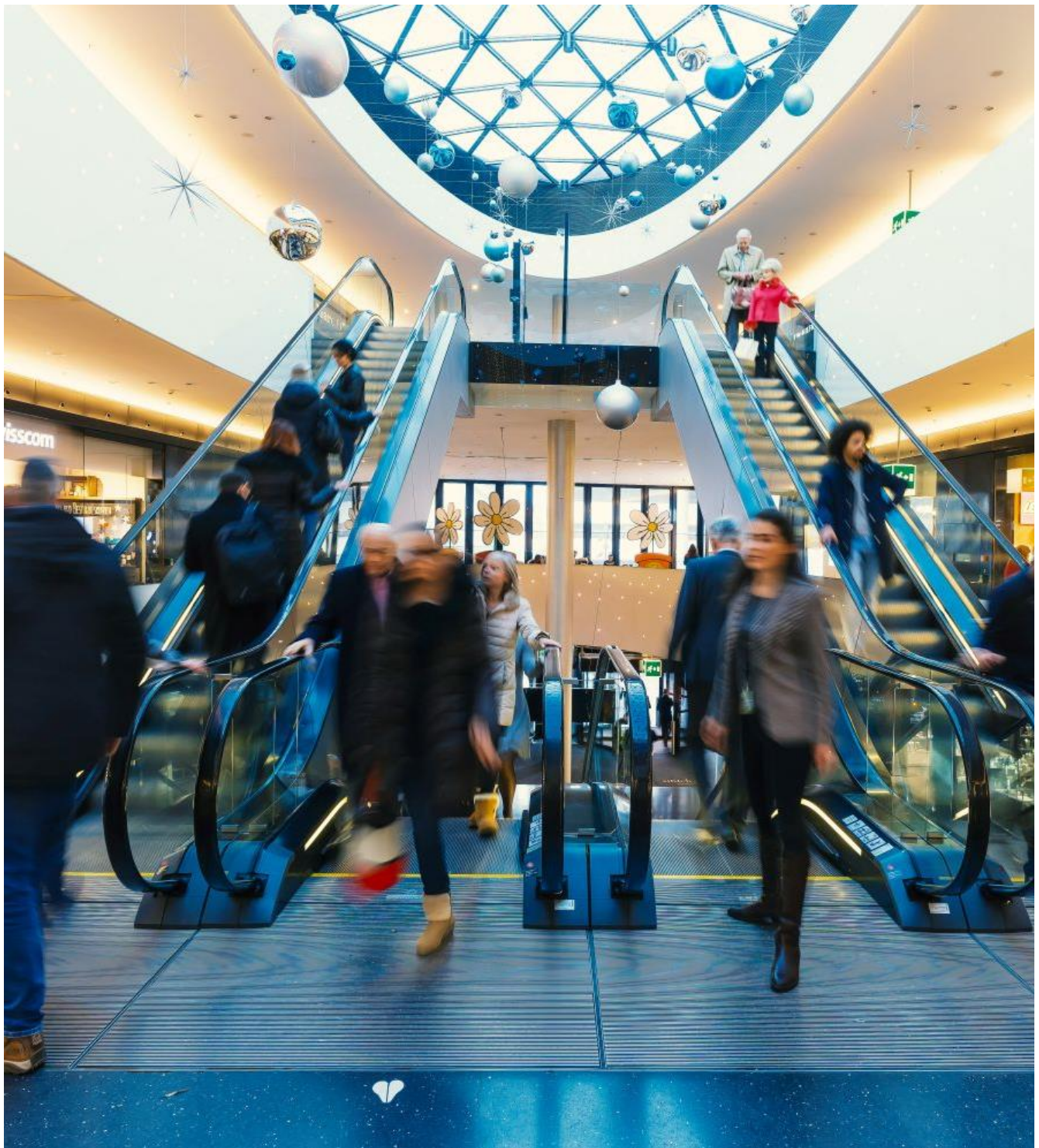


Personendichten und Fluchtwegansforderungen in Verkaufsgeschäften

Schlussbericht
23.09.2020



Trägerverein

espace.mobilité

Markus Neukom

Thomas Schaumberg

espace.mobilité, Präsident

espace.mobilité, Geschäftsführer

Projektteam

Christian Aumayer

Migros-Genossenschafts-Bund (MGB)

Gianluca De Sanctis

EBP Schweiz AG

Christine Steinlin

EBP Schweiz AG

Michael Moos

ASE (Analysis Simulation Engineering) AG

Uri Schtalheim

ASE (Analysis Simulation Engineering) AG

Begleitgruppe VKF

Michael Binz

Vereinigung Kantonaler Gebäudeversicherungen (VKG)

Lars Mülli

Gebäudeversicherung Zürich (GVZ)

László Koller

Basellandschaftliche Gebäudeversicherung (BGV)

Wissenschaftliche Qualitätssicherung

Katharina Fischer

Matrisk GmbH

Zusammenfassung

Die breit angelegte Studie zur Personendichte in Verkaufsgeschäften zeigt, dass die in der Brandschutzrichtlinie von 2015 gesetzten Werte, für viele Verkaufsgeschäfte sehr hoch ausgelegt sind und die Personendichte massgeblich von der Nutzungskategorie abhängt. Die Richtlinie unterscheidet nicht nach Nutzungskategorie, sondern nach Geschosslage. Der Einfluss der Geschosslage, wie es die Richtlinie vorsieht, konnte für die Personenbelegung nicht nachgewiesen werden. Die Studie zeigt, dass die Personenbelegung vor allem von den angebotenen Produkten der Nutzungskategorie abhängig ist. Wenn die Nachfrage für Produkte vorhanden ist, spielt die Geschosslage nur eine untergeordnete Rolle. Allerdings beeinflusst die Geschosslage die Kosten-Wirksamkeit von Massnahmen und ist daher im Bemessungskonzept für Fluchtweg Anforderungen zu berücksichtigen. Aus diesen Gründen wird empfohlen, in der Brandschutzrichtlinie die Personendichte zu aktualisieren und neben der Geschosslage auch nach der Nutzungskategorie zu differenzieren. Auf Grundlage der vorliegenden Studie werden folgende charakteristischen Werte für die Personendichte vorgeschlagen, welche mindestens auf einem 99%-Quantil basieren:

Nutzungskategorie	Charakteristische Personendichte $p_{c,99\%}$ [Pers./m ²]
Non-Food-Verkaufsgeschäfte (inkl. Kaufhäuser und Einkaufszentren)	0.10
Supermärkte	0.15
Hochfrequente Supermärkte	0.30

Basierend auf der statistischen Erhebung der Personendichte und den risikobasierten Schutzziele, die für die Revision der Brandschutzvorschriften 2026 an der Hauptversammlung des IOTH vom 17. September 2020 verabschiedet wurden, wurden optimale Fluchtweg Anforderungen für Verkaufsgeschäfte abgeleitet. Die Fluchtwegbreiten wurden mit einer risikobasierten Betrachtung hergeleitet, da eine deterministische Beurteilung nicht zielführend war. In der risikobasierten Betrachtung wird die Kosten-Wirksamkeit (Grenzkostenansatz) von Fluchtweg Anforderungen beurteilt und so die Fluchtwegbreiten optimiert. Um diese optimalen Fluchtwegbreiten zu erreichen, wird ein Bemessungskonzept vorgeschlagen, das im Grunde auf den bestehenden Anforderungen der VKF BSR 16-15 basiert (insbesondere die Minimalanforderungen an die Breite der Ausgänge nach Art. 2.4.6 und die spezifische Fluchtwegbreite pro Belegung nach Art. 2.4.7). Dafür wird aus der charakteristischen Personendichte $p_{c,99\%}$ und einem partiellen Faktor für präskriptive Anforderungen $\gamma_{\text{präskriptiv}}$ eine Bemessungspersonendichte p_d abgeleitet:

$$p_d = p_{c,99\%} \cdot \gamma_{\text{präskriptiv}}$$

Die risikobasierte Optimierung der Fluchtwegbreiten zeigte, dass die Investitionen, die für die Sicherheit getätigt werden müssen, abhängig von der Nutzungskategorie und der Geschosslage sind. Da ebenerdige Ausgänge günstiger zu erstellen sind als in Ober- und Untergeschossen, ist eine grössere Risikoreduktion durch breitere Ausgänge bei ebenerdigen Fluchtwegen gerechtfertigt. Somit beeinflusst die Geschosslage die Kosten-Wirksamkeit der Fluchtweg Anforderung. Daher sind diese Anforderungen nicht nur von der Nutzungskategorie, sondern auch von der Geschosslage abhängig. Der eingeführte partielle Faktor $\gamma_{\text{präskriptiv}}$ wird so kalibriert, dass er je nach Fluchtsituation (ebenerdig oder über Treppen) mit dem Bemessungsformat der BSR 16-15 die optimalen Fluchtwegbreiten erreicht werden. Das

heisst, dass die Bemessung der Fluchtwegbreiten mit den eingeführten Bemessungspersonendichten analog zum heutigen Verfahren nach BSR 16-15 erfolgt.

Die Bemessungswerte für der Personendichte haben folgende Werte:

Nutzungskategorie	Präskriptive [Pers./m ²]	Bemessungspersonendichte
	Flucht ebenerdig	Flucht über Treppen
Non-Food-Verkaufsgeschäfte (inkl. Kaufhäuser und Einkaufszentren)	0.10	0.10
Supermärkte	0.38	0.15
Hochfrequente Supermärkte	0.45	0.21

Die Bemessungswerte der Personendichte haben insbesondere Einfluss auf die Dimensionierung der Fluchtwegbreiten. Mit diesem Bemessungskonzept reduzieren sich die Breiten der Fluchtwege im Vergleich zu den heutigen Werten. Beispielsweise sind mit den vorgeschlagenen Bemessungswerten für Non-Food-Verkaufsgeschäfte nur noch die Minimalanforderung an die Ausgänge erforderlich, für Supermärkte und hochfrequente Supermärkte können deutliche Reduktionen erzielt werden. Dabei wird stets gewährleistet, dass die Risiken akzeptabel bleiben und die daraus resultierenden Massnahmenkosten in einem angemessenen Verhältnis zur Risikoreduktion liegen.

Die aufgeführten Bemessungswerte der Personendichte sind ausschliesslich für präskriptive Brandschutzvorschriften zu verwenden. Um die risikobasierten Schutzziele auch mit Nachweisverfahren im Brandschutz zu erreichen, muss noch ein übergeordnetes Nachweiskonzept erarbeitet und Bemessungswerte für einen leistungsorientierten Nachweis hergeleitet werden (nicht Bestandteil dieser Studie). Die charakteristischen Personendichten $p_{c,99\%}$ und die risikooptimierten Fluchtwegbreiten können dafür als Grundlage verwendet werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Anwendung von nutzungsspezifischen Personendichten, für die Bemessung von Fluchtwegbreiten, bei Umnutzungen in grösseren Verkaufsnutzungen zu Problemen führen können. Insbesondere in hochfrequentierten Gebäuden (z.B. an Bahnhofseinkaufspassagen oder Einkaufszentren), in denen Verkaufsflächen als Non-Food-Verkaufsgeschäfte bemessen wurden und dann später zu Supermärkten umgenutzt werden. Diesem Problem kann durch eine weitsichtige Planung des Gebäudes begegnet werden. Um eine möglichst flexible Nutzung von Gebäuden zu gewährleisten, können beispielsweise die Fluchtweganforderungen für Verkaufsgeschäfte mit einer höheren Personendichte ausgelegt werden. Dies obliegt der Brandschutzplanung und der Eigenverantwortung des Bauherrn.

