



# Spill-Plumes

Praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der  
Rauchausbreitung in Atrien und atrienähnlichen Gebäuden,  
Einflussgrößen und numerische Validierung

**Diplomarbeit**  
(Master's Thesis)

zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur  
an der Fakultät für Bauingenieurwesen  
der TU Wien

eingereicht von

**Florian Breitler**

am Institut für Hochbau und Technologie  
Forschungsbereich für  
Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit

unter der Leitung von

o.Univ.Prof. DI Dr.techn. Dr.h.c. Ulrich Schneider

Betreuerin: DI Monika Oswald

Wien, im Mai 2009

## Verfasser

Florian Breitler

Geburtsdatum: 20.10.1981  
Adresse: Dreikreuzstraße 25  
3163 Rohrbach  
Studienkennzahl: E 610  
Matrikelnummer: 0125644

## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Florian Breitler, die vorliegende Diplomarbeit zum Thema "*Praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchausbreitung in Atrien und atrienähnlichen Gebäuden, Einflussgrößen und numerische Validierung*" selbstständig und ausschließlich unter Verwendung der im Literaturverzeichnis angeführten Quellen verfasst zu haben.

Rohrbach, am 27.05.2009

Unterschrift:

## Kurzfassung

Atrien oder atrienähnliche Bereiche sind zentraler Bestandteil moderner Büro- und Geschäftsbauten. Da durch solche, über mehrere Geschosse reichenden Räume, der Grundgedanke der geschosswisen, baulichen Brand- bzw. Rauchabschnittsbildung verletzt wird, stellen diese Bereiche im Brandfall ein Sicherheitsrisiko dar, das es durch entsprechende Maßnahmen zu kompensieren gilt. Methoden zur Rauchkontrolle spielen dabei eine zentrale Rolle, müssen doch durch Atrien führende Fluchtwege in allen Geschossen für Personen im Gefahrenfall zur Selbstrettung benutzbar, also rauchfrei bleiben.

Ausgehend von den Gefahren des Brandrauches auf Gebäudeinsassen und Bauwerk beschreibt diese Arbeit vorhandene Möglichkeiten, die Rauchausbreitung in Atrien zu verhindern bzw. entstandenen Brandrauch aus ihnen abzuführen.

Entstehungsweise, Erscheinungsformen und die bestimmenden Einflussgrößen des Balcony-Spill-Plumes (Überlaufplume) sind im Weiteren angeführt. Zahlreiche Methoden zur Berechnung der entstehenden Rauchgasmengen entwickelte man bislang, um Entrauchungsmaßnahmen für derartige Gebäude dimensionieren zu können. Ein Vergleich der Herleitung und Anwendungsgrenzen dieser Berechnungsansätze ist Bestandteil dieser Arbeit.

Ergebnisse aus CFD-Simulationen mit dem Programm Fire Dynamics Simulator wurden mit den vorhandenen BSP-Formeln nachgerechnet. Dies hatte zum Ziel, die Anwendungsmöglichkeit der bestehenden Formeln bei Szenarien ohne Rauchschürzen unter dem Balkon zu untersuchen bzw. für diesen Bemessungsfall etwaige Modifikationen in den Berechnungsmethoden vorzuschlagen. Diese Modifikationen betreffen die Bestimmung der Strömungsbreite an der Spill-Kante und die Quantifizierung der Einmischung von Umgebungsluft in die Rauchgasströmung, die aus einer Brandraumöffnung austritt und dann bis zum Erreichen der Kante von einer horizontalen Platte am Aufsteigen gehindert wird.

## Abstract

Over the last decades, large undivided volume buildings such as atrium buildings and covered shopping malls have become increasingly popular. In the event of a fire atrium buildings violate the fundamental approach in terms of horizontal compartmentation and vertical separation. Smoke and hot gases flowing from a communicating space can move unimpededly into an atrium space, possibly affecting other areas of the building.

In addition to limiting the spread of smoke the use of smoke control systems in atrium buildings is important to provide safe escape.

Based on the hazards of smoke and hot toxic gases for people and property the possible objectives for smoke control systems in atrium buildings are discussed in this thesis.

Characteristics, appearance and the governing influences of the balcony spill plume are described.

Currently, there are several calculation methods available to designers of smoke and heat exhaust ventilation systems for atrium buildings involving the balcony spill plume.

A literature review was conducted in order to get an overview how these correlations had been derived and to discuss uncertainties and limitations in the methods available.

CFD modeling with the code FDS (Fire Dynamics Simulator) has been used to analyze the accuracy of these correlations in case of missing channeling-screens under the balcony and to predict the entrainment of air flowing out from a compartment opening to a higher projecting balcony, and hence, the mass flow rate of gases at the spill edge.

## Danksagung

Für die Vergabe und Betreuung dieser Diplomarbeit gilt mein Dank dem Forschungszentrum für Brandschutz und Brandsicherheit der TU Wien, allen voran Herrn Professor DI Dr.techn. Dr.h.c. Ulrich Schneider.

Im Zuge zahlreicher spannender fachlicher Diskussionen trug Herr Ing. Christian Lebeda durch seine Anregungen und sein fachliches Wissen einen wesentlichen Anteil zum Gelingen der vorliegenden Arbeit bei.

Dem Team von FSE Ruhrhofer&Schweitzer GmbH. danke ich für die Benutzung der Fachbibliothek und dafür, dass sie mir die Möglichkeit boten, erste berufliche Erfahrungen im Fachbereich Brandschutz zu sammeln.

Während des gesamten Studiums und bei der Erarbeitung dieser Diplomarbeit haben mich viele Personen begleitet und unterstützt.

Meine Studienkollegen und Freunde Thomas Bader, Manfred Weber, Roman Höbinger, Thomas Weinlinger und Anton Schweighofer im Laufe vieler gemeinsam aufgewendeter Stunden der Prüfungsvorbereitung und beim Bearbeiten von diversen Studienprojekten.

Meine Partnerin Pamela Nolz und alle Mitglieder meiner Familie durch die von ihnen erhaltenen Hilfestellungen und ihr aufgebrachtes Verständnis.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern, denen ich diese Arbeit widmen möchte. Sie ermöglichten mir diesen Ausbildungsweg. Ihre liebevolle Unterstützung und die vielen Gespräche und motivierenden Worte waren und sind für mich von unschätzbarem Wert.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Gebäudesicherheit durch Rauchkontrolle</b>	<b>11</b>
2.1	Gefährlichkeit und Wirkungen des Brandrauches . . . . .	11
2.1.1	Physikalische Wirkungen . . . . .	11
2.1.2	Chemische Wirkungen . . . . .	12
2.2	Rauchkontrolle in Gebäuden zur Begrenzung der schädigenden Auswirkungen . . . . .	12
2.2.1	Schutzziele und Methoden der Rauchkontrolle . . . . .	12
2.2.2	Bauliche Maßnahmen . . . . .	14
2.2.3	Prinzip der Rauchableitung . . . . .	15
2.2.4	Prinzip der Rauchverdünnung . . . . .	17
2.2.5	Prinzip der Rauchverdrängung . . . . .	17
2.3	Dimensionierung der Rauchableitung . . . . .	20
2.3.1	Ingenieurmethoden zur Bemessung von Entrauchungssystemen .	20
2.3.2	Der Rauchgasplume als Grundlage der Rauchbildung - Plume Formeln . . . . .	25
2.3.3	Brandszenarien für die Rauchableitung . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Rauchkontrolle in Atriumbauten</b>	<b>30</b>
3.1	Das Wesen von Atrien und Malls . . . . .	30
3.1.1	Besonderheiten von Atrien und Malls im Brandfall . . . . .	30
3.2	Atriumtypen aus der Sicht des Brandschutzes . . . . .	31
3.2.1	Bauliche Unterscheidung . . . . .	31
3.2.2	Unterscheidung aufgrund der Nutzung . . . . .	33
3.3	Verrauchung von Atrien und Malls . . . . .	33
3.3.1	Der Balcony-Spill-Plume . . . . .	33
3.3.2	Lage der Neutralen Ebene . . . . .	36
3.4	Rauchkontrolle in Atriumbauten - Möglichkeiten und Anforderungen . .	38

<b>4</b>	<b>Berechnungsmethoden für Spill-Plumes</b>	<b>42</b>
4.1	Entstehung von BSP-Berechnungsmethoden . . . . .	42
4.2	Die BRE-Methode . . . . .	42
4.2.1	Eigenschaften der zuströmenden Rauchgasmasse $M_b$ . . . . .	43
4.2.2	Einmischung an der Kante . . . . .	46
4.2.3	Einmischung in den aufsteigenden Plume nach der Kante . . . .	46
4.2.4	Korrektur der Rauchsichtdicke . . . . .	47
4.3	Vereinfachte Spill-Plume-Formeln . . . . .	49
4.3.1	Form, Aufbau und Herleitung von BSP-Formeln . . . . .	49
4.3.2	Methode nach Law (1986) . . . . .	51
4.3.3	Methode nach Thomas (1987) . . . . .	52
4.3.4	Methode nach Law (1995) . . . . .	54
4.3.5	Methode laut NFPA 92 B . . . . .	54
4.3.6	Methode nach Poreh et al. . . . .	55
4.3.7	Methode nach Thomas et al. (1998) . . . . .	57
4.3.8	Methode nach Harrison (2004) . . . . .	58
4.4	Vergleich der vorhandenen Berechnungsmethoden und ihrer Anwendungsbereiche . . . . .	61
4.4.1	Vergleich der einzelnen Formelansätze . . . . .	61
4.4.2	Vergleichsrechnungen . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Eingangsgrößen für BSP-Formeln</b>	<b>66</b>
5.1	Wärmeleistung $Q$ an der umströmten Kante . . . . .	66
5.2	Umströmte Kantenbreite $W$ . . . . .	67
5.2.1	Durch Rauchschrägen festgelegte Strömungsbreite . . . . .	67
5.2.2	Annahme von $W$ bei fehlenden Rauchschrägen . . . . .	69
5.2.2.1	Einfache Abschätzformel . . . . .	69
5.2.2.2	Neuer Berechnungsansatz von Schneider . . . . .	70
5.2.3	Einmischung an den freien Seiten - Beeinflussung durch $W$ . . .	71
5.3	Rauchgasmassenzustrom an der Kante . . . . .	73
5.3.1	Einfluss der Größe $M_b$ in den Berechnungsmethoden . . . . .	73
5.3.2	Quantifizierung von $M_b$ . . . . .	74
5.3.3	Schichtdicke unter der Balkonplatte $d_b$ . . . . .	81
5.3.4	Einfluss eines Sturzes an der Spill-Kante . . . . .	82
5.4	Lage und Abmessungen des Rauchreservoirs . . . . .	82

<b>6</b>	<b>CFD Simulation</b>	<b>84</b>
6.1	Fragestellung und Zielsetzung . . . . .	84
6.1.1	Umströmte Kantenbreite . . . . .	84
6.1.2	Rauchgasmassenstrom an der Kante . . . . .	84
6.1.3	Parametervariation . . . . .	84
6.2	Fire Dynamics Simulator (FDS) . . . . .	85
6.2.1	Kurzbeschreibung . . . . .	85
6.2.2	Eignung für diese Aufgabenstellung . . . . .	85
6.3	Festlegung der Simulationsszenarien . . . . .	86
6.3.1	Geometrische Randbedingungen . . . . .	86
6.3.2	Gitterdefinition und Diskretisierung . . . . .	88
6.3.3	Brandquelle und Brandleistung . . . . .	88
6.3.4	Sonstige Randbedingungen . . . . .	91
6.3.5	Simulationsdatenaufzeichnung und deren Auswertung . . . . .	91
<b>7</b>	<b>Simulationsergebnisse, Vergleichsrechnungen</b>	<b>93</b>
7.1	Simulationsergebnisse - Qualitätskontrolle . . . . .	93
7.1.1	Überprüfung des Szenariums . . . . .	93
7.1.2	Plausibilitätskontrolle . . . . .	96
7.2	Verteilung der Massenströme an der Kante . . . . .	96
7.2.1	Einfluss der Balkonbreite $b_b$ . . . . .	97
7.2.2	Einfluss der Öffnungsbreite $b_o$ . . . . .	100
7.2.3	Einfluss der Sturzhöhe $h_{Sturz}$ . . . . .	101
7.2.4	Einfluss der Brandleistung $Q$ . . . . .	104
7.3	Umströmte Kantenbreite $W$ . . . . .	106
7.3.1	Festlegung der umströmten Kantenbreite . . . . .	106
7.3.2	Vergleich Simulationsergebnisse und BSP-Berechnungen . . . . .	110
7.3.3	Vergleich der Ergebnisse für die unterschiedlich ermittelten Kantenbreiten . . . . .	111
7.4	Einmischung in den Rauchgasmassenstrom . . . . .	116
7.4.1	Einfluss der Balkonbreite $b_b$ . . . . .	116
7.4.2	Einfluss der Öffnungsbreite $b_o$ . . . . .	119
7.4.3	Einfluss der Sturzhöhe $h_{Sturz}$ . . . . .	121
7.4.4	Einfluss der Brandleistung $Q$ . . . . .	124

7.5	Rauchgasmassenzustrom $M_b$ - Vergleichsrechnungen für die untersuchten Szenarien . . . . .	126
7.5.1	Einfache Näherungsformel . . . . .	126
7.5.2	Berechnungsmethode nach Morgan . . . . .	127
7.5.3	Berechnungsmethode von Thomas nach Morgan . . . . .	128
7.5.4	Annahme nach Law . . . . .	128
7.5.5	Berechnung laut BSI . . . . .	129
7.5.6	Berechnungsmethode nach Harrison . . . . .	130
7.5.7	Zusammenfassung und Wahl der Berechnungsmethode . . . . .	131
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>133</b>
8.1	Schlussfolgerungen . . . . .	133
8.2	Weiterführende Untersuchungen . . . . .	134
<b>A</b>	<b>Simulationsszenarien - Zusammenstellung</b>	<b>139</b>
<b>B</b>	<b>Beispiel eines FDS-Datensatzes</b>	<b>145</b>
<b>C</b>	<b>Ermittlung der umströmten Kantenbreite <math>W_s</math></b>	<b>153</b>
<b>D</b>	<b>Simulationsdaten - Vergleichsrechnungen <math>W</math></b>	<b>165</b>
<b>E</b>	<b>Simulationsdaten - Vergleichsrechnungen <math>M_b</math></b>	<b>220</b>

# Kapitel 1

## Einleitung und Zielsetzung

Zu Beginn dieser Arbeit stehen grundsätzliche Betrachtungen zu den Gefahren, die im Brandfall von den entstehenden Brandprodukten auf die Gebäudenutzer und die -Konstruktion ausgehen. Prinzipien und Methoden werden aufgezeigt, um diese schädlichen Auswirkungen des Brandrauches zu vermeiden bzw. zu reduzieren und die Dimensionierung dieser Maßnahmen zur Rauchkontrolle sind beschrieben.

Das Wesen von Atrien und Malls und warum an diese Art von Gebäuden besondere brandschutztechnische Anforderungen gestellt werden müssen ist anschließend erörtert.

Der Balcony-Spill-Plume als spezielle Plumeform, welche sich an auskragenden Bauteilen bilden kann und weitere Besonderheiten der Rauchausbreitung bei derartigen Gebäudeformen werden erläutert und diskutiert. Darauf aufbauend soll gezeigt werden, welche Maßnahmen zur Rauchkontrolle man in Atrien und atrienähnlichen Räumen sinnvoll einsetzen kann.

Die beiden darauffolgenden Kapitel haben zum Ziel, die in der Literatur angeführten Berechnungsmöglichkeiten der Lufteinmischung in Balcony-Spill-Plumes mit den wesentlichen Annahmen und Anwendungseinschränkungen wiederzugeben und zu vergleichen. Weiters werden der Einfluss der einzelnen Eingangsgrößen für diese Formeln diskutiert und Möglichkeiten zur Ermittlung dieser Größen aufgezeigt.

Auf Basis dieser Grundlagen führte der Autor CFD-Simulationen durch, welche sich aus der Literaturrecherche ergebende Fragestellungen zu klären versuchten. Dabei lag der Fokus besonders auf den Eigenschaften des Rauchgasmassenstroms vor der eigentlichen Spill-Kante, der bei allen bisher vorhandenen Berechnungsmethoden in seiner seitlichen Ausbreitung durch Rauchschürzen zu begrenzen ist. Auf diese "kanalisierenden" Rauchschürzen verzichtete man bei dieser Untersuchungsreihe.

Die Simulationsdaten und Vergleichsrechnungen der BSP-Formeln mit Berechnungsansätzen für den an der Kante ankommenden Rauchgasmassenstrom sollten Aufschlüsse über die seitliche Ausbreitung der Rauchgasströmung an der Kante und das Einmischverhalten der Strömung unter der Balkonplatte in Abhängigkeit von der Brandraumöffnungsgeometrie geben.

# Kapitel 2

## Gebäudesicherheit durch Rauchkontrolle

### 2.1 Gefährlichkeit und Wirkungen des Brandrauches

Eine Verbrennung ist ein chemisch-physikalischer Prozess, im Zuge dessen sich der Brennstoff mit dem Sauerstoff aus der Luft unter Freisetzung von Energie (Wärme) in die Verbrennungsprodukte chemisch umsetzt. Neben den meist unschädlichen festen Verbrennungsprodukten (anorganische Bestandteile bzw. nicht verbrannter Kohlenstoff) entstehen auch gasförmige - der Brandrauch [31].

Von ihm geht bei einem überwiegenden Teil aller Brände die größte Gefahr für Personen, Sachwerte und die Gebäudekonstruktion aus. Dieses hohe Gefährdungspotential des Brandrauches ist eine Folge seiner physikalischen Eigenschaften und seiner chemischen Zusammensetzung, welche unterschiedliche Wirkungen hervorrufen.

#### 2.1.1 Physikalische Wirkungen

**Brandausbreitung:** Bei einem sich entwickelnden Brand in einem Raum mit ausreichender Verbrennungsluftzufuhr heizt sich die Umgebung rasch auf und die vorhandenen brennbaren Stoffe werden thermisch aufbereitet. Brennbar, gasförmige Verbrennungsprodukte entstehen, welche sich in der Rauchschiicht ansammeln. Können Rauch und Wärme nicht entweichen oder abgeführt werden, so kommt es zur raschen Brandausbreitung [33]. Dies kann weiters zum "Flash-Over" (schlagartige Brandausbreitung infolge Bildung brennbarer Pyrolysegase-Sauerstoff-Gemische) führen.

**Rauchausbreitung:** Aufgrund seiner Wärmeenergie breitet sich der Brandrauch aus und kann so auch in unmittelbar vom Brand nicht betroffenen Bereichen zur Gefährdung von Personen und zu Schäden führen.

**Wärmeübertragung:** Durch Wärmeübergang und Wärmestrahlung gibt der Rauch die mittransportierte Energie an seine Umgebung ab. Neben der weiteren Brand-

ausbreitung kann das zu Verbrennungen bei Personen und zur Herabsetzung der Festigkeit von Bauteilen der Gebäudekonstruktion führen.

**Sichttrübung:** In dem, bei einem Schadenfeuer entstehenden Rauch, befinden sich Schwebstoffe, welche Licht absorbieren. Das bedeutet meist eine erhebliche Sichtbehinderung sowohl für noch flüchtende Gebäudeinsassen als auch für die Rettungsmannschaften. Weiters wird die Lokalisierung eines Brandherdes erschwert und damit eine gezielte Löschaktion erheblich beeinträchtigt oder gar unmöglich gemacht.

### 2.1.2 Chemische Wirkungen

**Toxische Wirkung:** Je nach Brandgut und Vollständigkeit der Verbrennung ist die chemische Zusammensetzung des Brandrauches eine andere. Die erstickende oder aber auch toxische Wirkung vieler seiner Bestandteile auf den Menschen ist erheblich. Bei jeder Verbrennung (auch ohne sichtbarer Rauchentwicklung) entstehen Kohlenmonoxid und Kohlendioxid. Beides sind Gase, die ab einer gewissen Konzentration für den Menschen tödlich sein können. Untersuchungen von Brandtoten haben gezeigt, dass ca. zwei Drittel aller Brandopfer einer Kohlenmonoxidvergiftung erliegen. Weitere Brandprodukte sind neben Wasserdampf auch Blausäure, Salzsäure, Nitrose Gase, Phosgen oder andere Toxide [2, 7].

**Korrosive Wirkung:** Besonders bei der Verbrennung von Kunststoffen werden wasserlösliche, gasförmige Säurebildner freigesetzt (z.B. Chlorwasserstoff, Schwefeloxide), welche korrosiv auf die Gebäudekonstruktion und -Ausstattung einwirken.

## 2.2 Rauchkontrolle in Gebäuden zur Begrenzung der schädigenden Auswirkungen

### 2.2.1 Schutzziele und Methoden der Rauchkontrolle

Die physikalischen und chemischen Wirkungen der Verbrennungsprodukte machen deutlich welches Gefahrenpotential im Brandfall vom entstehenden Brandrauch ausgeht.

Breiten sich Rauch und Wärme in einem Gebäude ungehindert aus, so besteht Lebensgefahr für alle darin befindlichen Personen. Gelagerte Sachwerte erleiden Schaden und mit umfangreichen Sanierungsarbeiten an der Bausubstanz ist in weiterer Folge zu rechnen. Weiters wird den eingesetzten Hilfsmannschaften die Personenrettung und Brandbekämpfung erheblich erschwert bzw. sind diese Maßnahmen aufgrund einer Gefährdung der Einsatzkräfte nicht (mehr) möglich.

Können der Rauch und dessen schädigenden Auswirkungen auf die Brandausbruchsstelle und dessen unmittelbare Umgebung eingeschränkt werden, bzw. kann die Rauchausbreitung auf vom Brand nicht betroffene Bereiche unterbunden werden, so verhindert dies eine Gefährdung von Personen, vermeidet Folgekosten durch Sanierung oder

Kriterium	Grenzwert
CO - Konzentration	200 ppm
CO <sub>2</sub> - Konzentration	2 Vol. - %
Wärmestrahlung	2,0 kW/m <sup>2</sup>
Gastemperatur	50 <sup>0</sup> C
Sichtweite	10 – 20 m

Tabelle 2.1: Definierte Schutzziele für die Rauchkontrolle bei einer mittleren Aufenthaltsdauer von 15 min. (Rettungsfrist) [4]

Totalausfall und minimiert die Unfallgefahr für die Helfer. Für diese "Kontrolle der Rauchausbreitung" ergeben sich daraus folgende mögliche Schutzziele [33]:

### Personenschutz

Fluchtwege dürfen innerhalb einer vorgesehenen Evakuierungszeit nicht verrauchen. In den heranzuziehenden Regelwerken wird die einzuhaltende Höhe einer raucharmen bzw. rauchfreien Schicht über dem Boden festgelegt. In der TRVB S 125 [33] ist diese Höhe für öffentliche Gebäude beispielsweise mit 3,0 m für Industriehallen und mit 2,5 m für Großraumbüros angesetzt.

Die sichere Benutzung der Fluchtwege ist für Personen nur möglich, wenn diese vorhandene Fluchtleitsysteme auch klar erkennen können, weshalb eine ausreichende Sichtweite gewährleistet sein muss.

Im Verlauf von Fluchtwegen sind außerdem Grenzwerte für Temperatur und Rauchgaskonzentrationen einzuhalten. In [4] sind die zu erreichenden Schutzziele für eine mittlere Aufenthaltsdauer (Rettungsfrist ca. 15 Minuten nach Brandausbruch) quantitativ laut Tab. 2.1 konkretisiert.

### Schutz bzw. Unterstützung der Rettungskräfte

Eine wirkungsvolle Maßnahme zur Rauchkontrolle ermöglicht der Feuerwehr einen effizienten Einsatz, indem sie die Rettung von Personen und das Vordringen zum Brandherd durch klarere Sicht und verminderte Hitze unterstützt.

Weiters sollte die Gefahr auftretender Raucheffekte (Rauchdurchzündung, Rauchexplosion) während der Rettungs- und Lösch Tätigkeit niedrig bleiben. Aufgrund verminderter Brandausbreitung und Begrenzung der auftretenden Temperaturen kann die Standsicherheit zumindest für die Zeit der manuellen Brandbekämpfung gewährleistet werden.

Für dieses Kriterium gelten ähnliche Voraussetzungen wie für den Personenschutz, wobei höhere Temperaturen und Rauchgaskonzentrationen toleriert werden. Dies ist unter anderem durch die getragene Schutzausrüstung vertretbar [7].

Die in [33] geforderte Höhe der raucharmen Schicht kann in diesem Fall unter bestimmten Voraussetzungen (z.B. Vorhandensein einer automatischen Brandmeldeanlage) bis auf 2,0 m reduziert werden.

## Sachwertschutz

Die schädigenden Auswirkungen der Verbrennungsprodukte auf das Bauwerk selbst und auf die darin befindlichen Güter sollen beschränkt bleiben. Durch Reduktion der auftretenden Temperaturen, Begrenzung der Ausbreitung und Abführung des schädlichen Brandrauches bzw. Verkürzung der Einwirkzeiten kann Rauchkontrolle teure Reinigungs-, Sanierungs- oder Entsorgungskosten ersparen. Bei Brandschutzkonzepten für denkmalgeschützte Gebäude und Bauwerke zur Aufbewahrung unwiederbringlicher Kulturgüter kann dieses Schutzziel von hoher Bedeutung sein. Auch bei Betriebsgebäuden ist ein schadensfeuerbedingter Teil- oder Totalausfall oft wirtschaftlich aber auch im Sinne der Arbeitsplatzsicherung nicht vertretbar.

## Festlegung des Schutzzieles und zur Verfügung stehende Maßnahmen

Je nach Art, Bedeutung, Größe und Nutzung eines Bauwerkes werden im Rahmen eines Brandschutzkonzeptes bzw. durch Gesetze und Regelwerke die zu erreichenden Schutzziele definiert. Daraus ergeben sich die Vorgaben für die Dimensionierung der Maßnahmen zur Rauchkontrolle.

Diese Maßnahmen können folgende Methoden umfassen:

- **Bauliche Maßnahmen** zum Schutz angrenzender Bereiche vor Brandrauch
- **Rauchableitung** zur Abfuhr der Brandprodukte aus den betroffenen Bereichen
- **Rauchverdünnung** durch Zufuhr von Frischluft zur Abkühlung und Senkung der Rauchgaskonzentration
- **Rauchverdrängung** durch Erzeugung von Überdruck, um das Eindringen von Rauch in schutzbedürftige Bereiche zu verhindern

### 2.2.2 Bauliche Maßnahmen

Die Ausbreitung von Brandprodukten kann durch bauliche Maßnahmen eingeschränkt werden. Beispielsweise fordern die Bauordnungen die Abgrenzung der Flucht- und Rettungswege durch Bauteile mit definiertem Brandwiderstand und mit rauchdichten, selbstschließenden Türen von sonstigen Bereichen.

Weiters können Rauchabschnitte (Rauchreservoirs) unter der Decke durch Rauchschürzen gebildet werden, die bis zu einer gewissen Höhe unter die prognostizierte Rauchsicht herabreichen. Diese Rauchschürzen können fix installiert oder aber auch flexibel sein. In diesem Fall sind sie beim Brand durch Rauchmelder bzw. Brandfallsteuerungen zu betätigen. Die verwendeten Materialien dieser Rauchschürzen und Rauchschutzvorhänge müssen auf Rauch- und Hitzeresistenz nachweislich geprüft sein.

Jegliche Brand- bzw. Rauchabschnittsbildung ist nur dann sinnvoll, wenn sie auch konsequent umgesetzt wird. Alle eventuell hergestellten Öffnungen oder Aussparungen in trennenden Bauteilen zur Durchführung von Leitungen und Installationen müssen also entsprechend den erforderlichen Leistungskriterien wieder verschlossen bzw. geschützt sein.

### 2.2.3 Prinzip der Rauchableitung

Durch ausreichend dimensionierten Rauch- und Wärmeabzug (RWA) kann erreicht werden, dass im Brandfall die Schicht von Rauch und heißen Brandgasen (Rauchschicht) ein bestimmtes Ausmaß nicht überschreitet. Somit bleiben die Fluchtwege passierbar, die Brandausbreitung wird erschwert und die Brandbekämpfung erleichtert. Außerdem können Brandfolgeschäden durch thermische Zersetzungsprodukte klein gehalten werden [33].

Voraussetzung für diese Wirkung einer RWA ist, dass sie in dem vom Brand betroffenen Rauchabschnitt frühzeitig in Funktion tritt und dass ausreichend Zuluft vorhanden ist. Eine richtig dimensionierte RWA gewährleistet, dass eine rauchfreie Schicht bis zum Erreichen einer, im Zuge der Projektierung festgelegten Brandgröße nicht unterschritten wird.

Zur Sicherung von Fluchtwegen in öffentlichen Gebäuden (wie Malls von Einkaufszentren, Hotels, Ausstellungshallen etc.) soll die Höhe der rauchfreien Schicht lt. [33] grundsätzlich nicht kleiner als  $3,0\text{ m}$ , und in sonstigen Gebäuden (z.B. Fabrikhallen, Lagerhallen, Großraumbüros) nicht kleiner als  $2,5\text{ m}$  sein. In Ausnahmefällen ist aber eine Reduktion bis zu einer Höhe von  $2,0\text{ m}$  möglich, sofern dadurch keine Personengefährdung zu erwarten ist.

Lagerungen sollten grundsätzlich einen vertikalen Abstand von  $0,5\text{ m}$  zur angenommenen Unterkante der Rauchschicht haben. Bei Lagerungen, welche in die Rauchschicht ragen ist deren Temperatur unter  $150^{\circ}\text{C}$  zu halten, um eine Entzündung zu vermeiden. Die Rauchschichttemperatur sollte außerdem  $550$  bis  $600^{\circ}\text{C}$  nicht übersteigen, da ansonsten trotz Abfuhr der heißen Brandgase die Gefahr eines "Flash-Overs" besteht.

Bezüglich der Funktionsweise von RWAs unterscheidet man zwischen zwei Typen:

#### Natürliche Rauch- und Wärmeabzugsanlagen

Natürliche RWAs bzw. Brandrauch-Entlüftungen (BRE) funktionieren durch den Auftrieb des heißen Brandrauches, welcher den Abzug von Rauch und Wärme durch natürliche Entlüftung des Brandraumes über Öffnungen im oberen Teil des Gebäudes (üblicherweise über Abluftöffnungen im Dach) bewirkt. Als "Lüfter" werden Geräte einer natürlichen RWA bezeichnet, welche bei Aktivierung im Brandfall die vorgesehene Öffnung im Dach freigeben, damit Rauch und Wärme durch Auftriebskräfte ins Freie abziehen können [siehe Abb. 2.1].



Abbildung 2.1: Lüfter von Brandrauch-Entlüftungs-Anlagen (BRE) auf Gebäudedächern

Bei BRE-Anlagen steigt der abgeführte Volumenstrom bei größerer Brandleistung aufgrund steigender Rauchgastemperatur an. Zur Anwendung kommen derartige Anlagen üblicherweise bei einfachen Gebäudegeometrien, hohen Räumen, hohen Brandlasten und ab einer Rauchabschnittsgröße von ca.  $800 \text{ m}^2$  [33].

### Mechanische RWAs

Im Gegensatz zu BREs arbeiten diese Anlagen mit Ventilatoren, welche das erforderliche Rauchvolumen pro Zeiteinheit absaugen [siehe Abb. 2.2]. Sie werden deshalb auch als Brandrauch-Absaug-Anlagen (BRA) bezeichnet [33].



Abbildung 2.2: Lüfter von Brandrauch-Absaug-Anlagen (BRA) auf Gebäuden

Da ihre Leistung nicht von der beim Brand entstehenden Thermik abhängt, sind sie schon bei Entstehungsbränden, Schwelbränden und hohen Räumen mit geringer Brandbelastung sofort einsatzbereit. Besonders in der Anfangsphase eines Brandes kann dadurch noch eine sichere Flucht für Personen ermöglicht werden. Mit steigender Tem-

peratur sinkt danach jedoch der, durch die Ventilatoren geförderte Massenstrom bei gleichem Volumenstrom.

### 2.2.4 Prinzip der Rauchverdünnung

Rauchverdünnungssysteme bringen Frischluft in zu schützenden Bereiche ein, wodurch dort eingedrungener Brandrauch so stark verdünnt wird, dass seine toxische Wirkung nicht gesundheitsschädigend ist (zumindest bei einer kurzen Verweildauer), ausreichende Sichtverhältnisse herrschen und die Temperaturen erträglich bleiben [33].

In der Anfangsphase eines Brandes begrenzen Rauchverdünnungssysteme die Auswirkungen des Brandrauches, um eine Flucht zu gewährleisten (verringerte Schadstoffkonzentration, geringere Temperatur und ausreichende Sicht). Auch bei zunehmender Brandentwicklung bewirken derartige Anlagen eine verminderte Schadstoffkonzentration, sodass auch bei kurzzeitigem Aufenthalt (zulässige Fluchtweglängen) im Gefahrenbereich die Aufnahme einer bedrohlichen Dosis an Rauchgasen ausgeschlossen werden kann. Die verminderten Temperaturen entlasten die Gebäudekonstruktion. Mit weiterem Brandfortschritt sind trotz korrekt arbeitender Rauchverdünnungsanlage erhöhte Schadstoffkonzentrationen zu erwarten. Durch bessere Sicht und weniger Hitze werden Rettungs- bzw. Löschmaßnahmen aber weiterhin unterstützt.

Der wesentliche Unterschied zu einer RWA ist, dass bei dieser Methode keine rauchfreie Schicht geschaffen wird. Eine gemeinsame Verwendung mit Rauchschürzen ist deshalb nicht sinnvoll. Eine Rauchausbreitung unterhalb der Rauchschürze kann man durch Rauchverdünnung nicht verhindern. Der gesamte Rauminhalt wird mit Rauch beaufschlagt.

Brandrauchabsauganlagen sind wie Anlagen zur herkömmlichen Gebäudelüftung auf einen bestimmten Luftwechsel auszulegen. In Österreich ist für Anlagen gemäß ÖNORM H 6029 [29] ein mindestens 12-facher stündlicher Luftwechsel erforderlich (im Verlauf von Fluchtwegen ein 30-facher stündlicher Luftwechsel). Bei dieser Anlagenbemessung ist es in der Regel nicht möglich, die Brandgase eines vollentwickelten Brandes gänzlich abzuführen.

### 2.2.5 Prinzip der Rauchverdrängung

Rauch breitet sich durch die beim Brand entstehen Druckdifferenzen im Gebäude über vorhandene Öffnungen und Leckagen aus. Druckbelüftungsanlagen (DBA) erzeugen eine Luftströmung, welche den sich ausbreitenden Rauchgasen entgegengerichtet ist und von diesen nicht überwunden werden kann. Dies geschieht durch Ventilatoren, die zwischen zu schützenden Räumen und anderen Bereichen ein Druckgefälle aufbauen. So kann die Bewegung des Rauches in Richtung schutzbedürftiger Bereiche durch das Verdrängen mittels künstlich erzeugtem Überdruck verhindert werden.

Voraussetzung für das Funktionieren dieses Prinzips ist ein baulich möglichst geschlossener Schutzbereich (z.B. Stiegenhaus, Aufzugsschacht, EDV-Raum). Darin muss laut den heranzuziehenden Richtlinien [30, 32] bei geschlossenen Türen ein Überdruck von

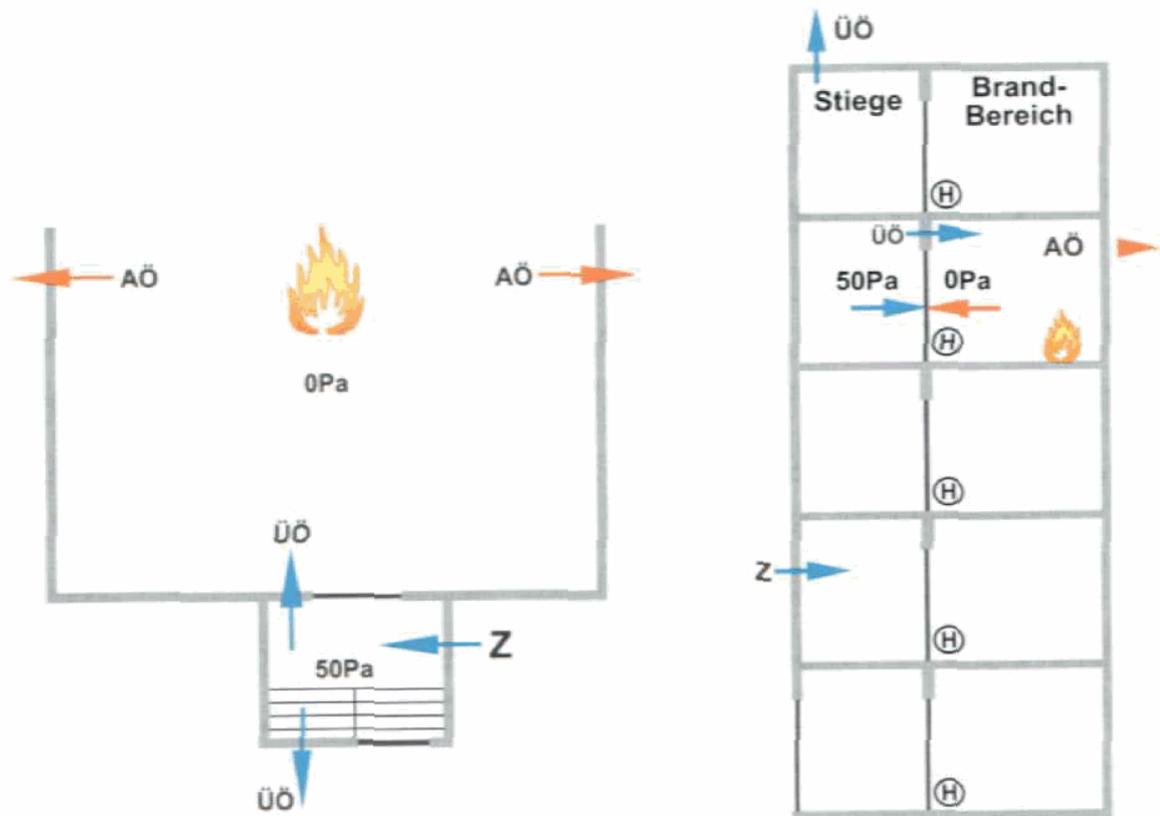


Abbildung 2.3: Prinzipielle Funktionsweise einer DBA zur Rauchfreihaltung eines Stieghauses [32] mit: AÖ...Abströmöffnung; ÜÖ...Überströmöffnung; Z...Zuluftöffnung

50 Pa zu einem angrenzenden nicht geschützten Bereich (z.B. angrenzende Büros, Verkaufsraum) erzeugbar sein (**Druckkriterium**). Um eine Flucht in den geschützten Bereich leicht zu ermöglichen ist die aufzubringende Türöffnungskraft auf 100 N beschränkt. Überströmöffnungen sind deshalb vorzusehen. Die Steuerung der DBA muss in der Lage sein, auf sich schnell ändernde Betriebszustände, wie sie durch das Öffnen und Schließen der Türen gegeben sind, zu reagieren. Die Funktionsweise ist in Abb. 2.3 dargestellt.

Des Weiteren muss zur Unterbindung einer Rauchausbreitung in diesen Bereich bei geöffneten Türen durch diese Öffnungen eine bestimmte Luftströmung sichergestellt sein (**Strömungskriterium**). Diese Luftströmung beträgt bei schwach entwickelten Bränden (Rauchgastemperaturen unter  $100^{\circ}\text{C}$ ) mindestens  $1\text{ m s}^{-1}$  und für fortgeschrittene Brände (Rauchgastemperaturen bis ca.  $250^{\circ}\text{C}$ ) eine Luftströmung von mindestens  $2\text{ m s}^{-1}$ .

Um diese Ströme durch geöffnete Türen in den Brandbereich aufrechterhalten zu können, muss die eingebrachte Luft aus diesem auch wieder austreten. Dies macht Abströmöffnungen bzw. -Anlagen erforderlich. Dadurch wird dort zwar keine rauchfreie Schicht erzeugt, jedoch erfolgt eine Rauchverdünnung und Wärmeabfuhr. Druckbelüftungsanlagen können mit Rauchverdünnungsanlagen gemäß [29] kombiniert werden.

Je nach dem Schutzziel sind folgende Anlagenkonzepte definiert:

Anlagenkonzept lt. TRVB S 112 [32]	verfolgte Schutzziele, Kriterien und Anwendungsfälle der DBA
<b>Aufenthaltskonzept</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zur Rauchfreihaltung von Fluchtwegen (Stiegenhäuser, Gänge)</li> <li>• relativ kurze Evakuierungsphase</li> <li>• schwach entwickelter Brand (Temp. unter <math>100^{\circ}C</math> im Bereich der Öffnungen, an denen der Rauch zurückgehalten werden soll)</li> <li>• nur relativ wenige Personen müssen über diesen Bereich evakuiert werden</li> <li>• Türen nur für kurze Zeit geöffnet (alle Türen sind selbstschließend, Druckkriterium)</li> </ul>
<b>Räumungsalarmkonzept</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zur Rauchfreihaltung von Fluchtwegen (Stiegenhäuser, Gänge)</li> <li>• relativ kurze Evakuierungsphase</li> <li>• schwach entwickelter Brand (Temp. unter <math>100^{\circ}C</math> im Bereich der Öffnungen, an denen der Rauch zurückgehalten werden soll)</li> <li>• Brandmeldeanlage mit anschließender innerbetrieblicher Alarmorganisation</li> <li>• organisierte, geschoßweise Räumung (detaillierter Evakuierungsplan und regelmäßige Räumungsübungen)</li> </ul>

Anlagenkonzept lt. TRVB S 112 [32]	verfolgte Schutzziele, Kriterien und Anwendungsfälle der DBA
<b>Brandbekämpfungskonzept</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zur Rauchfreihaltung von Feuerwehrrangriffswegen</li> <li>• nach Abschluss der Evakuierungsmaßnahmen</li> <li>• Rauchfreihaltung auch während der Brandbekämpfung (über längere Zeit offen stehende Türen, Strömungskriterium)</li> <li>• verminderte Rauchgastemperaturen durch wirksame Löschmaßnahmen der Feuerwehr oder von Sprinkleranlagen (200 bis 250°C an den Öffnungen zw. geschützten/nicht geschützten Bereichen)</li> <li>• z.B. in Hochhäusern, Einkaufszentren, Versammlungsstätten, großen Hotels</li> </ul>
<b>Raumschutzkonzept</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rauchfreihaltung von einzelnen schützenswerten Räumen</li> <li>• zu schützende Bereiche als eigene Brandabschnitte ausgeführt</li> <li>• Türen nur für kurze Zeit geöffnet</li> <li>• Sachgüterschutz bei EDV-Räumen, Archiven, Kommandozentralen oä.</li> </ul>

## 2.3 Dimensionierung der Rauchableitung

### 2.3.1 Ingenieurmethoden zur Bemessung von Entrauchungssystemen

#### Allgemeines

Bei der Auslegung von Maßnahmen zur Rauchkontrolle und zur Simulation der Rauchausbreitung müssen Brände modelliert werden. Diese Brandmodellierung kann auf mehrere Arten mit unterschiedlichem Aufwand und Genauigkeitsgrad erfolgen [siehe Abb. 2.4].

Bei allen Methoden müssen vorab die Randbedingungen definiert werden. Dazu werden die Geometrie des Gebäudes, die thermischen Eigenschaften der Umfassungsbau-



Abbildung 2.4: Vorgehensweise bei der Wahl der Methode zur Auslegung von Entrauchungsmaßnahmen [27]

teile und die zu erwartende Umgebungstemperatur möglichst genau erfasst. Die zu erreichenden Schutzziele sind vorgeschrieben oder werden im Zuge einer Risikoanalyse festgelegt.

Ausgehend vom Bemessungsbrand (Quellterm) und dessen Lage erfolgt die Quantifizierung der entstehenden Rauchgase und deren Temperatur. Die Entwicklung der Rauchsicht während des Brandverlaufes kann dann durch die gewählten Maßnahmen dermaßen beeinflusst werden, dass ihre Eigenschaften die einzuhaltenden Bedingungen erfüllen (z.B. maximale Temperatur, Höhe der rauchfreien Schicht).

Es ist immer zu prüfen, ob die erhaltenen Daten plausibel (Vergleich mit ähnlichen Projekten oder Vergleich der Daten untereinander) und anwendbar sind, oder ob außerdem noch zusätzliche Betrachtungen notwendig wären (z.B. Validierung einer Simulation mittels Versuch). Weiters müssen die Anwendungsgrenzen und -Einschränkungen des gewählten Modells bekannt sein. Diese sind in jedem Fall einzuhalten.

Verschiedene Brandmodelltypen stehen zur Projektierung der Rauchkontrolle zur Verfügung:

### **Handkalkulationen, empirisch belegte Ansätze, Plume-Formeln**

Für Entrauchungssysteme in geometrisch einfachen Räumen (z.B. Industrie- und Lagerhallen) können vereinfachte Bemessungsverfahren zur Anwendung kommen. Solche Vorgehensweisen sind auch Bestandteil von Regelwerken wie beispielsweise der TRVB

S 125 [33], DIN 18232 und DIN EN 12101. Eine Beschreibung einzelner Methoden und ihrer Herleitung findet sich unter *Pkt. 2.3.2.*

### Zonenmodelle

Zonenmodelle basieren auf vereinfachten Gleichungssystemen, abgeleitet aus den fundamentalen Gleichungen der Strömungs- und Wärmelehre oder sind empirisch begründet [4, 27]. Aufbauend auf Ein-Zonenmodellen (Vollbrandmodelle), in denen der Brandraum als ein mit Rauch gefülltes Volumen gleicher Temperatur angesehen wurde, entwickelte man Mehrzonen- bzw. Mehrraummodelle. Diese unterscheiden im Wesentlichen zwischen einer warmen Rauchgasschicht und einer darunterliegenden kälteren Luftschicht, die mehr oder weniger rauchfrei ist. Jede dieser Zonen besitzt eine einheitliche mittlere Temperatur und innerhalb dieser "Kontrollvolumen" werden die Gase als ruhend angesehen.

Zur Ermittlung der gesuchten physikalischen Brandgrößen für die einzelnen Volumen (Zonen) stehen der Energieerhaltungssatz und der Massenerhaltungssatz zur Verfügung, welche über die Dichte, die innere Energie und die Gaszustandsgleichung miteinander verbunden sind. Dies führt auf einen Satz gekoppelter Differentialgleichungen. So können die Temperatur und die Masse des Gasgemisches numerisch berechnet werden. Verluste an umgebende Bauteile und Austausch von Masse und Energie mit angrenzenden Zonen werden über zusätzliche Gleichungen (Submodelle) berücksichtigt.

Der Plume-Massenstrom als wesentliches Submodell bei der Dimensionierung von Entrauchungssystemen beschreibt die, der Rauchschrift zugeführte Masse und Energie, wobei im jeweiligen Zonenmodell verschiedene Plume-Modelle implementiert sein können.

Grundvoraussetzung für die Anwendung von Zonenmodellen ist die Ausbildung zweier stabiler Schichten, was bei sehr großen Räumen oder komplexen Gebäudegeometrien nicht immer gewährleistet sein muss.

### Feldmodelle

Feldmodelle, auch CFD-Modelle (Computational Fluid Dynamics) genannt, sind Computerprogramme, die Probleme der Strömungsmechanik numerisch lösen. Sie sind in der Lage, aufbauend auf den Gesetzen der Strömungs- und Thermodynamik (Erhaltung von Masse, Energie und Impuls), die Erhaltungsgleichungen näherungsweise zu lösen. Empirische Ansätze oder wesentliche Einschränkungen sind grundsätzlich nicht erforderlich. Somit können Phänomene der Brand- und Rauchausbreitung in Gebäuden aber genauso im Freien simuliert werden.

Wie bei Finite-Elemente-Programmen wird die zu untersuchende Geometrie durch ein dreidimensionales Rechengitter diskretisiert. Die Abmessung dieser einzelnen Kontrollvolumina richtet sich nach dem Zweck der Simulation und nach der erforderlichen Genauigkeit. Für jedes dieser Elemente löst das Programm dann die zugrundeliegenden Gleichungen.

## Physikalische Modelle

Versuche an Modellen in realer Größe oder in verkleinertem Maßstab können ebenfalls zur Überprüfung der Wirksamkeit oder Entwicklung von Entrauchungsmaßnahmen eingesetzt werden. In speziellen Fällen sind objektspezifische Abnahmeversuche erforderlich, um die korrekte Dimensionierung und Umsetzung der Rauchkontrollmaßnahmen vor Ort und vor Inbetriebnahme zu dokumentieren [siehe Abb. 2.5].



Abbildung 2.5: Rauchfreihaltung eines Atriums - Abnahmeversuch [26]

Bei der physikalischen Modellierung in Form von maßstäblichen Rauchversuchen sind spezielle Ähnlichkeitsbedingungen einzuhalten bzw. zu beachten. In [1] und [9] sind diesbezüglich die nachfolgenden Ableitungen angegeben, welche auf eine von Morgan 1976 erstmalig publizierte Arbeit zurückgehen.

Dieses Modell basiert auf einer modifizierten Froudezahl und vorausgesetzt seien turbulente Strömungen sowohl im Realversuch als auch im Modellmaßstab (Reynoldszahl  $Re > 4000$  für die wesentlichen Strömungen).

Diese Strömungen können gemäß dem Darcy'schen Gesetz nach Gl. 2.1 berechnet werden.  $\alpha$  bezeichnet darin die Proportionalität zwischen der Druckdifferenz  $\Delta P$  und dem Produkt aus dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit  $u$  und dem Dichteunterschied  $\Delta \rho$ .

$$\Delta P \propto \alpha \Delta \rho u^2 \quad (2.1)$$

Hierbei wird eine Vereinfachung getroffen, da der auftretende Exponent von  $u$  eigentlich eine Funktion der  $Re$ -Zahl wäre. Das Quadrat stellt jedoch eine ausreichend gute Näherung dar.

Zur Untersuchung von Rauchgasströmungen, welche ja ausschließlich vom Auftrieb angetrieben werden, hängt die auftretende Druckdifferenz nur von der Stärke dieses Auftriebes ab. Es folgt Gl. 2.2.

$$\Delta P \propto \Delta \rho g h = \rho_1 \frac{T_g - T_0}{T_g} g h \quad (2.2)$$

Daraus ergibt sich nachstehende Proportionalität:

$$\Delta P \propto \Delta T h \quad (2.3)$$

Gl. 2.1 und Gl. 2.3 lassen sich kombinieren und man erhält Gl. 2.4.  $L$  ist darin eine charakteristische Länge (Maßstabsfaktor).

$$\Delta T L \propto u^2 \quad (2.4)$$

Der Volumenstrom  $\dot{V}$  senkrecht durch eine Fläche  $A$  beträgt abhängig von seiner Geschwindigkeit  $u$ :

$$\dot{V} = u A \quad (2.5)$$

Als dimensionsbehaftete Größe folgt daraus:

$$\dot{V} = u L^2 \quad (2.6)$$

Damit lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit ausdrücken zu  $u = \frac{\dot{V}}{L^2}$ . Eingesetzt in Gl. 2.4 führt das auf folgenden Zusammenhang für den Volumenstrom:

$$\dot{V} \propto L^{5/2} \Delta T^{1/2} \quad (2.7)$$

Der konvektive Wärmefluss durch diese Strömung  $\dot{Q}$  ergibt sich aus dem Massenstrom pro Zeiteinheit  $M$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  und der Temperaturdifferenz zu:

$$\dot{Q} = M c_p (T_g - T_0) = \rho \dot{V} c_p \Delta T = \rho_1 c_p T_1 \dot{V} \frac{T_g - T_0}{T_g} \quad (2.8)$$

Aus Gl. 2.8 erhält man als dimensionsbehaftete Größe:

$$\dot{Q} \propto \Delta T M \propto \frac{\Delta T \dot{V}}{T_g} \quad (2.9)$$

Für die konvektive Brandleistung folgt durch Einsetzen von Gl. 2.7 in Gl. 2.9 folgender Ausdruck:

$$\dot{Q} \propto \frac{L^{5/2} \Delta T^{3/2}}{T} \quad (2.10)$$

Aus den angeführten Beziehungen für die Größen  $u$ ,  $M$ ,  $\dot{V}$  und  $\dot{Q}$  lassen sich durch Vereinfachen die gesuchten Modellgesetze für die erforderliche Skalierung ableiten, indem eine Variable konstant gehalten wird. Sinnvollerweise wählt man dazu die Temperatur  $T_g$  und hält diese über die Umgebungstemperatur  $T_0$  konstant. Damit erreicht man, dass im Realversuch und im Modellversuch an korrespondierenden Punkten der Strömung auch die selben Temperaturen auftreten. Diese Modellgesetze lauten also:

$$u \propto L^{1/2} \quad (2.11)$$

$$M \propto L^{5/2} \quad (2.12)$$

$$\dot{V} \propto L^{5/2} \quad (2.13)$$

$$\dot{Q} \propto L^{5/2} \quad (2.14)$$

Der Zeitmaßstab  $\omega$  errechnet sich daraus mit Gl. 2.15.

$$\omega \propto \frac{L}{u} \propto L^{1/2} \quad (2.15)$$

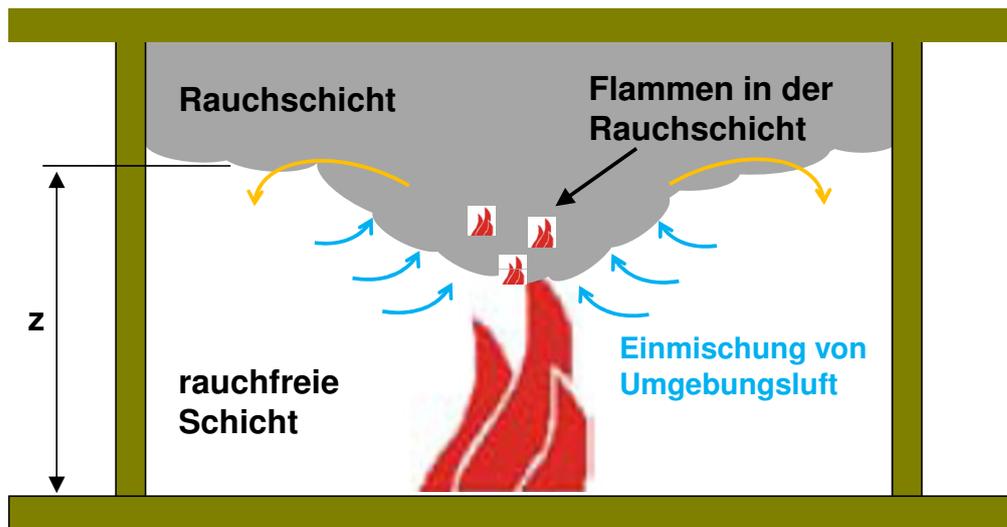


Abbildung 2.6: Rauchausbreitung bei einem Brand ohne Austauschöffnungen mit der Umgebung

### 2.3.2 Der Rauchgasplume als Grundlage der Rauchbildung - Plume Formeln

Das über einem Brandherd als Rauchgassäule (Fire-Plume, Smoke-Plume) aufsteigende Brandrauch-Luft-Gemisch stellt den Sonderfall eines auftriebsbehafteten Freistrahles dar [5].

Die entstehenden Rauchgase steigen durch den thermischen Auftrieb über dem Brandherd auf und strömen in ein umgebendes Medium (=Umgebungsluft), wo sie sich weiter ausbreiten. Beim Eintritt in die ruhende Umgebung wird dabei aufgrund von Druckunterschieden Medium aus der Umgebung eingesaugt und eingemischt. Diese Masseneinmischung bewirkt eine Verbreiterung und Abflachung der Strömungs-, Temperatur- und Rauchgaskonzentrationsprofile mit zunehmender Entfernung von der Quelle.

Werden die Rauchgase beispielsweise durch eine Decke am weiteren Aufsteigen gehindert, so breiten sie sich dort zunächst in radialer Richtung aus (Ceiling Jet). Wird die Ausbreitung auch in horizontaler Richtung verhindert bzw. eingeschränkt, so bildet sich eine Rauchschicht, welche auf der spezifisch schwereren, weil kälteren umgebenden Luft „aufschwimmt“. Vereinfachend wird dabei i.d.R. angenommen, dass Umgebungsluft nur bis zu jener Höhe  $z$  eingemischt wird, in welcher der Rauchgasstrom in die vorhandene Rauchschicht eintritt [siehe Abb. 2.6].

Folgende Zonen können nach [5] bei einem brandinduzierten Rauchgasplume unterschieden werden [siehe Abb. 2.7]:

- **Flammenzone** bestehend aus einer ständigen Flamme und einem beschleunigten Strom brennender Masse

- **Intermittierende Flammenzone** (Flackerbereich), in der vorübergehende Flammenbildung stattfindet und die Strömungsgeschwindigkeit nahezu konstant bleibt
- **Rauchgasplume**, wo keine Verbrennungsreaktion mehr stattfindet. Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur nehmen mit zunehmender Höhe ab. Den Geschwindigkeits-, Temperatur- und Konzentrationsverteilungen liegen näherungsweise Gauss-Profile zugrunde, die im Fall turbulenter Strömung durch die jeweiligen turbulenten Schwankungsgrößen überlagert sein können. Dieser Bereich wird auch als "Ähnlichkeitsbereich" bezeichnet.

Empirisch ermittelte Plume-Formeln beschreiben die Temperaturverteilung, die Geschwindigkeitsverteilung sowie die Lufteinmischung [4, 5].

Eine wesentliche Rolle bei der Ermittlung der Masseneinsaugung spielt die Geometrie des Brandherdes. Brandformen werden häufig als kreisähnlich oder rechteckig angenähert. Neben der Form ist auch die flächenmäßige Ausdehnung der Brandquelle von Bedeutung. Es werden quasi-punktförmige, flächig verteilte oder linienförmige Brandherde unterschieden.

Für punktförmige Brandquellen konnte festgestellt werden, dass sich die Masseneinsaugung im Ähnlichkeitsbereich des Plumes durch eine Potenzfunktion darstellen lässt. Potenzen der Aufstiegshöhe  $z$  und der Wärmeeintrag der Flamme  $Q$  sind die bestimmenden Größen.

Für flächig verteilte Brandquellen erweiterte man dieses Konzept durch Einführung des „virtuellen Ursprungs“. Dieser liegt unter der eigentlichen Brandfläche. Ein Korrekturterm wird zur Aufstiegshöhe  $z$  addiert [siehe Abb. 2.7]. Die Größe dieser Korrektur ist abhängig vom Durchmesser des Brandes. Je großflächiger der Brand, desto höher ist die virtuelle Aufstiegshöhe, welche wiederum eine höhere Einmischung verursacht.

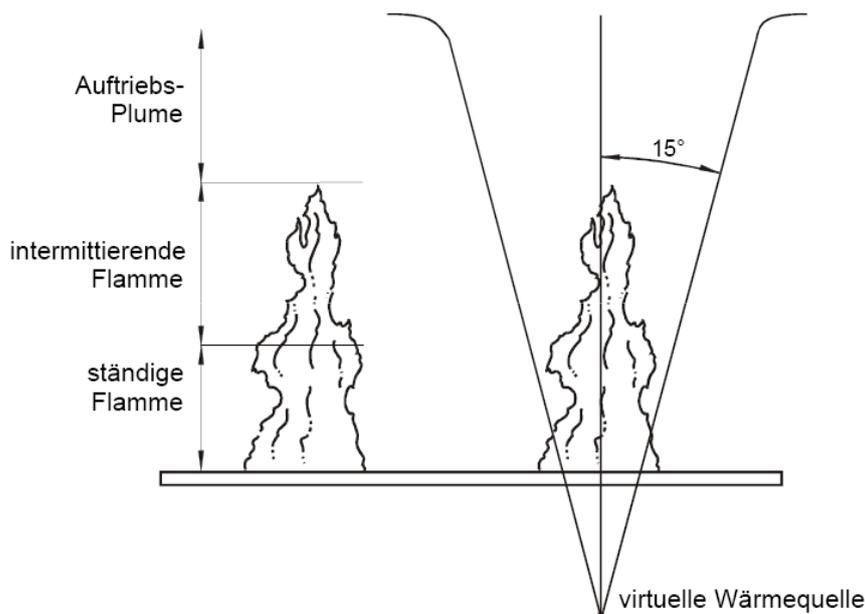


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Ausbildung von Flamme und Plume [1]

Neben dem axialsymmetrischen, frei aufsteigenden Plume müssen noch weitere Formen von Rauchplumes unterschieden werden, um die bei Bränden auftretenden Temperaturen und entstehenden Rauchgasmassenströme für unterschiedliche Szenarien näherungsweise berechnen zu können. Die Strömung des heißen Gas-Luft-Gemisches wird entlang der Umfassungsbauteile abgebremst und gelenkt. Verschiedene Raumgeometrien verursachen also Strömungen, die sich in ihrem Erscheinungsbild und Strömungsverhalten wesentlich unterscheiden. Über Analogieüberlegungen können meist ausgehend vom axialsymmetrischen Plume die Strömungseigenschaften auch für solche "speziellen Plume-Formen" beschrieben werden.

Für den einfachsten Fall der Dimensionierung einer Entrauchungsmaßnahme für einen eingeschossigen Raum mit rechteckiger Grundfläche werden abhängig von der Aufstiegshöhe des Plumes bis zu Rauchsicht  $z$  [m] und von der Fläche des Brandherdes  $A_B$  [m<sup>2</sup>] zwei Bemessungsfälle unterschieden [2]:

**1. große Brände:**  $z \leq (10 \sqrt{10 A_B})$  Es gilt:

$$M_{pl} = C_e P z^{3/2} \quad (2.16)$$

darin sind:

$M_{pl}$	pro Zeiteinheit in die Rauchsicht einströmende Rauchgasmasse [kg s <sup>-1</sup> ]
$C_e$	Entrainmentkoeffizient [kg s <sup>-1</sup> m <sup>5/2</sup> ] $C_e = 0,19$ für sehr große Räume mit großen Aufstiegshöhen über dem Plume $C_e = 0,21$ für sehr große Räume mit Decken nahe dem Plume (kleine Aufstiegshöhen) $C_e = 0,34$ für kleine Räume
$P$	Umfang des Brandes [m]
$z$	Aufstiegshöhe des Plumes bis zu Rauchsicht [m]

Gl. 2.16 ist für ein breites Spektrum an Bränden und unterschiedliche Aufstiegshöhen validiert.

**2. kleine Brände:**  $z > (10 \sqrt{10 A_B})$  Die produzierte Rauchgasmasse ergibt sich nach Zukoski zu Gl. 2.17.

$$M_{pl} = C_e Q_c^{1/3} (z - z_0)^{5/3} \quad [kg s^{-1}] \quad (2.17)$$

mit:

$C_e$	Entrainmentkoeffizient für kleine Brände [kg s <sup>-1</sup> kW <sup>1/3</sup> m <sup>5/3</sup> ] $C_e = 0,071$ für einen Brand in Raummitte $C_e = 0,050$ für einen Brand an einer Wand $C_e = 0,046$ für einen Brand in einer Raumecke
-------	---

$Q_c$	konvektive Wärmeleistung des Brandes [ $kW$ ] es gilt näherungsweise $Q_c \approx 0,70 Q$ [7]
$z_0$	Abstand zwischen virtuellem Ursprung und Brandherdebene [ $m$ ] [siehe Gl. 2.18]
$z$	Plumehöhe vom virtuellen Ursprung bis zu Rauchsicht [ $m$ ]

Die Lage des virtuellen Ursprungs lässt sich in Abhängigkeit von der konvektiven Brandleistung und der charakteristischen Brandherdseitenlänge  $D_B$  wie folgt berechnen:

$$z_0 = -1,02 D_B + 0,083 Q_c^{2/5} \quad (2.18)$$

Die oben angeführten Formeln sind als Beispiel für eine validierte und anerkannte Berechnungsmethode anzusehen. Je nach Anwendungsfall und verwendeten Regelwerken existieren eine Reihe weiterer Plume-Formeln die zu unterschiedlichen Ergebnissen mit teils erheblichen Schwankungsbreiten führen können. Je nach Lage des Brandherdes im Raum, Art und Geometrie des Brandherdes bzw. der Rauchgasquelle sollten für das jeweilige Szenario validierte Verfahren zur Anwendung kommen und die erhaltenen Resultate richtig interpretiert werden.

### 2.3.3 Brandszenarien für die Rauchableitung

Wie unter *Pkt. 2.3.1* beschrieben, muss bei der Dimensionierung einer Entrauchungsmaßnahme von einem Bemessungsbrand (Design Fire) ausgegangen werden, um die abzuführende Rauchgasmasse abschätzen zu können.

In der TRVB S 125 ist dieser Ausgangsbrand definiert als jener, hinsichtlich seiner Ausdehnung und produzierten Wärmeleistung wahrscheinlich größte Brand, der sich bis zum Einsetzen wirksamer Löschmaßnahmen entwickeln kann [33]. Das einfache Zugrundelegen eines "Durchschnittsbrandes" wäre fatal, da definitionsgemäß die Hälfte aller auftretenden Brände diesen in ihrem Ausmaß übertreffen würden.

Da die Entwicklung eines Brandes von einer Vielzahl von Parametern gesteuert wird gibt es viele Möglichkeiten, dies zu beschreiben bzw. mathematisch zu modellieren. Die Beschreibung einer einfachen Temperatur-Zeit-Kurve wie sie beispielsweise für Feuerwiderstandsprüfungen von Bauteilen verwendet wird, ist für die Entrauchung nicht geeignet. Es werden zu diesem Zweck Kurven verwendet, mit denen der Verlauf der Brandleistung  $Q$  über die Zeit beschrieben wird.

Falls für den konkreten Fall keine gesicherten statistischen Daten, räumlich begrenzte, wohl definierte Brandlasten oder Ergebnisse realer Brandversuche vorliegen, sind derartig festgelegte Bemessungsbrände laut Regelwerken zu verwenden. Meist handelt es sich dabei um zeitunabhängige Design-Fires, bei denen eine konstante Brandleistung  $Q$  anzusetzen ist ("Steady-State"-Fälle). Für das Bemessungsverfahren nach TRVB S 125 beispielsweise sind die Brandszenarien gemäß *Tab. 2.3* beschrieben.

BRE- Bemessungsgruppe	Brandfläche	Brandumfang	spez. Wärmestrom		Nutzungen
			$q_B$	$q_k^*$	
lt. TRVB A 126	$A_B$	$U_B$	$q_B$	$q_k^*$	Beispiele
	$[m^2]$	$[m]$	$[kW m^{-2}]$	$[kW m^{-2}]$	
1	10	12	156	125	Büro, Friseur
2	20	18	312	250	Möbel, Verkauf
3	40	25	625	500	Einkaufszentren
4	80	36	1250	1000	Drogeriewaren, Verkauf

\* $q_k = 0,8 q_B$  Annahme lt. TRVB: 80% der Wärmeabgabe des Brandes über Konvektion (Durchschnittswert). Eine zutreffendere Annahme wären 70% [7].

Tabelle 2.3: Anzunehmende Brandflächen bzw. -Umfänge, sowie spezifische Wärmeströme dieser Bemessungsbrände für die Dimensionierung von BRE-Anlagen [33, 34]

Je nach nutzungsspezifischer BRE-Bemessungsgruppe (zu ermitteln aus TRVB A 126 [34]) ist die maximale Brandfläche, deren Umfang und der spezifische Wärmestrom angegeben. Für Objekte mit Brandmeldeanlage ist die nächst niedrigere Bemessungsgruppe heranzuziehen. Bei einer Sprinkleranlage wird die zweitniedrigere Gruppe zugrunde gelegt.

# Kapitel 3

## Rauchkontrolle in Atriumbauten

### 3.1 Das Wesen von Atrien und Malls

Atrien sind geschoßverbindende Räume. Ihre Entwicklung geht zurück bis in die Römerzeit, wo sie als teilweise überdachte Innenhöfe zentraler Bestandteil vieler Wohnhäuser waren [12]. In den letzten Jahrzehnten ist diese Bauweise sehr gefragt. Anfänglich durch das bloße Überdachen von Ladenstrassen (Malls), prägen Atrien heute unzählige Bauten. Häufig sind sie repräsentative Räume, die beim Betreten des Gebäudes eine angenehme, lichtdurchflutete Atmosphäre schaffen [siehe Abb. 3.1].

Dabei erfüllen sie die unterschiedlichsten Funktionen, wobei im Lauf der Zeit die Nutzung dieser Zonen immer intensiver wurde. Empfangsbereiche und Cafeterias, aber auch Warteräume und Kundensalons sind vermehrt anzutreffen. Allen diesen überhöhen Innenräumen ist ihre Funktion als Erschließungszone gemeinsam. Neben ihrer nutzungsbedingten Funktionalität bieten sie aber auch belichtungs- und lüftungs- bzw. klimatechnische Vorzüge.

#### 3.1.1 Besonderheiten von Atrien und Malls im Brandfall

Atrien durchdringen mehrere Geschosse, wodurch der Grundgedanke des vorbeugenden Brandschutzes bezüglich geschoßweiser Brand- und Rauchabschnittsbildung verletzt wird. Im Brandfall können sich dadurch Rauch und Wärme über das Atrium auf andere Geschosse ausbreiten. Schließlich befinden sich offene Gänge entlang des Atriums in der Rauchsicht. Brandgase gelangen weiters über offene Türen o.ä. in die an das Atrium angrenzenden Bereiche.

Da vielfach laubengangartige Umgänge vorhanden sind, über welche die horizontalen Fluchtwege zu den Treppenhäusern führen, kommt der Rauchfreihaltung dieser Bereiche große Bedeutung zu. Nicht benutzbare Flucht- und Rettungswege gefährden eine große Anzahl von Personen, zumal es sich bei Gebäuden mit Atrien oder Malls meist um stark frequentierte, öffentliche Gebäude oder Geschäftsgebäude handelt. Dies gilt es durch technische und betriebliche Brandschutzmaßnahmen zu kompensieren.

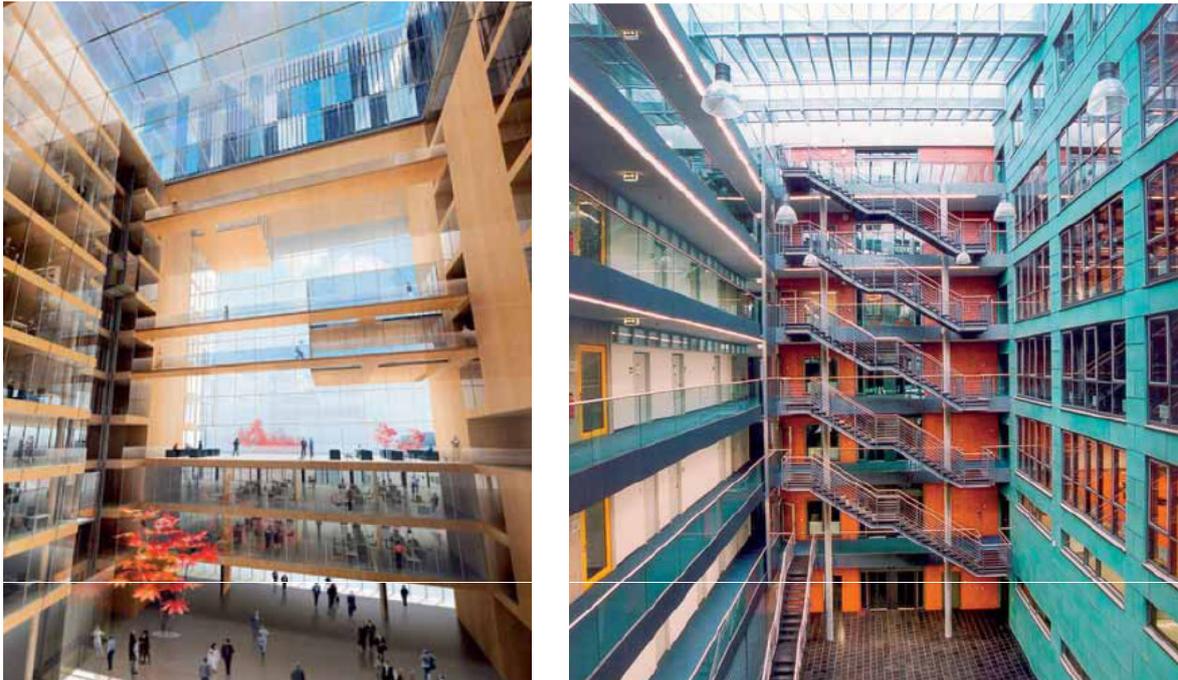


Abbildung 3.1: Repräsentatives Atrium als Teil eines Geschäftsgebäudes (links) [*ThyssenKrupp Architektenwettbewerb 2006, Siegerentwurf chaix&morel et associés*] und zur Gebäudeerschließung und -belichtung (rechts) [*Neubau der Bundesdruckerei Berlin GmbH.*]

## 3.2 Atriumtypen aus der Sicht des Brandschutzes

### 3.2.1 Bauliche Unterscheidung

Nach [28] werden Atrien aufgrund ihrer baulichen Anbindung an andere Gebäudebereiche folgendermaßen unterschieden:

**Offener Atriumraum:** Die Nutzflächen grenzen offen an das Atrium an, wie es oft bei Warenhäusern oder großen Bürogebäuden anzutreffen ist [*siehe Abb. 3.2*]. Häufig sind auch nur gewisse Bereiche in einzelnen Geschossen vom Atrium nicht getrennt (z.B. Foyers im Erdgeschoß oder Kommunikationsbereiche in oberen Stockwerken).

**Zwischenraum:** Charakteristisch für diesen Typ sind Abschlüsse zwischen den einzelnen Nutzungseinheiten und dem Atrium [*siehe Abb. 3.3*]. In Einkaufszentren stellen diese Abschlüsse meist die Grenze zwischen den einzelnen Mietflächen und der eigentlichen Mall dar. Diese Trennung kann unterschiedlich realisiert sein und ist im jeweiligen Fall nach ihrer feuerschutztechnischen Leistungsfähigkeit zu bewerten bzw. sind die zu leistenden Kriterien vorzuschreiben.

**Überdachter Außenraum:** Hierbei ist das Atriumdach als reiner Witterungsschutz zu verstehen, in dem permanente Öffnungen zum Freien vorhanden sind (überdachter Innenhof) [*siehe Abb. 3.4*].

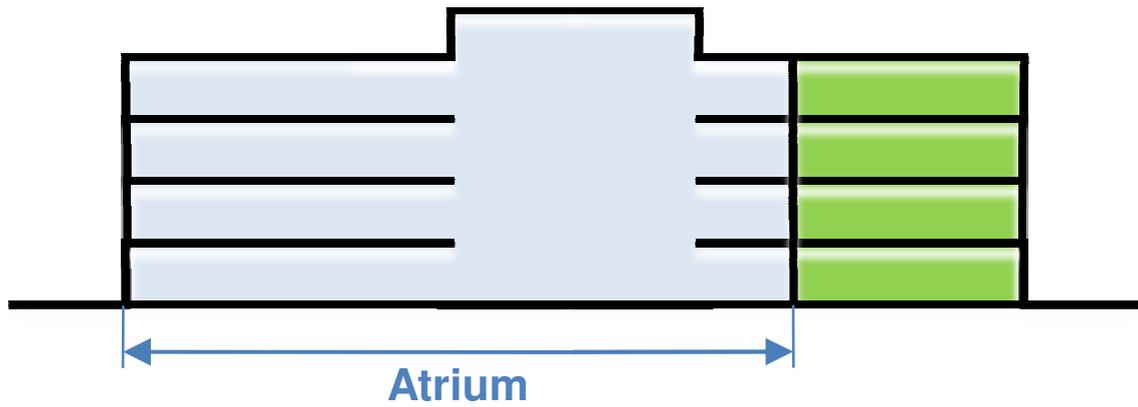


Abbildung 3.2: Offenes Atrium

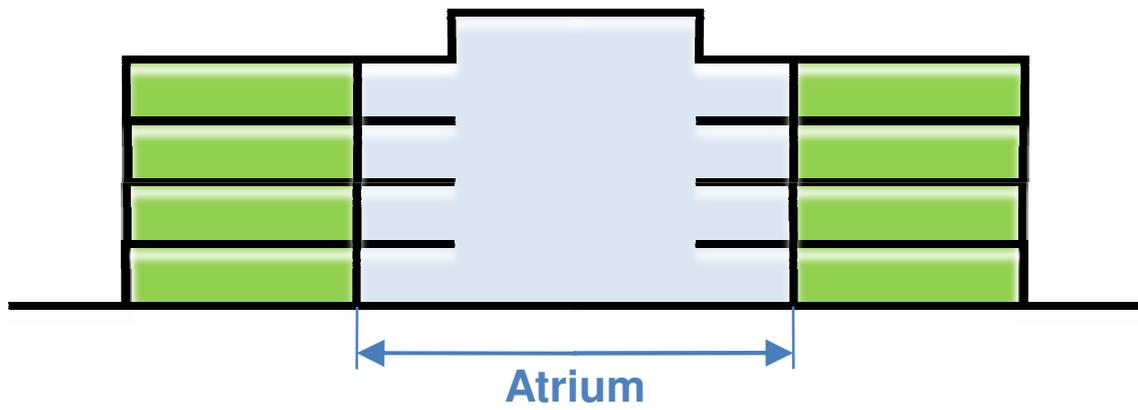


Abbildung 3.3: Zwischenraum

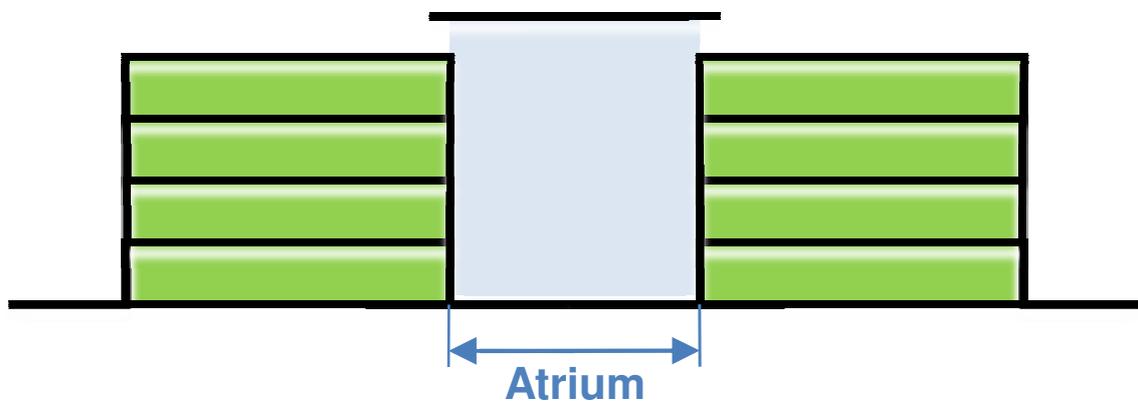


Abbildung 3.4: Überdachter Außenraum

Diese grundsätzliche Differenzierung ist notwendig, um die möglichen Auswirkungen eines Schadenfeuers auf die Nutzer bzw. auf das Gebäude abzuschätzen und den maßgebenden Fall in Bezug auf Größe und Lage des Bemessungsbrandes festzulegen.

### 3.2.2 Unterscheidung aufgrund der Nutzung

Eine weitere Unterscheidung kann aufgrund des unterschiedlichen Fluchtverhaltens der Gebäudenutzer getroffen werden [7]:

- A Nutzer, die überwiegend wach und mit dem Gebäude bzw. dessen Fluchtwegen vertraut sind (z.B. Bürogebäude)
- B Nutzer, die überwiegend wach aber mit dem Gebäude nicht vertraut sind (z.B. Einkaufszentren, öffentliche Veranstaltungs- und Versammlungsstätten)
- C Nutzer, welche von einem Brandereignis auch im Schlaf überrascht werden können (z.B. Wohngebäude, Beherbergungsbetriebe, Wohnheime)
- D Nutzer, welche medizinischer Behandlung oder dauernder Pflege bedürfen und deshalb nicht oder nur eingeschränkt zu einer Selbstrettung fähig sind (z.B. Krankenhäuser, Geriatriezentren)

Für die Ermittlung von Entfluchtungs- bzw. Evakuierungszeiten ist dies von zentraler Bedeutung und kann auch auf die Projektierung der jeweiligen Maßnahme zur Rauchkontrolle Einfluss nehmen. Beispielsweise ist im NFPA-Code 101 die Einhaltung einer rauchfreien Schicht von  $1,85\text{ m}$  im höchstgelegenen, zum Atrium hin offenen Gang, welcher als Fluchtweg dient, für die 1,5-fache berechnete Entfluchtungszeit vorgeschrieben [37].

## 3.3 Verrauchung von Atrien und Malls

### 3.3.1 Der Balcony-Spill-Plume

Der sogenannte "Balcony-Spill-Plume" (BSP) oder "Überlaufplume" bildet sich aus, wenn Rauchgase zunächst von einem Bauteil am Aufsteigen gehindert werden und anschließend entlang einer Kante in einen höheren Bereich einströmen [2]. Diese Art von Rauchausbreitung erfolgt typischerweise in Gebäuden mit Atrien, Galerien oder offenen Gängen, wenn angrenzende Bereiche beabsichtigt oder aber auch unbeabsichtigt in diese höheren Bereiche entrauchen.

Der Rauchgasstrom wird an der Kante ("Spill-Kante") aus der Horizontalen in die Vertikale umgelenkt. Der Plume ragt aufgrund seines horizontalen Impulses ein Stück in den höheren Raum bevor er aufsteigt.

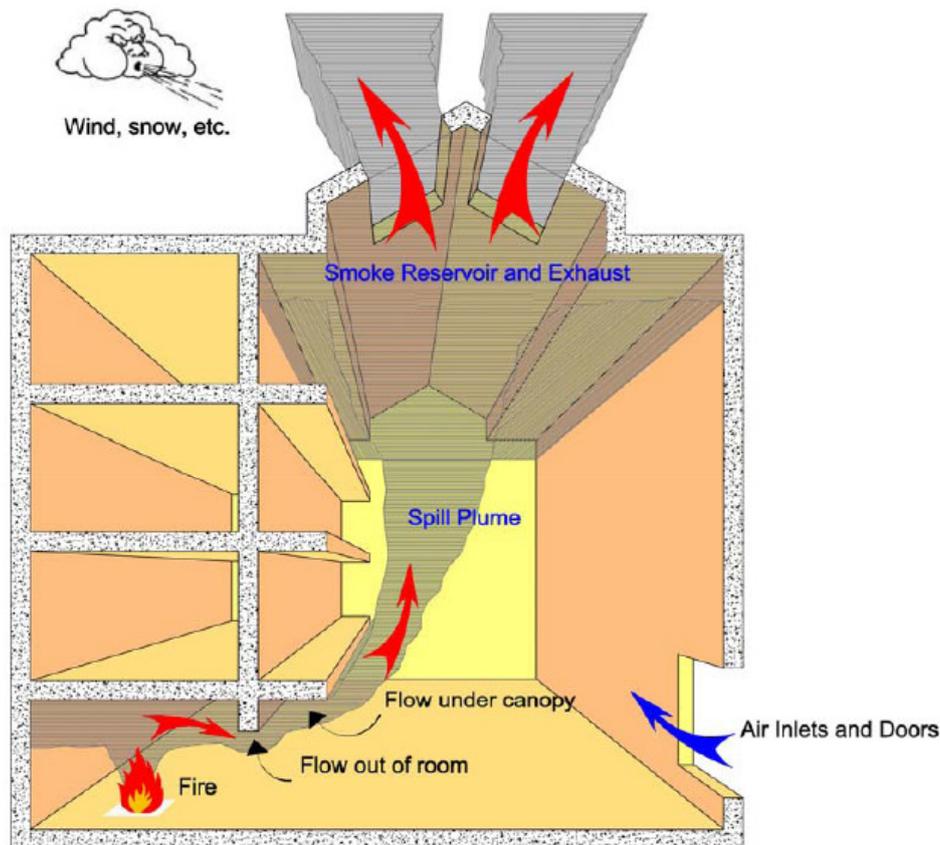


Abbildung 3.5: Rauchströmung aus einem Brandraum entlang eines Balkons in ein Atrium - Ausbildung eines Spill-Plumes [9]

Beim Umströmen der Kante bilden sich Wirbel ("vortex rolls"), wodurch zusätzlich Umgebungsluft über die gesamte umströmte Kantenbreite  $W$  in den Rauchgasstrom eingemischt wird [siehe Abb. 3.5].

An diesen "Umströmbereich" oder "Wirbelbereich" anschließend bildet sich entlang der Kante ein "Linienplume". Das Rauchgasvolumen vergrößert sich mit zunehmender Aufstieghöhe bis es in die angesammelte Rauchschiicht unter der Decke des Atriums einströmt.