Die Notwendigkeit einer Sprinkleranlage für den Personenschutz wurde mit den risikobasierten Schutzzielen ebenfalls untersucht. Das Risiko wird massgebend von der Staudruckproblematik beeinflusst. Der Risikoanteil aus der ASET/RSET-Betrachtung ist gering. Da Löschanlagen nur diesen Risikoanteil reduzieren können, ist deren Effektivität begrenzt. Hinsichtlich des Personenschutzes rechtfertigt die absolute Risikoreduktion durch eine Löschanlage nicht dessen Kosten.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	8
1.1	Ausgangslage	8
1.2	Ziele des Projekts	8
1.3	Aufbau und Strukturierung der Studie	9
2.	Grundlagen	10
2.1	Definitionen	10
2.2	Normative Vorgaben für die Personendichte	11
2.3	Von der Personenbelegung abhängige Fluchtweganforderungen	13
2.4	Bisherige Studien zu Personendichten in Verkaufsgeschäften	14
2.5	Brandereignisse in Verkaufsgeschäften	15
3.	Erhebung der Personendichte in Schweizer Verkaufsgeschäften	21
3.1	Stichprobe	21
3.1.1	Nutzungskategorien	21
3.1.2	Verkaufsflächen	23
3.1.3	Repräsentation der Grundgesamtheit	25
3.2	Ermittlung der Personendichte	26
3.3	Messsystem	27
3.4	Anforderungen an die Messung	29
3.5	Statistische Auswertung der Personendichte	29
3.5.1	Statistische Kennwerte	29
3.5.2	Auswertung der Quantile (Verfahren 1)	29
3.5.3	Auswertung pro Nutzungskategorie (Verfahren 2)	30
3.5.4	Geschosslage	39
3.5.5	Quantil unter Berücksichtigung des Messfehlers	40
3.5.6	Tagesmaximum	41
4.	Festlegung von Bemessungswerten für die Personendichte	43
5.	Methodik zur Überprüfung von präskriptiven Anforderungen	46
5.1	Referenzfälle für die Überprüfung der Fluchtweganforderungen	46
5.1.1	Layouts	46
5.1.2	Nutzungskategorien	47
5.2	Einfluss auf Fluchtweganforderungen	48
5.2.1	Anzahl und Gesamtbreite der Fluchtwege	48

5.2.2	Notwendigkeit von sprachgesteuerten Informationssystemen	49
5.3	Analysemethodik	49
6.	Grundlagen der Modellierung	51
6.1	Modellierung des Brandes und dessen Auswirkung	52
6.1.1	Letalitätskriterien	52
6.1.2	Vergleich und Wahl des Modells	55
6.1.3	Brandparameter	56
6.1.4	Brandszenarien für die Referenzfälle	58
6.1.5	Auswertung der ASET (Available Safe Egress Time)	59
6.2	Modellierung der Evakuation	62
6.2.1	Alarmierungszeit	63
6.2.2	Pre-Evacuation-Time	65
6.2.3	Gehgeschwindigkeiten	67
6.2.4	Fluchtdauer	68
6.2.5	Maximal ertragbarer Staudruck	69
6.2.6	Spezifischer Fluss durch eine Engstelle	72
6.2.7	Auswertung der RSET	74
7.	Deterministische Beurteilung der Fluchtweganforderungen	77
7.1	Definition des Worst-Credible-Case Szenario	78
7.2	Ergebnisse der deterministischen Auswertung	78
7.3	Schlussfolgerung der deterministischen Auswertung	79
8.	Risikobasierte Beurteilung der Fluchtweganforderungen	82
8.1	Risikobasierte Schutzziele	82
8.1.1	Beurteilung mit der Obergrenze für das Nutzerrisiko	83
8.1.2	Beurteilung mit dem ALARP-Ansatz (Grenzkosten)	84
8.2	Berechnung des kollektiven Risikos	84
8.2.1	Wahrscheinlichkeiten	86
8.2.2	Ausmassberechnung	90
8.2.3	Kollektives Risiko	93
8.3	Kostenschätzung	94
8.4	Optimierung der Fluchtwegbreiten	97
8.4.1	Optimierung	97
8.4.2	Bemessungskonzept für präskriptive Fluchtweganforderungen	105
8.5	Notwendigkeit einer Löschanlage für die Personensicherheit	110

8.6	Schlussfolgerung der risikobasierten Beurteilung	112
9.	Schlussfolgerungen und Ausblick	114
9.1	Schlussfolgerungen	114
9.2	Weiterführende Fragestellungen	115
10.	Literaturverzeichnis	116

Anhang

A2.1	Dokumentation des Objektes	
A2.2	Messkonzept	
A2.3	Messgenauigkeit	
A2.4	Datenerfassung	
A3.1	Zufallsvariablen	
A3.2	Lognormalverteilung	
A3.3	Gammaverteilung	
A4.2	Brandszenarien für die Referenzfälle	
A4.4	ASET als Funktion der Brandausbreitungsgeschwindigkeit	
A6	Probabilistische Parameter	
A7	Ergebnisse der deterministischen Auswertung	
A8	Kostenzusammenstellung	
A8.1	Grundannahmen	
A8.2	Kostenzusammenstellung	
A9	Risikofunktionen und optimale Gesamtfluchtwegbreiten	

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Fluchtweganforderungen für Hochbauten in der Schweiz sind in der VKF Brandschutzrichtlinie (BSR) „Flucht- und Rettungswege“ [1] festgelegt. Sie legen u.a. die Fluchtweglänge, die Fluchtwegbreite und die Anzahl der Treppenanlagen fest. Für Bauten mit grosser Personenbelegung (u. a. Verkaufsgeschäfte) ist eine Abschätzung der Anzahl Personen notwendig, um die Fluchtweganforderungen zu dimensionieren. Die Abschätzung erfolgt anhand einer nutzungsabhängigen Personendichte und der Nutzungsfläche. Somit beeinflusst die Personendichte direkt die Dimensionierung der Fluchtwege. Damit legt die Personendichte einerseits das Sicherheitsniveau im Brandfall für die Selbstrettung fest. Andererseits hat die Personendichte dadurch einen direkten Einfluss auf die resultierenden direkten oder indirekten Kosten für den Brandschutz.

Die statistische Voruntersuchung von De Sanctis et al. [2] zeigte, dass die aktuellen Richtwerte der Personendichte für Verkaufsgeschäfte in den VKF Brandschutzrichtlinien sehr konservativ ausgelegt sind. Die Personendichte hängt auch stark vom Typ des Verkaufsgeschäfts ab. Dies spricht für einen angepassten und nach Typ des Verkaufsgeschäfts differenzierten Richtwert. Aufgrund mangelnder Datengrundlagen konnte bis anhin keine abschliessende Empfehlung für eine entsprechend differenzierte Personendichte in den VKF-Brandschutzrichtlinien vorgeschlagen werden. Zudem kann ein realistischer Richtwert auch für leistungsorientierte Brandschutznachweise verwendet werden (Evakuierungsnachweise).

Da die Personendichte in den präskriptiven Vorschriften direkt die Fluchtweganforderungen definiert, führt eine Anpassung dieses Wertes direkt zu einer Anpassung der Fluchtweganforderungen und führt zu einem veränderten Sicherheitsniveau im Vergleich zur heutigen Auslegung. Darum ist es wichtig, dieses Sicherheitsniveau zu quantifizieren und den Einfluss eines realistischeren Richtwerts auf das Sicherheitsniveau auszuzeichnen.

1.2 Ziele des Projekts

Das Hauptziel der Studie ist eine wissenschaftliche Überprüfung und eine pragmatische Überarbeitung der Fluchtweganforderungen für Verkaufsgeschäfte. Dazu gehören die folgenden Teilziele:

- Ermittlung der statistischen Verteilung der Personendichte in unterschiedlichen Nutzungskategorien von Verkaufsgeschäften mittels Personenflussmessungen
- Deterministische Analyse der Brandrisiken (Worst-case-Betrachtung, Fokus auf Schadensausmass)
- Quantifizierung der Brandrisiken in Verkaufsgeschäften (Analyse der Brandeintrittshäufigkeiten und Modellierung des Brandausmasses hinsichtlich des Personenschutzes)
- Kosten-Wirksamkeits-Betrachtungen von Fluchtweganforderungen
- Formulierung von Empfehlungen für Bemessungswerte und Fluchtweganforderungen

Die Ergebnisse dieser Studie sollen als Entscheidungsgrundlage für die Weiterentwicklung der VKF-Brandschutzrichtlinien dienen, insbesondere der anzusetzenden Personendichten für Verkaufsgeschäfte. Damit kann erreicht werden, dass einerseits ein ausreichendes

Sicherheitsniveau gewährleistet und andererseits der Einsatz der Mittel für Brandschutzmassnahmen verhältnismässig ist.

1.3 Aufbau und Strukturierung der Studie

Die Studie besteht aus drei Teilen:

- Teil 1: Grundlagenaufbereitung zu normativen Vorgaben bezüglich der Personendichte und statistische Analyse von Brandereignissen in Verkaufsgeschäften
- Teil 2: Erhebung der Personendichte in Schweizer Verkaufsgeschäften und Vorschlag neuer Bemessungswerte für die Personendichte
- Teil 3: Deterministische und risikobasierte Betrachtung des Einflusses der Bemessungswerte auf die Fluchtweganforderungen durch ingenieurmässige Methoden und risikobasierte Optimierung der Fluchtweganforderungen

Eine schematische Übersicht der Struktur des Berichts ist in Abbildung 1 abgebildet.

Aufbau der Studie zur «Erhebung der Personendichte und Überprüfung der Fluchtweganforderungen in Schweizer Verkaufsgeschäften»			
Teil 1	I Einleitung		Einführung und Gliederung der Studie
	II Grundlagen		Definitionen, Übersicht normativer Vorgaben und Analyse von Brandereignissen
Teil 2	III Erhebung der Personendichte		Wahl der Stichprobe, Messkonzept und statistische Auswertung der Daten
	IV Festlegung von Bemessungswerte		Vorschlag für den Bemessungswert der Personendichte
Teil 3	V Methodik zur Überprüfung der Fluchtweganforderungen		Einfluss auf Fluchtweganforderungen und Überblick über Analysemethodik
	VI Grundlagen der Modellierung		Ingenieurmodelle und Beschreibung der Parameter und deren Unsicherheiten
	VII Deterministische Beurteilung		Brandrisiken für den Worst-Credible-Case analysieren
	VIII Risikobasierte Beurteilung		Brandrisiken (Wahrscheinlichkeit und Schadensausmass) berechnen und Optimierung der Fluchtweganforderungen
	IX Schlussfolgerung und Empfehlungen		Zusammenfassung der Erkenntnisse

Abbildung 1: Aufbau und Strukturierung der Studie.

2. Grundlagen

2.1 Definitionen

Personendichte

Die Personendichte in Verkaufsgeschäften wird definiert als Personenbelegung in einem Brandabschnitt gemittelt durch die Brutto-Geschossfläche des Brandabschnitts. Die Personenbelegung eines Bereichs umfasst alle den Kunden zugänglichen Räume, insbesondere auch Ladenstrassen und andere Verkehrsflächen, ausser WC-Anlagen mit direktem Zugang zu horizontalen oder vertikalen Fluchtwegen.

Verkaufsgeschäfte

Alle Verkaufsflächen in denen Waren oder Dienstleistungen gewerblich zum Verkauf angeboten werden und die der Öffentlichkeit zugänglich sind.

Verkaufsgeschäfte gemäss VKF BSR

Als Verkaufsflächen gemäss BSR gelten Räume mit einer gesamten, brandabschnittsmässigen zusammenhängenden Fläche von mehr als 1'200 m².

Food-Verkaufsgeschäfte

Darunter fallen in dieser Studie Verkaufsgeschäfte mit mehrheitlichem Verkauf folgender Produkte:

- Frischprodukte (Molkereiprodukte, Brot, Früchte/Gemüse/Salate, Fleisch/Geflügel/Fisch, frisch gekühlte Produkte)
- Getränke (mit und ohne Alkohol)
- Lang haltbare Lebensmittel (Konserven, Süswaren, Tiefkühlprodukte, Grundnahrungsmittel, Kochzutaten)

Near-Food-Verkaufsgeschäfte

Darunter fallen in dieser Studie Verkaufsgeschäfte mit mehrheitlichem Verkauf folgender Produkte:

- Personal Care (Körperpflege, Papier- und Hygieneprodukte)
- Tierbedarf

Non-Food-Verkaufsgeschäfte (Fachmärkte)

Darunter fallen in dieser Studie Verkaufsgeschäfte mit mehrheitlichem Verkauf folgender Nutzungen:

- Baumärkte und Gartenbedarf (Do-it-Yourself/Garten/Autozubehör)
- Heimelektronik (Unterhaltungselektronik, Haushaltsgeräte, Tonträger, Telekom, IT, Foto)
- Fashion/Style (Damen/Herren/Kinder/Baby inkl. Sportbekleidung, Schuhe inkl. Sportschuhe, Fashion, Accessoires, Modeschmuck, Mercerie)
- Freizeit (Sporthartwaren und Fahrräder, Reisegepäck, Lederwaren, Spielwaren)
- Haushalt/Wohnen (Möbel, Heimtextilien, Einrichtungsgegenstände, Haushaltswaren, Saison-Deko)

Supermärkte

Verkaufsflächen mit mehrheitlichem Verkauf von Food-Artikel für den täglichen Gebrauch, die aber auch Near-Food- und Non-Food-Artikel im Sortiment haben können.

Hochfrequente Supermärkte

Darunter fallen insbesondere Supermärkte an wichtigen Verkehrsknotenpunkten des öffentlichen Verkehrs¹ mit einem bewilligtem Sonntagsverkauf. In der Regel kann dabei eine totale mittlere Tagesbesucherzahl² von mehr als 7 Personen pro Quadratmeter³ Bruttogeschossfläche pro Tag erwartet werden.

Räume mit grosser Personenbelegung gemäss VKF BSR

Räume, in denen sich mehr als 300 Personen aufhalten können und die kleiner als 1'200 m² Verkaufsfläche sind.

2.2 Normative Vorgaben für die Personendichte

Generell ist die Personendichte abhängig von der Grösse, Nutzung und Lage der Räume. Richtwerte für die Personendichten für Verkaufsgeschäfte in der Schweiz sind im Anhang der Brandschutzrichtlinie (BSR) 16-15 «Flucht- und Rettungswege» [1] festgelegt (vgl. Abbildung 2). Für Verkaufsgeschäfte sind die Personendichten geschossabhängig angegeben. Von diesen Werten kann abgewichen werden, wenn verbindliche Angaben (z.B. Bestuhlungspläne bei Restaurants) gemacht werden können. Bei Verkaufsgeschäften ist dies nur schwer möglich, da oft repräsentative Personenfrequenzmessungen fehlen oder insbesondere bei Neubauten a-priori nicht durchgeführt werden können. Sind keine verbindlichen Angaben vorhanden, sind die Brandschutzplaner auf die Einschätzung und die Bewilligung von der Brandschutzbehörde angewiesen, wenn abweichende Personendichten angesetzt werden. Da Datengrundlagen zu Personendichten fehlen, gibt es grosse Unterschiede in der Auslegung der Personendichten unter den Kantonen.

Nutzung	Personen / m ² [1]	Bemerkungen
Verkaufsgeschäfte:		
• Bereiche mit Zugang ebenerdig	0.5	Für die Ermittlung der Personenbelegung eines Bereiches massgebend sind alle den Kunden zugänglichen Räume, insbesondere auch Ladenstrassen und andere Verkehrsflächen. WC-Anlagen mit direktem Zugang zu horizontalen oder vertikalen Fluchtwegen sind nicht zu messen.
• Bereiche im 1. UG oder 1. OG	0.35	
• Bereiche tiefer als 1. UG oder höher als 1. OG	0.25	

[1] Wenn nicht anders vermerkt, ist geschossweise von der Brandabschnittsfläche auszugehen.

Abbildung 2: Personendichten für Verkaufsgeschäfte (Auszug aus BSR 16-15 [1]).

Spearpoint & Hopkin [4] verglichen verschiedene normative Vorgaben für die Personendichte in Verkaufsgeschäften in nationalen und internationalen Richtlinien (vgl. Abbildung 3). Gemäss den Autoren lässt sich die Herkunft dieser Werte oft nicht mehr genau nachvollziehen. Gewisse Werte sind auf eine umfangreiche Erhebung von Courtney et al. [5] aus dem Jahr 1935 (!) zurückzuführen. Da keine Daten über die Personendichte für Verkaufsgeschäfte zur Verfügung standen, wurde in dieser Untersuchung ein Verkaufsmanager gebeten die maximale

1 Bahnhöfe, Flughäfen und andere Terminals des öffentlichen Verkehrs, die ein Waren- und Dienstleistungsangebot führen, das in erster Linie auf die Bedürfnisse der Reisenden ausgerichtet ist. Der Begriff «Terminals des öffentlichen Verkehrs» umfasst grosse Anfangs- und Endstationen mit starkem Publikumsaufkommen, aber auch eigentliche Knotenpunkte des öffentlichen Verkehrs, sofern diese nicht durch die anderen Begriffe abgedeckt sind [3]. Die Definition eines starken Publikumsaufkommens wird für Verkehrsknoten kantonal oder städtisch spezifiziert. Beispielsweise setzt die Stadt Zürich einen Wert von 15'000 Passagieren fest.

2 Durchschnittliche Anzahl Besucher pro Tag über die Periode von einem Jahr.

3 Nicht zu verwechseln mit der Personendichte. Grundlage für die Festlegung dieses Wertes ist in Kapitel 3.1.1 zu finden.

Personendichte abzuschätzen. Diese abgeschätzten Personendichten sind heute noch in diversen Richtlinien wiederzufinden, u.a. NFPA 101 [6] und IBC [7].

In Abbildung 3 sind aus diversen Quellen [1,4,8] Personendichten in Verkaufsgeschäften für verschiedene Geschosslagen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Personendichte sehr unterschiedlich ausgelegt ist. Für das Erdgeschoss variiert die Dichte zwischen 0.1 Pers./m² und 0.5 Pers./m².

Allerdings sei hier darauf hingewiesen, dass die meisten dieser Regelwerke präskriptiv ausgelegt sind und die Personendichte für die Definition von Fluchtweganforderungen genutzt wird. Darum kann es sein, dass je nach Auslegung der Regelwerke, auch kleinere Personendichten zu höheren, gleichen oder geringeren Fluchtweganforderungen führen können im Vergleich zur Schweiz. Für Versammlungsstätten wurde dies durch einen internationalen Vergleich der Fluchtweganforderungen von Forell et al. [9] dargelegt. Für Verkaufsgeschäfte gibt es keine vergleichbare Studie.

Auffallend ist die unterschiedliche Auslegung der Personendichte bezüglich den Geschosslagen. Einige Richtlinien (z.B. Schweiz, Deutschland) gehen von einer tieferen Personendichte für Unter-/Obergeschosse aus. Andere Richtlinien (z.B. Neuseeland, UK) gehen vom Gegenteil aus. Und bei wieder anderen (Japan, Kanada, IBC) gibt es keine Unterscheidung. Für die unterschiedlichen Auslegungen konnte in der Literatur keine Begründung gefunden werden. Anzunehmen ist, dass durch die Festlegung von geschossweisen unterschiedlichen Personendichten, implizit strengere Fluchtweganforderungen gestellt werden.

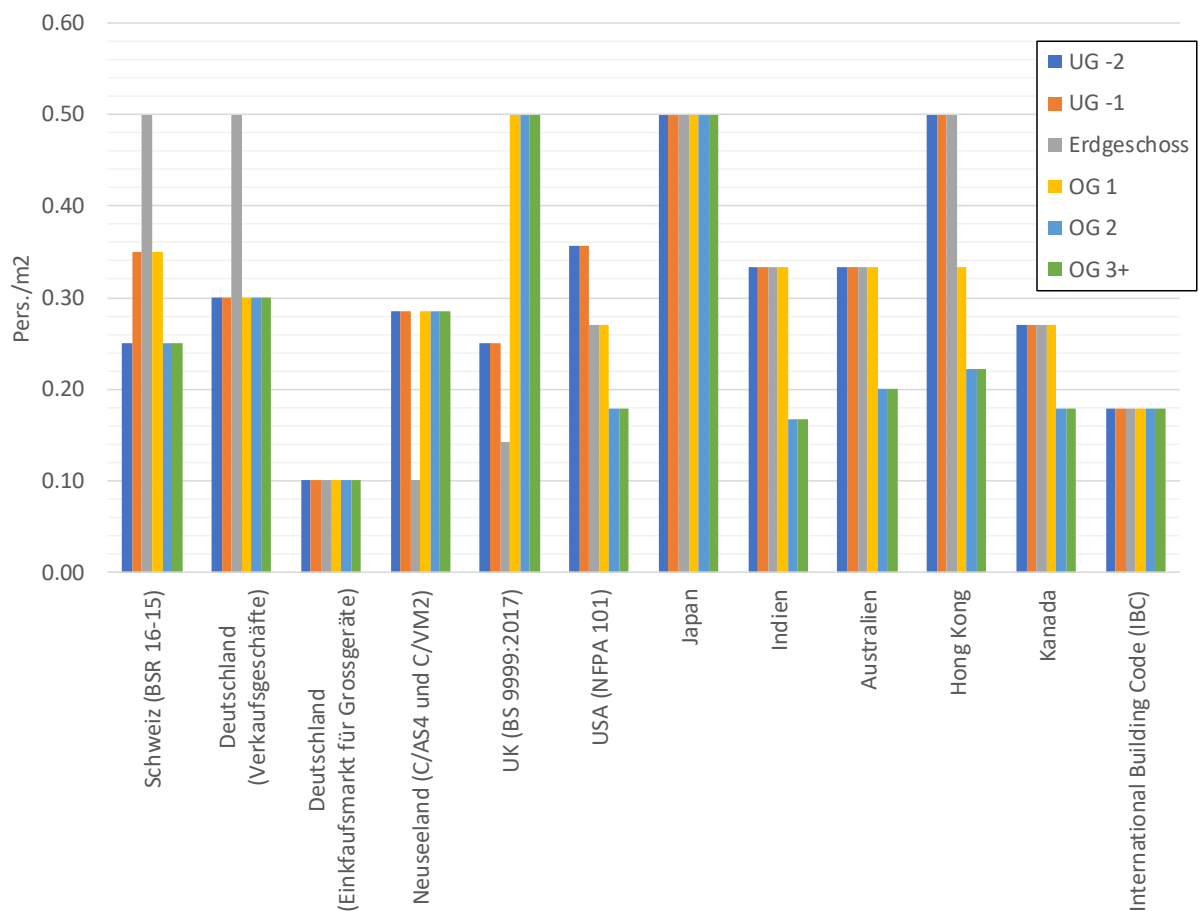


Abbildung 3: Zusammenstellung der Personendichten in verschiedenen Ländern / Richtlinien (nach Angaben gemäss [1,4,8]).

2.3 Von der Personenbelegung abhängige Fluchtweg Anforderungen

Die Personenbelegung in Räumen ist massgebend für die Anzahl und die Bemessung der erforderlichen Fluchtwege (Ausgänge, horizontale und vertikale Fluchtwege). Dieses Kapitel gibt einen Überblick welche Anforderungen von der Personenbelegung massgeblich tangiert werden.

Anzahl Ausgänge

Die Personenbelegung in einem Raum wird als Grundlage für die Anzahl Ausgänge verwendet (BSR 16-15 [1]):

- mit maximal 50 Personen: 1 Ausgang mit 0.9 m Breite
- mit maximal 100 Personen: 2 Ausgänge mit je 0.9 m Breite
- mit maximal 200 Personen: 3 Ausgänge mit je 0.9 m Breite oder
2 Ausgänge mit 0.9 m und 1.2 m Breite
- mit mehr als 200 Personen: mehrere Ausgänge mit mindesten 1.2 m Breite

Fluchtwegbreiten

Die Gesamtbreite aller Fluchtwege hängt direkt von der Anzahl an Personen im Raum ab und wird anhand einer spezifischen Breite bemessen (BSR 16-15 [1]):

- Ebenerdig: 0.6 m pro 100 Personen
- Über Treppen: 0.6 m pro 60 Personen

Wie in Kapitel 6.2.6 ausgeführt wird, ist der ebenerdige Fall massgebender für eine Entfluchtung des Raumes der Brandentstehung. Durch die obige Festlegung verläuft die Entfluchtung über Treppenanlagen mindestens mit der gleichen Kapazität wie im ebenerdigen Fall. Deswegen wird für die Studie nur der ebenerdige Fall analysiert.