Der im Atrium aufsteigende Linienplume kann zwei Formen annehmen:

**Frei aufsteigender Plume ("free plume"):** Nach der umströmten Kante breiten sich die Rauchgase frei nach oben und in das Atrium aus. Umgebungsluft wird an beiden Seiten über seine gesamte Breite in den Plume eingemischt ("double-sided-plume") [siehe Abb. 3.6 a].

**Anliegender Plume ("adhered plume"):** Der horizontal gerichtete Impuls der in das Atrium einströmenden Rauchgase ist schwächer. Deshalb berühren sie während dem Aufsteigen die vertikale Fläche oberhalb der "Spill-Kante". Einmischung kann dadurch nur von einer Seite erfolgen ("single-sided-plume") [siehe Abb. 3.6

b]. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn der Rauchgasstrom direkt aus einer Öffnung einströmt oder aber auch bei sehr kurzen Balkonen. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich bei Balkonbreiten  $b_{Balkon} < 2\text{ m}$  der Rauchplume nach innen dreht, was bei offenen Atrien zu einer Verrauchung der über dem Brandherd liegenden Geschosse führen kann [7]. Dem kann man durch das Anbringen von Rauchleitblechen [siehe Abb. 3.7] entgegenwirken. Diese können außerdem die abzuführenden Rauchgase in Richtung der Rauchabzugsöffnungen lenken.

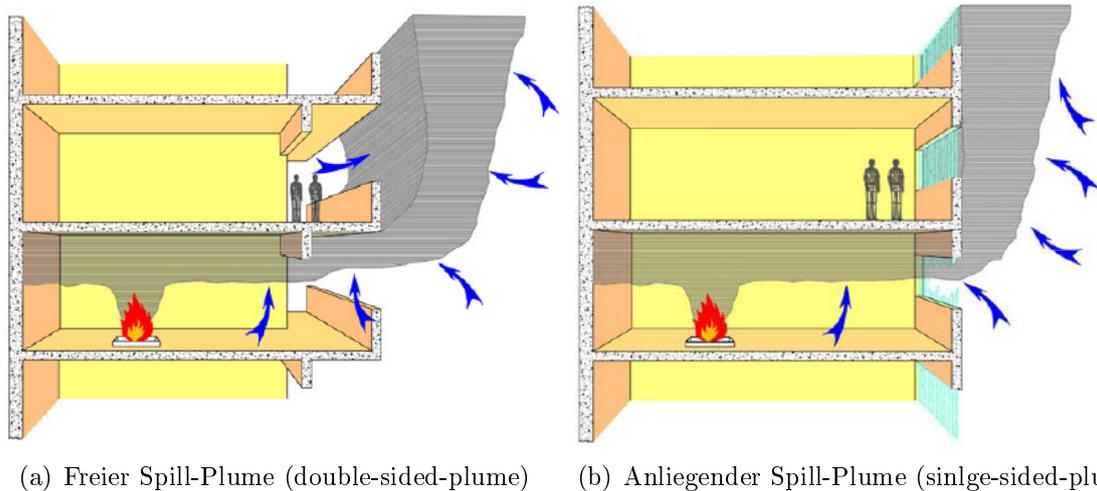


Abbildung 3.6: Einmischung von Umgebungsluft in den "freien" und den "anliegenden" Spill-Plume [7]



Abbildung 3.7: Rauchleitbleche zum Lenken der Rauchgase [26]

Für den im Brandraum aufsteigenden Plume, dessen Lufteinmischung, Temperatur, etc. gelten die in *Pkt. 2.3.2* angeführten Zusammenhänge sinngemäß.

Das Rauchgasvolumen im Atrium vergrößert sich mit zunehmender Aufstiegshöhe durch Einmischung von Umgebungsluft. Ein Brand in einem der unteren Geschosse, welche in das Atrium entrauchen, verursacht also die größte Menge an nachströmenden Rauchgasen.

Bei der Untersuchung der Lufteinmischung in "Spill-Plumes" mit zunehmender Höhe unterscheidet man wiederum zwei Typen:

**2-D-Plume:** Einmischung erfolgt nur von zwei Seiten (in *Abb. 3.6* in Bildebene). Die zusätzlich an den freien Enden des aufsteigenden Rauchplumes eingemischte Umgebungsluft wird nicht berücksichtigt bzw. ihre Einmischung wird durch bauliche Maßnahmen unterbunden.

**3-D-Plume:** Auch die an den freien Enden des Plumes eingemischte Umgebungsluft wird berücksichtigt (in *Abb. 3.6* wäre das in der Bildebene). Diese zusätzliche Einmischung wurde von Marshall und Harrison mit ca. 30% beziffert [9].

Diese Differenzierung resultiert aus der Möglichkeit Einmischung an den freien Seiten durch Anbringung von Rauchschürzen ("channelling screens") zu unterbinden. Das an den freien Enden eingemischte Rauchvolumen und die seitliche Ausbreitung kann dadurch eingeschränkt werden [siehe *Pkt. 5.2*].

Folgende vier Parameter beeinflussen hauptsächlich die Einmischung von Umgebungsluft in den Spill-Plume [6, 7]:

- Der aus dem Brandraum bzw. Rauchabschnitt zur Spill-Kante gelangende **Rauchgasmassenzustrom**  $M_b$  und dessen Temperatur
- Der **konvektive Wärmefluss**  $Q$  der ankommenden Rauchgase
- Die **Breite**  $W$  des **Rauchgaszustromes**, gemessen an der Spill-Kante
- Die **Aufstiegshöhe**  $z$  des Plumes im Atrium bis zur Rauchschichtunterkante

In Spill-Plumes wird mehr Umgebungsluft eingemischt als in axialsymmetrische Plumes. Dies wurde in Versuchen mit unterschiedlichen Brandleistungen und Balkengeometrien bis zu einer Aufstiegshöhe von rund 40 m gezeigt [22].

Somit muss für Atrien, atrienähnliche Gebäude und Malls mit üblichen vertikalen Abmessungen unter 40 m der Spill-Plume als "Worst-Case"-Bemessungsszenarium für die Dimensionierung von Entrauchungsanlagen herangezogen werden. Es ist also notwendig die Entstehungsmechanismen und Zusammenhänge dieses Phänomens zu verstehen, um bei derartigen Gebäuden eine sicher funktionierende Entrauchung realisieren zu können.

### 3.3.2 Lage der Neutralen Ebene

Zur Beurteilung der Verrauchung eines Atriums ist die Lageermittlung der so genannten "neutralen Ebene" erforderlich. Wie in *Abb. 3.8* dargestellt, stellt sich im Brandfall innerhalb des Gebäudes ein Druckgefälle ein. Im unteren Teil wird Frischluft aus den angrenzenden Bereichen angesogen (Unterdruck). Im oberen Teil herrscht ein Überdruck und die heißen Rauchgase breiten sich aus oder werden abgeführt. Oberhalb der Neutralen Ebene würden die Brandgase also in angrenzende Zonen gedrückt.

Für einfache Geometrien lässt sich die höhenmäßige Lage der NPP (Neutral Pressure Plane) mittels Gl. 3.1 näherungsweise festlegen [7]. Wind- und sonstige Witterungseinflüsse sind darin nicht berücksichtigt.

$$\left(\frac{A_v C_v}{A_i C_i}\right)^2 = \frac{\frac{T_g}{T_0}}{\left(\frac{d_{max}}{X_n} - 1\right)} \quad (3.1)$$

darin sind:

$A_v$	Fläche der Abluftöffnungen (geometrisch) [ $m^2$ ]
$C_v$	Strömungsbeiwert der Abluftöffnungen [–]
$A_i$	Fläche der Zuluftöffnungen (geometrisch) [ $m^2$ ]
$C_i$	Strömungsbeiwert der Zuluftöffnungen [–]
$T_g$	Rauchgastemperatur [ $K$ ]
$T_0$	Umgebungstemperatur [ $K$ ]
$d_{max}$	maximale Rauchsichtdicke im Atrium [ $m$ ] (gemessen von der Mitte der Abluftventilatoren bis zur akzeptierten Rauchsichtunterkante oder bis zum Boden)
$X_n$	Lage der neutralen Ebene, gemessen ab der Rauchsichtunterkante [ $m$ ] [siehe Abb. 3.8]

In der Regel leiten Rauchabzüge und Entrauchungsventilatoren im Dach den Rauch aus dem Atrium ab, während die Zuluft im unteren Gebäudebereich zugeführt wird. Damit die Rauchgase nicht in Zwischengeschosse eindringen können, sollte die Zuluft in jedem Geschoss zum Atrium hin geleitet werden.

Zur Dimensionierung der erforderlichen Entrauchungsmaßnahme kann die entstehende Rauchgasmasse nicht mit den, unter Pkt. 2.3.2 vorgestellten Formeln berechnet werden, da es sich i.d.R. hierbei um komplexe Geometrien handelt, die keinen senkrecht zum Rauchreservoir aufsteigenden Plume hervorrufen, sondern durch Einbauten umgelenkt werden, was eine Vergrößerung des Rauchgasstromes bewirkt [siehe Pkt. 3.3.1]. So heißt es auch in [33], dass Räume mit teilweise eingezogenen Zwischenebenen, einkragenden Erkern oder Balkonen, die eine teilweise laterale Rauchausbreitung vor Erreichen des Rauchreservoirs bewirken, aufgrund der größeren Lufteinmischung besonders behandelt werden müssen.

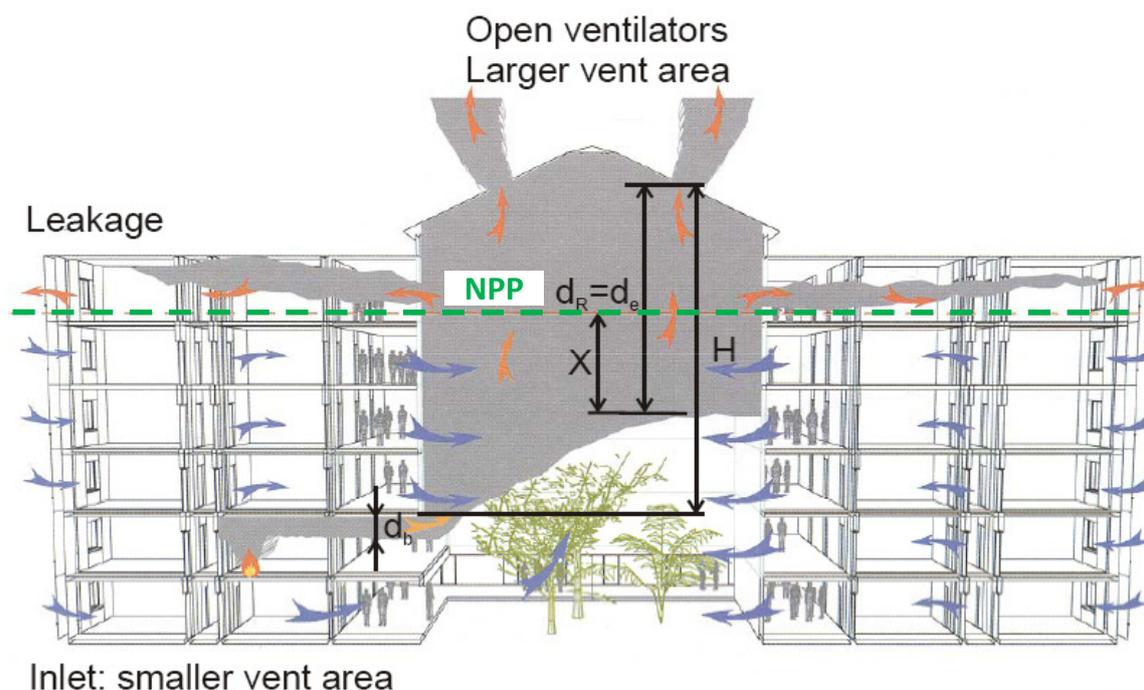


Abbildung 3.8: Lage der Neutralen Ebene bei der Verrauchung eines Atriums [7]

### 3.4 Rauchkontrolle in Atriumbauten - Möglichkeiten und Anforderungen

Ein allseits durch feuerbeständige, rauchdichte Bauteile umschlossenes, frei von Brandlasten gehaltenes Atrium, durch das keine notwendigen Verbindungs- oder Fluchtwege verlaufen, wäre aus der Sicht der Gebäudesicherheit zu begrüßen. Da aus architektonisch-gestalterischen, nutzungs- und klimatechnischen Gründen ein solches Atrium eher die Ausnahme darstellt, sind je nach Atriumtyp [siehe Pkt. 3.2.1] zusätzliche Maßnahmen erforderlich, um den gestellten Anforderungen zu entsprechen.

Die Rauchkontrolle betreffend, werden jene unter Pkt. 2.2 vorgestellten Prinzipien und ihre Anwendbarkeit in Atrien und Malls nachfolgend behandelt.

#### Bauliche Maßnahmen

Die einfachste und wirksamste Methode, um Bereiche vom Atrium brandschutztechnisch zu trennen ist, die vorhandenen Öffnungen mit Feuerschutzabschlüssen zu verschließen. Dies ist einerseits nur bei eher kleinen Öffnungen realisierbar, andererseits widerspricht es dem Wesen solcher möglichst offen wirkender Bauwerke.

Großflächige Verglasungen erhalten den gewünschten offenen Charakter, sind jedoch kostspielig und wartungsaufwendig. Je nach Qualifikation können sie aber das Eindringen von Rauch und die Brandausbreitung in angrenzende Bereiche für eine gewisse Zeit wirksam verhindern.

Als Alternative zum Glas können bei offenen oder teilweise offenen Atrien auch Rauchschürzen und Rauchschutzvorhänge auf zwei Arten verwendet werden:

- Im eigentlichen Brandgeschoß, sodass die heißen Brandgase nicht in das Atrium einströmen können, wobei diese aus dem jeweiligen Geschoß abgeführt werden müssen [siehe Abb. 3.9]. Es kommt also nicht zur Ausbildung eines Spill-Plumes und die Entrauchungsmaßnahme kann auf herkömmliche Art dimensioniert werden.
- Zum Schutz höherliegender Ebenen vor dem Eindringen von Verbrennungsprodukten. Der aufsteigende Rauch breitet sich zwar im Atrium aus, die umliegenden Bereiche und Fluchtwege bleiben aber zumindest für eine definierte Zeit passierbar [siehe Abb. 3.9]

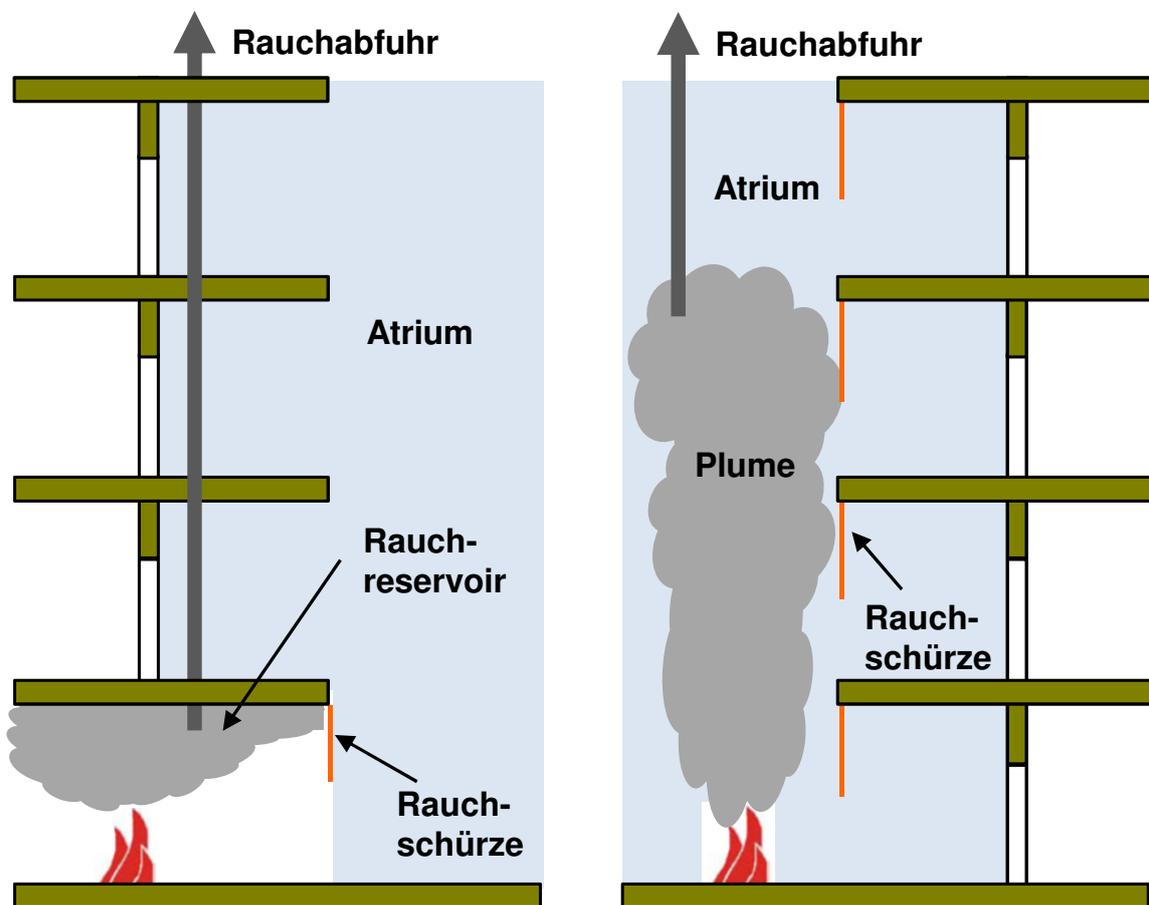


Abbildung 3.9: Bauliche Maßnahmen zur Begrenzung der Rauchausbreitung durch Verhinderung des Einströmens ins Atrium (*links*) und durch rauchschutztechnische Trennung der einzelnen Ebenen vom Atrium (*rechts*)

In Abb. 3.10 ist eine flexible, über die gesamte Raumhöhe reichende Rauchschürze (Rauchschutzvorhang) zur Trennung zwischen einem Geschäft und der angrenzenden Einkaufsmall dargestellt.



Abbildung 3.10: Flexibler Rauchschutzvorhang als Rauchabschnittsgrenze zwischen Atrium und Verkaufsfläche [Quelle: Eckart Feuerschutz]

Bauliche Maßnahmen können auch die seitliche Ausdehnung des Spill-Plumes begrenzen und so das abzuführende Rauchvolumen beschränken [siehe Pkt. 5.2]

### Natürlicher (BRE) oder mechanischer (BRA) Rauch- und Wärmeabzug

Zur Entrauchung des Atriums kann eine Entrauchungsanlage zur Erhaltung einer rauchfreien Schicht dimensioniert werden. Je nach den baulichen Gegebenheiten und der Lage des Bemessungsbrandes ist der abzuführende Massenstrom unter Berücksichtigung der zusätzlichen Einmischung durch den BSP zu ermitteln. Ansonsten kann die TRVB S 125 sinngemäß verwendet werden [35]. Die Höhe der raucharmen Schicht muss natürlich über dem höchstgelegenen Fluchtweg eingehalten werden. Besonderes Augenmerk ist auf die Lage der Zuluftflächen zu legen, welche möglichst im unteren Teil dieser überhöhen Räume gelegen sein sollten. Da Atrien meist in der Gebäudemitte angeordnet werden ist das oft schwer realisierbar.

Ein Nachteil natürlicher RWAs ist die Abhängigkeit ihrer Leistung von der, vom Brand verursachten Thermik [siehe Pkt. 2.2.3]. Da durch die hohen Einmischungsraten der auftretenden Rauchgasströmungen der Temperaturunterschied zur Umgebungsluft relativ gering ist, lässt ihre thermische Auftriebskraft stark nach.

Will man wirkungsvollen Personenschutz betreiben, so sind Rauchabzugssysteme zu bevorzugen, die in der Brandentstehungsphase (Selbstrettungsphase) und nicht erst in der Phase des vollentwickelten Brandes ihre Leistung erbringen. Es ist deshalb naheliegend, dass man zur effizienten Entrauchung von solchen Räumen eher maschinelle

Rauchabzüge einsetzen sollte. Spielt das Schutzziel Personenschutz keine Rolle, weil beispielsweise notwendige Fluchtwege nicht durch das Atrium verlaufen, können natürliche Entrauchungsanlagen sehr wohl eingesetzt werden.

Berechnungsmethoden zur Dimensionierung derartiger Anlagen für Atrien und atrien-ähnliche Gebäude stellen den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar.

## **Rauchverdünnung**

Anlagen zur Rauchverdünnung nach *Pkt. 2.2.4* sind grundsätzlich für Atrien geeignet und dimensionierbar. Durch die geforderten Luftwechselraten können bei derartigen Räumen die von den Ventilatoren zu leistenden Volumenströme jedoch beträchtlich sein.

Des Weiteren werden trotz dieser Maßnahme sehr große Bereiche mit Verbrennungsprodukten und Wärme beaufschlagt, was gerade in Verkaufsstätten und repräsentativen Gebäuden mit umfangreicher Gebäudeausstattung nicht wünschenswert ist (Sachwertschutz).

## **Druckbelüftungsanlagen (DBA)**

Das Prinzip der Rauchverdrängung wäre zum Schutz an das Atrium angrenzender Nutzungseinheiten anwendbar und sinnvoll. Problematisch sind hierbei wiederum die großen Raumvolumina, welche unter Überdruck gesetzt werden müssten. Weitläufige Geschäftsbereiche mit vielen Türen und Verbindungswegen sind charakteristisch für derartige Gebäude. Ein baulich möglichst geschlossener Bereich als Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Prinzips ist also nicht gegeben [*siehe Pkt. 2.2.5*].

Neben dem Druckkriterium ist auch die Einhaltung der Strömungskriterien nicht möglich, da die Öffnungen in das Atrium in den meisten Fällen zu große Flächen aufweisen, um die geforderten Strömungsgeschwindigkeiten aufrecht erhalten zu können [6, 22].

# Kapitel 4

## Berechnungsmethoden für Spill-Plumes

### 4.1 Entstehung von BSP-Berechnungsmethoden

Die ersten Untersuchungen der Rauchgasmassenzunahme in Spill-Plumes wurden in den 1960er Jahren von Lee und Emmons und darauf aufbauend in den 1970ern von Morgan und Marshall anhand von Versuchen durchgeführt. Daraus leitete man eine Reihe von Methoden zur rechnerischen Bestimmung des Rauchgasvolumenstroms ab, mit dem Ziel, einen möglichst einfachen und praxistauglichen Formelapparat für die Dimensionierung von Entrauchungsanlagen zur Verfügung zu haben.

Da sich die Zusammenhänge auf denen die einzelnen Verfahren beruhen meist auf Versuchsergebnisse stützen, ist ihre Anwendung auf Szenarien beschränkt, die jenem Versuchsaufbau entsprechen aus denen sie abgeleitet wurden. Solche einschränkende Bedingungen betreffen beispielsweise die Brandleistung, die Abmessungen des Brandraumes und dessen Öffnungen.

Die zur Herleitung herangezogenen Versuchsdaten stammen zum größten Teil aus Modellversuchen im Maßstab 1:10, durchgeführt vom britischen Building Research Establishment (BRE). Zwei Versuchsreihen von Morgan und Marshall 1975 und 1979 lieferten die grundlegenden Zusammenhänge und das unter *Pkt. 4.2* näher vorgestellte BRE-Verfahren. Weiters führten Hansell et al. 1993 und Marshall und Harrison 1996 ähnliche Experimente durch. Die neuesten Modellversuche zur Untersuchung von Rauchgasmassenströmen bei Spill- aber auch Window-Plumes führte Harrison 2004 durch. Es existieren auch Daten aus Versuchen von Yii 1998, der im Gegensatz zu den anderen die turbulenten Rauchströmungen mit Salzwasser modellierte [7, 9, 11, 15].

### 4.2 Die BRE-Methode

Morgan und Marshall entwickelten dieses Berechnungsverfahren in den 1970er Jahren basierend auf Versuchen im Maßstab 1:10. Vier Bereiche des Spill-Plumes, in denen

die Einmischung auf unterschiedliche Art und in unterschiedlichem Ausmaß stattfindet werden dabei unterschieden [siehe Abb. 4.1]:

1. im Brandraum über der Brandstelle aufsteigender, **axialsymmetrischer Plume**
2. der **Rauchgasmassenzustrom**  $M_b$ , der an der Decke entlang zur Spill-Kante strömt
3. die entlang der Kante "rollenden" Rauchgase an der **Spill-Kante**, wo die Strömung aus der Horizontalen in die Vertikale umgelenkt werden
4. der nach oben aufsteigende, und sich zu den Seiten ausbreitende **Linienplume**  $M_{pl}$

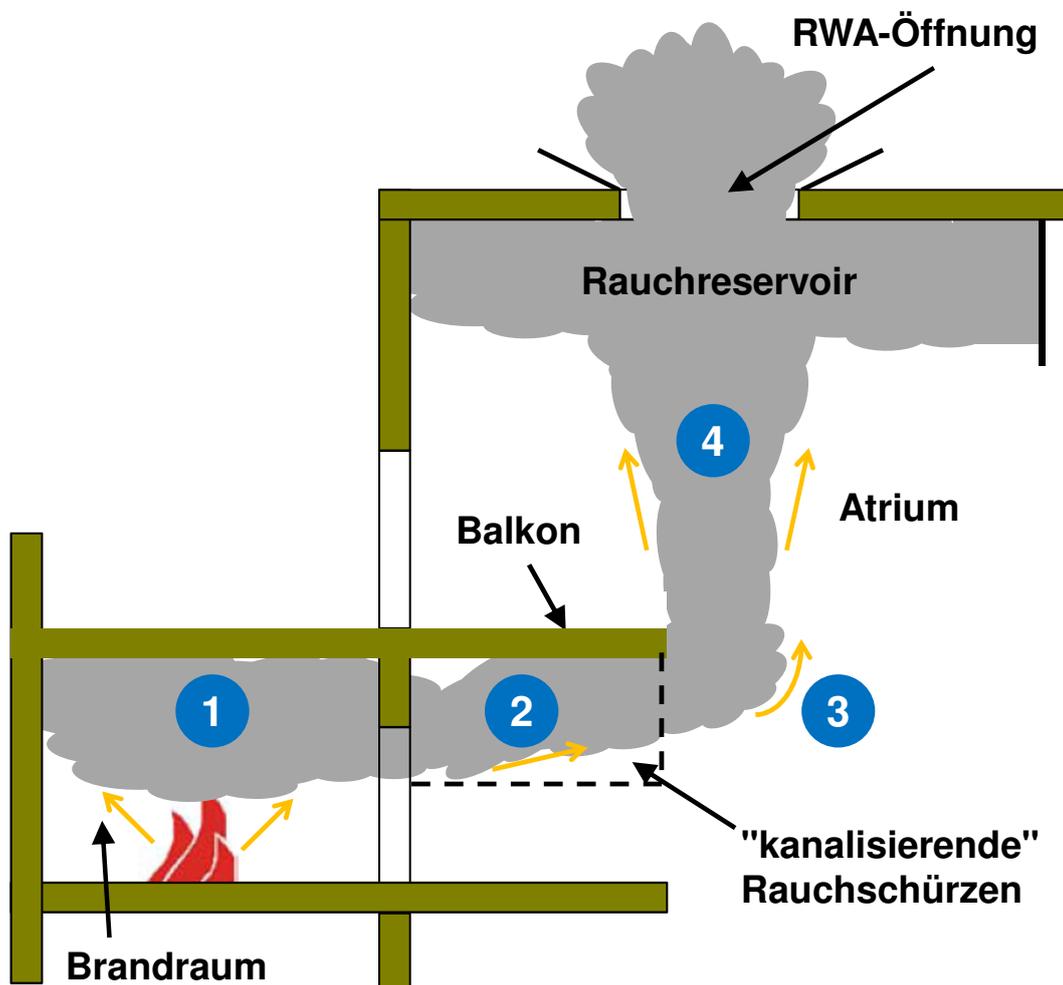


Abbildung 4.1: Gliederung des BSP in unterschiedliche Einmischungsbereiche

#### 4.2.1 Eigenschaften der zuströmenden Rauchgasmasse $M_b$

Der Zustrom  $M_b$  verläuft entlang einer horizontalen Decke und wird durch zwei parallele Rauchschürzen "kanalisiert" [siehe Abb. 4.1]. Die Breite  $W$  des Zustroms ist somit fest-

gelegt. Weiters wird angenommen, dass die Strömung aus dem Brandraum vollkommen turbulent ist und im rechten Winkel zur Öffnung verläuft [7, 9]. Mittels Gl. 4.1 kann die, aus der Brandraumöffnung austretende Rauchgasmenge [siehe Abb. 4.2] bestimmt werden.

$$M_w = \frac{2}{3} C_d^{2/3} (2g \Delta T_g T_0)^{1/2} \frac{W \rho_0}{T_g} d_w^{3/2} \kappa_M \quad [kg s^{-1}] \quad (4.1)$$

darin sind:

$C_d$	Ausströmkoefizient [-] $C_d = 1,0$ für Öffnungen ohne Sturz $C_d = 0,6$ für Öffnungen mit hohem Sturz
$g$	Erdbeschleunigung $g = 9,81 \quad [m s^{-2}]$
$T_0$	Temperatur der Umgebungsluft [K]
$T_g$	Temperatur des Rauchgasstromes, gemessen am Punkt der größten Strömung [K]
$\Delta T_g$	Temperaturunterschied des Rauchgasstromes gegenüber der Umgebungstemperatur [K]
$W$	Breite des Rauchgasstromes [m] (in diesem Fall gleich der Öffnungsbreite bzw. gleich dem lichten Abstand der Rauchschränke)
$\rho_0$	Dichte der Umgebungsluft [ $kg m^{-3}$ ] für trockene Luft mit $20^{\circ}C$ gilt $\rho_0 \approx 1,20$
$d_w$	Schichtdicke des Rauchgasstromes an der Öffnung [m] ermittelt z.B. nach Gl. 4.3
$\kappa_M$	Profilkorrekturfaktor für den Massenstrom [-] angenommen zu $\kappa_M \approx 1,3$

Die mittlere Temperatur der Rauchschränke  $\overline{T_g}$  errechnet sich anschließend nach Gl. 4.2. Sie sollte unter  $350^{\circ}C$  liegen, da bei Anwendung dieser Methode ansonsten die Einmischung in den Massenstrom beträchtlich überschätzt würde [20].

$$\overline{T_g} = \frac{Q_w}{M_w c_p} \quad [K] \quad (4.2)$$

mit:

$Q_w$	Wärmefluss der aus der Öffnung austretenden Rauchgase [kW]
$M_w$	Rauchgasmassenstrom aus der Brandraumöffnung [ $kg s^{-1}$ ] ermittelt nach Gl. 4.1

$c_p$  spezifische Wärmekapazität [ $kJ kg^{-1} K^{-1}$ ]  
 $c_p = f(T_g) \approx const. = 1,01$

Weiters kann die Schichtdicke in der Öffnung  $d_w$  durch Umformen von Gl. 4.1 wie folgt bestimmt werden:

$$d_w = \left[ \frac{3 M_w T_g}{2 C_d^{3/2} \kappa_M W \rho_0 (2 g \Delta T_g T_0)^{1/2}} \right]^{2/3} \quad [m] \quad (4.3)$$

Die mittlere Temperatur der Rauchschiicht berechnet sich dann zu:

$$\hat{T}_g = \frac{\kappa_Q}{\kappa_M} \Delta T_g \quad [K] \quad (4.4)$$

mit:

$\kappa_Q$  Profilkorrekturfaktor [-]  
angenommen zu  $\kappa_Q \approx 0,95$

Weiters wird die charakteristische Geschwindigkeit  $\nu$  der Rauchgasströmung ermittelt. Hierbei wird bezüglich der anzuwendenden Formel unterschieden:

allgemein:

$$\nu = 0,96 \frac{C_d \kappa_M}{\kappa_Q^{1/3}} \left[ \frac{g Q_w \hat{T}_g}{c_p \rho_0 W T_0^2} \right] \quad [m s^{-1}] \quad (4.5)$$

für Öffnungen ohne Sturz ( $C_d = 1,0$ ):

$$\nu = 1,27 \left[ \frac{g Q_w \hat{T}_g}{c_p \rho_0 W T_0^2} \right] \quad [m s^{-1}] \quad (4.6)$$

und für Öffnungen mit tiefreichenden Stürzen:

$$\nu = 0,76 \left[ \frac{g Q_w \hat{T}_g}{c_p \rho_0 W T_0^2} \right] \quad [m s^{-1}] \quad (4.7)$$

Daraus folgend kann die, auf die Länge bezogene, potentielle Energie der Auftriebsströmung  $B$  errechnet werden:

$$B = \frac{\rho_0}{2} \frac{\Delta T_g}{T_g} g \nu d_w^2 \quad [W m^{-1}] \quad (4.8)$$

### 4.2.2 Einmischung an der Kante

Die an der Kante durch die Umlenkung der Strömung eingemischte Masse wird folgendermaßen bestimmt:

$$\Delta M = \frac{2}{3} \rho_0 W \alpha' \left( \frac{2g \Delta T_g}{T_0} \right) d_w^{3/2} \quad [kg s^{-1}] \quad (4.9)$$

Dabei ist  $\alpha'$  der Einmischungskoeffizient für den Nahbereich der Kante. Ursprünglich wurde dieser empirisch mit 0,9 beziffert. In [7] wird  $\alpha' = 1,1$  angenommen. Dieser eigentlich zu große Wert berücksichtigt auch Einmischung oberhalb der Kante.

Somit ergibt sich Gl. 4.10 für die, ins Atrium einströmende Rauchgasmenge [siehe Abb. 4.2].

$$M_{Atrium} = M_w + \Delta M \quad [kg s^{-1}] \quad (4.10)$$

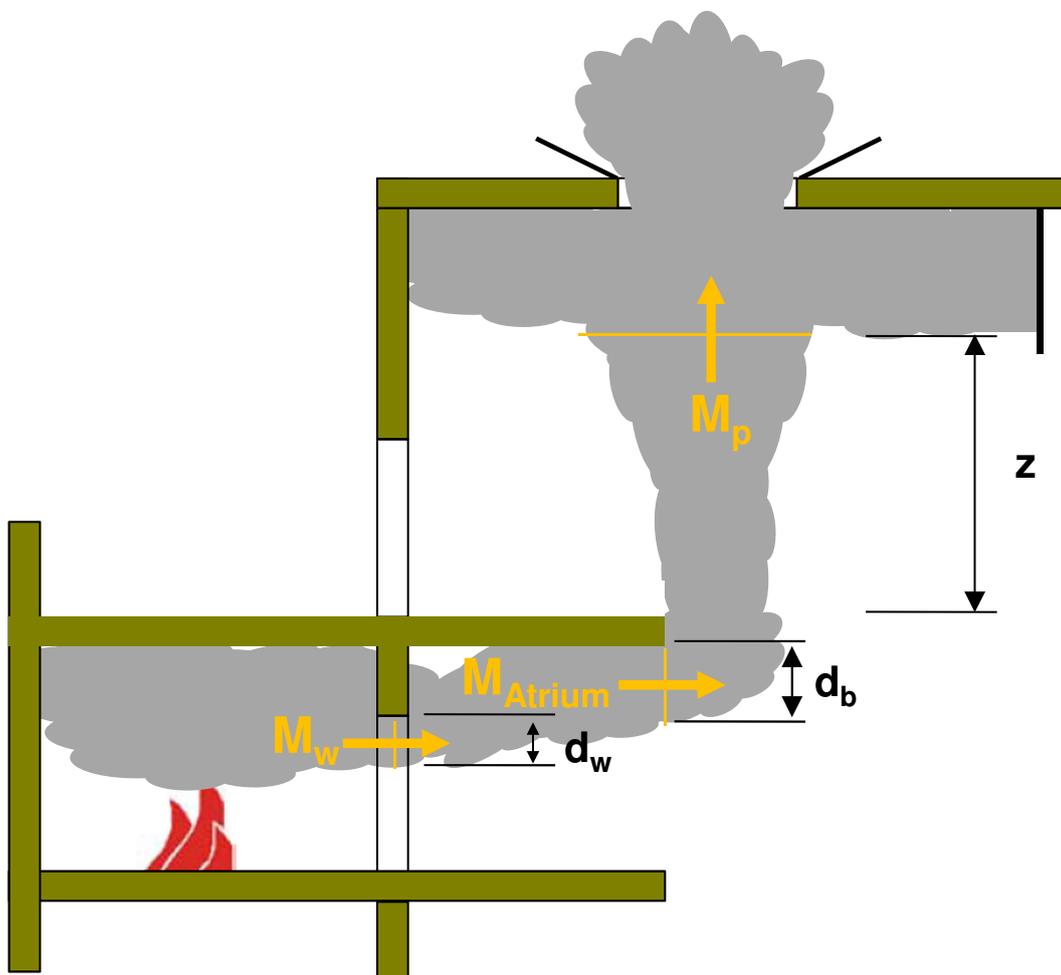


Abbildung 4.2: Bezeichnung der Massenströme für die BSP-Berechnung

### 4.2.3 Einmischung in den aufsteigenden Plume nach der Kante

Es wird angenommen, dass der im Atrium aufsteigende Rauchgasplume einem virtuellen, linienförmigen Ursprung unterhalb der Spill-Kante entspringt. Die Lage dieses

Punktes bzw. dieser Linie wird aus den Parametern des Rauchgaszustromes bestimmt, wobei mit  $Q_0 = \frac{Q}{W}$  und  $A = \frac{M_p}{W}$  diese Größen auf die Strombreite  $W$  bezogen werden.

Daraus sind die charakteristische Geschwindigkeit  $u_g$  und Breite  $b_g$  des Rauchgasmassenstroms in der Höhe  $z$  zu bestimmen.  $z$  ist die Höhe der rauchfreien Schicht über dem Brandraum. Der Index  $g$  steht für die, näherungsweise einer "Gauss'schen Verteilung" entsprechenden Geschwindigkeits- und Temperaturprofile der Strömung.

Zur Ermittlung der Einmischung in den aufsteigenden Linienplume wird der Turbulenzgrad der Strömung über die Froude-Zahl mittels Gl. 4.11 bestimmt.

$$F = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/4} \left[ \frac{\alpha}{\lambda \left(\frac{\Delta T}{T_0}\right)_g} \right]^{1/2} \frac{u_g}{(g b_g)^{1/2}} \quad [-] \quad (4.11)$$

Darin ist  $\alpha$  ein weiterer Einmischungskoeffizient, der für "freie Plumes" 0,16 und für "anliegende Plumes" 0,077 (also rund die Hälfte) beträgt.

$\lambda$  ist ein empirisch ermittelter thermischer Plume-Koeffizient mit dem Wert 0,9.

In Abhängigkeit von der Froude-Zahl werden  $u_g$  und  $b_g$  iterativ korrigiert und ein dimensionsloser, auftriebsbestimmender Faktor  $p'$  berechnet.

Daraus folgt der Massenstrom pro Längeneinheit in der Höhe  $z$  zu:

$$m_r = \sqrt{\pi} \rho_0 u b \left[ 1 - p' \left(\frac{\Delta T}{T_0}\right)_g \frac{\lambda}{\sqrt{1 + \lambda^2}} \right] \quad [kg s^{-1} m^{-1}] \quad (4.12)$$

Die Einmischung an den freien Enden kann durch folgenden Zusatzterm berücksichtigt werden:

$$\Delta M_f = 4 \bar{b} \bar{u} \alpha z \rho_0 \quad [kg s^{-1}] \quad (4.13)$$

Der für die Bemessung der Rauchableitung anzunehmende Rauchgasmassenstrom ergibt sich durch Addition der einzelnen Teilströme zu:

$$M_p = M_{Atrium} + m_r W + \Delta M_f \quad [kg s^{-1}] \quad (4.14)$$

Der Abstand zwischen Spill-Kante und Rauchschicht-Unterkante  $z$  sollte bei Anwendung dieser Methode über  $3 m$  liegen, da ansonsten die Einmischung überschätzt würde [7].

Für  $z < 3 m$  ist der Einfluss der Kante auf Geschwindigkeits- und Temperaturprofile der Strömung noch zu groß. Die dem Rechenverfahren zugrundeliegenden Ähnlichkeitsbedingungen (näherungsweise Gauss'sche Verteilungen) sind in diesem Bereich nicht zutreffend [14].

#### 4.2.4 Korrektur der Rauchschichtdicke

Zur Herleitung von Theorien zur Quantifizierung der Einmischung in einen aufsteigenden Rauchgasplume ging man i.A. davon aus, dass die Umgebungstemperatur  $T_0$

über die gesamte Aufstiegshöhe  $z$  konstant ist, was bei höheren Räumen bzw. Rauchabschnitten jedoch nicht zutrifft. Mit zunehmender Höhe steigt auch die Temperatur der Umgebungsluft. Die thermische Auftriebskraft der Rauchgase sinkt also mit der Aufstiegshöhe.

Es hat sich gezeigt, dass die Luftschicht unterhalb der gebildeten Rauchschrift annähernd gleichmäßig verteilte Temperatur besitzt, wenn die charakteristische Breite des Rauchreservoirs klein im Vergleich zur sichtbaren Rauchschriftdicke ist ( $\sqrt{A_{res}} < d_v$ ).

Gilt hingegen  $\sqrt{A_{res}} > d_v$ , so ist die Luft unterhalb der Rauchschrift wärmer als die eigentliche Umgebungstemperatur  $T_0$ .

Weiters wird weniger Umgebungsluft in den Plume eingemischt, bei einer Grundfläche der Rauchschrift, welche groß im Vergleich zu den Plume-Abmessungen ist. Andererseits ist die Einmischung wesentlich größer bei annähernd gleichen horizontalen Abmessungen der Rauchschrift und des Plumes beim Eintritt in diese.

In [7] wird eine Möglichkeit zur rechnerischen Berücksichtigung dieses Effekts angegeben. Zwei Fälle sind zu unterscheiden [siehe Abb. 4.3]:

- Die **charakteristische Breite der Rauchschrift** ist **klein** gegenüber der sichtbaren Rauchschriftdicke  $d_v > 0,67 \sqrt{A_{res}}$

Die Lufttemperatur unter der Rauchschrift kann als konstant angesehen werden. Es ist keine Korrektur erforderlich. Die Aufstiegshöhe des Plumes ist damit  $z = H - d_v$  [m].

- Die **Breite der Rauchschrift** ist **groß** gegenüber der sichtbaren Rauchschriftdicke  $d_v < 0,67 \sqrt{A_{res}}$

Die Lufttemperatur unter der Rauchschrift steigt gegenüber der umgebenden Temperatur mit zunehmender Höhe, was eine geringere Einmischung zur Folge hat. Um den in die Rauchschrift einströmenden Massenstrom zu bestimmen ist eine Korrektur der Rauchschriftdicke im Rauchreservoir erforderlich .

Die effektive Rauchschriftdicke wird angenommen mit  $d_{eff} = 1,26 d_v$ . Dieser Wert ist rein empirisch begründet.

Die Aufstiegshöhe ist mit  $x_p = H - 1,26 d_v$  also geringer wie in Fall 1.

Dadurch wird rechnerisch die Einmischung verringert. Da bei dieser Vorgehensweise theoretisch auch ein sehr kleiner oder sogar negativer Wert für  $z$  auftreten könnte und das eine praktisch unmögliche "Luftausmischung" zur Folge hätte, ist für  $z < 0,75 m$  die effektive Rauchschriftdicke  $d_{eff}$  gleich  $d_v$  anzunehmen.

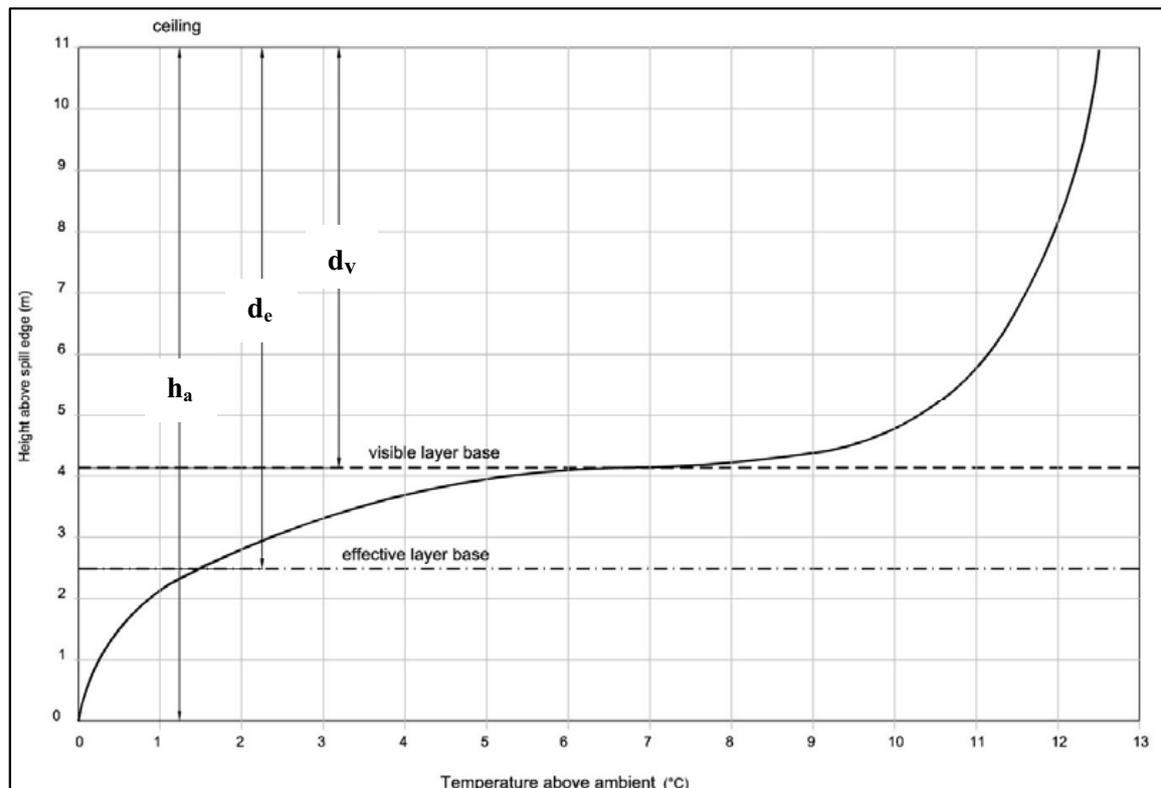


Abbildung 4.3: Typisches Temperaturprofil für ein "breites" Rauchreservoir mit erfolgter Korrektur der Rauchsichtdicke [7]

Eine weitere Möglichkeit das Einmischungsverhalten bei steigender Umgebungstemperatur mit zunehmender Höhe rechnerisch zu erfassen wäre die Variation des Einmischungskoeffizienten [9].

## 4.3 Vereinfachte Spill-Plume-Formeln

### 4.3.1 Form, Aufbau und Herleitung von BSP-Formeln

Im Vergleich zur unter *Pkt. 4.2* vorgestellten BRE-Methode besitzen diese Spill-Plume-Formeln einen einfacheren Aufbau - nur eine Gleichung.

Um die Ausbreitung des Spill-Plumes nach der Spill-Kante zu beschreiben wird bei den meisten dieser Methoden ein linienförmiger, virtueller Ursprung unterhalb der umströmten Kante angenommen. Der Abstand dieses Punktes von der Kante  $z_0$  ist abhängig vom zuströmenden Massenstrom  $M_b$ .

Als  $z$  wird der Abstand zwischen der umströmten Kante und der Höhe, in welcher der Rauchplume in die angesammelte Rauchsicht übergeht bezeichnet [siehe *Abb. 4.4*].

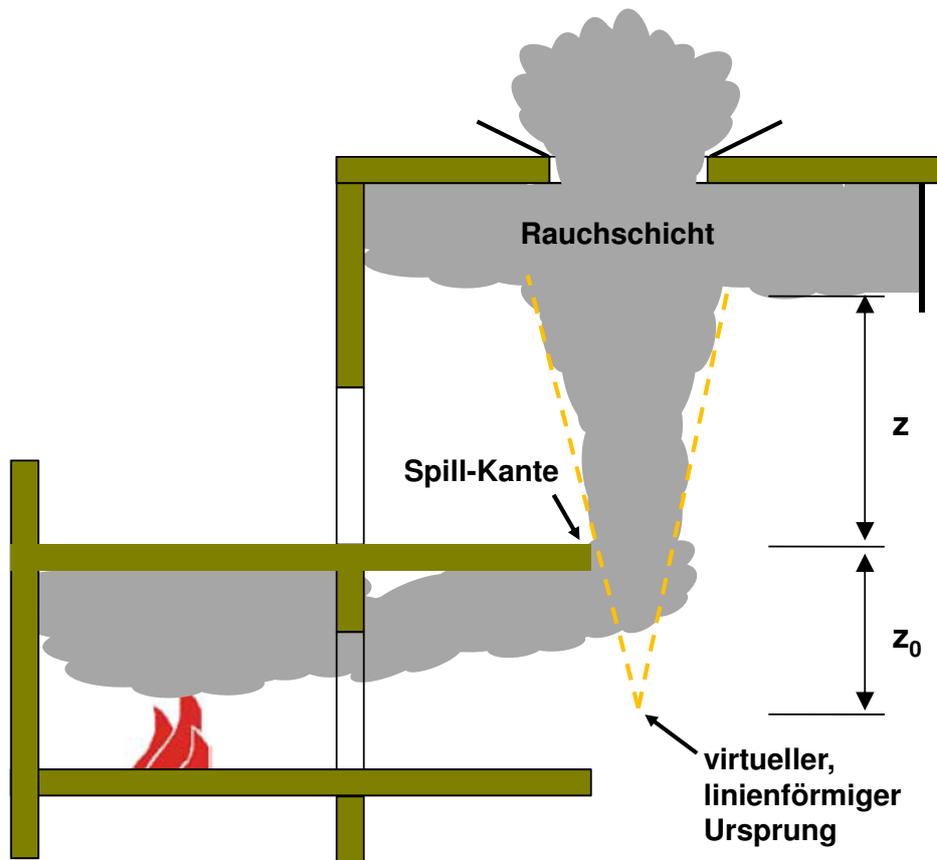


Abbildung 4.4: Freier Spill-Plume ausgehend von einem "virtuellen Ursprung", der in ein Rauchreservoir einströmt

Für den, von diesem linienförmigen Ursprung mit der seitlichen Ausdehnung  $W$  aufsteigenden Linienplume, wird beim Großteil der Verfahren eine Gauss'sche Verteilung der Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile angenommen (Ähnlichkeitsbedingungen). Diese Annahme basiert auf den Untersuchungen von Lee und Emmons, die ein theoretisches Modell zur Charakterisierung der Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung in auftriebsbehafteten linienförmigen Plumes entwickelten. Experimente mit Feuerplumes über Linienquellen ( $a \times b = 0,014 \times 1,98 \text{ m}$ ) zeigten eine lineare Steigerung der aufsteigenden Rauchgasmenge mit zunehmenden Abstand vom virtuellen Ursprung. Daraus folgte die Annahme eines konstanten Einmischungskoeffizienten.

Grundsätzlich sind diese vereinfachten Bestimmungsgleichungen alle folgendermaßen aufgebaut:

$$M_p = A z + B \quad (4.15)$$

Darin sind:

- |       |  |
|-------|--|
| $M_p$ | Rauchgasmassenstrom, der pro Sekunde in der Höhe $z$ in die Rauchschicht eintritt [ $\text{kg s}^{-1}$ ]                                     |
| $z$   | Aufstiegshöhe des thermischen Plumes, gemessen von der Balkondecke (Spill-Kante) bis zur angenommenen Rauchschicht-Unterkante [ $\text{m}$ ] |

- A* linearer Koeffizient für die Einmischung von Umgebungsluft in den Linienplume beim Aufsteigen im Atrium [ $kg\ s^{-1}m^{-1}$ ]
- B* Koeffizient, der die Einmischung des Linienplumes im Bereich der Spill-Kante definiert [ $kg\ s^{-1}$ ]. Auch an den freien Enden eingemischte Luft kann in diesem Term berücksichtigt werden

Vereinfachte Näherungsverfahren sind i. A. nur für frei aufsteigende Spill-Plumes heranzuziehen. Für anliegende ist die BRE-Methode [siehe Pkt. 4.2] zu verwenden.

Des Weiteren ist zu beachten, ob die einzelnen Methoden die Einmischung an den freien Enden des Plumes (3D-Spill-Plume) schon mit einschließen oder ob dies über Zusatzterme erfolgen kann.

In der Fachwelt sind teilweise kontroverse Ansichten über die Anwendungsgrenzen und die Zuverlässigkeit einzelner Berechnungsmethoden anzutreffen [5, 7, 9, 12, 20, 15, 19]. Die Bandbreite der erhaltenen Ergebnisse kann erheblich sein, je nach Szenarium und verwendetem Berechnungsansatz. Diese Streuung führt entweder zu unnötig hohen Kosten für überdimensionierte Entrauchungseinrichtungen, verbunden mit geringer Akzeptanz überzogener Brandschutzanforderungen, oder zu einer reduzierten Gebäudesicherheit.

Im Sinne einer leistbaren und trotzdem brandschutztechnisch sicheren Ausführung und Ausstattung derartiger Gebäude werden immer wieder Versuche zur Validierung und Weiterentwicklung einzelner Ansätze durchgeführt. Realbrandversuche sind jedoch aufwendig und ihre Ergebnisse oft nur eingeschränkt nachvollzieh- bzw. reproduzierbar. In den letzten Jahren ist es mit der fortschreitenden Entwicklung im Bereich der Brandschutz-Simulationssoftware möglich geworden derartige Szenarien mittels EDV mit geringerem Aufwand zu analysieren.

### 4.3.2 Methode nach Law (1986)

Um eine einfacher handhabbare Berechnungsweise als Alternative zur BRE-Methode bereitzustellen, rechnete Law die aus Brandversuchsreihen von Morgan und Marshall gewonnenen Daten mit einem modifizierten Rauchgasplume-Berechnungsansatz von Yokoi nach. Dieser hatte den in Gl. 4.16 angeführten Zusammenhang zwischen dem maximalen Temperaturanstieg im Rauchgasplume und der Energiefreisetzung des Brandes hergestellt [9].

$$\Delta T_g = \frac{6,98}{(z + z_0)} \left( \frac{Q}{\bar{W}} \right)^{2/3} \quad [K] \quad (4.16)$$

mit:

- $\Delta T_g$  maximaler Temperaturanstieg im aufsteigenden Plume [ $K$ ]
- $z$  vertikaler Abstand zwischen Brandquelle und Rauchsichtunterkante [ $m$ ]
- $z_0$  vertikaler Abstand zwischen virtuellem Ursprung und Brandquelle [ $m$ ]

$Q$	konvektiver Wärmestrom $[kW]$
$W$	Öffnungsbreite bzw. umströmte Kantenlänge (lichter Abstand der Rauchschürzen unter dem Balkon) $[m]$

Für den entlang der Decke zur Kante strömenden Rauchgasstrom wurde folgende Größe angenommen:

$$M_b = 0,025 (Q W^2)^{1/3} \quad [kg s^{-1}] \quad (4.17)$$

Law verglich das Verhältnis  $\Delta T_g : \frac{Q}{W}$  mit  $\Delta T_b : \frac{Q}{W}$ .

$\Delta T_b$  ist in diesem Fall der maximale Rauchgas-Temperaturanstieg an der Spill-Kante.

Daraus bestimmte er die Lage des virtuellen Linienplumes unter der Kante. Für  $z_0$  ergaben sich folgende Werte:

- $z_0 = 0,67 h_b$  : bei Übereinstimmung mit  $\Delta T_g$
- $z_0 = 0,50 h_b$  : bei Übereinstimmung mit  $\Delta T_b$

Dabei ist  $h_b$  die lichte Höhe zwischen Brandraumboden und Balkonplatte.

Den Massenstrom in Höhe  $z$  über der Kante bezifferte Law schlussendlich mit *Gl. 4.18*.

$$M_p = 0,34 (Q W^2)^{1/3} (z + 0,15 h_b) \quad [kg s^{-1}] \quad (4.18)$$

Diese Methode setzt "freie Plumes" und einen, an der Balkonunterseite durch Rauchschürzen in der Breite  $W$  begrenzten Rauchgasmassenzustrom voraus. Die seitlich an den freien Enden eingemischte Luftmasse wird mit dieser Formel berücksichtigt.

Unklar sind die Anwendungsgrenzen dieser Methode, da zu ihrer Herleitung die maximalen Temperaturanstiege im Plume  $\Delta T_g$  bzw.  $\Delta T_b$  herangezogen wurden, welche von der jeweiligen Rauchgasströmung und somit von Brandleistung und Geometrie stark abhängig sind [9].

### 4.3.3 Methode nach Thomas (1987)

Thomas befasste sich, ausgehend von den selben Versuchsdaten wie Law mit der Lage des virtuellen Ursprungs unter der Kante  $z_0$  in Abhängigkeit von der Höhe des Brandraumes  $h_b$  [7, 9, 19].

Wiederum über das Verhältnis  $\Delta T : \frac{Q}{W}$  zeigte er, dass folgender Zusammenhang gilt:

$$0,32 h_b \leq z_0 \leq 0,66 h_b$$

Die tatsächliche Größe von  $z_0$  ist aber stark abhängig von den Abmessungen des Versuchsaufbaus. Eine Bestimmungsgleichung für  $z_0$  ist in *Gl. 4.19* angegeben.

$$z_0 = d_b + \frac{M_b}{C Q^{1/3}} \quad [m] \quad (4.19)$$

darin sind:

$d_b$	Rauchschichtdicke unter dem Balkon [ $m$ ] ermittelt z.B. nach Gl. 4.33
$M_b$	Rauchgasmassenstrom an der Spill-Kante [ $kg\ s^{-1}$ ]
$Q$	konvektive Brandleistung [ $kW$ ]
$C$	Koeffizient zur Berücksichtigung der Geometrie [ $-$ ]

Aus einer von Lee und Emmons für einen Plume über einer linienförmigen Quelle aufgestellten Beziehung quantifizierte Thomas den Rauchgasmassenstrom in Höhe  $z$  über der Kante mit Gl. 4.20.

$$M_p = 0,58 \rho_g \left( \frac{g Q W^2}{\rho_g c_p T_0} \right)^{1/3} (z + z_0) \quad [kg\ s^{-1}] \quad (4.20)$$

darin sind:

$\rho_g$  Dichte der Rauchgase

$$\rho_g = \frac{p}{R T_g} [kg\ m^{-3}] \quad (4.21)$$

$p$  Luftdruck, atmosphärischer Luftdruck  $p \approx 101.325$  [ $Pa$ ]

$R$  individuelle Gaskonstante, für trockene Luft  $R \approx 287,05$  [ $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ]

$T_g$  Temperatur der Rauchgase [ $K$ ]

$g$  Erdbeschleunigung,  $g = 9,81$  [ $m\ s^{-2}$ ]

$Q$  konvektive Brandleistung [ $kW$ ]

$W$  umströmte Kantenbreite (lichter Abstand der Rauchschrägen unter dem Balkon) [ $m$ ]

$c_p$  spezifische Wärmekapazität von Luft,  
 $c_p \approx const. = 1,01$  [ $kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ]

$T_0$  Temperatur der Umgebungsluft [ $K$ ]

Bringt man Gl. 4.20 in die verallgemeinerte Form aus Gl. 4.15 und setzt man für  $z_0$  die Beziehung aus Gl. 4.19, so erhält man Gl. 4.22.

$$M_p = 0,21 (Q W^2)^{1/3} (z + d_b + Q^{-1/3} M_b) \quad (4.22)$$

Der Faktor  $C$  wurde in Gl. 4.22 mit 1,00 angenommen und die Temperaturen zu  $T_g = T_0 = 20^\circ C$  gesetzt. Dies ist eine konservative Annahme.

Um Einmischung auch an den freien Seiten des Plumes zu berücksichtigen kann Gl. 4.22 um einen Term erweitert werden [siehe Gl. 4.23]. Mit zunehmender Aufstiegshöhe und bei tiefliegenden virtuellen Linienquellen wird demnach an den Seiten Umgebungsluft in größerem Ausmaß in den Plume gesogen. Je größer hingegen die Strömungsbreite  $W$ , desto geringer ist der Anteil dieser Einmischung am gesamten Massenstrom [siehe dazu auch Pkt. 5.2].

$$M_p = 0,21 (QW^2)^{1/3} (z + z_0) \left[ 1 + \frac{0,22 (z + 2z_0)}{W} \right]^{2/3} \quad [kg s^{-1}] \quad (4.23)$$

#### 4.3.4 Methode nach Law (1995)

Law kombinierte die von ihr abgeleitete Gl. 4.18 mit Versuchsdaten von Hansell et al. [11, 13]. Auch bei diesen Versuchen waren Rauchschrzen verwendet worden, um die umströmte Kantenlänge  $W$  zu begrenzen. Die Auswertung der Daten führte Law auf Gl. 4.24. Die seitliche Einmischung an den freien Enden des Spill-Plumes ist in dieser bereits berücksichtigt [9].

$$M_p = 0,31 (QW^2)^{1/3} (z + 0,25 h_b) \quad [kg s^{-1}] \quad (4.24)$$

darin sind:

$M_p$	Rauchgasmassenstrom, der pro Sekunde in der Höhe $z$ in die Rauchschrze eintritt [ $kg s^{-1}$ ]
$Q$	konvektive Brandleistung [ $kW$ ]
$W$	umströmte Kantenbreite (lichter Abstand der Rauchschrzen unter dem Balkon) [ $m$ ]
$z$	Aufstiegshöhe gemessen ab Spill-Kante [ $m$ ]
$h_b$	Höhe des Brandraumes bzw. lichte Höhe zwischen Bodenplatte und Balkonplatte [ $m$ ]

Anstatt des Faktors 0,31 ist auch der Wert 0,36 in britischen Regelwerken [39] zur Dimensionierung von Entrauchungsmaßnahmen zu finden (Abweichung ca. 16%). Dort wird auch empfohlen, dass zur Anwendung dieser Berechnungsmethode  $\frac{z}{W} < 5$  gelten sollte.

#### 4.3.5 Methode laut NFPA 92 B

Die in der US-amerikanischen Norm [36] verwendete Gleichung beruht auf Laws Formel, mit der man Ergebnisse aus maßstäblichen Versuchen nachrechnete. So wurde Gl. 4.24 zu Gl. 4.25. Die daraus resultierende Rauchgasmasse ist um ca. 32% höher als in Law's ursprünglicher Version. Dabei gilt es das Verhältnis  $\frac{z}{W} < 13$  einzuhalten.

$$M_p = 0,41 (QW^2)^{1/3} (z + 0,25 h_b) \quad [kg s^{-1}] \quad (4.25)$$

mit:

$M_p$	Rauchgasmassenstrom, der pro Sekunde in der Höhe $z$ in die Rauchschiicht eintritt [ $kg s^{-1}$ ]
$Q$	konvektive Brandleistung [ $kW$ ]
$W$	umströmte Kantenbreite (lichter Abstand der Rauchschrürzen unter dem Balkon) [ $m$ ]
$z$	Aufstiegshöhe gemessen ab Spill-Kante [ $m$ ]
$h_b$	Höhe des Brandraumes bzw. lichte Höhe zwischen Bodenplatte und Balkonplatte [ $m$ ]

In [36] ist zusätzlich ein Erweiterungsterm angegeben [siehe Gl. 4.26], der wiederum Einmischung an den freien Seiten berücksichtigen soll. Da diese in der Ausgangsversion von Law jedoch bereits enthalten ist, liegt die Annahme nahe, dass diese Formel sehr konservative Ergebnisse liefert.

$$M_p = 0,41 (QW^2)^{1/3} (z + 0,25 h_b) \left[ 1 + \frac{0,063 (z + 0,6 h_b)}{W} \right] \quad [kg s^{-1}] \quad (4.26)$$

### 4.3.6 Methode nach Poreh et al.

Gl. 4.27 stellt einen Zusammenhang zwischen dem Rauchgasmassenstrom aus dem Linienplume und der konvektiven Wärmeleistung des Brandes her [16]. Der virtuelle Ursprung des Linienplumes wird in Höhe der Rauchschiichtunterkante des Rauchgassstromes unter dem Balkon angenommen ( $z_0 = d_b$ ). Das heißt durch die Wirbel an der Kante wird gleich viel Luft eingemischt wie in der virtuellen Region des Plumes.

$$M_p = Q^{1/3} C \left( z + d_b + \frac{M_b}{C Q^{1/3}} \right) \quad [kg s^{-1}] \quad (4.27)$$

darin sind:

$M_p$	Rauchgasmassenstrom, der pro Sekunde in der Höhe $z$ in die Rauchschiicht eintritt [ $kg s^{-1}$ ]
$Q$	konvektiver Wärmestrom [ $kW$ ]
$C$	eine Konstante [ $kg m s^{-1} kW^{-1/3}$ ]
$z$	Aufstiegshöhe des thermischen Plumes von der Balkonkante bis zur Rauchschiicht [ $m$ ]
$d_b$	Rauchschiichtdicke unter dem Balkon [ $m$ ]
$M_b$	Rauchgasmassenzustrom an der Spill-Kante [ $kg s^{-1}$ ]

Die Konstante  $C$  ist definiert als:

$$C = 0,3 C_m \rho_0 W^{2/3} \quad (4.28)$$

mit:

$C_m$	experimentell ermittelter, dimensionsloser Einmischungskoeffizient [–] 0,44 für freie Plumes 0,21 für anliegende Plumes
$\rho_0$	Dichte der Umgebungsluft [ $kg\ m^{-3}$ ] bei $20^{\circ}C$ Umgebungslufttemperatur $\rho_0 \approx 1,21$
$W$	umströmte Kantenlänge (lichter Abstand der Rauchschürzen unter dem Balkon) [ $m$ ]

Die Einmischung in einen definierten Massenstrom  $M_b$  lässt sich somit in Abhängigkeit von der Aufstiegshöhe des Plumes  $z$  und der Breite der umströmten Kante  $W$  berechnen. Die Einmischung an den freien Seiten wird bei dieser Methode nicht berücksichtigt.

Aufgrund der Versuchsanordnung aus der die Konstante  $C_m$  abgeleitet wurde, sollte sich die Anwendung dieser Formel auf "großflächige Rauchreservoirs" [siehe Pkt. 4.2.4] beschränken (d.h.  $d < 0,67 \sqrt{A_{res}}$ ) [9].

Die, ab der Kante eingemischte Luftmenge, kann man mittels Gl. 4.29 bestimmen.

$$(M_p - M_b) = B Q^{1/3} W^{2/3} (z + d_b) \quad [kg\ s^{-1}] \quad (4.29)$$

Darin ist:

$$B = 0,3 C_m \rho_0 \quad (4.30)$$

Für freie Plumes ohne Einmischung an den Seiten und  $\rho_0 = 1,21\ kg\ m^{-3}$  folgt  $B = 0,16$ .

Einsetzen dieser Werte in Gl. 4.29 führt somit auf:

$$M_p = 0,16 (Q W^2)^{1/3} (z + d_b) + M_b \quad (4.31)$$

Bei der Anwendung dieser Formel sind vorab also zwei Größen des Rauchgasmassenzustromes zu ermitteln. Um den notwendigen Rechengang zu verkürzen, substituierten Thomas et al.  $d_b$  über folgenden Zusammenhang, der sich aus den Versuchsdaten von Poreh et al. ableiten lässt [12]:

$$\frac{d_b \left(\frac{Q}{W}\right)^{1/3}}{\left(\frac{M_b}{W}\right)} = 2,50 \left(1 + \frac{Q}{c_p T_0 M_b}\right) \quad (4.32)$$

Mit  $c_p \approx 1,01\ [kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}]$  und  $T_0 = 293\ [K]$  für die Umgebungsluft ergibt sich Gl. 4.33. Die ursprüngliche Formel von Poreh et al. lässt sich durch Einsetzen zu Gl. 4.34 weiter vereinfachen.

$$d_b = 2,50 \frac{M_b}{(Q W^2)^{1/3}} + 0,0084 \left(\frac{Q}{W}\right)^{2/3} \quad (4.33)$$

$$M_{pl} = 0,16 (Q W^2)^{1/3} z + 0,0014 Q + 1,4 M_b \quad (4.34)$$

Anwendungsbereiche dieser Methode sind aufgrund der Ausgangsdaten und Annahmen wiederum frei aufsteigende Spill-Plumes ohne Einmischung an den Seiten, die in "großflächige Rauchreservoirs" einströmen.

Für "kleine Rauchreservoirs" prognostizierte Poreh für diese Methode einen größeren Einmischungskoeffizienten ( $C = 0,25$ ). Dies ist jedoch nur eine Schätzung und sollte alleine zur Dimensionierung nicht verwendet werden [9].

### 4.3.7 Methode nach Thomas et al. (1998)

Im Unterschied zu den anderen genannten Methoden wird bei dieser auf die Annahme eines virtuellen Ursprungs unter der Kante verzichtet. Auch die Ähnlichkeitsbedingungen im Plume wurden zur Herleitung nicht herangezogen.

Analyse der Daten von Marshall und Harrison sowie von Poreh et. al führten Thomas et al. auf folgenden verallgemeinerten Zusammenhang [11]:

$$\frac{M'_p}{Q'} = \alpha \frac{z}{Q'^{2/3}} + \gamma \frac{M'_b}{Q'} + \beta \quad (4.35)$$

darin sind:

$M'_p = \frac{M_p}{W}$  Verhältnis des aufsteigenden Massenstroms zur Länge der umströmten Kante [ $kg s^{-1} m^{-1}$ ]

$M'_b = \frac{M_b}{W}$  Verhältnis des Massenstroms an der Kante zur Länge der umströmten Kante [ $kg s^{-1} m^{-1}$ ]

$Q' = \frac{Q}{W}$  Verhältnis des konvektiven Wärmestroms der Rauchgase zur Länge der umströmten Kante [ $kW m^{-1}$ ]

$\alpha, \beta, \gamma$  Regressionskoeffizienten

$z$  Aufstiegshöhe des thermischen Plumes von der Balkonkante bis zur Rauchsicht [ $m$ ]

Durch Einsetzen und Umformen erhält man aus Gl. 4.35 die in Gl. 4.36 angeführte Form.

$$M_p = \alpha z Q^{1/3} W^{2/3} + \beta Q + \gamma M_b \quad (4.36)$$

Für frei aufsteigende BSP in große Rauchreservoirs ließen sich folgende Werte für die Koeffizienten ermitteln:

$\alpha = 0,16$  (weitere mögliche Werte für  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Breite  $W$  siehe Pkt. 5.2)

$\beta = 0,0027$

$\gamma = 1, 20$

Daraus ergibt sich Gl. 4.37.

$$M_p = 0,16 z Q^{1/3} W^{2/3} + 0,0027 Q + 1,2 M_b \quad [kg s^{-1}] \quad (4.37)$$

$M_p$	Rauchgasmassenstrom, der pro Sekunde in der Höhe $z$ in die Rauchschiicht eintritt [ $kg s^{-1}$ ]
$z$	Aufstiegshöhe des thermischen Plumes von der Balkonkante bis zur Rauchschiicht [ $m$ ]
$Q$	konvektiver Wärmestrom [ $kW$ ]
$W$	umströmte Kantenbreite (lichter Abstand der Rauchschiürzen unter dem Balkon) [ $m$ ]
$M_b$	Rauchgasmassenzustrom an der Spill-Kante [ $kg s^{-1}$ ]

In der Literatur ist für die Koeffizienten auch  $\beta = 0,0014$  und  $\gamma = 1,20$  zu finden. Diese Werte sind beispielsweise in britischen Regelwerken angeführt [39].

Gl 4.37 kann um einen Term zur Berücksichtigung der seitlichen Einmischung erweitert werden:

$$M_f = 0,09 z \left( \frac{Q}{W} \right)^{1/3} \quad [kg s^{-1}] \quad (4.38)$$

Dies gilt jedoch nur, wenn die Aufstiegshöhe  $z$  im Vergleich zur umströmten Kantenbreite  $W$  nicht "zu groß" ist [9].

### 4.3.8 Methode nach Harrison (2004)

Diese Bestimmungsgleichung leitet sich aus Versuchen im Maßstab 1:10 in Anlehnung an die Methode von Poreh et al. ab [9]. Die Versuchsanordnung ist in Abb. 4.5 dargestellt.

Die Breite  $W$  des Rauchgaszustromes an der Unterseite der horizontalen Balkonplatte wurde bei diesen Versuchen durch Rauchschiürzen festgelegt.

Law's Versuche und Simulationen zeigten, dass die Werte für  $(M_p - M_b)$  und  $(Q W^2)^{1/3} (z + d_b)$  einen linearen Zusammenhang beschreiben [siehe Abb. 4.6], wobei  $d_b$  die Dicke des Rauchgasmassenzustromes  $M_b$  ist.

Harrison trug also seine Versuchsergebnisse in dieser Form auf und legte eine lineare Ausgleichsgerade durch die erhaltenen Punkte [siehe Abb. 4.6].

Die Gleichung dieser Ausgleichsgeraden lautet:

$$M_p - M_b = 0,195 Q^{1/3} W^{2/3} (z + d_b) \quad (4.39)$$

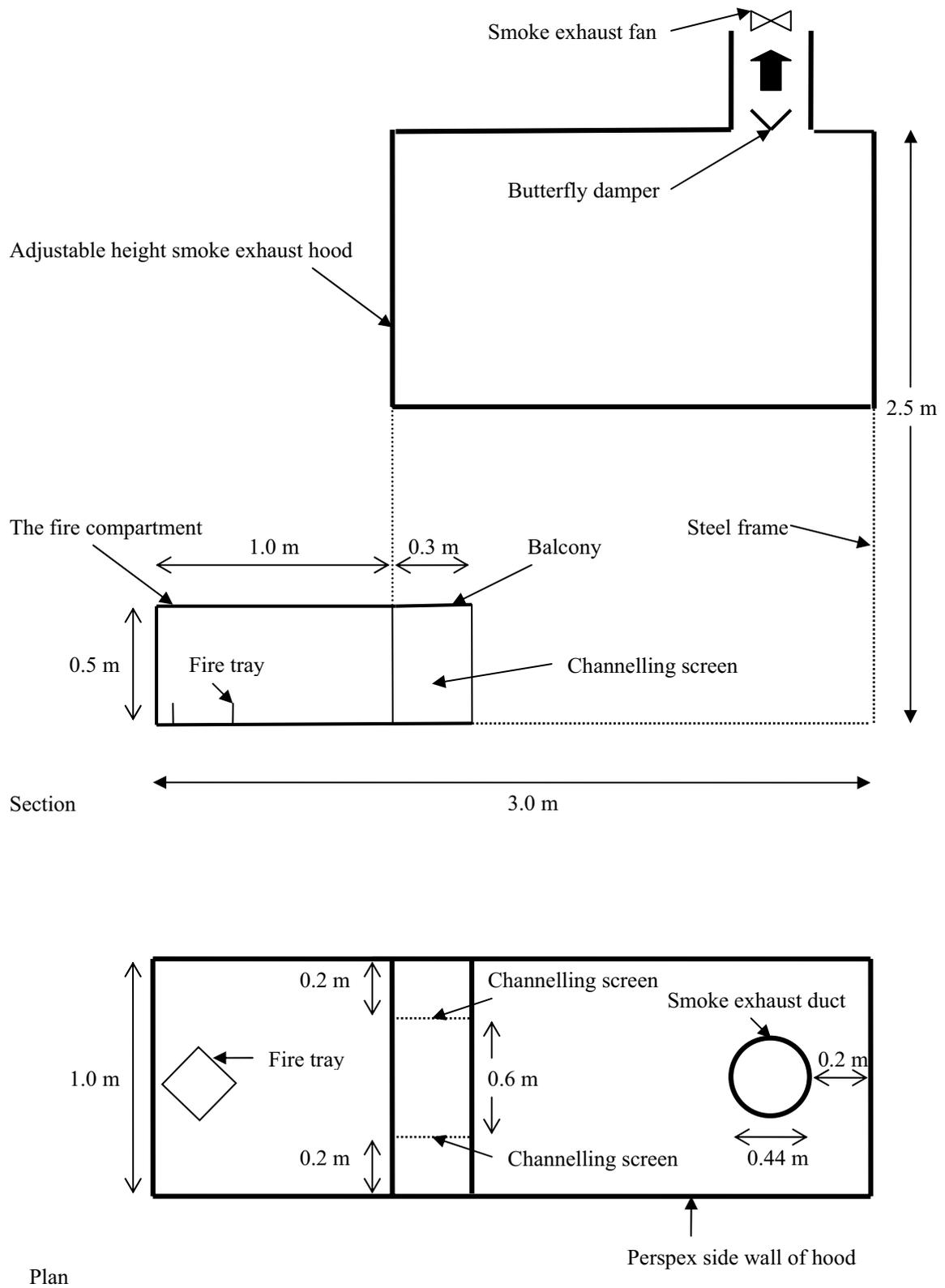


Abbildung 4.5: Versuchsaufbau von Harrison in Grundriss und Schnitt [9]

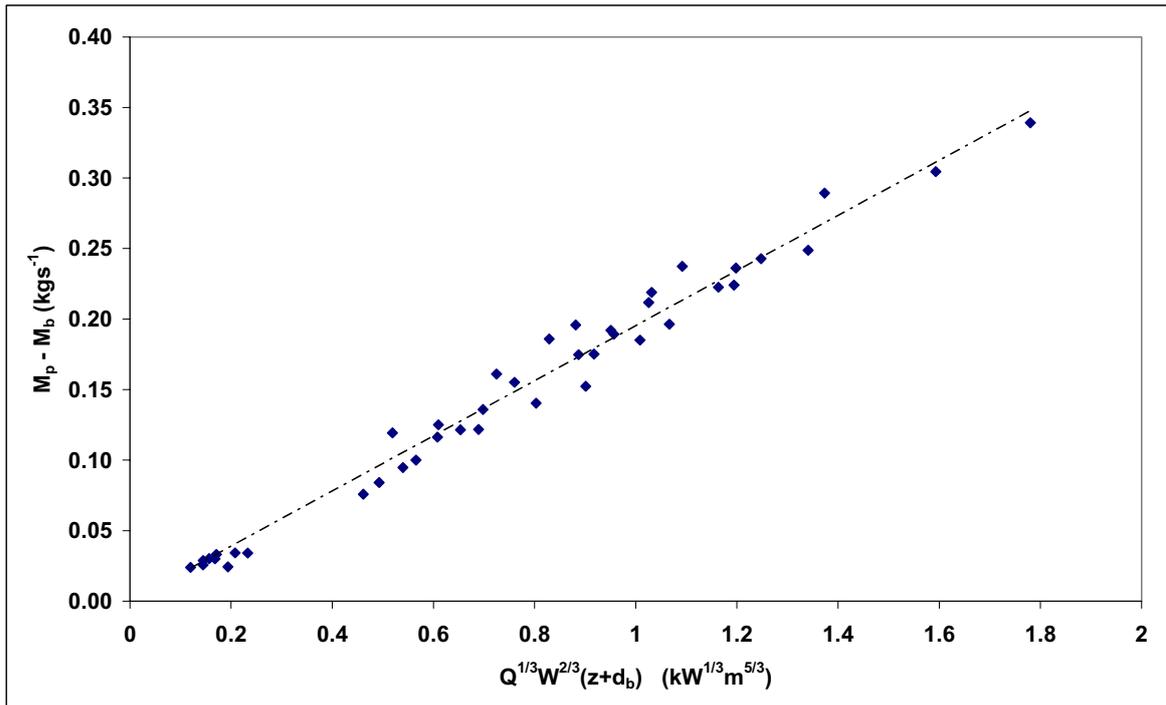


Abbildung 4.6:  $(M_p - M_b)$  in Abhängigkeit von  $(Q W^2)^{1/3} (z + d_b)$  laut Harrison's Versuchsergebnissen mit Ausgleichsgeraden [9]

Den auftretenden Faktor 0,195 rundete Harrison zu 0,20 und so ergibt sich Gl. 4.40.

$$M_p = 0,20 (Q W^2)^{1/3} (z + d_b) + M_b \quad (4.40)$$

Mit Hilfe von Gl. 4.33 kann  $d_b$  wiederum substituiert werden. Damit braucht mit  $M_b$  nur ein Parameter des Rauchgasmassenzustromes bestimmt werden und man erhält Gl. 4.41.

$$M_p = 0,20 Q^{1/3} W^{2/3} z + 0,0017 Q + 1,5 M_b \quad [kg s^{-1}] \quad (4.41)$$

Gl. 4.41 bezieht sich auf einen frei aufsteigenden Spill-Plume wobei Einmischung an den freien Seiten Berücksichtigung findet.

Der von Poreh mit 0,16 bezifferte Faktor wird von Harrison mit  $B = 0,20$  höher angesetzt. Diese ca. 25%-ige Vergrößerung ergibt sich aus der Miteinrechnung der seitlichen Einmischung. Diese liegt also Harrison zufolge etwas niedriger als die von Marshall und Harrison behaupteten 30% [siehe Pkt. 3.3.1].

Die Gültigkeit von Gl. 4.41 ist auf "große Rauchreservoirs" [siehe Pkt. 4.2.4] beschränkt und weiters sollte folgendes Verhältnis zwischen der Aufstiegshöhe  $z$  und der umströmten Kantenbreite  $W$  eingehalten werden:

$$\frac{z}{W} < 2 \quad (4.42)$$

## 4.4 Vergleich der vorhandenen Berechnungsmethoden und ihrer Anwendungsbereiche

### 4.4.1 Vergleich der einzelnen Formelansätze

Nach der in *Gl. 4.15* vorgestellten Grundform aller vereinfachten Spill-Plume-Formeln  $M_p = Az + B$  kann man die Koeffizienten der existierenden Berechnungsmethoden vergleichen.

Dieser Vergleich ist nachfolgend in *Tab. 4.1* und *Tab. 4.2* angeführt. Weiters sind darin die wichtigsten Anwendungseinschränkungen und Annahmen zusammengestellt.

Methoden	Jahr	Faktor A	Faktor B	Eignung für anliegende BSP	Einmischung an den freien Seiten	einschränkende Bedingungen	siehe Pkt.
BRE-Methode	1779	-	-	ja	ja	Rauchschränzen unter dem Balkon $z > 3m$ ev. Korrektur der Rauchschränzendicke ( $d_v \rightarrow d_{eff}$ )	4.2
Law	1986	$0,34 (QW^2)^{1/3}$	$A (0,15 h_{br})$	nein	ja	Rauchschränzen unter dem Balkon	4.3.2
Thomas	1987	$0,21 (QW^2)^{1/3}$	$A (d_b + Q^{-1/3} M_b)$	nein	über Zusatzterm	-	4.3.3
Law	1995	$0,31 (QW^2)^{1/3}$	$A (0,25 h_{br})$	nein	ja	Rauchschränzen unter dem Balkon	4.3.4
BSI nach Law	1995	$0,36 (QW^2)^{1/3}$	$A (0,25 h_{br})$	nein	ja	Rauchschränzen unter dem Balkon	4.3.4
NFPA nach Law	2005	$0,41 (QW^2)^{1/3}$	$A (0,25 h_{br})$	nein	ja, und Zusatzterm	-	4.3.5
Poreh et al.	1998	$0,16 (QW^2)^{1/3}$	$A d_b + M_b$	ja, über Faktor $C_m$	nein	"großflächiges" Rauchreservoir ( $d < 0,67 \sqrt{A_{res}}$ )	4.3.6

Tabelle 4.1: Vergleich der vorhandenen BSP-Berechnungsformeln (1)

Methoden	Jahr	Faktor A	Faktor B	Eignung für anliegende BSP	Einmischung an den freien Seiten	einschränkende Bedingungen	siehe Pkt.
Thomas et al.	1998	$0,16 (Q W^2)^{1/3}$	$0,0027 Q + 1,2 M_b$	nein	über Zusatzterm	"großflächiges" Rauchreservoir $W$ gegenüber $z$ "nicht zu klein"	4.3.7
BSI nach Thomas et al.	1995	$0,16 (Q W^2)^{1/3}$	$0,0014 Q + 1,4 M_b$	nein	über Zusatzterm	"großflächiges" Rauchreservoir $W$ gegenüber $z$ "nicht zu klein"	4.3.7
Harrison nach Poreh et al.	2004	$0,20 (Q W^2)^{1/3}$	$0,0017 Q + 1,5 M_b$	nein	ja	Rauchschrägen unter dem Balkon "großflächiges" Rauchreservoir $\frac{z}{W} < 2$	4.3.8

Tabelle 4.2: Vergleich der vorhandenen BSP-Berechnungsformeln (2)

#### 4.4.2 Vergleichsrechnungen

Zum Vergleich der einzelnen vereinfachten BSP-Berechnungsansätze wurden verschiedene Szenarien ausgewertet. In *Abb. 4.7* ist exemplarisch eine dieser Auswertungen für einen  $7,3\text{ MW}$  Brand (konvektive Brandleistung  $Q \approx 5,0\text{ MW}$ ) und einer, durch Rauchschürzen festgelegten, umströmten Kantenlänge von  $10,0\text{ m}$  dargestellt.

Der aus dieser Graphik abzuleitende Trend war bei allen Rechnungen zu beobachten. Es zeigt sich, dass die vorhandenen Formeln auch bei niedrigen Aufstiegshöhen und kleinen Brandleistungen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen. Harrison fand durch Nachrechnung seiner Versuche und Simulationen heraus, dass für sehr kleine Aufstiegshöhen bis zu einem Meter die Einmischung in den BSP durch die vereinfachten Formeln unterschätzt wird. Dieser Bereich ist aber für die Bemessungspraxis ohne Bedeutung. Ab Aufstiegshöhen von ca.  $3\text{ m}$  und höher wird die Einmischung aber mit allen Methoden überquantifiziert [9].

Mit zunehmender Aufstiegshöhe und höheren Brandleistungen wächst die Abweichung zwischen den einzelnen Formeln. Generell liefern die in den US-amerikanischen (NFPA) und britischen Regelwerken (BSI) empfohlenen Methoden immer die größten Ergebnisse, während die Ansätze von Poreh und Thomas viel kleinere Massenströme prognostizieren (z.B. beträgt die Abweichung zwischen "NFPA nach Law" und "Poreh et al." für  $5,0\text{ m}$  Aufstiegshöhe schon ca. 120% !).

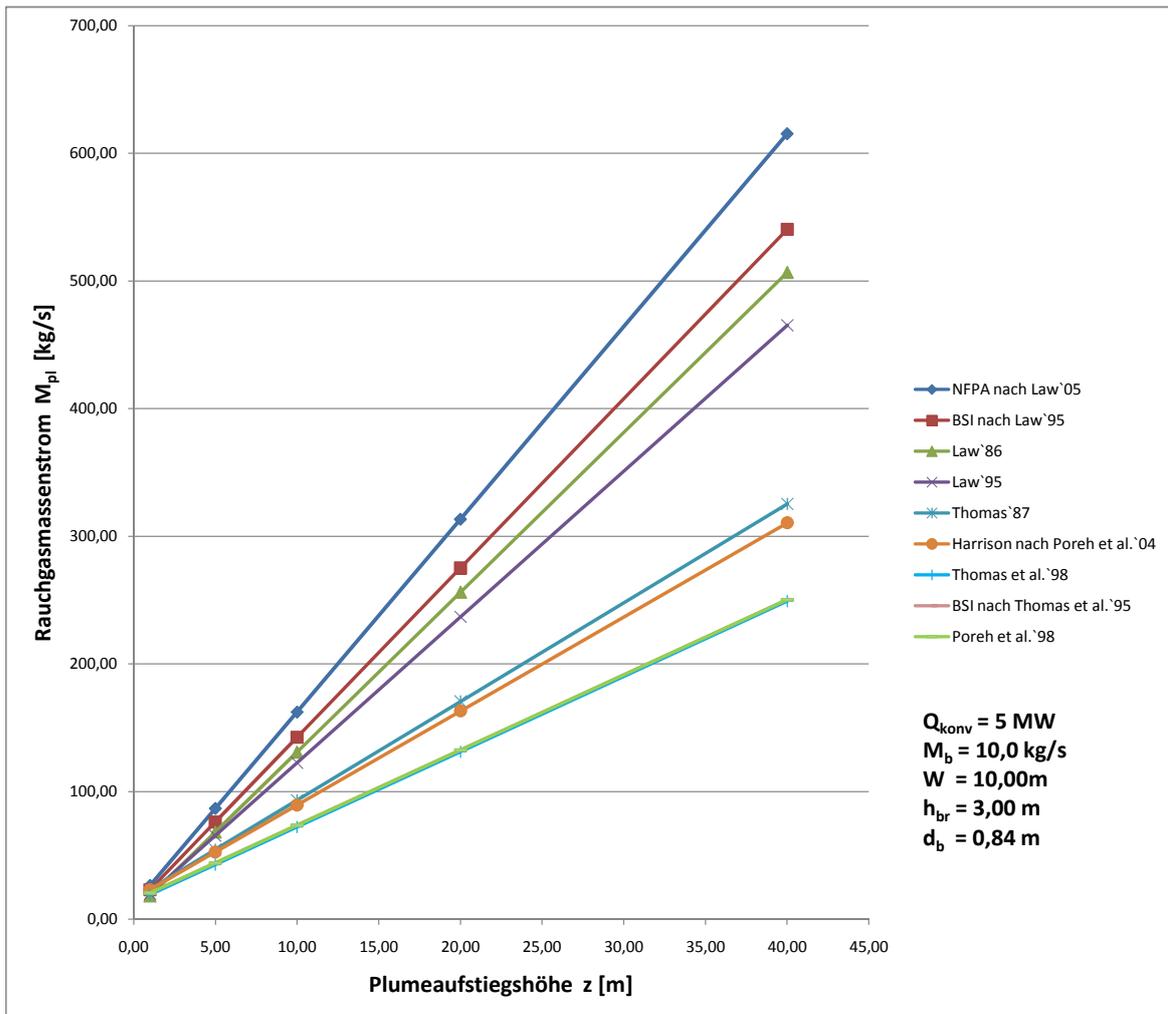


Abbildung 4.7: Vergleich der vereinfachten BSP-Berechnungsformeln Rauchgasmassenstrom mit zunehmender Aufstiegshöhe

# Kapitel 5

## Eingangsgrößen für BSP-Formeln

### 5.1 Wärmeleistung $Q$ an der umströmten Kante

Bei allen Methoden zur Bestimmung der Einmischungsrate wird die konvektive Wärmeleistung  $Q$  des angenommenen Brandes als Eingangsgröße benötigt. Der zugrundeliegende Bemessungsbrand muss in Abhängigkeit von den vorhandenen Brandlasten, Nutzungen und den zu erfüllenden Schutzziele definiert werden [siehe Pkt. 2.3.3].

In Abb. 5.1 ist der Einfluss der Brandleistung auf das Ergebnis der vereinfachten Berechnungsformeln für BSP dargestellt. Bei einer angenommenen Strömungsbreite  $W = 15,0\text{ m}$  und einer Aufstiegshöhe im Atrium von  $z = 10,0\text{ m}$  variiert die Brandleistung  $Q$ . Der Rauchgasmassenzustrom  $M_b$  wurde dabei mittels Gl. 2.17 berechnet und die Einmischung unter der Kante durch Gl. 5.13 abgeschätzt.

Die Werte für die Koeffizienten von  $A$  und  $B$  sind bei den unter Pkt. 4.3 angeführten Methoden sehr unterschiedlich. Für die folgende Betrachtung wurden Mittelwerte dieser Koeffizienten gebildet:

$$A = 0,200 (Q W^2)^{1/3} \quad (5.1)$$

$$B = 0,002 Q + 1,4 M_b \quad (5.2)$$

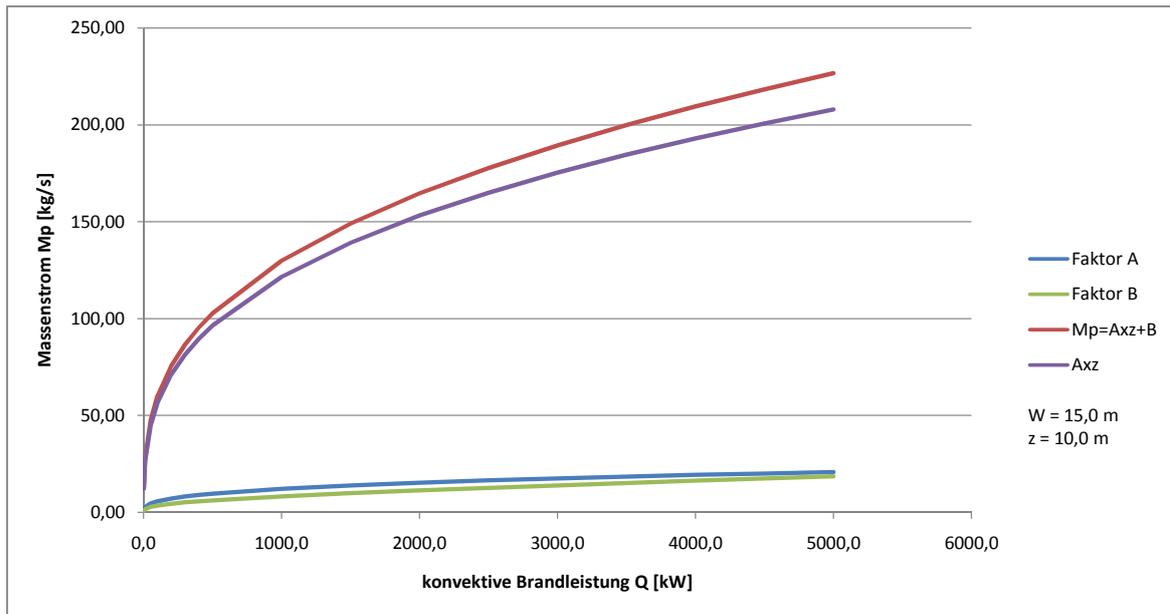


Abbildung 5.1: Einfluss der konvektiven Brandleistung  $Q$  auf die Größe der Faktoren  $A$ ,  $B$  und die Größe des entstehenden Massenstroms

$$M_p = 0,200 (Q W^2)^{1/3} + 0,002 Q + 1,4 M_b$$

Wie aus *Abb. 5.1* hervorgeht, kann eine geringe Änderung der Brandleistung einen sehr großen Anstieg bzw. Rückgang des Plume-Massenstromes hervorrufen. Die Wahl des richtigen Bemessungsbrandes und dessen Parameter sind deswegen sorgfältig zu treffen bzw. kritisch zu hinterfragen. Weiters ist darauf zu achten, dass der verwendete Berechnungsansatz für die vorliegende Brandleistung auch geeignet und validiert ist.

## 5.2 Umströmte Kantenbreite $W$

### 5.2.1 Durch Rauchschürzen festgelegte Strömungsbreite

Bei allen BSP-Berechnungsmethoden wird das Vorhandensein von Rauchschürzen unter der Balkonplatte vorausgesetzt. Diese sollen den Rauchgasmassenzustrom  $M_b$  bis zur Kante kanalisieren und so eine unkontrollierte seitliche Ausbreitung entlang der Decke und anschließend im Atrium unterbinden. Die umströmte Kantenbreite  $W$  ist in diesem Fall gleich dem Abstand der Rauchschürzen [*siehe Abb. 5.2*].

Bei der BRE-Methode geht die umströmte Breite als linearer Faktor zur Quantifizierung des Rauchgasmassenzustromes ein [*siehe Gl. 4.1*].

In allen vereinfachten BSP-Formeln ist  $W^{2/3}$  ein Teil des Faktors  $A$  [*siehe Gl. 4.15*]. Ihr Einfluss nimmt mit zunehmender Breite ab [*siehe Abb. 5.3*].

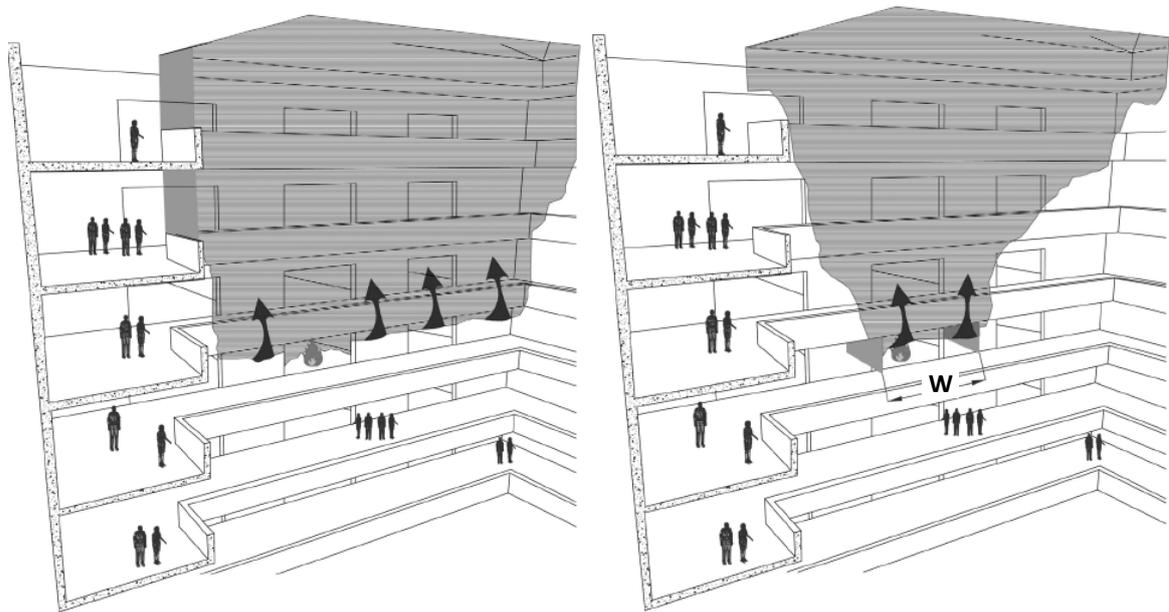


Abbildung 5.2: Seitliche Rauchausbreitung unter einem Balkon ohne (*links*) und mit (*rechts*) Rauchschürzen [7]

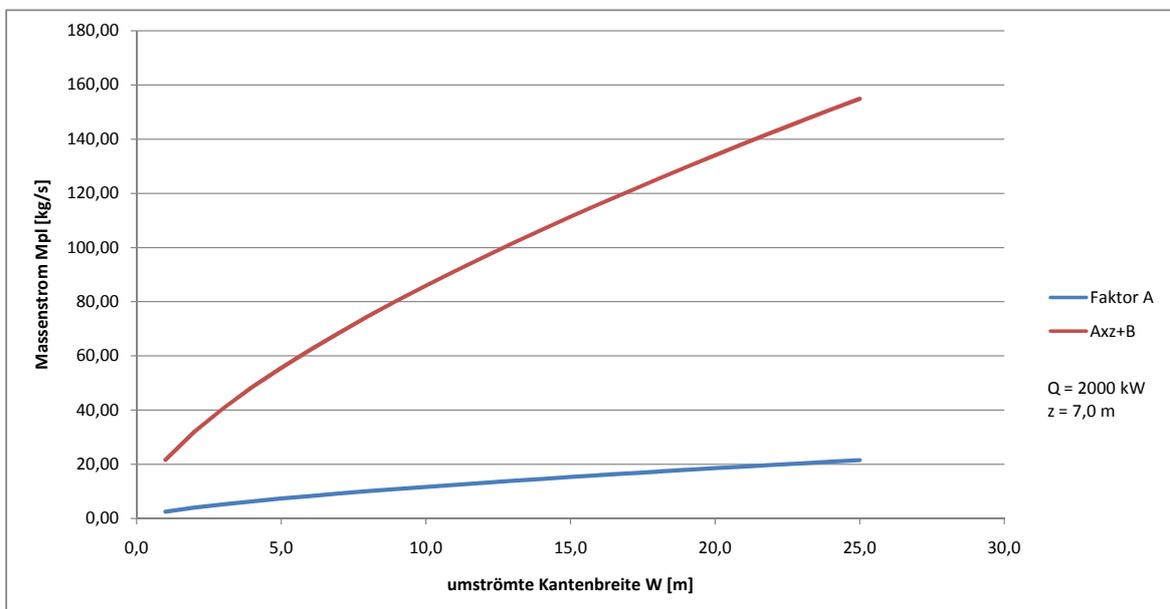


Abbildung 5.3: Einfluss der umströmten Kantenbreite  $W$  auf die Größe des entstehenden Massenstroms

## 5.2.2 Annahme von $W$ bei fehlenden Rauchschürzen

Sind keine Rauchschürzen an der Unterseite der Balkonplatte angebracht ist die Breite  $W$  der umströmten Kante nicht klar festgelegt. Dieser Fall ist in der Bemessungspraxis häufig anzutreffen oder kann auch durch einen Defekt vorgesehener, mobiler Rauchschürzen eintreten.

### 5.2.2.1 Einfache Abschätzformel

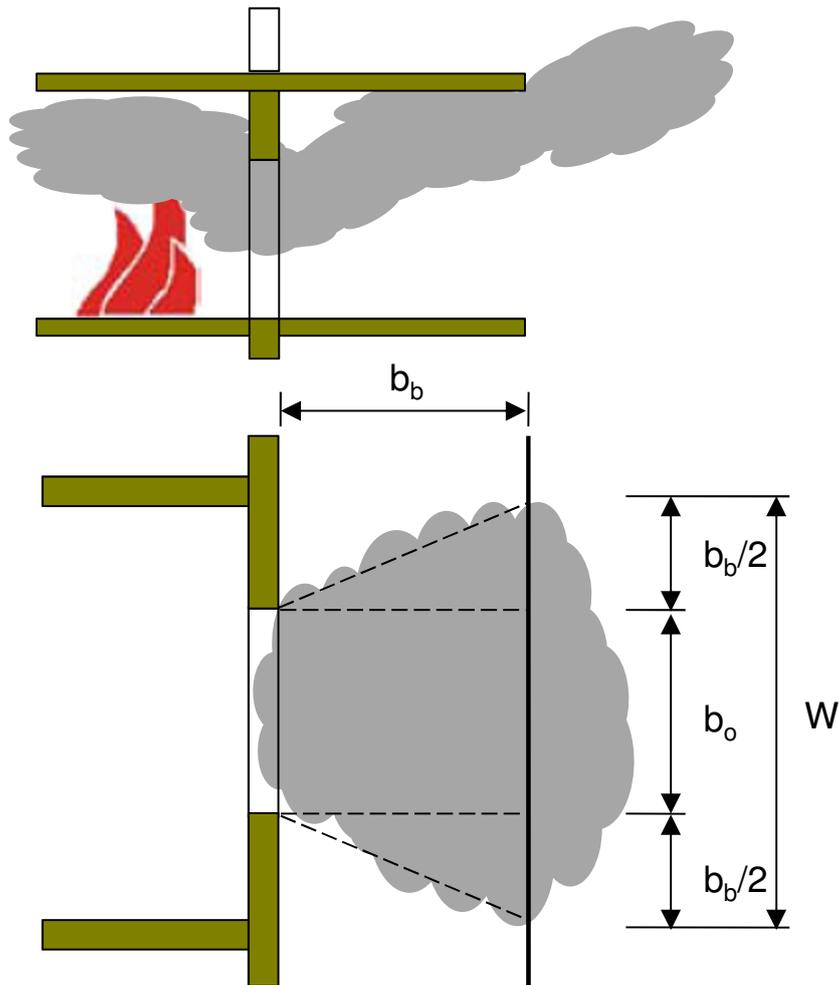
Eine von Law empfohlene, lange bekannte einfache Abschätzformel wird im NFPA-Code [36] mit *Gl. 5.3* angegeben. Für den Rauchgasstrom entlang der Decke wird ein horizontaler Ausbreitungswinkel von jeweils  $22,5^\circ$  angenommen [siehe *Abb. 5.4*].

$$W = b_b + b_o \quad [m] \quad (5.3)$$

Darin sind:

$b_b$             horizontaler Abstand zwischen Brandraumöffnung und Spill-Kante [ $m$ ]  
(i.d.R. gleich der Breite des Balkons)

$b_o$             Breite der Brandraumöffnung [ $m$ ]

Abbildung 5.4: Ermittlung von  $W$  nach NFPA 92B

Gl. 5.3 ist empirisch begründet. Es sind keine weiteren Bedingungen oder einschränkenden Annahmen zur Anwendung dieser Methode definiert.

### 5.2.2.2 Neuer Berechnungsansatz von Schneider

Aktuelle Forschungen von Schneider [1, 3] zur Bestimmung der umströmten Kantenbreite  $W$  bei fehlenden Rauchschürzen zeigen einen anderen Ansatz zur Lösung dieses Problems auf.

Im Gegensatz zu den vorhandenen, empirisch begründeten Zusammenhängen wurde folgende theoretische Herangehensweise gefunden:

- Bilanzierung der Wärmeenergie des Rauchgasmassenstromes zwischen Brandraumöffnung (Index  $w$ ) und Überlaufkante (Index  $b$ ) nach Gl. 5.4.  $T_g$  [K] ist darin die Rauchgastemperatur an der Brandraumöffnung und  $T_b$  steht für die Temperatur der Rauchgase an der Spillkante.

$$M_w c_p (T_g - T_0) = M_b c_p (T_b - T_0) \quad (5.4)$$

Konvektive Wärmeverluste im Bereich unter der Balkonplatte werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Aus Gl. 5.4 folgt für die Temperatur  $T_b$  folgender Zusammenhang:

$$T_b = \frac{M_w}{M_b} (T_g - T_0) + T_0 \quad (5.5)$$

- Mit der näherungsweise Annahme einer reibungsfreien Strömung kann der Impulserhaltungssatz für die untersuchte Rauchgasströmung nach Gl. 5.6 formuliert werden.  $v_g$  und  $v_b$  [ $m s^{-1}$ ] sind die auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten an der Brandraumöffnung bzw. an der Spillkante.

$$M_w v_g = M_b v_b \quad (5.6)$$

- Unter Voraussetzung einer konstanten Rauchsichtdicke  $d_b$  an der Überlaufkante lässt sich der auftretende Kantenmassenstrom mittels Gl. 5.7 berechnen.

$$M_b = v_b d_b W \rho_b \quad (5.7)$$

Die darin auftretende Dichte der Rauchgase  $\rho_b$  an der Kante ergibt sich aus der allgemeinen Gasgleichung zu  $\rho_b = \rho_g \frac{T_g}{T_b}$ . Damit und mit der aus Gl. 5.6 für die Strömungsgeschwindigkeit abgeleiteten Beziehung  $v_b = \frac{M_w}{M_b} v_g$  folgt Gl. 5.8.

$$M_b = \frac{M_w}{M_b} v_g d_b W \rho_g \frac{T_g}{T_b} \quad (5.8)$$

- Aus Gl. 5.8 lässt sich die gesuchte Breite  $W$  vorerst folgendermaßen berechnen.

$$W = \frac{M_b T_b}{\frac{M_w}{M_b} v_g d_b \rho_g T_g} \quad (5.9)$$

- Um die Breite  $b_o$  der Öffnung zu berücksichtigen, aus der die Strömung austritt, werden in Gl. 5.9 Zähler und Nenner um diese Größe erweitert. Weitere Umformungen führen schließlich auf Gl. 5.10 als Berechnungsformel für die gesuchte Strömungsbreite an der Überlaufkante.

$$W = b_o \frac{M_b}{M_w} \left[ 1 + \frac{T_0}{T_g} \left( \frac{M_b}{M_w} - 1 \right) \right] \quad (5.10)$$

Der Kantenstrom  $M_b$  sollte mit Hilfe des Ansatzes von Harrison [siehe Gl. 5.9] bestimmt werden. Als Alternative dazu schlägt Schneider auch Gl. 5.15 vor.

### 5.2.3 Einmischung an den freien Seiten - Beeinflussung durch $W$

In Abhängigkeit von  $W$  unterscheiden sich die Einmischungsraten an den seitlichen Enden des Spill-Plumes erheblich. Vergleichsrechnungen nach der Methode von Thomas

et. al [siehe Pkt. 4.3.7] ausgeführt von Spearpoint und Harrison [11] mit unterschiedlichen Werten für die umströmte Breite  $W$  und variierenden Brandleistungen zeigten, dass Plumes, die aus schmalen Öffnungen austreten an den freien Enden Umgebungsluft zu einem höheren Anteil einmischen. Die zugrundeliegenden Versuche im Maßstab 1 : 10 erfolgten mit Brandleistungen von  $Q_c = 3,6$  bis  $12,2 \text{ kW}$  und Öffnungsbreiten  $W = 0,2$  bis  $1,0 \text{ m}$ .

Abb. 5.5 zeigt die unterschiedlichen Plumeformen je nach Breite des Rauchgasmassenstromes an der Kante. Breite Öffnungen produzieren einen langgestreckten Linienplume während schmale Öffnungen eine eher axialsymmetrische Plumeform hervorrufen.

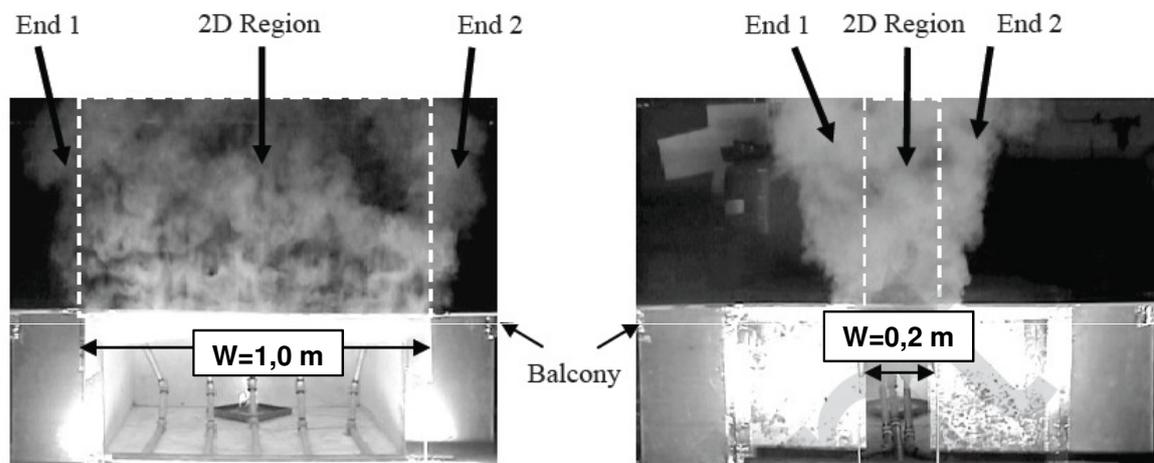


Abbildung 5.5: Einmischverhalten von Plumes aus Öffnungen mit unterschiedlicher Breite  $W$  aus Versuchen im Maßstab 1:10 [11]

- In die **2-D-Region** der Strömung mit gleichbleibender Breite  $W$  wird Umgebungsluft an nur zwei Seiten eingemischt [siehe Abb. 5.5].
- In die **3-D-Regionen** an den Seiten erfolgt Einmischung von drei Seiten. Diese Regionen werden breiter mit zunehmender Aufstiegshöhe. Ursprünglich schmale Plumes besitzen also mit zunehmender Höhe immer größere Einmischraten.

In der vereinfachten BSP-Formel nach Thomas et al. [siehe Gl. 4.35] wird der Einfluss der Kantenbreite  $W$  durch den Koeffizienten  $\alpha$  bestimmt. Dieser wurde unter Pkt. 4.3.7 für 2-D-Plumes konstant mit  $\alpha = 0,16$  angegeben.

Berücksichtigt man auch die 3-D-Regionen, so steigt dieser Koeffizient mit immer kleinerem  $W$  bis zu einem Maximalwert von  $\alpha \approx 0,38$  [11]. Bei den durchgeführten Versuchen im Maßstab 1:10 war er bis zu einer Breite  $W = 1,0 \text{ m}$  unabhängig von der Wärmeleistung  $Q$  des Brandes. Bei kleinerem  $W$  jedoch zeigte sich, dass  $\alpha$  sehr wohl von der Brandleistung beeinflusst wird.

Da sich mit der Variation von  $W$  bei gleicher Geometrie und Brandleistung (gleicher Massenstrom) nur die Dicke der unter dem Balkon strömenden Rauchsicht  $d_b$  ändert, wird angenommen, dass die Einmischung an den freien Seiten direkt proportional zu

dieser Größe ist. Ein schmaler Rauchgasmassenstrom mit großem  $d_b$  besitzt breitere freie Seiten, die mehr Umgebungsluft einmischen.

Diesen Zusammenhang verdeutlicht Gl. 5.11.

$$(\alpha_{3D} - \alpha_{2D}) \approx 0,25 \left( \frac{W}{d_b} \right)^{-2/3} \quad (5.11)$$

Somit ergibt sich die Einmischung an den freien Enden des Plumes  $M_f$  zu Gl. 5.12. Diese kann bis zu einer Aufstiegshöhe  $\frac{z}{W} \leq 5$  als gültig angesehen werden. Ab dieser Höhe verhält sich der Plume annähernd so wie ein axialsymmetrischer [11].

$$M_f = 0,25 Q^{1/3} d_b^{2/3} z \quad (5.12)$$

Zur Berechnung der Schichtdicke  $d_b$  und deren Einfluss in den vereinfachten BSP-Formeln siehe auch Pkt. 5.3.3.

## 5.3 Rauchgasmassenzustrom an der Kante

### 5.3.1 Einfluss der Größe $M_b$ in den Berechnungsmethoden

Beim BSP kommt es bei der Richtungsänderung der horizontalen Strömung unter der Balkonplatte in eine vertikale Strömung nach der Kante zu hohen Einmischraten. Um den resultierenden Massenstrom abschätzen zu können, muss also der "Ausgangsmassenstrom"  $M_b$  bekannt sein.

Bei der BRE-Methode wird die, an der Kante eingemischte Luftmasse  $\Delta M$  ermittelt, wobei hierfür die Temperatur des Ausgangsmassenstromes erforderlich ist. Im Anschluss addiert man  $M_b$  und  $\Delta M$  und erhält somit  $M_{Atrium}$  [siehe Pkt. 4.2].

In die vereinfachten Methoden geht  $M_b$  entweder indirekt bei deren Herleitung oder linear als Teil des Faktors  $B$  ein [siehe Pkt. 4.3]. In Abb. 5.6 ist der Einfluss von  $M_b$  dargestellt, wobei mit  $B = 0,002Q + 1,40 M_b$  wiederum Mittelwerte für die Koeffizienten angesetzt wurden.

Mit zunehmender Aufstiegshöhe  $z$  wird der Anteil von  $M_b$  am Gesamtmassenstrom immer kleiner.

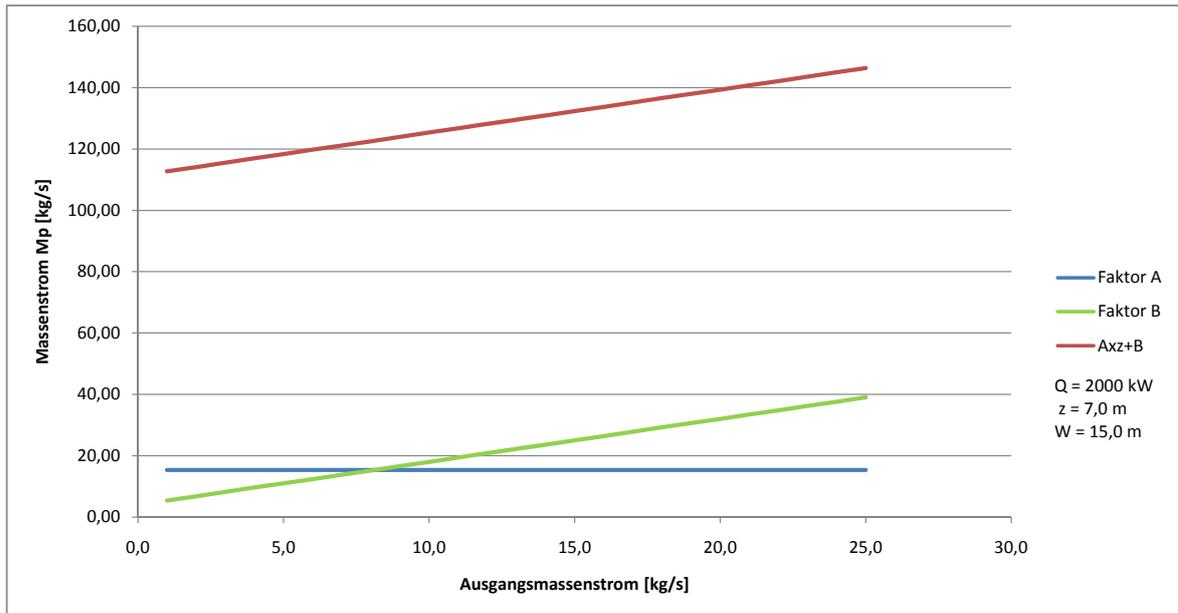


Abbildung 5.6: Einfluss des Ausgangsmassenstromes  $M_b$  in vereinfachten BSP-Berechnungsmethoden

### 5.3.2 Quantifizierung von $M_b$

#### Einfache Näherungsformel

Mangels ausführlicher Untersuchungen der Einmischung in Rauchströmungen, die aus Öffnungen austreten und anschließend durch Bauteile oder Einbauten am Aufsteigen gehindert werden, ist zur Quantifizierung von  $M_b$  in der Literatur eine einfache Abschätzungsformel mit Gl. 5.13 angegeben [7, 8, 36].

$$M_b = 2 M_w \quad (5.13)$$

darin sind:

$M_b$  Massenstrom an der Kante [ $kg s^{-1}$ ]

$M_w$  aus der Brandraumöffnung austretender Massenstrom [ $kg s^{-1}$ ]

Bezeichnung und Lage der Massenströme siehe Abb. 5.7.

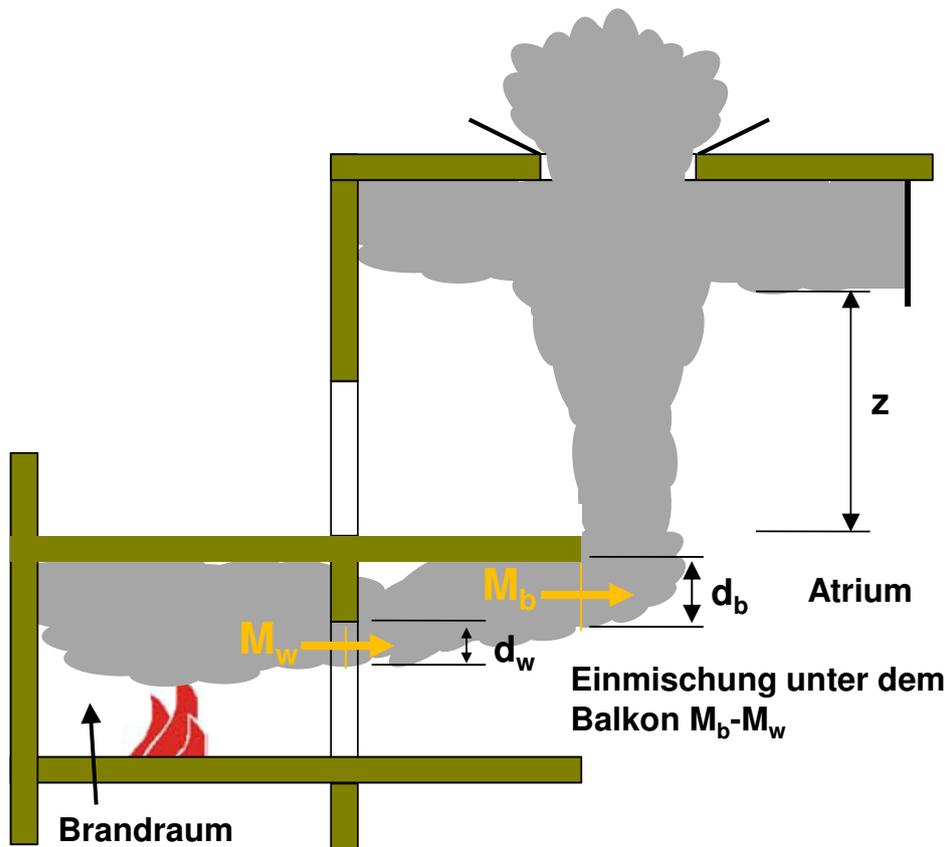


Abbildung 5.7: Bezeichnung der Massenströme für die Berechnung des Rauchgasmassenzustromes

Diese Annahme beruht auf einer nicht publizierten Arbeit von Marshall, der die Einmischraten zwischen der Brandraumöffnung und der Balkonkante untersuchte. Bei Öffnungsbreiten von  $b_o = 7,0 \text{ m}$  betrug diese 73% mit einer Streuung von 19%. Für die doppelte Öffnungsbreite  $b_o = 14,0 \text{ m}$  ergab sich die Einmischrate zu ca. 150% [9]. Als einfach handhabbaren Mittelwert setzte man 100% Einmischung für den Bereich unter dem Balkon an.

Der Massenstrom aus einer vertikalen Brandraumöffnung  $M_w$  lässt sich auf verschiedene Arten, beispielsweise mittels Gl. 5.14, berechnen [1, 7].

$$M_w = \frac{C_e b_o P h_o^{3/2}}{\left[ b_o^{2/3} + \frac{1}{C_d} \left( \frac{C_e P}{2} \right)^{2/3} \right]^{2/3}} \quad [\text{kg s}^{-1}] \quad (5.14)$$

darin sind:

- $C_e$  Einmischungskoeffizient zur Berücksichtigung der Brandraumgröße im Vergleich zur Brandfläche  $A_f$  [-]  
 0,19 bei sehr großen Räumen (Stadien, Hallen, ö.ä.)  
 0,21 für große Räume bei denen die Decke nahe dem Plume liegt ( $z < A_f^{1/2}$ )  
 0,34 für kleine Räume (größte Raumabmessung  $\leq 5 P$ )

$b_o$	Öffnungsbreite [m]
$h_o$	Öffnungshöhe [m]
$P$	Brandumfang [m]
$C_d$	Ausströmkoefizient zur Berücksichtigung eines Sturzes [-] 0,65 mit Sturz 1,00 ohne Sturz

### Morgan

In [11] wird Gl. 4.1 der BRE-Methode (dort zur Berechnung von  $M_w$ ) zur Berechnung von  $M_b$  angegeben. Die Autoren empfehlen, den Faktor  $C_d = 0,80$  (anstatt 0,65 bzw. 1,00) zu verwenden [Gl. 5.15].

$$M_b = \frac{2}{3} C_d^{3/2} (2g \Delta T_g T_0)^{1/2} \frac{W \rho_0}{T_g} d_w^{3/2} \kappa_M \quad (5.15)$$

### Thomas nach Morgan

Ebenfalls in [11] wird eine, von Thomas aus Gl. 4.1 abgeleitete Formel, vorgestellt. Gl. 5.16 ist bei "eher breiten" Öffnungen anzuwenden.

$$M_b = \frac{2}{3} C_d (2g \Delta T_g T_0)^{1/2} \frac{W \rho_0}{T_g} d_w^{3/2} \quad (5.16)$$

### Annahme nach Law

Law nahm zur Herleitung seiner Berechnungsformeln [siehe Pkt. 4.3.2 und 4.3.4] einen, von der konvektiven Brandleistung und der Strömungsbreite (durch Rauchschürzen festgelegt) abhängigen Rauchgasmassenstrom an der Kante an [siehe Gl. 5.17].

$$M_b = 0,025 (Q W^2)^{1/3} \quad (5.17)$$

### Berechnung laut British Standards Institution

In britischen Regelwerken zur Anwendung von Ingenieurmethoden im vorbeugenden Brandschutz wird Gl. 5.18 für die Einmischung in den Rauchgasstrom unter dem Balkon zwischen Brandraumöffnung und Kante beim Vorhandensein von Rauchschürzen angenommen. Kommen keine Schürzen zum Einsatz, so wird auch in [38] die Annahme  $W = b_o + b_b$  [siehe Gl. 5.3] empfohlen.

$$M_b = 0,36 Q^{1/3} W^{2/3} (0,25 h_{Sturz} + z) \quad (5.18)$$

mit:

$Q$	konvektive Wärmeleistung des Brandes [ $kW$ ]
$h_{Sturz}$	Sturzhöhe [ $m$ ]
$z$	Aufstiegshöhe ab der Oberkante der Öffnung gemessen [ $m$ ]

### Berechnungsformel von Harrison

Harrison [9] leitete eine Formel für  $M_b$  aus Versuchen und begleitenden Simulationen mit dem Programm Fire Dynamics Simulator (FDS) ab [siehe Gl. 5.19]. Sowohl die Simulationen als auch die vorangegangenen Versuche führte er im Maßstab 1 : 10 durch.

Untersucht wurde ein, aus einer Brandraumöffnung austretender und anschließend mittels Rauchschürzen kanalisierter, durch eine horizontale Platte am Aufsteigen gehinderter Heißgasstrom. Die Breite der Brandraumöffnung und der Abstand der Rauchschürzen waren dabei ident ( $b_o = W$ ), wobei die Rauchschürzen bis zur Kante reichten [siehe Abb. 5.8].

Bei konstantem Abstand zwischen Boden und Balkonplatte  $h_{br}$  variierte Harrison die Brandleistung  $Q$  (6,0; 10,3 und 16,0  $kW$ ), die Breite der Brandraumöffnung  $b_o$  (0,2 bis 1,0  $m$ ), die Balkonbreite  $b_b$  (0,2 bis 5,0  $m$ ) und die Sturzhöhe  $h_{Sturz}$  (0,10 bis 0,30  $m$ ) bzw. die Höhe der Brandraumöffnung.

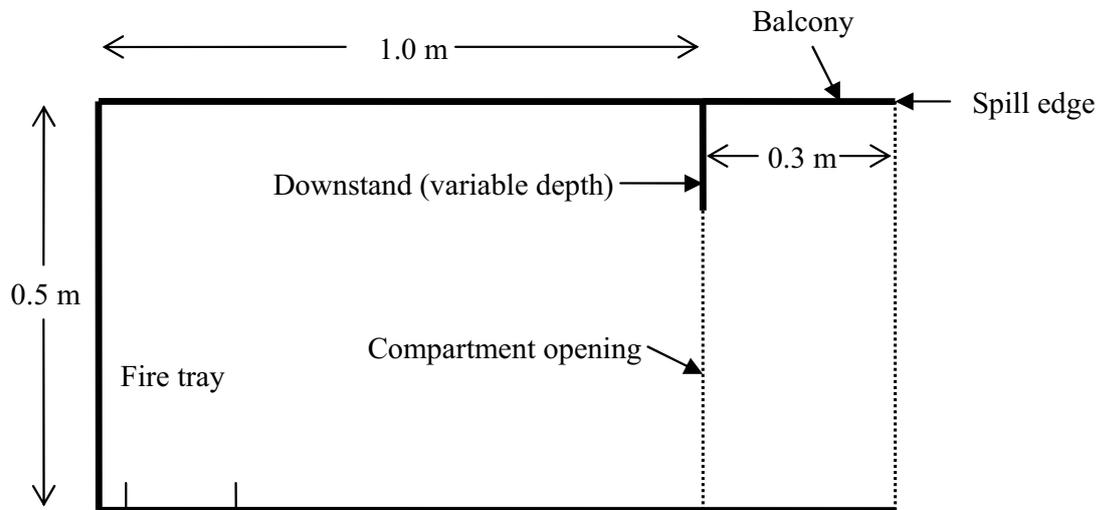
$$M_b = 0,89 \left( \frac{h_0}{b_0} \right)^{-0,92} \left( \frac{h_{br} M_w}{b_0} \right) \quad [kg s^{-1}] \quad (5.19)$$

mit:

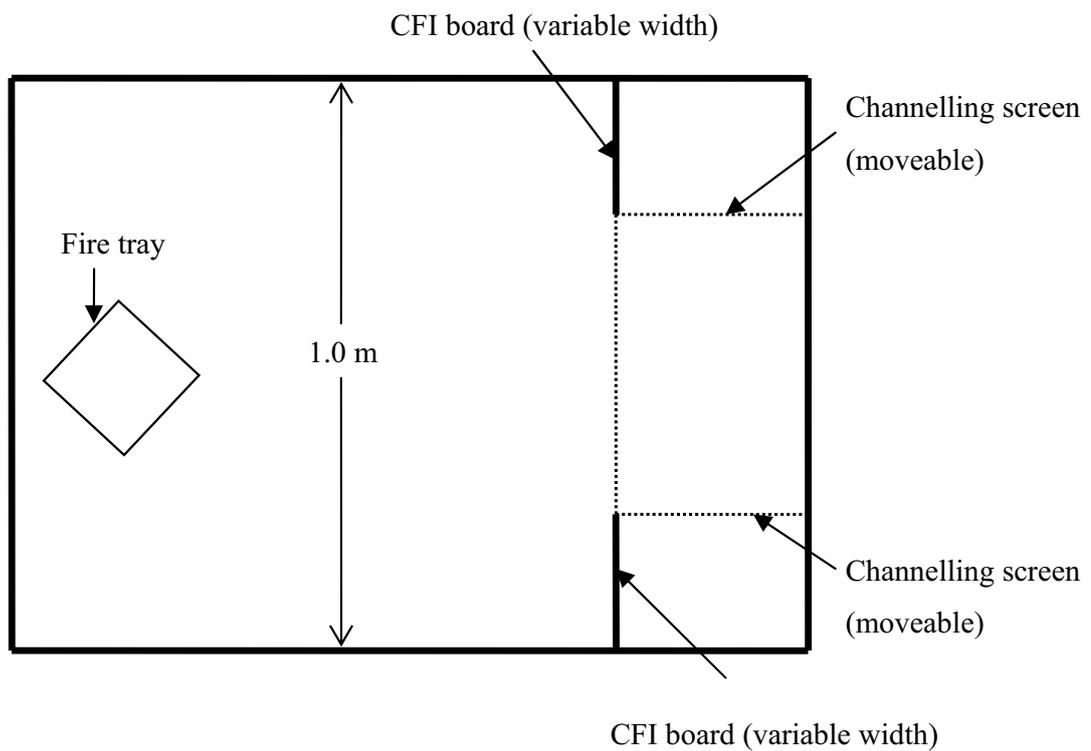
$h_0$	Höhe der Brandraumöffnung [ $m$ ]
$b_0$	Breite der Brandraumöffnung [ $m$ ]
$h_{br}$	lichte Raumhöhe (Bodenplatte bis Balkonplatte) [ $m$ ]
$M_w$	Massenstrom aus der Brandraumöffnung [ $kg s^{-1}$ ], ermittelt beispielsweise nach Gl. 5.14

Gl. 5.19 basiert ausschließlich auf Harrisons Simulationsergebnissen und ist rein empirisch begründet.

Zur Herleitung betrachtete Harrison das Verhältnis von  $\left( \frac{M_b b_o}{M_w h_{br}} \right)$  zu  $\left( \frac{h_0}{b_0} \right)$ . Diese Beziehung beschreibt eine Funktion, die auf die ausgewerteten Ergebnisse in guter Näherung zutrifft [siehe Abb. 5.9].



Section



Plan

Abbildung 5.8: Geometrische Randbedingungen für die Herleitung von Gl. 5.19 [9]

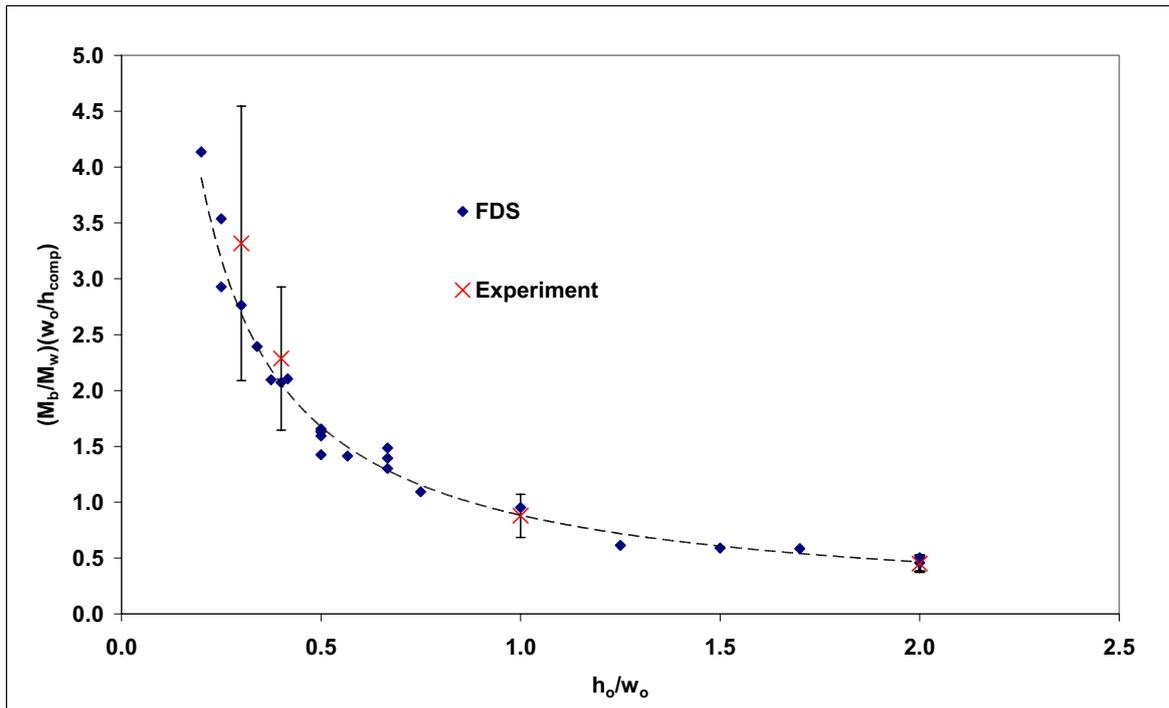


Abbildung 5.9: Korrelation der Versuchs- und Simulationsergebnisse zur Bestimmung von  $M_b$  ( $b_o$  ist hier mit  $w_o$  und  $h_{br}$  mit  $h_{comp}$  bezeichnet) [9]

Validierte Ergebnisse liegen für Brandraumöffnungen vor, deren Abmessungen folgender Bedingung entsprechen:

$$0,2 \leq \frac{h_o}{b_o} \leq 2,0 \quad (5.20)$$

Erfüllt die Brandraumöffnung dieses Kriterium nicht, so wird Gl. 5.21 als gute Näherung empfohlen.

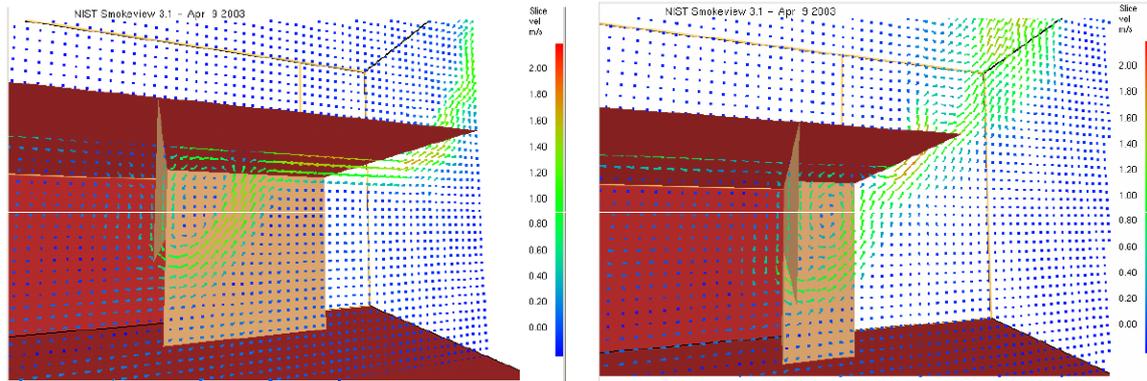
$$M_b = 0,89 \left( \frac{h_{br} M_w}{h_o} \right) \quad (5.21)$$

Außerdem liefert Gl. 5.19 nur dann zutreffende Resultate, wenn sich unter dem Balkon eine horizontal gerichtete Strömung ausbilden kann. Dies ist bei sehr kurzen Balkonen ( $b_b < 2\text{ m}$ ) nicht der Fall, da die Strömung nahezu unmittelbar in die Vertikale umgelenkt wird [9, 11]. Diese unterschiedlichen Strömungscharakteristika sind in Abb. 5.3.2 anhand von Strömungsgeschwindigkeitsvektoren dargestellt.

Eine weitere einschränkende Bedingung für die Anwendung von Gl. 5.19 betrifft die Proportionen von Raumhöhe, Öffnungshöhe und Balkonbreite zueinander. Laut Harrison sollten diese folgender Bedingung entsprechen:

$$\left( \frac{h_{br}}{h_o} \right) \left( \frac{b_b}{h_{br} - h_o} \right) \geq 2,5 \quad (5.22)$$

In [8] ist außerdem die Bedingung aus Gl. 5.23 als Voraussetzung für die Gültigkeit der Formel von Harrison angegeben. Eine kleine Öffnung von  $b_o \times h_o = 1,0 \times 2,0\text{ m}$



Strömungsgeschwindigkeitsvektoren aus einer FDS-Simulation für einen  $5m$  (*links*) und einen  $2m$  (*rechts*) breiten Balkon [9]

bedarf beispielsweise einer Raumhöhe von  $h_{br} \geq 2,2m$ , ansonsten ist dieses Kriterium nicht erfüllt und Gl. 5.19 ergibt eine negative Einmischrate für den Bereich unter dem Balkon. Für größere Öffnungen ist eine entsprechend größere Raumhöhe erforderlich (z.B.  $b_o \times h_o = 6,0 \times 3,0m \Rightarrow h_{br} \geq 3,7m$ ).

$$1,16 < \left(\frac{h_o}{W}\right)^{-0,92} \left(\frac{h_{br}}{W}\right) < 2,23 \quad (5.23)$$

Die mit Harrisons Formel errechneten Werte liegen wesentlich niedriger als jene Massenströme  $M_b$  aus Gl. 5.13. Die bei dieser einfachen Abschätzung angenommene Einmischrate von 100% zwischen Austrittsöffnung und Spill-Kante stellt laut Harrison den Extremfall mit sehr breiten Brandraumöffnungen und tiefreichenden Stürzen dar, welche hohe Einmischraten verursachen [9].

### Iteratives Verfahren nach Hansell

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Einmischung in Rauchgasströmungen unter Balkonen existiert von Hansell [21]. Hierbei handelt es sich um ein iteratives Verfahren, welches schmale Öffnungen und Öffnungsgrößen von maximal  $b_o \times h_o = 3,0 \times 5,0m$  voraussetzt. Wiederum wird ein, unter dem Balkon kanalisierter Rauchgasstrom der Breite  $W = b_o$  berechnet.

Nach der Annahme eines Massenstromes  $M_b \geq M_w$  werden die Rauchgastemperatur und die Schichtdicke in der Öffnung  $d_w$  bestimmt. Außerdem ist die Schichtdicke  $d_b$  an der Kante (z.B. nach Gl. 5.24) zu ermitteln.

Nach einigen weiteren Berechnungsschritten wird eine Fallunterscheidung getroffen:

- $d_b > h_{Sturz}$ : Die Schichtdicke an der Kante ist größer als die Sturzhöhe
- $d_b < h_{Sturz}$ : Die Schichtdicke an der Kante ist kleiner als die Sturzhöhe

Es kann die Einmischung  $\Delta M$  und somit  $\overline{M}_b = M_w + \Delta M$  bestimmt werden und der nächste Iterationsschritt erfolgen.

Vergleichsrechnungen mit dieser Methode zeigten aber, dass sie nur für ausgewählte Geometrien und Massenströme eine konvergierende Iteration gewährleistet [9]. Für schmale Öffnungen konnte man aber auch hier zeigen, dass die Annahme aus Gl. 5.13 als konservativ einzustufen ist.

### 5.3.3 Schichtdicke unter der Balkonplatte $d_b$

Zur Ermittlung der Schichtdicke  $d_b$  der Strömung  $M_b$  unter der Balkonplatte kann Gl. 5.24 herangezogen werden [2]:

$$d_b = \frac{0,36}{C_d} \left[ \left( \frac{M_w}{W} \right) \left( \frac{T_g}{T_g - T_0} \right)^{1/2} \left( \frac{T_g}{T_0} \right)^{1/2} \right]^{2/3} \quad [m] \quad (5.24)$$

mit:

$M_w$	aus der vertikalen Öffnung austretender Rauchgasmassenstrom	$[kg\ s^{-1}]$
$W$	Breite des Rauchgasstromes (mit Rauchschürze begrenzt)	$[m]$
$T_0$	Umgebungstemperatur	$[K]$
$C_d$	Faktor zur Berücksichtigung eines Sturzes	$[m]$
	0,65 für Öffnungen mit Sturz	
	1,00 für Öffnungen ohne Sturz	
$T_g$	Temperatur der ausströmenden Rauchgase	$[K]$
	Näherungsformel: $T_g = \frac{Q}{M_w c_p} + T_0$	
	Dies stellt eine Vereinfachung dar, da Wärmeverluste an die umfassenden Bauteile nicht berücksichtigt werden. Das trifft nur bei relativ kleinen Rauchvolumina und nur für kurze Zeit zu. Somit werden die Rauchgastemperaturen mit dieser Formel i.A. überschätzt.	
$Q$	konvektive Brandleistung	$[kW]$
$c_p$	spezifische Wärmekapazität	$[kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}]$
	$c_p = f(T_g) \approx const. = 1,01$	

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung von  $d_b$  ist die Rückrechnung aus dem Kantenstrom  $M_b$  mittels der unter Pkt. 4.3.6 vorgestellten Gl. 4.33. Abb. 5.10 stellt den in dieser Gleichung hergestellten Zusammenhang zwischen der umströmten Kantenbreite  $W$  und der resultierenden Schichtdicke  $d_b$  dar.

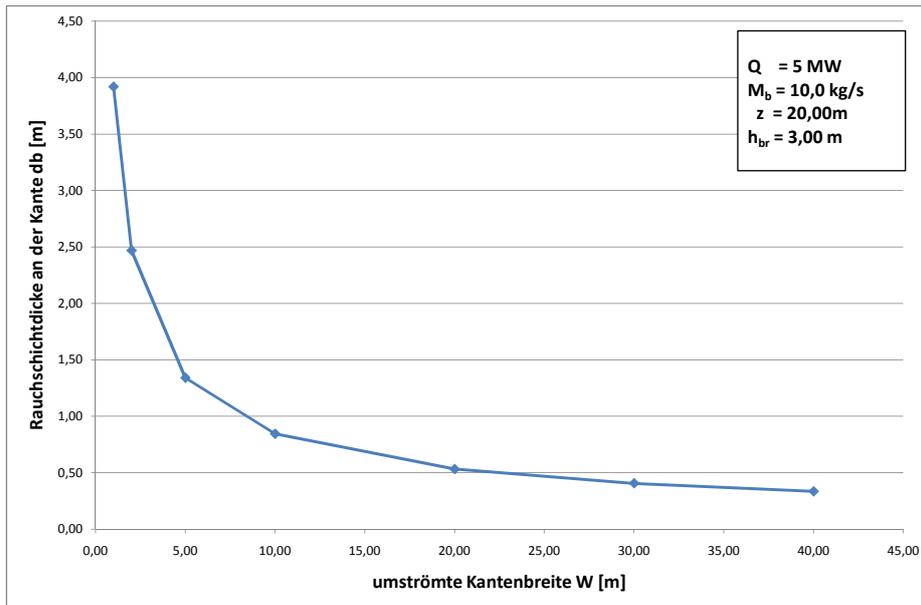


Abbildung 5.10: Schichtdicke an der Kante  $d_b$  in Abhängigkeit von der umströmten Kantenbreite  $W$  nach Gl. 4.33

### 5.3.4 Einfluss eines Sturzes an der Spill-Kante

Die Spill-Plume-Berechnungen gehen alle von experimentellen oder theoretischen Untersuchungen aus, in denen der Zustrom entlang einer ebenen, horizontalen Decke bzw. Balkonplatte erfolgt.

In manchen Fällen ist jedoch an der Kante ein Sturz vorhanden, der den horizontalen Impuls der Rauchgasströmung reduziert. Der Plume strömt nach der Kante dadurch eher nach oben (anliegender Plume). Dieser Effekt wird verstärkt, je tiefer der Sturz unter die Balkonplatte ragt. Die Einmischungsrate ist im Atrium daher geringer, die Gefahr der Verrauchung unmittelbar darüberliegender Gangbereiche aber höher.

Harrison konnte mit seinen Studien aber zeigen, dass das Einmischungsverhalten des Plumes über die Breite  $W$  und auch an den freien Enden durch einen Sturz nicht merklich beeinflusst wird [9].

## 5.4 Lage und Abmessungen des Rauchreservoirs

Die höhenmäßige Lage des Rauchreservoirs, charakterisiert durch die Aufstiegshöhe  $z$  ist ausschlaggebend für die Menge der eingemischten Umgebungsluft. Die Größe  $z$  reicht von der Spill-Kante bis zur Unterkante der Rauchschicht und geht in allen vereinfachten BSP-Formeln als linearer Faktor ein.

Bei den Rauchreservoir-Abmessungen muss unterschieden werden:

- **Kleinere, schmale Rauchreservoirs** verursachen größere Einmischungsraten, da das Einströmen in Rauchsichten mit kleiner seitlicher Ausbreitung turbulenter verläuft [siehe Pkt. 4.2.4]. Besonders an den Wänden kann es zu Unstetigkeiten und Wirbeln kommen, welche veränderliche Rauchsichtdicken und weitere Lufteinmischung verursachen. Diese Effekte werden auch von der Lage der Rauchabzugsöffnungen im Atriumdach beeinflusst.
- Flächenmäßig **größere Rauchreservoirs** mit annähernd gleichen Seitenlängen verursachen ein weniger turbulentes Nachströmen. Rückströmungen von Decken oder Wänden treten weniger auf als bei kleinen Reservoirs.

Vor der Anwendung einer BSP-Berechnungsmethode ist abzuklären, ob Einschränkungen vorliegen, welche die Abmessungen oder die Lage des Rauchreservoirs betreffen.

Bei großmaßstäblichen Brand- und Rauchexperimenten ist die Höhe des Versuchsaufbaues meist eingeschränkt. Es existieren deshalb wenige qualifizierte Aussagen, bis zu welcher Aufstiegshöhe  $z$  die einzelnen Formelansätze zuverlässige Ergebnisse bringen.

CFD-Modellierungen für hohe Atrien ( $z > 20\text{ m}$ ) mit unterschiedlichen Brandleistungen und Öffnungsbreiten zeigten, dass die vereinfachten Spill-Plume-Formeln die Einmischung mit zunehmender Aufstiegshöhe ober der Kante deutlich überschätzen [13].

# Kapitel 6

## CFD Simulation

### 6.1 Fragestellung und Zielsetzung

#### 6.1.1 Umströmte Kantenbreite

Die Breite  $W$  des Rauchgasmassenzustromes ist von besonderer Bedeutung für alle Spill-Plume-Berechnungen [siehe Pkt. 5.2]. Bei fehlenden Rauchschürzen unter dem Balkon ist das Vorgehen bislang nicht eindeutig geklärt. Es werden zwar Empfehlungen zur Annahme der Breite abhängig von der Geometrie [siehe Pkt. 5.2.2] angegeben, diese sind aber nicht durch Versuchsergebnisse und Vergleichsrechnungen in ausreichender Art und Weise nachvollziehbar validiert.

Bei allen im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Simulationen wurde auf "kanalisierende" Rauchschürzen unter der Balkonplatte verzichtet. Die heißen Gase konnten sich somit nach dem Ausströmen aus der Brandraumöffnung zu den Seiten hin ungehindert ausbreiten. Die resultierende Verteilung der Strömung an der Kante und die Bestimmung der Größe  $W$  bei fehlenden Rauchschürzen waren eine Zielsetzung dieser Simulationsreihe.

#### 6.1.2 Rauchgasmassenstrom an der Kante

Die Simulationen hatten weiters zum Ziel den entstehenden Rauchgasmassenstrom  $M_b$  an der Spill-Kante in Abhängigkeit von Geometrie und Brandleistung zu untersuchen und die Ergebnisse mit den vorgestellten Berechnungsmöglichkeiten [siehe Pkt. 5.3] zu vergleichen. Für den besonderen Fall einer sich zu den Seiten frei ausbreitenden Strömung galt es die Anwendungsmöglichkeit und Aussagegenauigkeit dieser Formeln zu prüfen.

#### 6.1.3 Parametervariation

Für die vorliegenden Fragestellungen war es erforderlich eine große Anzahl von Parametern zu variieren. Diese betreffen sowohl die Geometrie als auch den angenommenen Brand.

Für den jeweiligen Simulationslauf wurden folgende Größen festgelegt:

- konvektive Brandleistung  $Q$
- Abmessungen des Brandraumes  $h_{br}$ ,  $b_{br}$
- Abmessungen der Brandraumöffnung  $b_o$ ,  $h_o$
- Sturzhöhe  $h_{Sturz}$
- Balkonbreite  $b_b$

## 6.2 Fire Dynamics Simulator (FDS)

### 6.2.1 Kurzbeschreibung

Bei dem für die Simulationen verwendeten Programm FDS (Fire Dynamics Simulator) handelt es sich um ein dynamisches Feldmodell (CFD-Modell) [siehe Pkt. 2.3.1]. Zum Einsatz kam in diesem Fall die FDS-Version 5.2. Dieses Programm wurde und wird vom US-amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST) zur Bemessung und Steuerung von Entrauchungsmaßnahmen sowie zur Bestimmung thermischer Belastung bei Bränden entwickelt. Es ist auf herkömmlichen PCs lauffähig und berechnet die skalaren und vektoriellen Größen, welche zur Beschreibung von Rauch- und Wärmeausbreitung notwendig sind. Das Programm bietet vielfältige Möglichkeiten zur Berücksichtigung wichtiger brandschutztechnischer Einflussgrößen (z.B. Sprinklerung, mechanische Lüftungseinrichtungen) und ist speziell bei komplexen Raumgeometrien ein geeignetes Hilfsmittel zur Simulation der Ausbreitung von Feuer, Rauch und Wärme [23].

Das zu untersuchende Gebäude bzw. der betroffene Bereich wird zur Berechnung in einzelne Teilvolumina unterteilt (rechtwinkelige Gitterzellen), auf die dann die fundamentalen Erhaltungsgleichungen für Energie, Masse und Impuls angewendet werden. FDS löst numerisch eine spezielle Form der Navier-Stokes-Gleichungen, welche sich vornehmlich zur Berechnung thermisch angeregter Strömungen eignen (turbulente und laminare Strömungsanteile). Man erhält für jede Zelle und jeden Zeitschritt die jeweiligen Zustandsgrößen wie Gastemperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Schadstoffkonzentration, etc. [24].

Die Ergebnisse können mittels dem FDS-Partnerprogramm SMOKEVIEW visualisiert und aufbereitet werden [25]. Im Zuge der Simulation erstellte Datenfiles mit den über die Simulationszeit aufgezeichneten Auswertegrößen ermöglichen weitere quantitative Analysen.

### 6.2.2 Eignung für diese Aufgabenstellung

Als Feldmodell ist FDS grundsätzlich zur detaillierten rechnerischen Behandlung einer derartigen Raumströmung geeignet. Bei der Auswertung ermöglicht FDS durch

die Bereitstellung von 2-dimensionalen Schnittbildern, 3-dimensionalen Darstellungen (Videosequenzen) und den generierten Datenfiles eine umfassende visuelle und quantitative Beurteilung [4].

Unter anderem durch maßstäbliche Versuche validierte FDS-Simulationen von Harrison [9] und McCartney [12] für Untersuchungen von Rauchströmungen in atrienähnlichen Gebäuden wurde gezeigt, dass dieses Programm zur Lösung solcher Probleme gut geeignet ist.

## 6.3 Festlegung der Simulationsszenarien

Eine Zusammenstellung der für die Auswertungen herangezogenen Simulationsszenarien findet sich im *Anhang A*.

Im *Anhang B* ist beispielhaft ein FDS-Simulationsdatensatz angeführt.

### 6.3.1 Geometrische Randbedingungen

Der "Versuchsaufbau" besteht aus einem Brandraum mit Öffnung und einer darüber befindlichen Deckenplatte. Die entstehende Rauchgasströmung tritt aus der Brandraumöffnung aus, wird von der Balkonplatte am Aufsteigen gehindert und an der Kante bildet sich der Spill-Plume aus. Die modellierte Geometrie ist in *Abb. 6.1* dargestellt.

- Die Abmessungen des **Brandraumes** betragen für alle Simulationen:
  - $b_{br} = 1,80 \text{ m}$  (im FDS-Modell in x-Richtung)
  - $l_{br} = 10,00 \text{ m}$  (im FDS-Modell in y-Richtung)
  - $h_{br} = 2,80 \text{ m}$  (im FDS-Modell in z-Richtung)
- Der Abstand zwischen Bodenplatte und Balkonplatte entsprach der **Höhe des Brandraumes**  $h_{br}$ .
- In der Mitte des Brandraumes (in y-Richtung) befand sich die **Öffnung**, deren **Breite**  $b_o$  in Meterschritten von zunächst  $2,0 \text{ m}$  auf bis zu  $6,0 \text{ m}$  gesteigert wurde.
- Die **Öffnungshöhe**  $h_o$  variierte ebenfalls. So ergaben sich Sturzhöhen  $h_{Sturz}$  von  $30, 90$  und  $150 \text{ cm}$ . Auch Öffnungen ohne einen Sturz wurden untersucht.
- Die **Balkonbreite**  $b_b$  wurde von zunächst  $2,0 \text{ m}$  auf bis zu  $4,0 \text{ m}$  gesteigert (Zwischenschritte mit  $2,5$  und  $3,0 \text{ m}$ ). Als Breite des Balkons ist hier seine Abmessung in x-Richtung zu verstehen [siehe *Abb. 6.1*]. Diese wird oft auch als Balkontiefe bezeichnet.
- Die Abmessungen des anschließenden **Atriums** betragen für alle Simulationen:
  - $b_{Atrium} = 6,00 \text{ m}$  (im FDS-Modell in x-Richtung)
  - $l_{Atrium} = 30,00 \text{ m}$  (im FDS-Modell in y-Richtung)
  - $h_{Atrium} = 6,00 \text{ m}$  (im FDS-Modell in z-Richtung)

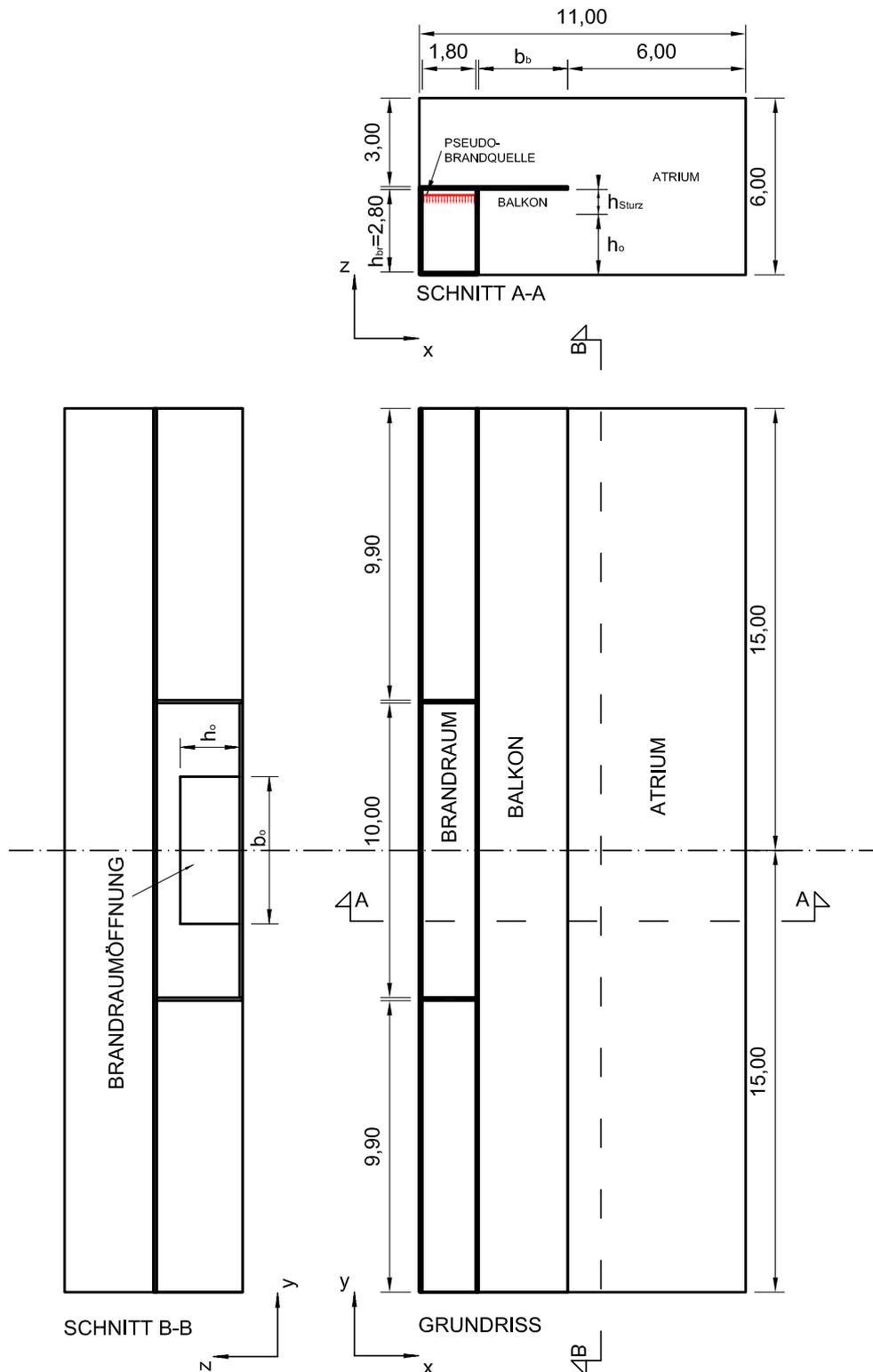


Abbildung 6.1: Geometrische Randbedingungen der durchgeführten Simulationen

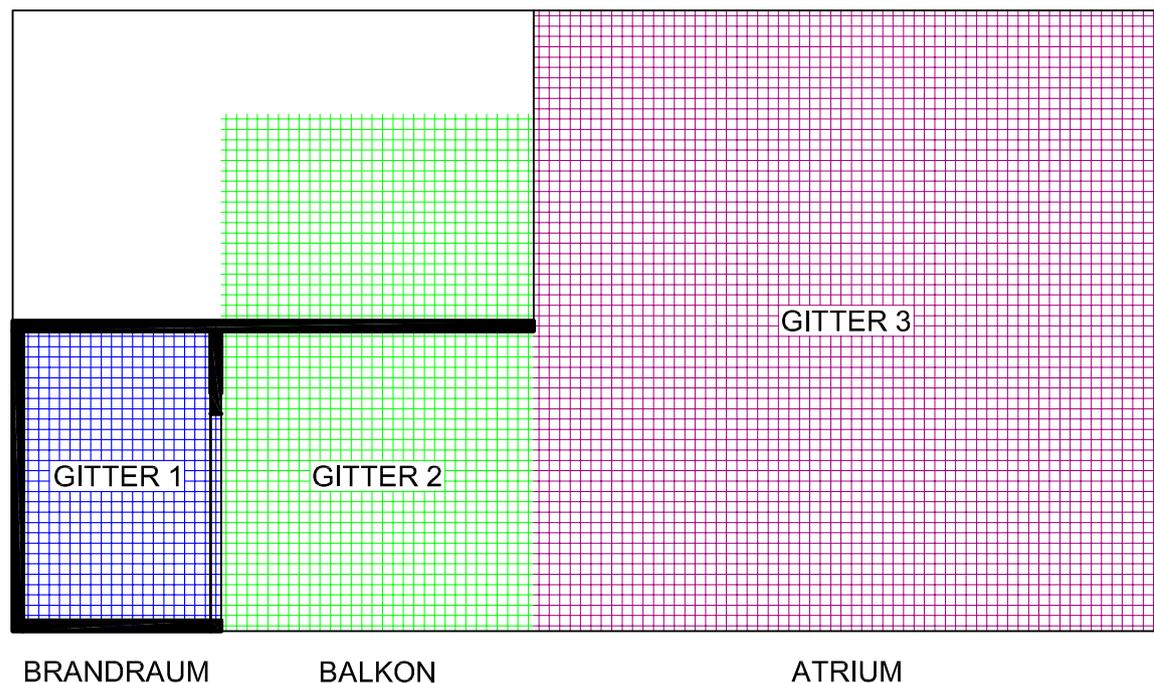


Abbildung 6.2: Drei Zellengitter zur Diskretisierung des Szenariums

### 6.3.2 Gitterdefinition und Diskretisierung

Bei allen Simulationen betrug die Abmessung der Gitterzellen  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ . Diese Größe ist für derartige Fragestellungen üblich.

Bei der Diskretisierung des "Versuchsaufbaus" wurde darauf geachtet, die aus der Numerik begründeten Bedingung für die Zellensumme in x-Richtung nach Gl. 6.1 einzuhalten [23].

$$\sum \text{Zellen}_{x\text{-Richtung}} = 2^l 3^m 5^n \quad (6.1)$$

Drei Gitterbereiche wurden definiert, um das Szenario möglichst zellensparsam nachzubilden und so die Rechenzeiten nicht unnötig zu erhöhen. Aus dem selben Grund wurde die Symmetrieebene des "Versuchsaufbaus" ( $y = 15,00 \text{ m}$ ) als ein so genannter "Mirror-Vent" definiert. FDS rechnete also nur das halbe Szenarium.

Die Lage der einzelnen Gitter sind in Abb. 6.2 dargestellt wobei ein Gitter für den Brandraum (Gitter 1), eines für den Bereich unter und über dem Balkon (Gitter 2) und eines für das Atrium (Gitter 3) festgelegt wurden. Einen Überblick über die auftretenden Zellenanzahlen liefert Tab. 6.1. Mit unterschiedlichen Balkonbreiten mussten auch die Gitterbereiche bei den einzelnen Simulationsläufen angepasst werden.

### 6.3.3 Brandquelle und Brandleistung

In der Simulation wurde anstatt eines Brandherdes ein "Vent" mit definiertem Volumenstrom (Größe, Temperatur und Richtung) angenommen. Der Ursprung dieses

Bezeichnung	Bereich	Zellen in x- Richtung	Zellen in y- Richtung	Zellen in z- Richtung	Summe
Gitter 1	Brandraum	20	50	30	30.000
Gitter 2	Balkon	20 *	150	50	150.000
		25 *	150	50	187.500
		30 *	150	50	225.000
		40 *	150	50	300.000
Gitter 3	Atrium	70 *	150	60	630.000
		65 *	150	60	585.000
		60 *	150	60	540.000
		50 *	150	60	450.000
			Maximalwert		810.000

\* abhängig von der jeweiligen Balkonbreite

Tabelle 6.1: Gitterdefinition

”Ausgangsvolumenstromes” befand sich an der Brandraumdecke und war nach unten (negative z-Richtung) gerichtet. Größe und Temperatur blieben über die jeweilige Simulationszeit konstant. Für die Simulationsauswertung sind weitgehend stabile Temperaturen und Rauchgasmassenströme zu betrachten. Für das Erreichen dieses ”Steady States” wären bei der Modellierung eines ”echten Brandes” am Boden des Brandraumes sehr lange Simulationszeiten erforderlich gewesen (”Einschwingdauer”). Um Rechenzeit zu sparen wurde vereinfachend ein konstanter Ausgangsvolumenstrom als ”Rauchgasquelle” angenommen. Unter *Pkt. 7.1.1* wird gezeigt, dass diese vereinfachende Annahme für die gewählten Szenarien gerechtfertigt ist.

Bei der Festlegung von Größe und Temperatur des angenommenen ”Ausgangsvolumenstromes” wurde nach TRVB S 125 [33] vorgegangen und die Bemessungsgruppe 1 für BRE-Anlagen [siehe *Pkt. 2.3.3*] herangezogen. Für die unter *Pkt. 6.3.1* beschriebenen geometrischen Randbedingungen beträgt die Brandraumgröße  $18,0 m^2$  (ein  $20,0 m^2$  großer Brand, wie er der BRE-Gruppe 2 zugrunde liegt wäre somit nicht möglich).

Beim Bemessungsverfahren nach TRVB wird *Gl. 2.16* mit dem Faktor  $C_e = 0,19$  verwendet. Die mindestens anzunehmende Höhe der rauchfreien Schicht  $z$  beträgt  $2,5 m$ . Folgende Bedingungen galt es in diesem Fall einzuhalten:

$$z = 2,50 \leq 10 (A_B)^{0,5} = 10 (10)^{0,5} = 31,62 \quad [m] \quad (6.2)$$

$$0,1 h_{br} = 0,29 < z = 2,50 < 0,9 h_{br} = 2,61 \quad [m] \quad (6.3)$$

In *Tab. 6.2* ist der Rechengang angeführt.

Bei der angenommenen Geometrie und Höhe der rauchfreien Schicht resultiert ein Massenstrom von  $9,01 kg s^{-1}$  mit einer Temperatur von  $157^{\circ}C$ . Über die nach *Gl. 4.21* berechnete Dichte der Rauchgase folgt ein Volumenstrom von  $10,99 m^3 s^{-1}$ .

Ausgehend von den Werten, die sich lt. *Tab. 6.2* für die BRE-Gruppe 1 ergeben, wurde beim Großteil der Simulationen die Größe des Volumenstromes  $V_{vent}$  gerundet mit  $11,00 m^3 s^{-1}$  und seine Temperatur  $T_{vent}$  mit  $160^{\circ}C$  angesetzt (”Ausgangsszenario”).

BRE Gruppe	Brandfläche	Brandumfang	spez. Wärmestrom		Brandleistung	
	$A_B$	$U_B$	$q_B$	$q_k$	$Q_B$	$Q_k$
	$[m^2]$	$[m]$	$[kW m^{-2}]$	$[kW m^{-2}]$	$[kW]$	$[kW]$
1	10	12	156	125	1560	1248

BRE Gruppe	Höhe	Massenstrom	Temp.	Dichte [siehe Gl. 4.21]	Volumenstrom
	$z$	$M_{pl} = 0,19 U_B z^{3/2}$	$T_g = \frac{Q_k}{(1,01 M_{pl})} + T_0$	$\rho_g = \frac{p}{R T_g}$	$V = \frac{M_{pl}}{\rho_g}$
	$[m]$	$[kg s^{-1}]$	$[^{\circ}C]$	$[kg m^{-3}]$	$[m^3 s^{-1}]$
1	2,5	9,01	157	0,82	10,99

Tabelle 6.2: Brandszenarium lt. [33] und daraus errechneter Richtwert für den angenommenen Impulsvolumenstrom

Im Zuge einer Sensitivitätsanalyse zur Untersuchung der Einflussnahme der einzelnen Parameter auf die Lufteinmischung variierten diese Größen:

- Bei gleichem Volumenstrom wurde die Temperatur gesteigert (Verdopplung auf  $320^{\circ}C$  und Verdreifachung auf  $480^{\circ}C$ ).
- Bei weiteren Simulationsläufen betrug der Volumenstrom bei gleicher Temperatur den doppelten ( $22,0 m^3 s^{-1}$ ) bzw. den halben Wert ( $5,5 m^3 s^{-1}$ ) des Ausgangsvolumenstromes.

Eine Übersicht der angenommenen "Ausgangsvolumenströme" mit den zugehörigen Massenströmen und rückgerechneten, zugrundeliegenden konvektiven Brandleistungen findet sich in Tab. 6.3. Für das "Ausgangsszenario" nach BRE-Gruppe 1 ergibt sich beispielsweise eine konvektive Wärmeleistung des Vents  $Q_{vent}$  von  $1268 kW$ . Eine Zusammenstellung aller Simulationen mit ihren Randbedingungen siehe Anhang A.

Simulationen	$V_{vent}$	$T_{vent}$	$\rho$	$M_{vent}$	$Q_{vent}$
	angenommen	angenommen	[nach Gl. 4.21]	$M = V \rho$	$Q = \Delta T_g (M c_p)$
	$[m^3 s^{-1}]$	$[^{\circ}C]$	$[kg m^{-3}]$	$[kg s^{-1}]$	$[kW]$
7 bis 14	10,20	357	0,56	5,71	1945
"Ausgangsszenario"	11,00	160	0,81	8,96	1268
31	11,00	320	0,60	6,55	1983
41	11,00	480	0,47	5,16	2395
42	5,50	160	0,81	4,48	634
43	22,00	160	0,81	17,93	2535
44	5,50	160	0,81	4,48	634
45	16,50	160	0,81	13,45	1901
46	5,50	160	0,81	4,48	634
47	16,50	160	0,81	13,45	1901

Tabelle 6.3: Rückrechnung von Massenstrom  $M_{Impuls}$  und konvektiver Brandleistung  $Q$  aus den angenommenen Impulsvolumenströmen  $V_{Impuls}$

### 6.3.4 Sonstige Randbedingungen

Weitere im Zuge der Modellierung getroffene Annahmen waren:

- Temperatur der Umgebungsluft und der Umfassungsbauteile:  $T_0 = 20^{\circ}C$
- Um die konvektive Wärmeübertragung auf die Begrenzungsbauteile (Decken und Wände) berücksichtigen zu können, wurden ihre Materialeigenschaften gleich jenen von Betonbauteilen mit einer Stärke von 15 cm gesetzt.  
Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{Beton} = 1,20 [W m^{-1} K^{-1}]$   
Spezifische Wärme  $c_{Beton} = 0,88 [J kg^{-1} K^{-1}]$   
Dichte  $\rho_{Beton} = 2200 [kg m^{-3}]$
- Alle, das Szenarium begrenzenden Flächen, welche keine Wände oder Decken sind, wurden als "offene Vents" definiert (Begrenzungsvents). Ein Luftaustausch mit der Umgebung war also möglich und es fand keine Wärmeübertragung auf bzw. von diesen Oberflächen statt.