Notwendigkeit von sprachgesteuerten Informationssystemen

Die Personenbelegung hat einen Einfluss auf die Notwendigkeit und die Anforderungen an sprachgesteuerte Informationssysteme (BSR 12-15 [10]):

- Räume mit grosser Personenbelegung (für Verkaufsgeschäfte bis 1'200 m²):
 Ab 300 Personen ist ein Informationssystem, mit welchem die öffentlich zugänglichen Bereiche gleichzeitig, ab Datenträger sowie mit individueller Sprachdurchsage, informiert werden können (z.B. Beschallungsanlage), erforderlich.
 Ab 1'000 Personen ist ein elektroakustisches Notfallwarnsystem erforderlich.
- Für Verkaufsgeschäfte nach BSR:
 Ab 1200 m² ist ein Informationssystem, mit welchem die öffentlich zugänglichen Bereiche gleichzeitig, ab Datenträger sowie mit individueller Sprachdurchsage, informiert werden können (z.B. Beschallungsanlage im Verkaufsgeschäft), erforderlich.
 Ab 4800 m² (eingeschossig) resp. 2400 m² (mehrgeschossig) Gesamtverkaufsfläche ist ein elektroakustisches Notfallwarnsystem erforderlich.

Gesamtverkaufsfläche	Kriterium BRS (2015)	Gesamtverkaufsfläche BSR (2015)
Kein System	Personen < 300	bis 600 m ²
Beschallungsanlage	ab 300 Personen bzw. ab 1'200 m ²	ab 600 m ² bis 4800 m ²
elektroakustisches Notfallwarnsystem	ab 4'800 m ² (eingeschossig) ab 2'400 m ² (mehrgeschossig)	ab 4800 m ²

Tabelle 1: Notwendigkeit von sprachgesteuerten Informationssystemen.

2.4 Bisherige Studien zu Personendichten in Verkaufsgeschäften

Unabhängig von der Nutzung ist die Personenzahl eine der wichtigsten Grössen für die Beurteilung der Personensicherheit. Daher wurden in der Vergangenheit zahlreiche Erhebungen für verschiedene Nutzungen durchgeführt. Die meisten dieser Studien basieren auf Personenzählungen während Begehungen, z.B. Zählen der tatsächlichen Anzahl der Gebäudenutzer oder der Anzahl Arbeitsplätze. Eine ähnliche Methodik kann in Gebäuden angewendet werden, in denen die maximale Anzahl der Personen stark von der Kapazität des Gebäudes beeinflusst wird, z.B. in Wohngebäuden [11], Hotels, Krankenhäusern, Schulgebäuden, Theatern, Kinos, etc. Courtney et al. [5] führten bereits im Jahr 1935 Erhebungen für die meisten der aufgeführten Belegungsarten durch.

Im Gegensatz zu dieser Art von Gebäuden, wird die Personenzahl in Verkaufsgeschäften in der Regel nicht durch die Belegungskapazität einer Filiale beeinflusst. Die Anzahl der Personen wird stark von der individuellen Wahl und dem Wunsch einer Person das Geschäft zu besuchen beeinflusst. Dies führt zu einer hohen Variabilität der Personenbelegung in der Zeit. Daher sind

zeitlich zufällige Begehungsuntersuchungen für die Erhebung der Personendichten in Verkaufsgeschäften nicht zielführend. Ein üblicher Ansatz ist die Bewertung der Personendichte an Spitzentagen eines Jahres durchzuführen [12]. Anschließend wird die abgeleitete Personendichte als Bemessungswert verwendet. Der Nachteil dieses Ansatzes ist, dass die gesamte Variabilität der Personenzahl unbekannt bleibt und es unsicher bleibt wie der ermittelte Wert statistisch einzuordnen ist. Die dadurch ermittelte Personenzahl ist damit ungeeignet für einen risikobasierten Ansatz.

Charters et al. [13] analysierten die von der Feuerwehr rapportierten Personendichten in Verkaufsgeschäften in Brandfällen in Grossbritannien. Dabei handelt es sich um die gegenwärtige Personendichte zum Zeitpunkt als die Evakuationsaufforderung durch die Feuerwehr begann. Es ist jedoch unklar wie verlässlich die Daten sind und ob es sich nur um grobe Schätzungen der Feuerwehr handelte oder um konkrete Personenzählung. Beispielsweise wurde bei einem Brandereignis eine Dichte von 0.5 Pers./m² festgestellt. Der Wert entspricht dem damaligen britischen Normwert und die Vermutung liegt nahe, dass dieser für die Datenerhebung verwendet wurde. Allerdings weisen Charters et al. auf eine grosse Streuung der Personendichte hin. Abgesehen von dem einen bereits erwähnten Wert, lagen die anderen 15 untersuchten Brandfälle bei 0.1 Pers./m² (ca. 75%) und bei 0.2 Pers./m² (ca. 19%).

De Sanctis et al. [2] analysierten basierend auf verschiedenen Datenquellen, u.a. Kassensbons (getätigte Verkäufe mit Quittung) und Tagesmessungen, die Personendichte in Schweizer Verkaufsgeschäften. Zur Berechnung der Personendichten waren zahlreiche Annahmen zu treffen, u.a. über die Verweildauer der Kunden, über die Anzahl Personen pro Kassensbon und über die zeitliche Verteilung der Einkäufe. Das Ziel war es, die Variabilität der Personenbelegung zu ermitteln und die Notwendigkeit einer genaueren Datenerhebung für die Ermittlung der Personendichte in Verkaufsgeschäften aufzuzeigen. Dabei wurde postuliert, dass eine erhebliche Senkung der Personendichte für Verkaufsgeschäfte der VKF Richtlinien erreicht werden könnte und der Grundstein für die vorliegende Studie wurde gelegt.

2.5 Brandereignisse in Verkaufsgeschäften

Seit mehreren Jahren führt die IRV eine Datenbank mit Brandereignissen von Gebäuden und deren Schadenfolgen (Personenschäden und Gebäudeschäden). Basierend auf dieser Datenbank gab es verschiedene statische Auswertungen [14,15]. Die statistische Auswertung der Brände basiert auf den von der VKF definierten Zweckbestimmungen und der Schadenursache. Verkaufsgeschäfte fallen unter die Zweckbestimmung «Handel». Darunter wird unterschieden zwischen Bränden in Läden, Handels- und Warenhäuser und Bränden in Lagergebäuden.

Brandursachen und Todesfälle in Verkaufsgeschäfte

Fischer et al. [15] wertete die IRV-Schadenstatistik unter anderem bezüglich der Anzahl Todesopfer (Abbildung 4) und Schadenursache (Abbildung 5) für den Zeitraum zwischen 2000 bis 2007 statistisch aus. Todesfälle in Verkaufsgeschäfte treten im Vergleich zu den anderen Todesfällen (insb. in Wohngebäuden) sehr selten auf (<1% aller Brandtote). Zudem wurde die Häufigkeit der Schadenursache anhand des relativen Anteils am Gesamtschaden ermittelt (vgl. Abbildung 5).

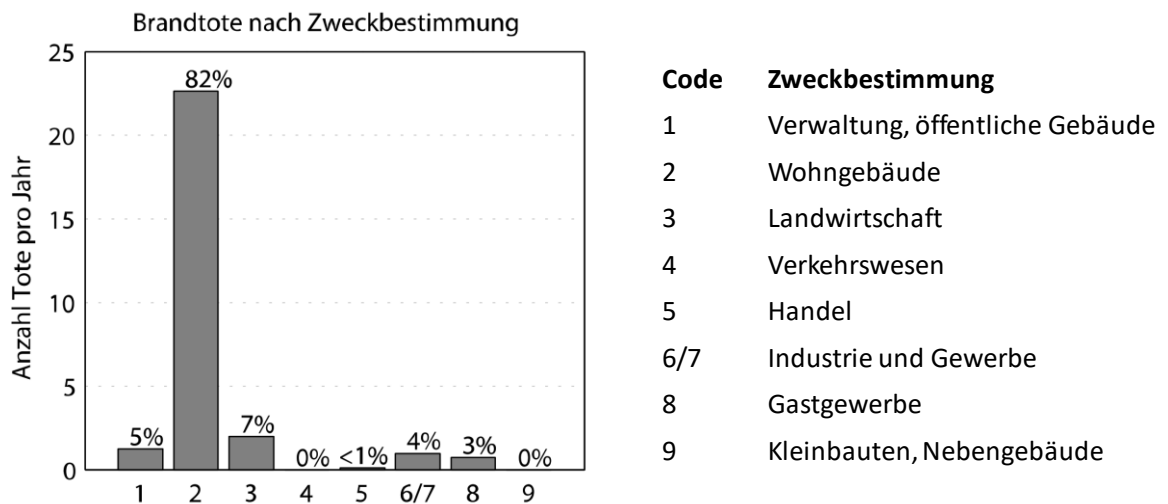


Abbildung 4: Anzahl zivile Todesopfer pro Jahr nach Zweckbestimmung (VKF-Todesfallstatistik 2000-2007, 8-Jahres-Durchschnitt, aus [15]).

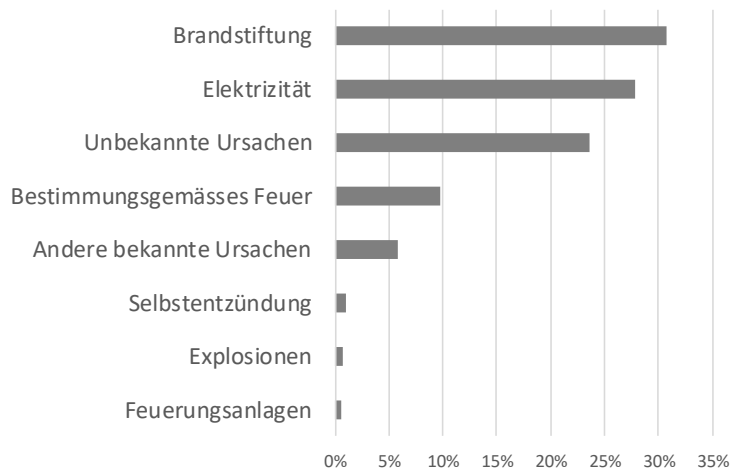


Abbildung 5: Schadenursachen bezogen auf der Gesamtschadensumme für den Zweck «Handel» (aus [15] ohne Blitzschläge).

Einer der beiden grössten Einzelhändler der Schweiz erhebt seit 2010 Brandfälle in deren Filialen. Im Zeitraum von 2010 bis 2016 wurden 35 Brände registriert (ohne Blitzschläge). Dabei werden nur Brände in öffentlich zugänglichen Bereichen (z.B. Verkauf, Baumarkt, Gastronomie – nicht aber Anlieferung und Einstellhallen) berücksichtigt. Für diese Brände sind u.a. Informationen enthalten bezüglich:

- Brandursache (gemäss VKF Codierung)
- Datum des Brandes
- Verkaufsfläche
- Nutzung (Verkauf, Baumarkt, Gastronomie, etc.)

In diesem Zeitraum wurden keine Todesfälle in Verkaufsgeschäften verzeichnet.