### 6.3.5 Simulationsdatenaufzeichnung und deren Auswertung

Zur Datenaufzeichnung und -Auswertung wurden die berechneten Temperaturen und Massenströme über die Simulationszeit einmal pro Sekunde aufgezeichnet. Diese Momentaufnahmen wurden dann mittels EXCELL über die Zeit integriert.

Folgend sind die Messpunkte bzw. -Bereiche für Temperatur und Massenströme beschrieben.

**Temperaturmessungen:**

- in Mitte der Brandraumöffnung alle 10 *cm* in z-Richtung als Punktmessungen
- als 2D-Slicefile jeden Meter in x-, y- und z-Richtung
- Punktmessung an der Kante alle 50 *cm* in y-Richtung und dies in 2,90, 2,80, 2,70, 2,60 und 2,50 *m* Höhe
- 3D-Flächen gleicher Temperatur für 300, 150 und 50<sup>0</sup>C (Isosurfaces)

**Messung der Massenströme:**

FDS bietet die Möglichkeit über sogenannte "Devices" Bereiche (Ebenen) zu definieren und den hindurchtretenden Massenstrom zu messen. Diese Devices wurden an folgende Stellen gelegt:

- über die gesamte Brandraumöffnung zur Messung von  $M_w$  (x-Richtung)
- unter dem Balkon alle 10 *cm* in x-Richtung über die gesamte Balkonlänge bis zur Kante, zwecks Untersuchung der Einmischung in die Strömung entlang der Platte
- an der Kante wurden 50 *cm* breite Devices definiert (Breite in y-Richtung), um die Verteilung der Strömung entlang der Kante quantifizieren zu können. Gemessener Massenstrom in x-Richtung.
- weitere Devices befanden sich im Atrium und maßen die auftretenden Massenströme in z-Richtung zur Beurteilung der Einmischung in den BSP und unter dem Balkon zur Messung der Strömung in y-Richtung.

# Kapitel 7

## Simulationsergebnisse, Vergleichsrechnungen

### 7.1 Simulationsergebnisse - Qualitätskontrolle

#### 7.1.1 Überprüfung des Szenariums

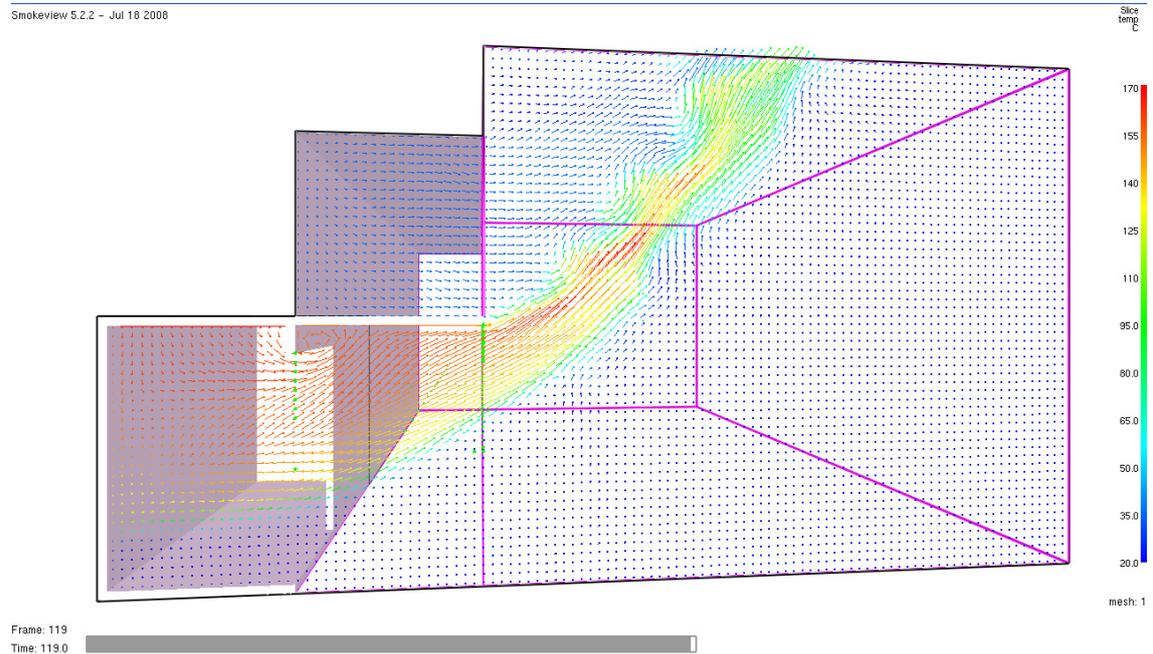
Zunächst wird überprüft, ob die gewählten Randbedingungen auch zu Ergebnissen führen, mit welchen die zugrundeliegenden Fragestellungen ausreichend behandelt werden können. Die heiße Luftströmung muss also aus der angenommenen Brandraumöffnung austreten, unter der Balkonplatte entlangströmen und beim Eintritt ins modellierte Atrium einen Spill-Plume ausbilden.

Diese Voraussetzungen können für alle durchgeführten Simulationen als erfüllt betrachtet werden [siehe Abb. 7.1].

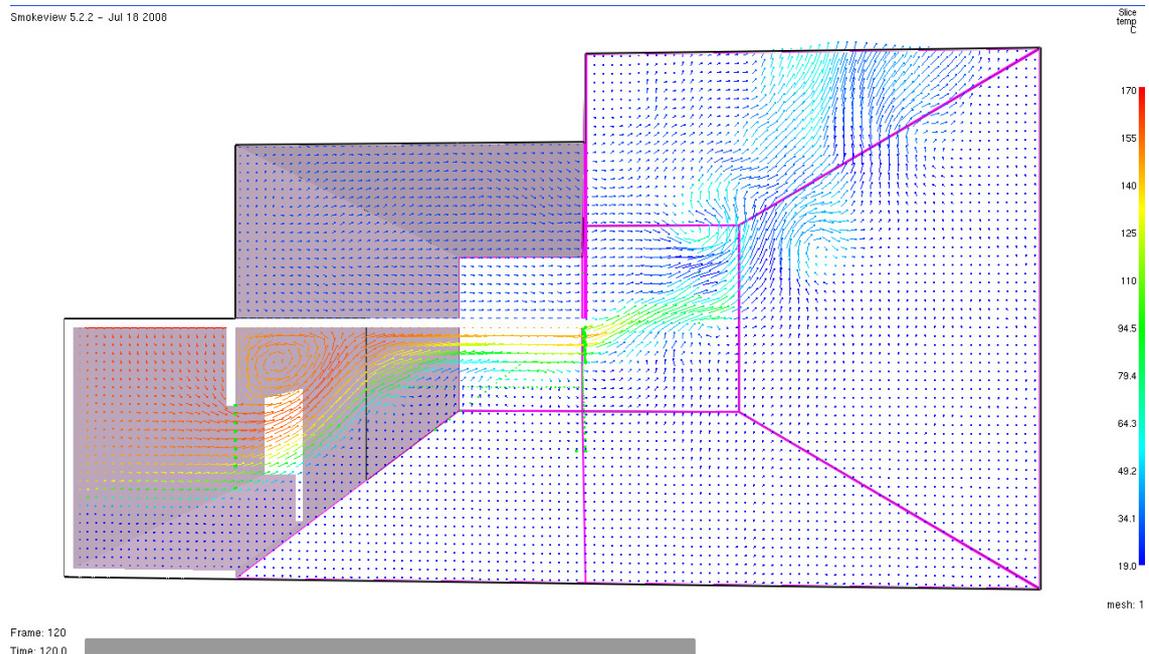
Weiters müssen die Simulationsgeometrie und die Anordnung der Datenerfassungspunkte bzw. -Ebenen derart gewählt sein, dass Temperatur und Größe der sich bildenden Strömung auch quantitativ nachvollzogen und ausgewertet werden können. In diesem Fall betrifft das vor allem die Balkonlänge, die auf alle Fälle größer als die umströmte Kantenbreite sein sollte, da ansonsten ein Teil des Rauchgasstromes seitlich aus den berechneten Zellen abfließt und in der Auswertung nicht berücksichtigt werden kann.

In Abb. 7.2 ist die seitliche Ausbreitung der Strömung an der Kante anhand zweier Simulationen dargestellt. Dies zeigt, dass die Balkonlänge mit  $30,0\text{ m}$  ausreichend groß gewählt wurde. Zusätzlich erfolgte eine Messung des seitlichen Abströmens mittels "Massenstrom-Device". Dieser seitliche Verlust betrug bei allen Simulationen maximal 2 bis 6% des Kantenmassenstromes  $M_b$ .

Da die Rauchgasquelle um Simulationszeit zu sparen an der Brandraumdecke platziert wurde, muss sichergestellt sein, dass diese Annahme die gewonnenen Aussagen nicht verfälscht, wodurch die beobachteten Zusammenhänge nicht auf Realbrände übertragen werden könnten. Aus diesem Grund wurden einige Rechenläufe mit einer am Boden befindlichen, nach oben gerichteten Rauchgasquelle (positive z-Richtung) zur Kontrolle

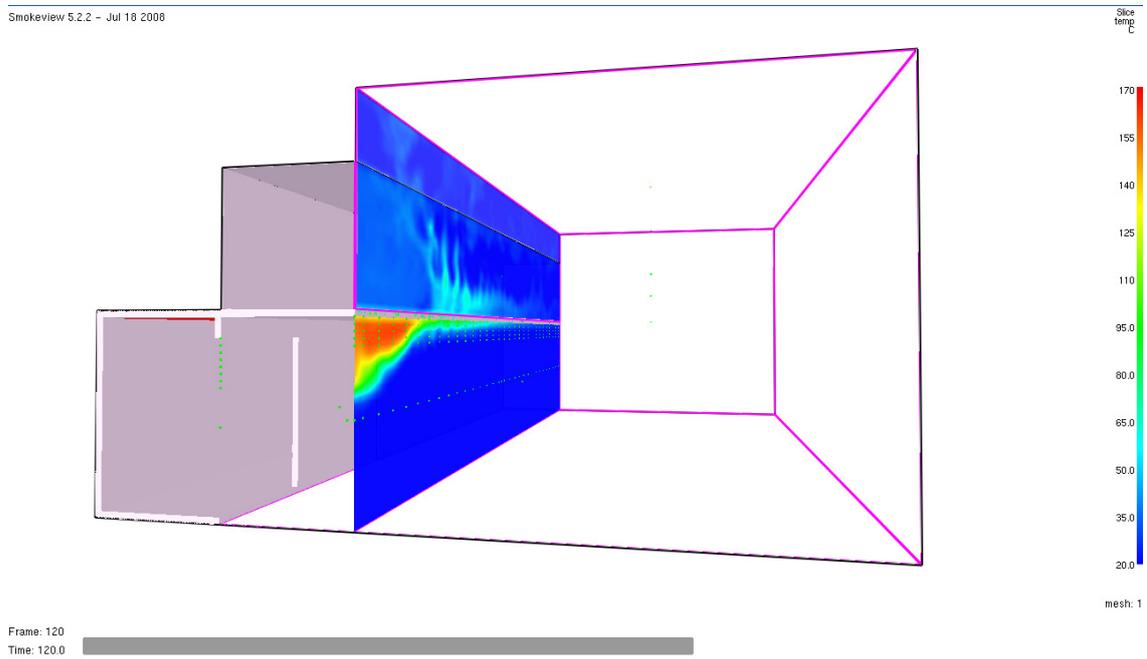


(a) Sim16: kleinste simulierte Balkonbreite  $bb=2,0$  m; Breite der Öffnung  $bo=4,0$  m

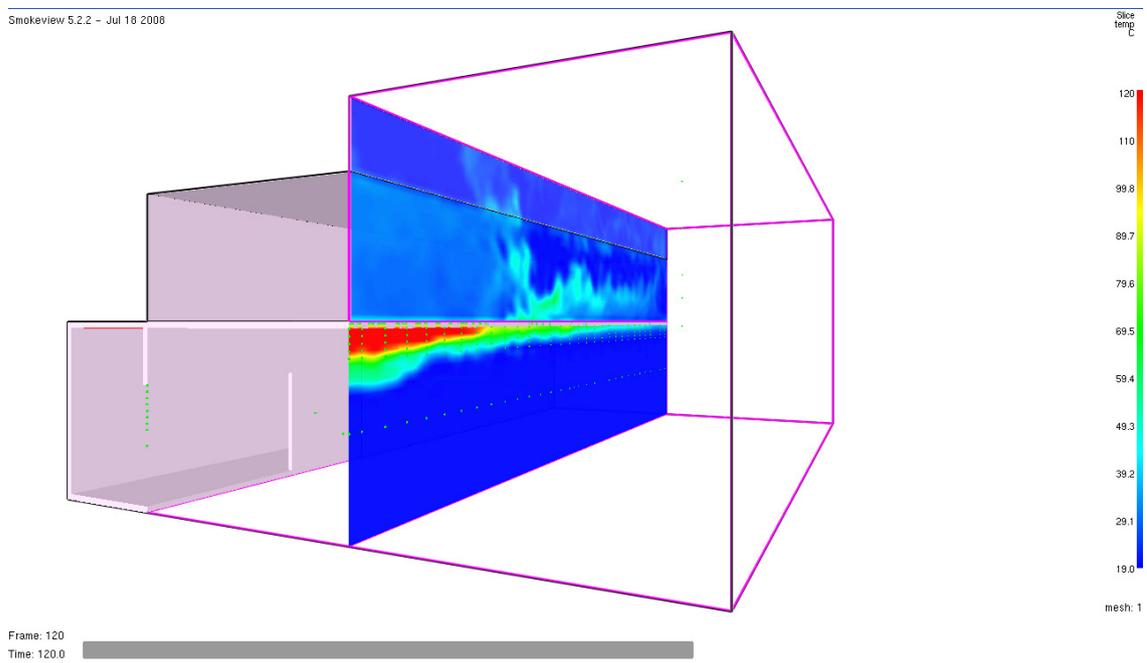


(b) Sim40: größte simulierte Balkonbreite  $bb=4,0$  m; Breite der Öffnung  $bo=6,0$  m

Abbildung 7.1: Richtungsvektoren und Temperatur der Strömung unter dem Balkon und im anschließenden Spill-Plume beispielhaft für zwei Simulationen (Schnitt in der Symmetrieebene)



(a) Sim16: kleinste simulierte Balkonbreite  $bb=2,0$  m; Breite der Öffnung  $bo= 4,0$  m



(b) Sim40: größte simulierte Balkonbreite  $bb=4,0$  m; Breite der Öffnung  $bo= 6,0$  m

Abbildung 7.2: Seitliche Ausbreitung der Strömung an der Kante beispielhaft für zwei Simulationen zur Überprüfung des Simulationsszenariums

durchgeführt. Der angenommene Volumenstrom wurde nicht geändert. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit jenen Szenarien, bei denen sich die Rauchgasquelle an der Decke befand zeigte, dass die erhaltenen Massenströme nicht signifikant voneinander abweichen und die selben Strömungscharakteristika aufweisen. Ein Vergleich der ausgewerteten Daten ist anhand der im *Anhang D* und *Anhang E* befindlichen Zusammenstellungen für die Szenarien "Sim26" und "Sim26 Brand unten" möglich. Für die Einmischraten von der Öffnung bis zur Kante  $M_b/M_w$  betragen diese Unterschiede ca. 3%. Die Absolutwerte der gemessenen Massenströme weichen etwas mehr voneinander ab, da beim Aufsteigen vom Boden bis zur Brandraumöffnung mehr Umgebungsluft eingemischt wird. Die Massenströme  $M_w$  gemessen in der Brandraumöffnung sind bei den Simulationen mit an der Decke liegender Rauchgasquelle also durchschnittlich um 10% geringer.

Bei den meisten Rechenläufen konnte eine weitgehend stabile Strömung nach rund 80 Sekunden Simulationszeit beobachtet werden (gesamte Simulationszeit meist 120 s  $\Rightarrow$  40 s "Steady-State"). Für die am Boden befindliche Brandquelle dauerte dies bei gleicher Geometrie und Brandleistung über 100 Sekunden. Die angestrebte Simulationszeitreduktion war also gegeben.

### 7.1.2 Plausibilitätskontrolle

Die aus den verschiedenen Simulationen gewonnenen Werte liefern allesamt ähnliche Ergebnisse. Änderungen der Werte für die Temperaturen und Massenströme sind aufgrund der Variation der Parameter nachvollziehbar. Im Zuge der Simulationsauswertung erzeugte Grafiken und die mittels SMOKEVIEW generierten Visualisierungen ermöglichen eine weitere Kontrollmöglichkeit.

Alle Resultate der durchgeführten Rechenläufe und deren Auswertungen wurden überprüft und als plausibel eingestuft.

## 7.2 Verteilung der Massenströme an der Kante

Durch die 50 cm breiten Devices und die zugehörigen Temperaturmessungen an der Kante konnten für jede Simulation die Verteilung des Massenstromes entlang der Kante (in y-Richtung) und die Temperaturverteilung ermittelt werden. Da bei den durchgeführten Simulationen auf kanalisierende Rauchschürzen unterhalb der Balkonplatte gänzlich verzichtet wurde, breitete sich der Heißgasstrom entlang des Balkons ungehindert zu den Seiten aus.

In allen Fällen verteilte sich der Rauch über die ganze Balkonlänge, was zur Umströmung der gesamten Kante führte, wenngleich die hervortretenden Rauchgasmengen an den Rändern absolut und anteilig am gesamten Kantenstrom sehr gering waren (unter 1% des gesamten Kantenmassenstromes). In *Abb. 7.5* ist die entstandene Strömung beispielhaft für zwei Simulationen dargestellt.

Nachfolgend ist beschrieben, wie sich die Variation der einzelnen Parameter auf die seitliche Ausbreitung und Verteilung des Massenstromes an der Kante in den Simu-

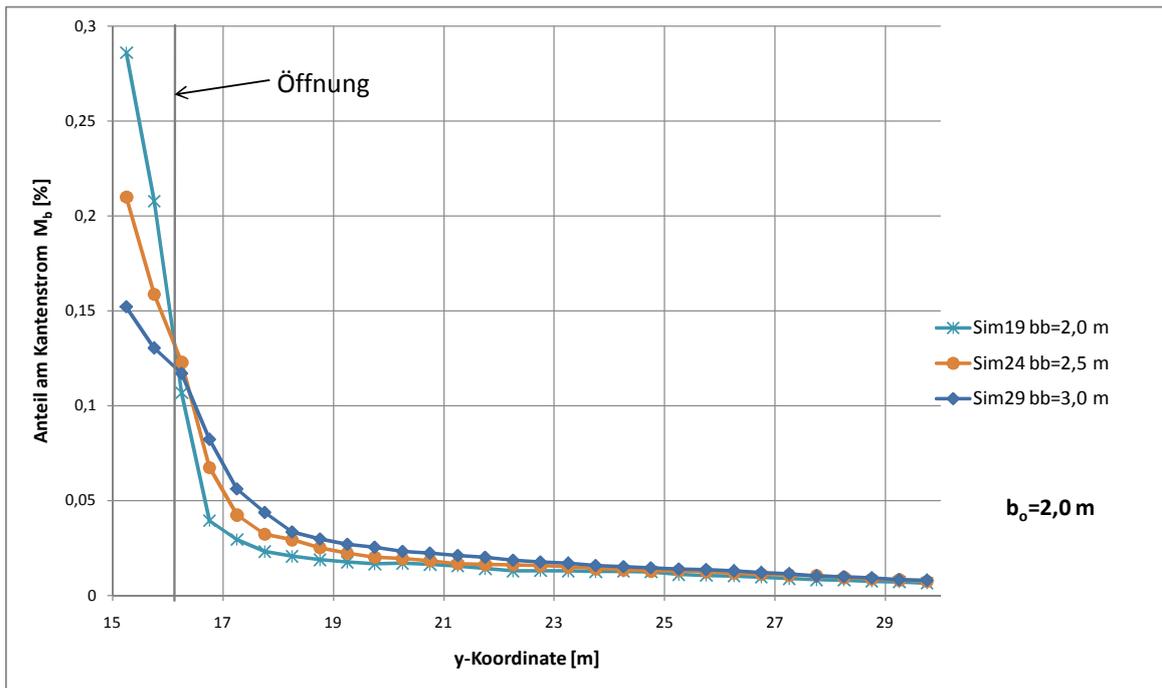
lationen auswirkt. Dabei wird im Rahmen dieser Arbeit auf die zu Grunde liegenden Gesetze der Strömungslehre nicht eingegangen (rein empirische Betrachtungen).

### 7.2.1 Einfluss der Balkonbreite $b_b$

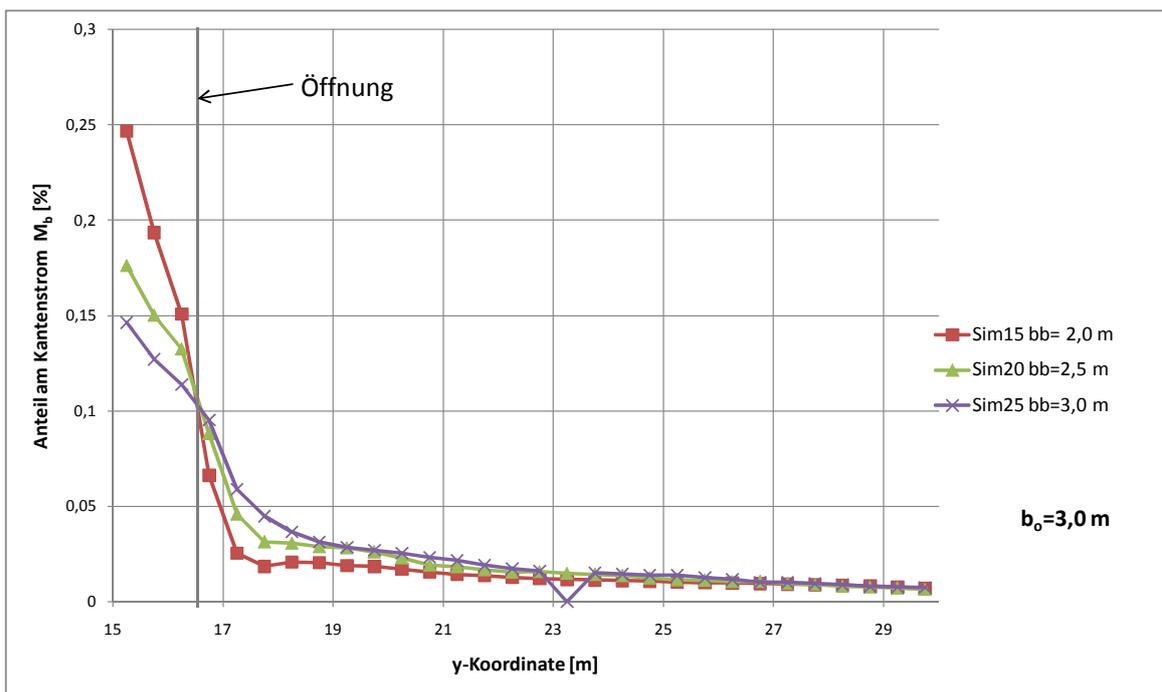
Durch die seitliche Ausbreitung verteilt sich die Strömung mit zunehmender Balkonbreite etwas gleichmäßiger. Für die simulierten Balkonbreiten von 2,0 bis 4,0 m ist dieser Einfluss aber relativ gering.

Eine Änderung der Verteilungskurven zufolge größerer Balkonbreiten ist lediglich im Bereich der Brandraumöffnung zu erkennen. Seitlich der Öffnung bleiben die Anteile am Gesamtmassenstrom gleich. Dies ist in *Abb. 7.3* und *Abb. 7.4* für unterschiedliche Öffnungsweiten und einer Sturzhöhe von 0,3 m dargestellt. Die einzelnen Diagramme zeigen nur jeweils das halbe Szenarium (Spiegelung).

Bei den untersuchten Geometrien war also der Einfluss der Balkonbreite bzw. die Länge jenes Bereiches, in dem die Rauchgasströmung durch eine horizontale Platte am Aufstieg gehindert wird, auf die resultierende Verteilung der Strömung an der Kante sehr gering. Die Öffnungsgeometrie ist offenbar von größerer Bedeutung für die seitliche Ausbreitung als die Balkonbreite.

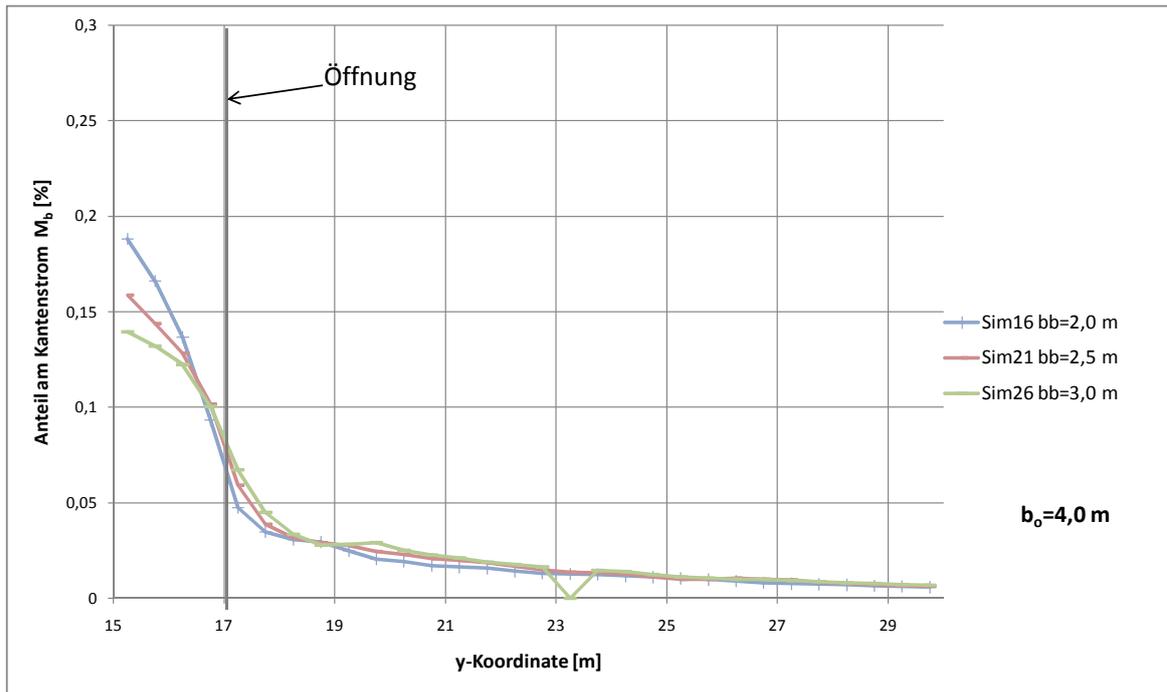


(a) Öffnungsbreite  $b_o=2,0$  m; Sturzhöhe  $h_{\text{Sturz}}=0,3$  m

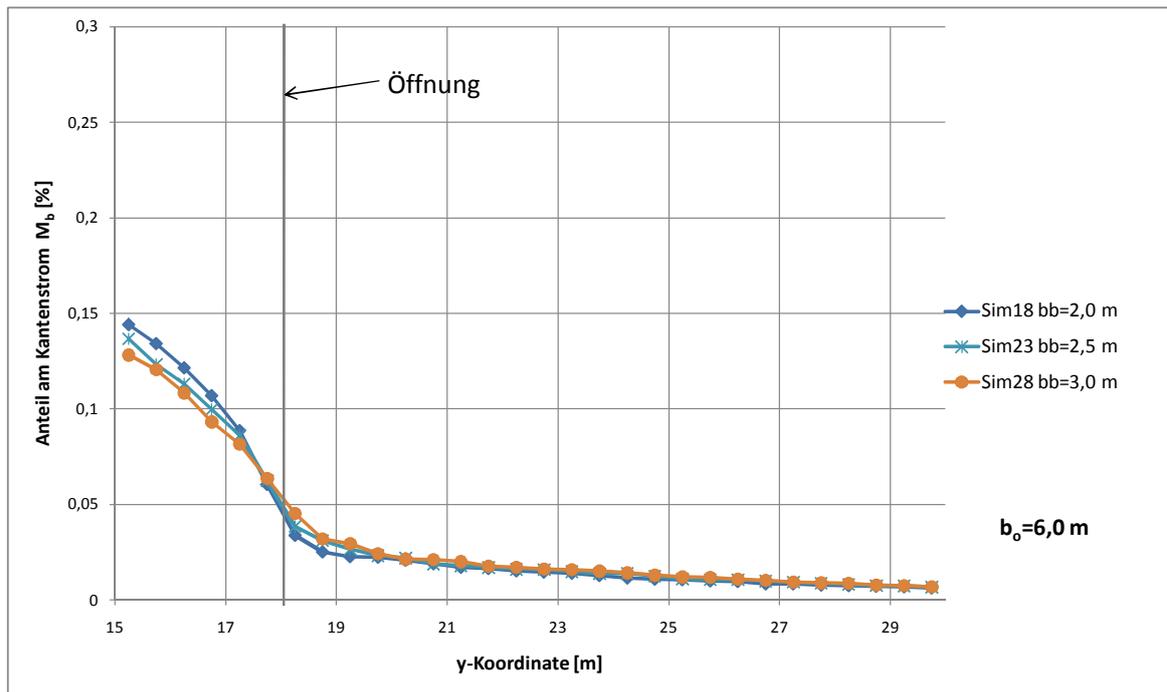


(b) Öffnungsbreite  $b_o=3,0$  m; Sturzhöhe  $h_{\text{Sturz}}=0,3$  m

Abbildung 7.3: Verteilung des Massenstroms entlang der Kante abhängig von der jeweiligen Balkonbreite für unterschiedliche Öffnungsbreiten (1)



(a) Öffnungsbreite  $b_o=4,0$  m; Sturzhöhe  $h_{Sturz}=0,3$  m



(b) Öffnungsbreite  $b_o=6,0$  m; Sturzhöhe  $h_{Sturz}=0,3$  m

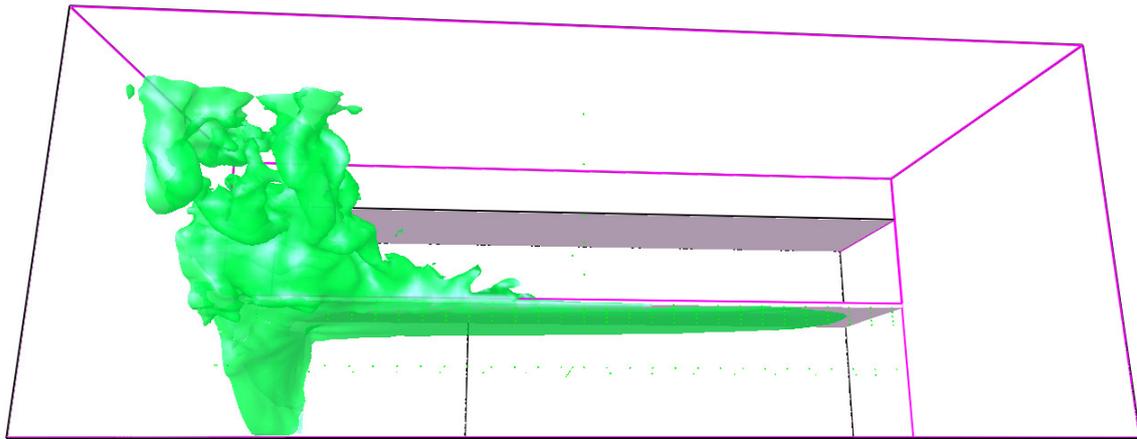
Abbildung 7.4: Verteilung des Massenstroms entlang der Kante abhängig von der jeweiligen Balkonbreite für unterschiedliche Öffnungsbreiten (2)

## 7.2.2 Einfluss der Öffnungsbreite $b_o$

Wie ebenfalls aus den Diagrammen in *Abb. 7.3* und *7.4* ersichtlich ist, verursachen breitere Öffnungen eine geringfügige Abflachung der Verteilungskurve des Kantenmassenstromes. Wiederum ist diese Änderung der Verteilung nur in einem Bereich in der Mitte der Kante festzustellen, welcher ca. der jeweiligen Breite der Öffnung entspricht.

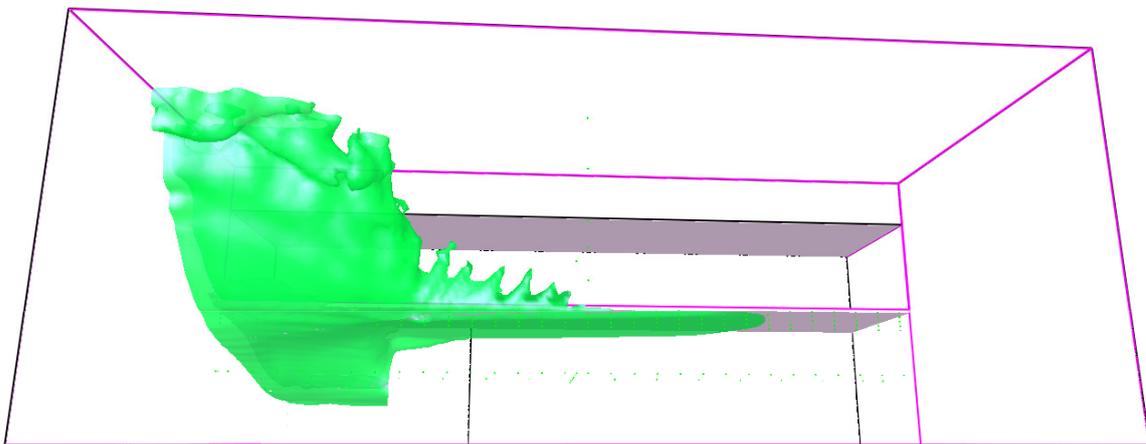
In *Abb. 7.5* sind die entstandenen Strömungen für eine 2,0 und eine 6,0 m breite Brandraumöffnung zum Vergleich dargestellt. Die Sturzhöhe betrug jeweils 0,3 m.

Smokeview 5.2.2 - Jul 18 2008



(a) Öffnungsbreite  $b_o=2,0$  m; Sturzhöhe  $h_{\text{Sturz}}=0,3$  m

Smokeview 5.2.2 - Jul 18 2008



(b) Öffnungsbreite  $b_o=6,0$  m; Sturzhöhe  $h_{\text{Sturz}}=0,3$  m

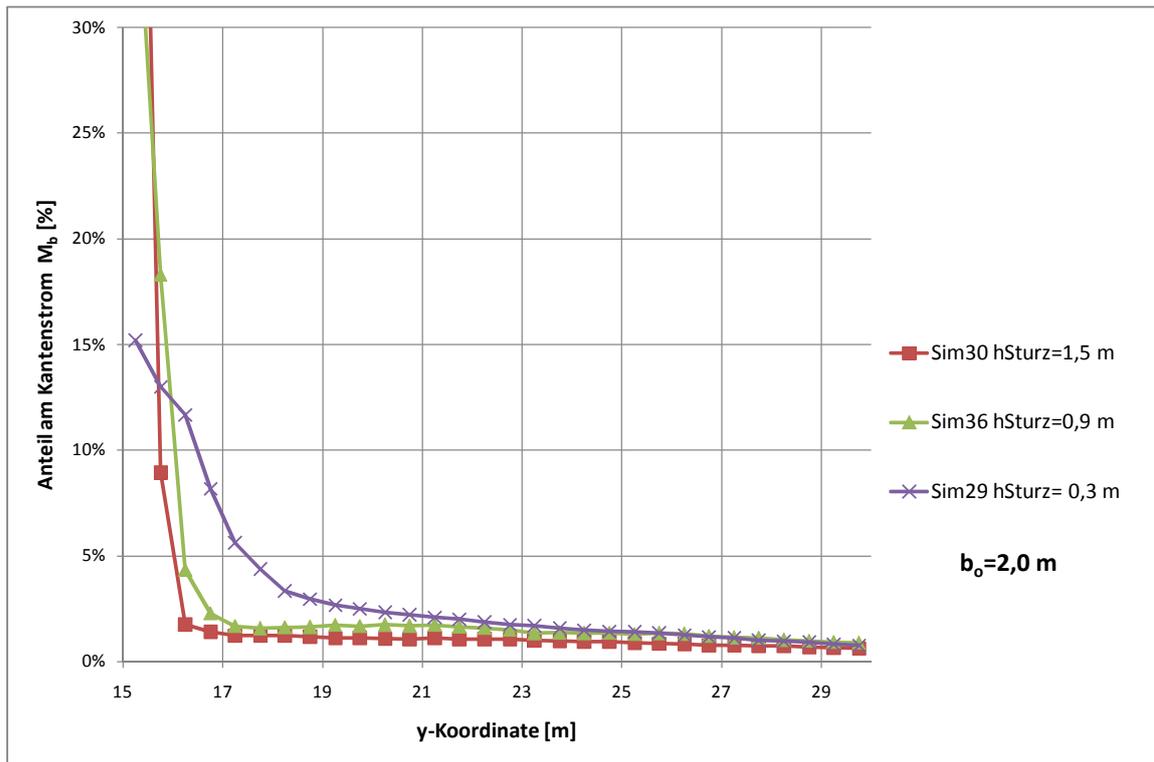
Abbildung 7.5: Massenstrom an der Kante mit anschließenden BSP, dargestellt als Flächen gleicher Temperatur (Isosurfaces für  $50^{\circ}\text{C}$ ) mittels SMOKEVIEW bei einem 3,0 m breiten Balkon für unterschiedliche Öffnungsbreiten

### 7.2.3 Einfluss der Sturzhöhe $h_{Sturz}$

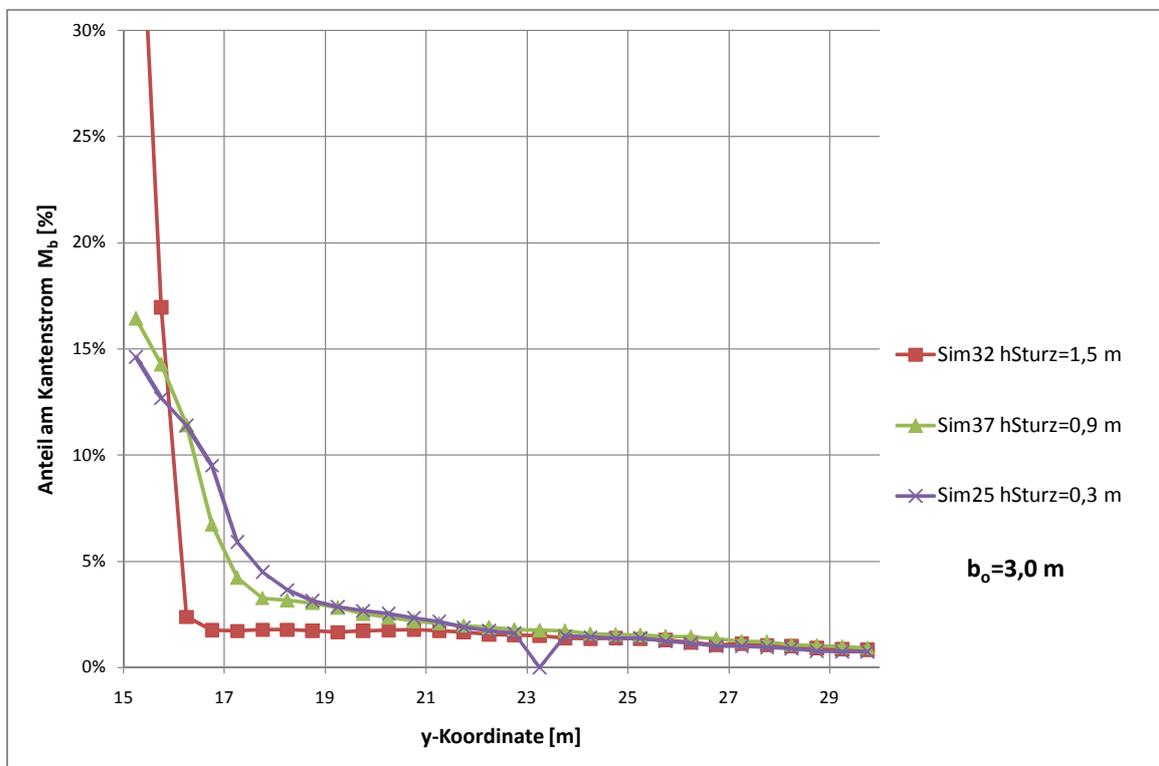
Mit größerer Sturzhöhe breitet sich die Strömung zu den Seiten hin weniger aus. Dieser Effekt tritt wieder bei schmalen Brandraumöffnungen stärker auf als bei breiten [siehe Abb. 7.6 und 7.7].

In Abb. 7.8 ist ersichtlich, dass durch einen tiefen Sturz die Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung steigt. Dargestellt sind Flächen gleicher Geschwindigkeit für einen Schnitt bei  $y = 15,1 m$  und einen horizontalen Schnitt bei  $z = 2,8 m$  (direkt unter der Deckenplatte). Die größte auftretende Geschwindigkeit in x-Richtung beträgt für  $h_{Sturz} = 0,3 m$  rund  $4,25 m s^{-1}$  und für einen  $1,5 m$  hohen Sturz  $6,35 m s^{-1}$ . Der Rauchgasmassenstrom wird also durch den Sturz stark kanalisiert und trifft aufgrund des höheren Impulses erst später auf die Balkonplatte, wodurch er sich seitlich weniger weit ausbreitet.

Bei der größten untersuchten Öffnungsbreite von  $6,0 m$  ist der Einfluss der Sturzhöhe auf die Verteilung an der Kante vernachlässigbar.

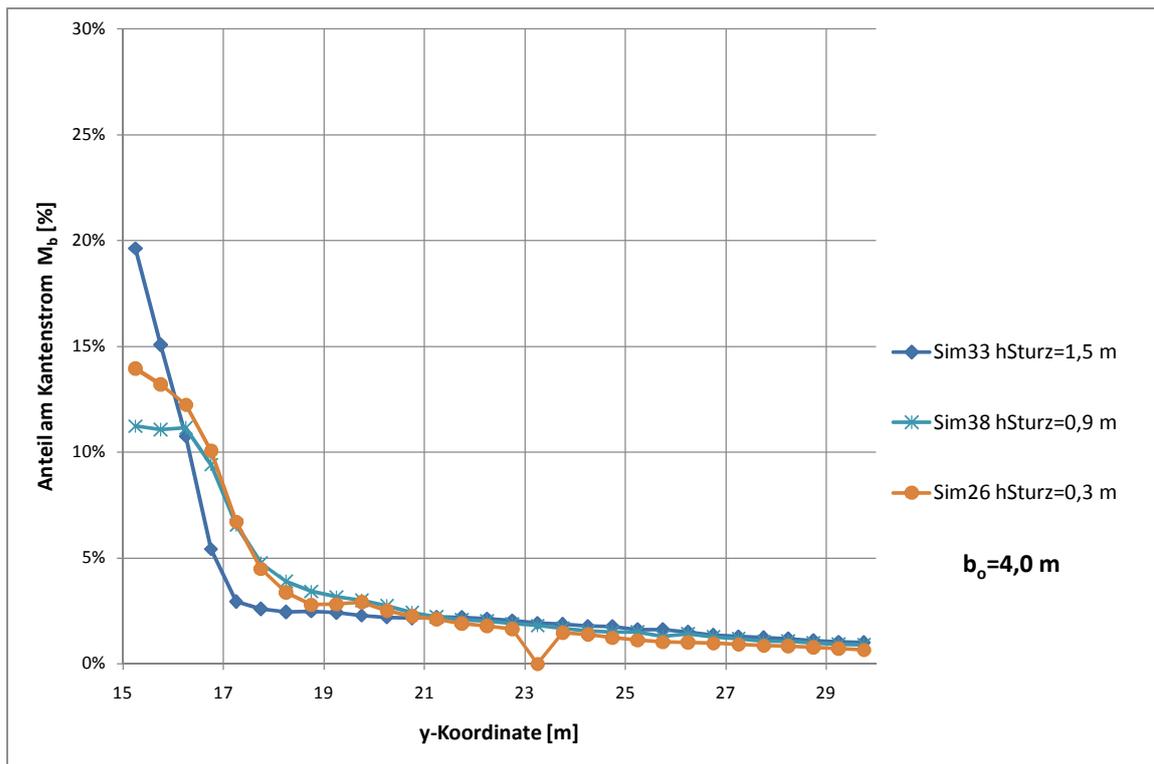


(a) Öffnungsbreite  $b_o=2,0$  m; Balkonbreite  $b_b=3,0$  m

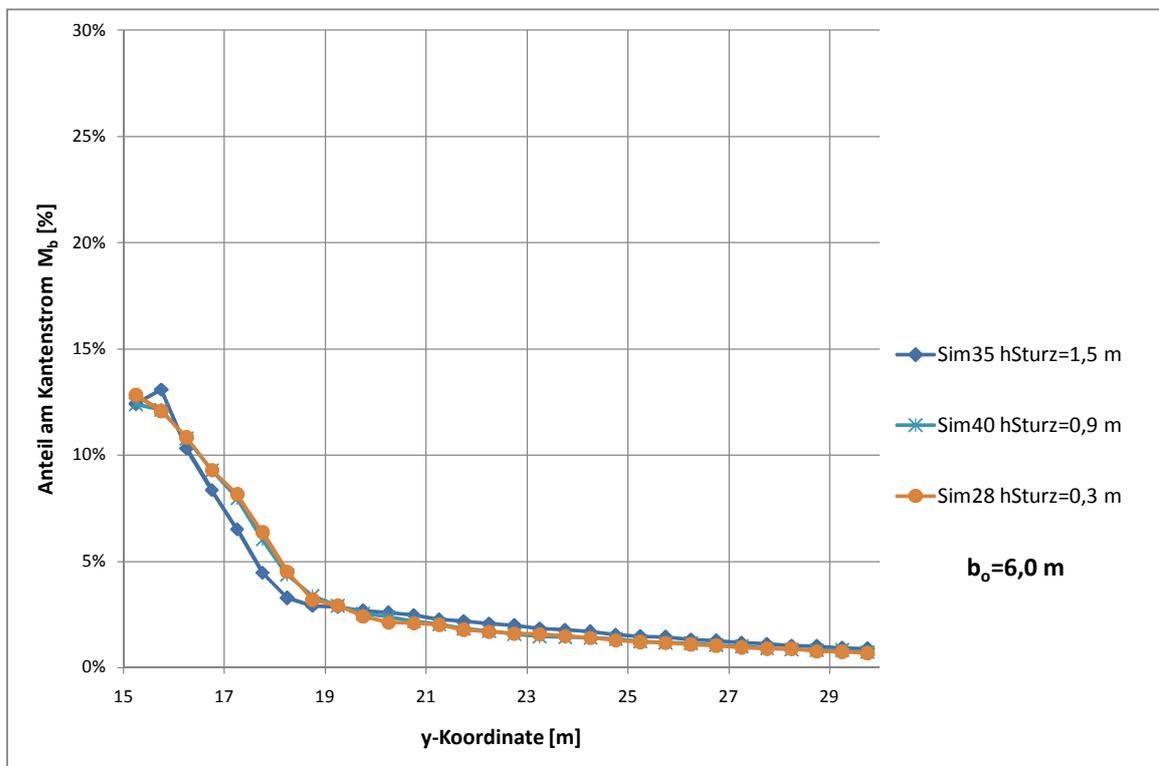


(b) Öffnungsbreite  $b_o=3,0$  m; Balkonbreite  $b_b=3,0$  m

Abbildung 7.6: Verteilung des Massenstroms entlang der Kante abhängig von der jeweiligen Sturzhöhe für unterschiedliche Öffnungsbreiten (1)

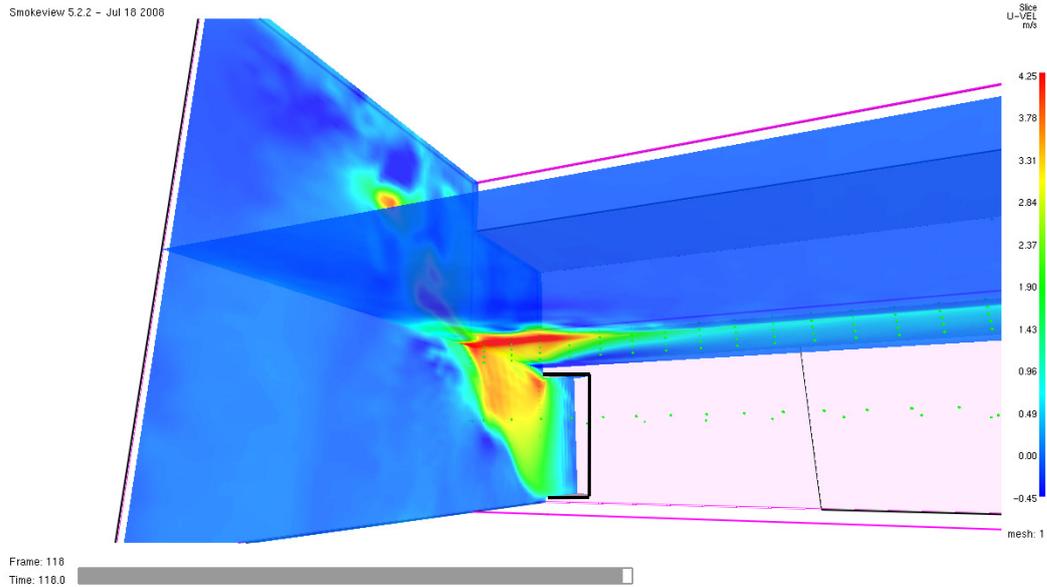


(a) Öffnungsbreite  $b_o=4,0$  m; Balkonbreite  $b_b=3,0$  m

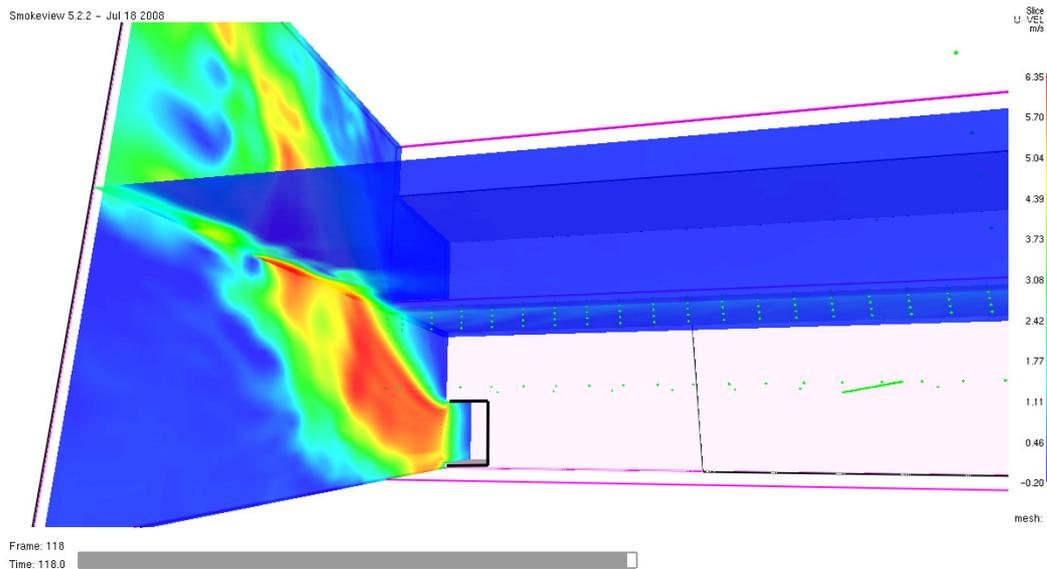


(b) Öffnungsbreite  $b_o=6,0$  m; Balkonbreite  $b_b=3,0$  m

Abbildung 7.7: Verteilung des Massenstroms entlang der Kante abhängig von der jeweiligen Sturzhöhe für unterschiedliche Öffnungsbreiten (2)



(a) Sim29; Sturzhöhe  $h_{Sturz}=0,3$  m



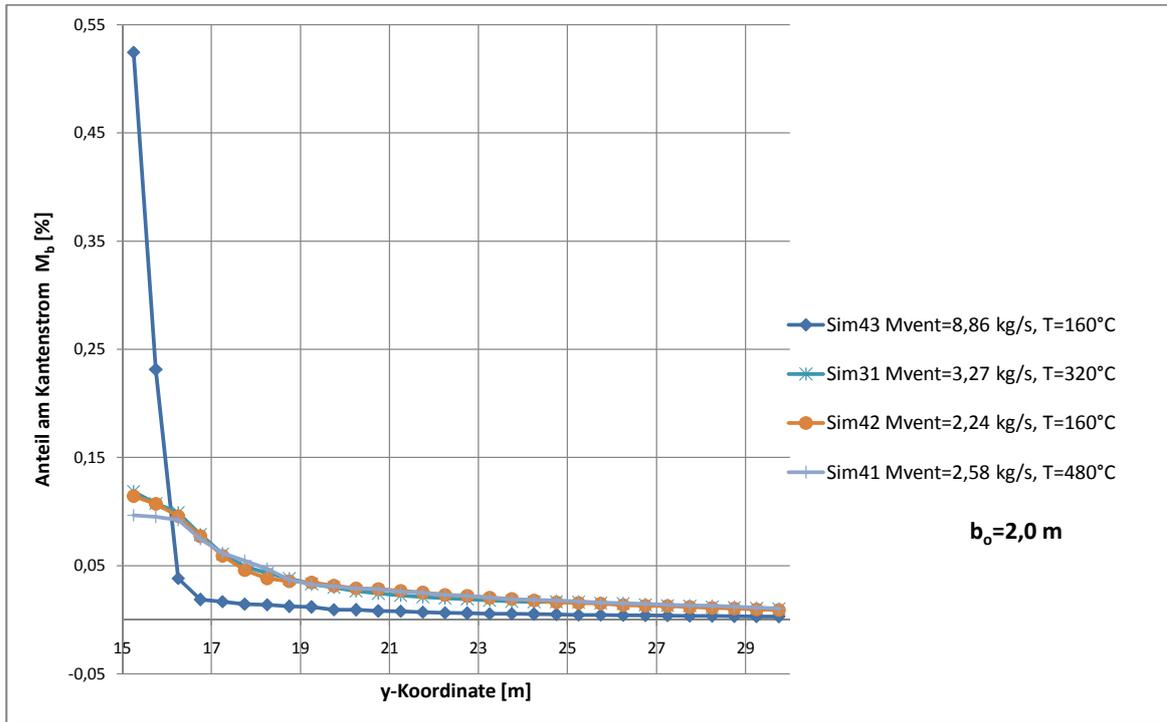
(b) Sim30; Sturzhöhe  $h_{Sturz}=1,5$  m

Abbildung 7.8: Visualisierung der Strömungsgeschwindigkeiten zur Untersuchung der seitlichen Ausbreitung in Abhängigkeit von der Sturzhöhe  $h_{Sturz}$  für eine Öffnungsbreite  $b_o = 2,0$  m

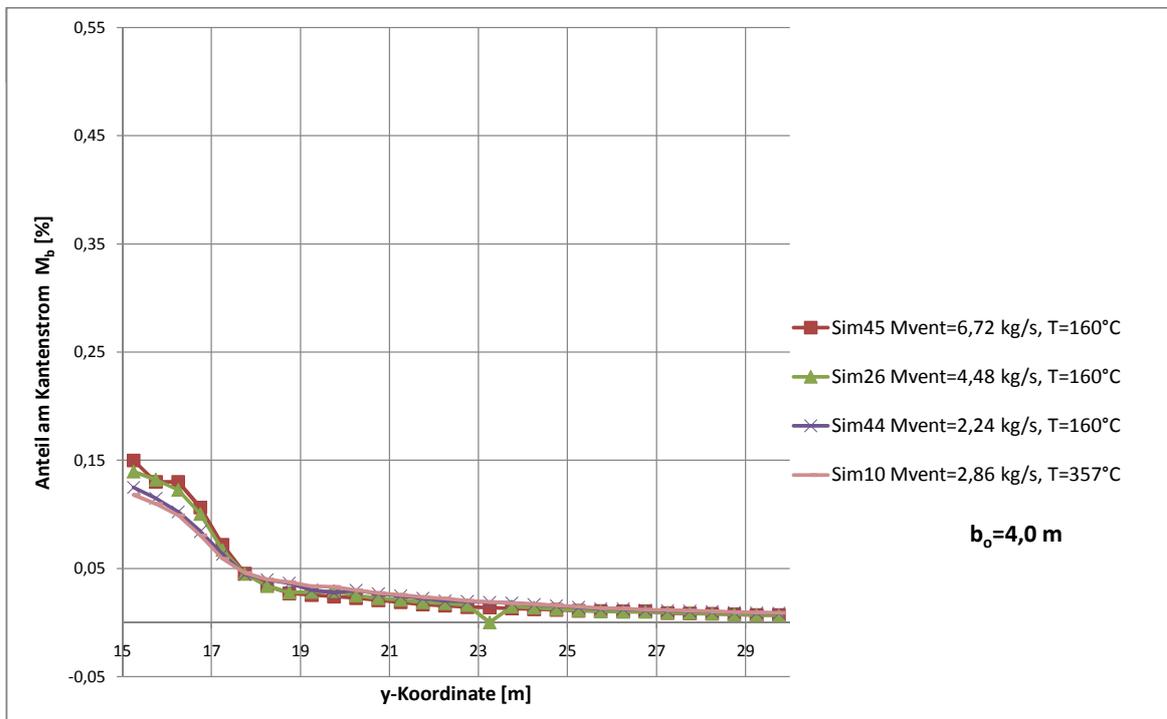
### 7.2.4 Einfluss der Brandleistung $Q$

Die Verteilung des Massenstromes entlang der Kante für jene durchgeführten Simulationen, bei denen Größe und Temperatur des Ausgangsmassenstromes  $M_{vent}$  variiert worden waren zeigen, dass die Temperatur keinen nachvollziehbaren Einfluss auf die seitliche Ausbreitung nimmt. Bei sehr großen Massenströmen und schmalen Brandraummöffnungen ("fokussierter Impuls") breitet sich die Strömung unter dem Balkon am

geringsten aus [siehe Abb. 7.9].



(a) Öffnungsbreite  $b_o=2,0$  m



(b) Öffnungsbreite  $b_o=4,0$  m

Abbildung 7.9: Verteilung des Massenstroms entlang der Kante abhängig vom angenommenen Impulsmassenstrom für unterschiedliche Öffnungsbreiten

## 7.3 Umströmte Kantenbreite $W$

### 7.3.1 Festlegung der umströmten Kantenbreite

Wie unter *Pkt. 7.2* gezeigt, ist bei fehlenden Rauchschürzen der Rauchgasmassenzustrom keineswegs gleichmäßig entlang der Kante verteilt und die umströmte Kantenbreite  $W$  ist nicht definiert. Für diesen Fall wurden unter *Pkt. 5.2.2* zwei Möglichkeiten vorgestellt diese Größe zu berechnen: *Gl. 5.3* laut NFPA-Code [36] und die von Schneider [1] hergeleitete *Gl. 5.10*.

Zum Vergleich dieser Berechnungsansätze wurden die Simulationsergebnisse für die im Atrium aufsteigende Rauchgasmasse  $M_p$  mit den vorgestellten vereinfachten BSP-Methoden nachgerechnet. Für die Breite  $W$  der Rauchgasströmung an der Kante traf man 4 verschiedene Annahmen:

- Annahme laut Regelwerken mit  $W = b_o + b_b$  [*Gl. 5.3*]
- Berechnung nach Schneider, wobei zunächst für den Kantenmassenstrom der aus den Simulationen gewonnene Wert  $M_{b,sim.}$  eingesetzt wurde [*siehe Gl. 7.1*]. Auch den Öffnungsstrom  $M_w$  und die Rauchgastemperatur  $T_g$  in der Brandraumöffnung erhielt man aus den Simulationsdaten ( $T_{g,sim.}$  in der Mitte der Brandraumöffnung, 10 cm unter dem Türsturz).

$$W_{s,sim.} = b_o \frac{M_{b,sim.}}{M_{w,sim.}} \left[ 1 + \frac{T_0}{T_{g,sim.}} \left( \frac{M_{b,sim.}}{M_{w,sim.}} - 1 \right) \right] \quad (7.1)$$

Rechengang und Ergebnisse *siehe Anhang C*.

- Berechnung analog *Gl. 7.1*, wobei nicht der Kantenstrom aus der Simulation angesetzt wurde, sondern dieser Wert nach Harrison mittels *Gl. 5.19* berechnet wurde:

$$W_{s,rechn.} = b_o \frac{M_{b,rechn.}}{M_{w,sim.}} \left[ 1 + \frac{T_0}{T_{g,vent}} \left( \frac{M_{b,rechn.}}{M_{w,sim.}} - 1 \right) \right] \quad (7.2)$$

Rechengang und Ergebnisse *siehe Anhang C*.

- Einführung einer "Ersatzbreite"  $\bar{W}$  über welche die unter der Kante hervorströmende Rauchgasmasse pro Zeiteinheit als gleichmäßig verteilt angenommen werden kann. Dies entspricht eher jenen Voraussetzungen, welche zur Herleitung der einzelnen BSP-Methoden herangezogen wurden ("Kanalisation" des Rauchgasmassenzustromes).

Diese "Ersatzbreite" ergab sich durch Division des gesamten Kantenstromes durch den auftretenden Massenstrom-Maximalwert der 0,5 m breiten "Kanten-Devices" [*siehe Abb. 7.10 und 7.11*].

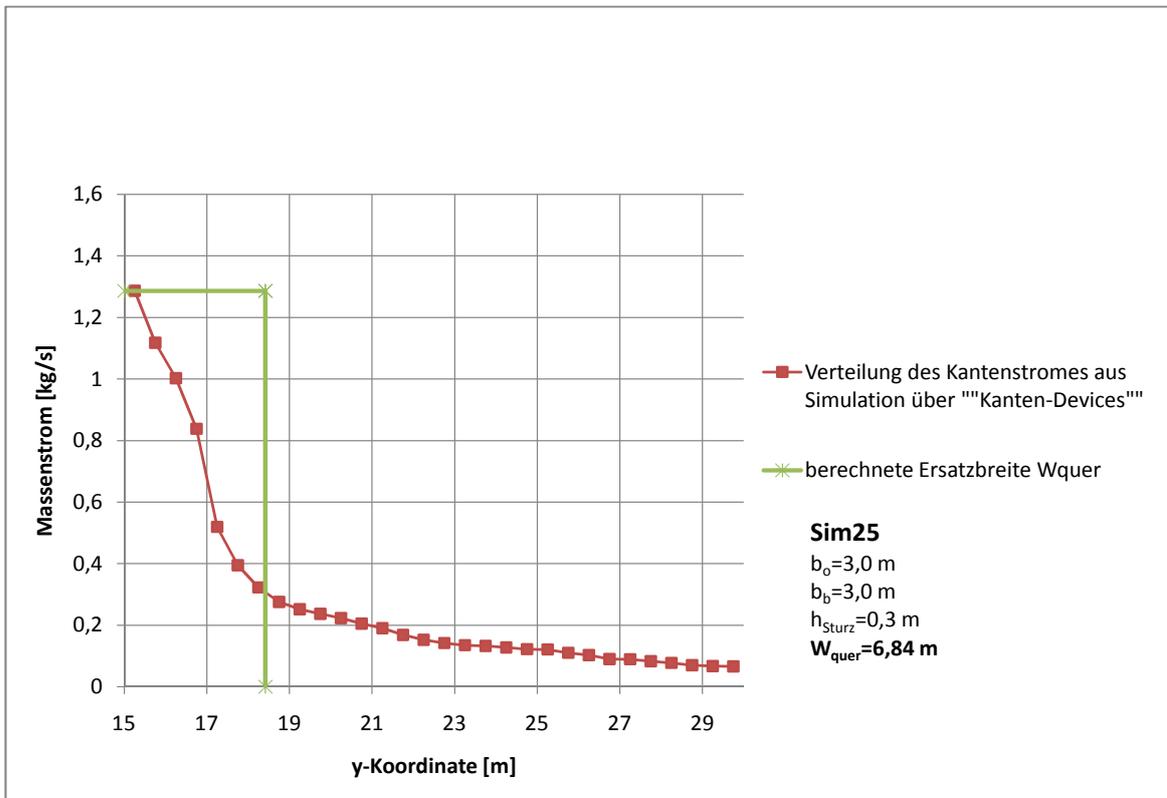
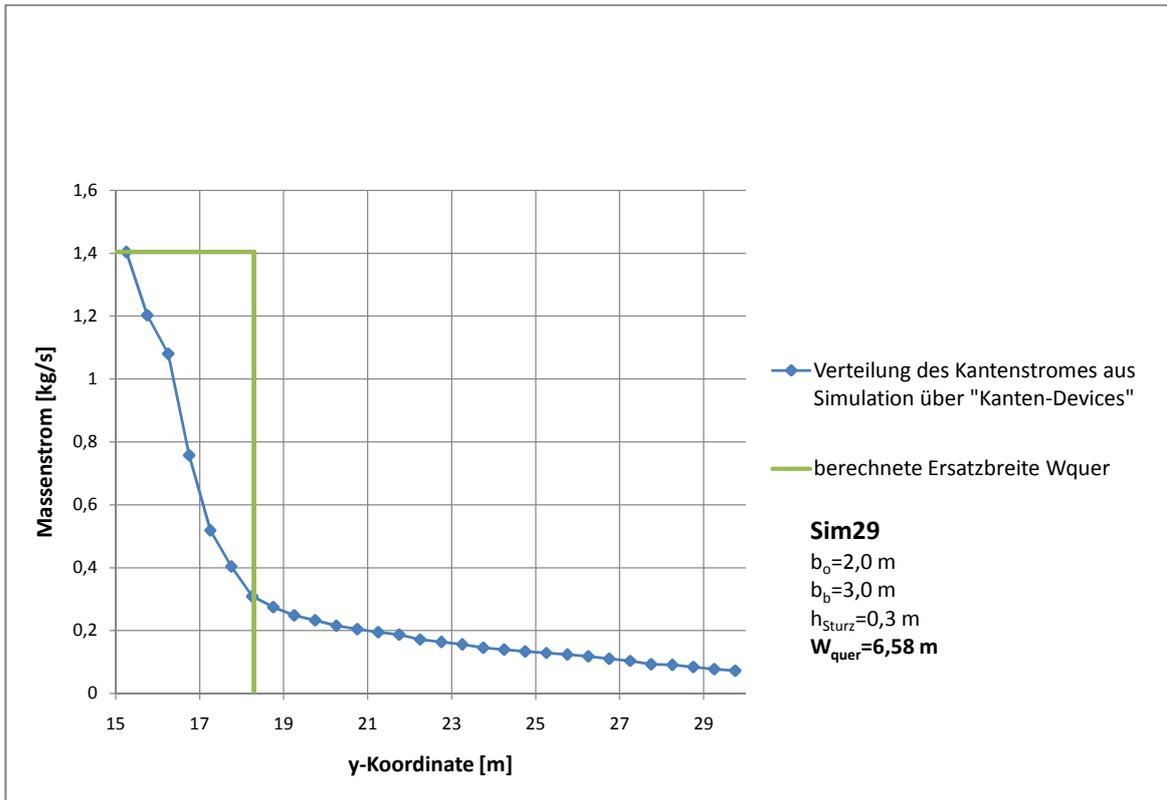


Abbildung 7.10: Größe und Ermittlung der Ersatzbreite  $\bar{W}$  ausgehend von der Verteilung des Massenstromes an der Spill-Kante

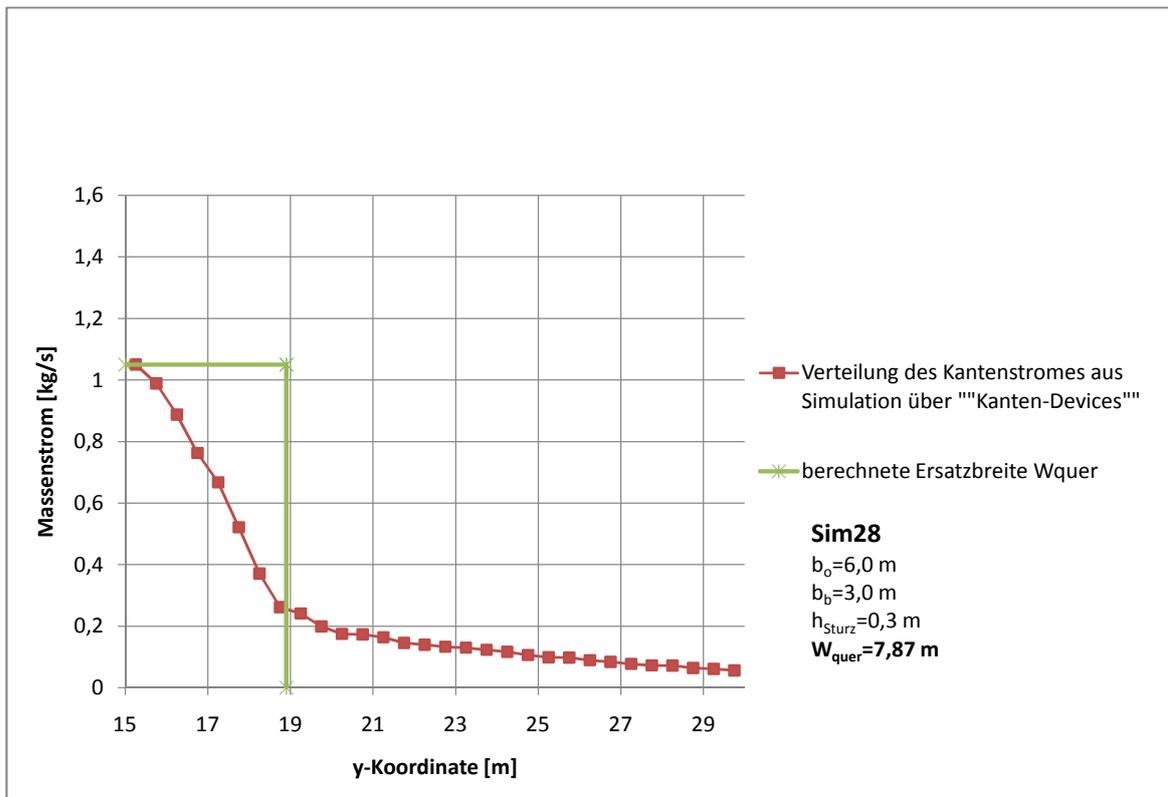
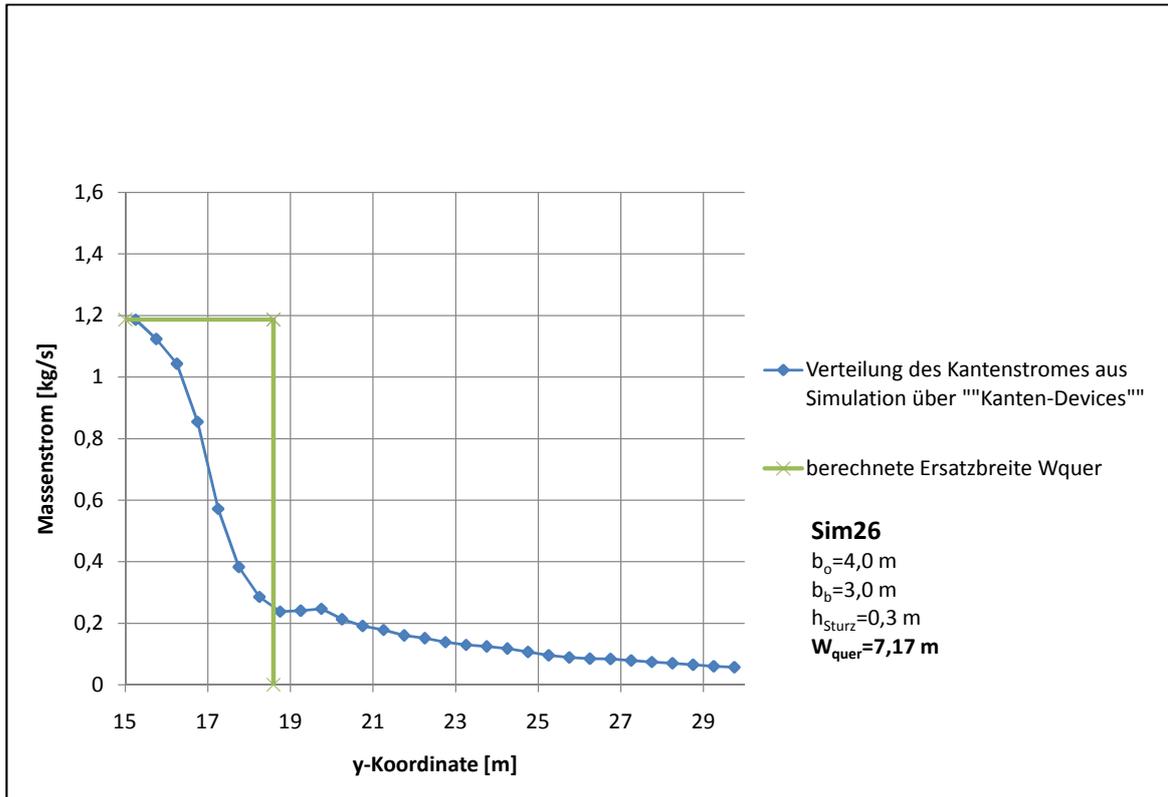


Abbildung 7.11: Größe und Ermittlung der Ersatzbreite  $\bar{W}$  ausgehend von der Verteilung des Massenstromes an der Spill-Kante

Bei schmalen Öffnungen ist  $\bar{W}$  generell kleiner als die vereinfachend angenommene Breite ( $b_o + b_b$ ). Für Öffnungsbreiten über  $4\text{ m}$  liegt sie darüber. Ein Vergleich dieser Werte für eine Simulationsreihe ist beispielhaft in *Abb. 7.12* angegeben. Der darin linear scheinende Verlauf der Ersatzbreite mit immer breiteren Öffnungen trifft nur auf Szenarien mit eher kleinen Sturzhöhen ( $h_{\text{Sturz}} = 0,3\text{ m}$ ) zu.

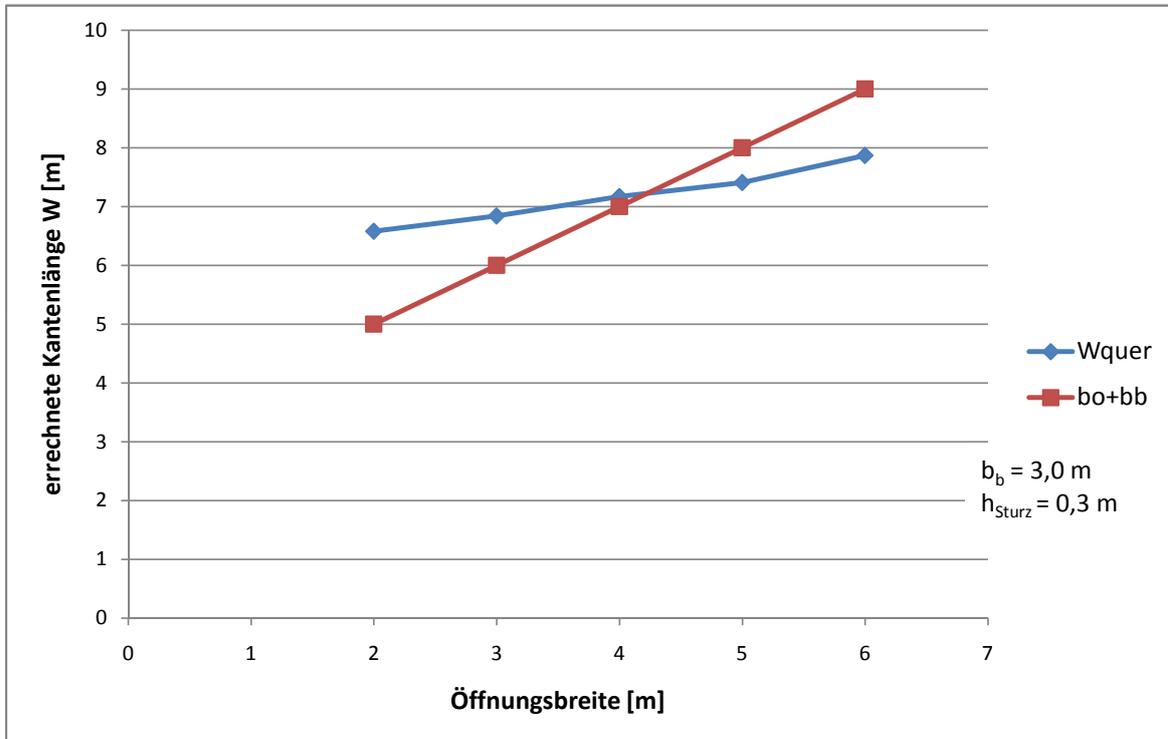


Abbildung 7.12: Vergleich der Werte für die eingeführte "Ersatzbreite"  $\bar{W}$  mit der Annahme  $W = b_o + b_b$

Weitere benötigte Eingangsgrößen für die BSP-Formeln wurden folgendermaßen ermittelt:

- geometrische Größen  $b_b$  und  $h_{br}$  aus dem jeweiligen Simulationsszenarium
- Kantenstrom  $M_{b,sim.}$  aus dem Simulationsergebnis (Ausnahme: Rechnung mit  $W_{s,rechn.}$ , da ja bei der Ermittlung dieser Größe  $M_{b,rechn.}$  herangezogen wurde)
- Brandleistung  $Q_{vent}$  rückgerechnet aus den Temperaturen und Volumenströmen [siehe Tab. 6.3]
- Dicke des Rauchgasmassenzustromes  $d_b$  berechnet mittels Gl. 4.33
- aus den Simulationen lagen Vergleichsdaten für die Aufstiegshöhen  $z = 0,6; 1,1; 2,1$  und  $3,1\text{ m}$  über der Spill-Kante vor

### 7.3.2 Vergleich Simulationsergebnisse und BSP-Berechnungen

Zur Vergleichsrechnung wurden alle unter *Pkt. 4.3* vorgestellten, vereinfachten BSP-Formeln herangezogen. Die errechneten Massenströme variieren stark, je nach angewendeter Methode [siehe *Abb. 7.13*]. Die in dieser Abbildung dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die vereinfachten Methoden nach Law'86, Thomas'87, NFPA'05, BSI'95 (Law), und Law'95 für die nachgerechneten Szenarien sehr große Abweichungen von den Simulationsergebnissen für alle Annahmen der Strömungsbreite ergeben (Abweichung meist über 10% vom Simulationsergebnis, sehr oft über 50%, durchschnittliche Abweichung über 30%). Die Ergebnisse dieser Vergleichsrechnungen sind im *Anhang D* angeführt.

Für die nachfolgenden Betrachtungen werden deshalb nur die Methoden nach Poreh et al.'98, Thomas et al.'98 und Harrison '04 herangezogen, da diese für alle Szenarien Resultate mit geringeren Abweichungen ergaben (Abweichung meist unter 10%, durchschnittliche Abweichung unter 20%) [siehe auch *Tab. 7.1*].

Weiters zeigen auch diese Ergebnisse den beschriebenen Trend, dass vereinfachte BSP-Formeln den Massenstrom bei kleinen Aufstiegshöhen unterschätzen [siehe *Pkt. 5.4*], während sie ab einer gewissen Höhe zu hohe Werte liefern (im vorliegenden Fall ab einer Aufstiegshöhe von  $z = 2,2\text{ m}$ ).

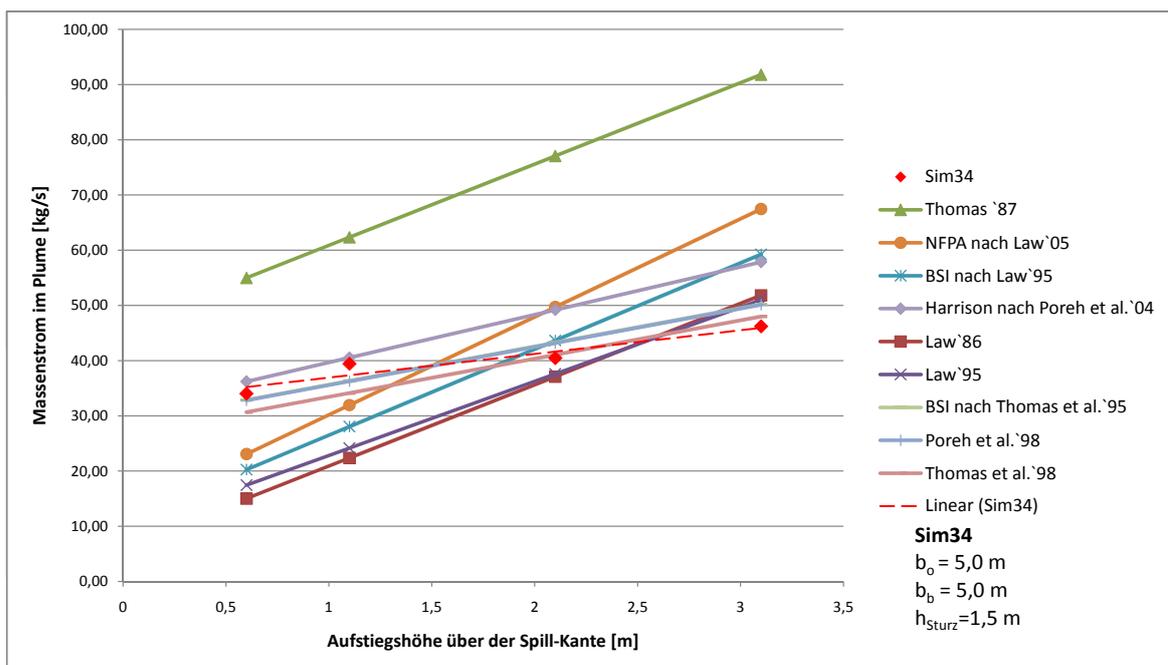
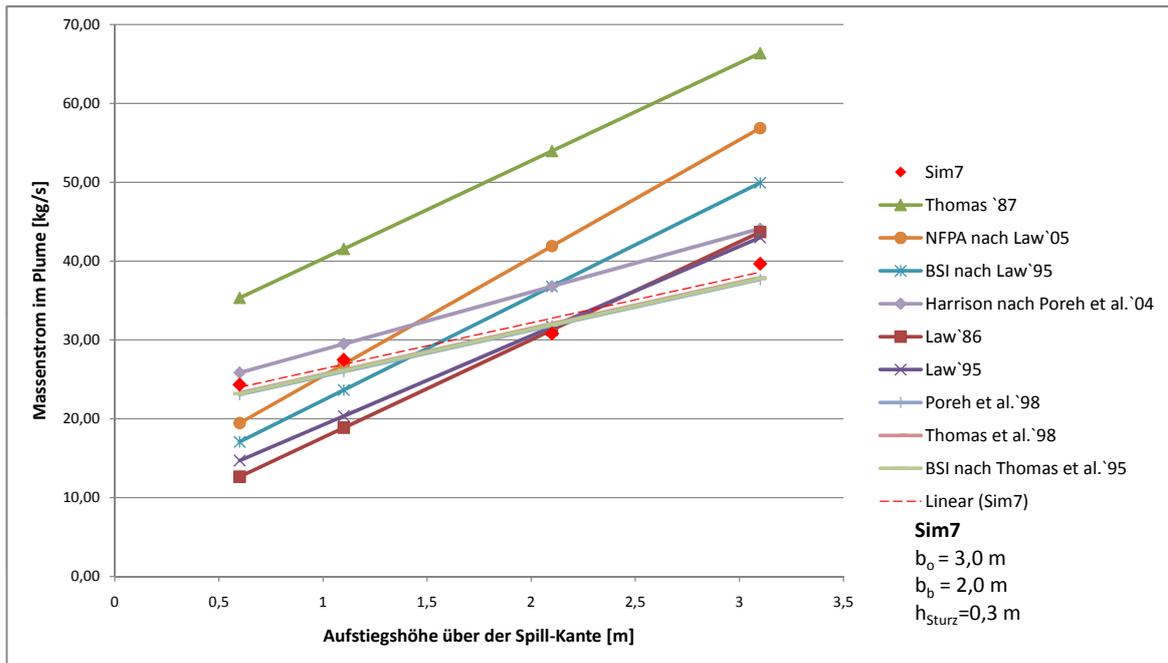


Abbildung 7.13: Vergleich von Simulations- und Berechnungsergebnissen für den im Atrium aufsteigenden Massenstrom  $M_p$  in Abhängigkeit von der Aufstiegshöhe

### 7.3.3 Vergleich der Ergebnisse für die unterschiedlich ermittelten Kantenbreiten

In den Abb. 7.14, 7.15 und 7.16 sind beispielhaft Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für einige Simulationen dargestellt. Jede der vereinfachten BSP-Methoden wurde mit den beschriebenen 4 Annahmen für die umströmte Kantenbreite  $W$  berechnet.