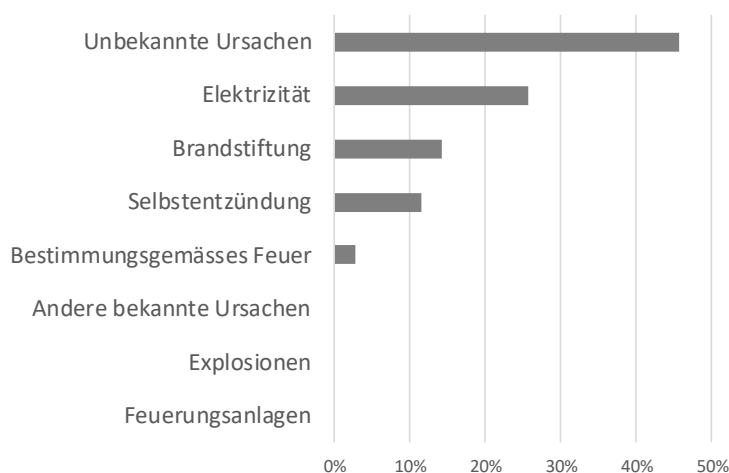


Abbildung 6: Schadenursachen nach Häufigkeit für Supermärkte von einem der beiden grössten Einzelhändler der Schweiz (2010-2016).

Die häufigste Schadenursache für Brandtote vorwiegend in Wohngebäuden ist «Bestimmungsgemässes Feuer», z.B. unvorsichtiger Umgang mit Rauchzeug und Kerzen und andere fahrlässig verursachten Entzündungen [15]. Diese Ursache kann für Verkaufsgeschäfte mehrheitlich ausgeschlossen werden, da ein generelles Rauchverbot gilt und Einkaufen in der Regel nicht mit Umgang mit Feuer in Verbindung gebracht wird. Zudem ist die Häufigkeit dieser Schadenursache in Verkaufsgeschäften relativ klein (Abbildung 6).

Brandeintrittshäufigkeit

Brände in Gebäuden werden der KGV-Kantone grundsätzlich gemeldet und diese dem IRV für eine gesamtschweizerische Schadenstatistik weitergeleitet. Basierend auf dieser Schadenstatistik wurde im Projekt «Wirtschaftliche Optimierung im vorbeugenden Brandschutz» [15] die Schadenhäufigkeit analysiert. Es wurde festgestellt, dass die Schadenshäufigkeit und die Grösse des Gebäudes (Gebäudevolumen) korrelieren. Dies erklärt sich damit, dass die Anzahl möglicher Zündquellen mit der Gebäudegrösse zunehmen. Aufgrund dieser Korrelation wurde ein statistisches Modell entwickelt, mit dem sich die jährliche Brandhäufigkeit für verschiedenen Nutzungen anhand dem Gebäudevolumen ableiten lässt. Das Modell basiert auf einer Potenzgleichung, die anhand der Schadendaten kalibriert wurde:

$$\lambda = e^{\alpha} \cdot Vol^{\beta}$$

Dabei entspricht λ der jährlichen Brandeintrittsrate, Vol dem Volumen und α und β sind die Kalibriergrössen. Für die Zweckbestimmung «Handel» entsprechen die Kalibriergrössen $\alpha = -8.979 \pm 0.472$ und $\beta = 0.4447 \pm 0.051$ (Angabe des Erwartungswert und Standardabweichung). Diese Zweckbestimmung beinhaltet nicht nur öffentlich zugängliche Räume, sondern auch Lagerbereiche und nicht öffentlich zugängliche Räume in Verkaufsgeschäften. Da der Fokus dieser Studie auf den öffentlich zugänglichen Räumen liegt, stellt die Verwendung dieses Ansatzes eine eher konservative Abschätzung der Brandeintrittshäufigkeit dar, da elektrische Anlagen (z.B. Öfen oder Schaltkästen) eher in den nichtöffentlichen Bereichen liegen und diese Anlagen eine erhöhte Brandgefahr aufweisen (Elektrizität). Zudem beinhaltet die Schadenstatistik der VKF, die als Grundlage für dieses Modell verwendet wurde, auch Brände an der Fassade und an Objekten ausserhalb des Gebäudes, die bei der Schadensmeldung aber trotzdem zum Gebäude gezählt werden (z.B. Velounterstände oder Plakatwände).

Basierend auf der Schadenstatistik von einem der beiden grössten Einzelhändler der Schweiz wird die Brandhäufigkeit pro Flächenklasse der Filialen mit dem vorgeschlagenen Modell von Fischer et al. [15] verglichen (vgl. Abbildung 7). Aufgrund der kleinen Stichprobengrösse (35 Brände innerhalb im Zeitraum von 2010 bis 2016) und der geringen Anzahl Filialen in bestimmten Flächenklassen, gibt es eine starke Streuung der Brandeintrittshäufigkeit. Bei kleineren Objekten gibt es vergleichsweise mehr Brände und die Abweichung zum statistischen Modell ist kleiner. Gemittelt über alle Filialen sind die Brandeintrittsraten aber in derselben Grössenordnung:

— Mittlere Brandeintrittsrates aus der Schadenstatistik:

8.4 Brände pro 1000 Gebäude pro Jahr

— Mittlere Brandeintrittsrates gem. Fischer et al. bezogen auf die Filialen:

5.7 Brände pro 1000 Gebäude pro Jahr

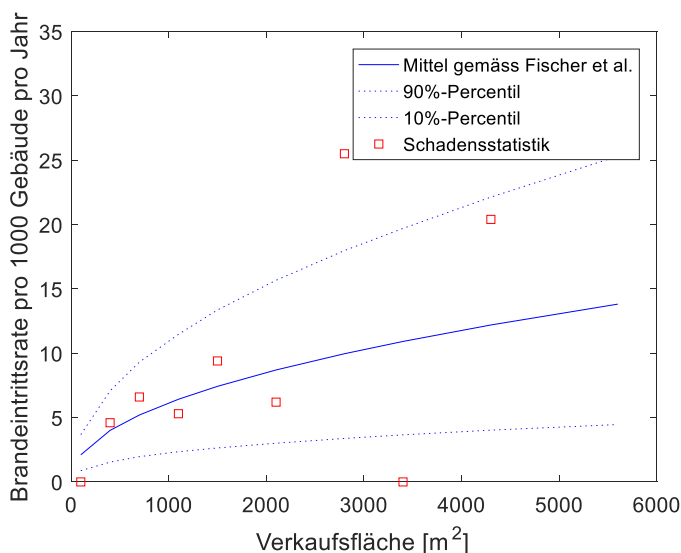


Abbildung 7: Vergleich der Brandhäufigkeiten ermittelt durch das statistische Modell von Fischer et al. [15] und der Schadenstatistik.

Abhängigkeit Personenzahl und Brandeintritt

Da Menschen durch Fahrlässigkeit oder durch die Nutzung eines Gebäudes Brände verursachen können, könnte es eine Abhängigkeit geben zwischen einer hohen Anzahl Personen (quasi als potenzielle Brandverursacher) und der Brandhäufigkeit. In der Literatur wurde dieser Abhängigkeit nur beschränkt Beachtung geschenkt, da man üblicherweise den schlimmsten anzunehmenden Fall betrachtet (Worst-Credible-Case) und von einer hohen Personenbelegung bei einem Brandereignis ausgeht. Aus statistischer Sicht kann ein Brand zu jeder Zeit und an jedem Ort auftreten. Statistisch wird das Auftreten eines Brandes durch die Brandeintrittshäufigkeit beschrieben. Ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Personen in einem Geschäft und der Brandeintrittshäufigkeit könnte bestehen [16]. Ändert sich also die Anzahl der Personen, so wird auch die Wahrscheinlichkeit eines Brandes beeinflusst. Nach Kenntnisstand der Autoren wurde noch keine Veröffentlichung verfasst, um diesen Sachverhalt für den Einzelhandel zu behandeln. Bennetts und Thomas [16] diskutierten die Auswirkungen der Anzahl Personen auf die Brandeintrittshäufigkeit in Bürogebäuden. Sie kamen zum Schluss, dass die Brandeintrittshäufigkeit während der Betriebsstunden – d.h. während der Nutzung des Gebäudes – zunimmt, ohne sie mit der Personenbelegung in Beziehung zu setzen. Sie stellten jedoch fest, dass gleichzeitig auch die Wahrscheinlichkeit

steigt, dass die Brandausbreitung klein bleibt, da die Personen den Brand schneller wahrnehmen, alarmieren und / oder bekämpfen können. Eine höhere Personenzahl kann sich also sowohl positiv als auch negativ auswirken.

Um die Abhängigkeit zwischen Personenzahl und Brandentstehung in Verkaufsgeschäften zu untersuchen, wurde die Brandschadenstatistik von einem der beiden grössten Einzelhändler der Schweiz nach Monaten und nach Wochentag ausgewertet. Die Auswertung über die Monate (Abbildung 8) zeigt, dass die meisten Brände im November stattfanden. Bei der näheren Betrachtung der Ursachen der Brände im November, gibt es aber keine Hinweise darauf, dass die Brandfälle mit einer erhöhten Personenzahl in Verbindung gebracht werden können (v.a. unbekannte Ursachen und Elektrobrände).

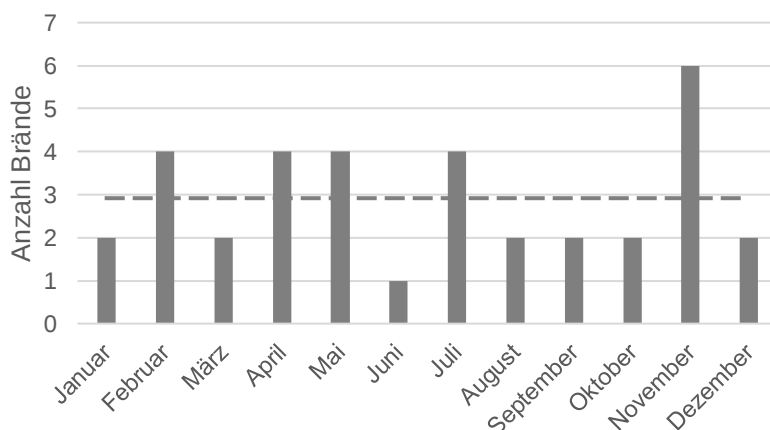


Abbildung 8: Brandereignisse nach Monat.

Die Auswertung über die Wochentage (Abbildung 9) zeigt, dass es an Montagen und an Samstagen am häufigsten brennt, jedoch statistisch nicht signifikant mehr. Vor allem an Samstagen ist mit einer erhöhten Personenzahl zu rechnen. Die Analyse der Brandursachen gab allerdings keinen Hinweis auf das Vorhandensein einer Abhängigkeit zwischen Personenzahl und Bränden. Unter den Bränden an Samstagen waren:

- 2 Elektrobrände (defekter Kühlschrank / Reinigungsmaschine)
- 2 Brandstiftungen
- 2 Unbekannte Ursachen (Brand Velounterstand / Rauchentwicklung in Verkaufsgeschäft)
- 1 Bestimmungsmässiges Feuer (Brand auf einer Terrasse einer Mietwohnung als Teil des Verkaufsgeschäfts)

Zu beachten ist, dass am Wochenende die Häufigkeit von Brandstiftungen grösser ist. So fanden 4 von 5 Brandstiftungen mit kleinerem Sachschaden zwischen Freitag und Sonntag statt. Diese Brände sind vor allem auf Vandalismus zurückzuführen und treten eher abends nach Ladenschluss auf. Elektrobrände traten vor allem bei defekten elektrischen Geräten auf und können von der Personenzahl als unabhängig betrachtet werden.