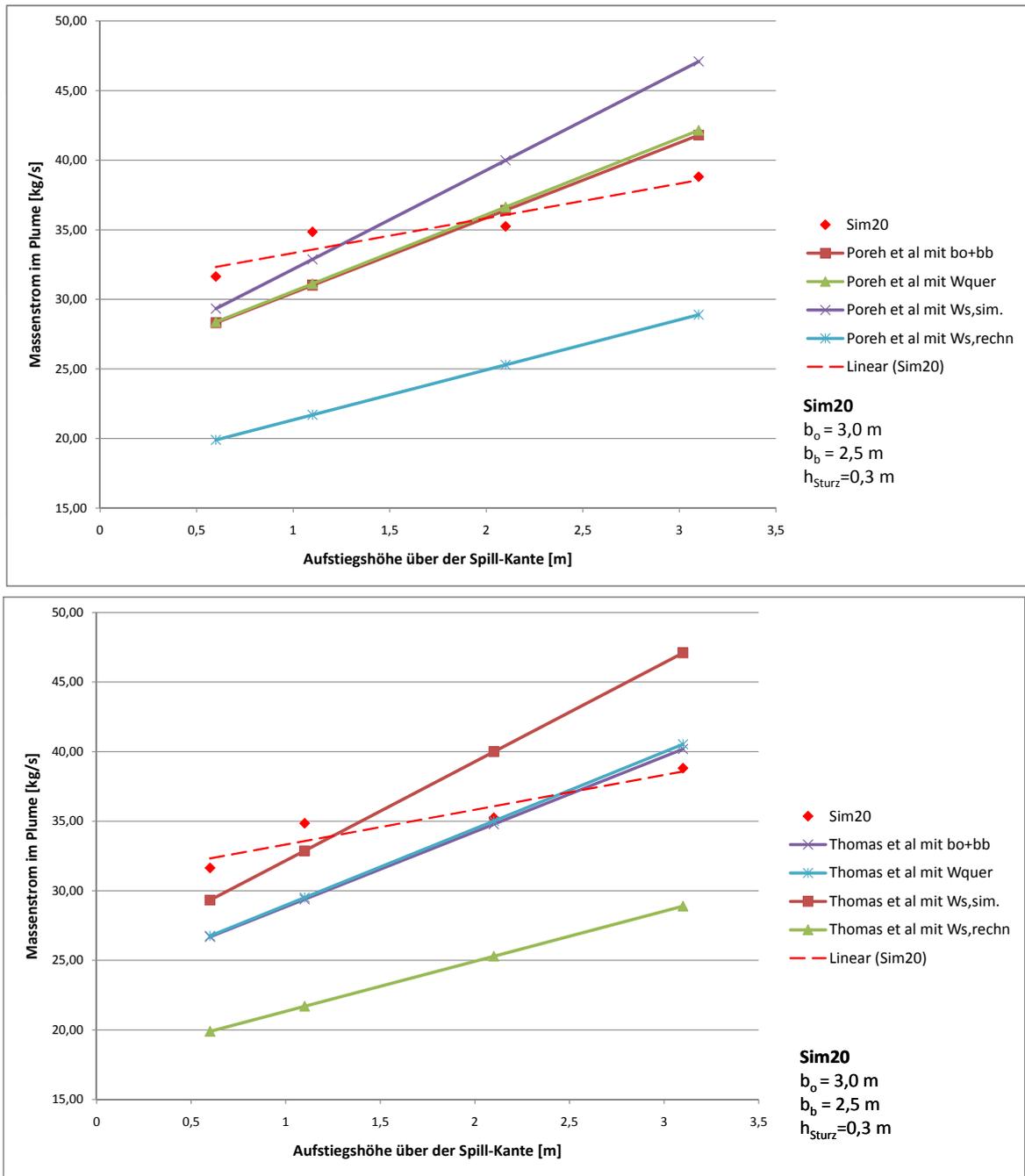


Abbildung 7.14: Vergleich der Berechnungsergebnisse für unterschiedlich ermittelte umströmte Kantenbreiten  $W$  mit Simulationsergebnissen (1)

In Tab. 7.1 sind die Ansätze für die Breite der umströmten Kante  $W$  anhand der durchschnittlichen Abweichung des Berechnungsergebnisses für  $M_{p, rechn.}$  vom Simulationsergebnis  $M_{p, sim.}$  zum Vergleich angeführt. Der Durchschnitt wurde dabei für jede Berechnungsmethode über alle durchgeführten Simulationen und alle Aufstiegshöhen  $z$  gebildet.

Die Rechnungen zeigten, dass die Annahme nach Gl. 5.3 mit  $W = b_o + b_b$  generell gerechtfertigt ist und für die betrachteten Aufstiegshöhen bis zu 3,1 m die BSP-Methoden

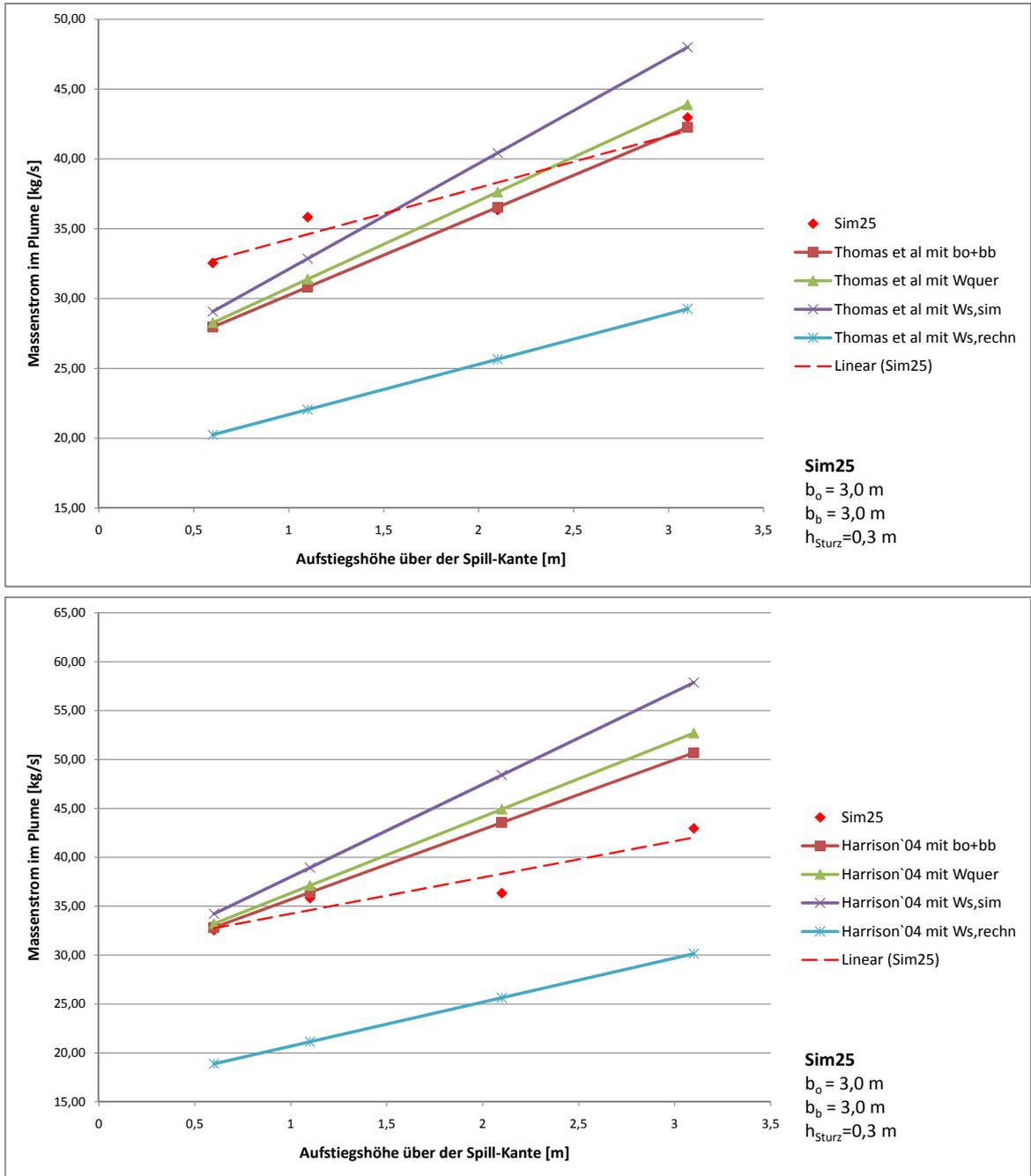


Abbildung 7.15: Vergleich der Berechnungsergebnisse für unterschiedlich ermittelte umströmte Kantenbreiten  $W$  mit Simulationsergebnissen (2)

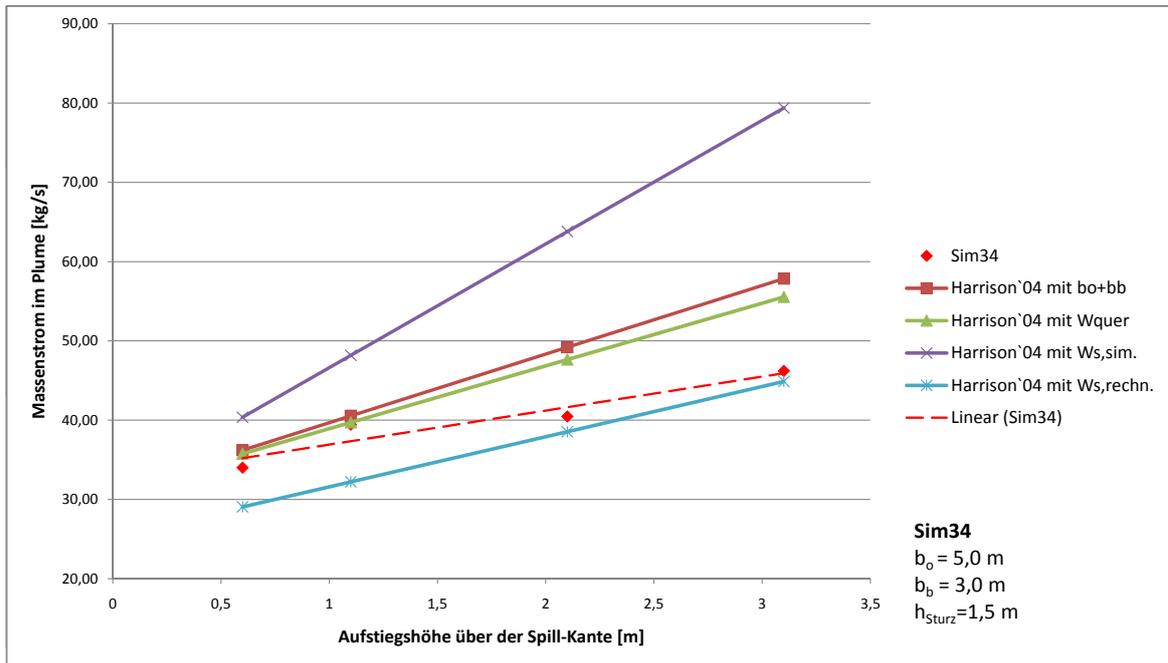
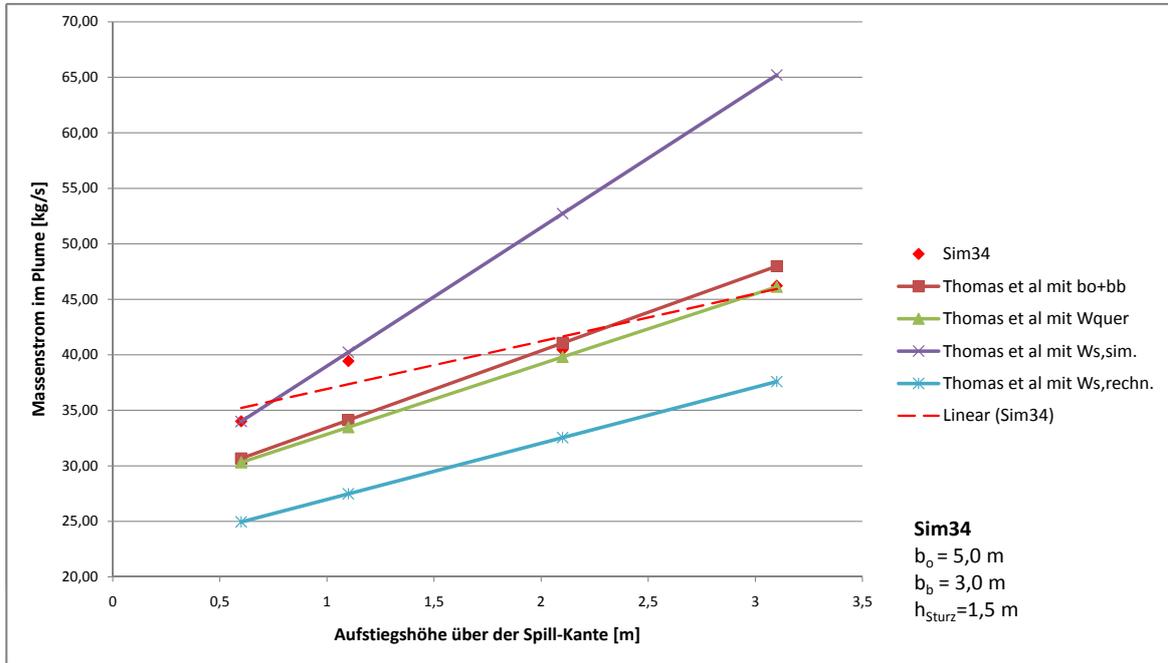


Abbildung 7.16: Vergleich der Berechnungsergebnisse für unterschiedlich ermittelte umströmte Kantenbreiten  $W$  mit Simulationsergebnissen (3)

BSP-Methode	durchschnittliche Abweichung für $M_{p,rechn.}$ von $M_{p,sim.}$			
	$W = b_o + b_b$	$W_{s,sim.}$	$W_{s,rechn.}$	Ersatzbreite $\overline{W}$
Law'86	33%	47%	46%	37%
Thomas'87	79%	136%	27%	77%
Law'95	30%	45%	43%	33%
BSI nach Law'95	31%	58%	38%	34%
NFPA nach Law	35%	74%	35%	38%
Poreh et al.'98	11%	22%	25%	11%
Thomas et al.'98	11%	20%	32%	11%
BSI nach Thomas et al.	11%	23%	32%	11%
Harrison'04	21%	38%	32%	21%

Tabelle 7.1: Durchschnittliche Abweichungen der BSP-Berechnungsergebnisse für  $M_p$  von den Simulationsergebnissen - Vergleich der Annahme von  $W$

Poreh'98, Thomas et al.'98 und BSI nach Thomas et al.'95 mit den so ermittelten Strömungsbreiten durchschnittliche Abweichungen von ca. 11% vom Simulationsergebnis erzielen.

Die Berechnung nach Gl. 7.1 führte bei den nachgerechneten Szenarien zu sehr hohen Werten für die umströmte Kantenbreite im Vergleich zur NFPA-Methode [siehe Tabellen im Anhang C]. Eingesetzt in die BSP-Formeln ergab dies Massenströme, die deutlich über den Simulationsergebnissen liegen.

Niedrigere Werte für die Kantenstrombreite liefert diese Gleichung, berechnet man den einzusetzenden Kantenmassenstrom vorab mit der Bestimmungsgleichung nach Harrison. Wesentlich dabei ist jedoch, dass Harrisons Formel sehr niedrige Kantenströme im Vergleich zu den Simulationswerten ergibt [siehe auch Pkt. 7.5.6]. Bei einem Großteil der untersuchten Szenarien ist  $M_{b,rechn.} < M_{w,sim.}$ , was nicht möglich ist (und somit der Nebenbedingung  $M_b \geq M_w$  widerspricht). In diesem Fall wurde  $M_{b,rechn.} = M_{b,sim.}$  gesetzt. Dadurch vereinfacht sich jedoch Gl. 5.10 zu  $W_s = b_o$  und sehr kleine Plume-massenströme im Vergleich zu den Simulationswerten sind die Folge.

Bei tiefreichenden Stürzen lassen sich mit dieser Vorgangsweise gute Ergebnisse sowohl für die Kantenbreite, als auch für den BSP-Massenstrom erzielen [siehe Abb. 7.16 unten].

Die Annahme einer Ersatzbreite  $\overline{W}$  wie unter Pkt. 7.3.1 beschrieben bringt für die untersuchten Szenarien keine wesentliche Verbesserung der Berechnungsergebnisse gegenüber der Annahme nach NFPA. Bei jenen Methoden mit den größten Abweichungen von den Simulationsergebnissen ergibt sich eine Reduktion der durchschnittlichen Abweichung von maximal 3%. Für jene BSP-Methoden mit ohnehin niedrigen durchschnittlichen Abweichungen von rund 12% liefern die Rechnungen mit einer Ersatzbreite  $\overline{W}$  weitgehend die selben Ergebnisse wie mit dem Ansatz für  $W$  in Abhängigkeit von Öffnungs- und Balkonbreite nach Law.

Die Ersatzbreite  $\overline{W}$  bringt zwar, eingesetzt in die BSP-Formeln in manchen Fällen ein zutreffenderes Resultat, im Vergleich zu den ohnehin durch die Anwendung der

vereinfachten Methoden vorhandenen Unsicherheiten ist dieses Mehr an Genauigkeit aber nicht erforderlich. Zusätzlich wäre diese angenommene Breite einer Strömung gleicher Intensität an der Kante als Eingangsgröße für die Berechnung zu bestimmen, was wiederum zu Unsicherheiten im Ergebnis führen würde, wenn dies über empirisch ermittelte Zusammenhänge erfolgt.

## 7.4 Einmischung in den Rauchgasmassenzustrom

Da die zugrundeliegenden Zusammenhänge aus der Strömungs- und Wärmelehre den Umfang dieser Arbeit übersteigen, werden im Folgenden rein empirische Betrachtungen, die Einmischung in die Strömung zwischen Brandraumöffnung und Überströmkannte betreffend, angestellt.

Um die entstandenen Strömungen unterhalb der Balkonplatte vergleichen zu können wurde der anteilige Massenstromzuwachs ausgehend vom gemessenen Öffnungsstrom herangezogen ( $M_w = 1,00$ ). Die Einmischrate beschreibt also das Verhältnis ( $M_b/M_w$ ) [siehe Abb. 7.17].

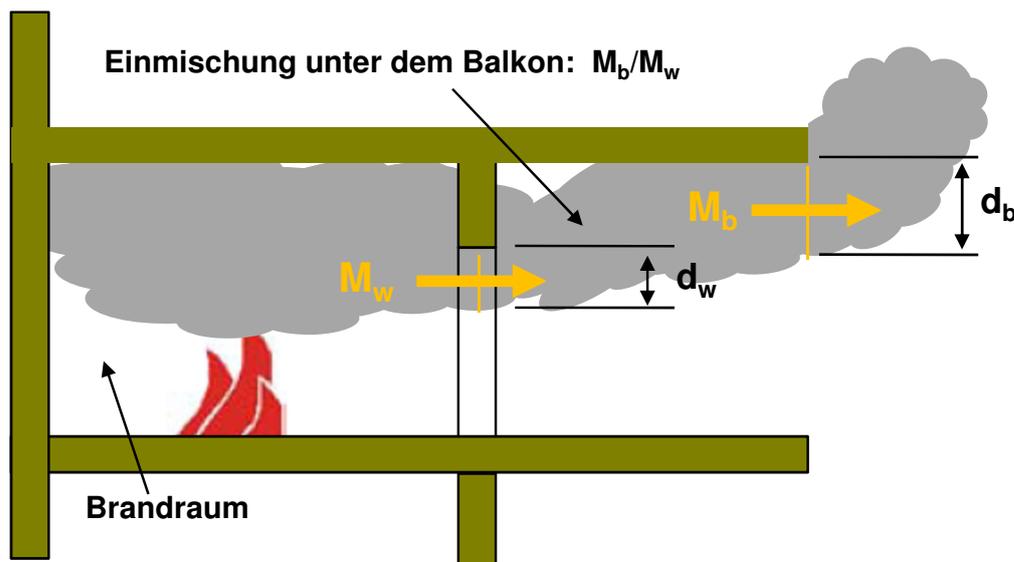


Abbildung 7.17: Massenstrom  $M_w$  austretend aus der Brandraumöffnung und der resultierende Kantenstrom  $M_b$

### 7.4.1 Einfluss der Balkonbreite $b_b$

In Abb. 7.18 ist der aus den Simulationen gewonnene Verlauf der Einmischrate für die in x-Richtung gerichtete Strömung unter der Balkonplatte dargestellt. Es sind einander jeweils Simulationsergebnisse für Balkonbreiten von 2,0, 2,5 und 3,0 m gegenübergestellt.

Generell ist die Einmischung in den Bereichen direkt nach der Brandraumöffnung und vor der Kante aufgrund der auftretenden Verwirbelungen am größten (jeweils ca. 20%

pro halbem Meter Strömungslänge). An den Öffnungsbereich schließt ein Bereich mit scheinbar geringerer Einmischrate an. Da sich der Massenstrom seitlich (in  $y$ -Richtung) ausbreitet nimmt seine Intensität in  $x$ -Richtung ab. Dieser Effekt steigt mit zunehmenden Öffnungsbreiten und Sturzhöhen [siehe auch Pkt. 7.4.2 und Pkt. 7.4.3].

Danach werden mit zunehmender Strömungslänge unter der Platte pro Längeneinheit annähernd gleiche Luftmengen eingemischt (ca. 10 bis 15% pro 0,5 m).

Die Einmischrate steigt also mit Ausnahme der beiden Bereiche an der Öffnung und an der Kante linear mit der Balkonbreite  $b_b$ .

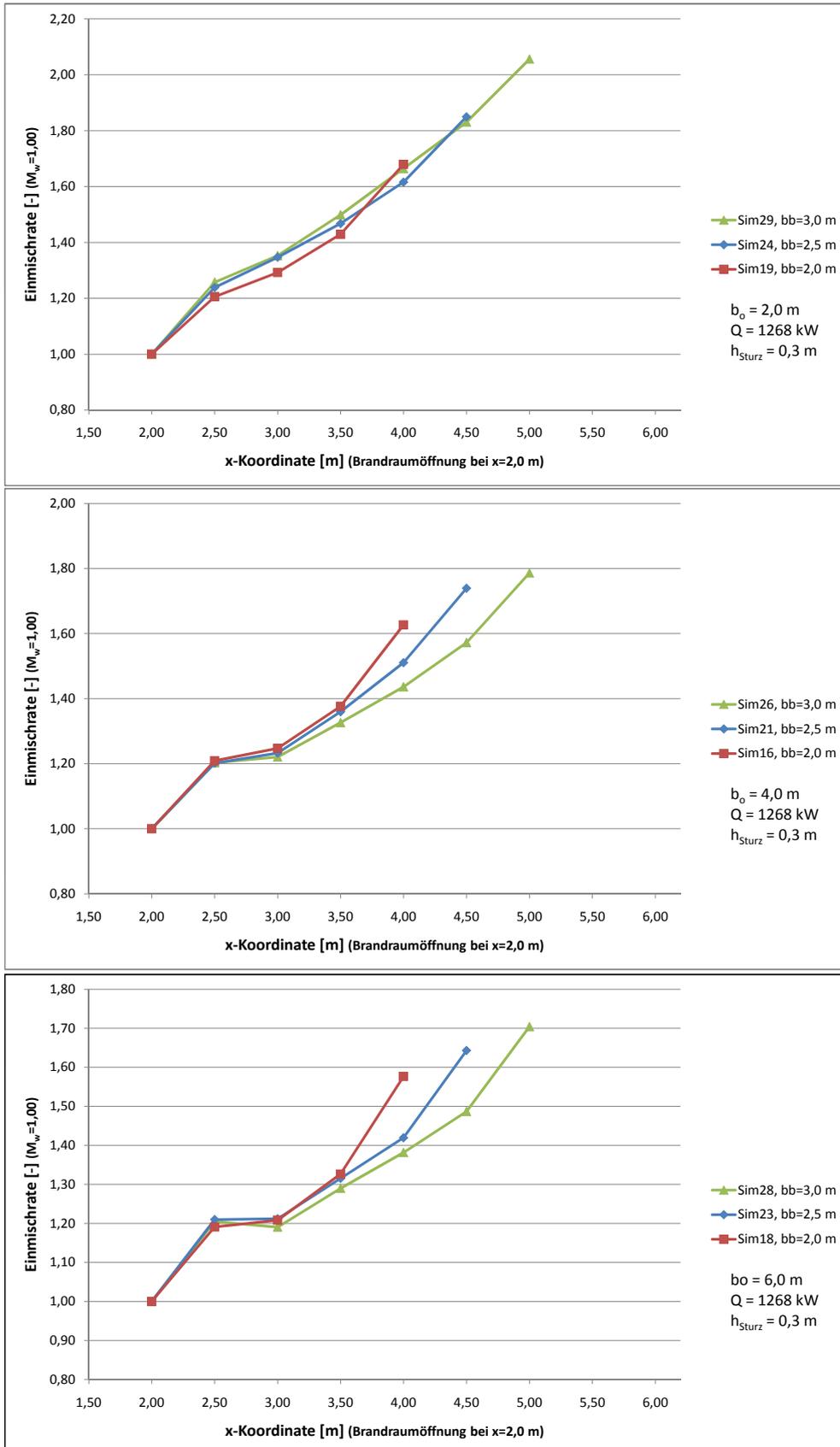


Abbildung 7.18: Einmischung zwischen Brandraumöffnung und Balkonkante - Einfluss der Breite  $b_b$  des Balkons

### 7.4.2 Einfluss der Öffnungsbreite $b_o$

Schmale Öffnungen verursachen höhere Einmischraten als breite Öffnungen. So beträgt diese beispielsweise für eine doppelt so breite Öffnung nur das 0,87-fache und für die dreifache Breite das 0,83-fache (Ausgangsbreite  $b_o = 3,0\text{ m}$ ,  $h_{Sturz} = 0,3\text{ m}$  und  $b_b = 3,0\text{ m}$ ) [siehe Abb. 7.19].

Die "Einmischungskurven" unterschieden sich direkt an der Öffnung kaum (jeweils ca. 20%). In den daran anschließenden Bereichen wird aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten bei schmalen Öffnungen durch die eher turbulente Strömung anteilig mehr eingemischt.

Ähnliche Zusammenhänge wurden unter Pkt. 5.2 für die Einmischung an der Kante beschrieben.

In Abb. 7.19 ist ein starker Knick der "Einmischungskurven" im Bereich  $x = 2,5\text{ m}$  bis  $x = 3,5\text{ m}$  zu erkennen. Dieser tritt ab Öffnungsbreiten von  $b_o = 4,0\text{ m}$  auf und ist mit zunehmenden Öffnungsbreiten stärker ausgeprägt. Auch in Abb. 7.18 zur Beschreibung des Einflusses der Balkonbreite auf das Einmischverhalten unter dem Balkon ist dieser Effekt sichtbar.

Er erklärt sich durch den Rückgang der auftretenden Strömungsgeschwindigkeitskomponenten  $u$  in x-Richtung bei breiten Öffnungen. Da zur Ermittlung des Einmischverhaltens der Massenstrom pro Zeiteinheit [ $\text{kg s}^{-1}$ ] in x-Richtung herangezogen wurde verursachen diese geringeren Geschwindigkeiten einen scheinbaren Rückgang der Einmischrate. Zur Veranschaulichung sind in Abb. 7.20 Flächen gleicher Geschwindigkeiten  $u$  für eine schmale und eine breite Öffnung in der Symmetrieebene dargestellt. Für die  $2,0\text{ m}$  breite Öffnung ( $h_{Sturz} = 0,3\text{ m}$ ) beträgt in diesem Bereich  $u$  rund  $4,0\text{ m s}^{-1}$  während für  $b_o = 6,0\text{ m}$  und  $h_{Sturz} = 0,9\text{ m}$  diese mit  $u = 1,6\text{ m s}^{-1}$  bei gleicher Brandleistung wesentlich kleiner ist.

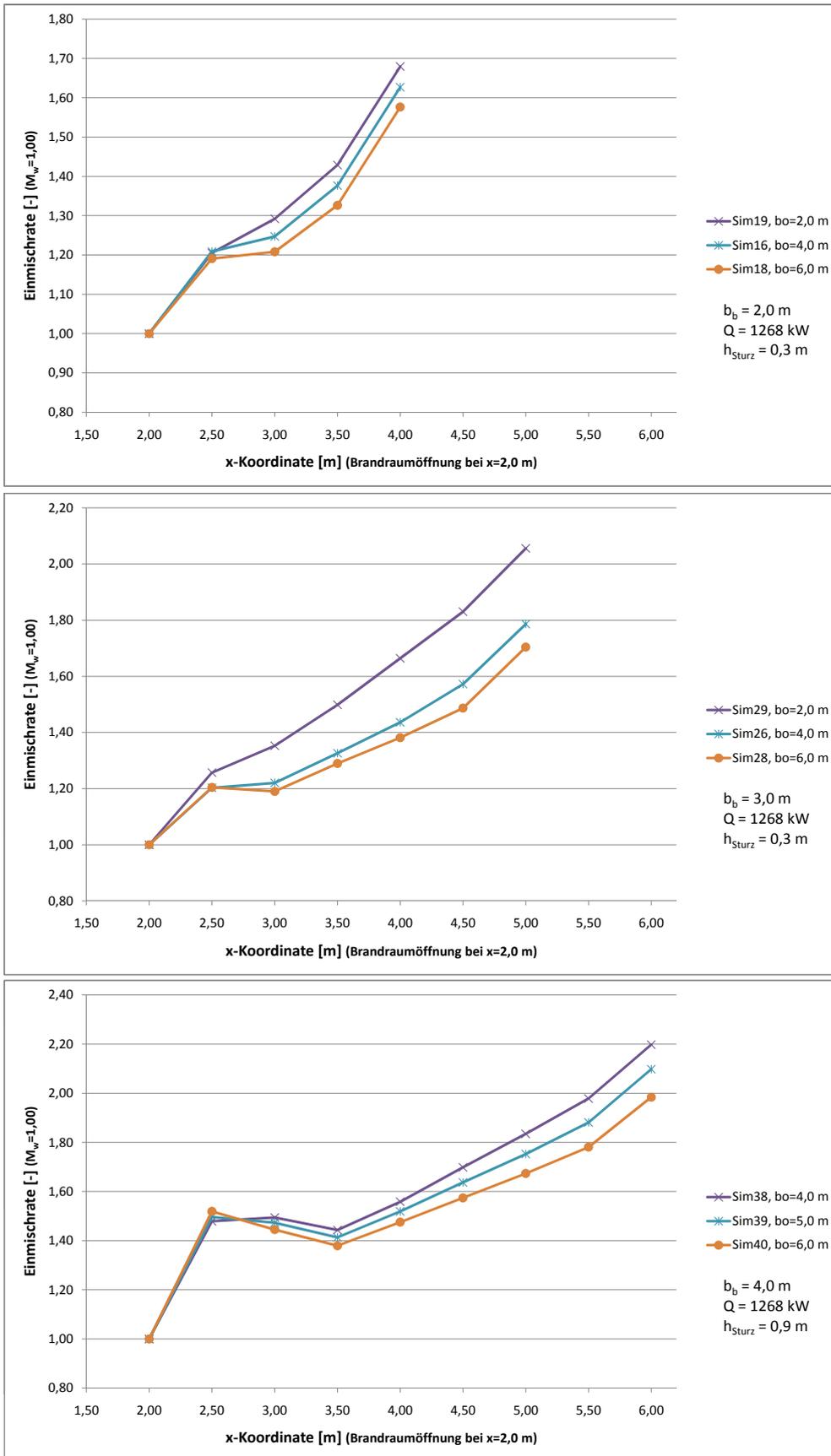
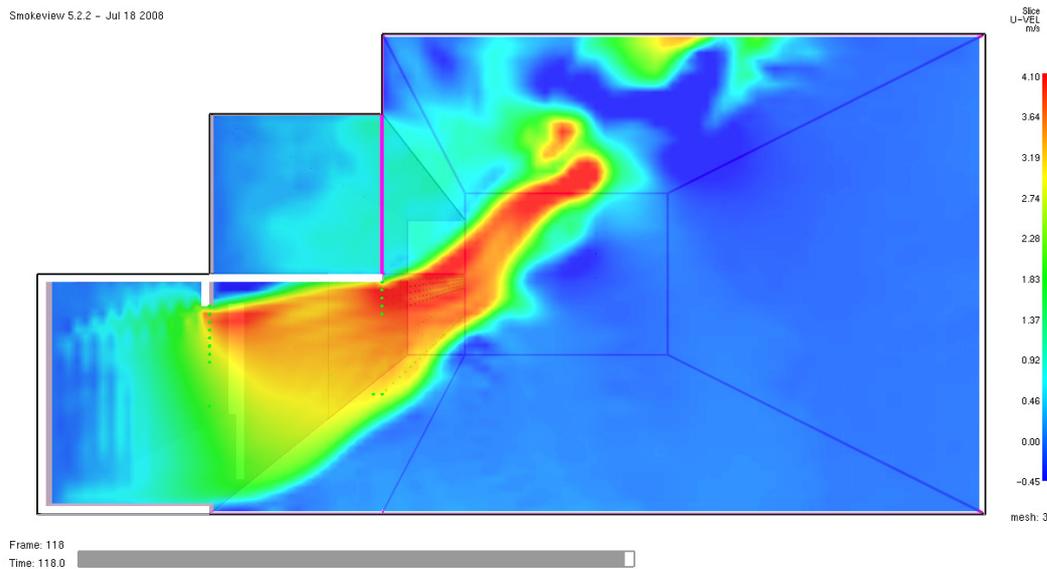
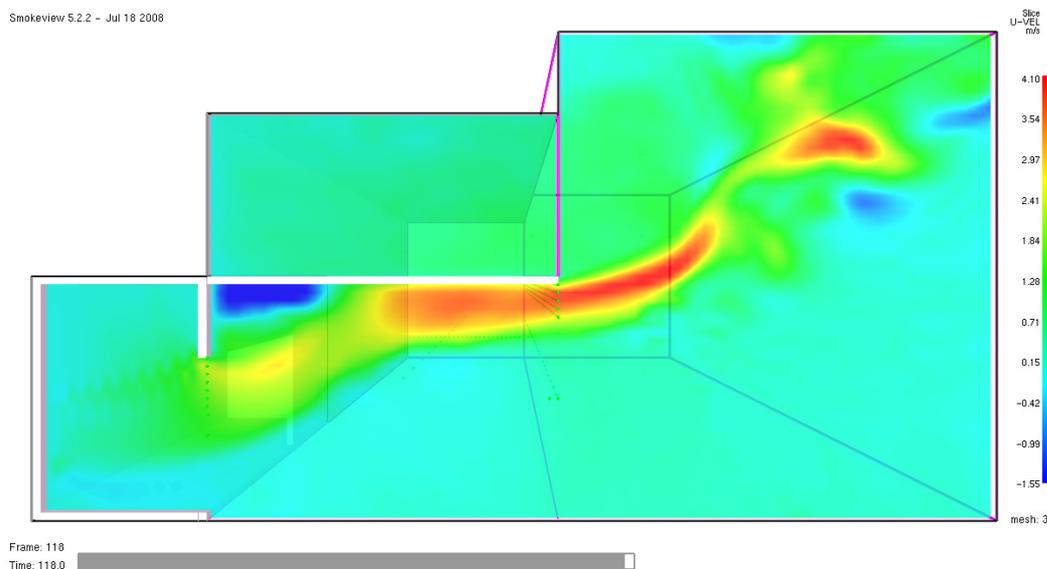


Abbildung 7.19: Einmischung zwischen Brandraumöffnung und Balkonkante - Einfluss der Öffnungsbreite  $b_o$



(a) Sim19;  $b_o=2,0$  m;  $h_{Sturz}=0,3$  m



(b) Sim40;  $b_o=6,0$  m;  $h_{Sturz}=0,9$  m

Abbildung 7.20: Strömungsgeschwindigkeit  $u$  in x-Richtung in Abhängigkeit von Öffnungsweite  $b_o$  und Sturzhöhe  $h_{Sturz}$

### 7.4.3 Einfluss der Sturzhöhe $h_{Sturz}$

Die Sturzhöhe wirkt sich je nachdem ob es sich um eine schmale oder breite Öffnung handelt grundsätzlich unterschiedlich aus.

Bei einer  $2\text{ m}$  breiten Öffnung bewirkt eine Vergrößerung der Sturzhöhe eine starke Reduktion der Einmischrate [Abb. 7.22 oben]. Diese beträgt bei einer Verdoppelung von  $h_{Sturz}$  um ca. 30% und bei der dreifachen Sturzhöhe um ca. 60% weniger.

Bei den durchgeführten Simulationen kehrte sich dieser Trend bei einer Öffnungsbreite von  $4\text{ m}$  um und tieferreichende Stürze verursachten die größten Massenstromzunahmen [siehe Abb. 7.22 mitte]. Auch bei noch breiteren Öffnungen war das der Fall.

Die Begründung liegt darin, dass im Bereich der Öffnung bei hohen Stürzen und breiten Öffnungen nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. Es bilden sich Wirbel aus, in die große Luftmengen über die gesamte Breite eingemischt werden [siehe Abb. 7.21]. Diese Menge beträgt z.B. für  $b_o = 6,0\text{ m}$  und  $h_{\text{Sturz}} = 1,5\text{ m}$  rund 80%.

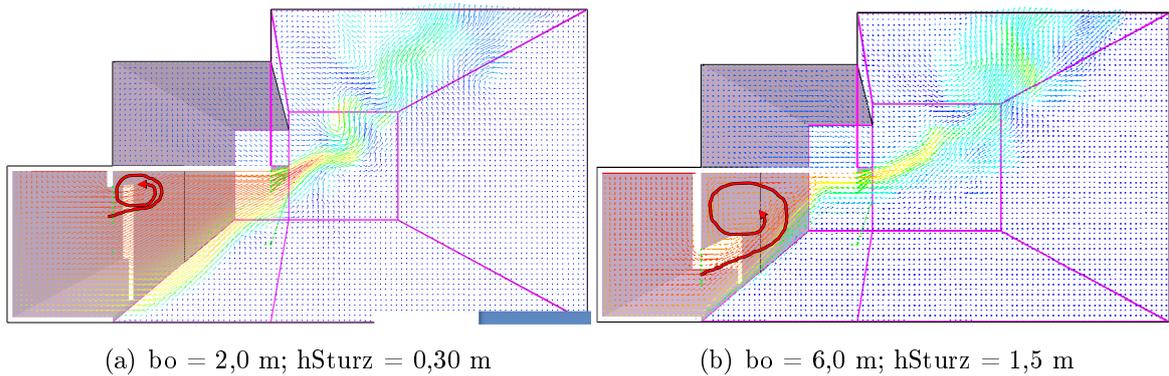


Abbildung 7.21: Wirbelbildung im Bereich der Brandraumöffnung für unterschiedliche Öffnungsbreiten und Sturzhöhen

Durch den Sturz wird die Strömungsgeschwindigkeit stark verringert, wodurch bei der weiteren Strömung unter der Platte geringere Einmischraten pro Strömungslänge zu beobachten sind, was dazu führt, dass die großen Unterschiede aus dem Bereich nach der Öffnung teilweise wieder kompensiert werden.

Der scheinbare Rückgang der Einmischrate in Abb. 7.22 für Öffnungsbreiten mit  $b_o \geq 4,0\text{ m}$  ist durch den unter Pkt. 7.4.2 erläuterten Zusammenhang zu erklären.

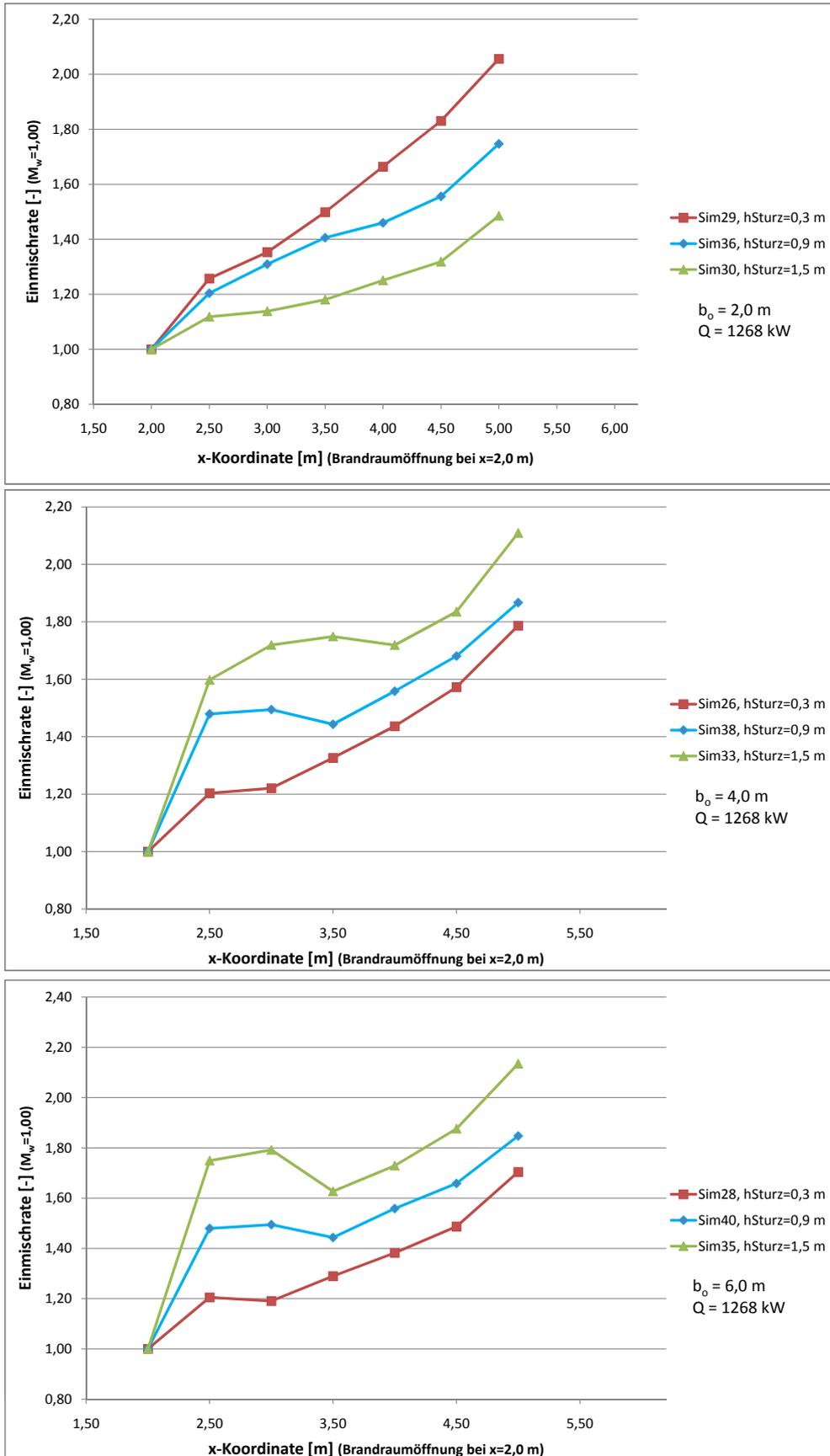


Abbildung 7.22: Einmischung zwischen Brandraumöffnung und Balkonkante - Einfluss der Sturzhöhe  $h_{Sturz}$

#### 7.4.4 Einfluss der Brandleistung $Q$

Höhere Temperaturen bei gleichem Ausgangsvolumenstrom führen zu größeren Einmischraten [siehe Abb. 7.23 oben]. Die Einmischung in die Strömung erfolgt umso stärker, je höher ihr Impuls (Auftrieb) ist. Durch eine Steigerung der Rauchgastemperatur vergrößert sich dieser.

Die Verdopplung der Temperatur  $T_{vent}$  des Ausgangsvolumenstromes von  $160^{\circ}C$  auf  $320^{\circ}C$  verursachte bei einer  $2\text{ m}$  breiten Öffnung eine Vergrößerung der Einmischrate um ca. 20% (eine Verdreifachung auf  $480^{\circ}C$  ca. 40%) der ursprünglichen Einmischrate von  $\frac{M_b}{M_w} = 2,06$ .

Mit der Variation der Größe des Ausgangsvolumenstromes  $V_{vent}$  bei gleicher Temperatur ändert sich das Einmischverhalten der Strömung ebenfalls erheblich. Mit steigendem Volumenstrom nimmt die Einmischrate ab (geringere Auftriebskraft). Diese Abnahme ist wiederum bei schmalen Öffnungen am stärksten [siehe Abb. 7.23 mitte und unten].

Eine Verdopplung von  $V_{vent}$  hatte bei Öffnungsbreiten von  $2,0$  und  $4,0\text{ m}$  eine Verringerung der Einmischrate um ca. 15% zur Folge. Für den höchsten simulierten Volumenstrom von  $22,0\text{ kg s}^{-1}$  ( $T_{vent} = 160^{\circ}C$ ,  $M_{vent} = 17,93\text{ kg s}^{-1}$ ) ergab sich die geringste Einmischrate von nur 31% zwischen Austrittsöffnung und Kante.

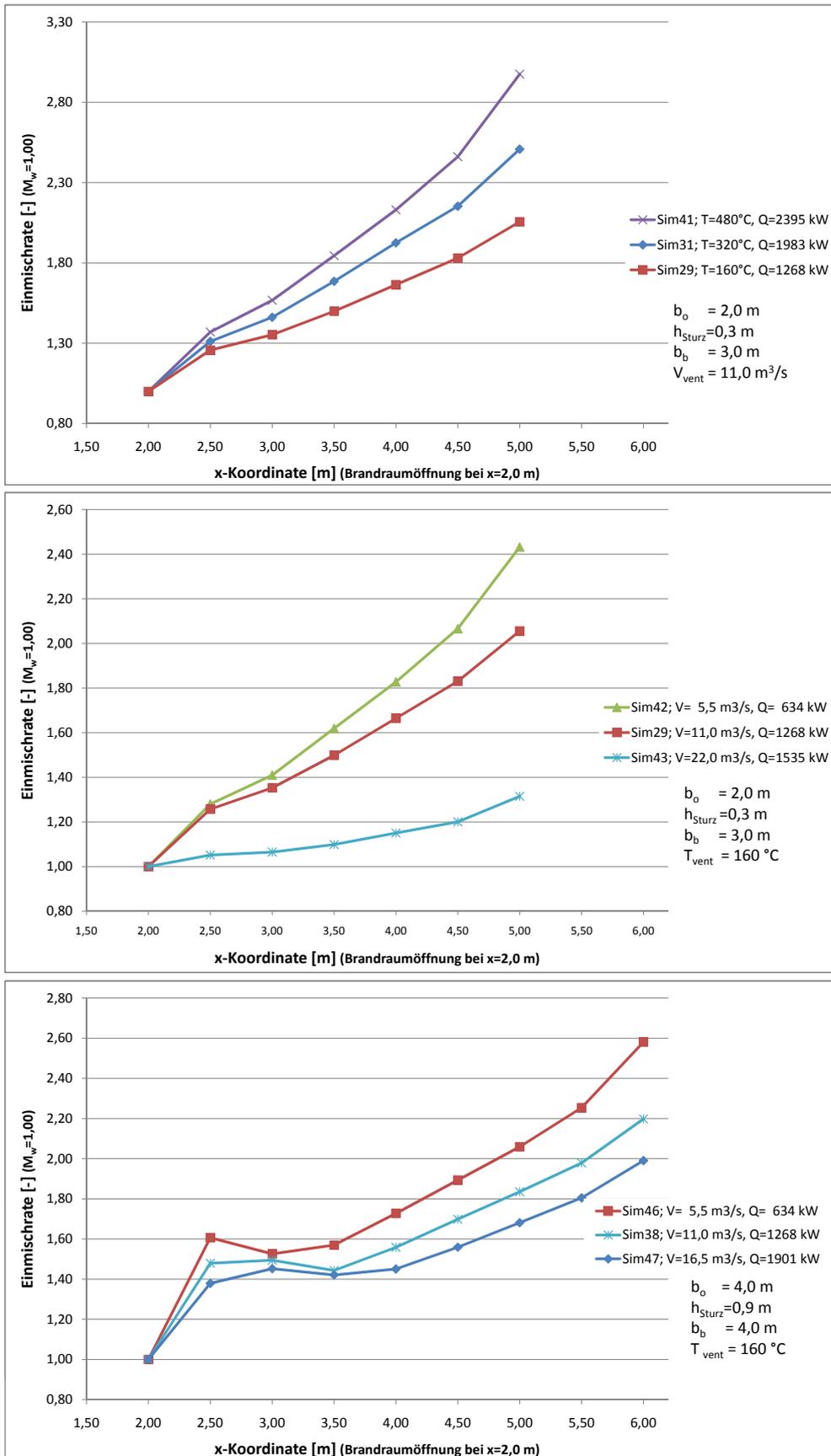


Abbildung 7.23: Einmischung zwischen Brandraumöffnung und Balkonkante - Einfluss der Brandleistung

## 7.5 Rauchgasmassenzustrom $M_b$ - Vergleichsrechnungen für die untersuchten Szenarien

Für alle Szenarien wurde der Massenstrom  $M_b$  mittels der unter *Pkt. 5.3* vorgestellten vereinfachten Gleichungen für die jeweilige Geometrie und Brandleistung berechnet. Der Massenstrom aus der Brandraumöffnung  $M_w$  und dessen Temperatur wurde gleich den, aus den Simulationen erhaltenen Werten gesetzt.

Die nachfolgenden Tabellen geben die durchschnittliche Einmischrate [siehe *Gl. 7.3*] der nachgerechneten Szenarien an.

$$\bar{E} = \frac{1}{n_{Sim.}} \sum_{n=1}^{n_{Sim.}} \left( \frac{M_{b,rechn.}}{M_{w,sim.}} \right) \quad (7.3)$$

Weiters ist die durchschnittliche Abweichung der errechneten Massenströme  $M_{b,rechn.}$  von den, aus den Simulationen gewonnenen Werten  $M_{b,sim.}$  angegeben. Dieser Durchschnittswert [siehe *Gl. 7.4*] wurde über alle nachgerechneten Simulationenwerte gebildet und wird hier zur Beurteilung der Genauigkeit der Berechnungsformeln herangezogen.

$$\bar{D} = \frac{1}{n_{Sim.}} \sum_{n=1}^{n_{Sim.}} \left( \frac{M_{b,sim.} - M_{b,rechn.}}{M_{b,sim.}} \right) \quad (7.4)$$

Die Charakteristika jener Szenarien mit der größten bzw. mit der kleinsten Abweichung ( $M_{b,sim.} - M_{b,rechn.}$ ) sind kurz beschrieben, um eine Einschätzung zu treffen, für welche Situationen sich die jeweilige Methode eignet bzw. nicht eignet.

Eine detaillierte Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse inklusive Vergleich mit den Simulationsdaten findet sich im *Anhang E*.

### 7.5.1 Einfache Näherungsformel

<b>Formel</b> [ <i>Gl. 5.13</i> ]	$M_{b,rechn.} = 2 M_w$		
durchschnittliche Einmischung $\bar{E}$	+100%		
durchschnittliche Abweichung $\bar{D}$	15%		
geringste Abweichung $M_{b,rechn.}$ von $M_{b,sim.}$	±0%	Sim47	breiter Balkon, mittlere Öffnungsbreite, mittlere Sturzhöhe, hohe Brandleistung
max. Abweichung $M_{b,rechn.}$ von $M_{b,sim.}$	+52%	Sim43	schmale Öffnung, großer Massenstrom
	-33%	Sim41	schmale Öffnung, kleiner Sturz, hohe Brandleistung

Tabelle 7.2: Vergleich der Simulationsergebnisse mit der einfachen Näherungsformel für  $M_b$

Diese Näherungsformel prognostiziert trotz ihrer Einfachheit den an der Kante ankommenden Massenstrom ausgehend vom Öffnungsstrom sehr zutreffend für die meisten untersuchten Fälle. Durchschnittliche 15% Abweichung stellen für eine einfache Abschätzformel eine sehr gute Näherung dar.

Die maximale Überschätzung der Einmischung von rund 50% ergibt sich für Sim43. Hierbei handelt es sich jedoch um jenes Szenarium für das sich verglichen mit allen anderen durchgeführten Simulationen die geringste Einmischrate ergab  $\left(\frac{M_{b,sim.}}{M_{w,sim.}} = 1,31\right)$  [siehe Pkt. 7.4.4].

Merklich unterschätzt wird die Menge an Rauchgasen vorwiegend bei eher schmalen Öffnungen, hohen Brandleistungen und tiefreichenden Stürzen.

## 7.5.2 Berechnungsmethode nach Morgan

<b>Formel</b> [Gl. 5.15]	$M_b = \frac{2}{3} 0,8^{3/2} (2g \Delta T_g T_0)^{1/2} \frac{W \rho_0}{T_g} d_w^{3/2} \kappa_M$		
durchschnittliche Einmischung $\bar{E}$	+148%		
durchschnittliche Abweichung $\bar{D}$	41%		
geringste Abweichung $M_{b,rechn.}$ von $M_{b,sim.}$	±0%	Sim9	schmaler Balkon, mittlere Öffnungsbreite, kleine Sturzhöhe, hohe Brandleistung
max. Abweichung $M_{b,rechn.}$ von $M_{b,sim.}$	+168%	Sim43	schmale Öffnung, großer Massenstrom
	-53%	Sim12	schmaler Balkon, mittlere Öffnungsbreite, kein Sturz, hohe Brandleistung

Tabelle 7.3: Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Formel nach Morgan

Die umströmte Kantenbreite  $W$  wurde mittels Gl. 5.3 näherungsweise berechnet.

Im Vergleich zur zuvor unter Pkt. 7.5.1 diskutierten Formel erhält man bei der Anwendung dieser Formel höhere durchschnittliche Einmischraten. Auch die Abweichungen von den Simulationsergebnissen sind größer.

Die ermittelten Werte für  $d_w$  korrelieren i.A. gut mit den in den Simulationen auftretenden Rauchschichtdicken. Da zusätzlich zu den geometrischen Größen der maximale Temperaturanstieg in der Strömung gegenüber der Umgebungsluft  $\Delta T_{g,max.}$  bekannt sein muss, ist diese Vorgehensweise bei alleiniger Rechnung mit sehr großen Unsicherheiten behaftet.

### 7.5.3 Berechnungsmethode von Thomas nach Morgan

<b>Formel</b> [Gl. 5.16]	$M_b = \frac{2}{3} 0,8 (2g \Delta T_g T_0)^{1/2} \frac{W \rho_0}{T_g} d_w^{3/2}$		
durchschnittliche Einmischung $\overline{E}$	+114%		
durchschnittliche Abweichung $\overline{D}$	27%		
geringste Abweichung $M_{b,rechn.}$ von $M_{b,sim.}$	+1%	Sim33	mittlere Öffnungsbreite, tiefer Sturz
max. Abweichung $M_{b,rechn.}$ von $M_{b,sim.}$	+131%	Sim43	schmale Öffnung, großer Massenstrom
	-59%	Sim12	schmaler Balkon, mittlere Brandraumöffnungsbreite, kein Sturz, hohe Brandleistung

Tabelle 7.4: Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Formel nach Morgan

Die umströmte Kantenbreite  $W$  wurde mittels Gl. 5.3 näherungsweise berechnet.

Die aus der von Thomas modifizierte Berechnungsmethode nach Morgan erhaltenen Massenströme liegen im Vergleich zur ursprünglichen Version mit einer durchschnittlichen Abweichung von 27% näher an den Simulationsergebnissen.

Für mittlere und große Öffnungsbreiten mit unterschiedliche Sturzhöhen brachten die Vergleichsrechnungen mit dieser Formel durchaus zutreffende Ergebnisse. Die größten Unterschiede zur Simulation sind wieder bei eher schmalen Öffnungen und hohen Brandleistungen zu beobachten. Die größte Abweichung vom Simulationsergebnis tritt wieder bei Sim43 auf [siehe Pkt. 7.5.1].

### 7.5.4 Annahme nach Law

<b>Formel</b> [Gl. 5.17]	$M_b = 0,025 (Q W^2)^{1/3}$
durchschnittliche Einmischung $\overline{E}$	-88%
durchschnittliche Abweichung $\overline{D}$	-94%

Tabelle 7.5: Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Annahme von Law

Trotz der Annahme von  $W = b_o + b_b$  nach Gl. 5.3 liegen die Ergebnisse im Hinblick auf die Einmischung für alle Szenarien mit dieser Methode bedeutend unter den Simulationsdaten für  $\frac{M_{b,sim.}}{M_{w,sim.}}$ .

Auf die nähere Beschreibung jener Szenarien, für welche sich die maximale und minimale Abweichung des Berechnungs- vom Simulationsergebnis ergibt, wird hier verzichtet, da die Einmischung in allen Fällen etwa gleich stark unterschätzt wird.

Eine gute Näherung kann aber erzielt werden, indem man anstatt 0,025 den auftretenden Faktor mit 0,41 annimmt. Die durchschnittliche Abweichung reduziert sich auf

15% [siehe Tab. 7.6] und es folgt Gl. 7.5.

$$M_b = 0,41 [Q (b_o + b_b)^2]^{1/3} \quad [kg s^{-1}] \quad (7.5)$$

<b>Formel</b> [Gl. 7.5]	$M_b = 0,41 [Q (b_o + b_b)^2]^{1/3}$		
durchschnittliche Einmischung $\bar{E}$	+96%		
durchschnittliche Abweichung $\bar{D}$	15%		
geringste Abweichung $M_{b,rechn.}$ von $M_{b,sim.}$	±0%	Sim39	breite Öffnung, mittlere Sturzhöhe
max. Abweichung $M_{b,rechn.}$ von $M_{b,sim.}$	+26%	Sim10	mittlere Öffnungsbreite, geringer Massenstrom
	-31%	Sim43	schmale Öffnung, großer Massenstrom

Tabelle 7.6: Vergleich der Simulationsergebnisse mit der modifizierten Formel nach Law

### 7.5.5 Berechnung laut BSI

<b>Formel</b> [Gl. 5.18]	$M_b = 0,36 Q^{1/3} W^{2/3} (0,25 h_{Sturz} + z)$		
durchschnittliche Einmischung $\bar{E}$	+5%		
durchschnittliche Abweichung $\bar{D}$	60%		
geringste Abweichung $M_{b,rechn.}$ von $M_{b,sim.}$	-2%	Sim39	breite Öffnung, mittlere Sturzhöhe
max. Abweichung $M_{b,rechn.}$ von $M_{b,sim.}$	+64%	Sim35	breite Öffnung, tieferer Sturz

Tabelle 7.7: Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Formel nach Morgan

Die Aufstiegshöhe  $z$  ab der Öffnungsoberkante wurde für die Berechnungen gleich der Sturzhöhe gesetzt. Weiters galt  $W = b_o + b_b$  laut Gl. 5.3 bei seitlicher Ausbreitung aufgrund fehlender Rauchschrägen.

Die Ergebnisse weisen große Abweichungen zu den Simulationen auf. Die errechnete, durchschnittliche Einmischung mit nur 5% in den Rauchgasmassenzustrom ist sehr gering.

### 7.5.6 Berechnungsmethode nach Harrison

<b>Formel</b> [Gl. 5.19]	$M_b = 0,89 \left(\frac{h_o}{b_o}\right)^{-0,92} \left(\frac{h_{br} M_w}{b_o}\right)$		
durchschnittliche Einmischung $\bar{E}$	+10%		
durchschnittliche Abweichung $\bar{D}$	43%		
geringste Abweichung $M_{b,rechn.}$ von $M_{b,sim.}$	+4%	Sim32	mittlere Öffnungsbreite, tiefer Sturz
max. Abweichung $M_{b,rechn.}$ von $M_{b,sim.}$	-66%	Sim41	schmale Öffnung, kleiner Sturz, hohe Brandleistung

Tabelle 7.8: Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Formel nach Morgan

Harrisons Formel, die er für einen kanalisierten Rauchgasmassenzustrom entwickelte, ist beim Wegfall der Rauchschürzen eigentlich nicht anwendbar [siehe Pkt. 5.3.2]. Abgesehen vom Fehlen der Rauchschürzen unter dem Balkon werden die von Harrison definierten Anwendungsbedingungen aber bei allen Szenarien eingehalten. Im Hinblick auf eine eventuell mögliche Modifikation dieser Berechnungsmethode für  $M_b$  erfolgte trotzdem eine Nachrechnung der Simulationsergebnisse. Die Auswertung zeigt, dass sich auf diese Weise eine sehr niedrige, durchschnittliche Einmischrate von 10% ergibt.

Betrachtet man für die durchgeführten Simulationen wie Harrison bei der Formelherleitung das Verhältnis  $\left(\frac{M_b b_o}{M_w h_{br}}\right)$  zu  $\left(\frac{h_o}{b_o}\right)$  [siehe Abb. 5.9], so liegen die einzelnen Datenpunkte teilweise sehr weit von möglichen Ausgleichsgeraden entfernt [siehe Abb. 7.24].  $h_o$  und  $b_o$  bezeichnen darin die Höhe und Breite der Brandraumöffnung. Der lichte Abstand zwischen Brandraumboden und Balkonplatte ist als  $h_{br}$  bezeichnet.

Es ergibt sich also auf diese Weise für die vorliegenden Daten keine zutreffende Bestimmungsgleichung für den Kantenstrom, die zuverlässige Ergebnisse für möglichst alle betrachteten Szenarien bringt. Große Schwankungen dieses Verhältnisses ergeben sich vor allem aufgrund der unterschiedlichen Sturzhöhen. Außerdem wird die Ausbreitung zu den Seiten bei dieser Vorgehensweise nicht berücksichtigt.

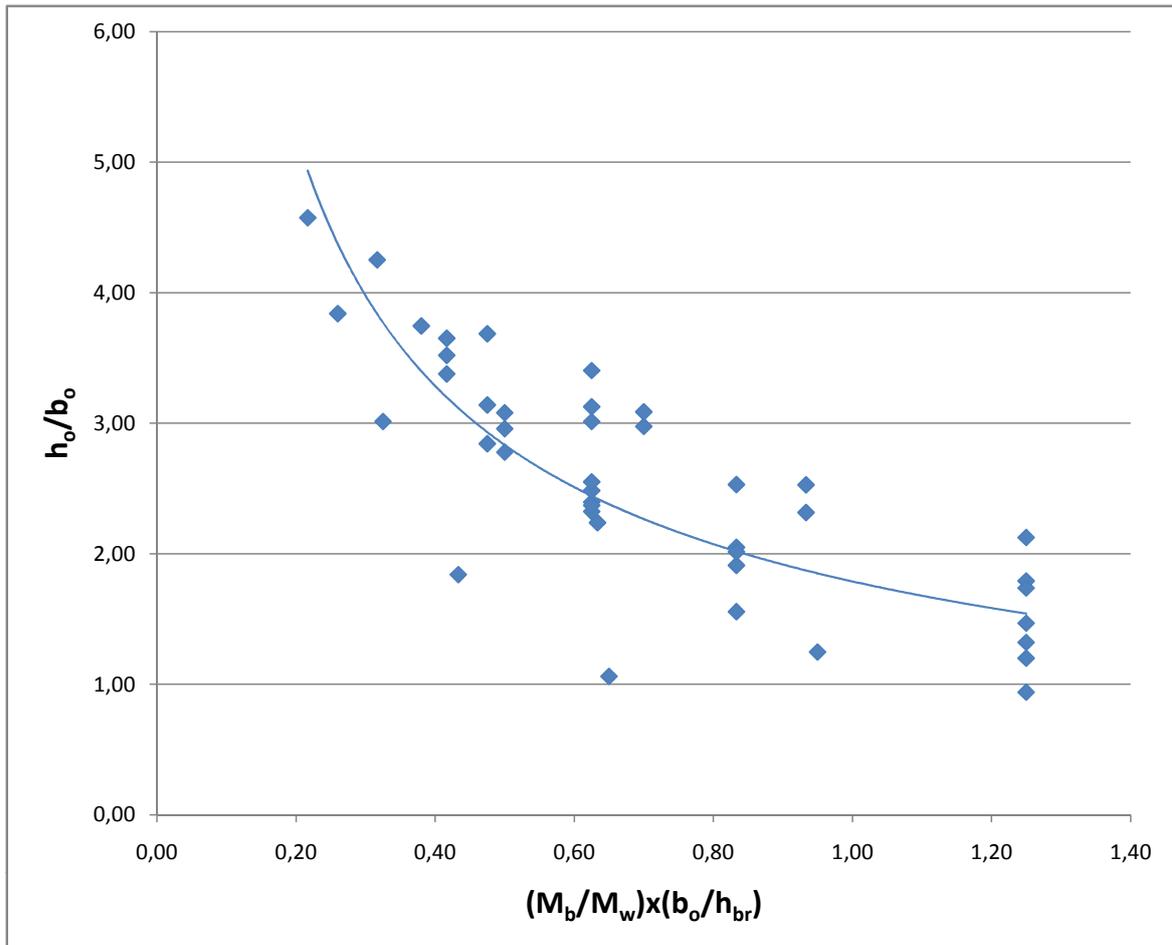


Abbildung 7.24: Datenpunkte für die durchgeführten Simulationen in Anlehnung an Harrisons Herleitung [9]

Ändert man das betrachtete Verhältnis auf  $\left(\frac{M_b b_0}{M_w h_{br}}\right)$  zu  $\left(\frac{h_{Sturz}}{b_0 + b_b}\right)$  so ergeben sich wie aus Abb. 7.25 hervorgeht für jede Sturzhöhe eine Gruppe von Datenpunkten. Verbindet man diese so erhält man je eine Potenzfunktion. Diese Ausgleichsgeraden lassen sich zu Bestimmungsgleichungen für  $M_b$  in Abhängigkeit vom Öffnungsstrom  $M_w$  und der Geometrie umformen. Die auftretenden Koeffizienten und Exponenten sind für jede der untersuchten Sturzhöhen unterschiedlich.

Die so ermittelte durchschnittliche Einmischrate beträgt 91% bei einer durchschnittlichen Abweichung von 12%.

### 7.5.7 Zusammenfassung und Wahl der Berechnungsmethode

Es wurde gezeigt, dass die zur Verfügung stehenden Bestimmungsformeln für  $M_b$  sehr unterschiedliche Werte ergeben. Die zuverlässigsten Resultate für die untersuchten Szenarien brachten Law's einfache Näherungsformel nach Gl. 5.13 und die Gleichung von Thomas nach Morgan wie sie in Gl. 5.16 angeführt ist.

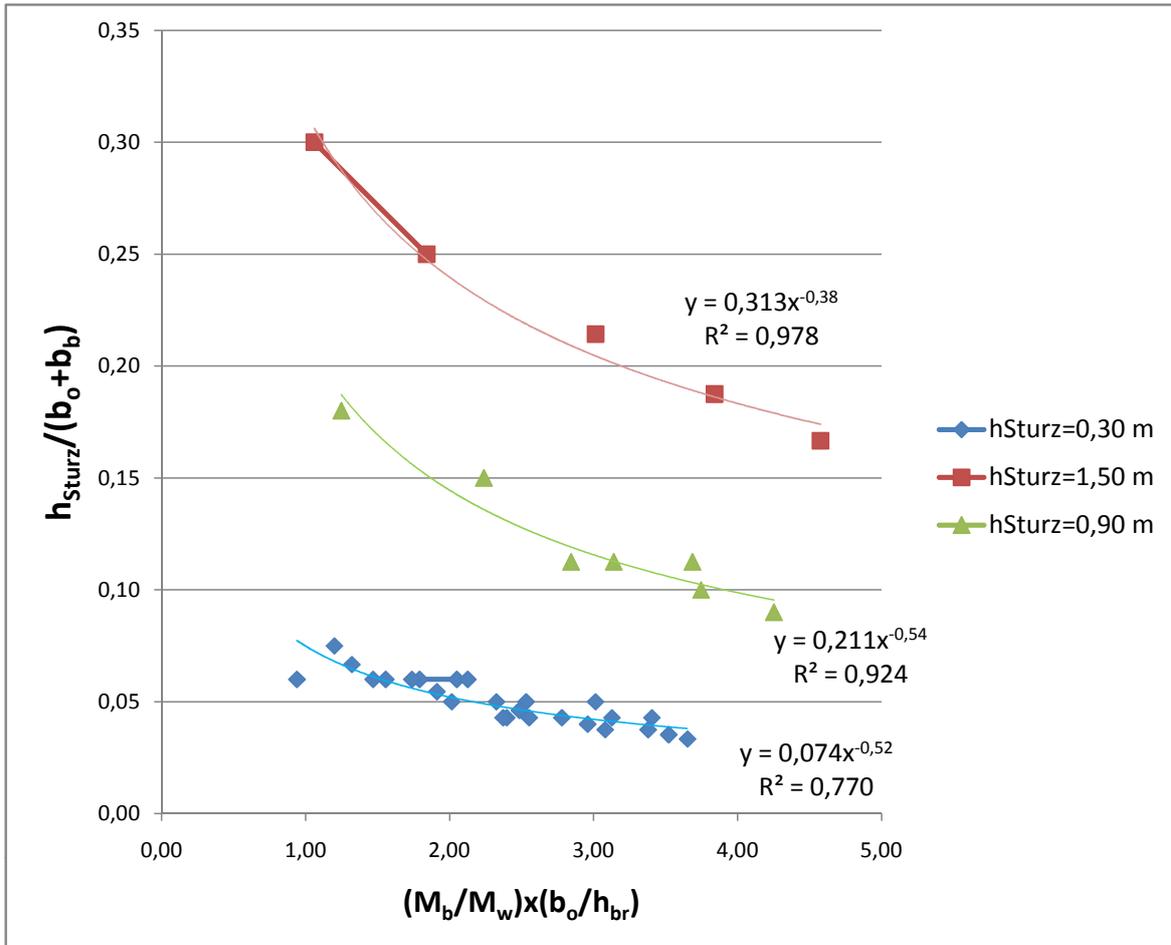


Abbildung 7.25: Modifikation des von Harrison betrachteten Verhältnisses zur Berücksichtigung von Sturzhöhe und seitlicher Ausbreitung

Durch Modifikation von Gl. 5.17 zu Gl. 7.5 konnte über alle Simulationen gerechnet die geringste durchschnittliche Abweichung erzielt werden (14,7%). Diese Methode ist auch plausibel, da sowohl die Geometrie (Öffnungs- und Balkonbreite) als auch die Brandleistung Eingang in die Berechnung finden.

Die sich aus den, in Abb. 7.25 dargestellten Zusammenhängen ergebenden Bestimmungsgleichungen liefern Kantenströme, welche um durchschnittlich 12% von den Simulationsergebnissen abweichen. Da für jede Sturzhöhe andere, empirisch ermittelte Koeffizienten anzusetzen sind, ist die Anwendung dieser Methode bislang aber nicht möglich. Weitere Untersuchungen zur Bestimmung dieser Koeffizienten wären erforderlich.

# Kapitel 8

## Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Schlussfolgerungen

Führen Fluchtwege durch Bereiche, die rauchschutztechnisch nicht vom Atrium getrennt sind, ist von einer möglichen Verrauchung auszugehen und somit eine sichere Benutzung zur Selbstrettung nicht möglich. Um für die Nutzer trotzdem während einer festgelegten Zeit eine Flucht in sichere Bereiche zu gewährleisten, müssen Maßnahmen zur Rauchkontrolle getroffen werden.

Für die häufig anzutreffenden, offenen oder zumindest teilweise offenen Atrien und Malls kommen dafür neben baulichen Maßnahmen in Form von Rauchschürzen zur Bildung von Rauchreservoirs in den einzelnen Geschoßen nur Entrauchungsanlagen in Frage. Rauchverdünnungsanlagen und Druckbelüftungsanlagen sind für solche Anwendungen aufgrund der i.A. großen Volumina und der vorhandenen Öffnungen eher nicht geeignet.

- Zur Bemessung der Rauchreservoirs und Auslegung der Entrauchungsanlagen müssen die auftretenden Mengen an aufsteigenden Rauchgasen bekannt sein bzw. ermittelt werden. Da der Spill-Plume mehr Umgebungsluft einmischt als andere Plume-Formen ist dieser als bemessungsrelevant heranzuziehen.
- Die vereinfachten BSP-Methoden ermöglichen es, den entstehenden Massenstrom mit geringem Rechenaufwand näherungsweise zu berechnen. Die einzelnen Berechnungsformeln wurden in ihrer Herleitung und in ihrem Aufbau verglichen sowie Empfehlungen bzw. Grenzen zur Anwendung aus der Literatur zusammengefasst.
- Vergleichsrechnungen mit Simulationsdaten brachten zum Teil gute Übereinstimmung mit den Berechnungsmethoden nach Thomas et al. und Poreh et al. sowie mit der vom BSI empfohlenen Methode für kleine Aufstiegshöhen bis zu 3,1 m.
- Für den Fall fehlender Rauchschürzen zwischen Brandraumöffnung und Spill-Kante konnte mit den Ergebnissen der durchgeführten CFD-Simulationen die Annahme der umströmten Kantenbreite mit  $W = b_o + b_b$  numerisch validiert

werden. Diese Breite beschreibt nicht die tatsächliche seitliche Ausbreitung der Strömung an der Kante sondern dient lediglich als Rechenwert.

- Weiters ermöglichten die durchgeführten Simulationen eine Betrachtung der Strömung unterhalb des Balkons und auch dafür existierende Berechnungsansätze wurden auf ihre Eignung für derartige Bemessungssituationen überprüft und verglichen. Dabei zeigten sich große Unterschiede in den Berechnungsergebnissen.
- Die einfache NFPA-Näherungsformel für den Rauchgasmassenzustrom  $M_b = 2 M_w$  bringt i.A. eine gute Abschätzung. Law's Formel konnte für die angenommenen Szenarien modifiziert werden und eine weitere mögliche Vorgehensweise zur Herleitung einer Berechnungsmethode wurde aufgezeigt.

## 8.2 Weiterführende Untersuchungen

- Für den Normalfall fehlender Rauchschränken unter dem Balkon sind weitere Forschungen erforderlich, um die Strömung zwischen Brandraumöffnung und umströmter Kante für unterschiedliche Brandszenarien und Öffnungsgeometrien beschreiben zu können.
- Brandversuche in Realgröße oder maßstäbliche Versuche wären wünschenswert zur Überprüfung der, aus den vorliegenden Simulationen gewonnenen Ergebnisse.
- Besonderes Augenmerk sollte dabei auf die seitliche Ausbreitung der Strömung unter dem Balkon und die dabei erfolgende Einmischung gelegt werden.
- Außerdem wären die vereinfachten BSP-Formeln in Bezug auf ihre Gültigkeit und Zuverlässigkeit bei großen Aufstiegshöhen zu untersuchen, wobei auch die Frage der Beschränkung der Einmischung durch ungenügende Luftzufuhr im Atrium und damit die Möglichkeit einer diffusen Verrauchung zu betrachten wären.

# Literaturverzeichnis

- [1] **Schneider, Ulrich:** Ingenieurmethoden im Brandschutz. 2. Auflage, Werner Verlag GmbH., Köln, 2009
- [2] **Schneider, Ulrich; Oswald, Monika; Max, Ulrich:** Grundlagen für die Dimensionierung der Rauchableitung. Kurzreferate 9. Internationales Brandschutz-Symposium "Ingenieurmethoden für die Brandsicherheit" ;TU Braunschweig, iBMB Institut für Baustoffe Massivbau und Brandschutz Fachgebiet Massivbau; vfdb Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.; München 2001.
- [3] **Schneider, Ulrich:** Grundlagen zur Beurteilung der Verrauchung von Gebäuden durch Spillplumes. Forschungsbericht. TU Wien, Institut für Hochbau und Technologie; Wien 2008.
- [4] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (**vfdb**); **Hosser, Dietmar** (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Technischer Bericht vfdb TB 04/01. 1. Auflage Mai 2006 Altenberge; Braunschweig 2007.
- [5] **Brein, Dieter:** Anwendungsbereiche und -grenzen für praxisrelevante Modellansätze zur Bewertung der Rauchausbreitung in Gebäuden (Plume-Formeln). Version 1.2. Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), 2001.
- [6] **Morgan, H.P.; Marshall, N.R.:** Smoke hazards in covered multi-level shopping malls - An experimentally-based theory for smoke production. BRE Current paper 48/75, BRE, 1975.
- [7] **Morgan, H.P.; Ghosh, B.K.; Garrad, G.; Pamlichka, R.; deSmedt, J.-C.; Schoonbaert, L.R.:** Design methodologies for smoke and heat exhaust ventilation. BRE publication BR 368. Construction Research Communications Ltd, London 1999.
- [8] **Morgan, Howard P.:** Plume models for practical smoke control design. EUSAS Journal No. 4 EUSAS European Society for Automatic Alarm Systems e.V., 2008.
- [9] **Harrison, Roger:** Smoke Control in Atrium Buildings: A study of the Thermal Spill Plume. Fire Engineering Research Report 04/1. Department of Civil Engineering, University of Canterbury 2004.

- [10] **Harrison, Roger; Spearpoint, Michael:** Entrainment of Air into a Balcony Spill Plume. BRE Building Research Establishment Ltd; Departement of Civil Engineering, University of Canterbury, 2006.
- [11] **Harrison, Roger; Spearpoint, Michael:** Characterisation of balcony spill plume entrainment using physical scale modelling. Pre Prints of the 9th Fire Safety Science Symposium. IAFSS International Association for Fire Safety Science, 2008.
- [12] **McCartney, Cameron John:** A CFD Investigation of Balcony Spill Plumes. Masters-Thesis. University of Waterloo, Waterloo, Canada 2006.
- [13] **McCartney, Cameron John; Loughed G.D.; Weckman, E.J.:** CFD Investigation of Balcony Spill Plumes in Atria (RP-1247). NRCC - 50043. 13th Annual Conference of the CFD Society of Canada National Research Council Canada, St. John's, Canada 2008.
- [14] **Marshall; N. R.; Harrison, Roger; Morgan, Howard P.:** A study of the mechanisms that govern the entrainment of air into the thermal line plume. 1993.
- [15] **Marshall, N.R.; Harrison, R.:** Experimental studies of thermal spill-plumes. BRE Occasional Paper OP1. Garston 1996.
- [16] **Poreh, M.; Morgan, H.P.; Marshall, N.R.; Harrison, R.:** Entrainment by two dimensional spill-plumes in malls and atria In: Fire Safety Journal, 1998, Nr. 30, S. 1 - 19.
- [17] **Thomas, P.H.; Delichatsios, M.:** Notes on the similarity of turbulent buoyant fire plumes with large density variations In: Fire Safety Journal, 2007, Nr. 42, S. 43 - 50.
- [18] **Kumar, S.; Thomas, P.H.; Cox, G.:** Novel Analytical Approach for Characterising Air Entrainment into a Balcony Spill Plume. Pre Prints of the 9th Fire Safety Science Symposium IAFSS International Association for Fire Safety Science, 2008.
- [19] **Sanderson, Iain; Kilpatrick, Tony; Torerro, Jose:** A Comparative Analysis of the Use of Different Zone Models to Predict the Mass Smoke Flow for Axisymmetric and Spill Plumes. Pre Prints of the 9th Fire Safety Science Symposium IAFSS International Association for Fire Safety Science, 2008.
- [20] **Hansell, G. O.; Morgan, Howard P.; Marshall, N. R.:** Smoke flow experiments in a model atrium. BRE OP 55. BRE Building Research Establishment Ltd; Departement of Civil Engineering, University of Canterbury 1993.
- [21] **Hansell, G.O.:** Heat and mass transfer process affecting smoke control in atrium buildings. Phd.-Thesis. South Bank University, London 1993.
- [22] **Milke, J.A.:** Smoke management in covered malls and atria. In: The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering; Hrsg. Di Nenno, P.J.; 2002.

- [23] **McGrattan, Kevin; Klein, Bryan; Hostikka, Simo; Floyd, Jason:** Fire Dynamics Simulator (Version 5) - User's Guide. NIST Special Publication 1019-5. NIST National Institute of Standard and Technology, 2008.
- [24] **McGrattan, Kevin; Hostikka, Simo; Floyd, Jason; Baum, Howard; Rehm, Ronald; Mell, William; McDermott, Dandal:** Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1018-5. NIST National Institute of Standard and Technology, 2008.
- [25] **Forney, Glenn P.:** User's Guide for Smokeview Version 5 - A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. NIST Special Publication 1017-1. NIST National Institute of Standard and Technology, 2008.
- [26] **Seydler, Jörg:** Entrauchungsnachweis für ein offenes Atrium. Tagungsband zur Jahresfachtagung 2005, bft COGNOS GmbH., 2005.
- [27] **Zehfuß, Jochen; Paschen, Christian:** Entrauchungssimulation. Anforderungen nach VFDB-Leitfaden und VDI 6019 - Ein Vergleich. hhp berlin Ingenieure für Brandschutz GmbH, Berlin 2008.
- [28] **Schwehr, Peter; Hartman, Peter:** Atrium: Glasüberdeckte Höfe und Hallen. Ein interdisziplinäres Planungswerkzeug. Birkhäuser, Hochschule für Technik+Architektur Luzern; Zürcher Hochschule Winterthur, 2005.
- [29] **ÖNORM H 6029:** Lüftungstechnische Anlagen - Brandrauchabsaug-Anlagen. ON Österreichisches Normungsinstitut, Wien 01.05.1997.
- [30] **ÖNORM EN 12101-6:** Anlagen zur Kontrolle von Rauch- und Wärmeströmungen - Teil 6: Anforderung an Differenzdrucksysteme - Bausätze (konsolidierte Fassung). CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, 01.10.2006.
- [31] **TRVB A 101/67:** Grundlagen für die Beurteilung der Brand- und Explosionsgefährlichkeit. Technische Richtlinien vorbeugender Brandschutz ÖBFV Österreichischer Bundesfeuerwehrverband; Die österreichischen Brandverhütungsstellen, 1967.
- [32] **TRVB S 112/04:** Druckbelüftungsanlagen (DBA). Technische Richtlinien vorbeugender Brandschutz; ÖBFV Österreichischer Bundesfeuerwehrverband; Die österreichischen Brandverhütungsstellen, 2004.
- [33] **TRVB S 125/97:** Rauch- und Wärmeabzugsanlagen. Technische Richtlinien vorbeugender Brandschutz, ÖBFV Österreichischer Bundesfeuerwehrverband; Die österreichischen Brandverhütungsstellen, Ausgabe 1997.
- [34] **TRVB A 126/87:** Brandschutztechnische Kennzahlen verschiedener Nutzungen, Lagerungen, Lagergüter. Technische Richtlinien vorbeugender Brandschutz ÖBFV Österreichischer Bundesfeuerwehrverband; Die österreichischen Brandverhütungsstellen, 1987.

- [35] **TRVB N 138/00**: Verkaufsstätten. Baulicher Brandschutz. Technische Richtlinien vorbeugender Brandschutz; ÖBFV Österreichischer Bundesfeuerwehrverband; Die österreichischen Brandverhütungsstellen, 2000.
- [36] **NFPA 92 B**: Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and large Spaces. NFPA National Fire Protection Association USA, Quincy, MA, 2005.
- [37] **NFPA 101**: Life Safety Code. NFPA National Fire Protection Association USA, Quincy, MA, 2000.
- [38] **BSI British Standards Institution: DD 240**: Fire safety engineering in buildings. Part 1: Guide to application of fire safety engineering principles. 1997.
- [39] **BSI British Standards Institution: PD 7974**: Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 2: Spread of smoke and toxic gases within and beyond the enclosure of origin. 2002.

# Anhang A

## Simulationsszenarien - Zusammenstellung

Bezeichnung der Simulation			Sim7	Sim8	Sim9	Sim10	Sim11	Sim12	Sim13	Sim14
Brandraum	$l_{br}$	in y-Richtung [m]	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
	$b_{br}$	in x-Richtung [m]	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
	$h_{br}$	in z-Richtung [m]	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Öffnung	$b_o$	in y-Richtung [m]	3,00	3,00	4,00	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00
	$h_o$	in z-Richtung [m]	2,50	2,50	2,50	2,50	2,80	2,80	2,80	2,80
	$h_{sturz}$	[m]	0,30	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00
Balkon	$b_b$	in x-Richtung [m]	2,00	3,00	2,00	3,00	2,00	2,00	3,00	3,00
	$l_b$	in y-Richtung [m]	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Volumenstrom	Lage des Vents		BR-Decke							
	Richtung		-z							
Quasibrandquelle	$V_{vent}$		10,20	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20	10,20
	$V_{vent}(\text{halbes Szenario})$		5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10	5,10
	Temperatur [°C]		357,00	357,00	357,00	357,00	357,00	357,00	357,00	357,00
Massenstrom	$\rho_{vent}$ [kg/m³]		0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	$M_{vent}(\text{halbes Szenario})$ [kg/s]		2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86	2,86
Simulationszeit	$t_{beginn}$ [s]		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$t_{ende}$ [s]		80,0	80,0	80,0	80,0	90,0	90,0	90,0	90,0
Zeitangaben	$\Delta t_{bevc}$ [s]		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	$N_{frames}$ [Stk.]		80,0	80,0	80,0	80,0	90,0	90,0	90,0	90,0
	$t_{sim}$ [s]		40,0	40,0	40,0	40,0	60,0	60,0	60,0	60,0
$\Delta t_{steady}$ [s]		40,0	40,0	40,0	40,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0

Tabelle A.1: Zusammenstellung der durchgeführten Simulationen (1)

Bezeichnung der Simulation			Sim15	Sim16	Sim17	Sim18	Sim19	Sim20	Sim21	Sim22
Brandraum	$l_{br}$	in y-Richtung [m]	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
	$b_{br}$	in x-Richtung [m]	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
	$h_{br}$	in z-Richtung [m]	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Öffnung	$b_o$	in y-Richtung [m]	3,00	4,00	5,00	6,00	2,00	3,00	4,00	5,00
	$h_o$	in z-Richtung [m]	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
	$h_{sturz}$	[m]	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Balkon	$b_b$	in x-Richtung [m]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,50	2,50	2,50
	$l_b$	in y-Richtung [m]	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Volumenstrom	Lage des Vents		BR-Decke							
	Richtung		-z							
Quasibrandquelle	$V_{vent}$		11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
	$V_{vent}$ (halbes Szenario)		5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
	Temperatur [°C]		160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
Massenstrom	$\rho_{vent}$ [kg/m³]		0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
	$M_{vent}$ (halbes Szenario) [kg/s]		4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48
Zeitangaben	$t_{Beginn}$ [s]		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$t_{Ende}$ [s]		120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
	$\Delta t_{BEVC}$ [s]		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Steady-State	$N_{frames}$ [Stk.]		120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
	$t_{Sim}$ [s]		80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
	$\Delta t_{Steady}$ [s]		40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0

Tabelle A.2: Zusammenstellung der durchgeführten Simulationen (2)

Bezeichnung der Simulation			Sim23	Sim24	Sim25	Sim26	Sim27	Sim28	Sim29	Sim30
Brandraum	$l_{br}$	in y-Richtung [m]	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
	$b_{br}$	in x-Richtung [m]	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
	$h_{br}$	in z-Richtung [m]	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Öffnung	$b_o$	in y-Richtung [m]	6,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	2,00	2,00
	$h_o$	in z-Richtung [m]	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,30
	$h_{sturz}$	[m]	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	1,50
Balkon	$b_b$	in x-Richtung [m]	2,50	2,50	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	$l_b$	in y-Richtung [m]	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Volumenstrom	Lage des Vents		BR-Decke							
	Richtung		-z							
Quasibrandquelle	$V_{vent}$		11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
	$V_{vent}$ (halbes Szenario)		5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
Massenstrom	Temperatur		160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
	$\rho_{vent}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Simulationszeit	$M_{vent}$ (halbes Szenario)		4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48
	$t_{Beginn}$	[s]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Zeitangaben	$t_{Ende}$	[s]	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
	$\Delta t_{BEVC}$	[s]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Steady-State	$N_{frames}$		120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
	$t_{Sim}$	[s]	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
$\Delta t_{Steady}$		[s]	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0

Tabelle A.3: Zusammenstellung der durchgeführten Simulationen (3)

Bezeichnung der Simulation			Sim31	Sim32	Sim33	Sim34	Sim35	Sim36	Sim37	Sim38
Brandraum	$l_{br}$	in y-Richtung [m]	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
	$b_{br}$	in x-Richtung [m]	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
	$h_{br}$	in z-Richtung [m]	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Öffnung	$b_o$	in y-Richtung [m]	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	2,00	3,00	4,00
	$h_o$	in z-Richtung [m]	2,50	1,30	1,30	1,30	1,30	1,90	1,90	1,90
	$h_{Sturz}$	[m]	0,30	1,50	1,50	1,50	1,50	0,90	0,90	0,90
Balkon	$b_b$	in x-Richtung [m]	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	4,00
	$l_b$	in y-Richtung [m]	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Volumenstrom	Lage des Vents		BR-Decke							
	Richtung		-z							
Quasibrandquelle	$V_{vent}$		11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
	$V_{vent}$ (halbes Szenario)		5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
	Temperatur [°C]		320,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
Massenstrom	$\rho_{vent}$ [kg/m³]		0,60	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
	$M_{vent}$ (halbes Szenario) [kg/s]		3,27	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48	4,48
Zeitangaben	$t_{Beginn}$ [s]		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$t_{Ende}$ [s]		120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
	$\Delta t_{BEVC}$ [s]		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Steady-State	$N_{frames}$ [Stk.]		120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
	$t_{Sim}$ [s]		80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
	$\Delta t_{Steady}$ [s]		40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0

Tabelle A.4: Zusammenstellung der durchgeführten Simulationen (4)

Bezeichnung der Simulation			Sim39	Sim41	Sim42	Sim43	Sim44	Sim45	Sim46	Sim47
Brandraum	$l_{br}$	in y-Richtung [m]	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
	$b_{br}$	in x-Richtung [m]	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
	$h_{br}$	in z-Richtung [m]	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Öffnung	$b_o$	in y-Richtung [m]	5,00	2,00	2,00	2,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	$h_o$	in z-Richtung [m]	1,90	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,90	1,90
	$h_{sturz}$	[m]	0,90	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,90	0,90
Balkon	$b_b$	in x-Richtung [m]	4,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	4,00	4,00
	$l_b$	in y-Richtung [m]	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Volumenstrom	Lage des Vents		BR-Decke							
	Richtung		-z							
Quasibrandquelle	$V_{vent}$		11,00	11,00	5,50	22,00	5,50	16,50	5,50	16,50
	$V_{vent}$ (halbes Szenario)		5,50	5,50	2,75	11,00	2,75	8,25	2,75	8,25
	Temperatur		160,00	480,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00	160,00
	$\rho_{vent}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,81	0,47	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Massenstrom	$M_{vent}$ (halbes Szenario)		4,48	2,58	2,24	8,96	2,24	6,72	2,24	6,72
	Simulationszeit									
Zeitangaben	$t_{Beginn}$		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	$t_{Ende}$		120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
	$\Delta t_{BEVC}$		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	$N_{frames}$		120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0	120,0
	Steady-State									
$t_{Sim}$		80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	
$\Delta t_{Steady}$		40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	

Tabelle A.5: Zusammenstellung der durchgeführten Simulationen (5)

# Anhang B

## Beispiel eines FDS-Datensatzes

```

Sim29.fds
// Simulation mit Auswertungen
// Beispiel 1: 3,00 m Balkon, Brandraumöffnung bxh=2.0x2.5m
// Identifikation: Beschreibungen
&HEAD CHID='Sim29', TITLE='Var.Balkon3'/

// Steuerung: Zeitangaben
&TIME TWFIN=120.0, SYNCHRONIZE=.TRUE./
&DUMP NFRAMES=120, DT_DEVC=1.0/

// Gitterdefinition, Diskretisierung
&MESH IJK=20, 50,30, XB= 0.0, 2.0, 15.0, 20.0, 0.0, 3.0, COLOR='RED' /
&MESH IJK=30,150,50, XB= 2.0, 5.0, 15.0, 30.0, 0.0, 5.0, COLOR='BLUE' /
&MESH IJK=60,150,60, XB= 5.0,11.0, 15.0, 30.0, 0.0, 6.0, COLOR='GREEN' /

// Verschiedene Parameter
&MISC TMPA=20.0, GVEC=0.00,0.00,-9.81, SURF_DEFAULT='CONCRETE'/

&MATL ID='CONCRETE',
      CONDUCTIVITY=0.88,
      SPECIFIC_HEAT=0.84,
      DENSITY=2100. /

&SURF ID='CONCRETE',
      MATL_ID='CONCRETE',
      BACKING='VOID',
      THICKNESS=0.15,
      COLOR='THISTLE' /

//Wände
&OBST XB=0.0, 0.1, 0.0, 30.0, 0.0, 2.9 /           Brandraum   Wand links
&OBST XB=0.1, 1.9, 9.9, 10.0, 0.0, 2.9 /         Brandraum   Wand vorne
&OBST XB=0.1, 1.9,20.0, 20.1, 0.0, 2.9 /         Brandraum   Wand hinten
&OBST XB=1.9, 2.0, 0.0, 30.0, 0.0, 2.9 /         Brandraum   Wand rechts
&OBST XB=0.1, 1.9,10.0, 20.0, 0.0, 0.1 /         Brandraum   Boden
&OBST XB=0.0, 5.0, 0.0, 30.0, 2.9, 3.0 /         Brandraum   Decke und Balkon

//Brandquelle
&SURF ID='PSEUDO', VOLUME_FLUX=-11.0, TMP_FRONT=160.0, COLOR='RED',
PART_ID='TRACER'/
&VENT XB= 0.1, 1.9, 10.1, 19.9, 2.9, 2.9, SURF_ID='PSEUDO' / QUELLE 1 an
Brandraumdecke
&PART ID='TRACER', MASSLESS=.TRUE., COLOR='BLUE', DT_INSERT=0.5/

//Begrenzungen
&VENT XB= 0.0, 11.0, 0.0, 0.0, 0.0, 6.0, SURF_ID='OPEN' /           Begrenzung vorne
&VENT XB= 0.0, 11.0,30.0,30.0, 0.0, 6.0, SURF_ID='OPEN' /           Begrenzung
hinten
&VENT XB= 11.0, 11.0, 0.0,30.0, 0.0, 6.0, SURF_ID='OPEN' /           Begrenzung
rechts
&VENT XB= 5.0, 5.0, 0.0,30.0, 3.0, 6.0, SURF_ID='OPEN' /           Begrenzung links
über Balkon
&VENT XB= 2.0, 11.0, 0.0,30.0, 0.0, 0.0, SURF_ID='OPEN' /           Begrenzung unten
&VENT XB= 2.0, 11.0, 0.0,30.0, 6.0, 6.0, SURF_ID='OPEN' /           Begrenzung oben

&VENT XB= 0.0, 11.0, 15.0, 15.0, 0.0, 6.0, SURF_ID='MIRROR' /

// Brandraumöffnung bxh=2.0x2.5m, Sturzhöhe=0.3m
&HOLE XB= 1.8, 2.2, 14.0, 16.0, 0.1, 2.6 /

//Auswertung: Schnitt durch die Mitte

```

```

Sim29.fds
&SLCF PBX=1.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=2.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=2.1,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=3.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=3.9,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=4.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=4.5,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=5.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=6.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=7.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=8.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=9.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=10.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=10.9,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=11.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=15.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=15.1,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=15.5,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=16.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=17.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=18.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=19.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=20.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=21.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=22.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=23.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=24.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=25.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=26.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=27.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=28.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=29.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=29.9,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=0.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=1.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=2.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=2.5,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=2.6,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=2.8,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=3.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=4.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=5.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=6.0,QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /

&ISOF QUANTITY='TEMPERATURE', VALUE(1)=300.0, VALUE(2)=150.00, VALUE(3)=50.00 /

// Massenstroeme
// Tür
&DEVC XB=2.0, 2.0, 14.0, 16.0, 0.1, 2.6, QUANTITY='MASS FLOW +', ID='MF_T_plus'
/
&DEVC XB=2.0, 2.0, 14.0, 16.0, 0.1, 2.6, QUANTITY='MASS FLOW -', ID='MF_T_minus'
/

// Überströmkante -1 zelle
&DEVC XB=4.9, 4.9, 0.0, 30.0, 0.0, 3.0, QUANTITY='MASS FLOW +', ID='MF_K1_plus'
/
&DEVC XB=4.9, 4.9, 0.0, 30.0, 0.0, 3.0, QUANTITY='MASS FLOW -', ID='MF_K1_minus'
/

// Überströmkante
&DEVC XB=5.0, 5.0, 0.0, 30.0, 0.0, 3.0, QUANTITY='MASS FLOW +', ID='MF_K2_plus'
/
&DEVC XB=5.0, 5.0, 0.0, 30.0, 0.0, 3.0, QUANTITY='MASS FLOW -', ID='MF_K2_minus'
/

// Seitliche Randbedingung Gang

```

```

                                Sim29.fds
&DEVC XB=2.0, 5.0, 30.0, 30.0, 0.0, 3.0, QUANTITY='MASS FLOW +', ID='MF_S1_plus'
/
&DEVC XB=2.0, 5.0, 30.0, 30.0, 0.0, 3.0, QUANTITY='MASS FLOW -',
ID='MF_S1_minus' /

// Temperaturen an der Kante
//x=5.0, z=2.90 y=15bis30 alle 50 cm

&DEVC XYZ=5.00,15.00,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,15.00,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,15.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,15.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,15.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,15.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,16.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,16.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,16.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,16.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,17.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,17.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,17.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,17.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,18.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,18.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,18.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,18.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,19.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,19.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,19.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,19.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,20.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,20.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,20.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,20.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,21.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,21.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,21.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,21.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,22.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,22.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,22.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,22.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,23.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,23.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,23.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,23.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,24.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,24.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,24.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,24.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,25.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,25.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,25.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,25.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,26.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,26.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,26.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,26.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,27.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,27.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,27.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,27.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,28.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,28.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,28.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,28.75,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,29.25,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,29.25,2.90' /
&DEVC XYZ=5.00,29.75,2.90, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,29.75,2.90' /

// Temperaturen an der Kante
//x=5.0, z=2.80 y=15bis30 alle 50 cm

&DEVC XYZ=5.00,15.00,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,15.00,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,15.25,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,15.25,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,15.75,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,15.75,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,16.25,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,16.25,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,16.75,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,16.75,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,17.25,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,17.25,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,17.75,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,17.75,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,18.25,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,18.25,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,18.75,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,18.75,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,19.25,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,19.25,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,19.75,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,19.75,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,20.25,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,20.25,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,20.75,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,20.75,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,21.25,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,21.25,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,21.75,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,21.75,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,22.25,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,22.25,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,22.75,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,22.75,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,23.25,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,23.25,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,23.75,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,23.75,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,24.25,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,24.25,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,24.75,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,24.75,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,25.25,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,25.25,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,25.75,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,25.75,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,26.25,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,26.25,2.80' /
&DEVC XYZ=5.00,26.75,2.80, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,26.75,2.80' /

```



```

Sim29.fds
&DEVC XYZ=5.00,26.25,2.60, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,26.25,2.60'/
&DEVC XYZ=5.00,26.75,2.60, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,26.75,2.60'/
&DEVC XYZ=5.00,27.25,2.60, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,27.25,2.60'/
&DEVC XYZ=5.00,27.75,2.60, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,27.75,2.60'/
&DEVC XYZ=5.00,28.25,2.60, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,28.25,2.60'/
&DEVC XYZ=5.00,28.75,2.60, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,28.75,2.60'/
&DEVC XYZ=5.00,29.25,2.60, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,29.25,2.60'/
&DEVC XYZ=5.00,29.75,2.60, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,29.75,2.60'/

// Temperaturen an der Kante
//x=5.00, z=2.50 Y=15bis30 alle 50 cm

&DEVC XYZ=5.00,15.00,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,15.00,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,15.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,15.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,15.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,15.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,16.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,16.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,16.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,16.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,17.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,17.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,17.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,17.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,18.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,18.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,18.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,18.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,19.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,19.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,19.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,19.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,20.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,20.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,20.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,20.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,21.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,21.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,21.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,21.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,22.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,22.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,22.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,22.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,23.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,23.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,23.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,23.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,24.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,24.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,24.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,24.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,25.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,25.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,25.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,25.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,26.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,26.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,26.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,26.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,27.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,27.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,27.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,27.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,28.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,28.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,28.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,28.75,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,29.25,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,29.25,2.50'/
&DEVC XYZ=5.00,29.75,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE',ID='T_5.00,29.75,2.50'/

// Massenströme an der Kante
//x=5.00, Y alle 50 cm z=0.1 bis 2.9
&DEVC XB=5.00,5.00,15.0,15.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW+',ID='MF_Y=15.00 bis
15.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,15.5,16.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW+',ID='MF_Y=15.50 bis
16.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,16.0,16.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW+',ID='MF_Y=16.00 bis
16.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,16.5,17.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW+',ID='MF_Y=16.50 bis
17.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,17.0,17.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW+',ID='MF_Y=17.00 bis
17.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,17.5,18.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW+',ID='MF_Y=17.50 bis
18.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,18.0,18.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW+',ID='MF_Y=18.00 bis
18.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,18.5,19.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW+',ID='MF_Y=18.50 bis
19.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,19.0,19.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW+',ID='MF_Y=19.00 bis
19.50'/

```

```

Sim29.fds
&DEVC XB=5.00,5.00,19.5,20.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=19.50 bis
20.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,20.0,20.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=20.00 bis
20.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,20.5,21.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=20.50 bis
21.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,21.0,21.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=21.00 bis
21.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,21.5,22.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=21.50 bis
22.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,22.0,22.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=22.00 bis
22.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,22.5,23.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=22.50 bis
23.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,23.0,23.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=23.00 bis
23.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,23.5,24.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=23.50 bis
24.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,24.0,24.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=24.00 bis
24.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,24.5,25.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=24.50 bis
25.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,25.0,25.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=25.00 bis
25.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,25.5,26.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=25.50 bis
26.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,26.0,26.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=26.00 bis
26.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,26.5,27.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=26.50 bis
27.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,27.0,27.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=27.00 bis
27.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,27.5,28.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=27.50 bis
28.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,28.0,28.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=28.00 bis
28.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,28.5,29.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=28.50 bis
29.00'/
&DEVC XB=5.00,5.00,29.0,29.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=29.00 bis
29.50'/
&DEVC XB=5.00,5.00,29.5,30.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF_Y=29.50 bis
30.00'/

```

```

// Massenströme unter dem Balkon in Y-Richtung
//X=2.0 bis 5.0 Z=0.1 bis 2.90 Y=16.5 bis 30 alle 100 cm

```

```

&DEVC XB=2.0,5.0,16.5,16.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=16.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,17.5,17.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=17.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,18.5,18.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=18.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,19.5,19.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=19.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,20.5,20.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=20.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,21.5,21.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=21.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,22.5,22.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=22.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,23.5,23.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=23.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,24.5,24.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=24.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,25.5,25.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=25.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,26.5,26.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=26.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,27.5,27.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=27.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,28.5,28.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=28.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,29.5,29.5,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=29.50'/
&DEVC XB=2.0,5.0,30.0,30.0,0.1,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF u.B._Y=30.00'/

```

```

Sim29.fds
// Massenströme ober der Kante
//x=5.0 bis 11.0, Y=15 bis 30
&DEVC XB=5.0,11.0,15.0,30.0,2.9,2.9,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF in Z=2.90'//
&DEVC XB=5.0,11.0,15.0,30.0,3.5,3.5,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF in Z=3.50'//
&DEVC XB=5.0,11.0,15.0,30.0,4.0,4.0,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF in Z=4.00'//
&DEVC XB=5.0,11.0,15.0,30.0,5.0,5.0,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF in Z=5.00'//
&DEVC XB=5.0,11.0,15.0,30.0,6.0,6.0,QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF in Z=6.00'//

//Massenströme unter dem Balkon in x-Richtung
&DEVC XB=2.5, 2.5, 15.0, 30.0, 0.1, 2.9, QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF
u.B._x=2.50'//
&DEVC XB=3.0, 3.0, 15.0, 30.0, 0.1, 2.9, QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF
u.B._x=3.00'//
&DEVC XB=3.5, 3.5, 15.0, 30.0, 0.1, 2.9, QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF
u.B._x=3.50'//
&DEVC XB=4.0, 4.0, 15.0, 30.0, 0.1, 2.9, QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF
u.B._x=4.00'//
&DEVC XB=4.5, 4.5, 15.0, 30.0, 0.1, 2.9, QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF
u.B._x=4.50'//
&DEVC XB=5.0, 5.0, 15.0, 30.0, 0.1, 2.9, QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF
u.B._x=5.00'//
//&DEVC XB=5.5, 5.5, 15.0, 30.0, 0.1, 2.9, QUANTITY='MASS FLOW +' ,ID='MF
u.B._x=5.50'//

// Temperaturen Brandraumöffnung
//x=2.0, y=15.00
&DEVC XYZ=2.00,15.00,2.60, QUANTITY='TEMPERATURE' ,ID='T_2.00,15.00,2.60'//
&DEVC XYZ=2.00,15.00,2.50, QUANTITY='TEMPERATURE' ,ID='T_2.00,15.00,2.50'//
&DEVC XYZ=2.00,15.00,2.40, QUANTITY='TEMPERATURE' ,ID='T_2.00,15.00,2.40'//
&DEVC XYZ=2.00,15.00,2.30, QUANTITY='TEMPERATURE' ,ID='T_2.00,15.00,2.30'//
&DEVC XYZ=2.00,15.00,2.20, QUANTITY='TEMPERATURE' ,ID='T_2.00,15.00,2.20'//
&DEVC XYZ=2.00,15.00,2.10, QUANTITY='TEMPERATURE' ,ID='T_2.00,15.00,2.10'//
&DEVC XYZ=2.00,15.00,2.00, QUANTITY='TEMPERATURE' ,ID='T_2.00,15.00,2.00'//
&DEVC XYZ=2.00,15.00,1.90, QUANTITY='TEMPERATURE' ,ID='T_2.00,15.00,1.90'//

//Massenströme über dem Balkon in negative x-Richtung (adhered plume?)
&DEVC XB=5.0, 5.0, 15.0, 30.0, 3.0, 5.0, QUANTITY='MASS FLOW -' ,ID='MF über
B._x=4.5'//

// Da weiss FDS -> jetzt ist's aus
&TAIL /

```

## Anhang C

### Ermittlung der umströmten Kantenbreite $W_s$

		Sim7	Sim8	Sim9	Sim10
Öffnungsbreite	$b_o$ [m]	3,00	3,00	4,00	4,00
Öffnungshöhe	$h_o$ [m]	2,50	2,50	2,50	2,50
Sturzhöhe	$h_{Sturz}$ [m]	0,30	0,30	0,30	0,30
Brandraumhöhe	$h_{br}$ [m]	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	$b_b$ [m]	2,00	3,00	2,00	3,00
umströmte Kante	$W=b_o+b_b$ [m]	5,00	6,00	6,00	7,00
Impulsvolumen	$V_{ent}$ [m <sup>3</sup> /s]	10,20	10,20	10,20	10,20
Temperatur	$T_{vent}$ [°C]	357	357	357	357
Massenstrom	$M_{vent}$ [kg/s]	5,71	5,71	5,71	5,71
Brandleistung	$Q_{vent}$ [kW]	1945	1945	1945	1945
$T_o$	20 [°C]	293	293	293	293
$T_g, sim$	STUK-10 [°C]	354	354	355	356
<b><math>W_{s, sim}</math> aus Simulationsergebnissen für den Kantenmassenstrom:</b>					
Kantenstrom aus Simulation	$M_{b, sim}$ [kg/s]	12,11	14,88	13,47	15,22
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w, sim}$ [kg/s]	6,33	6,30	6,39	6,39
	$\Delta M_{sim}$ [kg/s]	5,78	8,58	7,08	8,83
	$M_{b, sim}/M_{w, sim}$ [-]	1,91	2,36	2,11	2,38
<b><math>W_{s, sim} = b_o * M_{b, sim}/M_{w, sim} * [1 + T_o/T_g * (M_{b, sim}/M_{w, sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>8,19</b>	<b>11,59</b>	<b>12,80</b>	<b>15,67</b>
<b><math>W_{s, rechn.}</math> aus Rechenwerten für den Kantenmassenstrom nach Harrison:</b>					
Bedingungen für	$0,2 \leq h_o/b_o \leq 2,0$ [-]	0,83	0,83	0,63	0,63
Harrisonformel	$(h_{br}/h_o) \leq (b_b/(h_{br}-h_o)) \geq 2,5$ [-]	7,5	11,2	7,5	11,2
$M_{b, Harr.} = 0,89x(h_o/b_o)^{0,92x(h_{br}xM_{w, sim}/b_o)}$	[kg/s]	6,22	6,19	6,13	6,13
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w, sim}$ [kg/s]	6,33	6,30	6,39	6,39
	$\Delta M_{Harr.}$ [kg/s]	-0,11	-0,11	-0,26	-0,26
	$M_{b, Harr.}/M_{w, sim}$ [-]	0,98	0,98	0,96	0,96
Bedingung $M_{b, sim} > M_{w, sim}$		Ann. $M_b=M_w$	Ann. $M_b=M_w$	Ann. $M_b=M_w$	Ann. $M_b=M_w$
in Rechnung angesetzt	$M_{b, rechn.}$ [kg/s]	6,33	6,30	6,39	6,39
<b><math>W_{s, rechn.} = b_o * M_{b, rechn.}/M_{w, sim} * [1 + T_o/T_g * (M_{b, rechn.}/M_{w, sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>3,00</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>

 Tabelle C.1: Berechnung der umströmten Kantenbreite  $W_{s, sim.}$  aus den Simulationsergebnissen für  $M_b$  bzw.  $W_{s, rechn.}$  aus dem nach Harrison ermittelten  $M_{b, rechn.}$  (1)

	Sim11	Sim12	Sim13	Sim14
Öffnungsbreite	3,00	4,00	3,00	4,00
Öffnungshöhe	2,80	2,80	2,80	2,80
Sturzhöhe	0,00	0,00	0,00	0,00
Brandraumhöhe	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	2,00	2,00	3,00	3,00
umströmte Kante	5,00	6,00	6,00	7,00
Impulsvolumen	10,20	10,20	10,20	10,20
Temperatur	357	357	357	357
Massenstrom	5,71	5,71	5,71	5,71
Brandleistung	1945	1945	1945	1945
$T_0$	293	293	293	293
$T_{g,sim}$	349	350	353	355
<b><math>W_{s,sim}</math> aus Simulationsergebnissen für den Kantenmassenstrom:</b>				
Kantenstrom aus Simulation	12,73	12,40	14,87	13,88
Öffnungsstrom aus Simulation	5,89	5,95	6,30	6,42
$\Delta M_{g,sim}$	6,84	6,45	8,57	7,46
$M_{b,sim}/M_{w,sim}$	2,16	2,08	2,36	2,16
<b><math>W_{s,sim} = b_o \cdot M_{b,sim}/M_{w,sim} \cdot [1 + T_0/T_g \cdot (M_{b,sim}/M_{w,sim} - 1)]</math></b>	<b>10,04</b>	<b>12,58</b>	<b>11,58</b>	<b>13,33</b>
<b><math>W_{s,rechn.}</math> aus Rechenwerten für den Kantenmassenstrom nach Harrison:</b>				
Bedingungen für	$0,2 \leq h_o/b_o \leq 2,0$	0,70	0,93	0,70
Harrisonformel	$(h_{br}/h_o)(b_b/(h_{br}-h_o)) \geq 2,5$	20000,0	30000,0	30000,0
$M_{b,Harr.} = 0,89x(h_o/b_o)^{0,92x}(h_{br} \cdot M_{w,sim}/b_o)$	5,21	5,15	5,58	5,55
Öffnungsstrom aus Simulation	5,89	5,95	6,30	6,42
$\Delta M_{Harr.}$	-0,68	-0,80	-0,72	-0,87
$M_{b,Harr.}/M_{w,sim}$	0,89	0,86	0,89	0,86
Bedingung $M_{b,sim} > M_{w,sim}$	Ann. $M_b = M_w$	Ann. $M_b = M_w$	Ann. $M_b = M_w$	Ann. $M_b = M_w$
in Rechnung angesetzt	5,89	5,95	6,30	6,42
<b><math>W_{s,rechn.} = b_o \cdot M_{b,rechn.}/M_{w,sim} \cdot [1 + T_0/T_g \cdot (M_{b,rechn.}/M_{w,sim} - 1)]</math></b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>

Tabelle C.2: Berechnung der umströmten Kantenbreite  $W_{s,sim.}$  aus den Simulationsergebnissen für  $M_b$  bzw.  $W_{s,rechn.}$  aus dem nach Harrison ermittelten  $M_{b,rechn.}$  (2)

	Sim15	Sim16	Sim17	Sim18
Öffnungsbreite	3,00	4,00	5,00	6,00
Öffnungshöhe	2,50	2,50	2,50	2,50
Sturzhöhe	0,30	0,30	0,30	0,30
Brandraumhöhe	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	2,00	2,00	2,00	2,00
umströmte Kante	5,00	6,00	7,00	8,00
Impulsvolumen	10,20	10,20	10,20	10,20
Temperatur	357	357	357	357
Massenstrom	8,96	8,96	8,96	8,96
Brandleistung	1268	1268	1268	1268
$T_0$	293	293	293	293
$T_{g,sim}$	160	160	160	162
<b><math>W_{s,sim}</math> aus Simulationenwerten für den Kantenmassenstrom:</b>				
Kantenstrom aus Simulation	13,61	15,50	14,93	15,17
Öffnungsstrom aus Simulation	9,37	9,53	9,60	9,62
	4,24	5,97	5,33	5,55
	1,45	1,63	1,56	1,58
<b><math>W_{s,sim} = b_o \cdot M_{b,sim} / M_{w,sim} \cdot [1 + T_0 / T_g \cdot (M_{b,sim} / M_{w,sim} - 1)]</math></b>	<b>5,69</b>	<b>9,27</b>	<b>10,70</b>	<b>13,13</b>
<b><math>W_{s,rechn.}</math> aus Rechenwerten für den Kantenmassenstrom nach Harrison:</b>				
Bedingungen für	$0,2 \leq h_o / b_o \leq 2,0$			
Harrisonformel	$(h_{br} / h_o) (b_b / (h_{br} - h_o)) \geq 2,5$	0,63	0,50	0,42
$M_{b,Harr.} = 0,89x(h_o/b_o)^{0,92x}(h_{br} \times M_{w,b_o})$	9,20	9,15	9,05	8,94
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w,sim}$	9,53	9,60	9,62
	$\Delta M_{Harr.}$	-0,38	-0,55	-0,68
Bedingung $M_{b,sim} > M_{w,sim}$	$M_{b,Harr.} / M_{w,sim}$	0,96	0,94	0,93
in Rechnung angesetzt	$M_{b,rechn.}$	Ann. $M_b = M_w$	Ann. $M_b = M_w$	Ann. $M_b = M_w$
<b><math>W_{s,rechn.} = b_o \cdot M_{b,rechn.} / M_{w,sim} \cdot [1 + T_0 / T_g \cdot (M_{b,rechn.} / M_{w,sim} - 1)]</math></b>	9,37	9,53	9,60	9,62
	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>	<b>5,00</b>	<b>6,00</b>

Tabelle C.3: Berechnung der umströmten Kantenbreite  $W_{s,sim.}$  aus den Simulationsergebnissen für  $M_b$  bzw.  $W_{s,rechn.}$  aus dem nach Harrison ermittelten  $M_{b,rechn.}$  (3)

		Sim19	Sim20	Sim21	Sim22
Öffnungsbreite	$b_o$ [m]	2,00	3,00	4,00	5,00
Öffnungshöhe	$h_o$ [m]	2,50	2,50	2,50	2,50
Sturzhöhe	$h_{Sturz}$ [m]	0,30	0,30	0,30	0,30
Brandraumhöhe	$h_{br}$ [m]	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	$b_b$ [m]	2,00	2,50	2,50	2,50
umströmte Kante	$W=b_o+b_b$ [m]	4,00	5,50	6,50	7,50
Impulsvolumen	$V_{ent}$ [m <sup>3</sup> /s]	10,20	10,20	10,20	10,20
Temperatur	$T_{vent}$ [°C]	357	357	357	357
Massenstrom	$M_{vent}$ [kg/s]	8,96	8,96	8,96	8,96
Brandleistung	$Q_{vent}$ [kW]	1268	1268	1268	1268
$T_o$	20 [°C]	293	293	293	293
$T_g, sim$	STUK-10 [°C]	160	160	160	161
<b><math>W_{s, sim}</math> aus Simulationenwerten für den Kantenmassenstrom:</b>					
Kantenstrom aus Simulation	$M_{b, sim}$ [kg/s]	15,10	16,69	16,58	15,90
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w, sim}$ [kg/s]	8,99	9,35	9,53	9,60
	$\Delta M_{sim}$ [kg/s]	6,11	7,33	7,05	6,30
	$M_{b, sim}/M_{w, sim}$ [-]	1,68	1,78	1,74	1,66
<b><math>W_{s, sim} = b_o * M_{b, sim}/M_{w, sim} * [1 + T_o/T_g * (M_{b, sim}/M_{w, sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>4,91</b>	<b>8,19</b>	<b>10,44</b>	<b>11,96</b>
<b><math>W_{s, rechn.}</math> aus Rechenwerten für den Kantenmassenstrom nach Harrison:</b>					
Bedingungen für	$0,2 \leq h_o/b_o \leq 2,0$	1,25	0,83	0,63	0,50
Harrisonformel	$(h_{br}/h_o)(bb/(h_{br}-h_o)) \geq 2,5$	7,5	9,3	9,3	9,3
$M_{b, Harr.} = 0,89x(h_o/b_o)^{0,92x(h_{br}xM_{w, sim}/b_o)}$	[kg/s]	9,12	9,19	9,15	9,05
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w, sim}$ [kg/s]	8,99	9,35	9,53	9,60
	$\Delta M_{Harr.}$ [kg/s]	0,13	-0,16	-0,38	-0,55
	$M_{b, Harr.}/M_{w, sim}$ [-]	1,01	0,98	0,96	0,94
Bedingung $M_{b, sim} > M_{w, sim}$		ok	Ann. $M_b=M_w$	Ann. $M_b=M_w$	Ann. $M_b=M_w$
in Rechnung angesetzt	$M_{b, rechn.}$ [kg/s]	9,12	9,35	9,53	9,60
<b><math>W_{s, rechn.} = b_o * M_{b, rechn.}/M_{w, sim} * [1 + T_o/T_g * (M_{b, rechn.}/M_{w, sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>2,05</b>	<b>3,00</b>	<b>4,00</b>	<b>5,00</b>

Tabelle C.4: Berechnung der umströmten Kantenbreite  $W_{s, sim.}$  aus den Simulationsergebnissen für  $M_b$  bzw.  $W_{s, rechn.}$  aus dem nach Harrison ermittelten  $M_{b, rechn.}$  (4)

	Sim23	Sim24	Sim25	Sim26
Öffnungsbreite	$b_o$ [m]	2,00	3,00	4,00
Öffnungshöhe	$h_o$ [m]	2,50	2,50	2,50
Sturzhöhe	$h_{sturz}$ [m]	0,30	0,30	0,30
Brandraumhöhe	$h_{br}$ [m]	2,80	2,80	2,80
Balkonbreite	$b_b$ [m]	2,50	3,00	3,00
umströmte Kante	$W=b_o+b_b$ [m]	4,50	6,00	7,00
Impulsvolumen	$V_{ent}$ [m <sup>3</sup> /s]	10,20	10,20	10,20
Temperatur	$T_{vent}$ [°C]	357	357	357
Massenstrom	$M_{vent}$ [kg/s]	8,96	8,96	8,96
Brandleistung	$Q_{vent}$ [kW]	1268	1268	1268
$T_o$	20 [°C]	293	293	293
$T_g, sim$	STUK-10 [°C]	160	160	160
<b><math>W_{s, sim}</math> aus Simulationen für den Kantenmassenstrom:</b>				
Kantenstrom aus Simulation	$M_{b, sim}$ [kg/s]	15,80	16,62	17,03
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w, sim}$ [kg/s]	9,61	8,99	9,35
	$\Delta M_{sim}$ [kg/s]	6,18	7,64	7,50
	$M_{b, sim}/M_{w, sim}$ [-]	1,64	1,85	1,79
<b><math>W_{s, sim} = b_o * M_{b, sim}/M_{w, sim} * [1 + T_o/T_g * (M_{b, sim}/M_{w, sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>14,13</b>	<b>9,00</b>	<b>10,94</b>
<b><math>W_{s, rechn.}</math> aus Rechenwerten für den Kantenmassenstrom nach Harrison:</b>				
Bedingungen für	$0,2 \leq h_o/b_o \leq 2,0$ [-]	1,25	0,83	0,63
Harrisonformel	$(h_{br}/h_o)(bb/(h_{br}-h_o)) \geq 2,5$ [-]	9,3	11,2	11,2
$M_{b, Harr.} = 0,89x(h_o/b_o)^{0,92x}(h_{br}xM_{w, sim}/b_o)$	[kg/s]	8,94	9,12	9,15
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w, sim}$ [kg/s]	9,61	8,99	9,35
	$\Delta M_{Harr.}$ [kg/s]	-0,68	0,13	-0,38
	$M_{b, Harr.}/M_{w, sim}$ [-]	0,93	1,01	0,96
Bedingung $M_{b, sim} > M_{w, sim}$		Ann. $M_b = M_w$	Ann. $M_b = M_w$	Ann. $M_b = M_w$
in Rechnung angesetzt	$M_{b, rechn.}$ [kg/s]	9,61	9,12	9,35
<b><math>W_{s, rechn.} = b_o * M_{b, rechn.}/M_{w, sim} * [1 + T_o/T_g * (M_{b, rechn.}/M_{w, sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>6,00</b>	<b>2,05</b>	<b>4,00</b>

 Tabelle C.5: Berechnung der umströmten Kantenbreite  $W_{s, sim.}$  aus den Simulationsergebnissen für  $M_b$  bzw.  $W_{s, rechn.}$  aus dem nach Harrison ermittelten  $M_{b, rechn.}$  (5)

		Sim26_Br_unen	Sim27	Sim28	Sim29
Öffnungsbreite	$b_o$ [m]	4,00	5,00	6,00	2,00
Öffnungshöhe	$h_o$ [m]	2,50	2,50	2,50	2,50
Sturzhöhe	$h_{sturz}$ [m]	0,30	0,30	0,30	0,30
Brandraumhöhe	$h_{br}$ [m]	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkonbreite	$b_b$ [m]	3,00	3,00	3,00	3,00
umströmte Kante	$W=b_o+b_b$ [m]	7,00	8,00	9,00	5,00
Impulsvolumen	$V_{ent}$ [m <sup>3</sup> /s]	10,20	10,20	10,20	10,20
Temperatur	$T_{vent}$ [°C]	357	357	357	357
Massenstrom	$M_{vent}$ [kg/s]	8,96	8,96	8,96	8,96
Brandleistung	$Q_{vent}$ [kW]	1268	1268	1268	1268
$T_o$	20 [°C]	293	293	293	293
$T_g, sim$	STUK-10 [°C]	145	161	162	160
<b><math>W_{s, sim}</math> aus Simulationenwerten für den Kantenmassenstrom:</b>					
Kantenstrom aus Simulation	$M_{b, sim}$ [kg/s]	17,59	16,56	16,38	18,48
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w, sim}$ [kg/s]	10,49	9,60	9,61	8,99
	$\Delta M_{sim}$ [kg/s]	7,10	6,96	6,77	9,49
	$M_{b, sim}/M_{w, sim}$ [-]	1,68	1,72	1,70	2,06
<b><math>W_{s, sim} = b_o * M_{b, sim}/M_{w, sim} * [1 + T_o/T_g * (M_{b, sim}/M_{w, sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>9,89</b>	<b>12,85</b>	<b>15,08</b>	<b>7,05</b>
<b><math>W_{s, rechn.}</math> aus Rechenwerten für den Kantenmassenstrom nach Harrison:</b>					
Bedingungen für	$0,2 \leq h_o/b_o \leq 2,0$	0,63	0,50	0,42	1,25
Harrisonformel	$(h_{br}/h_o)(b_b/(h_{br}-h_o)) \geq 2,5$	11,2	11,2	11,2	11,2
$M_{b, Harr.} = 0,89x(h_o/b_o)^{0,92x(h_{br}xM_{w, sim}/b_o)}$	[kg/s]	10,07	9,05	8,93	9,12
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w, sim}$ [kg/s]	10,49	9,60	9,61	8,99
	$\Delta M_{Harr.}$ [kg/s]	-0,42	-0,55	-0,68	0,13
	$M_{b, Harr.}/M_{w, sim}$ [-]	0,96	0,94	0,93	1,01
Bedingung $M_{b, sim} > M_{w, sim}$		Ann. $M_b = M_w$	Ann. $M_b = M_w$	Ann. $M_b = M_w$	ok
in Rechnung angesetzt	$M_{b, rechn.}$ [kg/s]	10,49	9,60	9,61	9,12
<b><math>W_{s, rechn.} = b_o * M_{b, rechn.}/M_{w, sim} * [1 + T_o/T_g * (M_{b, rechn.}/M_{w, sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>4,00</b>	<b>5,00</b>	<b>6,00</b>	<b>2,05</b>

 Tabelle C.6: Berechnung der umströmten Kantenbreite  $W_{s, sim.}$  aus den Simulationsergebnissen für  $M_b$  bzw.  $W_{s, rechn.}$  aus dem nach Harrison ermittelten  $M_{b, rechn.}$  (6)

	Sim30	Sim31	Sim32	Sim33
Öffnungsbreite	2,00	2,00	3,00	4,00
Öffnungshöhe	1,30	2,50	1,30	1,30
Sturzhöhe	1,50	0,30	1,50	1,50
Brandraumhöhe	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	3,00	3,00	3,00	3,00
umströmte Kante	5,00	5,00	6,00	7,00
Impulsvolumen	10,20	10,20	10,20	10,20
Temperatur	357	357	357	357
Massenstrom	8,96	6,55	8,96	8,96
Brandleistung	1268	1983	1268	1268
$T_0$	293	293	293	293
$T_{g,sim}$	163	318	164	162
<b><math>W_{s,sim}</math> aus Simulationsergebnissen für den Kantenmassenstrom:</b>				
Kantenstrom aus Simulation	13,29	17,20	15,39	18,88
Öffnungsstrom aus Simulation	8,95	6,86	8,96	8,95
$\Delta M_{sim}$	4,34	10,34	6,43	9,93
$M_{b,sim}/M_{w,sim}$	1,49	2,51	1,72	2,11
<b><math>W_{s,sim} = b_o \cdot M_{b,sim}/M_{w,sim} \cdot [1 + T_0/T_g \cdot (M_{b,sim}/M_{w,sim} - 1)]</math></b>	<b>3,94</b>	<b>8,76</b>	<b>7,64</b>	<b>14,74</b>
<b><math>W_{s,rechn.}</math> aus Rechenwerten für den Kantenmassenstrom nach Harrison:</b>				
Bedingungen für	$0,2 \leq h_o/b_o \leq 2,0$			
Harrisonformel	$(h_{br}/h_o) \cdot (bb/(h_{br} - h_o)) \geq 2,5$	1,25	0,43	0,33
$M_{b,Harr.} = 0,89x(h_o/b_o)^{0,92x}(h_{br} \cdot M_{w,sim}/b_o)$		11,2	4,3	4,3
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w,sim}$	6,96	16,06	15,68
	$\Delta M_{Harr.}$	6,86	8,96	8,95
	$M_{b,Harr.}/M_{w,sim}$	0,10	7,10	6,73
Bedingung $M_{b,sim} > M_{w,sim}$		1,01	1,79	1,75
in Rechnung angesetzt		ok	ok	ok
<b><math>W_{s,rechn.} = b_o \cdot M_{b,rechn.}/M_{w,sim} \cdot [1 + T_0/T_g \cdot (M_{b,rechn.}/M_{w,sim} - 1)]</math></b>		6,96	16,06	15,68
		<b>2,04</b>	<b>8,24</b>	<b>10,56</b>

 Tabelle C.7: Berechnung der umströmten Kantenbreite  $W_{s,sim.}$  aus den Simulationsergebnissen für  $M_b$  bzw.  $W_{s,rechn.}$  aus dem nach Harrison ermittelten  $M_{b,rechn.}$  (7)

	Sim34	Sim35	Sim36	Sim37
Öffnungsbreite	$b_o$ [m]	5,00	6,00	2,00
Öffnungshöhe	$h_o$ [m]	1,30	1,30	1,90
Sturzhöhe	$h_{sturz}$ [m]	1,50	1,50	0,90
Brandraumhöhe	$h_{br}$ [m]	2,80	2,80	2,80
Balkonbreite	$b_b$ [m]	3,00	3,00	3,00
umströmte Kante	$W=b_o+b_b$ [m]	8,00	9,00	5,00
Impulsvolumen	$V_{ent}$ [ $m^3/s$ ]	10,20	10,20	10,20
Temperatur	$T_{vent}$ [ $^{\circ}C$ ]	357	357	357
Massenstrom	$M_{vent}$ [kg/s]	8,96	8,96	8,96
Brandleistung	$Q_{vent}$ [kW]	1268	1268	1268
$T_0$	20 [ $^{\circ}C$ ]	293	293	293
$T_{g,sim}$	STUK-10 [ $^{\circ}C$ ]	156	156	162
<b><math>W_{s,sim}</math> aus Simulationsergebnissen für den Kantenmassenstrom:</b>				
Kantenstrom aus Simulation	$M_{b,sim}$ [kg/s]	19,24	19,24	15,68
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w,sim}$ [kg/s]	8,95	9,01	8,98
	$\Delta M_{sim}$ [kg/s]	10,29	10,23	6,70
	$M_{b,sim}/M_{w,sim}$ [-]	2,15	2,14	1,75
<b><math>W_{s,sim} = b_o * M_{b,sim}/M_{w,sim} * [1 + T_0/T_g * (M_{b,sim}/M_{w,sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>19,19</b>	<b>22,75</b>	<b>10,87</b>
<b><math>W_{s,rechn.}</math> aus Rechenwerten für den Kantenmassenstrom nach Harrison:</b>				
Bedingungen für	$0,2 \leq h_o/b_o \leq 2,0$	0,26	0,22	0,63
Harrisonformel	$(h_{br}/h_o) / (bb/(h_{br}-h_o)) \geq 2,5$	4,3	4,3	4,9
$M_{b,Harr.} = 0,89x(h_o/b_o)^{0,92x(h_{br}xM_{w,sim}/b_o)}$	[kg/s]	15,40	15,29	11,73
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w,sim}$ [kg/s]	8,95	9,01	8,98
	$\Delta M_{Harr.}$ [kg/s]	6,45	6,27	2,75
	$M_{b,Harr.}/M_{w,sim}$ [-]	1,72	1,70	1,31
Bedingung $M_{b,sim} > M_{w,sim}$		ok	ok	ok
in Rechnung angesetzt	$M_{b,rechn.}$ [kg/s]	15,40	15,29	11,73
<b><math>W_{s,rechn.} = b_o * M_{b,rechn.}/M_{w,sim} * [1 + T_0/T_g * (M_{b,rechn.}/M_{w,sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>12,84</b>	<b>15,02</b>	<b>4,47</b>

 Tabelle C.8: Berechnung der umströmten Kantenbreite  $W_{s,sim.}$  aus den Simulationsergebnissen für  $M_b$  bzw.  $W_{s,rechn.}$  aus dem nach Harrison ermittelten  $M_{b,rechn.}$  (8)

	Sim38	Sim39	Sim40	Sim41
Öffnungsbreite	$b_o$ [m]	5,00	6,00	2,00
Öffnungshöhe	$h_o$ [m]	1,90	1,90	2,50
Sturzhöhe	$h_{Sturz}$ [m]	0,90	0,90	0,30
Brandraumhöhe	$h_{br}$ [m]	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	$b_b$ [m]	4,00	4,00	3,00
umströmte Kante	$W=b_o+b_b$ [m]	9,00	10,00	5,00
Impulsvolumen	$V_{ent}$ [m <sup>3</sup> /s]	10,20	10,20	10,20
Temperatur	$T_{vent}$ [°C]	357	357	357
Massenstrom	$M_{vent}$ [kg/s]	8,96	8,96	5,16
Brandleistung	$Q_{vent}$ [kW]	1268	1268	2395
$T_0$	20 [°C]	293	293	293
$T_{g,sim}$	STUK-10 [°C]	160	160	476
<b><math>W_{s,sim}</math> aus Simulationsergebnissen für den Kantenmassenstrom:</b>				
Kantenstrom aus Simulation	$M_{b,sim}$ [kg/s]	19,92	19,04	16,65
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w,sim}$ [kg/s]	9,49	9,60	5,60
	$\Delta M_{sim}$ [kg/s]	10,42	9,44	11,05
	$M_{b,sim}/M_{w,sim}$ [-]	2,10	1,98	2,97
<b><math>W_{s,sim} = b_o * M_{b,sim}/M_{w,sim} * [1 + T_0/T_g * (M_{b,sim}/M_{w,sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>18,29</b>	<b>19,82</b>	<b>10,55</b>
<b><math>W_{s,rechn.}</math> aus Rechenwerten für den Kantenmassenstrom nach Harrison:</b>				
Bedingungen für	$0,2 \leq h_o/b_o \leq 2,0$	0,38	0,32	1,25
Harrisonformel	$(h_{br}/h_o) / (bb/(h_{br}-h_o)) \geq 2,5$	6,5	6,5	11,2
$M_{b,Harr.} = 0,89x(h_o/b_o)^{0,92x(h_{br}xM_{w,sim}/b_o)}$	[kg/s]	11,41	11,48	5,68
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w,sim}$ [kg/s]	9,49	9,60	5,60
	$\Delta M_{Harr.}$ [kg/s]	2,03	1,88	0,08
	$M_{b,Harr.}/M_{w,sim}$ [-]	1,21	1,20	1,01
Bedingung $M_{b,sim} > M_{w,sim}$	ok	ok	ok	ok
in Rechnung angesetzt	$M_{b,rechn.}$ [kg/s]	11,41	11,48	5,68
<b><math>W_{s,rechn.} = b_o * M_{b,rechn.}/M_{w,sim} * [1 + T_0/T_g * (M_{b,rechn.}/M_{w,sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>6,95</b>	<b>8,13</b>	<b>2,04</b>

 Tabelle C.9: Berechnung der umströmten Kantenbreite  $W_{s,sim.}$  aus den Simulationsergebnissen für  $M_b$  bzw.  $W_{s,rechn.}$  aus dem nach Harrison ermittelten  $M_{b,rechn.}$  (9)

		Sim42	Sim43	Sim44
Öffnungsbreite	$b_o$ [m]	2,00	2,00	4,00
Öffnungshöhe	$h_o$ [m]	2,50	2,50	2,50
Sturzhöhe	$h_{sturz}$ [m]	0,30	0,30	0,30
Brandraumhöhe	$h_{br}$ [m]	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	$b_b$ [m]	3,00	3,00	3,00
umströmte Kante	$W=b_o+b_b$ [m]	5,00	5,00	7,00
Impulsvolumen	$V_{ent}$ [m <sup>3</sup> /s]	10,20	10,20	10,20
Temperatur	$T_{vent}$ [°C]	357	357	357
Massenstrom	$M_{vent}$ [kg/s]	4,48	17,93	4,48
Brandleistung	$Q_{vent}$ [kW]	634	2535	634
$T_o$	20 [°C]	293	293	293
$T_g, sim$	STUK-10 [°C]	158	160	159
<b><math>W_{s, sim}</math> aus Simulationswerten für den Kantenmassenstrom:</b>				
Kantenstrom aus Simulation	$M_{b, sim}$ [kg/s]	11,63	23,61	10,81
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w, sim}$ [kg/s]	4,78	17,95	4,94
	$\Delta M_{sim}$ [kg/s]	6,85	5,65	5,87
	$M_{b, sim}/M_{w, sim}$ [-]	2,43	1,31	2,19
	<b><math>W_{s, sim} = b_o * M_{b, sim}/M_{w, sim} * [1 + T_o/T_g * (M_{b, sim}/M_{w, sim} - 1)]</math></b> [m]	<b>9,60</b>	<b>3,19</b>	<b>15,81</b>
<b><math>W_{s, rechn.}</math> aus Rechenwerten für den Kantenmassenstrom nach Harrison:</b>				
Bedingungen für	$0,2 < h_o/b_o <= 2,0$ [-]	1,25	1,25	0,63
Harrisonformel	$(h_{br}/h_o)(bb/(h_{br}-h_o)) >= 2,5$ [-]	11,2	11,2	11,2
$M_{b, Harr.} = 0,89x(h_o/b_o)^{0,92x(h_{br}xM_{w, sim}/b_o)}$	[kg/s]	4,85	18,22	4,74
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w, sim}$ [kg/s]	4,78	17,95	4,94
	$\Delta M_{Harr.}$ [kg/s]	0,07	0,26	-0,20
	$M_{b, Harr.}/M_{w, sim}$ [-]	1,01	1,01	0,96
Bedingung $M_{b, sim} >= M_{w, sim}$		ok	ok	Ann. $M_b = M_w$
in Rechnung angesetzt	$M_{b, rechn.}$ [kg/s]	4,85	18,22	4,94
<b><math>W_{s, rechn.} = b_o * M_{b, rechn.}/M_{w, sim} * [1 + T_o/T_g * (M_{b, rechn.}/M_{w, sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>2,05</b>	<b>2,05</b>	<b>4,00</b>

 Tabelle C.10: Berechnung der umströmten Kantenbreite  $W_{s, sim}$  aus den Simulationsergebnissen für  $M_b$  bzw.  $W_{s, rechn.}$  aus dem nach Harrison ermittelten  $M_{b, rechn.}$  (10)

	Sim45	Sim46	Sim47
Öffnungsbreite	$b_o$ [m]	4,00	4,00
Öffnungshöhe	$h_o$ [m]	2,50	1,90
Sturzhöhe	$h_{sturz}$ [m]	0,30	0,90
Brandraumhöhe	$h_{br}$ [m]	2,80	2,80
Balkenbreite	$b_b$ [m]	3,00	4,00
umströmte Kante	$W=b_o+b_b$ [m]	7,00	8,00
Impulsvolumen	$V_{ent}$ [m <sup>3</sup> /s]	10,20	10,20
Temperatur	$T_{vent}$ [°C]	357	357
Massenstrom	$M_{vent}$ [kg/s]	13,45	13,45
Brandleistung	$Q_{vent}$ [kW]	1901	1901
$T_o$	20 [°C]	293	293
$T_g, sim$	STUK-10 [°C]	159	162
<b><math>W_{s, sim}</math> aus Simulationen für den Kantenmassenstrom:</b>			
Kantenstrom aus Simulation	$M_{b, sim}$ [kg/s]	22,83	26,73
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w, sim}$ [kg/s]	13,75	13,43
	$\Delta M_{sim}$ [kg/s]	9,07	13,30
	$M_{b, sim}/M_{w, sim}$ [-]	1,66	1,99
<b><math>W_{s, sim} = b_o * M_{b, sim}/M_{w, sim} * [1 + T_o/T_g * (M_{b, sim}/M_{w, sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>9,61</b>	<b>13,27</b>
<b><math>W_{s, rechn.}</math> aus Rechenwerten für den Kantenmassenstrom nach Harrison:</b>			
Bedingungen für	$0,2 \leq h_o/b_o \leq 2,0$ [-]	0,63	0,48
Harrisonformel	$(h_{br}/h_o)(bb/(h_{br}-h_o)) \geq 2,5$ [-]	11,2	6,5
$M_{b, Harr.} = 0,89x(h_o/b_o)^{0,92x(h_{br}xM_{w, sim}/b_o)}$	[kg/s]	13,20	16,60
Öffnungsstrom aus Simulation	$M_{w, sim}$ [kg/s]	13,75	13,43
	$\Delta M_{Harr.}$ [kg/s]	-0,55	3,17
	$M_{b, Harr.}/M_{w, sim}$ [-]	0,96	1,24
Bedingung $M_b >= M_w$	Ann. $M_b = M_w$	ok	ok
in Rechnung angesetzt	$M_{b, rechn.}$ [kg/s]	13,75	16,60
<b><math>W_{s, rechn.} = b_o * M_{b, rechn.}/M_{w, sim} * [1 + T_o/T_g * (M_{b, rechn.}/M_{w, sim} - 1)]</math></b>	<b>[m]</b>	<b>4,00</b>	<b>5,73</b>

Tabelle C.11: Berechnung der umströmten Kantenbreite  $W_{s, sim}$  aus den Simulationsergebnissen für  $M_b$  bzw.  $W_{s, rechn.}$  aus dem nach Harrison ermittelten  $M_{b, rechn.}$  (11)

# Anhang D

## Simulationsdaten - Vergleichsrechnungen *W*

In den folgenden Tabellen markieren orange ausgefüllte Felder Abweichungen der errechneten Werte vom Simulationsergebnis größer als 50%. Grüne Felder bezeichnen nahe am Simulationsergebnis liegende, berechnete Werte für den im Atrium aufsteigenden Massenstrom (Abweichung kleiner als 10%).

Simulation	M <sub>p,sim</sub>		Law '86				W <sub>s</sub>		W <sub>s,rechn.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb		W <sub>quer</sub>		W <sub>s</sub>		W <sub>s,rechn.</sub>	
			bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rechn.</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rechn.</sub>		
Sim7	0,6	24,34	12,66	-48%	12,19	-50%	17,99	-26%	9,00	-63%
	1,1	27,48	18,86	-31%	18,17	-34%	26,80	-2%	13,42	-51%
	2,1	30,81	31,27	1%	30,12	-2%	44,44	44%	22,25	-28%
	3,1	39,66	43,68	10%	42,07	6%	62,07	56%	31,07	-22%
Sim8	0,6	27,78	14,29	-49%	17,50	-37%	22,82	-18%	9,00	-68%
	1,1	29,79	21,30	-29%	26,07	-12%	34,01	14%	13,42	-55%
	2,1	33,03	35,31	7%	43,22	31%	56,39	71%	22,25	-33%
	3,1	41,11	49,33	20%	60,38	47%	78,76	92%	31,07	-24%
Sim9	0,6	25,83	14,29	-45%	15,31	-41%	24,32	-6%	10,91	-58%
	1,1	28,44	21,30	-25%	22,82	-20%	36,25	27%	16,26	-43%
	2,1	27,76	35,31	27%	37,83	36%	60,09	116%	26,95	-3%
	3,1	34,65	49,33	42%	52,84	52%	83,94	142%	37,64	9%
Sim10	0,6	28,63	15,84	-45%	17,98	-37%	27,94	-2%	10,91	-62%
	1,1	31,80	23,61	-26%	26,79	-16%	41,63	31%	16,26	-49%
	2,1	31,61	39,14	24%	44,42	41%	69,02	118%	26,95	-15%
	3,1	38,88	54,67	41%	62,04	60%	96,40	148%	37,64	-3%
Sim11	0,6	26,13	12,66	-52%	14,35	-45%	20,11	-23%	9,00	-66%
	1,1	28,74	18,86	-34%	21,38	-26%	29,97	4%	13,42	-53%
	2,1	29,43	31,27	6%	35,44	20%	49,68	69%	22,25	-24%
	3,1	35,91	43,68	22%	49,51	38%	69,40	93%	31,07	-13%
Sim12	0,6	23,55	14,29	-39%	14,79	-37%	23,37	-1%	10,91	-54%
	1,1	26,24	21,30	-19%	22,04	-16%	34,83	33%	16,26	-38%
	2,1	26,86	35,31	31%	36,55	36%	57,75	115%	26,95	0%
	3,1	32,29	49,33	53%	51,05	58%	80,66	150%	37,64	17%
Sim13	0,6	29,14	14,29	-51%	18,32	-37%	22,64	-22%	9,00	-69%
	1,1	31,91	21,30	-33%	27,30	-14%	33,73	6%	13,42	-58%
	2,1	33,05	35,31	7%	45,26	37%	55,93	69%	22,25	-33%
	3,1	39,69	49,33	24%	63,23	59%	78,12	97%	31,07	-22%
Sim14	0,6	26,07	15,84	-39%	17,53	-33%	25,03	-4%	10,91	-58%
	1,1	28,95	23,61	-18%	26,12	-10%	37,30	29%	16,26	-44%
	2,1	29,92	39,14	31%	43,30	45%	61,84	107%	26,95	-10%
	3,1	37,16	54,67	47%	60,48	63%	86,37	132%	37,64	1%

Tabelle D.1: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (1)

Simulation	Mp,sim		Law 86					W <sub>s,rech.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
							W <sub>s</sub>			
Sim15	0,6	26,07	10,98	-58%	9,54	-63%	12,04	-54%	7,81	-70%
	1,1	29,48	16,36	-45%	14,22	-52%	17,94	-39%	11,64	-61%
	2,1	33,47	27,12	-19%	23,57	-30%	29,75	-11%	19,29	-42%
	3,1	41,44	37,88	-9%	32,92	-21%	41,56	0%	26,94	-35%
Sim16	0,6	27,52	12,39	-55%	11,43	-58%	16,70	-39%	9,46	-66%
	1,1	28,85	18,47	-36%	17,04	-41%	24,89	-14%	14,10	-51%
	2,1	28,40	30,62	8%	28,25	-1%	41,26	45%	23,37	-18%
	3,1	34,54	42,77	24%	39,46	14%	57,63	67%	32,64	-5%
Sim17	0,6	25,32	13,74	-46%	12,53	-51%	18,35	-28%	10,98	-57%
	1,1	27,83	20,47	-26%	18,67	-33%	27,34	-2%	16,36	-41%
	2,1	27,42	33,94	24%	30,95	13%	45,32	65%	27,12	-1%
	3,1	32,67	47,40	45%	43,23	32%	63,31	94%	37,88	16%
Sim18	0,6	24,11	15,01	-38%	13,66	-43%	21,02	-13%	12,39	-49%
	1,1	26,59	22,37	-16%	20,36	-23%	31,33	18%	18,47	-31%
	2,1	26,13	37,09	42%	33,75	29%	51,94	99%	30,62	17%
	3,1	30,94	51,81	67%	47,15	52%	72,55	135%	42,77	38%
Sim19	0,6	28,62	9,46	-67%	8,65	-70%	10,93	-62%	5,96	-79%
	1,1	30,48	14,10	-54%	12,89	-58%	16,29	-47%	8,88	-71%
	2,1	30,48	23,37	-23%	21,36	-30%	27,00	-11%	14,72	-52%
	3,1	38,59	32,64	-15%	29,84	-23%	37,71	-2%	20,56	-47%
Sim20	0,6	31,65	11,70	-63%	11,94	-62%	15,40	-51%	7,81	-75%
	1,1	34,85	17,43	-50%	17,79	-49%	22,94	-34%	11,64	-67%
	2,1	35,25	28,90	-18%	29,50	-16%	38,04	8%	19,29	-45%
	3,1	38,81	40,36	4%	41,21	6%	53,13	37%	26,94	-31%
Sim21	0,6	30,53	13,07	-57%	12,81	-58%	18,09	-41%	9,46	-69%
	1,1	32,86	19,48	-41%	19,08	-42%	26,96	-18%	14,10	-57%
	2,1	32,38	32,30	0%	31,64	-2%	44,69	38%	23,37	-28%
	3,1	35,11	45,12	28%	44,19	26%	62,43	78%	32,64	-7%

Tabelle D.2: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (2)

Simulation	Mp,sim		Law 86					W <sub>s,rech.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
							W <sub>s</sub>		W <sub>s,rech.</sub>	
Sim22	0,6	28,01	14,38	-49%	13,45	-52%	19,76	-29%	10,98	-61%
	1,1	30,87	21,43	-31%	20,05	-35%	29,45	-5%	16,36	-47%
	2,1	30,86	35,53	15%	33,24	8%	48,82	58%	27,12	-12%
	3,1	34,10	49,63	46%	46,43	36%	68,20	100%	37,88	11%
Sim23	0,6	25,63	15,63	-39%	14,14	-45%	22,08	-14%	12,39	-52%
	1,1	28,48	23,30	-18%	21,08	-26%	32,91	16%	18,47	-35%
	2,1	28,10	38,62	37%	34,94	24%	54,56	94%	30,62	9%
	3,1	30,54	53,95	77%	48,81	60%	76,21	150%	42,77	40%
Sim24	0,6	33,26	10,23	-69%	10,63	-68%	12,27	-63%	5,96	-82%
	1,1	36,36	15,25	-58%	15,84	-56%	18,29	-50%	8,88	-76%
	2,1	36,87	25,28	-31%	26,26	-29%	30,32	-18%	14,72	-60%
	3,1	41,31	35,31	-15%	36,69	-11%	42,35	3%	20,56	-50%
Sim25	0,6	32,55	12,39	-62%	13,52	-58%	16,40	-50%	7,81	-76%
	1,1	35,83	18,47	-48%	20,15	-44%	24,44	-32%	11,64	-68%
	2,1	36,34	30,62	-16%	33,40	-8%	40,53	12%	19,29	-47%
	3,1	42,96	42,77	0%	46,66	9%	56,61	32%	26,94	-37%
Sim26	0,6	30,38	13,74	-55%	13,96	-54%	18,68	-39%	9,46	-69%
	1,1	32,85	20,47	-38%	20,81	-37%	27,83	-15%	14,10	-57%
	2,1	32,92	33,94	3%	34,49	5%	46,14	40%	23,37	-29%
	3,1	39,30	47,40	21%	48,18	23%	64,46	64%	32,64	-17%
Sim26_Br_unen	0,6	32,99	13,74	-58%	10,87	-67%	17,34	-47%	9,46	-71%
	1,1	37,18	20,47	-45%	16,20	-56%	25,84	-31%	14,10	-62%
	2,1	38,64	33,94	-12%	26,85	-31%	42,84	11%	23,37	-40%
	3,1	45,21	47,40	5%	37,51	-17%	59,84	32%	32,64	-28%
Sim27	0,6	28,44	15,01	-47%	14,26	-50%	20,74	-27%	10,98	-61%
	1,1	31,04	22,37	-28%	21,26	-32%	30,90	0%	16,36	-47%
	2,1	31,00	37,09	20%	35,24	14%	51,24	65%	27,12	-13%
	3,1	37,22	51,81	39%	49,23	32%	71,57	92%	37,88	2%

Tabelle D.3: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (3)

Simulation	Mp,sim		Law 86				W <sub>s,rech.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>				
								bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>
Sim28	0,6	25,69	16,24	-37%	14,76	-43%	23,07	-10%	12,39	-52%
	1,1	28,36	24,20	-15%	22,00	-22%	34,38	21%	18,47	-35%
	2,1	28,13	40,12	43%	36,47	30%	56,99	103%	30,62	9%
	3,1	33,35	56,05	68%	50,95	53%	79,61	139%	42,77	28%
Sim29	0,6	34,97	10,98	-69%	13,18	-62%	13,95	-60%	5,96	-83%
	1,1	38,80	16,36	-58%	19,63	-49%	20,79	-46%	8,88	-77%
	2,1	39,60	27,12	-32%	32,55	-18%	34,47	-13%	14,72	-63%
	3,1	45,73	37,88	-17%	45,47	-1%	48,15	5%	20,56	-55%
Sim30	0,6	25,69	10,98	-57%	5,18	-80%	9,39	-63%	5,96	-77%
	1,1	26,87	16,36	-39%	7,72	-71%	14,00	-48%	8,88	-67%
	2,1	26,11	27,12	4%	12,79	-51%	23,20	-11%	14,72	-44%
	3,1	31,67	37,88	20%	17,87	-44%	32,41	2%	20,56	-35%
Sim31	0,6	34,72	12,74	-63%	18,04	-48%	18,90	-46%	6,92	-80%
	1,1	38,49	18,98	-51%	26,88	-30%	28,16	-27%	10,31	-73%
	2,1	38,56	31,48	-18%	44,57	16%	46,69	21%	17,09	-56%
	3,1	46,02	43,97	-4%	62,25	35%	65,21	42%	23,87	-48%
Sim32	0,6	24,78	12,39	-50%	6,76	-73%	14,63	-41%	7,81	-68%
	1,1	25,79	18,47	-28%	10,08	-61%	21,80	-15%	11,64	-55%
	2,1	23,98	30,62	28%	16,71	-30%	36,14	51%	19,29	-20%
	3,1	31,31	42,77	37%	23,34	-25%	50,48	61%	26,94	-14%
Sim33	0,6	32,63	13,74	-58%	11,11	-66%	22,68	-30%	9,46	-71%
	1,1	37,27	20,47	-45%	16,56	-56%	33,80	-9%	14,10	-62%
	2,1	37,95	33,94	-11%	27,45	-28%	56,04	48%	23,37	-38%
	3,1	44,22	47,40	7%	38,35	-13%	78,28	77%	32,64	-26%
Sim34	0,6	34,02	15,01	-56%	13,72	-60%	27,05	-20%	10,98	-68%
	1,1	39,44	22,37	-43%	20,44	-48%	40,31	2%	16,36	-59%
	2,1	40,47	37,09	-8%	33,89	-16%	66,84	65%	27,12	-33%
	3,1	46,22	51,81	12%	47,34	2%	93,36	102%	37,88	-18%

Tabelle D.4: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (4)

Simulation	Mp,sim		Law 86					W <sub>s,rech.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
							W <sub>s,rech.</sub>			
Sim35	0,6	33,70	16,24	-52%	14,56	-57%	30,35	-10%	12,39	-63%
	1,1	39,49	24,20	-39%	21,70	-45%	45,22	15%	18,47	-53%
	2,1	40,85	40,12	-2%	35,98	-12%	74,97	84%	30,62	-25%
	3,1	46,62	56,05	20%	50,25	8%	104,72	125%	42,77	-8%
Sim36	0,6	29,09	10,98	-62%	7,18	-75%	11,41	-61%	5,96	-80%
	1,1	30,42	16,36	-46%	10,70	-65%	17,00	-44%	8,88	-71%
	2,1	29,36	27,12	-8%	17,74	-40%	28,18	-4%	14,72	-50%
	3,1	38,01	37,88	0%	24,78	-35%	39,36	4%	20,56	-46%
Sim37	0,6	33,22	12,39	-63%	12,51	-62%	18,54	-44%	7,81	-76%
	1,1	37,02	18,47	-50%	18,65	-50%	27,64	-25%	11,64	-69%
	2,1	36,69	30,62	-17%	30,91	-16%	45,82	25%	19,29	-47%
	3,1	44,44	42,77	-4%	43,18	-3%	64,00	44%	26,94	-39%
Sim38	0,6	35,36	15,01	-58%	16,11	-54%	23,91	-32%	9,46	-73%
	1,1	39,91	22,37	-44%	24,01	-40%	35,63	-11%	14,10	-65%
	2,1	39,84	37,09	-7%	39,80	0%	59,07	48%	23,37	-41%
	3,1	46,36	51,81	12%	55,60	20%	82,50	78%	32,64	-30%
Sim39	0,6	33,77	16,24	-52%	15,17	-55%	26,22	-22%	10,98	-67%
	1,1	38,47	24,20	-37%	22,61	-41%	39,07	2%	16,36	-57%
	2,1	39,15	40,12	2%	37,49	-4%	64,77	65%	27,12	-31%
	3,1	45,27	56,05	24%	52,36	16%	90,48	100%	37,88	-16%
Sim40	0,6	33,56	17,42	-48%	15,11	-55%	27,65	-18%	12,39	-63%
	1,1	38,54	25,96	-33%	22,51	-42%	41,20	7%	18,47	-52%
	2,1	39,62	43,04	9%	37,33	-6%	68,31	72%	30,62	-23%
	3,1	45,39	60,13	32%	52,14	15%	95,42	110%	42,77	-6%
Sim41	0,6	33,31	13,57	-59%	22,06	-34%	23,07	-31%	7,37	-78%
	1,1	36,77	20,22	-45%	32,87	-11%	34,38	-7%	10,98	-70%
	2,1	36,97	33,52	-9%	54,49	47%	56,99	54%	18,20	-51%
	3,1	45,55	46,82	3%	76,11	67%	79,61	75%	25,42	-44%

Tabelle D.5: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (5)

Simulation	Mp, sim		Law '86					W <sub>s, rech.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>			
<b>Sim42</b>	0,6	21,39	8,71	-59%	12,65	-41%	13,72	4,73	-78%
	1,1	22,98	12,98	-44%	18,86	-18%	20,44	7,05	-69%
	2,1	22,48	21,52	-4%	31,26	39%	33,89	11,68	-48%
	3,1	28,50	30,06	5%	43,67	53%	47,34	16,32	-43%
<b>Sim43</b>	0,6	39,12	13,83	-65%	7,27	-81%	10,27	7,51	-81%
	1,1	42,10	20,60	-51%	10,83	-74%	15,31	11,19	-73%
	2,1	43,55	34,16	-22%	17,96	-59%	25,39	18,54	-57%
	3,1	47,92	47,72	0%	25,09	-48%	35,46	25,90	-46%
<b>Sim44</b>	0,6	18,47	10,90	-41%	11,91	-35%	19,09	7,51	-59%
	1,1	20,16	16,25	-19%	17,76	-12%	28,44	11,19	-45%
	2,1	19,80	26,93	36%	29,44	49%	47,15	18,55	-6%
	3,1	24,91	37,62	51%	41,12	65%	65,86	25,91	4%
<b>Sim45</b>	0,6	40,57	15,72	-61%	15,23	-62%	19,62	10,83	-73%
	1,1	44,73	23,43	-48%	22,69	-49%	29,24	16,13	-64%
	2,1	45,86	38,84	-15%	37,62	-18%	48,47	26,75	-42%
	3,1	52,87	54,25	3%	52,54	-1%	67,71	37,36	-29%
<b>Sim46</b>	0,6	22,74	11,92	-48%	12,38	-46%	23,25	7,51	-67%
	1,1	26,00	17,76	-32%	18,44	-29%	34,64	11,19	-57%
	2,1	26,10	29,44	13%	30,58	17%	57,44	18,55	-29%
	3,1	31,42	41,13	31%	42,71	36%	80,23	25,91	-18%
<b>Sim47</b>	0,6	44,22	17,18	-61%	16,58	-62%	24,20	10,83	-76%
	1,1	49,76	25,61	-49%	24,71	-50%	36,06	16,13	-68%
	2,1	50,71	42,46	-16%	40,97	-19%	59,78	26,75	-47%
	3,1	59,06	59,30	0%	57,23	-3%	83,50	37,36	-37%

Tabelle D.6: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (6)

Simulation	M <sub>p,sim</sub>		Thomas '87				W <sub>s,rech.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb		W <sub>quer</sub>			W <sub>s</sub>		
Sim7	0,6	24,34	35,34	45%	34,62	42%	43,54	79%	25,63	5%
	1,1	27,48	41,54	51%	40,60	48%	52,36	91%	30,04	9%
	2,1	30,81	53,95	75%	52,55	71%	69,99	127%	38,87	26%
	3,1	39,66	66,36	67%	64,50	63%	87,62	121%	47,70	20%
Sim8	0,6	27,78	43,31	56%	48,93	76%	58,29	110%	27,95	1%
	1,1	29,79	50,32	69%	57,51	93%	69,48	133%	32,37	9%
	2,1	33,03	64,33	95%	74,66	126%	91,86	178%	41,19	25%
	3,1	41,11	78,34	91%	91,81	123%	114,23	178%	50,02	22%
Sim9	0,6	25,83	40,54	57%	42,21	63%	57,05	121%	28,90	12%
	1,1	28,44	47,55	67%	49,72	75%	68,97	143%	34,24	20%
	2,1	27,76	61,56	122%	64,73	133%	92,82	234%	44,94	62%
	3,1	34,65	75,57	118%	79,74	130%	116,66	237%	55,63	61%
Sim10	0,6	28,63	46,74	63%	50,55	77%	68,31	139%	30,38	6%
	1,1	31,80	54,50	71%	59,36	87%	82,00	158%	35,72	12%
	2,1	31,61	70,03	122%	76,99	144%	109,39	246%	46,42	47%
	3,1	38,88	85,57	120%	94,62	143%	136,78	252%	57,11	47%
Sim11	0,6	26,13	36,48	40%	39,16	50%	48,31	85%	25,84	-1%
	1,1	28,74	42,68	48%	46,19	61%	58,17	102%	30,25	5%
	2,1	29,43	55,09	87%	60,26	105%	77,88	165%	39,08	33%
	3,1	35,91	67,50	88%	74,32	107%	97,60	172%	47,91	33%
Sim12	0,6	23,55	38,43	63%	39,21	66%	52,62	123%	27,62	17%
	1,1	26,24	45,44	73%	46,46	77%	64,08	144%	32,96	26%
	2,1	26,86	59,45	121%	60,97	127%	86,99	224%	43,66	63%
	3,1	32,29	73,47	127%	75,47	134%	109,91	240%	54,35	68%
Sim13	0,6	29,14	43,29	49%	50,36	73%	57,94	99%	27,95	-4%
	1,1	31,91	50,30	58%	59,35	86%	69,04	116%	32,36	1%
	2,1	33,05	64,31	95%	77,31	134%	91,23	176%	41,19	25%
	3,1	39,69	78,33	97%	95,27	140%	113,43	186%	50,02	26%
Sim14	0,6	26,07	43,93	69%	46,76	79%	59,35	128%	29,27	12%
	1,1	28,95	51,70	79%	55,35	91%	71,62	147%	34,62	20%
	2,1	29,92	67,23	125%	72,54	142%	96,16	221%	45,31	51%
	3,1	37,16	82,76	123%	89,72	141%	120,70	225%	56,00	51%

Tabelle D.7: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (7)

Simulation	Mp,sim				Thomas 87				W <sub>s,rech.</sub>	
	z	aus Sim			bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>		
		z	aus Sim	bo+bb						
Sim15	0,6	26,07	35,17	35%	32,56	25%	37,11	42%	26,41	1%
	1,1	29,48	40,55	38%	37,24	26%	43,02	46%	30,23	3%
	2,1	33,47	51,31	53%	46,59	39%	54,82	64%	37,89	13%
	3,1	41,44	62,07	50%	55,94	35%	66,63	61%	45,54	10%
Sim16	0,6	27,52	41,50	51%	39,58	44%	50,08	82%	30,53	11%
	1,1	28,85	47,57	65%	45,19	57%	58,26	102%	35,17	22%
	2,1	28,40	59,72	110%	56,40	99%	74,63	163%	44,44	56%
	3,1	34,54	71,88	108%	67,61	96%	91,01	164%	53,71	56%
Sim17	0,6	25,32	42,97	70%	40,63	60%	51,92	105%	32,31	28%
	1,1	27,83	49,70	79%	46,77	68%	60,91	119%	37,69	35%
	2,1	27,42	63,17	130%	59,05	115%	78,90	188%	48,45	77%
	3,1	32,67	76,64	135%	71,33	118%	96,88	197%	59,21	81%
Sim18	0,6	24,11	45,98	91%	43,32	80%	57,76	140%	34,61	44%
	1,1	26,59	53,34	101%	50,02	88%	68,07	156%	40,68	53%
	2,1	26,13	68,06	160%	63,41	143%	88,68	239%	52,83	102%
	3,1	30,94	82,78	168%	76,81	148%	109,29	253%	64,98	110%
Sim19	0,6	28,62	34,95	22%	33,37	17%	37,83	32%	24,88	-13%
	1,1	30,48	39,59	30%	37,60	23%	43,18	42%	27,80	-9%
	2,1	30,48	48,86	60%	46,08	51%	53,90	77%	33,65	10%
	3,1	38,59	58,14	51%	54,56	41%	64,61	67%	39,49	2%
Sim20	0,6	31,65	42,36	34%	42,88	35%	50,13	58%	29,01	-8%
	1,1	34,85	48,10	38%	48,73	40%	57,68	66%	32,84	-6%
	2,1	35,25	59,56	69%	60,44	71%	72,77	106%	40,50	15%
	3,1	38,81	71,03	83%	72,15	86%	87,87	126%	48,15	24%
Sim21	0,6	30,53	45,04	48%	44,48	46%	55,52	82%	31,44	3%
	1,1	32,86	51,45	57%	50,76	54%	64,39	96%	36,08	10%
	2,1	32,38	64,26	98%	63,31	96%	82,12	154%	45,35	40%
	3,1	35,11	77,08	120%	75,86	116%	99,86	184%	54,63	56%

Tabelle D.8: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (8)

Simulation	Mp,sim		Thomas 87				W <sub>s,rech.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>				
								W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>	
Sim22	0,6	28,01	46,31	65%	44,42	59%	57,22	104%	33,13	18%
	1,1	30,87	53,36	73%	51,02	65%	66,91	117%	38,51	25%
	2,1	30,86	67,46	119%	64,21	108%	86,28	180%	49,27	60%
	3,1	34,10	81,56	139%	77,39	127%	105,65	210%	60,03	76%
Sim23	0,6	25,63	48,61	90%	45,61	78%	61,64	141%	35,13	37%
	1,1	28,48	56,28	98%	52,54	84%	72,46	154%	41,21	45%
	2,1	28,10	71,61	155%	66,41	136%	94,11	235%	53,36	90%
	3,1	30,54	86,93	185%	80,27	163%	115,76	279%	65,51	114%
Sim24	0,6	33,26	39,18	18%	40,01	20%	43,45	31%	26,18	-21%
	1,1	36,36	44,19	22%	45,22	24%	49,47	36%	29,10	-20%
	2,1	36,87	54,22	47%	55,65	51%	61,50	67%	34,94	-5%
	3,1	41,31	64,25	56%	66,07	60%	73,53	78%	40,78	-1%
Sim25	0,6	32,55	45,61	40%	48,06	48%	54,35	67%	29,78	-9%
	1,1	35,83	51,69	44%	54,69	53%	62,40	74%	33,61	-6%
	2,1	36,34	63,84	76%	67,95	87%	78,48	116%	41,26	14%
	3,1	42,96	75,99	77%	81,20	89%	94,56	120%	48,92	14%
Sim26	0,6	30,38	47,36	56%	47,85	57%	57,89	91%	31,83	5%
	1,1	32,85	54,10	65%	54,69	66%	67,05	104%	36,46	11%
	2,1	32,92	67,56	105%	68,38	108%	85,36	159%	45,74	39%
	3,1	39,30	81,03	106%	82,07	109%	103,67	164%	55,01	40%
Sim26_Br_unen	0,6	32,99	48,53	47%	42,27	28%	56,39	71%	33,12	0%
	1,1	37,18	55,26	49%	47,60	28%	64,89	75%	37,75	2%
	2,1	38,64	68,73	78%	58,26	51%	81,89	112%	47,03	22%
	3,1	45,21	82,19	82%	68,91	52%	98,89	119%	56,30	25%
Sim27	0,6	28,44	49,05	72%	47,48	67%	61,00	114%	33,70	18%
	1,1	31,04	56,41	82%	54,48	75%	71,17	129%	39,08	26%
	2,1	31,00	71,13	129%	68,46	121%	91,50	195%	49,84	61%
	3,1	37,22	85,85	131%	82,45	122%	111,83	200%	60,60	63%

Tabelle D.9: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (9)

Simulation	Mp,sim		Thomas 87				W <sub>s,rech.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>					
Sim28	0,6	25,69	51,20	99%	48,14	87%	65,35	154%	35,63	39%
	1,1	28,36	59,16	109%	55,37	95%	76,65	170%	41,71	47%
	2,1	28,13	75,08	167%	69,85	148%	99,27	253%	53,86	91%
	3,1	33,35	91,01	173%	84,32	153%	121,88	265%	66,01	98%
Sim29	0,6	34,97	44,15	26%	49,13	40%	50,88	45%	27,75	-21%
	1,1	38,80	49,53	28%	55,59	43%	57,72	49%	30,67	-21%
	2,1	39,60	60,29	52%	68,50	73%	71,40	80%	36,52	-8%
	3,1	45,73	71,05	55%	81,42	78%	85,07	86%	42,36	-7%
Sim30	0,6	25,69	34,59	35%	24,20	-6%	31,75	24%	27,37	7%
	1,1	26,87	39,97	49%	26,74	0%	36,35	35%	30,29	13%
	2,1	26,11	50,73	94%	31,81	22%	45,56	74%	36,13	38%
	3,1	31,67	61,49	94%	36,89	16%	54,77	73%	41,97	33%
Sim31	0,6	34,72	44,88	29%	55,11	59%	56,77	64%	28,11	-19%
	1,1	38,49	51,13	33%	63,96	66%	66,04	72%	31,50	-18%
	2,1	38,56	63,62	65%	81,64	112%	84,56	119%	38,28	-1%
	3,1	46,02	76,11	65%	99,33	116%	103,09	124%	45,06	-2%
Sim32	0,6	24,78	41,27	67%	30,11	22%	45,69	84%	32,65	32%
	1,1	25,79	47,35	84%	33,42	30%	52,86	105%	36,48	41%
	2,1	23,98	59,50	148%	40,06	67%	67,20	180%	44,14	84%
	3,1	31,31	71,65	129%	46,69	49%	81,54	160%	51,79	65%
Sim33	0,6	32,63	51,24	57%	45,21	39%	71,81	120%	38,67	19%
	1,1	37,27	57,97	56%	50,66	36%	82,93	123%	43,30	16%
	2,1	37,95	71,44	88%	61,55	62%	105,17	177%	52,58	39%
	3,1	44,22	84,91	92%	72,44	64%	127,41	188%	61,85	40%
Sim34	0,6	34,02	54,98	62%	51,96	53%	83,04	144%	41,74	23%
	1,1	39,44	62,34	58%	58,68	49%	96,30	144%	47,12	19%
	2,1	40,47	77,06	90%	72,13	78%	122,83	204%	57,88	43%
	3,1	46,22	91,78	99%	85,58	85%	149,35	223%	68,65	49%