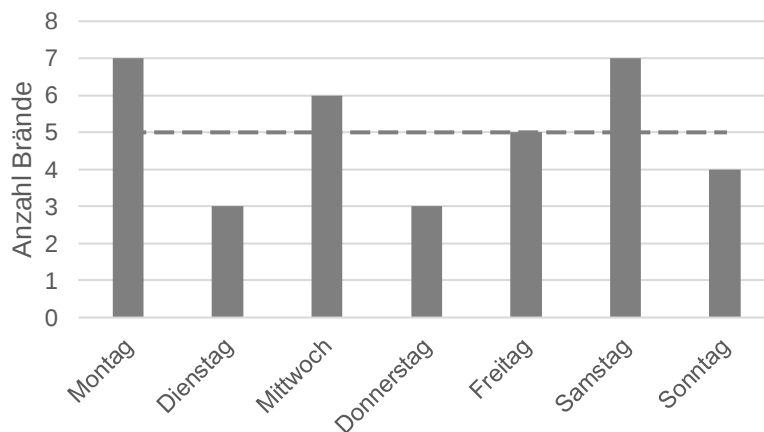


Abbildung 9: Brandereignisse nach Wochentag.

Ob eine Korrelation zwischen Personenzahl und Brandeintrittsrate besteht, kann nicht abschliessend beurteilt werden. Vermutlich sind sie schwach korreliert oder sogar unabhängig. Eine starke Korrelation kann aufgrund der Ursachen und der zeitlichen Verteilung der Brände praktisch ausgeschlossen werden. Eine starke Korrelation würde für eine Erhebung von täglichen oder gar jährlichen Maximalwerten sprechen. Wegen der schwachen Korrelation scheint es legitim, die Personendichte zeitlich hochaufgelöst zu erfassen (Point-in-Time-Verteilung), z.B. in minütlichen Schritten, und den Bemessungswert der Personendichte darauf auszulegen (vgl. Kapitel 3).

Für Verkaufsgeschäfte ist die Unabhängigkeitsannahme plausibel, so dass die Point-in-Time-Verteilung verwendet werden kann, aber nicht unbedingt für andere Nutzungen, z.B. Wohnbauten oder Hotels. Für andere Nutzungen ist eine Analyse der Unabhängigkeit der Personenbelegung und der Brandeintrittsgefahr unumgänglich und es ist nutzungsspezifisch zu bestimmen, ob die Point-in-Time-Verteilung verwendet werden darf oder ob die Personenbelegung auf einen täglichen oder gar jährlichen Maximalwert ausgelegt werden muss.

3. Erhebung der Personendichte in Schweizer Verkaufsgeschäften

In diesem Kapitel wird erläutert, wie die Personendichte in Schweizer Verkaufsgeschäften ermittelt wurde und welche Stichprobe diese umfasst. Das Ziel der Auswertung ist ein möglichst vollständiges Abbild der Personenbelegung in Schweizer Verkaufsgeschäfte zu geben, das sowohl normal-frequentierte als auch hoch-frequentierte Verkaufsgeschäfte beinhaltet. Gemäss Kapitel 2.5 ist die Personenbelegung und die Brandeintrittsrates eher unkorreliert oder sogar unabhängig zu werten. Daher ist es sehr wahrscheinlich, dass ein Brand nicht gerade zur Spitzenzeit auftritt, sondern zu einem zufälligen Zeitpunkt mit einer zufälligen Personenbelegung. Deswegen ist das Ziel eine zeitlich-hochaufgelöste statistische Verteilung der Personendichte zu ermitteln. Diese statistische Verteilung kann als Grundlage verwendet werden sowohl für die Festlegung von Bemessungswerten für die Richtlinie, als auch für die probabilistische und risikobasierte Beurteilung der Fluchtweg Anforderungen.

3.1 Stichprobe

Eine Liste der beteiligten Filialen ist im Anhang A1 zu finden. Aus vertraulichkeitsgründen können keine spezifischen Angaben der an der Erhebung beteiligten Filialen gemacht werden. Die VKF Begleitgruppe begleitete die Auswahl der Filialen der Stichprobe und konnte Änderungen an der Erhebung anbringen. Es wurde darauf geachtet, dass alle Charakteristiken der Filialen, die auf die Personendichte einen Einfluss haben könnten, miteingeflossen sind, u.a.:

- Nutzungskategorie
- Grösse der Verkaufsflächen
- Standort (Filialen in ländlichen Gebieten, in der Agglomeration und in urbanen Gebieten)
- Nutzerfrequenz (Hoch- und normalfrequentierte Verkaufsgeschäfte)
- Geschosslage

3.1.1 Nutzungskategorien

Es wurden 97 Objekte aus 6 verschiedenen Organisationen (Coop, Lib AG, Maus Frères, Migros, Möbel Pfister und Volg) untersucht. Dabei wurden 13 verschiedene Nutzungskategorien definiert. Abbildung 10 zeigt die Verteilung der Nutzungskategorien für die Filialen von einem der beiden grössten Einzelhändler der Schweiz auf. Abbildung 11 zeigt die resultierende Anzahl Filialen pro Nutzungskategorie. Da alle Nutzungskategorien vertreten sind und diese einen grossen Teil des Schweizer Detailhandels ausmachen, wird davon ausgegangen, dass diese die gesamtschweizerische Grundgesamtheit der Nutzungskategorien gut abbildet (vgl. Abbildung 10). Fast 75% der Filialen sind Supermärkte, d.h. Verkaufsgeschäfte mit einem starken Fokus auf den Verkauf von Lebensmitteln. Andere Non-Food-Geschäfte machen ca. 25% der Filialen aus. Deswegen macht es Sinn, die Erhebung der Personendichte für Supermärkte etwas detaillierter zu betrachten. Die Supermärkte werden anhand ihrer Verkaufsflächen in 5 verschiedene Kategorien aufgeteilt (vgl. auch Kapitel 3.1.2). Zugunsten der Übersichtlichkeit werden folgende Abkürzungen verwendet:

Verkaufsfläche bis 600 m²:

Supermarkt_600

Verkaufsfläche zwischen 600 m² und 1200 m²:

Supermarkt_1200

Verkaufsfläche zwischen 1200 m² und 2400 m²:

Supermarkt_2400

Verkaufsfläche zwischen 2400 m² und 4800 m²:

Supermarkt_4800

Verkaufsfläche grösser als 4800 m²:

Supermarkt_gross

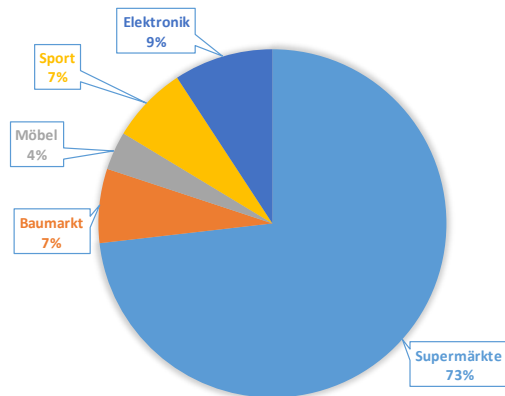


Abbildung 10: Verteilung der Nutzungskategorien der Grundgesamtheit für die Filialen des einen der beiden grössten Einzelhändler der Schweiz für das Jahr 2016 nach Anzahl Filialen.

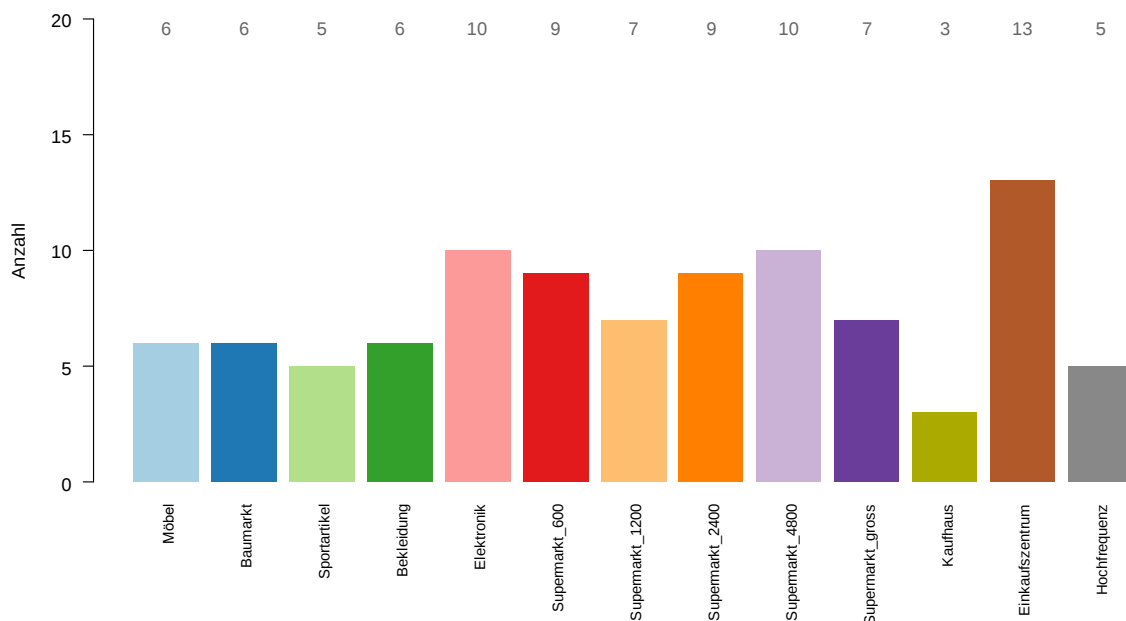


Abbildung 11. Anzahl Filialen pro Nutzungskategorie für die Studie.

Kategorie Hochfrequenz

Unter den 47 Supermärkten sind 5 Supermärkte vorhanden, die an wichtigen Verkehrsknotenpunkten des öffentlichen Verkehrs liegen und die einen Sonntagsverkauf haben. Diese Filialen sind mit einer sehr hohen Besucherfrequenz pro Ladenfläche verbunden. Dieser Anteil an hochfrequenten Filialen wurde explizit ausgewählt, um vor allem extreme Belegungen zu untersuchen. Deshalb wird für diese hochfrequentierten Filialen eine eigene Kategorie «Hochfrequenz» verwendet.

Abbildung 12 zeigt die durchschnittliche totale Besucherfrequenz pro Tag und Quadratmeter (nicht zu verwechseln mit der Personendichte). Es wird ersichtlich, dass die Kategorie «Hochfrequenz» sich von den Restlichen klar unterscheidet. Keine Filiale der Kategorie Hochfrequenz weist im Durchschnitt weniger als 7 Tagesbesucher pro m² Verkaufsfläche aus. Gleichzeitig wird dieser Wert von keiner anderen Filiale der restlichen Kategorien erreicht. Dieser Wert wäre ein mögliches quantitatives Kriterium für die Unterscheidung zwischen normal frequentierten Supermärkten und hoch frequentierten Supermärkten. Allerdings müsste die Tagesbesucherfrequenz z.B. durch eine Marktanalyse abgeschätzt werden.

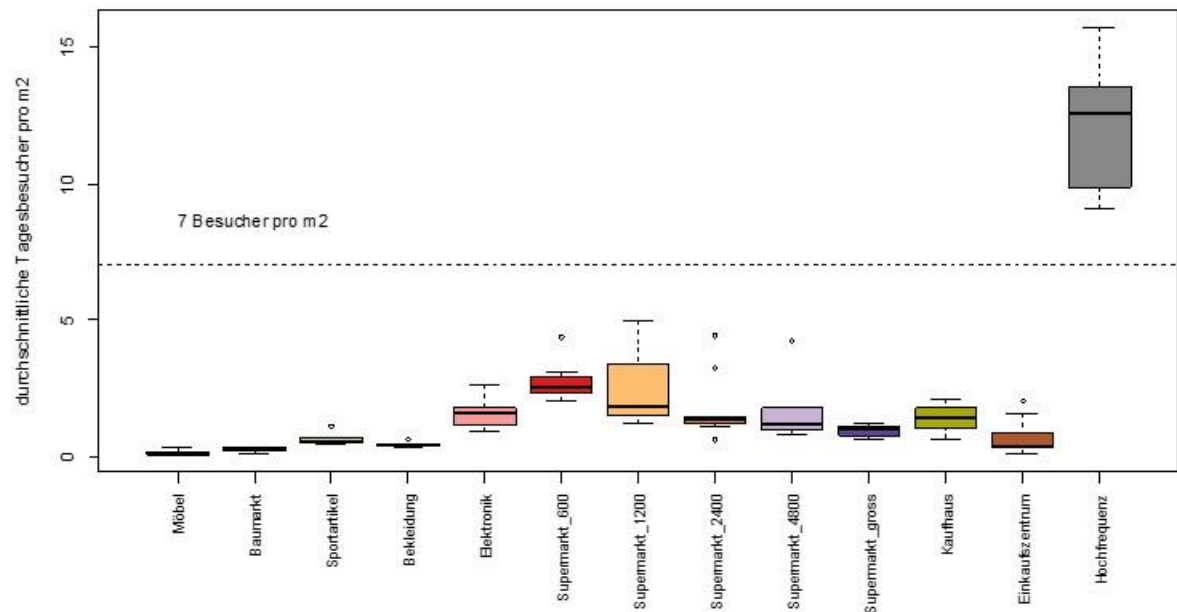


Abbildung 12. Durchschnittliche Besucherfrequenz pro Tag und Quadratmeter.

3.1.2 Verkaufsflächen

Für die Personendichte sind Besucherfrequenz, Verkaufsfläche und Aufenthaltsdauer relevant. Bei einer kleinen Verkaufsfläche und einer hohen Personenfrequenz kann daher schnell eine hohe Personendichte erreicht werden. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 13 die Verteilung der Verkaufsflächen pro Nutzungskategorie. Da die Supermärkte in Flächenkategorien aufgeteilt werden, streuen die Verkaufsflächen innerhalb der Grenzen der Kategorie. Für die anderen Nutzungskategorien wurde auf eine Flächenaufteilung verzichtet. Damit fällt teilweise der Streubereich etwas grösser aus.

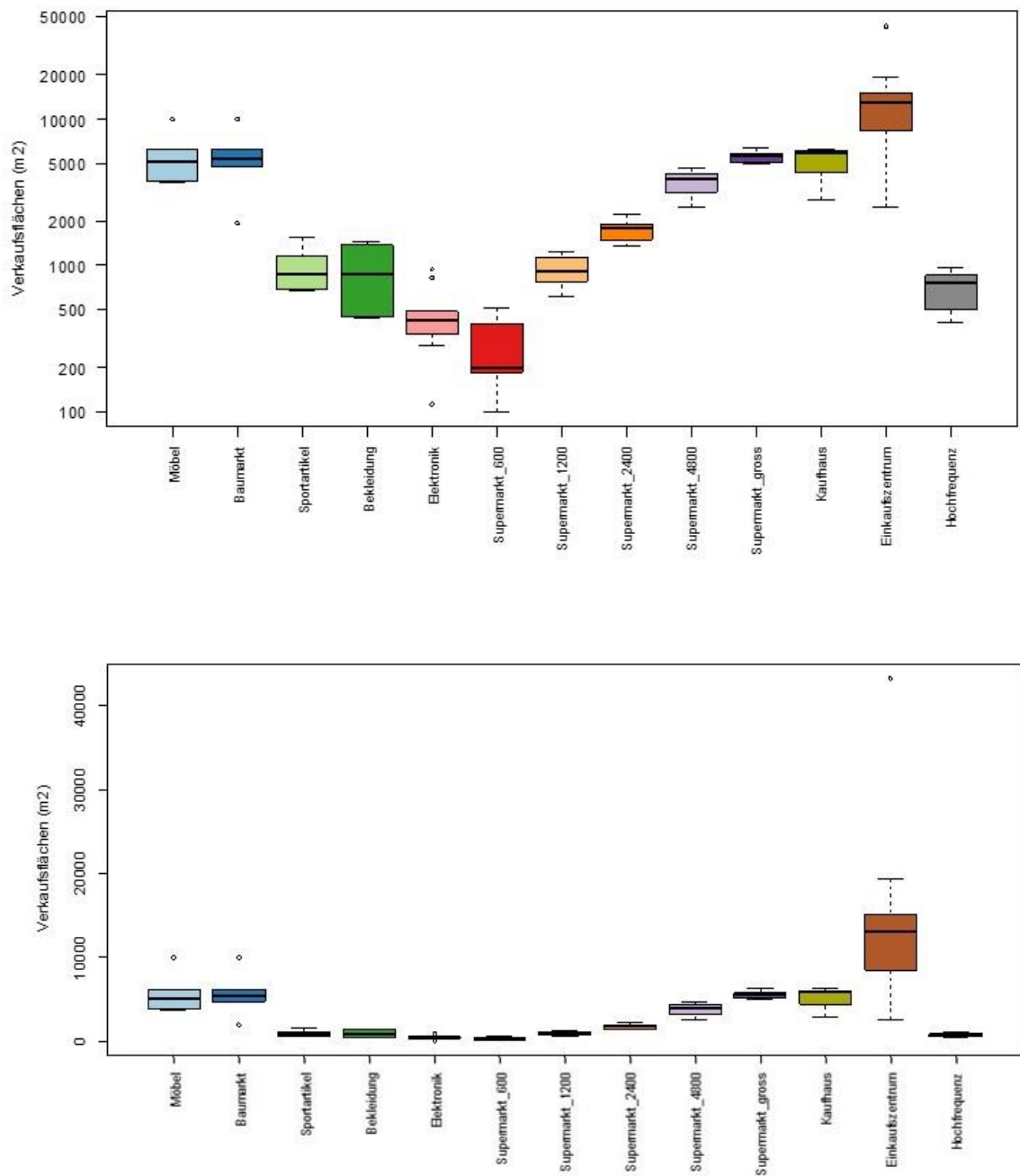


Abbildung 13. Verteilung der Verkaufsflächen pro Nutzungskategorie. Oben im logarithmischen Massstab; unten im linearen Massstab.

Supermärkte

Abbildung 14 zeigt die Verteilung der Verkaufsflächen für Supermärkte von einem der beiden grössten Einzelhändler der Schweiz. Knapp 80 % der Filialen weisen Verkaufsflächen zwischen 600 m² und 2'400 m² auf. Dies kann einerseits mit erhöhten Anforderungen an den Brandschutz begründet werden (z.B. Notwendigkeit eines Sprinklers ab 2'400 m² und/oder Notwendigkeit eines elektroakustisches Notfallsystem für mehrgeschossige Verkaufsgeschäfte) und andererseits mit dem beschränkten Platzangebot in Städten, in denen eine Vielzahl von kleineren Supermärkten sind. Deshalb macht es für Supermärkte Sinn, flächenbezogene Unterkategorien zu definieren.

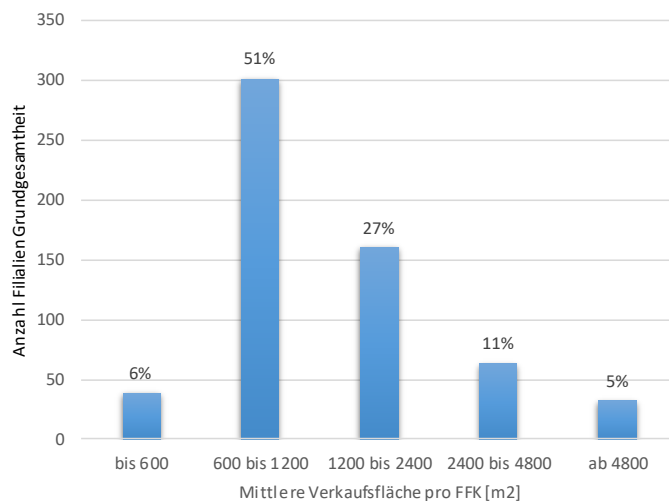


Abbildung 14: Verteilung der Verkaufsflächen für Supermärkte von einem der beiden grössten Einzelhändler der Schweiz.

Einkaufszentren

Einkaufszentren zeichnen sich durch eine Mischnutzung verschiedener Nutzungskategorien und durch vergleichsweise grössere Verkehrsflächen aus. Vor allem letztere können zwischen einzelnen Einkaufszentren stark variieren und werden teilweise auch anderweitig genutzt, z.B. als Promotionsflächen. Für die Studie wird zur Berechnung der Personendichte bei Einkaufszentren die Summe der Verkaufsflächen verwendet. Es wird somit der Fall betrachtet, in dem alle Besucher innerhalb von Verkaufsflächen stehen und keine Besucher auf Verkehrsflächen vorhanden sind. Diese Betrachtung wird die Personendichte überschätzen, da die Personenbelegung durch eine kleinere Fläche geteilt wird.

3.1.3 Repräsentation der Grundgesamtheit

Die Auswahl der Filialen für die Erhebung erfolgte einerseits aufgrund bereits installierten Messsystemen und andererseits anhand der Einschätzung, wie repräsentativ die Filiale für die Personendichte ist. Die Auswahl wurde in Absprache mit der VKF-Begleitgruppe durchgeführt. Um zusätzlich auch quantitativ zu überprüfen, ob die Stichprobenwahl die Grundgesamtheit repräsentiert, wurde für Supermärkte von einem der beiden grössten Einzelhändler der Schweiz der flächenbezogene Umsatz mit dem Umsatz pro Verkaufsfläche der Grundgesamtheit verglichen. Dabei wird angenommen, dass die Personenbelegung stark mit dem Umsatz in Supermärkten korreliert (je mehr Personen, desto mehr Umsatz). In Abbildung 15 ist der flächenbezogene Umsatz der Stichprobe und der Grundgesamtheit dargestellt. Letzterer entspricht einem mittleren flächenbezogenen Umsatz aller Filialen einer Flächenklasse. Der starke Abfall bei kleinen Verkaufsgeschäften liegt daran, dass diese vermehrt an wichtigen

Verkehrsknotenpunkten erstellt werden. Bei der Stichprobe wurden die Fläche und der flächenbezogene Umsatz der Filiale verwendet. Die Stichprobe bildet den Verlauf des Umsatzes der Grundgesamtheit relativ gut ab. Tendenziell liegt die Stichprobe sogar über dem flächenbezogenen Umsatz der Grundgesamtheit.

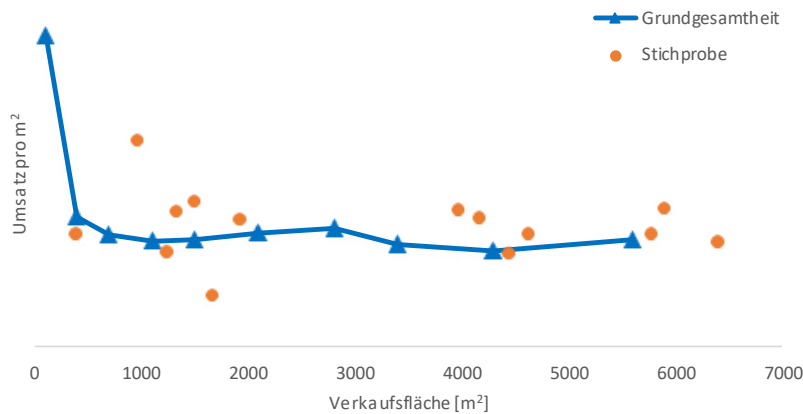


Abbildung 15: Flächenbezogener Umsatz der Grundgesamtheit und der Stichprobe von Supermärkten von einem der beiden grössten Einzelhändler der Schweiz ⁴.

3.2 Ermittlung der Personendichte

Die Personendichte wird in minütlicher Auflösung bestimmt anhand der Messung der Personenströme an den Zu- und Ausgängen der Verkaufsflächen. Anhand der Differenz zwischen den Personenströmen an den Zu- und Ausgängen lässt sich auf die Personenbelegung schliessen. Schliesslich lässt sich aus der Verkaufsfläche und der Personenbelegung die Personendichte bestimmen. Dies geschieht durch die Division der Personenbelegung durch die Verkaufsfläche.