Tabelle D.10: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (10)

Simulation	Mp,sim		Thomas 87					W <sub>s,rech.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
							W <sub>s</sub>			
Sim35	0,6	33,70	57,83	72%	53,92	60%	90,71	169%	44,43	32%
	1,1	39,49	65,80	67%	61,06	55%	105,59	167%	50,50	28%
	2,1	40,85	81,72	100%	75,33	84%	135,34	231%	62,65	53%
	3,1	46,62	97,64	109%	89,61	92%	165,09	254%	74,80	60%
Sim36	0,6	29,09	39,00	34%	31,37	8%	39,86	37%	26,79	-8%
	1,1	30,42	44,38	46%	34,89	15%	45,45	49%	29,71	-2%
	2,1	29,36	55,14	88%	41,93	43%	56,64	93%	35,55	21%
	3,1	38,01	65,90	73%	48,97	29%	67,82	78%	41,39	9%
Sim37	0,6	33,22	47,92	44%	48,19	45%	61,99	87%	32,19	-3%
	1,1	37,02	54,00	46%	54,32	47%	71,08	92%	36,02	-3%
	2,1	36,69	66,15	80%	66,59	82%	89,26	143%	43,68	19%
	3,1	44,44	78,30	76%	78,86	77%	107,44	142%	51,33	16%
Sim38	0,6	35,36	57,29	62%	59,95	70%	78,87	123%	36,20	2%
	1,1	39,91	64,65	62%	67,85	70%	90,59	127%	40,84	2%
	2,1	39,84	79,37	99%	83,64	110%	114,03	186%	50,11	26%
	3,1	46,36	94,09	103%	99,44	115%	137,46	197%	59,39	28%
Sim39	0,6	33,77	59,40	76%	56,85	68%	83,27	147%	38,46	14%
	1,1	38,47	67,37	75%	64,29	67%	96,13	150%	43,84	14%
	2,1	39,15	83,29	113%	79,16	102%	121,83	211%	54,60	39%
	3,1	45,27	99,21	119%	94,04	108%	147,53	226%	65,37	44%
Sim40	0,6	33,56	60,10	79%	54,74	63%	83,75	150%	39,98	19%
	1,1	38,54	68,64	78%	62,15	61%	97,30	152%	46,06	20%
	2,1	39,62	85,72	116%	76,96	94%	124,41	214%	58,21	47%
	3,1	45,39	102,80	126%	91,77	102%	151,52	234%	70,36	55%
Sim41	0,6	33,31	45,53	37%	60,88	83%	62,71	88%	28,39	-15%
	1,1	36,77	52,18	42%	71,69	95%	74,02	101%	32,00	-13%
	2,1	36,97	65,48	77%	93,32	152%	96,64	161%	39,23	6%
	3,1	45,55	78,78	73%	114,94	152%	119,26	162%	46,45	2%

Tabelle D.11: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (11)

Simulation	Mp,sim		Thomas'87					W <sub>s,rechn.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
<b>Sim42</b>	0,6	21,39	28,37	33%	35,92	68%	37,96	77%	17,09	-20%
	1,1	22,98	32,65	42%	42,13	83%	44,69	94%	19,41	-16%
	2,1	22,48	41,19	83%	54,53	143%	58,14	159%	24,05	7%
	3,1	28,50	49,73	74%	66,94	135%	71,58	151%	28,68	1%
<b>Sim43</b>	0,6	39,12	58,91	51%	43,92	12%	50,79	30%	41,55	6%
	1,1	42,10	65,68	56%	47,48	13%	55,82	33%	45,23	7%
	2,1	43,55	79,24	82%	54,61	25%	65,90	51%	52,59	21%
	3,1	47,92	92,79	94%	61,74	29%	75,97	59%	59,95	25%
<b>Sim44</b>	0,6	18,47	30,86	67%	32,71	77%	45,77	148%	19,65	6%
	1,1	20,16	36,21	80%	38,55	91%	55,13	173%	23,33	16%
	2,1	19,80	46,90	137%	50,23	154%	73,84	273%	30,69	55%
	3,1	24,91	57,58	131%	61,91	149%	92,55	272%	38,05	53%
<b>Sim45</b>	0,6	40,57	62,48	54%	61,29	51%	71,82	77%	42,98	6%
	1,1	44,73	70,19	57%	68,76	54%	81,44	82%	48,29	8%
	2,1	45,86	85,60	87%	83,68	82%	100,67	120%	58,90	28%
	3,1	52,87	101,01	91%	98,61	87%	119,91	127%	69,52	31%
<b>Sim46</b>	0,6	22,74	36,94	62%	37,87	67%	60,05	164%	22,26	-2%
	1,1	26,00	42,78	65%	43,94	69%	71,45	175%	25,94	0%
	2,1	26,10	54,46	109%	56,08	115%	94,24	261%	33,30	28%
	3,1	31,42	66,14	111%	68,21	117%	117,03	272%	40,66	29%
<b>Sim47</b>	0,6	44,22	74,62	69%	72,99	65%	93,57	112%	48,74	10%
	1,1	49,76	83,04	67%	81,12	63%	105,44	112%	54,05	9%
	2,1	50,71	99,89	97%	97,38	92%	129,16	155%	64,66	28%
	3,1	59,06	116,73	98%	113,64	92%	152,88	159%	75,27	27%

Tabelle D.12: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (12)

Simulation	M <sub>p,sim</sub>		Law '95				W <sub>s,rechn.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb		W <sub>quer</sub>			W <sub>s</sub>		
Sim7	0,6	24,34	14,71	-40%	14,17	-42%	20,90	-14%	10,46	-57%
	1,1	27,48	20,37	-26%	19,62	-29%	28,94	5%	14,49	-47%
	2,1	30,81	31,68	3%	30,51	-1%	45,02	46%	22,54	-27%
	3,1	39,66	43,00	8%	41,41	4%	61,09	54%	30,59	-23%
Sim8	0,6	27,78	16,61	-40%	20,33	-27%	26,52	-5%	10,46	-62%
	1,1	29,79	23,00	-23%	28,15	-6%	36,72	23%	14,49	-51%
	2,1	33,03	35,78	8%	43,79	33%	57,12	73%	22,54	-32%
	3,1	41,11	48,55	18%	59,43	45%	77,52	89%	30,59	-26%
Sim9	0,6	25,83	16,61	-36%	17,79	-31%	28,26	9%	12,68	-51%
	1,1	28,44	23,00	-19%	24,64	-13%	39,14	38%	17,55	-38%
	2,1	27,76	35,78	29%	38,32	38%	60,88	119%	27,30	-2%
	3,1	34,65	48,55	40%	52,01	50%	82,62	138%	37,05	7%
Sim10	0,6	28,63	18,41	-36%	20,89	-27%	32,46	13%	12,68	-56%
	1,1	31,80	25,49	-20%	28,93	-9%	44,95	41%	17,55	-45%
	2,1	31,61	39,65	25%	45,00	42%	69,92	121%	27,30	-14%
	3,1	38,88	53,81	38%	61,07	57%	94,89	144%	37,05	-5%
Sim11	0,6	26,13	14,71	-44%	16,67	-36%	23,37	-11%	10,46	-60%
	1,1	28,74	20,37	-29%	23,08	-20%	32,36	13%	14,49	-50%
	2,1	29,43	31,68	8%	35,91	22%	50,33	71%	22,54	-23%
	3,1	35,91	43,00	20%	48,73	36%	68,31	90%	30,59	-15%
Sim12	0,6	23,55	16,61	-29%	17,19	-27%	27,16	15%	12,68	-46%
	1,1	26,24	23,00	-12%	23,80	-9%	37,61	43%	17,55	-33%
	2,1	26,86	35,78	33%	37,02	38%	58,50	118%	27,30	2%
	3,1	32,29	48,55	50%	50,25	56%	79,39	146%	37,05	15%
Sim13	0,6	29,14	16,61	-43%	21,29	-27%	26,31	-10%	10,46	-64%
	1,1	31,91	23,00	-28%	29,48	-8%	36,42	14%	14,49	-55%
	2,1	33,05	35,78	8%	45,86	39%	56,66	71%	22,54	-32%
	3,1	39,69	48,55	22%	62,23	57%	76,89	94%	30,59	-23%
Sim14	0,6	26,07	18,41	-29%	20,37	-22%	29,08	12%	12,68	-51%
	1,1	28,95	25,49	-12%	28,20	-3%	40,27	39%	17,55	-39%
	2,1	29,92	39,65	33%	43,87	47%	62,64	109%	27,30	-9%
	3,1	37,16	53,81	45%	59,53	60%	85,02	129%	37,05	0%

Tabelle D.13: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (13)

Simulation	Mp,sim		Law 95					W <sub>s,rech.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
							W <sub>s,rech.</sub>			
Sim15	0,6	26,07	12,75	-51%	11,09	-57%	13,99	-46%	9,07	-65%
	1,1	29,48	17,66	-40%	15,35	-48%	19,37	-34%	12,56	-57%
	2,1	33,47	27,47	-18%	23,88	-29%	30,14	-10%	19,54	-42%
	3,1	41,44	37,28	-10%	32,40	-22%	40,90	-1%	26,52	-36%
Sim16	0,6	27,52	14,40	-48%	13,29	-52%	19,41	-29%	10,99	-60%
	1,1	28,85	19,94	-31%	18,40	-36%	26,87	-7%	15,22	-47%
	2,1	28,40	31,02	9%	28,62	1%	41,80	47%	23,67	-17%
	3,1	34,54	42,10	22%	38,84	12%	56,72	64%	32,13	-7%
Sim17	0,6	25,32	15,96	-37%	14,56	-42%	21,32	-16%	12,75	-50%
	1,1	27,83	22,10	-21%	20,16	-28%	29,52	6%	17,66	-37%
	2,1	27,42	34,38	25%	31,36	14%	45,92	67%	27,47	0%
	3,1	32,67	46,66	43%	42,55	30%	62,31	91%	37,28	14%
Sim18	0,6	24,11	17,45	-28%	15,88	-34%	24,43	1%	14,40	-40%
	1,1	26,59	24,16	-9%	21,98	-17%	33,83	27%	19,94	-25%
	2,1	26,13	37,58	44%	34,19	31%	52,62	101%	31,02	19%
	3,1	30,94	51,00	65%	46,41	50%	71,41	131%	42,10	36%
Sim19	0,6	28,62	10,99	-62%	10,05	-65%	12,70	-56%	6,92	-76%
	1,1	30,48	15,22	-50%	13,91	-54%	17,58	-42%	9,59	-69%
	2,1	30,48	23,67	-22%	21,64	-29%	27,35	-10%	14,91	-51%
	3,1	38,59	32,13	-17%	29,37	-24%	37,12	-4%	20,24	-48%
Sim20	0,6	31,65	13,59	-57%	13,88	-56%	17,89	-43%	9,07	-71%
	1,1	34,85	18,82	-46%	19,21	-45%	24,77	-29%	12,56	-64%
	2,1	35,25	29,27	-17%	29,89	-15%	38,53	9%	19,54	-45%
	3,1	38,81	39,73	2%	40,56	5%	52,29	35%	26,52	-32%
Sim21	0,6	30,53	15,19	-50%	14,88	-51%	21,02	-31%	10,99	-64%
	1,1	32,86	21,04	-36%	20,60	-37%	29,11	-11%	15,22	-54%
	2,1	32,38	32,72	1%	32,05	-1%	45,28	40%	23,67	-27%
	3,1	35,11	44,41	26%	43,50	24%	61,45	75%	32,13	-8%

Tabelle D.14: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (14)

Simulation	Mp,sim		Law 95					W <sub>s,rech.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>				
							W <sub>s</sub>		W <sub>s,rech.</sub>	
Sim22	0,6	28,01	16,71	-40%	15,63	-44%	22,96	-18%	12,75	-54%
	1,1	30,87	23,14	-25%	21,65	-30%	31,80	3%	17,66	-43%
	2,1	30,86	36,00	17%	33,67	9%	49,46	60%	27,47	-11%
	3,1	34,10	48,85	43%	45,70	34%	67,12	97%	37,28	9%
Sim23	0,6	25,63	18,17	-29%	16,44	-36%	25,66	0%	14,40	-44%
	1,1	28,48	25,15	-12%	22,76	-20%	35,53	25%	19,94	-30%
	2,1	28,10	39,13	39%	35,40	26%	55,27	97%	31,02	10%
	3,1	30,54	53,10	74%	48,04	57%	75,01	146%	42,10	38%
Sim24	0,6	33,26	11,89	-64%	12,35	-63%	14,26	-57%	6,92	-79%
	1,1	36,36	16,46	-55%	17,11	-53%	19,75	-46%	9,59	-74%
	2,1	36,87	25,61	-31%	26,61	-28%	30,72	-17%	14,91	-60%
	3,1	41,31	34,75	-16%	36,11	-13%	41,69	1%	20,24	-51%
Sim25	0,6	32,55	14,40	-56%	15,71	-52%	19,06	-41%	9,07	-72%
	1,1	35,83	19,94	-44%	21,75	-39%	26,39	-26%	12,56	-65%
	2,1	36,34	31,02	-15%	33,84	-7%	41,05	13%	19,54	-46%
	3,1	42,96	42,10	-2%	45,92	7%	55,72	30%	26,52	-38%
Sim26	0,6	30,38	15,96	-47%	16,22	-47%	21,70	-29%	10,99	-64%
	1,1	32,85	22,10	-33%	22,46	-32%	30,05	-9%	15,22	-54%
	2,1	32,92	34,38	4%	34,95	6%	46,75	42%	23,67	-28%
	3,1	39,30	46,66	19%	47,43	21%	63,44	61%	32,13	-18%
Sim26_Br_unen	0,6	32,99	15,96	-52%	12,63	-62%	20,15	-39%	10,99	-67%
	1,1	37,18	22,10	-41%	17,49	-53%	27,90	-25%	15,22	-59%
	2,1	38,64	34,38	-11%	27,20	-30%	43,40	12%	23,67	-39%
	3,1	45,21	46,66	3%	36,92	-18%	58,90	30%	32,13	-29%
Sim27	0,6	28,44	17,45	-39%	16,58	-42%	24,10	-15%	12,75	-55%
	1,1	31,04	24,16	-22%	22,95	-26%	33,37	7%	17,66	-43%
	2,1	31,00	37,58	21%	35,70	15%	51,91	67%	27,47	-11%
	3,1	37,22	51,00	37%	48,45	30%	70,44	89%	37,28	0%

Tabelle D.15: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (15)

Simulation	Mp,sim		Law 95					W <sub>s,rech.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
							W <sub>s</sub>		W <sub>s,rech.</sub>	
Sim28	0,6	25,69	18,87	-27%	17,16	-33%	26,81	4%	14,40	-44%
	1,1	28,36	26,13	-8%	23,75	-16%	37,12	31%	19,94	-30%
	2,1	28,13	40,65	45%	36,95	31%	57,74	105%	31,02	10%
	3,1	33,35	55,17	65%	50,15	50%	78,35	135%	42,10	26%
Sim29	0,6	34,97	12,75	-64%	15,31	-56%	16,21	-54%	6,92	-80%
	1,1	38,80	17,66	-54%	21,20	-45%	22,45	-42%	9,59	-75%
	2,1	39,60	27,47	-31%	32,98	-17%	34,92	-12%	14,91	-62%
	3,1	45,73	37,28	-18%	44,76	-2%	47,39	4%	20,24	-56%
Sim30	0,6	25,69	12,75	-50%	6,02	-77%	10,91	-58%	6,92	-73%
	1,1	26,87	17,66	-34%	8,33	-69%	15,11	-44%	9,59	-64%
	2,1	26,11	27,47	5%	12,96	-50%	23,51	-10%	14,91	-43%
	3,1	31,67	37,28	18%	17,59	-44%	31,90	1%	20,24	-36%
Sim31	0,6	34,72	14,80	-57%	20,96	-40%	21,96	-37%	8,04	-77%
	1,1	38,49	20,50	-47%	29,02	-25%	30,41	-21%	11,13	-71%
	2,1	38,56	31,89	-17%	45,15	17%	47,30	23%	17,31	-55%
	3,1	46,02	43,27	-6%	61,27	33%	64,19	39%	23,49	-49%
Sim32	0,6	24,78	14,40	-42%	7,86	-68%	17,00	-31%	9,07	-63%
	1,1	25,79	19,94	-23%	10,88	-58%	23,53	-9%	12,56	-51%
	2,1	23,98	31,02	29%	16,93	-29%	36,61	53%	19,54	-18%
	3,1	31,31	42,10	34%	22,97	-27%	49,68	59%	26,52	-15%
Sim33	0,6	32,63	15,96	-51%	12,91	-60%	26,36	-19%	10,99	-66%
	1,1	37,27	22,10	-41%	17,88	-52%	36,50	-2%	15,22	-59%
	2,1	37,95	34,38	-9%	27,81	-27%	56,78	50%	23,67	-38%
	3,1	44,22	46,66	6%	37,74	-15%	77,05	74%	32,13	-27%
Sim34	0,6	34,02	17,45	-49%	15,94	-53%	31,44	-8%	12,75	-63%
	1,1	39,44	24,16	-39%	22,07	-44%	43,53	10%	17,66	-55%
	2,1	40,47	37,58	-7%	34,34	-15%	67,71	67%	27,47	-32%
	3,1	46,22	51,00	10%	46,60	1%	91,89	99%	37,28	-19%

Tabelle D.16: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (16)

Simulation	Mp,sim				Law 95				W <sub>s,rech.</sub>	
	z	aus Sim			W <sub>quer</sub>	bo+bb	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>		
Sim35										
	0,6	33,70	18,87	-44%	16,92	-50%	35,26	5%	14,40	-57%
	1,1	39,49	26,13	-34%	23,43	-41%	48,83	24%	19,94	-50%
	2,1	40,85	40,65	0%	36,45	-11%	75,95	86%	31,02	-24%
	3,1	46,62	55,17	18%	49,46	6%	103,08	121%	42,10	-10%
Sim36										
	0,6	29,09	12,75	-56%	8,34	-71%	13,25	-54%	6,92	-76%
	1,1	30,42	17,66	-42%	11,55	-62%	18,35	-40%	9,59	-68%
	2,1	29,36	27,47	-6%	17,97	-39%	28,55	-3%	14,91	-49%
	3,1	38,01	37,28	-2%	24,39	-36%	38,74	2%	20,24	-47%
Sim37										
	0,6	33,22	14,40	-57%	14,54	-56%	21,55	-35%	9,07	-73%
	1,1	37,02	19,94	-46%	20,13	-46%	29,84	-19%	12,56	-66%
	2,1	36,69	31,02	-15%	31,32	-15%	46,41	27%	19,54	-47%
	3,1	44,44	42,10	-5%	42,50	-4%	62,99	42%	26,52	-40%
Sim38										
	0,6	35,36	17,45	-51%	18,72	-47%	27,78	-21%	10,99	-69%
	1,1	39,91	24,16	-39%	25,92	-35%	38,47	-4%	15,22	-62%
	2,1	39,84	37,58	-6%	40,32	1%	59,84	50%	23,67	-41%
	3,1	46,36	51,00	10%	54,72	18%	81,21	75%	32,13	-31%
Sim39										
	0,6	33,77	18,87	-44%	17,63	-48%	30,47	-10%	12,75	-62%
	1,1	38,47	26,13	-32%	24,41	-37%	42,19	10%	17,66	-54%
	2,1	39,15	40,65	4%	37,98	-3%	65,62	68%	27,47	-30%
	3,1	45,27	55,17	22%	51,54	14%	89,06	97%	37,28	-18%
Sim40										
	0,6	33,56	20,25	-40%	17,56	-48%	32,13	-4%	14,40	-57%
	1,1	38,54	28,03	-27%	24,31	-37%	44,49	15%	19,94	-48%
	2,1	39,62	43,61	10%	37,81	-5%	69,20	75%	31,02	-22%
	3,1	45,39	59,18	30%	51,32	13%	93,92	107%	42,10	-7%
Sim41										
	0,6	33,31	15,77	-53%	25,63	-23%	26,81	-20%	8,56	-74%
	1,1	36,77	21,83	-41%	35,49	-3%	37,12	1%	11,85	-68%
	2,1	36,97	33,96	-8%	55,20	49%	57,74	56%	18,43	-50%
	3,1	45,55	46,09	1%	74,92	64%	78,36	72%	25,02	-45%

Tabelle D.17: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (17)

Simulation	Mp, sim		Law '95					W <sub>s, rech.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
<b>Sim42</b>	0,6	21,39	10,12	-53%	14,70	-31%	15,94	-25%	5,50	-74%
	1,1	22,98	14,02	-39%	20,36	-11%	22,07	-4%	7,61	-67%
	2,1	22,48	21,80	-3%	31,67	41%	34,33	53%	11,84	-47%
	3,1	28,50	29,59	4%	42,98	51%	46,60	63%	16,06	-44%
<b>Sim43</b>	0,6	39,12	16,07	-59%	8,45	-78%	11,94	-69%	8,72	-78%
	1,1	42,10	22,25	-47%	11,70	-72%	16,53	-61%	12,08	-71%
	2,1	43,55	34,61	-21%	18,19	-58%	25,72	-41%	18,79	-57%
	3,1	47,92	46,97	-2%	24,69	-48%	34,90	-27%	25,50	-47%
<b>Sim44</b>	0,6	18,47	12,67	-31%	13,85	-25%	22,18	20%	8,72	-53%
	1,1	20,16	17,54	-13%	19,17	-5%	30,71	52%	12,08	-40%
	2,1	19,80	27,29	38%	29,82	51%	47,77	141%	18,79	-5%
	3,1	24,91	37,03	49%	40,47	62%	64,83	160%	25,50	2%
<b>Sim45</b>	0,6	40,57	18,27	-55%	17,69	-56%	22,80	-44%	12,58	-69%
	1,1	44,73	25,29	-43%	24,50	-45%	31,57	-29%	17,42	-61%
	2,1	45,86	39,35	-14%	38,11	-17%	49,11	7%	27,09	-41%
	3,1	52,87	53,40	1%	51,72	-2%	66,65	26%	36,77	-30%
<b>Sim46</b>	0,6	22,74	13,85	-39%	14,38	-37%	27,01	19%	8,72	-62%
	1,1	26,00	19,17	-26%	19,91	-23%	37,41	44%	12,08	-54%
	2,1	26,10	29,83	14%	30,98	19%	58,19	123%	18,79	-28%
	3,1	31,42	40,48	29%	42,04	34%	78,97	151%	25,50	-19%
<b>Sim47</b>	0,6	44,22	19,97	-55%	19,27	-56%	28,12	-36%	12,58	-72%
	1,1	49,76	27,65	-44%	26,68	-46%	38,93	-22%	17,42	-65%
	2,1	50,71	43,01	-15%	41,51	-18%	60,56	19%	27,09	-47%
	3,1	59,06	58,37	-1%	56,33	-5%	82,19	39%	36,77	-38%

Tabelle D.18: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (18)

Simulation	M <sub>p,sim</sub>		BSI nach Law'95						W <sub>s,rech.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb		W <sub>quer</sub>		W <sub>s,sim</sub>		W <sub>s,rech.</sub>	
			bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s,sim</sub>	W <sub>s,rech.</sub>	W <sub>s,sim</sub>	W <sub>s,rech.</sub>		
Sim7	0,6	24,34	17,08	-30%	16,45	-32%	24,27	0%	12,15	-50%
	1,1	27,48	23,65	-14%	22,78	-17%	33,61	22%	16,83	-39%
	2,1	30,81	36,79	19%	35,43	15%	52,28	70%	26,17	-15%
	3,1	39,66	49,93	26%	48,09	21%	70,95	79%	35,52	-10%
Sim8	0,6	27,78	19,29	-31%	23,61	-15%	30,80	11%	12,15	-56%
	1,1	29,79	26,71	-10%	32,69	10%	42,64	43%	16,83	-44%
	2,1	33,03	41,55	26%	50,85	54%	66,34	101%	26,17	-21%
	3,1	41,11	56,38	37%	69,01	68%	90,03	119%	35,52	-14%
Sim9	0,6	25,83	19,29	-25%	20,66	-20%	32,82	27%	14,72	-43%
	1,1	28,44	26,71	-6%	28,61	1%	45,45	60%	20,38	-28%
	2,1	27,76	41,55	50%	44,50	60%	70,70	155%	31,71	14%
	3,1	34,65	56,38	63%	60,40	74%	95,94	177%	43,03	24%
Sim10	0,6	28,63	21,38	-25%	24,26	-15%	37,70	32%	14,72	-49%
	1,1	31,80	29,60	-7%	33,59	6%	52,20	64%	20,38	-36%
	2,1	31,61	46,04	46%	52,26	65%	81,20	157%	31,71	0%
	3,1	38,88	62,49	61%	70,92	82%	110,19	183%	43,03	11%
Sim11	0,6	26,13	17,08	-35%	19,36	-26%	27,14	4%	12,15	-53%
	1,1	28,74	23,65	-18%	26,80	-7%	37,57	31%	16,83	-41%
	2,1	29,43	36,79	25%	41,70	42%	58,45	99%	26,17	-11%
	3,1	35,91	49,93	39%	56,59	58%	79,32	121%	35,52	-1%
Sim12	0,6	23,55	19,29	-18%	19,96	-15%	31,54	34%	14,72	-38%
	1,1	26,24	26,71	2%	27,64	5%	43,67	66%	20,38	-22%
	2,1	26,86	41,55	55%	43,00	60%	67,94	153%	31,71	18%
	3,1	32,29	56,38	75%	58,35	81%	92,20	185%	43,03	33%
Sim13	0,6	29,14	19,29	-34%	24,72	-15%	30,55	5%	12,15	-58%
	1,1	31,91	26,71	-16%	34,23	7%	42,30	33%	16,83	-47%
	2,1	33,05	41,55	26%	53,25	61%	65,80	99%	26,17	-21%
	3,1	39,69	56,38	42%	72,27	82%	89,29	125%	35,52	-11%
Sim14	0,6	26,07	21,38	-18%	23,65	-9%	33,78	30%	14,72	-44%
	1,1	28,95	29,60	2%	32,75	13%	46,77	62%	20,38	-30%
	2,1	29,92	46,04	54%	50,94	70%	72,75	143%	31,71	6%
	3,1	37,16	62,49	68%	69,14	86%	98,73	166%	43,03	16%

Tabelle D.19: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (19)

Simulation	Mp,sim		BSI nach Law '95					W <sub>s,rech.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s,sim</sub>					
					W <sub>s,sim</sub>	W <sub>s,rech.</sub>				
Sim15	0,6	26,07	14,81	-43%	12,87	-51%	16,25	-38%	10,54	-60%
	1,1	29,48	20,51	-30%	17,83	-40%	22,50	-24%	14,59	-51%
	2,1	33,47	31,90	-5%	27,73	-17%	35,00	5%	22,69	-32%
	3,1	41,44	43,30	4%	37,63	-9%	47,50	15%	30,80	-26%
Sim16	0,6	27,52	16,73	-39%	15,43	-44%	22,54	-18%	12,76	-54%
	1,1	28,85	23,16	-20%	21,36	-26%	31,20	8%	17,67	-39%
	2,1	28,40	36,02	27%	33,23	17%	48,54	71%	27,49	-3%
	3,1	34,54	48,89	42%	45,10	31%	65,87	91%	37,31	8%
Sim17	0,6	25,32	18,54	-27%	16,91	-33%	24,76	-2%	14,81	-41%
	1,1	27,83	25,67	-8%	23,41	-16%	34,28	23%	20,51	-26%
	2,1	27,42	39,92	46%	36,41	33%	53,32	94%	31,90	16%
	3,1	32,67	54,18	66%	49,42	51%	72,37	121%	43,30	33%
Sim18	0,6	24,11	20,26	-16%	18,44	-24%	28,37	18%	16,73	-31%
	1,1	26,59	28,05	5%	25,53	-4%	39,28	48%	23,16	-13%
	2,1	26,13	43,64	67%	39,71	52%	61,10	134%	36,02	38%
	3,1	30,94	59,23	91%	53,89	74%	82,93	168%	48,89	58%
Sim19	0,6	28,62	12,76	-55%	11,67	-59%	14,75	-48%	8,04	-72%
	1,1	30,48	17,67	-42%	16,16	-47%	20,42	-33%	11,13	-63%
	2,1	30,48	27,49	-10%	25,13	-18%	31,76	4%	17,32	-43%
	3,1	38,59	37,31	-3%	34,11	-12%	43,11	12%	23,50	-39%
Sim20	0,6	31,65	15,78	-50%	16,11	-49%	20,78	-34%	10,54	-67%
	1,1	34,85	21,85	-37%	22,31	-36%	28,77	-17%	14,59	-58%
	2,1	35,25	33,99	-4%	34,71	-2%	44,75	27%	22,69	-36%
	3,1	38,81	46,14	19%	47,10	21%	60,73	56%	30,80	-21%
Sim21	0,6	30,53	17,64	-42%	17,28	-43%	24,41	-20%	12,76	-58%
	1,1	32,86	24,43	-26%	23,93	-27%	33,80	3%	17,67	-46%
	2,1	32,38	38,00	17%	37,22	15%	52,58	62%	27,49	-15%
	3,1	35,11	51,57	47%	50,51	44%	71,36	103%	37,31	6%

Tabelle D.20: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (20)

Simulation	Mp,sim		BSI nach Law'95						W <sub>s,rech.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s,sim</sub>		W <sub>s,rech.</sub>			
					W <sub>s,sim</sub>	W <sub>s,rech.</sub>				
Sim22	0,6	28,01	19,41	-31%	18,15	26,67	-35%	26,67	14,81	-47%
	1,1	30,87	26,87	-13%	25,14	36,92	-19%	36,92	20,51	-34%
	2,1	30,86	41,80	35%	39,10	57,44	27%	57,44	31,90	3%
	3,1	34,10	56,73	66%	53,07	77,95	56%	77,95	43,30	27%
Sim23	0,6	25,63	21,10	-18%	19,09	29,80	-26%	29,80	16,73	-35%
	1,1	28,48	29,21	3%	26,43	41,26	-7%	41,26	23,16	-19%
	2,1	28,10	45,44	62%	41,11	64,18	46%	64,18	36,02	28%
	3,1	30,54	61,67	102%	55,79	87,11	83%	87,11	48,89	60%
Sim24	0,6	33,26	13,81	-58%	14,35	16,56	-57%	16,56	8,04	-76%
	1,1	36,36	19,12	-47%	19,86	22,93	-45%	22,93	11,13	-69%
	2,1	36,87	29,74	-19%	30,90	35,67	-16%	35,67	17,32	-53%
	3,1	41,31	40,36	-2%	41,94	48,41	2%	48,41	23,50	-43%
Sim25	0,6	32,55	16,73	-49%	18,24	22,14	-44%	22,14	10,54	-68%
	1,1	35,83	23,16	-35%	25,26	30,65	-30%	30,65	14,59	-59%
	2,1	36,34	36,02	-1%	39,30	47,68	8%	47,68	22,69	-38%
	3,1	42,96	48,89	14%	53,33	64,70	24%	64,70	30,80	-28%
Sim26	0,6	30,38	18,54	-39%	18,84	25,21	-38%	25,21	12,76	-58%
	1,1	32,85	25,67	-22%	26,09	34,90	-21%	34,90	17,67	-46%
	2,1	32,92	39,92	21%	40,58	54,29	23%	54,29	27,49	-16%
	3,1	39,30	54,18	38%	55,08	73,68	40%	73,68	37,31	-5%
Sim26_Br_unen	0,6	32,99	18,54	-44%	14,67	23,40	-56%	23,40	12,76	-61%
	1,1	37,18	25,67	-31%	20,31	32,40	-45%	32,40	17,67	-52%
	2,1	38,64	39,92	3%	31,59	50,40	-18%	50,40	27,49	-29%
	3,1	45,21	54,18	20%	42,87	68,40	-5%	68,40	37,31	-17%
Sim27	0,6	28,44	20,26	-29%	19,25	27,99	-32%	27,99	14,81	-48%
	1,1	31,04	28,05	-10%	26,65	38,75	-14%	38,75	20,51	-34%
	2,1	31,00	43,64	41%	41,46	60,28	34%	60,28	31,90	3%
	3,1	37,22	59,23	59%	56,27	81,81	51%	81,81	43,30	16%

Tabelle D.21: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (21)

Simulation	Mp,sim		BSI nach Law '95					W <sub>s,rech.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s,sim</sub>					
					W <sub>s,sim</sub>	W <sub>s,rech.</sub>				
Sim28	0,6	25,69	21,92	-15%	19,92	-22%	31,13	21%	16,73	-35%
	1,1	28,36	30,35	7%	27,58	-3%	43,10	52%	23,16	-18%
	2,1	28,13	47,21	68%	42,91	53%	67,05	138%	36,02	28%
	3,1	33,35	64,07	92%	58,23	75%	90,99	173%	48,89	47%
Sim29	0,6	34,97	14,81	-58%	17,78	-49%	18,83	-46%	8,04	-77%
	1,1	38,80	20,51	-47%	24,62	-37%	26,07	-33%	11,13	-71%
	2,1	39,60	31,90	-19%	38,30	-3%	40,55	2%	17,32	-56%
	3,1	45,73	43,30	-5%	51,97	14%	55,03	20%	23,50	-49%
Sim30	0,6	25,69	14,81	-42%	6,99	-73%	12,67	-51%	8,04	-69%
	1,1	26,87	20,51	-24%	9,68	-64%	17,55	-35%	11,13	-59%
	2,1	26,11	31,90	22%	15,05	-42%	27,30	5%	17,32	-34%
	3,1	31,67	43,30	37%	20,43	-36%	37,05	17%	23,50	-26%
Sim31	0,6	34,72	17,19	-50%	24,34	-30%	25,50	-27%	9,33	-73%
	1,1	38,49	23,80	-38%	33,71	-12%	35,31	-8%	12,92	-66%
	2,1	38,56	37,03	-4%	52,43	36%	54,93	42%	20,10	-48%
	3,1	46,02	50,25	9%	71,16	55%	74,54	62%	27,28	-41%
Sim32	0,6	24,78	16,73	-32%	9,13	-63%	19,74	-20%	10,54	-57%
	1,1	25,79	23,16	-10%	12,64	-51%	27,33	6%	14,59	-43%
	2,1	23,98	36,02	50%	19,66	-18%	42,51	77%	22,69	-5%
	3,1	31,31	48,89	56%	26,68	-15%	57,70	84%	30,80	-2%
Sim33	0,6	32,63	18,54	-43%	15,00	-54%	30,61	-6%	12,76	-61%
	1,1	37,27	25,67	-31%	20,76	-44%	42,39	14%	17,67	-53%
	2,1	37,95	39,92	5%	32,30	-15%	65,93	74%	27,49	-28%
	3,1	44,22	54,18	23%	43,83	-1%	89,48	102%	37,31	-16%
Sim34	0,6	34,02	20,26	-40%	18,51	-46%	36,51	7%	14,81	-56%
	1,1	39,44	28,05	-29%	25,63	-35%	50,55	28%	20,51	-48%
	2,1	40,47	43,64	8%	39,87	-1%	78,63	94%	31,90	-21%
	3,1	46,22	59,23	28%	54,12	17%	106,71	131%	43,30	-6%

Tabelle D.22: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (22)

Simulation	Mp,sim		BSI nach Law '95						W <sub>s,rech.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s,sim</sub>		W <sub>s,rech.</sub>			
					W <sub>s,sim</sub>	W <sub>s,rech.</sub>				
Sim35	0,6	33,70	21,92	-35%	19,65	-42%	40,95	22%	16,73	-50%
	1,1	39,49	30,35	-23%	27,21	-31%	56,70	44%	23,16	-41%
	2,1	40,85	47,21	16%	42,32	4%	88,20	116%	36,02	-12%
	3,1	46,62	64,07	37%	57,44	23%	119,70	157%	48,89	5%
Sim36	0,6	29,09	14,81	-49%	9,69	-67%	15,39	-47%	8,04	-72%
	1,1	30,42	20,51	-33%	13,41	-56%	21,31	-30%	11,13	-63%
	2,1	29,36	31,90	9%	20,87	-29%	33,15	13%	17,32	-41%
	3,1	38,01	43,30	14%	28,32	-25%	44,99	18%	23,50	-38%
Sim37	0,6	33,22	16,73	-50%	16,88	-49%	25,03	-25%	10,54	-68%
	1,1	37,02	23,16	-37%	23,38	-37%	34,65	-6%	14,59	-61%
	2,1	36,69	36,02	-2%	36,37	-1%	53,90	47%	22,69	-38%
	3,1	44,44	48,89	10%	49,36	11%	73,15	65%	30,80	-31%
Sim38	0,6	35,36	20,26	-43%	21,74	-39%	32,26	-9%	12,76	-64%
	1,1	39,91	28,05	-30%	30,10	-25%	44,67	12%	17,67	-56%
	2,1	39,84	43,64	10%	46,83	18%	69,49	74%	27,49	-31%
	3,1	46,36	59,23	28%	63,55	37%	94,31	103%	37,31	-20%
Sim39	0,6	33,77	21,92	-35%	20,48	-39%	35,38	5%	14,81	-56%
	1,1	38,47	30,35	-21%	28,35	-26%	48,99	27%	20,51	-47%
	2,1	39,15	47,21	21%	44,10	13%	76,21	95%	31,90	-19%
	3,1	45,27	64,07	42%	59,85	32%	103,42	128%	43,30	-4%
Sim40	0,6	33,56	23,51	-30%	20,39	-39%	37,31	11%	16,73	-50%
	1,1	38,54	32,55	-16%	28,23	-27%	51,66	34%	23,16	-40%
	2,1	39,62	50,64	28%	43,91	11%	80,37	103%	36,02	-9%
	3,1	45,39	68,73	51%	59,60	31%	109,07	140%	48,89	8%
Sim41	0,6	33,31	18,31	-45%	29,76	-11%	31,13	-7%	9,94	-70%
	1,1	36,77	25,35	-31%	41,21	12%	43,10	17%	13,76	-63%
	2,1	36,97	39,43	7%	64,11	73%	67,05	81%	21,41	-42%
	3,1	45,55	53,52	18%	87,00	91%	91,00	100%	29,05	-36%

Tabelle D.23: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (23)

Simulation	Mp,sim		BSI nach Law '95					W <sub>s,rechn.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s,sim</sub>	W <sub>s,rechn.</sub>				
<b>Sim42</b>	0,6	21,39	11,76	-45%	17,08	-20%	18,51	-13%	6,38	-70%
	1,1	22,98	16,28	-29%	23,64	3%	25,63	12%	8,84	-62%
	2,1	22,48	25,32	13%	36,78	64%	39,87	77%	13,75	-39%
	3,1	28,50	34,36	21%	49,91	75%	54,11	90%	18,66	-35%
<b>Sim43</b>	0,6	39,12	18,66	-52%	9,81	-75%	13,87	-65%	10,13	-74%
	1,1	42,10	25,84	-39%	13,58	-68%	19,20	-54%	14,03	-67%
	2,1	43,55	40,19	-8%	21,13	-51%	29,86	-31%	21,82	-50%
	3,1	47,92	54,54	14%	28,68	-40%	40,53	-15%	29,61	-38%
<b>Sim44</b>	0,6	18,47	14,71	-20%	16,08	-13%	25,76	39%	10,13	-45%
	1,1	20,16	20,37	1%	22,26	10%	35,66	77%	14,03	-30%
	2,1	19,80	31,69	60%	34,63	75%	55,47	180%	21,82	10%
	3,1	24,91	43,00	73%	47,00	89%	75,29	202%	29,61	19%
<b>Sim45</b>	0,6	40,57	21,21	-48%	20,55	-49%	26,48	-35%	14,61	-64%
	1,1	44,73	29,37	-34%	28,45	-36%	36,66	-18%	20,23	-55%
	2,1	45,86	45,69	0%	44,25	-4%	57,03	24%	31,47	-31%
	3,1	52,87	62,01	17%	60,06	14%	77,40	46%	42,70	-19%
<b>Sim46</b>	0,6	22,74	16,08	-29%	16,70	-27%	31,37	38%	10,13	-55%
	1,1	26,00	22,27	-14%	23,13	-11%	43,44	67%	14,03	-46%
	2,1	26,10	34,64	33%	35,97	38%	67,57	159%	21,82	-16%
	3,1	31,42	47,01	50%	48,82	55%	91,70	192%	29,61	-6%
<b>Sim47</b>	0,6	44,22	23,19	-48%	22,38	-49%	32,65	-26%	14,61	-67%
	1,1	49,76	32,11	-35%	30,99	-38%	45,21	-9%	20,23	-59%
	2,1	50,71	49,95	-2%	48,20	-5%	70,33	39%	31,47	-38%
	3,1	59,06	67,79	15%	65,42	11%	95,45	62%	42,70	-28%

Tabelle D.24: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (24)

Simulation	M <sub>p,sim</sub>		NFA nach Law '05						W <sub>s</sub>		W <sub>s,rechn.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb		W <sub>quer</sub>		W <sub>s</sub>		W <sub>s,rechn.</sub>			
			bo	bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rechn.</sub>	W <sub>s,rechn.</sub>				
Sim7	0,6	24,34	19,45	-20%	18,74	-23%	27,64	14%	13,84	-43%		
	1,1	27,48	26,94	-2%	25,94	-6%	38,27	39%	19,16	-30%		
	2,1	30,81	41,90	36%	40,36	31%	59,54	93%	29,81	-3%		
	3,1	39,66	56,87	43%	54,77	38%	80,80	104%	40,45	2%		
Sim8	0,6	27,78	21,97	-21%	26,89	-3%	35,08	26%	13,84	-50%		
	1,1	29,79	30,42	2%	37,23	25%	48,57	63%	19,16	-36%		
	2,1	33,03	47,32	43%	57,91	75%	75,55	129%	29,81	-10%		
	3,1	41,11	64,22	56%	78,60	91%	102,53	149%	40,45	-2%		
Sim9	0,6	25,83	21,97	-15%	23,53	-9%	37,38	45%	16,77	-35%		
	1,1	28,44	30,42	7%	32,58	15%	51,76	82%	23,21	-18%		
	2,1	27,76	47,32	70%	50,68	83%	80,51	190%	36,11	30%		
	3,1	34,65	64,22	85%	68,79	99%	109,27	215%	49,01	41%		
Sim10	0,6	28,63	24,35	-15%	27,63	-3%	42,93	50%	16,77	-41%		
	1,1	31,80	33,71	6%	38,26	20%	59,45	87%	23,21	-27%		
	2,1	31,61	52,44	66%	59,51	88%	92,47	193%	36,11	14%		
	3,1	38,88	71,17	83%	80,77	108%	125,50	223%	49,01	26%		
Sim11	0,6	26,13	19,45	-26%	22,05	-16%	30,91	18%	13,84	-47%		
	1,1	28,74	26,94	-6%	30,53	6%	42,79	49%	19,16	-33%		
	2,1	29,43	41,90	42%	47,49	61%	66,57	126%	29,81	1%		
	3,1	35,91	56,87	58%	64,45	79%	90,34	152%	40,45	13%		
Sim12	0,6	23,55	21,97	-7%	22,73	-3%	35,92	53%	16,77	-29%		
	1,1	26,24	30,42	16%	31,48	20%	49,74	90%	23,21	-12%		
	2,1	26,86	47,32	76%	48,97	82%	77,37	188%	36,11	34%		
	3,1	32,29	64,22	99%	66,45	106%	105,00	225%	49,01	52%		
Sim13	0,6	29,14	21,97	-25%	28,16	-3%	34,79	19%	13,84	-53%		
	1,1	31,91	30,42	-5%	38,99	22%	48,17	51%	19,16	-40%		
	2,1	33,05	47,32	43%	60,65	83%	74,93	127%	29,81	-10%		
	3,1	39,69	64,22	62%	82,31	107%	101,70	156%	40,45	2%		
Sim14	0,6	26,07	24,35	-7%	26,94	3%	38,47	48%	16,77	-36%		
	1,1	28,95	33,71	16%	37,30	29%	53,26	84%	23,21	-20%		
	2,1	29,92	52,44	75%	58,02	94%	82,85	177%	36,11	21%		
	3,1	37,16	71,17	92%	78,74	112%	112,44	203%	49,01	32%		

Tabelle D.25: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (25)

Simulation	Mp,sim		NFPA nach Law '05						W <sub>s,rech.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>			
								bo+bb		Wquer
Sim15	0,6	26,07	16,87	-35%	14,66	-44%	18,51	-29%	12,00	-54%
	1,1	29,48	23,36	-21%	20,30	-31%	25,62	-13%	16,62	-44%
	2,1	33,47	36,33	9%	31,58	-6%	39,86	19%	25,85	-23%
	3,1	41,44	49,31	19%	42,86	3%	54,10	31%	35,08	-15%
Sim16	0,6	27,52	19,05	-31%	17,57	-36%	25,67	-7%	14,54	-47%
	1,1	28,85	26,38	-9%	24,33	-16%	35,54	23%	20,13	-30%
	2,1	28,40	41,03	44%	37,85	33%	55,28	95%	31,31	10%
	3,1	34,54	55,68	61%	51,36	49%	75,02	117%	42,49	23%
Sim17	0,6	25,32	21,11	-17%	19,25	-24%	28,20	11%	16,87	-33%
	1,1	27,83	29,23	5%	26,66	-4%	39,04	40%	23,36	-16%
	2,1	27,42	45,47	66%	41,47	51%	60,73	121%	36,33	32%
	3,1	32,67	61,71	89%	56,28	72%	82,42	152%	49,31	51%
Sim18	0,6	24,11	23,08	-4%	21,00	-13%	32,31	34%	19,05	-21%
	1,1	26,59	31,95	20%	29,07	9%	44,74	68%	26,38	-1%
	2,1	26,13	49,70	90%	45,22	73%	69,59	166%	41,03	57%
	3,1	30,94	67,45	118%	61,38	98%	94,44	205%	55,68	80%
Sim19	0,6	28,62	14,54	-49%	13,29	-54%	16,80	-41%	9,16	-68%
	1,1	30,48	20,13	-34%	18,40	-40%	23,26	-24%	12,68	-58%
	2,1	30,48	31,31	3%	28,62	-6%	36,17	19%	19,72	-35%
	3,1	38,59	42,49	10%	38,85	1%	49,09	27%	26,77	-31%
Sim20	0,6	31,65	17,98	-43%	18,35	-42%	23,66	-25%	12,00	-62%
	1,1	34,85	24,89	-29%	25,41	-27%	32,76	-6%	16,62	-52%
	2,1	35,25	38,72	10%	39,53	12%	50,96	45%	25,85	-27%
	3,1	38,81	52,54	35%	53,65	38%	69,16	78%	35,08	-10%
Sim21	0,6	30,53	20,09	-34%	19,68	-36%	27,80	-9%	14,54	-52%
	1,1	32,86	27,82	-15%	27,25	-17%	38,50	17%	20,13	-39%
	2,1	32,38	43,28	34%	42,39	31%	59,88	85%	31,31	-3%
	3,1	35,11	58,73	67%	57,53	64%	81,27	131%	42,49	21%

Tabelle D.26: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (26)

Simulation	Mp,sim		NFPA nach Law '05						W <sub>s,rech.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>			
								bo+bb		Wquer
Sim22	0,6	28,01	22,10	-21%	20,68	-26%	30,37	8%	16,87	-40%
	1,1	30,87	30,61	-1%	28,63	-7%	42,05	36%	23,36	-24%
	2,1	30,86	47,61	54%	44,53	44%	65,42	112%	36,33	18%
	3,1	34,10	64,61	89%	60,44	77%	88,78	160%	49,31	45%
Sim23	0,6	25,63	24,03	-6%	21,74	-15%	33,94	32%	19,05	-26%
	1,1	28,48	33,27	17%	30,10	6%	46,99	65%	26,38	-7%
	2,1	28,10	51,75	84%	46,82	67%	73,10	160%	41,03	46%
	3,1	30,54	70,23	130%	63,54	108%	99,21	225%	55,68	82%
Sim24	0,6	33,26	15,72	-53%	16,34	-51%	18,86	-43%	9,16	-72%
	1,1	36,36	21,77	-40%	22,62	-38%	26,12	-28%	12,68	-65%
	2,1	36,87	33,87	-8%	35,19	-5%	40,62	10%	19,72	-47%
	3,1	41,31	45,96	11%	47,76	16%	55,13	33%	26,77	-35%
Sim25	0,6	32,55	19,05	-41%	20,78	-36%	25,21	-23%	12,00	-63%
	1,1	35,83	26,38	-26%	28,77	-20%	34,91	-3%	16,62	-54%
	2,1	36,34	41,03	13%	44,75	23%	54,30	49%	25,85	-29%
	3,1	42,96	55,68	30%	60,74	41%	73,69	72%	35,08	-18%
Sim26	0,6	30,38	21,11	-31%	21,46	-29%	28,71	-6%	14,54	-52%
	1,1	32,85	29,23	-11%	29,71	-10%	39,75	21%	20,13	-39%
	2,1	32,92	45,47	38%	46,22	40%	61,83	88%	31,31	-5%
	3,1	39,30	61,71	57%	62,72	60%	83,91	114%	42,49	8%
Sim26_Br_unen	0,6	32,99	21,11	-36%	16,70	-49%	26,65	-19%	14,54	-56%
	1,1	37,18	29,23	-21%	23,13	-38%	36,90	-1%	20,13	-46%
	2,1	38,64	45,47	18%	35,98	-7%	57,40	49%	31,31	-19%
	3,1	45,21	61,71	36%	48,82	8%	77,90	72%	42,49	-6%
Sim27	0,6	28,44	23,08	-19%	21,92	-23%	31,87	12%	16,87	-41%
	1,1	31,04	31,95	3%	30,36	-2%	44,13	42%	23,36	-25%
	2,1	31,00	49,70	60%	47,22	52%	68,65	121%	36,33	17%
	3,1	37,22	67,45	81%	64,09	72%	93,17	150%	49,31	32%

Tabelle D.27: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (27)

Simulation	Mp,sim		NFPA nach Law '05					W <sub>s,rech.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>			
							W <sub>s,rech.</sub>		
Sim28	0,6	25,69	24,96	-3%	22,69	35,45	38%	19,05	-26%
	1,1	28,36	34,56	22%	31,42	49,09	73%	26,38	-7%
	2,1	28,13	53,76	91%	48,87	76,36	171%	41,03	46%
	3,1	33,35	72,96	119%	66,32	103,63	211%	55,68	67%
Sim29	0,6	34,97	16,87	-52%	20,25	21,44	-42%	9,16	-74%
	1,1	38,80	23,36	-40%	28,04	29,69	-23%	12,68	-67%
	2,1	39,60	36,33	-8%	43,62	46,18	10%	19,72	-50%
	3,1	45,73	49,31	8%	59,19	62,68	29%	26,77	-41%
Sim30	0,6	25,69	16,87	-34%	7,96	14,43	-69%	9,16	-64%
	1,1	26,87	23,36	-13%	11,02	19,99	-59%	12,68	-53%
	2,1	26,11	36,33	39%	17,14	31,09	-34%	19,72	-24%
	3,1	31,67	49,31	56%	23,27	42,19	-27%	26,77	-15%
Sim31	0,6	34,72	19,58	-44%	27,72	29,04	-20%	10,63	-69%
	1,1	38,49	27,11	-30%	38,39	40,21	0%	14,72	-62%
	2,1	38,56	42,17	9%	59,71	62,55	55%	22,89	-41%
	3,1	46,02	57,23	24%	81,04	84,90	76%	31,07	-32%
Sim32	0,6	24,78	19,05	-23%	10,40	22,48	-58%	12,00	-52%
	1,1	25,79	26,38	2%	14,39	31,13	-44%	16,62	-36%
	2,1	23,98	41,03	71%	22,39	48,42	-7%	25,85	8%
	3,1	31,31	55,68	78%	30,39	65,71	-3%	35,08	12%
Sim33	0,6	32,63	21,11	-35%	17,08	34,86	-48%	14,54	-55%
	1,1	37,27	29,23	-22%	23,65	48,27	-37%	20,13	-46%
	2,1	37,95	45,47	20%	36,78	75,09	-3%	31,31	-18%
	3,1	44,22	61,71	40%	49,92	101,91	13%	42,49	-4%
Sim34	0,6	34,02	23,08	-32%	21,08	41,58	-38%	16,87	-50%
	1,1	39,44	31,95	-19%	29,19	57,57	-26%	23,36	-41%
	2,1	40,47	49,70	23%	45,41	89,55	12%	36,33	-10%
	3,1	46,22	67,45	46%	61,63	121,54	33%	49,31	7%

Tabelle D.28: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (28)

Simulation	Mp,sim		NFPA nach Law '05						W <sub>s,rech.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>			
								W <sub>s</sub>		W <sub>s</sub>
Sim35	0,6	33,70	24,96	-26%	22,38	-34%	46,64	38%	19,05	-43%
	1,1	39,49	34,56	-12%	30,99	-22%	64,58	64%	26,38	-33%
	2,1	40,85	53,76	32%	48,20	18%	100,45	146%	41,03	0%
	3,1	46,62	72,96	57%	65,42	40%	136,33	192%	55,68	19%
Sim36	0,6	29,09	16,87	-42%	11,03	-62%	17,53	-40%	9,16	-69%
	1,1	30,42	23,36	-23%	15,28	-50%	24,27	-20%	12,68	-58%
	2,1	29,36	36,33	24%	23,77	-19%	37,76	29%	19,72	-33%
	3,1	38,01	49,31	30%	32,25	-15%	51,24	35%	26,77	-30%
Sim37	0,6	33,22	19,05	-43%	19,23	-42%	28,50	-14%	12,00	-64%
	1,1	37,02	26,38	-29%	26,63	-28%	39,46	7%	16,62	-55%
	2,1	36,69	41,03	12%	41,42	13%	61,39	67%	25,85	-30%
	3,1	44,44	55,68	25%	56,21	26%	83,31	87%	35,08	-21%
Sim38	0,6	35,36	23,08	-35%	24,76	-30%	36,74	4%	14,54	-59%
	1,1	39,91	31,95	-20%	34,28	-14%	50,88	27%	20,13	-50%
	2,1	39,84	49,70	25%	53,33	34%	79,14	99%	31,31	-21%
	3,1	46,36	67,45	46%	72,37	56%	107,41	132%	42,49	-8%
Sim39	0,6	33,77	24,96	-26%	23,32	-31%	40,30	19%	16,87	-50%
	1,1	38,47	34,56	-10%	32,29	-16%	55,79	45%	23,36	-39%
	2,1	39,15	53,76	37%	50,23	28%	86,79	122%	36,33	-7%
	3,1	45,27	72,96	61%	68,16	51%	117,79	160%	49,31	9%
Sim40	0,6	33,56	26,78	-20%	23,22	-31%	42,50	27%	19,05	-43%
	1,1	38,54	37,08	-4%	32,15	-17%	58,84	53%	26,38	-32%
	2,1	39,62	57,67	46%	50,01	26%	91,53	131%	41,03	4%
	3,1	45,39	78,27	72%	67,87	50%	124,22	174%	55,68	23%
Sim41	0,6	33,31	20,85	-37%	33,90	2%	35,45	6%	11,32	-66%
	1,1	36,77	28,87	-21%	46,94	28%	49,09	34%	15,67	-57%
	2,1	36,97	44,91	21%	73,01	97%	76,36	107%	24,38	-34%
	3,1	45,55	60,95	34%	99,09	118%	103,64	128%	33,09	-27%

Tabelle D.29: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (29)

Simulation	Mp,sim		NFA nach Law'05						W <sub>s,rechn.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rechn.</sub>				
Sim42	0,6	21,39	13,39	-37%	19,45	-9%	21,08	-1%	7,27	-66%
	1,1	22,98	18,54	-19%	26,93	17%	29,19	27%	10,06	-56%
	2,1	22,48	28,84	28%	41,89	86%	45,41	102%	15,66	-30%
	3,1	28,50	39,14	37%	56,85	99%	61,63	116%	21,25	-25%
Sim43	0,6	39,12	21,25	-46%	11,17	-71%	15,79	-60%	11,54	-71%
	1,1	42,10	29,42	-30%	15,47	-63%	21,87	-48%	15,97	-62%
	2,1	43,55	45,77	5%	24,06	-45%	34,01	-22%	24,85	-43%
	3,1	47,92	62,12	30%	32,66	-32%	46,16	-4%	33,72	-30%
Sim44	0,6	18,47	16,76	-9%	18,31	-1%	29,33	59%	11,54	-38%
	1,1	20,16	23,20	15%	25,36	26%	40,62	101%	15,98	-21%
	2,1	19,80	36,09	82%	39,44	99%	63,18	219%	24,85	26%
	3,1	24,91	48,98	97%	53,53	115%	85,74	244%	33,73	35%
Sim45	0,6	40,57	24,16	-40%	23,40	-42%	30,15	-26%	16,64	-59%
	1,1	44,73	33,45	-25%	32,40	-28%	41,75	-7%	23,04	-49%
	2,1	45,86	52,04	13%	50,40	10%	64,95	42%	35,84	-22%
	3,1	52,87	70,63	34%	68,40	29%	88,15	67%	48,63	-8%
Sim46	0,6	22,74	18,32	-19%	19,02	-16%	35,73	57%	11,54	-49%
	1,1	26,00	25,36	-2%	26,34	1%	49,47	90%	15,98	-39%
	2,1	26,10	39,45	51%	40,97	57%	76,96	195%	24,85	-5%
	3,1	31,42	53,54	70%	55,60	77%	104,44	232%	33,73	7%
Sim47	0,6	44,22	26,41	-40%	25,49	-42%	37,19	-16%	16,64	-62%
	1,1	49,76	36,57	-27%	35,29	-29%	51,49	3%	23,04	-54%
	2,1	50,71	56,88	12%	54,90	8%	80,10	58%	35,84	-29%
	3,1	59,06	77,20	31%	74,50	26%	108,70	84%	48,63	-18%

Tabelle D.30: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (30)

Simulation	Mp.sim		Poreh et al. '98						W <sub>s,rechn.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb		W <sub>quer</sub>		W <sub>s</sub>			
			bo+bb	W <sub>quer</sub>						
Sim7	0,6	24,34	23,08	-5%	22,95	-6%	24,55	1%	16,28	-33%
	1,1	27,48	26,00	-5%	25,76	-6%	28,70	4%	18,36	-33%
	2,1	30,81	31,84	3%	31,38	2%	37,00	20%	22,51	-27%
	3,1	39,66	37,68	-5%	37,01	-7%	45,30	14%	26,67	-33%
Sim8	0,6	27,78	27,40	-1%	28,28	2%	29,76	7%	17,36	-38%
	1,1	29,79	30,70	3%	32,32	8%	35,02	18%	19,43	-35%
	2,1	33,03	37,29	13%	40,39	22%	45,55	38%	23,59	-29%
	3,1	41,11	43,88	7%	48,46	18%	56,08	36%	27,74	-33%
Sim9	0,6	25,83	25,43	-2%	25,71	0%	28,21	9%	17,41	-33%
	1,1	28,44	28,73	1%	29,25	3%	33,82	19%	19,93	-30%
	2,1	27,76	35,32	27%	36,31	31%	45,04	62%	24,96	-10%
	3,1	34,65	41,92	21%	43,37	25%	56,26	62%	29,99	-13%
Sim10	0,6	28,63	28,30	-1%	28,89	1%	31,65	11%	18,11	-37%
	1,1	31,80	31,96	1%	33,04	4%	38,09	20%	20,62	-35%
	2,1	31,61	39,27	24%	41,34	31%	50,98	61%	25,66	-19%
	3,1	38,88	46,57	20%	49,63	28%	63,87	64%	30,69	-21%
Sim11	0,6	26,13	23,94	-8%	24,41	-7%	26,00	0%	16,09	-38%
	1,1	28,74	26,86	-7%	27,72	-4%	30,64	7%	18,16	-37%
	2,1	29,43	32,70	11%	34,34	17%	39,92	36%	22,32	-24%
	3,1	35,91	38,54	7%	40,95	14%	49,20	37%	26,47	-26%
Sim12	0,6	23,55	23,94	2%	24,08	2%	26,45	12%	16,55	-30%
	1,1	26,24	27,23	4%	27,49	5%	31,84	21%	19,07	-27%
	2,1	26,86	33,83	26%	34,31	28%	42,63	59%	24,10	-10%
	3,1	32,29	40,42	25%	41,14	27%	53,41	65%	29,13	-10%
Sim13	0,6	29,14	27,39	-6%	28,50	-2%	29,70	2%	17,36	-40%
	1,1	31,91	30,68	-4%	32,73	3%	34,92	9%	19,43	-39%
	2,1	33,05	37,28	13%	41,18	25%	45,36	37%	23,59	-29%
	3,1	39,69	43,87	11%	49,63	25%	55,80	41%	27,74	-30%
Sim14	0,6	26,07	26,43	1%	26,89	3%	28,97	11%	17,61	-32%
	1,1	28,95	30,08	4%	30,94	7%	34,74	20%	20,12	-30%
	2,1	29,92	37,39	25%	39,02	30%	46,29	55%	25,15	-16%
	3,1	37,16	44,70	20%	47,11	27%	57,84	56%	30,19	-19%

Tabelle D.31: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (31)

Simulation	Mp,sim		Poreh et al. '98				W <sub>s,rech.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>				
								W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>	
Sim15	0,6	26,07	23,79	-9%	23,40	-10%	24,09	-8%	18,68	-28%
	1,1	29,48	26,33	-11%	25,60	-13%	26,87	-9%	20,48	-31%
	2,1	33,47	31,39	-6%	30,00	-10%	32,42	-3%	24,08	-28%
	3,1	41,44	36,45	-12%	34,40	-17%	37,98	-8%	27,68	-33%
Sim16	0,6	27,52	26,84	-2%	26,58	-3%	28,03	2%	20,05	-27%
	1,1	28,85	29,70	3%	29,21	1%	31,89	11%	22,24	-23%
	2,1	28,40	35,42	25%	34,49	21%	39,59	39%	26,60	-6%
	3,1	34,54	41,14	19%	39,76	15%	47,29	37%	30,96	-10%
Sim17	0,6	25,32	26,41	4%	26,08	3%	27,69	9%	20,31	-20%
	1,1	27,83	29,58	6%	28,97	4%	31,92	15%	22,84	-18%
	2,1	27,42	35,92	31%	34,75	27%	40,38	47%	27,91	2%
	3,1	32,67	42,25	29%	40,53	24%	48,85	50%	32,97	1%
Sim18	0,6	24,11	27,10	12%	26,72	11%	28,76	19%	20,82	-14%
	1,1	26,59	30,56	15%	29,87	12%	33,61	26%	23,68	-11%
	2,1	26,13	37,49	43%	36,18	38%	43,31	66%	29,40	13%
	3,1	30,94	44,41	44%	42,48	37%	53,01	71%	35,12	14%
Sim19	0,6	28,62	25,46	-11%	25,23	-12%	25,87	-10%	18,51	-35%
	1,1	30,48	27,64	-9%	27,23	-11%	28,39	-7%	19,89	-35%
	2,1	30,48	32,01	5%	31,22	2%	33,43	10%	22,64	-26%
	3,1	38,59	36,37	-6%	35,21	-9%	38,47	0%	25,39	-34%
Sim20	0,6	31,65	28,30	-11%	28,37	-10%	29,33	-7%	19,89	-37%
	1,1	34,85	31,00	-11%	31,13	-11%	32,88	-6%	21,70	-38%
	2,1	35,25	36,40	3%	36,64	4%	39,98	13%	25,30	-28%
	3,1	38,81	41,79	8%	42,15	9%	47,09	21%	28,90	-26%
Sim21	0,6	30,53	28,54	-7%	28,46	-7%	29,92	-2%	20,49	-33%
	1,1	32,86	31,55	-4%	31,41	-4%	34,10	4%	22,67	-31%
	2,1	32,38	37,58	16%	37,32	15%	42,44	31%	27,03	-17%
	3,1	35,11	43,61	24%	43,23	23%	50,79	45%	31,40	-11%

Tabelle D.32: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (32)

Simulation	Mp,sim		Poreh et al. '98					W <sub>s,rech.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
							W <sub>s</sub>		W <sub>s</sub>	
Sim22	0,6	28,01	27,94	0%	27,69	-1%	29,43	5%	20,70	-26%
	1,1	30,87	31,26	1%	30,79	0%	33,99	10%	23,23	-25%
	2,1	30,86	37,90	23%	37,00	20%	43,11	40%	28,30	-8%
	3,1	34,10	44,53	31%	43,20	27%	52,23	53%	33,36	-2%
Sim23	0,6	25,63	28,15	10%	27,74	8%	29,93	17%	21,07	-18%
	1,1	28,48	31,75	11%	31,00	9%	35,03	23%	23,93	-16%
	2,1	28,10	38,97	39%	37,52	34%	45,21	61%	29,65	5%
	3,1	30,54	46,18	51%	44,05	44%	55,40	81%	35,36	16%
Sim24	0,6	33,26	27,81	-16%	27,92	-16%	28,37	-15%	19,12	-43%
	1,1	36,36	30,17	-17%	30,37	-16%	31,21	-14%	20,50	-44%
	2,1	36,87	34,89	-5%	35,28	-4%	36,87	0%	23,25	-37%
	3,1	41,31	39,61	-4%	40,18	-3%	42,53	3%	26,00	-37%
Sim25	0,6	32,55	29,76	-9%	30,07	-8%	30,87	-5%	20,26	-38%
	1,1	35,83	32,62	-9%	33,19	-7%	34,65	-3%	22,06	-38%
	2,1	36,34	38,34	5%	39,43	8%	42,22	16%	25,66	-29%
	3,1	42,96	44,06	3%	45,67	6%	49,79	16%	29,26	-32%
Sim26	0,6	30,38	29,35	-3%	29,41	-3%	30,72	1%	20,67	-32%
	1,1	32,85	32,52	-1%	32,63	-1%	35,02	7%	22,85	-30%
	2,1	32,92	38,85	18%	39,07	19%	43,64	33%	27,21	-17%
	3,1	39,30	45,19	15%	45,51	16%	52,26	33%	31,58	-20%
Sim26_Br_unen	0,6	32,99	30,13	-9%	29,33	-11%	31,12	-6%	21,84	-34%
	1,1	37,18	33,29	-10%	31,84	-14%	35,12	-6%	24,02	-35%
	2,1	38,64	39,63	3%	36,85	-5%	43,12	12%	28,39	-27%
	3,1	45,21	45,97	2%	41,87	-7%	51,12	13%	32,75	-28%
Sim27	0,6	28,44	29,04	2%	28,84	1%	30,63	8%	20,97	-26%
	1,1	31,04	32,51	5%	32,13	3%	35,41	14%	23,50	-24%
	2,1	31,00	39,43	27%	38,71	25%	44,98	45%	28,56	-8%
	3,1	37,22	46,36	25%	45,29	22%	54,55	47%	33,63	-10%

Tabelle D.33: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (33)

Simulation	Mp,sim		Poreh et al. '98				W <sub>s,rech.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>				
								W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>	
Sim28	0,6	25,69	29,14	13%	28,73	12%	31,03	21%	21,30	-17%
	1,1	28,36	32,88	16%	32,13	13%	36,35	28%	24,16	-15%
	2,1	28,13	40,38	44%	38,94	38%	46,99	67%	29,88	6%
	3,1	33,35	47,87	44%	45,75	37%	57,63	73%	35,60	7%
Sim29	0,6	34,97	30,61	-12%	31,22	-11%	31,43	-10%	19,86	-43%
	1,1	38,80	33,14	-15%	34,26	-12%	34,65	-11%	21,24	-45%
	2,1	39,60	38,20	-4%	40,34	2%	41,09	4%	23,99	-39%
	3,1	45,73	43,27	-5%	46,41	2%	47,52	4%	26,74	-42%
Sim30	0,6	25,69	23,35	-9%	21,74	-15%	22,91	-11%	25,24	-2%
	1,1	26,87	25,88	-4%	22,94	-15%	25,08	-7%	26,62	-1%
	2,1	26,11	30,94	19%	25,33	-3%	29,41	13%	29,36	12%
	3,1	31,67	36,01	14%	27,72	-12%	33,74	7%	32,11	1%
Sim31	0,6	34,72	30,28	-13%	31,74	-9%	31,98	-8%	18,42	-47%
	1,1	38,49	33,22	-14%	35,90	-7%	36,34	-6%	20,02	-48%
	2,1	38,56	39,09	1%	44,23	15%	45,06	17%	23,21	-40%
	3,1	46,02	44,97	-2%	52,55	14%	53,78	17%	26,40	-43%
Sim32	0,6	24,78	26,68	8%	25,12	1%	27,30	10%	26,08	5%
	1,1	25,79	29,54	15%	26,68	3%	30,67	19%	27,88	8%
	2,1	23,98	35,26	47%	29,80	24%	37,42	56%	31,48	31%
	3,1	31,31	40,98	31%	32,92	5%	44,17	41%	35,09	12%
Sim33	0,6	32,63	31,94	-2%	31,21	-4%	34,42	5%	27,55	-16%
	1,1	37,27	35,11	-6%	33,78	-9%	39,65	6%	29,74	-20%
	2,1	37,95	41,44	9%	38,90	2%	50,11	32%	34,10	-10%
	3,1	44,22	47,78	8%	44,03	0%	60,58	37%	38,46	-13%
Sim34	0,6	34,02	32,80	-4%	32,44	-5%	36,13	6%	27,84	-18%
	1,1	39,44	36,26	-8%	35,61	-10%	42,37	7%	30,37	-23%
	2,1	40,47	43,19	7%	41,93	4%	54,85	36%	35,44	-12%
	3,1	46,22	50,12	8%	48,26	4%	67,33	46%	40,50	-12%

Tabelle D.34: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (34)

Simulation	Mp,sim		Poreh et al. '98				W <sub>s,rech.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>				
								W <sub>s,rech.</sub>		
<b>Sim35</b>										
	0,6	33,70	33,14	-2%	32,67	-3%	37,04	10%	28,12	-17%
	1,1	39,49	36,88	-7%	36,03	-9%	44,04	12%	30,98	-22%
	2,1	40,85	44,38	9%	42,75	5%	58,04	42%	36,69	-10%
	3,1	46,62	51,87	11%	49,47	6%	72,04	55%	42,41	-9%
<b>Sim36</b>										
	0,6	29,09	26,70	-8%	25,65	-12%	26,82	-8%	21,35	-27%
	1,1	30,42	29,23	-4%	27,30	-10%	29,45	-3%	22,73	-25%
	2,1	29,36	34,29	17%	30,62	4%	34,71	18%	25,48	-13%
	3,1	38,01	39,36	4%	33,93	-11%	39,97	5%	28,23	-26%
<b>Sim37</b>										
	0,6	33,22	31,40	-5%	31,43	-5%	33,10	0%	22,73	-32%
	1,1	37,02	34,26	-7%	34,32	-7%	37,38	1%	24,53	-34%
	2,1	36,69	39,98	9%	40,09	9%	45,94	25%	28,13	-23%
	3,1	44,44	45,70	3%	45,86	3%	54,49	23%	31,73	-29%
<b>Sim38</b>										
	0,6	35,36	34,26	-3%	34,57	-2%	36,73	4%	23,84	-33%
	1,1	39,91	37,73	-5%	38,28	-4%	42,24	6%	26,03	-35%
	2,1	39,84	44,66	12%	45,72	15%	53,27	34%	30,39	-24%
	3,1	46,36	51,58	11%	53,15	15%	64,30	39%	34,75	-25%
<b>Sim39</b>										
	0,6	33,77	34,08	1%	33,79	0%	36,85	9%	24,23	-28%
	1,1	38,47	37,83	-2%	37,29	-3%	42,89	11%	26,77	-30%
	2,1	39,15	45,32	16%	44,29	13%	54,99	40%	31,83	-19%
	3,1	45,27	52,82	17%	51,29	13%	67,09	48%	36,89	-18%
<b>Sim40</b>										
	0,6	33,56	33,18	-1%	32,54	-3%	36,01	7%	24,23	-28%
	1,1	38,54	37,20	-3%	36,02	-7%	42,39	10%	27,09	-30%
	2,1	39,62	45,24	14%	42,99	9%	55,15	39%	32,81	-17%
	3,1	45,39	53,28	17%	49,97	10%	67,90	50%	38,52	-15%
<b>Sim41</b>										
	0,6	33,31	30,29	-9%	32,64	-2%	32,92	-1%	17,60	-47%
	1,1	36,77	33,42	-9%	37,73	3%	38,24	4%	19,30	-48%
	2,1	36,97	39,68	7%	47,90	30%	48,88	32%	22,70	-39%
	3,1	45,55	45,94	1%	58,08	28%	59,53	31%	26,10	-43%

Tabelle D.35: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (35)

Simulation	Mp, sim		Poreh et al. '98					W <sub>s,rechn.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
<b>Sim42</b>	0,6	21,39	19,54	-9%	20,63	-4%	20,93	-2%	11,66	-45%
	1,1	22,98	21,55	-6%	23,55	2%	24,09	5%	12,75	-45%
	2,1	22,48	25,57	14%	29,39	31%	30,42	35%	14,93	-34%
	3,1	28,50	29,59	4%	35,23	24%	36,75	29%	17,12	-40%
<b>Sim43</b>	0,6	39,12	40,28	3%	38,47	-2%	39,30	0%	33,14	-15%
	1,1	42,10	43,47	3%	40,14	-5%	41,67	-1%	34,88	-17%
	2,1	43,55	49,85	14%	43,50	0%	46,41	7%	38,34	-12%
	3,1	47,92	56,23	17%	46,85	-2%	51,15	7%	41,80	-13%
<b>Sim44</b>	0,6	18,47	19,01	3%	19,29	4%	21,27	15%	12,19	-34%
	1,1	20,16	21,52	7%	22,03	9%	25,67	27%	13,93	-31%
	2,1	19,80	26,55	34%	27,53	39%	34,48	74%	17,39	-12%
	3,1	24,91	31,58	27%	33,03	33%	43,28	74%	20,85	-16%
<b>Sim45</b>	0,6	40,57	38,86	-4%	38,73	-5%	39,94	-2%	28,44	-30%
	1,1	44,73	42,49	-5%	42,24	-6%	44,47	-1%	30,93	-31%
	2,1	45,86	49,74	8%	49,26	7%	53,52	17%	35,93	-22%
	3,1	52,87	57,00	8%	56,29	6%	62,57	18%	40,92	-23%
<b>Sim46</b>	0,6	22,74	21,96	-3%	22,09	-3%	25,10	10%	14,11	-38%
	1,1	26,00	24,71	-5%	24,94	-4%	30,46	17%	15,84	-39%
	2,1	26,10	30,21	16%	30,65	17%	41,19	58%	19,31	-26%
	3,1	31,42	35,71	14%	36,36	16%	51,91	65%	22,77	-28%
<b>Sim47</b>	0,6	44,22	44,74	1%	44,57	1%	46,68	6%	32,84	-26%
	1,1	49,76	48,70	-2%	48,40	-3%	52,26	5%	35,34	-29%
	2,1	50,71	56,63	12%	56,05	11%	63,42	25%	40,33	-20%
	3,1	59,06	64,56	9%	63,70	8%	74,59	26%	45,33	-23%

Tabelle D.36: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (36)

Simulation	Mps.sim		Thomas et al.'98				W <sub>s,rechn.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb		W <sub>quer</sub>			W <sub>s</sub>		
			bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>					
Sim7	0,6	24,34	23,29	-4%	23,16	-5%	24,77	2%	15,34	-37%
	1,1	27,48	26,21	-5%	25,97	-5%	28,91	5%	17,42	-37%
	2,1	30,81	32,05	4%	31,60	3%	37,21	21%	21,57	-30%
	3,1	39,66	37,89	-4%	37,22	-6%	45,51	15%	25,73	-35%
Sim8	0,6	27,78	27,06	-3%	27,95	1%	29,42	6%	15,30	-45%
	1,1	29,79	30,36	2%	31,98	7%	34,69	16%	17,38	-42%
	2,1	33,03	36,95	12%	40,05	21%	45,22	37%	21,53	-35%
	3,1	41,11	43,55	6%	48,13	17%	55,75	36%	25,69	-38%
Sim9	0,6	25,83	25,37	-2%	25,66	-1%	28,15	9%	15,94	-38%
	1,1	28,44	28,67	1%	29,19	3%	33,76	19%	18,45	-35%
	2,1	27,76	35,27	27%	36,25	31%	44,98	62%	23,49	-15%
	3,1	34,65	41,86	21%	43,32	25%	56,20	62%	28,52	-18%
Sim10	0,6	28,63	27,90	-3%	28,49	0%	31,24	9%	15,93	-44%
	1,1	31,80	31,55	-1%	32,64	3%	37,69	19%	18,45	-42%
	2,1	31,61	38,86	23%	40,93	29%	50,58	60%	23,48	-26%
	3,1	38,88	46,17	19%	49,22	27%	63,46	63%	28,52	-27%
Sim11	0,6	26,13	24,03	-8%	24,50	-6%	26,10	0%	14,81	-43%
	1,1	28,74	26,95	-6%	27,81	-3%	30,73	7%	16,89	-41%
	2,1	29,43	32,79	11%	34,43	17%	40,01	36%	21,04	-29%
	3,1	35,91	38,63	8%	41,05	14%	49,29	37%	25,20	-30%
Sim12	0,6	23,55	24,09	2%	24,23	3%	26,61	13%	15,42	-35%
	1,1	26,24	27,39	4%	27,64	5%	32,00	22%	17,93	-32%
	2,1	26,86	33,99	27%	34,47	28%	42,78	59%	22,97	-15%
	3,1	32,29	40,58	26%	41,29	28%	53,57	66%	28,00	-13%
Sim13	0,6	29,14	27,05	-7%	28,16	-3%	29,36	1%	15,31	-47%
	1,1	31,91	30,35	-5%	32,39	2%	34,58	8%	17,38	-46%
	2,1	33,05	36,94	12%	40,84	24%	45,02	36%	21,54	-35%
	3,1	39,69	43,54	10%	49,30	24%	55,47	40%	25,69	-35%
Sim14	0,6	26,07	26,29	1%	26,76	3%	28,83	11%	15,98	-39%
	1,1	28,95	29,94	3%	30,80	6%	34,61	20%	18,49	-36%
	2,1	29,92	37,25	24%	38,88	30%	46,15	54%	23,53	-21%
	3,1	37,16	44,56	20%	46,97	26%	57,70	55%	28,56	-23%

Tabelle D.37: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (37)

Simulation	Mp,sim		Thomas et al. '98				W <sub>s,rech.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
								aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>
Sim15	0,6	26,07	22,79	-13%	22,39	-14%	23,09	-11%	16,83	-35%
	1,1	29,48	25,32	-14%	24,59	-17%	25,86	-12%	18,63	-37%
	2,1	33,47	30,39	-9%	29,00	-13%	31,42	-6%	22,23	-34%
	3,1	41,44	35,45	-14%	33,40	-19%	36,98	-11%	25,83	-38%
Sim16	0,6	27,52	25,46	-7%	25,19	-8%	26,65	-3%	17,48	-36%
	1,1	28,85	28,32	-2%	27,83	-4%	30,50	6%	19,66	-32%
	2,1	28,40	34,04	20%	33,11	17%	38,21	35%	24,02	-15%
	3,1	34,54	39,76	15%	38,38	11%	45,91	33%	28,39	-18%
Sim17	0,6	25,32	25,14	-1%	24,81	-2%	26,42	4%	17,98	-29%
	1,1	27,83	28,31	2%	27,70	0%	30,65	10%	20,51	-26%
	2,1	27,42	34,65	26%	33,48	22%	39,12	43%	25,57	-7%
	3,1	32,67	40,99	25%	39,26	20%	47,58	46%	30,64	-6%
Sim18	0,6	24,11	25,78	7%	25,41	5%	27,44	14%	18,40	-24%
	1,1	26,59	29,25	10%	28,56	7%	32,29	21%	21,26	-20%
	2,1	26,13	36,17	38%	34,86	33%	41,99	61%	26,98	3%
	3,1	30,94	43,10	39%	41,17	33%	51,69	67%	32,70	6%
Sim19	0,6	28,62	24,16	-16%	23,93	-16%	24,57	-14%	16,02	-44%
	1,1	30,48	26,34	-14%	25,93	-15%	27,09	-11%	17,39	-43%
	2,1	30,48	30,71	1%	29,92	-2%	32,13	5%	20,14	-34%
	3,1	38,59	35,07	-9%	33,91	-12%	37,17	-4%	22,89	-41%
Sim20	0,6	31,65	26,69	-16%	26,75	-15%	27,71	-12%	16,81	-47%
	1,1	34,85	29,38	-16%	29,51	-15%	31,26	-10%	18,61	-47%
	2,1	35,25	34,78	-1%	35,02	-1%	38,36	9%	22,21	-37%
	3,1	38,81	40,18	4%	40,53	4%	45,47	17%	25,82	-33%
Sim21	0,6	30,53	26,94	-12%	26,86	-12%	28,33	-7%	17,48	-43%
	1,1	32,86	29,95	-9%	29,82	-9%	32,50	-1%	19,66	-40%
	2,1	32,38	35,99	11%	35,73	10%	40,85	26%	24,03	-26%
	3,1	35,11	42,02	20%	41,63	19%	49,19	40%	28,39	-19%

Tabelle D.38: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (38)

Simulation	Mp,sim		Thomas et al. '98					W <sub>s,rech.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
							W <sub>s,rech.</sub>			
Sim22	0,6	28,01	26,48	-5%	26,23	-6%	27,97	0%	17,98	-36%
	1,1	30,87	29,80	-3%	29,33	-5%	32,53	5%	20,51	-34%
	2,1	30,86	36,44	18%	35,54	15%	41,65	35%	25,57	-17%
	3,1	34,10	43,07	26%	41,74	22%	50,77	49%	30,64	-10%
Sim23	0,6	25,63	26,71	4%	26,30	3%	28,49	11%	18,39	-28%
	1,1	28,48	30,31	6%	29,56	4%	33,59	18%	21,25	-25%
	2,1	28,10	37,53	34%	36,08	28%	43,77	56%	26,97	-4%
	3,1	30,54	44,74	46%	42,61	40%	53,96	77%	32,69	7%
Sim24	0,6	33,26	26,20	-21%	26,31	-21%	26,77	-20%	16,02	-52%
	1,1	36,36	28,56	-21%	28,77	-21%	29,60	-19%	17,39	-52%
	2,1	36,87	33,28	-10%	33,67	-9%	35,26	-4%	20,14	-45%
	3,1	41,31	38,00	-8%	38,58	-7%	40,92	-1%	22,89	-45%
Sim25	0,6	32,55	27,96	-14%	28,27	-13%	29,07	-11%	16,81	-48%
	1,1	35,83	30,82	-14%	31,39	-12%	32,86	-8%	18,61	-48%
	2,1	36,34	36,54	1%	37,63	4%	40,42	11%	22,21	-39%
	3,1	42,96	42,26	-2%	43,87	2%	47,99	12%	25,82	-40%
Sim26	0,6	30,38	27,66	-9%	27,72	-9%	29,03	-4%	17,48	-42%
	1,1	32,85	30,83	-6%	30,94	-6%	33,34	1%	19,66	-40%
	2,1	32,92	37,17	13%	37,39	14%	41,95	27%	24,03	-27%
	3,1	39,30	43,50	11%	43,83	12%	50,57	29%	28,39	-28%
Sim26_Br_unen	0,6	32,99	28,33	-14%	27,53	-17%	29,33	-11%	18,62	-44%
	1,1	37,18	31,50	-15%	30,04	-19%	33,33	-10%	20,81	-44%
	2,1	38,64	37,83	-2%	35,06	-9%	41,33	7%	25,17	-35%
	3,1	45,21	44,17	-2%	40,07	-11%	49,33	9%	29,53	-35%
Sim27	0,6	28,44	27,45	-3%	27,24	-4%	29,03	2%	17,98	-37%
	1,1	31,04	30,91	0%	30,53	-2%	33,82	9%	20,51	-34%
	2,1	31,00	37,84	22%	37,11	20%	43,39	40%	25,58	-17%
	3,1	37,22	44,77	20%	43,70	17%	52,95	42%	30,64	-18%

Tabelle D.39: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (39)

Simulation	Mp,sim		Thomas et al. '98				W <sub>s,rech.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
								W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>	
<b>Sim28</b>	0,6	25,69	27,58	7%	27,17	6%	29,47	15%	18,39	-28%
	1,1	28,36	31,33	10%	30,58	8%	34,79	23%	21,25	-25%
	2,1	28,13	38,82	38%	37,39	33%	45,43	62%	26,97	-4%
	3,1	33,35	46,31	39%	44,20	33%	56,07	68%	32,69	-2%
<b>Sim29</b>	0,6	34,97	28,63	-18%	29,24	-16%	29,46	-16%	16,02	-54%
	1,1	38,80	31,16	-20%	32,28	-17%	32,67	-16%	17,39	-55%
	2,1	39,60	36,23	-9%	38,36	-3%	39,11	-1%	20,14	-49%
	3,1	45,73	41,29	-10%	44,44	-3%	45,55	0%	22,89	-50%
<b>Sim30</b>	0,6	25,69	22,41	-13%	20,80	-19%	21,97	-14%	24,96	-3%
	1,1	26,87	24,94	-7%	22,00	-18%	24,14	-10%	26,33	-2%
	2,1	26,11	30,01	15%	24,39	-7%	28,47	9%	29,08	11%
	3,1	31,67	35,07	11%	26,78	-15%	32,80	4%	31,83	0%
<b>Sim31</b>	0,6	34,72	29,52	-15%	30,99	-11%	31,23	-10%	15,62	-55%
	1,1	38,49	32,46	-16%	35,15	-9%	35,59	-8%	17,22	-55%
	2,1	38,56	38,34	-1%	43,48	13%	44,31	15%	20,41	-47%
	3,1	46,02	44,22	-4%	51,80	13%	53,03	15%	23,60	-49%
<b>Sim32</b>	0,6	24,78	25,32	2%	23,76	-4%	25,94	5%	24,86	0%
	1,1	25,79	28,18	9%	25,32	-2%	29,31	14%	26,66	3%
	2,1	23,98	33,90	41%	28,44	19%	36,06	50%	30,26	26%
	3,1	31,31	39,62	27%	31,56	1%	42,81	37%	33,86	8%
<b>Sim33</b>	0,6	32,63	29,88	-8%	29,16	-11%	32,36	-1%	24,86	-24%
	1,1	37,27	33,05	-11%	31,72	-15%	37,59	1%	27,04	-27%
	2,1	37,95	39,39	4%	36,85	-3%	48,06	27%	31,40	-17%
	3,1	44,22	45,72	3%	41,97	-5%	58,52	32%	35,77	-19%
<b>Sim34</b>	0,6	34,02	30,67	-10%	30,31	-11%	34,00	0%	24,94	-27%
	1,1	39,44	34,13	-13%	33,48	-15%	40,24	2%	27,47	-30%
	2,1	40,47	41,06	1%	39,81	-2%	52,72	30%	32,54	-20%
	3,1	46,22	47,99	4%	46,13	0%	65,21	41%	37,60	-19%

Tabelle D.40: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (40)

Simulation	Mp,sim		Thomas et al. '98				W <sub>s,rech.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>				
								W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>	
Sim35	0,6	33,70	31,01	-8%	30,54	-9%	34,91	4%	25,20	-25%
	1,1	39,49	34,75	-12%	33,90	-14%	41,91	6%	28,06	-29%
	2,1	40,85	42,25	3%	40,62	-1%	55,91	37%	33,77	-17%
	3,1	46,62	49,74	7%	47,34	2%	69,91	50%	39,49	-15%
Sim36	0,6	29,09	25,28	-13%	24,23	-17%	25,40	-13%	19,15	-34%
	1,1	30,42	27,81	-9%	25,89	-15%	28,03	-8%	20,52	-33%
	2,1	29,36	32,88	12%	29,20	-1%	33,29	13%	23,27	-21%
	3,1	38,01	37,94	0%	32,51	-14%	38,56	1%	26,02	-32%
Sim37	0,6	33,22	29,37	-12%	29,40	-11%	31,07	-6%	19,22	-42%
	1,1	37,02	32,23	-13%	32,29	-13%	35,35	-5%	21,02	-43%
	2,1	36,69	37,94	3%	38,06	4%	43,90	20%	24,62	-33%
	3,1	44,44	43,66	-2%	43,83	-1%	52,46	18%	28,22	-36%
Sim38	0,6	35,36	31,93	-10%	32,23	-9%	34,39	-3%	19,73	-44%
	1,1	39,91	35,39	-11%	35,95	-10%	39,90	0%	21,91	-45%
	2,1	39,84	42,32	6%	43,38	9%	50,93	28%	26,28	-34%
	3,1	46,36	49,24	6%	50,81	10%	61,96	34%	30,64	-34%
Sim39	0,6	33,77	31,82	-6%	31,52	-7%	34,58	2%	20,29	-40%
	1,1	38,47	35,57	-8%	35,02	-9%	40,63	6%	22,82	-41%
	2,1	39,15	43,06	10%	42,02	7%	52,73	35%	27,89	-29%
	3,1	45,27	50,55	12%	49,02	8%	64,82	43%	32,95	-27%
Sim40	0,6	33,56	31,09	-7%	30,45	-9%	33,92	1%	20,63	-39%
	1,1	38,54	35,11	-9%	33,94	-12%	40,30	5%	23,49	-39%
	2,1	39,62	43,15	9%	40,91	3%	53,06	34%	29,21	-26%
	3,1	45,39	51,19	13%	47,88	5%	65,81	45%	34,92	-23%
Sim41	0,6	33,31	30,21	-9%	32,56	-2%	32,84	-1%	15,32	-54%
	1,1	36,77	33,34	-9%	37,64	2%	38,16	4%	17,02	-54%
	2,1	36,97	39,59	7%	47,82	29%	48,80	32%	20,42	-45%
	3,1	45,55	45,85	1%	57,99	27%	59,44	31%	23,82	-48%

Tabelle D.41: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (41)

Simulation	Mp,sim		Thomas et al. '98					W <sub>s,rechn.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>				
Sim42	0,6	21,39	18,07	-15%	19,17	-10%	19,46	-9%	8,84	-59%
	1,1	22,98	20,08	-13%	22,08	-4%	22,62	-2%	9,93	-57%
	2,1	22,48	24,10	7%	27,92	24%	28,95	29%	12,11	-46%
	3,1	28,50	28,12	-1%	33,76	18%	35,28	24%	14,29	-50%
Sim43	0,6	39,12	39,00	0%	37,18	-5%	38,02	-3%	30,78	-21%
	1,1	42,10	42,19	0%	38,86	-8%	40,39	-4%	32,51	-23%
	2,1	43,55	48,57	12%	42,21	-3%	45,13	4%	35,98	-17%
	3,1	47,92	54,95	15%	45,57	-5%	49,87	4%	39,44	-18%
Sim44	0,6	18,47	17,70	-4%	17,98	-3%	19,97	8%	9,72	-47%
	1,1	20,16	20,22	0%	20,73	3%	24,37	21%	11,45	-43%
	2,1	19,80	25,25	28%	26,23	32%	33,18	68%	14,91	-25%
	3,1	24,91	30,28	22%	31,73	27%	41,98	69%	18,38	-26%
Sim45	0,6	40,57	36,88	-9%	36,74	-9%	37,96	-6%	24,63	-39%
	1,1	44,73	40,50	-9%	40,25	-10%	42,48	-5%	27,13	-39%
	2,1	45,86	47,76	4%	47,28	3%	51,54	12%	32,13	-30%
	3,1	52,87	55,01	4%	54,30	3%	60,59	15%	37,12	-30%
Sim46	0,6	22,74	20,28	-11%	20,40	-10%	23,41	3%	11,10	-51%
	1,1	26,00	23,03	-11%	23,26	-11%	28,78	11%	12,83	-51%
	2,1	26,10	28,52	9%	28,97	11%	39,50	51%	16,30	-38%
	3,1	31,42	34,02	8%	34,68	10%	50,23	60%	19,76	-37%
Sim47	0,6	44,22	41,97	-5%	41,80	-5%	43,91	-1%	28,05	-37%
	1,1	49,76	45,93	-8%	45,63	-8%	49,49	-1%	30,54	-39%
	2,1	50,71	53,86	6%	53,28	5%	60,65	20%	35,54	-30%
	3,1	59,06	61,79	5%	60,93	3%	71,82	22%	40,53	-31%

Tabelle D.42: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (42)

Simulation	M <sub>p,sim</sub>		BSI nach Thomas et al. '95				W <sub>s,rechn.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb		W <sub>quer</sub>			W <sub>s</sub>		
			bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>					
Sim7	0,6	24,34	23,18	-5%	23,05	-5%	24,66	1%	14,08	-37%
	1,1	27,48	26,10	-5%	25,87	-6%	28,81	5%	16,16	-37%
	2,1	30,81	31,94	4%	31,49	2%	37,11	20%	20,31	-30%
	3,1	39,66	37,78	-5%	37,12	-6%	45,40	14%	24,47	-35%
Sim8	0,6	27,78	27,51	-1%	28,39	2%	29,87	8%	14,03	-45%
	1,1	29,79	30,80	3%	32,43	9%	35,13	18%	16,11	-42%
	2,1	33,03	37,40	13%	40,50	23%	45,66	38%	20,27	-35%
	3,1	41,11	43,99	7%	48,57	18%	56,19	37%	24,42	-38%
Sim9	0,6	25,83	25,54	-1%	25,82	0%	28,32	10%	14,69	-38%
	1,1	28,44	28,84	1%	29,35	3%	33,93	19%	17,20	-35%
	2,1	27,76	35,43	28%	36,42	31%	45,15	63%	22,23	-15%
	3,1	34,65	42,03	21%	43,48	25%	56,37	63%	27,27	-18%
Sim10	0,6	28,63	28,41	-1%	29,00	1%	31,76	11%	14,68	-44%
	1,1	31,80	32,07	1%	33,15	4%	38,20	20%	17,20	-42%
	2,1	31,61	39,37	25%	41,44	31%	51,09	62%	22,23	-26%
	3,1	38,88	46,68	20%	49,74	28%	63,98	65%	27,26	-27%
Sim11	0,6	26,13	24,05	-8%	24,52	-6%	26,11	0%	13,46	-43%
	1,1	28,74	26,97	-6%	27,83	-3%	30,75	7%	15,54	-41%
	2,1	29,43	32,81	11%	34,45	17%	40,03	36%	19,69	-29%
	3,1	35,91	38,65	8%	41,06	14%	49,31	37%	23,84	-30%
Sim12	0,6	23,55	24,05	2%	24,18	3%	26,56	13%	14,08	-35%
	1,1	26,24	27,34	4%	27,60	5%	31,95	22%	16,60	-32%
	2,1	26,86	33,94	26%	34,42	28%	42,73	59%	21,63	-15%
	3,1	32,29	40,53	26%	41,25	28%	53,52	66%	26,66	-13%
Sim13	0,6	29,14	27,49	-6%	28,61	-2%	29,80	2%	14,04	-47%
	1,1	31,91	30,79	-4%	32,84	3%	35,03	10%	16,12	-46%
	2,1	33,05	37,39	13%	41,29	25%	45,47	38%	20,27	-35%
	3,1	39,69	43,98	11%	49,74	25%	55,91	41%	24,42	-35%
Sim14	0,6	26,07	26,54	2%	27,00	4%	29,08	12%	14,73	-39%
	1,1	28,95	30,19	4%	31,05	7%	34,85	20%	17,25	-36%
	2,1	29,92	37,50	25%	39,13	31%	46,40	55%	22,28	-21%
	3,1	37,16	44,81	21%	47,22	27%	57,95	56%	27,31	-23%

Tabelle D.43: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (43)

Simulation	Mp,sim		BSI nach Thomas et al. '95						W <sub>s,rech.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>		W <sub>s</sub>				
				W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>				
Sim15	0,6	26,07	23,86	-8%	23,47	-10%	24,16	-7%	17,05	-35%
	1,1	29,48	26,40	-10%	25,67	-13%	26,94	-9%	18,85	-37%
	2,1	33,47	31,46	-6%	30,07	-10%	32,49	-3%	22,46	-34%
	3,1	41,44	36,52	-12%	34,47	-17%	38,05	-8%	26,06	-38%
Sim16	0,6	27,52	26,91	-2%	26,65	-3%	28,10	2%	17,74	-36%
	1,1	28,85	29,77	3%	29,28	2%	31,96	11%	19,92	-32%
	2,1	28,40	35,49	25%	34,56	22%	39,66	40%	24,28	-15%
	3,1	34,54	41,21	19%	39,83	15%	47,37	37%	28,64	-18%
Sim17	0,6	25,32	26,48	5%	26,15	3%	27,76	10%	18,25	-29%
	1,1	27,83	29,65	7%	29,04	4%	31,99	15%	20,78	-26%
	2,1	27,42	35,99	31%	34,82	27%	40,45	48%	25,85	-7%
	3,1	32,67	42,33	30%	40,60	24%	48,92	50%	30,91	-6%
Sim18	0,6	24,11	27,17	13%	26,79	11%	28,83	20%	18,68	-24%
	1,1	26,59	30,63	15%	29,94	13%	33,68	27%	21,54	-20%
	2,1	26,13	37,56	44%	36,25	39%	43,38	66%	27,25	3%
	3,1	30,94	44,48	44%	42,55	38%	53,08	72%	32,97	6%
Sim19	0,6	28,62	25,53	-11%	25,31	-12%	25,94	-9%	16,20	-44%
	1,1	30,48	27,71	-9%	27,30	-10%	28,46	-7%	17,57	-43%
	2,1	30,48	32,08	5%	31,29	3%	33,50	10%	20,32	-34%
	3,1	38,59	36,44	-6%	35,28	-9%	38,54	0%	23,07	-41%
Sim20	0,6	31,65	28,38	-10%	28,44	-10%	29,40	-7%	17,03	-47%
	1,1	34,85	31,07	-11%	31,20	-10%	32,95	-5%	18,83	-47%
	2,1	35,25	36,47	3%	36,71	4%	40,05	14%	22,44	-37%
	3,1	38,81	41,87	8%	42,22	9%	47,16	21%	26,04	-33%
Sim21	0,6	30,53	28,61	-6%	28,53	-7%	29,99	-2%	17,74	-43%
	1,1	32,86	31,62	-4%	31,49	-4%	34,17	4%	19,92	-40%
	2,1	32,38	37,65	16%	37,39	15%	42,51	31%	24,28	-26%
	3,1	35,11	43,69	24%	43,30	23%	50,86	45%	28,65	-19%

Tabelle D.44: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (44)

Simulation	Mp,sim		BSI nach Thomas et al. '95					Ws,rech.	
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer		Ws			
				W <sub>q</sub>	W <sub>s</sub>				
Sim22	0,6	28,01	28,01	27,76	-1%	29,50	5%	18,25	-36%
	1,1	30,87	31,33	30,86	0%	34,06	10%	20,78	-34%
	2,1	30,86	37,97	37,07	23%	43,18	40%	25,85	-17%
	3,1	34,10	44,60	43,27	31%	52,30	53%	30,91	-10%
Sim23	0,6	25,63	28,22	27,81	10%	30,00	9%	18,67	-28%
	1,1	28,48	31,82	31,07	12%	35,10	23%	21,52	-25%
	2,1	28,10	39,04	37,59	39%	45,29	61%	27,24	-4%
	3,1	30,54	46,25	44,12	51%	55,47	82%	32,96	7%
Sim24	0,6	33,26	27,88	27,99	-16%	28,45	-14%	16,19	-52%
	1,1	36,36	30,24	30,44	-17%	31,28	-14%	17,57	-52%
	2,1	36,87	34,96	35,35	-5%	36,94	0%	20,32	-45%
	3,1	41,31	39,68	40,25	-4%	42,60	3%	23,07	-45%
Sim25	0,6	32,55	29,83	30,14	-8%	30,94	-7%	17,03	-48%
	1,1	35,83	32,69	33,26	-9%	34,72	-3%	18,83	-48%
	2,1	36,34	38,41	39,50	6%	42,29	16%	22,44	-39%
	3,1	42,96	44,13	45,74	3%	49,86	16%	26,04	-40%
Sim26	0,6	30,38	29,42	29,48	-3%	30,79	1%	17,74	-42%
	1,1	32,85	32,59	32,70	-1%	35,09	7%	19,92	-40%
	2,1	32,92	38,92	39,14	18%	43,71	33%	24,29	-27%
	3,1	39,30	45,26	45,58	15%	52,33	33%	28,65	-28%
Sim26_Br_unen	0,6	32,99	30,20	29,40	-8%	31,20	-11%	19,07	-44%
	1,1	37,18	33,37	31,91	-10%	35,20	-5%	21,26	-44%
	2,1	38,64	39,70	36,92	3%	43,20	12%	25,62	-35%
	3,1	45,21	46,04	41,94	2%	51,20	13%	29,98	-35%
Sim27	0,6	28,44	29,11	28,91	2%	30,70	8%	18,25	-37%
	1,1	31,04	32,58	32,20	5%	35,48	14%	20,79	-34%
	2,1	31,00	39,50	38,78	27%	45,05	45%	25,85	-17%
	3,1	37,22	46,43	45,36	25%	54,62	47%	30,91	-18%

Tabelle D.45: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (45)

Simulation	Mp,sim		BSI nach Thomas et al. '95				W <sub>s,rech.</sub>		
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>			
Sim28	0,6	25,69	29,21	14%	28,80	31,10	21%	18,67	-28%
	1,1	28,36	32,95	16%	32,20	36,42	28%	21,52	-25%
	2,1	28,13	40,45	44%	39,01	47,06	67%	27,24	-4%
	3,1	33,35	47,94	44%	45,83	57,70	73%	32,96	-2%
Sim29	0,6	34,97	30,68	-12%	31,29	31,50	-10%	16,19	-54%
	1,1	38,80	33,21	-14%	34,33	34,72	-11%	17,57	-55%
	2,1	39,60	38,28	-3%	40,41	41,16	4%	20,32	-49%
	3,1	45,73	43,34	-5%	46,49	47,59	4%	23,06	-50%
Sim30	0,6	25,69	23,42	-9%	21,81	22,98	-15%	26,63	-3%
	1,1	26,87	25,95	-3%	23,01	25,15	-6%	28,00	-2%
	2,1	26,11	31,01	19%	25,40	29,48	13%	30,75	11%
	3,1	31,67	36,08	14%	27,79	33,81	7%	33,50	0%
Sim31	0,6	34,72	30,39	-12%	31,85	32,09	-8%	14,44	-55%
	1,1	38,49	33,33	-13%	36,02	36,45	-5%	16,03	-55%
	2,1	38,56	39,20	2%	44,34	45,17	17%	19,22	-47%
	3,1	46,02	45,08	-2%	52,66	53,89	17%	22,41	-49%
Sim32	0,6	24,78	26,75	8%	25,19	27,37	10%	26,42	0%
	1,1	25,79	29,61	15%	26,75	30,74	19%	28,22	3%
	2,1	23,98	35,33	47%	29,87	37,49	56%	31,82	26%
	3,1	31,31	41,05	31%	32,99	44,24	41%	35,43	8%
Sim33	0,6	32,63	32,01	-2%	31,28	34,49	6%	26,35	-24%
	1,1	37,27	35,18	-6%	33,85	39,72	7%	28,53	-27%
	2,1	37,95	41,52	9%	38,97	50,19	32%	32,89	-17%
	3,1	44,22	47,85	8%	44,10	60,65	37%	37,25	-19%
Sim34	0,6	34,02	32,87	-3%	32,51	36,20	6%	26,37	-27%
	1,1	39,44	36,33	-8%	35,68	42,44	8%	28,91	-30%
	2,1	40,47	43,26	7%	42,01	54,92	36%	33,97	-20%
	3,1	46,22	50,19	9%	48,33	67,41	46%	39,03	-19%

Tabelle D.46: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (46)

Simulation	Mp,sim		BSI nach Thomas et al. '95				W <sub>s,rech.</sub>			
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>		W <sub>s</sub>				
				W <sub>q</sub>	W <sub>h</sub>					
Sim35										
	0,6	33,70	33,21	-1%	32,74	-3%	37,11	10%	26,61	-25%
	1,1	39,49	36,95	-6%	36,10	-9%	44,11	12%	29,46	-29%
	2,1	40,85	44,45	9%	42,82	5%	58,11	42%	35,18	-17%
	3,1	46,62	51,94	11%	49,54	6%	72,11	55%	40,90	-15%
Sim36										
	0,6	29,09	26,77	-8%	25,72	-12%	26,89	-8%	19,84	-34%
	1,1	30,42	29,30	-4%	27,37	-10%	29,52	-3%	21,22	-33%
	2,1	29,36	34,36	17%	30,69	5%	34,78	18%	23,97	-21%
	3,1	38,01	39,43	4%	34,00	-11%	40,04	5%	26,72	-32%
Sim37										
	0,6	33,22	31,47	-5%	31,50	-5%	33,17	0%	19,84	-42%
	1,1	37,02	34,33	-7%	34,39	-7%	37,45	1%	21,64	-43%
	2,1	36,69	40,05	9%	40,16	9%	46,01	25%	25,24	-33%
	3,1	44,44	45,77	3%	45,93	3%	54,56	23%	28,84	-36%
Sim38										
	0,6	35,36	34,34	-3%	34,64	-2%	36,80	4%	20,36	-44%
	1,1	39,91	37,80	-5%	38,36	-4%	42,31	6%	22,54	-45%
	2,1	39,84	44,73	12%	45,79	15%	53,34	34%	26,91	-34%
	3,1	46,36	51,65	11%	53,22	15%	64,37	39%	31,27	-34%
Sim39										
	0,6	33,77	34,15	1%	33,86	0%	36,92	9%	20,95	-40%
	1,1	38,47	37,90	-1%	37,36	-3%	42,96	12%	23,48	-41%
	2,1	39,15	45,39	16%	44,36	13%	55,06	41%	28,54	-29%
	3,1	45,27	52,89	17%	51,36	13%	67,16	48%	33,61	-27%
Sim40										
	0,6	33,56	33,25	-1%	32,61	-3%	36,08	8%	21,28	-39%
	1,1	38,54	37,27	-3%	36,10	-6%	42,46	10%	24,14	-39%
	2,1	39,62	45,31	14%	43,07	9%	55,22	39%	29,85	-26%
	3,1	45,39	53,35	18%	50,04	10%	67,97	50%	35,57	-23%
Sim41										
	0,6	33,31	30,42	-9%	32,77	-2%	33,05	-1%	13,35	-54%
	1,1	36,77	33,55	-9%	37,86	3%	38,37	4%	15,04	-54%
	2,1	36,97	39,81	8%	48,04	30%	49,02	33%	18,44	-45%
	3,1	45,55	46,07	1%	58,21	28%	59,66	31%	21,84	-48%

Tabelle D.47: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (47)

Simulation	Mp, sim		BSI nach Thomas et al. '95					W <sub>s, rech.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>			
<b>Sim42</b>	0,6	21,39	19,58	-8%	20,67	-3%	20,96	8,99	-59%
	1,1	22,98	21,58	-6%	23,59	3%	24,13	10,08	-57%
	2,1	22,48	25,60	14%	29,42	31%	30,45	12,26	-46%
	3,1	28,50	29,62	4%	35,26	24%	36,78	14,44	-50%
<b>Sim43</b>	0,6	39,12	40,42	3%	38,61	-1%	39,44	31,13	-21%
	1,1	42,10	43,61	4%	40,29	-4%	41,81	32,86	-23%
	2,1	43,55	49,99	15%	43,64	0%	46,55	36,33	-17%
	3,1	47,92	56,37	18%	46,99	-2%	51,29	39,79	-18%
<b>Sim44</b>	0,6	18,47	19,04	3%	19,32	5%	21,31	9,88	-47%
	1,1	20,16	21,56	7%	22,07	9%	25,71	11,61	-43%
	2,1	19,80	26,59	34%	27,57	39%	34,51	15,08	-25%
	3,1	24,91	31,62	27%	33,06	33%	43,32	18,54	-26%
<b>Sim45</b>	0,6	40,57	38,97	-4%	38,83	-4%	40,05	24,91	-39%
	1,1	44,73	42,60	-5%	42,35	-5%	44,58	27,41	-39%
	2,1	45,86	49,85	9%	49,37	8%	53,63	32,41	-30%
	3,1	52,87	57,10	8%	56,40	7%	62,68	37,40	-30%
<b>Sim46</b>	0,6	22,74	22,00	-3%	22,12	-3%	25,13	11,50	-51%
	1,1	26,00	24,75	-5%	24,98	-4%	30,50	13,23	-51%
	2,1	26,10	30,24	16%	30,69	18%	41,22	16,69	-38%
	3,1	31,42	35,74	14%	36,40	16%	51,95	20,15	-37%
<b>Sim47</b>	0,6	44,22	44,84	1%	44,68	1%	46,78	28,90	-37%
	1,1	49,76	48,81	-2%	48,50	-3%	52,37	31,39	-39%
	2,1	50,71	56,74	12%	56,15	11%	63,53	36,39	-30%
	3,1	59,06	64,66	9%	63,80	8%	74,69	41,38	-31%

Tabelle D.48: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (48)

Simulation	Mp.sim		Harrison nach Poreh et al.'04						W <sub>s,rechn.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb		Wquer		W <sub>s</sub>			
			bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>					
Sim7	0,6	24,34	25,85	6%	25,69	6%	27,70	14%	15,92	-37%
	1,1	27,48	29,50	7%	29,21	6%	32,88	20%	18,52	-37%
	2,1	30,81	36,80	19%	36,24	18%	43,26	40%	23,71	-30%
	3,1	39,66	44,10	11%	43,27	9%	53,63	35%	28,90	-35%
Sim8	0,6	27,78	30,57	10%	31,68	14%	33,52	21%	15,87	-45%
	1,1	29,79	34,69	16%	36,72	23%	40,10	35%	18,47	-42%
	2,1	33,03	42,93	30%	46,81	42%	53,26	61%	23,66	-35%
	3,1	41,11	51,18	24%	56,90	38%	66,42	62%	28,85	-38%
Sim9	0,6	25,83	28,46	10%	28,81	12%	31,93	24%	16,66	-38%
	1,1	28,44	32,58	15%	33,23	17%	38,94	37%	19,81	-35%
	2,1	27,76	40,83	47%	42,06	52%	52,97	91%	26,10	-15%
	3,1	34,65	49,07	42%	50,89	47%	67,00	93%	32,39	-18%
Sim10	0,6	28,63	31,61	10%	32,35	13%	35,80	25%	16,66	-44%
	1,1	31,80	36,18	14%	37,54	18%	43,85	38%	19,81	-42%
	2,1	31,61	45,32	43%	47,90	52%	59,96	90%	26,10	-26%
	3,1	38,88	54,45	40%	58,27	50%	76,07	96%	32,39	-27%
Sim11	0,6	26,13	26,78	2%	27,37	5%	29,36	12%	15,25	-43%
	1,1	28,74	30,43	6%	31,50	10%	35,16	22%	17,85	-41%
	2,1	29,43	37,73	28%	39,78	35%	46,76	59%	23,04	-29%
	3,1	35,91	45,03	25%	48,05	34%	58,35	62%	28,24	-30%
Sim12	0,6	23,55	26,86	14%	27,03	15%	30,00	27%	16,01	-35%
	1,1	26,24	30,98	18%	31,30	19%	36,74	40%	19,16	-32%
	2,1	26,86	39,22	46%	39,83	48%	50,22	87%	25,45	-15%
	3,1	32,29	47,47	47%	48,36	50%	63,70	97%	31,74	-13%
Sim13	0,6	29,14	30,55	5%	31,95	10%	33,44	15%	15,88	-47%
	1,1	31,91	34,68	9%	37,23	17%	39,97	25%	18,47	-46%
	2,1	33,05	42,92	30%	47,80	45%	53,02	60%	23,66	-35%
	3,1	39,69	51,16	29%	58,36	47%	66,08	66%	28,86	-35%
Sim14	0,6	26,07	29,60	14%	30,19	16%	32,78	26%	16,71	-39%
	1,1	28,95	34,17	18%	35,24	22%	40,00	38%	19,86	-36%
	2,1	29,92	43,31	45%	45,35	52%	54,43	82%	26,15	-21%
	3,1	37,16	52,44	41%	55,46	49%	68,87	85%	32,44	-23%

Tabelle D.49: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (49)

Simulation	Mp,sim		Harrison nach Poreh et al.'04						W <sub>s,rech.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb	W <sub>quer</sub>		W <sub>s</sub>				
				W <sub>quer</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rech.</sub>			
Sim15	0,6	26,07	26,37	1%	25,87	-1%	26,73	3%	18,91	-35%
	1,1	29,48	29,53	0%	28,62	-3%	30,21	2%	21,16	-37%
	2,1	33,47	35,86	7%	34,12	2%	37,15	11%	25,67	-34%
	3,1	41,44	42,19	2%	39,62	-4%	44,10	6%	30,17	-38%
Sim16	0,6	27,52	29,70	8%	29,37	7%	31,19	13%	19,72	-36%
	1,1	28,85	33,27	15%	32,67	13%	36,01	25%	22,45	-32%
	2,1	28,40	40,42	42%	39,26	38%	45,64	61%	27,91	-15%
	3,1	34,54	47,57	38%	45,85	33%	55,27	60%	33,36	-18%
Sim17	0,6	25,32	29,31	16%	28,89	14%	30,90	22%	20,35	-29%
	1,1	27,83	33,27	20%	32,50	17%	36,19	30%	23,51	-26%
	2,1	27,42	41,19	50%	39,73	45%	46,77	71%	29,84	-7%
	3,1	32,67	49,11	50%	46,95	44%	57,35	76%	36,17	-6%
Sim18	0,6	24,11	30,10	25%	29,64	23%	32,18	33%	20,88	-24%
	1,1	26,59	34,43	29%	33,57	26%	38,24	44%	24,45	-20%
	2,1	26,13	43,09	65%	41,45	59%	50,37	93%	31,60	3%
	3,1	30,94	51,75	67%	49,33	59%	62,49	102%	38,75	6%
Sim19	0,6	28,62	28,08	-2%	27,79	-3%	28,58	0%	17,90	-44%
	1,1	30,48	30,80	1%	30,29	-1%	31,73	4%	19,62	-43%
	2,1	30,48	36,26	19%	35,27	16%	38,04	25%	23,05	-34%
	3,1	38,59	41,71	8%	40,26	4%	44,34	15%	26,49	-41%
Sim20	0,6	31,65	31,23	-1%	31,32	-1%	32,51	3%	18,89	-47%
	1,1	34,85	34,61	-1%	34,76	0%	36,95	6%	21,14	-47%
	2,1	35,25	41,35	17%	41,65	18%	45,83	30%	25,64	-37%
	3,1	38,81	48,10	24%	48,54	25%	54,71	41%	30,14	-33%
Sim21	0,6	30,53	31,55	3%	31,46	3%	33,28	9%	19,73	-43%
	1,1	32,86	35,32	7%	35,15	7%	38,50	17%	22,45	-40%
	2,1	32,38	42,86	32%	42,53	31%	48,93	51%	27,91	-26%
	3,1	35,11	50,40	44%	49,92	42%	59,37	69%	33,36	-19%

Tabelle D.50: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (50)

Simulation	Mp,sim		Harrison nach Poreh et al.'04						Ws,rechn.	
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	Ws	Wq	Wb			
								Wq		Wb
Sim22	0,6	28,01	30,98	11%	30,66	9%	32,84	17%	20,35	-36%
	1,1	30,87	35,13	14%	34,54	12%	38,54	25%	23,51	-34%
	2,1	30,86	43,42	41%	42,30	37%	49,94	62%	29,84	-17%
	3,1	34,10	51,72	52%	50,05	47%	61,33	80%	36,17	-10%
Sim23	0,6	25,63	31,26	22%	30,75	20%	33,49	31%	20,87	-28%
	1,1	28,48	35,77	26%	34,82	22%	39,86	40%	24,44	-25%
	2,1	28,10	44,78	59%	42,98	53%	52,59	87%	31,59	-4%
	3,1	30,54	53,80	76%	51,14	67%	65,33	114%	38,73	7%
Sim24	0,6	33,26	30,63	-8%	30,77	-7%	31,34	-6%	17,90	-52%
	1,1	36,36	33,58	-8%	33,83	-7%	34,88	-4%	19,62	-52%
	2,1	36,87	39,48	7%	39,97	8%	41,95	14%	23,05	-45%
	3,1	41,31	45,38	10%	46,10	12%	49,03	19%	26,49	-45%
Sim25	0,6	32,55	32,83	1%	33,22	2%	34,22	5%	18,89	-48%
	1,1	35,83	36,40	2%	37,12	4%	38,95	9%	21,14	-48%
	2,1	36,34	43,55	20%	44,91	24%	48,40	33%	25,64	-39%
	3,1	42,96	50,70	18%	52,71	23%	57,86	35%	30,15	-40%
Sim26	0,6	30,38	32,45	7%	32,53	7%	34,16	12%	19,73	-42%
	1,1	32,85	36,41	11%	36,56	11%	39,55	20%	22,46	-40%
	2,1	32,92	44,33	35%	44,61	35%	50,32	53%	27,91	-27%
	3,1	39,30	52,26	33%	52,66	34%	61,09	55%	33,37	-28%
Sim26_Br_unen	0,6	32,99	33,29	1%	32,29	-2%	34,53	5%	21,16	-44%
	1,1	37,18	37,25	0%	35,43	-5%	39,53	6%	23,88	-44%
	2,1	38,64	45,17	17%	41,70	8%	49,53	28%	29,34	-35%
	3,1	45,21	53,09	17%	47,96	6%	59,54	32%	34,79	-35%
Sim27	0,6	28,44	32,19	13%	31,93	12%	34,17	20%	20,35	-37%
	1,1	31,04	36,52	18%	36,04	16%	40,15	29%	23,52	-34%
	2,1	31,00	45,18	46%	44,27	43%	52,11	68%	29,85	-17%
	3,1	37,22	53,84	45%	52,50	41%	64,07	72%	36,18	-18%

Tabelle D.51: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (51)

Simulation	Mp,sim		Harrison nach Poreh et al.'04					Ws,rech.	
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	Ws	Ws			
							W_s,rech.		
Sim28	0,6	25,69	32,35	31,84	24%	34,71	35%	20,86	-28%
	1,1	28,36	37,03	36,09	27%	41,36	46%	24,44	-25%
	2,1	28,13	46,40	44,61	59%	54,67	94%	31,59	-4%
	3,1	33,35	55,77	53,12	59%	67,97	104%	38,73	-2%
Sim29	0,6	34,97	33,67	34,43	-4%	34,70	-1%	17,90	-54%
	1,1	38,80	36,83	38,23	-5%	38,72	0%	19,62	-55%
	2,1	39,60	43,16	45,83	9%	46,77	18%	23,05	-49%
	3,1	45,73	49,49	53,42	8%	54,81	20%	26,49	-50%
Sim30	0,6	25,69	25,89	23,88	1%	25,34	-1%	29,08	-3%
	1,1	26,87	29,05	25,38	8%	28,05	4%	30,79	-2%
	2,1	26,11	35,38	28,36	36%	33,46	28%	34,23	11%
	3,1	31,67	41,71	31,35	32%	38,88	23%	37,67	0%
Sim31	0,6	34,72	33,58	35,42	-3%	35,72	2%	16,21	-55%
	1,1	38,49	37,26	40,62	-3%	41,16	7%	18,20	-55%
	2,1	38,56	44,61	51,02	16%	52,06	35%	22,19	-47%
	3,1	46,02	51,95	61,43	13%	62,96	37%	26,18	-49%
Sim32	0,6	24,78	29,53	27,58	19%	30,30	11%	28,95	0%
	1,1	25,79	33,10	29,53	28%	34,52	15%	31,20	3%
	2,1	23,98	40,25	33,43	68%	42,95	79%	35,70	26%
	3,1	31,31	47,40	37,33	51%	51,39	64%	40,20	8%
Sim33	0,6	32,63	35,23	34,32	8%	38,32	5%	28,95	-24%
	1,1	37,27	39,19	37,52	5%	44,87	20%	31,68	-27%
	2,1	37,95	47,11	43,93	24%	57,95	53%	37,13	-17%
	3,1	44,22	55,03	50,34	24%	71,03	61%	42,59	-19%
Sim34	0,6	34,02	36,21	35,77	6%	40,38	5%	29,05	-27%
	1,1	39,44	40,54	39,72	3%	48,18	22%	32,22	-30%
	2,1	40,47	49,20	47,63	22%	63,78	58%	38,55	-20%
	3,1	46,22	57,86	55,54	25%	79,38	72%	44,88	-19%

Tabelle D.52: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (52)

Simulation	Mp,sim		Harrison nach Poreh et al. '04						Ws,rech.	
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	Ws	W	Ws,rech.			
								W		W
Sim35	0,6	33,70	36,64	9%	36,06	7%	41,52	23%	29,37	-25%
	1,1	39,49	41,32	5%	40,25	2%	50,27	27%	32,95	-29%
	2,1	40,85	50,69	24%	48,65	19%	67,77	66%	40,09	-17%
	3,1	46,62	60,05	29%	57,05	22%	85,27	83%	47,24	-15%
Sim36	0,6	29,09	29,48	1%	28,16	-3%	29,63	2%	21,81	-34%
	1,1	30,42	32,64	7%	30,23	-1%	32,92	8%	23,53	-33%
	2,1	29,36	38,97	33%	34,37	17%	39,49	35%	26,96	-21%
	3,1	38,01	45,30	19%	38,51	1%	46,07	21%	30,40	-32%
Sim37	0,6	33,22	34,58	4%	34,63	4%	36,71	11%	21,90	-42%
	1,1	37,02	38,16	3%	38,23	3%	42,06	14%	24,15	-43%
	2,1	36,69	45,31	23%	45,45	24%	52,76	44%	28,65	-33%
	3,1	44,44	52,45	18%	52,66	19%	63,45	43%	33,15	-36%
Sim38	0,6	35,36	37,78	7%	38,16	8%	40,86	16%	22,54	-44%
	1,1	39,91	42,11	6%	42,81	7%	47,76	20%	25,27	-45%
	2,1	39,84	50,77	27%	52,10	31%	61,54	54%	30,72	-34%
	3,1	46,36	59,43	28%	61,39	32%	75,33	63%	36,18	-34%
Sim39	0,6	33,77	37,65	11%	37,28	10%	41,10	22%	23,24	-40%
	1,1	38,47	42,33	10%	41,66	8%	48,66	26%	26,40	-41%
	2,1	39,15	51,70	32%	50,41	29%	63,78	63%	32,73	-29%
	3,1	45,27	61,07	35%	59,16	31%	78,90	74%	39,06	-27%
Sim40	0,6	33,56	36,74	9%	35,94	7%	40,28	20%	23,66	-39%
	1,1	38,54	41,76	8%	40,30	5%	48,25	25%	27,24	-39%
	2,1	39,62	51,81	31%	49,01	24%	64,20	62%	34,38	-26%
	3,1	45,39	61,86	36%	57,72	27%	80,14	77%	41,53	-23%
Sim41	0,6	33,31	33,75	1%	36,68	10%	37,03	11%	15,14	-54%
	1,1	36,77	37,66	2%	43,04	17%	43,68	19%	17,27	-54%
	2,1	36,97	45,48	23%	55,76	51%	56,99	54%	21,51	-45%
	3,1	45,55	53,31	17%	68,48	50%	70,29	54%	25,76	-48%

Tabelle D.53: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite W mit den verschiedenen BSP-Formeln (53)

Simulation	Mp,sim		Harrison nach Poreh et al. '04						W <sub>s,rechn.</sub>	
	z	aus Sim	bo+bb	Wquer	W <sub>s</sub>	W <sub>s</sub>	W <sub>s,rechn.</sub>			
<b>Sim42</b>	0,6	21,39	21,53	1%	22,89	7%	23,26	9%	9,99	-59%
	1,1	22,98	24,04	5%	26,54	16%	27,22	18%	11,35	-57%
	2,1	22,48	29,07	29%	33,84	51%	35,13	56%	14,08	-46%
	3,1	28,50	34,09	20%	41,14	44%	43,04	51%	16,81	-50%
<b>Sim43</b>	0,6	39,12	44,50	14%	42,23	8%	43,27	11%	34,23	-21%
	1,1	42,10	48,49	15%	44,33	5%	46,24	10%	36,40	-23%
	2,1	43,55	56,46	30%	48,52	11%	52,16	20%	40,73	-17%
	3,1	47,92	64,44	34%	52,71	10%	58,09	21%	45,05	-18%
<b>Sim44</b>	0,6	18,47	21,07	14%	21,42	16%	23,90	29%	11,08	-47%
	1,1	20,16	24,21	20%	24,85	23%	29,40	46%	13,25	-43%
	2,1	19,80	30,50	54%	31,72	60%	40,41	104%	17,58	-25%
	3,1	24,91	36,78	48%	38,60	55%	51,42	106%	21,91	-26%
<b>Sim45</b>	0,6	40,57	42,91	6%	42,74	5%	44,26	9%	27,61	-39%
	1,1	44,73	47,45	6%	47,13	5%	49,92	12%	30,73	-39%
	2,1	45,86	56,51	23%	55,91	22%	61,23	34%	36,97	-30%
	3,1	52,87	65,58	24%	64,69	22%	72,55	37%	43,22	-30%
<b>Sim46</b>	0,6	22,74	24,28	7%	24,44	7%	28,20	24%	12,81	-51%
	1,1	26,00	27,72	7%	28,01	8%	34,91	34%	14,98	-51%
	2,1	26,10	34,59	33%	35,15	35%	48,32	85%	19,31	-38%
	3,1	31,42	41,47	32%	42,29	35%	61,72	96%	23,64	-37%
<b>Sim47</b>	0,6	44,22	49,28	11%	49,07	11%	51,70	17%	31,87	-37%
	1,1	49,76	54,23	9%	53,85	8%	58,68	18%	35,00	-39%
	2,1	50,71	64,14	26%	63,41	25%	72,63	43%	41,24	-30%
	3,1	59,06	74,05	25%	72,98	24%	86,59	47%	47,48	-31%

Tabelle D.54: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für die unterschiedlichen Annahmen der Breite  $W$  mit den verschiedenen BSP-Formeln (54)

# Anhang E

## Simulationsdaten - Vergleichsrechnungen $M_b$

		$\phi$	Max.	Min.	Sim7	Sim8	Sim9	Sim10	Sim11
Öffnungsweite	$b_o$	[m]			3,00	3,00	4,00	4,00	3,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			2,50	2,50	2,50	2,50	2,80
Sturzhöhe	$h_{sturz}$	[m]			0,30	0,30	0,30	0,30	0,00
Brandraumhöhe	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkonbreite	$b_b$	[m]			2,00	3,00	2,00	3,00	2,00
umströmte Kante	$W = b_o + b_b$	[m]			5,00	6,00	6,00	7,00	5,00
	$W_{quer}$	[m]			4,73	8,12	6,65	8,46	6,03
Brandleistung	$Q_{vent}$	[kW]			1945	1945	1945	1945	1945
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			6,33	6,30	6,39	6,39	5,89
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			12,11	14,88	13,47	15,22	12,73
Einnischung	$\Delta M$	[kg/s]			5,78	8,58	7,08	8,83	6,84
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	131%	1,91	2,36	2,11	2,38	2,16
	Einnischrate aus Simulation		96%	197%	91%	136%	111%	138%	116%
<b>NFPA</b>	$M_b = 2 \times M_w$	[kg/s]			12,66	12,60	12,78	12,77	11,78
	Einnischrate aus Rechnung		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		15%	-33%	5%	-15%	-5%	-16%	-7%
<b>Harrison</b>	$0,2 < h_o/b_o \leq 2,0$	[-]			0,83	0,83	0,63	0,63	0,93
	$(h_{br}/h_o)(b_b/(h_{br}-h_o)) > 2,5$	[-]			7,47	11,20	7,47	11,20	2000,71
	$(M_b/M_w)(b_o/h_{br})$	[-]			2,05	2,53	3,01	3,40	2,32
$M_b = 0,89 \times (h_o/b_o)^{-0,92} \times (h_{br} \times M_w/b_o)$		[kg/s]			6,22	6,19	6,13	6,13	5,21
	Einnischrate aus Rechnung		10%	-14%	-2%	-2%	-4%	-4%	-11%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		43%	-66%	-49%	-58%	-54%	-60%	-59%
<b>Law</b>	$M_b = 0,025 \times (Q \times (b_o + b_b))^2 \wedge (1/3)$	[kg/s]			0,91	1,03	1,03	1,14	0,91
	Einnischrate aus Rechnung		-88%	-94%	-86%	-84%	-84%	-82%	-85%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		94%	-96%	-92%	-93%	-92%	-92%	-93%
<b>BSI DD 240</b>	$M_b = 0,36 \times Q \wedge (1/3) \times (b_o + b_b) \wedge (2/3) \times (0,25 \times h_{sturz} + z)$	[kg/s]			4,93	5,56	5,56	6,17	0,00
	Einnischrate aus Rechnung		5%	-100%	-22%	-12%	-13%	-3%	-100%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		60%	-100%	-59%	-63%	-59%	-59%	-100%

Tabelle E.1: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (1)

		$\phi$	Max.	Min.	Sim12	Sim13	Sim14	Sim15	Sim16
Öffnungsbreite	$b_o$	[m]			4,00	3,00	4,00	3,00	4,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,50	2,50
Sturzhöhe	$h_{sturz}$	[m]			0,00	0,00	0,00	0,30	0,30
Brandraumhöhe	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkonbreite	$b_b$	[m]			2,00	3,00	3,00	2,00	2,00
umströmte Kante	$W = b_o + b_b$	[m]			6,00	6,00	7,00	5,00	6,00
	$W_{quer}$	[m]			6,32	8,71	8,15	4,05	5,32
Brandleistung	$Q_{vent}$	[kW]			1945	1945	1945	1268	1268
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			5,95	6,30	6,42	9,37	9,53
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			12,40	14,87	13,88	13,61	15,50
Einnischung	$\Delta M$	[kg/s]			6,45	8,57	7,46	4,24	5,97
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	297%	2,08	2,36	2,16	1,45	1,63
	Einnischrate aus Simulation		96%	197%	108%	136%	116%	45%	63%
<b>NFPA</b>	$M_b = 2 \times M_w$	[kg/s]			11,91	12,60	12,84	18,74	19,06
	Einnischrate aus Rechnung		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		15%	52%	-4%	-15%	-7%	38%	23%
<b>Harrison</b>	$0,2 <= h_o/b_o <= 2,0$	[-]			0,70	0,93	0,70	0,83	0,63
	$(h_{br}/h_o)(b_b/(h_{br}-h_o)) >= 2,5$	[-]			2000,71	3001,07	3001,07	7,47	7,47
	$(M_b/M_w)(b_o/h_{br})$	[-]			2,98	2,53	3,09	1,56	2,32
$M_b = 0,89 \times (h_o/b_o)^{\wedge} 0,92 \times (h_{br} \times M_w/b_o)$		[kg/s]			5,15	5,58	5,55	9,20	9,15
	Einnischrate aus Rechnung		10%	85%	-14%	-11%	-14%	-2%	-4%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		43%	25%	-58%	-62%	-60%	-32%	-41%
<b>Law</b>									
	$M_b = 0,025 \times (Q \times (b_o + b_b)^{\wedge} 2)^{\wedge} 1/3$	[kg/s]			1,03	1,03	1,14	0,79	0,89
	Einnischrate aus Rechnung		-88%	-82%	-83%	-84%	-82%	-92%	-91%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		94%	92%	-92%	-93%	-92%	-94%	-94%
<b>BSI DD 240</b>									
	$M_b = 0,36 \times Q^{\wedge} 1/3 \times (b_o + b_b)^{\wedge} 2/3 \times (0,25^{\wedge} h_{sturz} + z)$	[kg/s]			0,00	0,00	0,00	4,27	4,82
	Einnischrate aus Rechnung		5%	251%	-100%	-100%	-100%	-54%	-49%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		60%	64%	-100%	-100%	-100%	-69%	-69%

Tabelle E.2: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (2)

		$\phi$	Max.	Min.	Sim17	Sim18	Sim19	Sim20	Sim21
Öffnungsbreite	$b_o$	[m]			5,00	6,00	2,00	3,00	4,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Sturzhöhe	$h_{sturz}$	[m]			0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Brandraumhöhe	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkonbreite	$b_b$	[m]			2,00	2,00	2,00	2,50	2,50
umströmte Kante	$W = b_o + b_b$	[m]			7,00	8,00	4,00	5,50	6,50
	$W_{quer}$	[m]			6,10	6,94	3,50	5,67	6,30
Brandleistung	$Q_{vent}$	[kW]			1268	1268	1268	1268	1268
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			9,60	9,62	8,99	9,35	9,53
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			14,93	15,17	15,10	16,69	16,58
Einmischung	$\Delta M$	[kg/s]			5,33	5,55	6,11	7,33	7,05
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	297%	131%	1,58	1,68	1,78	1,74
	Einmischrate aus Simulation		96%	197%	31%	58%	68%	78%	74%
<b>NFPA</b>	$M_b = 2 \times M_w$	[kg/s]			19,20	19,24	17,98	18,71	19,06
	Einmischrate aus Rechnung		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		15%	52%	-33%	27%	19%	12%	15%
<b>Harrison</b>	$0,2 <= h_o/b_o <= 2,0$	[-]			0,50	0,42	1,25	0,83	0,63
	$(h_{br}/h_o)(b_b/(h_{br}-h_o)) >= 2,5$	[-]			7,47	7,47	7,47	9,33	9,33
	$(M_b/M_w)(b_o/h_{br})$	[-]			2,78	3,38	1,20	1,91	2,48
$M_b = 0,89 \times (h_o/b_o)^{-0,92} \times (h_{br} \times M_w/b_o)$		[kg/s]			9,05	8,94	9,12	9,19	9,15
	Einmischrate aus Rechnung		10%	85%	-6%	-7%	1%	-2%	-4%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		43%	25%	-39%	-41%	-40%	-45%	-45%
<b>Law</b>	$M_b = 0,025 \times (Q \times (b_o + b_b))^2 \wedge 1/3$	[kg/s]			0,99	1,08	0,68	0,84	0,94
	Einmischrate aus Rechnung		-88%	-82%	-90%	-89%	-92%	-91%	-90%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		94%	-92%	-93%	-93%	-95%	-95%	-94%
<b>BSI DD 240</b>	$M_b = 0,36 \times Q \wedge 1/3 \times (b_o + b_b)^2 \wedge 2/3 \times (0,25 \times h_{sturz} + z)$	[kg/s]			5,35	5,84	3,68	4,55	5,09
	Einmischrate aus Rechnung		5%	251%	-100%	-39%	-59%	-51%	-47%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		60%	64%	-100%	-61%	-76%	-73%	-69%

Tabelle E.3: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (3)

		$\phi$	Max.	Min.	Sim22	Sim23	Sim24	Sim25	Sim26
Öffnungsbreite	$b_o$	[m]			5,00	6,00	2,00	3,00	4,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Sturzhöhe	$h_{sturz}$	[m]			0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Brandraumhöhe	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkonbreite	$b_b$	[m]			2,50	2,50	2,50	3,00	3,00
umströmte Kante	$W = b_o + b_b$	[m]			7,50	8,50	4,50	6,00	7,00
	$W_{quer}$	[m]			6,78	7,31	4,77	6,84	7,17
Brandleistung	$Q_{vent}$	[kW]			1268	1268	1268	1268	1268
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			9,60	9,61	8,99	9,35	9,53
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			15,90	15,80	16,62	17,59	17,03
Einnischung	$\Delta M$	[kg/s]			6,30	6,18	7,64	8,24	7,50
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	297%	131%	1,64	1,85	1,88	1,79
	Einnischrate aus Simulation		96%	197%	31%	64%	85%	88%	79%
<b>NFPA</b>	$M_b = 2 \times M_w$	[kg/s]			19,19	19,23	17,98	18,71	19,07
	Einnischrate aus Rechnung		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		15%	52%	-33%	22%	8%	6%	12%
<b>Harrison</b>	$0,2 <= h_o/b_o <= 2,0$	[-]			0,50	0,42	1,25	0,83	0,63
	$(h_{br}/h_o)(b_b/(h_{br}-h_o)) >= 2,5$	[-]			9,33	9,33	9,33	11,20	11,20
	$(M_b/M_w)(b_o/h_{br})$	[-]			2,96	3,52	1,32	2,01	2,55
$M_b = 0,89 \times (h_o/b_o)^{-0,92} \times (h_{br} \times M_w/b_o)$		[kg/s]			9,05	8,94	9,12	9,19	9,15
	Einnischrate aus Rechnung		10%	85%	-14%	-7%	1%	-2%	-4%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		43%	25%	-66%	-43%	-45%	-48%	-46%
<b>Law</b>	$M_b = 0,025 \times (Q \times (b_o + b_b))^2 \wedge (1/3)$	[kg/s]			1,04	1,13	0,74	0,89	0,99
	Einnischrate aus Rechnung		-88%	-82%	-94%	-88%	-92%	-90%	-90%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		94%	-92%	-96%	-93%	-96%	-95%	-94%
<b>BSI DD 240</b>	$M_b = 0,36 \times Q \wedge 1/3 \times (b_o + b_b)^2 \wedge 2/3 \times (0,25 \times h_{sturz} + z)$	[kg/s]			5,60	6,09	3,98	4,82	5,35
	Einnischrate aus Rechnung		5%	251%	-100%	-37%	-56%	-48%	-44%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		60%	64%	-100%	-61%	-76%	-73%	-69%

Tabelle E.4: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (4)



		$\phi$	Max.	Min.	Sim31	Sim32	Sim33	Sim34	Sim35
Öffnungsbreite	$b_o$	[m]			2,00	3,00	4,00	5,00	6,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			2,50	1,30	1,30	1,30	1,30
Sturzhöhe	$h_{sturz}$	[m]			0,30	1,50	1,50	1,50	1,50
Brandraumhöhe	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkonbreite	$b_b$	[m]			3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
umströmte Kante	$W = b_o + b_b$	[m]			5,00	6,00	7,00	8,00	9,00
	$W_{quer}$	[m]			8,42	2,42	5,09	6,99	7,64
Brandleistung	$Q_{vent}$	[kW]			1983	1268	1268	1268	1268
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			6,86	8,96	8,95	8,95	9,01
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			17,20	15,39	18,88	19,24	19,24
Einmischung	$\Delta M$	[kg/s]			10,34	6,43	9,93	10,29	10,23
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	297%	2,51	1,72	2,11	2,15	2,14
	Einmischrate aus Simulation		96%	197%	151%	72%	111%	115%	114%
<b>NFPA</b>	$M_b = 2 \times M_w$	[kg/s]			13,72	17,92	17,90	17,90	18,02
	Einmischrate aus Rechnung		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		15%	52%	-20%	16%	-5%	-7%	-6%
<b>Harrison</b>	$0,2 < h_o/b_o \leq 2,0$	[-]			1,25	0,43	0,33	0,26	0,22
	$(h_{br}/h_o)(b_b/(h_{br}-h_o)) > 2,5$	[-]			11,20	4,31	4,31	4,31	4,31
	$(M_b/M_w)(b_o/h_{br})$	[-]			1,79	1,84	3,01	3,84	4,58
$M_b = 0,89 \times (h_o/b_o)^{\wedge} 0,92 \times (h_{br} \times M_w/b_o)$		[kg/s]			6,96	16,06	15,68	15,40	15,29
	Einmischrate aus Rechnung		10%	85%	1%	79%	75%	72%	70%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		43%	25%	-60%	4%	-17%	-20%	-21%
<b>Law</b>	$M_b = 0,025 \times (Q \times (b_o + b_b)^{\wedge} 2)^{\wedge} 1/3$	[kg/s]			0,92	0,89	0,99	1,08	1,17
	Einmischrate aus Rechnung		-88%	-82%	-87%	-90%	-89%	-88%	-87%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		94%	-92%	-95%	-94%	-95%	-94%	-94%
<b>BSI DD 240</b>	$M_b = 0,36 \times Q^{\wedge} 1/3 \times (b_o + b_b)^{\wedge} 2/3 \times (0,25^{\wedge} h_{sturz} + z)$	[kg/s]			4,96	24,12	26,73	29,22	31,61
	Einmischrate aus Rechnung		5%	251%	-28%	169%	199%	227%	251%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		60%	64%	-71%	57%	42%	52%	64%

Tabelle E.6: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (6)





		$\phi$	Max.	Min.	Sim45	Sim46	Sim47
Öffnungsbreite	$b_o$	[m]			4,00	4,00	4,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			2,50	1,90	1,90
Sturzhöhe	$h_{sturz}$	[m]			0,30	0,90	0,90
Brandraumhöhe	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80
Balkonbreite	$b_b$	[m]			3,00	4,00	4,00
umströmte Kante	$W = b_o + b_b$	[m]			7,00	8,00	8,00
	$W_{quer}$	[m]			6,67	8,47	7,58
Brandleistung	$Q_{gent}$	[kW]			1901	634	1901
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			13,75	4,93	13,43
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			22,83	12,72	26,73
Einmischung	$\Delta M$	[kg/s]			9,07	7,79	13,30
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	131%	1,66	2,58	1,99
	Einmischrate aus Simulation		96%	31%	66%	158%	99%
<b>NFPA</b>	$M_b = 2 \times M_w$	[kg/s]			27,51	9,86	26,86
	Einmischrate aus Rechnung		100%	100%	100%	100%	100%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		15%	-33%	21%	-22%	0%
<b>Harrison</b>	$0,2 <= h_o/b_o <= 2,0$	[-]			0,63	0,48	0,48
	$(h_{br}/h_o)(b_b/(h_{br}-h_o)) >= 2,5$	[-]			11,20	6,55	6,55
	$(M_b/M_w)(b_o/h_{br})$	[-]			2,37	3,69	2,84
$M_b = 0,89 \times (h_o/b_o)^{-0,92} \times (h_{br} \times M_w/b_o)$		[kg/s]			13,20	6,09	16,60
	Einmischrate aus Rechnung		10%	-14%	-4%	24%	24%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		43%	-66%	-42%	-52%	-38%
<b>Law</b>							
$M_b = 0,025 \times (Q \times (b_o + b_b)^2)^{1/3}$		[kg/s]			1,13	0,86	1,24
	Einmischrate aus Rechnung		-88%	-94%	-92%	-83%	-91%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		94%	-96%	-95%	-93%	-95%
<b>BSI DD 240</b>							
$M_b = 0,36 \times Q^{1/3} \times (b_o + b_b)^2 / 3 \times (0,25 \times h_{sturz} + z)$		[kg/s]			6,12	13,92	20,07
	Einmischrate aus Rechnung		5%	-100%	-56%	182%	49%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		60%	-100%	-73%	9%	-25%

Tabelle E.9: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (9)

		$\phi$	Max.	Min.	Sim7	Sim8	Sim9	Sim10	Sim11
Öffnungsweite	$b_o$	[m]			3,00	3,00	4,00	4,00	3,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			2,50	2,50	2,50	2,50	2,80
Sturzhöhe	hSturz	[m]			0,30	0,30	0,30	0,30	0,00
Brandraumbreite	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	$b_b$	[m]			2,00	3,00	2,00	3,00	2,00
umströmte Kante	$W=b_o+bb$	[m]			5,00	6,00	6,00	7,00	5,00
	$W_{quer}$	[m]			4,73	8,12	6,65	8,46	6,03
Brandleistung	$Q_{vent}$	[kW]			1945	1945	1945	1945	1945
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			6,33	6,30	6,39	6,39	5,89
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			12,11	14,88	13,47	15,22	12,73
Einmischung	$\Delta M$	[kg/s]			5,78	8,58	7,08	8,83	6,84
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	297%	131%				
	Einmischrate aus Simulation		96%	197%	31%	136%	111%	138%	116%
<b>Morgan</b>	$\Delta Tw_{max}$	[K]			354	354	355	356	353
	$Tw_{max}$	[K]			646,85	646,88	648,47	648,76	646,50
	Cd mit Sturz	0,6							
	Cd ohne Sturz	1							
	$d_w=((2*M_{w,max})/(2*C_d*(3/2)*b_o*\rho_o*(2*g*delta T_{w,max}*T_o)^{1/2})^{2/3}$	[m]			1,12	1,57	1,31	1,31	0,90
	$M_b=2/3*0,80*(3/2)*(2*g*\Delta T_{w,max}*T_o)^{1/2}*(W*\rho_o)/T_w*d_w^{3/2}$	[kg/s]			8,94	17,78	13,52	15,77	6,44
	Einmischrate aus Rechnung		148%	253%	-2%	182%	112%	147%	9%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		41%	168%	-53%	20%	0%	4%	-49%
<b>Thomas nach Morgan</b>									
	$M_b=2/3*0,80*(2*g*\Delta T_{w,max}*T_o)^{1/2}*(W*\rho_o)/T_w*d_w^{3/2}$	[kg/s]			7,68	15,29	11,63	13,56	5,54
	Einmischrate aus Rechnung		114%	203%	-15%	143%	82%	112%	-6%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		27%	131%	-59%	3%	-14%	-11%	-57%
<b>Potenzfunktion in Anlehnung an Harrison</b>	$bo/hbr$	[-]			1,07	1,07	1,43	1,43	1,07
	$(M_b/M_w)*(b_o/h_{br})$	[-]			2,05	2,53	3,01	3,40	2,32
	$h_{sturz}/(b_o+b_b)$	[-]			0,06	0,05	0,05	0,04	0,01
	Faktor f	[-]			0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067
	Exponent e	[-]			0,9231	0,9231	0,9231	0,9231	0,9231
	$M_b=f*M_w*((b_o+b_b)/h_{sturz})^e*(b_o+b_b)/b_o$	[kg/s]			8,84	12,49	9,50	12,78	
	Einmischrate aus Rechnung		91%	145%	36%	98%	49%	100%	
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		12%	59%	-30%	-16%	-29%	-16%	

Tabelle E.10: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (10)

		$\phi$	Max.	Min.	Sim12	Sim13	Sim14	Sim15	Sim16
Öffnungsbreite	$b_o$	[m]			4,00	3,00	4,00	3,00	4,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,50	2,50
Sturzhöhe	hSturz	[m]			0,00	0,00	0,00	0,30	0,30
Brandraumhöhe	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	$b_b$	[m]			2,00	3,00	3,00	2,00	2,00
umströmte Kante	$W=b_o+bb$	[m]			6,00	6,00	7,00	5,00	6,00
	$W_{quer}$	[m]			6,32	8,71	8,15	4,05	5,32
Brandleistung	$Q_{vent}$	[kW]			1945	1945	1945	1268	1268
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			5,95	6,30	6,42	9,37	9,53
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			12,40	14,87	13,88	13,61	15,50
Einmischung	$\Delta M$	[kg/s]			6,45	8,57	7,46	4,24	5,97
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	297%	2,08	2,36	2,16	1,45	1,63
<b>Morgan</b>	Einmischrate aus Simulation		96%	197%	108%	136%	116%	45%	63%
	$\Delta Tw_{max}$	[K]			355	353	355	160	160
	$T_{w,max}$	[K]			647,75	646,34	647,54	452,91	453,11
	Cd mit Sturz	0,6							
	Cd ohne Sturz	1							
	$d_w=((2*M_{w,max})/(2*C_d*(3/2)*b_o*\rho_0*(2*g*\delta T_{w,max}*T_{p_0})^{1/2}))^{2/3}$	[m]			0,75	0,94	0,79	2,10	1,76
	$M_b=2/3*0,80*(3/2)*(2*g*\delta T_{w,max}*T_{p_0})^{1/2}*(W*\rho_0)/T_w*d_w^{1,3}$	[kg/s]			5,86	8,27	7,37	22,04	20,17
	Einmischrate aus Rechnung		148%	253%	-2%	31%	15%	135%	112%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		41%	168%	-53%	-44%	-47%	62%	30%
<b>Thomas nach Morgan</b>									
	$M_b=2/3*0,80*(2*g*\delta T_{w,max}*T_{p_0})^{1/2}*(W*\rho_0)/T_w*d_w^{1,3}$	[kg/s]			5,04	7,11	6,34	18,95	17,35
	Einmischrate aus Rechnung		114%	203%	-15%	13%	-1%	102%	82%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		27%	131%	-59%	-52%	-54%	39%	12%
<b>Potenzfunktion in Anlehnung an Harrison</b>	$bo/h_{br}$	[-]			1,43	1,07	1,43	1,07	1,43
	$(M_b/M_w)*(b_o/h_{br})$	[-]			2,98	2,53	3,09	1,56	2,32
	$h_{sturz}/(b_o+b_b)$	[-]			0,00	0,00	0,00	0,06	0,05
	Faktor f	[-]			0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067
	Exponent e	[-]			0,9231	0,9231	0,9231	0,9231	0,9231
	$M_b=f*M_w*((b_o+b_b)/h_{sturz})^e*(b_o+b_b)/b_o$	[kg/s]						13,09	14,18
	Einmischrate aus Rechnung		91%	145%	36%			40%	49%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		12%	59%	-30%			-4%	-9%

Tabelle E.11: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (11)

		$\phi$	Max.	Min.	Sim17	Sim18	Sim19	Sim20	Sim21
Öffnungsbreite	$b_o$	[m]			5,00	6,00	2,00	3,00	4,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Sturzhöhe	$h_{Sturz}$	[m]			0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Brandraumhöhe	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	$b_b$	[m]			2,00	2,00	2,00	2,50	2,50
umströmte Kante	$W=b_o+bb$	[m]			7,00	8,00	4,00	5,50	6,50
	$W_{quer}$	[m]			6,10	6,94	3,50	5,67	6,30
Brandleistung	$Q_{vent}$	[kW]			1268	1268	1268	1268	1268
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			9,60	9,62	8,99	9,35	9,53
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			14,93	15,17	15,10	16,69	16,58
Einmischung	$\Delta M$	[kg/s]			5,33	5,55	6,11	7,33	7,05
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	297%	131%	1,58	1,68	1,78	1,74
	Einmischrate aus Simulation		96%	197%	31%	58%	68%	78%	74%
<b>Morgan</b>	$\Delta Tw_{max}$	[K]			160	162	160	160	160
	$Tw_{max}$	[K]			453,29	454,80	452,71	452,96	453,41
	Cd mit Sturz	0,6							
	Cd ohne Sturz	1							
	$d_w = ((2 * M_{w,max}) / (2 * C_d * \Delta T_w * \rho_0 * (2 * g * \Delta T_w * \rho_0)^{1/2}) * T_{w,max} * T_{p_0})^{1/2} * (1/2)^{1/2} * (2/3)$	[m]			1,52	1,35	2,68	2,10	1,76
	$M_b = 2/3 * 0,80 * (3/2)^{1/2} * (2 * g * \Delta T_w * \rho_0)^{1/2} * (W * \rho_0) / T_w * d_w * \Delta T_w^{1/3}$	[kg/s]			18,96	18,11	25,37	24,20	21,86
	Einmischrate aus Rechnung		148%	253%	98%	88%	182%	159%	129%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		41%	168%	-53%	19%	68%	45%	32%
<b>Thomas nach Morgan</b>									
	$M_b = 2/3 * 0,80 * (2 * g * \Delta T_w * \rho_0)^{1/2} * (W * \rho_0) / T_w * d_w * \Delta T_w^{1/2}$	[kg/s]			16,31	15,57	21,82	20,81	18,80
	Einmischrate aus Rechnung		114%	203%	-15%	62%	143%	123%	97%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		27%	131%	-59%	3%	45%	25%	13%
<b>Potenzfunktion in Anlehnung an Harrison</b>	$bo/hbr$	[-]			1,79	2,14	0,71	1,07	1,43
	$(M_b/M_w) * (b_o/h_{br})$	[-]			2,78	3,38	1,20	1,91	2,48
	$h_{Sturz}/(b_o+b_b)$	[-]			0,04	0,04	0,08	0,05	0,05
	Faktor f	[-]			0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067
	Exponent e	[-]			0,9231	0,9231	0,9231	0,9231	0,9231
	$M_b = f * M_w * ((b_o + b_b) / h_{Sturz})^e * (b_o + b_b) / b_o$	[kg/s]			15,36	16,59	12,26	15,69	16,54
	Einmischrate aus Rechnung		91%	145%	36%	72%	36%	68%	74%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		12%	59%	-30%	9%	-19%	-6%	0%

Tabelle E.12: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (12)

		$\phi$	Max.	Min.	Sim22	Sim23	Sim24	Sim25	Sim26
Öffnungsbreite	$b_o$	[m]			5,00	6,00	2,00	3,00	4,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
Sturzhöhe	$h_{Sturz}$	[m]			0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Brandraumbreite	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	$b_b$	[m]			2,50	2,50	2,50	3,00	3,00
umströmte Kante	$W=b_o+bb$	[m]			7,50	8,50	4,50	6,00	7,00
	$W_{quer}$	[m]			6,78	7,31	4,77	6,84	7,17
Brandleistung	$Q_{vent}$	[kW]			1268	1268	1268	1268	1268
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			9,60	9,61	8,99	9,35	9,53
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			15,90	15,80	16,62	17,59	17,03
Einmischung	$\Delta M$	[kg/s]			6,30	6,18	7,64	8,24	7,50
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	297%	131%	1,64	1,85	1,88	1,79
	Einmischrate aus Simulation		96%	197%	31%	64%	85%	88%	79%
<b>Morgan</b>	$\Delta T_{w,max}$	[K]			161	162	160	160	160
	$T_{w,max}$	[K]			453,78	454,61	452,58	452,99	453,36
	Cd mit Sturz	0,6							
	Cd ohne Sturz	1							
	$d_w = ((2 * M_{w,max}) / (2 * C_d * \rho_0 * (3/2) * b_o * \rho_0 * (2 * g * \Delta T_{w,max} * T_{p0})^{1/2})^{1/2})^{2/3}$	[m]			1,52	1,35	2,68	2,10	1,76
	$M_b = 2/3 * 0,80 * (3/2) * (2 * g * \Delta T_{w,max} * T_{p0})^{1/2} * (W * \rho_0) / T_w * d_w * (3/2)^{1,3}$	[kg/s]			20,32	19,22	28,54	26,40	23,55
	Einmischrate aus Rechnung		148%	253%	-2%	100%	218%	182%	147%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		41%	168%	-53%	22%	72%	50%	38%
<b>Thomas nach Morgan</b>									
	$M_b = 2/3 * 0,80 * (2 * g * \Delta T_{w,max} * T_{p0})^{1/2} * (W * \rho_0) / T_w * d_w * (3/2)$	[kg/s]			17,47	16,53	24,55	22,71	20,25
	Einmischrate aus Rechnung		114%	203%	-15%	72%	173%	143%	112%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		27%	131%	-59%	5%	48%	29%	19%
<b>Potenzfunktion in Anlehnung an Harrison</b>	$bo/hbr$	[-]			1,79	2,14	0,71	1,07	1,43
	$(M_b/M_w) * (b_o/h_{br})$	[-]			2,96	3,52	1,32	2,01	2,55
	$h_{Sturz}/(b_o+b_b)$	[-]			0,04	0,04	0,07	0,05	0,04
	Faktor f	[-]			0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067
	Exponent e	[-]			0,9231	0,9231	0,9231	0,9231	0,9231
	$M_b = f * M_w * ((b_o + b_b) / h_{Sturz})^e * (b_o + b_b) / b_o$	[kg/s]			17,54	18,63	15,38	18,55	19,08
	Einmischrate aus Rechnung		91%	145%	36%	94%	71%	98%	100%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		12%	59%	-30%	18%	-7%	5%	12%

Tabelle E.13: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (13)

		$\phi$	Max.	Min.	Sim26_Br_unen	Sim27	Sim28	Sim29	Sim30
Öffnungsbreite	$b_o$	[m]			4,00	5,00	6,00	2,00	2,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			2,50	2,50	2,50	2,50	1,30
Sturzhöhe	hSturz	[m]			0,30	0,30	0,30	0,30	1,50
Brandraumhöhe	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	$b_b$	[m]			3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
umströmte Kante	$W=bo+bb$	[m]			7,00	8,00	9,00	5,00	5,00
	$W_{quer}$	[m]			4,93	7,41	7,80	6,58	1,62
Brandleistung	$Q_{vent}$	[kW]			1268	1268	1268	1268	1268
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			10,49	9,60	9,61	8,99	8,95
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			17,59	16,56	16,38	18,48	13,29
Einmischung	$\Delta M$	[kg/s]			7,10	6,96	6,77	9,49	4,34
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	297%	131%	1,72	1,70	2,06	1,49
<b>Morgan</b>	Einmischrate aus Simulation		96%	197%	31%	72%	70%	106%	49%
	$\Delta Tw_{max}$	[K]			149	161	162	160	163
	$T_{w,max}$	[K]			441,73	453,90	454,66	452,59	456,41
	Cd mit Sturz	0,6							
	Cd ohne Sturz	1							
	$d_w = ((2 * M_{w,sim.} * T_{w,max}) / (2 * C_d * \Delta T_{w,max} * T_o))^{(1/2)} * (W^{*} / T_o)^{(1/2)} * (1/2)^{(2/3)}$	[m]			1,89	1,52	1,35	2,68	2,67
	$M_b = 2/3 * 0,80 * (3/2) * (2 * g * \Delta T_{w,max} * T_o)^{(1/2)} * (W^{*} / T_o)^{(1/2)} * d_w^{*} (3/2)^{*} 1,3$	[kg/s]			25,90	21,68	20,35	31,71	31,57
	Einmischrate aus Rechnung		148%	253%	-2%	126%	112%	253%	253%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		41%	168%	-53%	31%	24%	72%	138%
<b>Thomas nach Morgan</b>									
	$M_b = 2/3 * 0,80 * (2 * g * \Delta T_{w,max} * T_o)^{(1/2)} * (W^{*} / T_o) / T_w^{*} d_w^{*} (3/2)$	[kg/s]			22,27	18,64	17,50	27,27	27,15
	Einmischrate aus Rechnung		114%	203%	-15%	94%	82%	203%	203%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		27%	131%	-59%	13%	7%	48%	104%
<b>Potenzfunktion in Anlehnung an Harrison</b>	$bo/hbr$	[-]			1,43	1,79	2,14	0,71	0,71
	$(M_b/M_w) * (b_o/h_{br})$	[-]			2,40	3,08	3,65	1,47	1,06
	$h_{sturz}/(b_o+b_b)$	[-]			0,04	0,04	0,03	0,06	0,30
	Faktor f	[-]			0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0470
	Exponent e	[-]			0,9231	0,9231	0,9231	0,9231	0,6316
	$M_b = f * M_w * ((b_o + b_b) / h_{sturz})^e * (b_o + b_b) / b_o$	[kg/s]			20,98	19,87	20,79	18,83	14,01
	Einmischrate aus Rechnung		91%	145%	36%	107%	116%	110%	57%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		12%	59%	-30%	20%	27%	2%	5%

Tabelle E.14: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (14)

		$\phi$	Max.	Min.	Sim31	Sim32	Sim33	Sim34	Sim35
Öffnungsbreite	$b_o$	[m]			2,00	3,00	4,00	5,00	6,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			2,50	1,30	1,30	1,30	1,30
Sturzhöhe	$h_{Sturz}$	[m]			0,30	1,50	1,50	1,50	1,50
Brandraumhöhe	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	$b_b$	[m]			3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
umströmte Kante	$W=bo+bb$	[m]			5,00	6,00	7,00	8,00	9,00
	$W_{quer}$	[m]			8,42	2,42	5,09	6,99	7,64
Brandleistung	$Q_{vent}$	[kW]			1983	1268	1268	1268	1268
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			6,86	8,96	8,95	8,95	9,01
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			17,20	15,39	18,88	19,24	19,24
Einmischung	$\Delta M$	[kg/s]			10,34	6,43	9,93	10,29	10,23
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	297%	131%	1,72	2,11	2,15	2,14
<b>Morgan</b>	Einmischrate aus Simulation		96%	197%	31%	72%	111%	115%	114%
	$\Delta Tw_{max}$	[K]			318	164	162	159	160
	$Tw_{max}$	[K]			611,15	456,85	455,30	452,01	452,57
	Cd mit Sturz	0,6							
	Cd ohne Sturz	1							
	$d_w = ((2 * M_{w,sim.} * T_{w,max}) / (2 * g * \Delta T_{w,max} * T_o))^{1/2} * (W^* / T_w)^{1/2} * (1/2)^{1/2} * (2/3)$	[m]			2,17	2,04	1,68	1,45	1,29
	$M_b = 2/3 * 0,80 * (3/2) * (2 * g * \Delta T_{w,max} * T_o)^{1/2} * (W^* / T_w)^{1/2} * d_w^{1/3} * 1,3$	[kg/s]			24,20	25,28	22,10	20,21	19,08
	Einmischrate aus Rechnung		148%	253%	-2%	182%	147%	126%	112%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		41%	168%	-53%	64%	17%	5%	-1%
<b>Thomas nach Morgan</b>									
	$M_b = 2/3 * 0,80 * (2 * g * \Delta T_{w,max} * T_o)^{1/2} * (W^* / T_w)^{1/2} * T_w * d_w^{1/3} * (3/2)$	[kg/s]			20,82	21,74	19,01	17,38	16,41
	Einmischrate aus Rechnung		114%	203%	-15%	143%	112%	94%	82%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		27%	131%	-59%	41%	1%	-10%	-15%
<b>Potenzfunktion in Anlehnung an Harrison</b>	$bo/h_{br}$	[-]			0,71	1,07	1,43	1,79	2,14
	$(M_b/M_w) * (b_o/h_{br})$	[-]			1,79	1,84	3,01	3,84	4,58
	$h_{Sturz} / (b_o + b_b)$	[-]			0,06	0,25	0,21	0,19	0,17
	Faktor f	[-]			0,0067	0,0470	0,0470	0,0470	0,0470
	Exponent e	[-]			0,9231	0,6316	0,6316	0,6316	0,6316
	$M_b = f * M_w * ((b_o + b_b) / h_{Sturz})^e * (b_o + b_b) / b_o$	[kg/s]			14,37	15,10	16,98	19,30	22,08
	Einmischrate aus Rechnung		91%	145%	36%	69%	90%	116%	145%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		12%	59%	-30%	-2%	-10%	0%	15%

Tabelle E.15: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (15)

		$\phi$	Max.	Min.	Sim36	Sim37	Sim38	Sim39	Sim40
Öffnungsbreite	$b_o$	[m]			2,00	3,00	4,00	5,00	6,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			1,90	1,90	1,90	1,90	1,90
Sturzhöhe	$h_{Sturz}$	[m]			0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Brandraumhöhe	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Balkenbreite	$b_b$	[m]			3,00	3,00	4,00	4,00	4,00
umströmte Kante	$W=bo+bb$	[m]			5,00	6,00	8,00	9,00	10,00
	$W_{quer}$	[m]			2,65	6,09	8,89	8,13	8,08
Brandleistung	$Q_{vent}$	[kW]			1268	1268	1268	1268	1268
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			8,98	8,98	9,23	9,49	9,60
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			15,68	18,76	20,29	19,92	19,04
Einmischung	$\Delta M$	[kg/s]			6,70	9,78	11,06	10,42	9,44
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	297%	131%	2,09	2,20	2,10	1,98
<b>Morgan</b>	Einmischrate aus Simulation		96%	197%	31%	109%	120%	110%	98%
	$\Delta Tw_{max}$	[K]			162	161	161	160	160
	$Tw_{max}$	[K]			454,71	453,74	453,62	452,87	453,44
	Cd mit Sturz	0,6							
	Cd ohne Sturz	1							
	$d_w = ((2 * M_w * T_{w,max}) / (2 * C_d * \Delta T_w * \rho_o * (2 * g * \Delta T_w * \rho_o * T_o)^{0,5} * (1/2)^{0,5}))^{2/3}$	[m]			2,68	2,04	1,72	1,51	1,35
	$M_b = 2/3 * 0,80 * (3/2) * (2 * g * \Delta T_w * \rho_o)^{0,5} * (1/2)^{0,5} * (W * d_w / T_w * d_w)^{0,3}$	[kg/s]	148%	253%	-2%	25,35	26,05	24,12	22,57
	Einmischrate aus Rechnung		41%	168%	-53%	182%	182%	154%	135%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$				102%	35%	28%	21%	19%
<b>Thomas nach Morgan</b>									
	$M_b = 2/3 * 0,80 * (2 * g * \Delta T_w * \rho_o)^{0,5} * (1/2)^{0,5} * (W * d_w / T_w * d_w)^{0,3}$	[kg/s]			27,25	21,81	22,41	20,74	19,41
	Einmischrate aus Rechnung		114%	203%	-15%	143%	143%	118%	102%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		27%	131%	-59%	16%	10%	4%	2%
<b>Potenzfunktion in Anlehnung an Harrison</b>	$bo/hbr$	[-]			0,71	1,07	1,43	1,79	2,14
	$(M_b/M_w) * (b_o/h_{br})$	[-]			1,25	2,24	3,14	3,75	4,25
	$h_{Sturz}/(b_o+b_b)$	[-]			0,18	0,15	0,11	0,10	0,09
	Faktor f	[-]			0,0561	0,0561	0,0561	0,0561	0,0561
	Exponent e	[-]			0,8519	0,8519	0,8519	0,8519	0,8519
	$M_b = f * M_w * ((b_o + b_b) / h_{Sturz})^e * (b_o + b_b) / b_o$	[kg/s]			16,87	15,77	20,71	21,19	21,69
	Einmischrate aus Rechnung		91%	145%	36%	76%	124%	123%	126%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		12%	59%	-30%	-16%	2%	6%	14%

Tabelle E.16: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (16)

		$\phi$	Max.	Min.	Sim41	Sim42	Sim43	Sim44
Öffnungsbreite	$b_o$	[m]			2,00	2,00	2,00	4,00
Öffnungshöhe	$h_o$	[m]			2,50	2,50	2,50	2,50
Sturzhöhe	$h_{Sturz}$	[m]			0,30	0,30	0,30	0,30
Brandraumhöhe	$h_{br}$	[m]			2,80	2,80	2,80	2,80
Balkonbreite	$b_b$	[m]			3,00	3,00	3,00	3,00
umströmte Kante	$W=bo+bb$	[m]			5,00	5,00	5,00	7,00
	$W_{quer}$	[m]			10,36	8,75	1,91	8,00
Brandleistung	$Q_{rent}$	[kW]			2395	634	2535	634
Öffnungsstrom	$M_{w,sim.}$	[kg/s]			5,60	4,78	17,95	4,94
Kantenstrom	$M_{b,sim.}$	[kg/s]			16,65	11,63	23,61	10,81
Einnischung	$\Delta M$	[kg/s]			11,05	6,85	5,65	5,87
	$M_{b,sim.}/M_{w,sim.}$		196%	297%	131%			
	Einnischrate aus Simulation		96%	197%	31%	143%	31%	119%
<b>Morgan</b>	$\Delta T_{w,max}$	[K]			476	159	160	159
	$T_{w,max}$	[K]			768,85	451,55	452,77	452,41
	Cd mit Sturz	0,6						
	Cd ohne Sturz	1						
	$d_w = ((2 * M_w * T_{w,max}) / (2 * C_d * \rho_o * (2 * g * \Delta T_{w,max} * T_o)^{1/2}))^{1/2}$	[m]			1,94	1,76	4,25	1,13
	$M_b = 2/3 * 0,80^{1/3} * (2 * g * \Delta T_{w,max} * T_o)^{1/2} * (W * \rho_o) / T_w * d_w^{1/3} * 1,3$	[kg/s]			19,75	16,86	63,34	12,20
	Einnischrate aus Rechnung		148%	253%	-2%	253%	253%	147%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		41%	168%	-53%	45%	168%	13%
<b>Thomas nach Morgan</b>	$M_b = 2/3 * 0,80^{1/3} * \Delta T_{w,max}^{1/2} * (1/2) * (W * \rho_o) / T_w * d_w^{1/2} * (3/2)$	[kg/s]			16,99	14,50	54,47	10,49
	Einnischrate aus Rechnung		114%	203%	-15%	203%	203%	112%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		27%	131%	-59%	25%	131%	-3%
<b>Potenzfunktion in Anlehnung an Harrison</b>	$b_o/h_{br}$	[-]			0,71	0,71	0,71	1,43
	$(M_b/M_w) * (b_o/h_{br})$	[-]			2,12	1,74	0,94	3,13
	$h_{Sturz}/(b_o+b_b)$	[-]			0,06	0,06	0,06	0,04
	Faktor f	[-]			0,0067	0,0067	0,0067	0,0067
	Exponent e	[-]			0,9231	0,9231	0,9231	0,9231
	$M_b = f * M_w * ((b_o+b_b)/h_{Sturz})^e * (b_o+b_b)/b_o$	[kg/s]			11,73	10,01	37,62	9,88
	Einnischrate aus Rechnung		91%	145%	36%	110%	110%	100%
	Abweichung von $M_{b,sim.}$		12%	59%	-30%	-14%	59%	-9%

Tabelle E.17: Ergebnisse der Vergleichsrechnungen für  $M_b$  (17)