Bilanzierung der Ein- und Austritte

Für die Berechnung der Personenbelegung auf den Verkaufsflächen werden die Ein- und Austritte (IN_t resp. OUT_t) an sämtlichen Zugängen bilanziert. Dabei muss beachtet werden, dass der Messfehler während dem Tagesverlauf (über einen Zeitraum T) zunimmt. Zur Optimierung der Messgenauigkeit wird deshalb zeitlich vorwärts (FW) und rückwärts (BW) bilanziert (vgl. Abbildung 16). Damit resultieren zwei Belegungen (L_{FW} und L_{BW}), die mit Gewichtungsfaktoren (w_{FW} und w_{BW}) kombiniert werden:

$$L = w_{FW} \cdot L_{FW} + w_{BW} \cdot L_{BW}$$

$$L_{FW_t} = L_{FW_{t-1}} + IN_t - OUT_t$$

$$L_{BW_t} = L_{BW_{t+1}} + OUT_{t+1} - IN_{t+1}$$

$$w_{FW} = 1 - w_{BW}$$

$$w_{BW_t} = \frac{\sum_{i=0}^t IN_i + OUT_i}{\sum_{i=0}^T IN_i + OUT_i}$$

Messfehler

Bei einer exakten Bilanzierung muss die Anzahl Eintretender gleich gross sein wie die Anzahl Austretender. Der Unterschied dieser beiden Grössen wird für die Fehlerabschätzung verwendet. Der gemessene relative Fehler der Bilanzierung beträgt somit:

⁴ Aus vertraulichkeitsgründen wird auf eine Darstellung der Umsatzzahlen verzichtet und nur der qualitative Verlauf dargestellt.

$$\delta = \frac{|IN - OUT|}{IN + OUT}$$

Für die Personendichte ist allerdings der absolute Fehler pro Quadratmeter relevant. Dieser steigt linear mit der Anzahl Besucher pro Quadratmeter. Durch die vorwärts und rückwärts Berechnung der Personendichte wird der maximale Fehler statt am Ende des Tages in der Mitte erreicht und damit eine Halbierung des Messfehlers erzielt (Abbildung 16). Die Fehlerabschätzung für die Personendichte ist somit:

$$\Delta = \frac{|IN - OUT|}{2 \cdot A}$$

Öffnungszeiten und Feiertage

Die Personendichte wird während den regulären Öffnungszeiten pro Wochentag untersucht. Feiertage werden durch die sehr tiefe Besucherfrequenz erkannt und bei der Auswertung ignoriert.

Messdauer

Von jeder Filiale wird genau 1 Kalenderjahr erfasst. Anfangs und Enddaten unterscheiden sich zwischen den Filialen. Die Messungen finden grösstenteils im Jahr 2017 und 2018 statt. Damit sind auch Tage mit hohen Personenaufkommen (Samstage, Ostersonntag, Sonntagsverkäufe, Weihnachtsverkauf) vorzuziehen als auch Sonderaktionen, wie beispielsweise den Black Friday.

3.3 Messsystem

Die Personendichte wird anhand der Messung der Personenströme an den Zu- und Ausgängen der Verkaufsflächen bestimmt. Dazu werden optische Sensoren verwendet, welche die Personen und deren Bewegungsrichtung erkennen. Im Vergleich zu anderen Technologien, wie beispielsweise Lichtschranken, Radar oder WiFi ist die Verwendung von optischen Sensoren gegenwärtig die präziseste Technologie. Die optischen Sensoren weisen gemäss Hersteller einen Messfehler von weniger als 2% auf. Für eine Messung mit optischen Sensoren ist eine Beleuchtungsstärke von mindestens 5 Lux notwendig. Die Sensoren müssen auf einer Höhe von mindestens 220 cm montiert werden. Je nach Verhältnis zwischen Montagehöhe und Türbreite sind pro Zählstelle eventuell mehrere Sensoren notwendig. Personen mit einer Höhe unter 120 cm werden im Allgemeinen nicht gezählt. Abbildung 17 zeigt ein Beispiel eines Sensors sowie das Messprinzip.

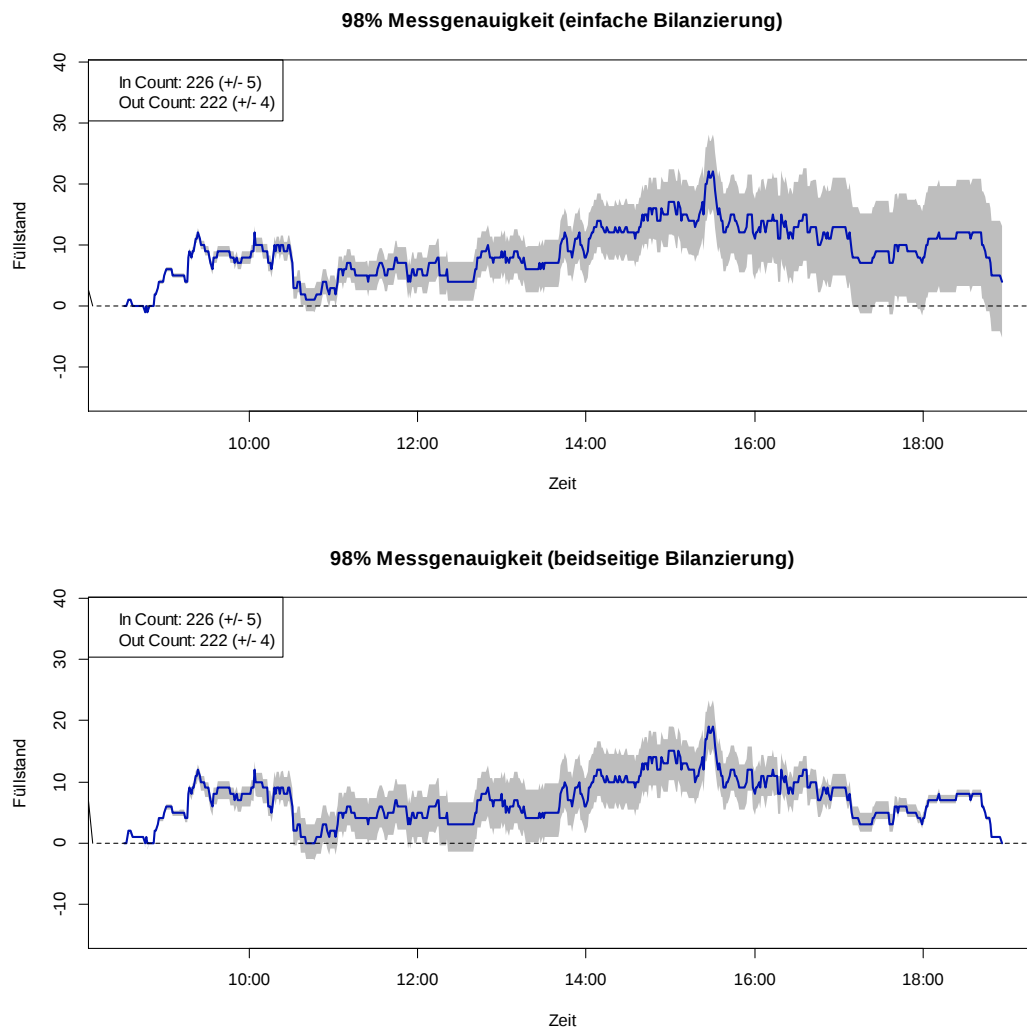


Abbildung 16 Veranschaulichung der Fehlerkorrektur für eine einfache Bilanzierung (oben) und für eine beidseitige Bilanzierung (unten).

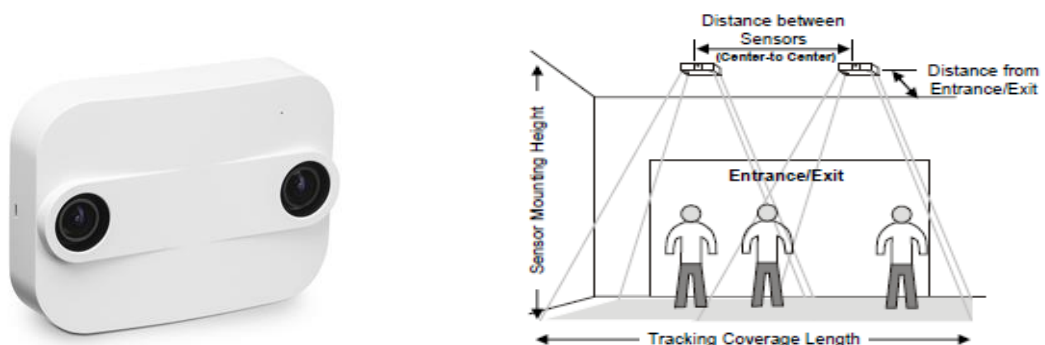


Abbildung 17. Beispiel eines Sensors sowie das Messprinzip.

3.4 Anforderungen an die Messung

Die Messung wird von den Teilnehmern der Erhebung in Auftrag gegeben. Da verschiedene Systeme von verschiedenen Herstellern zum Einsatz kommen können, werden Mindestanforderungen an die Messung formuliert. Im Anhang A2 sind die Anforderungen an das Messkonzept, die Dokumentation und die definierten Kriterien beschrieben.

3.5 Statistische Auswertung der Personendichte

3.5.1 Statistische Kennwerte

Gegenstand der Studie ist eine statistische Auswertung der Personendichte in Verkaufsflächen verschiedener Nutzungskategorien. Für jede Nutzungskategorie stehen mehrere Filialen zur Verfügung. Rohdaten sind somit minütlich abgeleitete Personendichten.

Für die Auswertung werden zwei verschiedene Ansätze verfolgt:

Verfahren 1: Ermittlung von Quantilen pro Filiale und deren statistische Auswertung für jede Nutzungskategorie.

Verfahren 2: Gruppierung der ausgewerteten Minuten pro Nutzungskategorie und deren statistische Auswertung.

Im ersten Verfahren wird jede Filiale auf einzelne Kennwerte reduziert. Es wird eine Auswertung der Personendichte über einzelne Filialen durchgeführt. Im zweiten Verfahren findet diese Einzelauswertung nicht statt, sondern die Auswertung erfolgt über alle Filialen über die Betriebszeit. Dies hat zur Folge, dass Filialen mit längerer Öffnungszeit stärker gewichtet werden.

3.5.2 Auswertung der Quantile (Verfahren 1)

Abbildung 18 zeigt die Verteilung der 99%-Quantile pro Filiale für sämtliche Nutzungskategorien. Die Anzahl Filialen pro Nutzungskategorie und 99%-Quantil der Personendichte ist in Tabelle 2 dokumentiert. Die Auswertung zeigt, dass die Supermärkte (vor allem die hochfrequenten Supermärkte) die höchsten Personendichten erreichen. Davon erreicht nur eine Hochfrequenz Filiale ein 99%-Quantil von mehr als 0.35 Pers./m². Es folgen einige Supermärkte mit einem 99%-Quantil bis 0.25 Pers/m². Die 99%-Quantile der meisten restlichen untersuchten Filialen sind kleiner als 0.1 Pers./m².

Nutzungskategorie	Personendichte [Pers./m ²]									
	0 - 0.05	0.05 - 0.1	0.1 - 0.15	0.15 - 0.2	0.2 - 0.25	0.25 - 0.3	0.3 - 0.35	0.35 - 0.4	0.4 - 0.45	0.45 - 0.5
Möbel	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Baumarkt	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sportartikel	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bekleidung	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elektronik	2	8	0	0	0	0	0	0	0	0
Supermarkt_600	0	7	2	0	0	0	0	0	0	0
Supermarkt_1200	0	6	1	0	0	0	0	0	0	0
Supermarkt_2400	1	7	0	0	1	0	0	0	0	0
Supermarkt_4800	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0
Supermarkt_gross	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0
Kaufhaus	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Einkaufszentrum	9	2	2	0	0	0	0	0	0	0
Hochfrequenz	0	0	0	1	0	3	0	1	0	0

Tabelle 2 Anzahl Filialen pro Nutzungskategorie und 99%-Quantil der Personendichte.

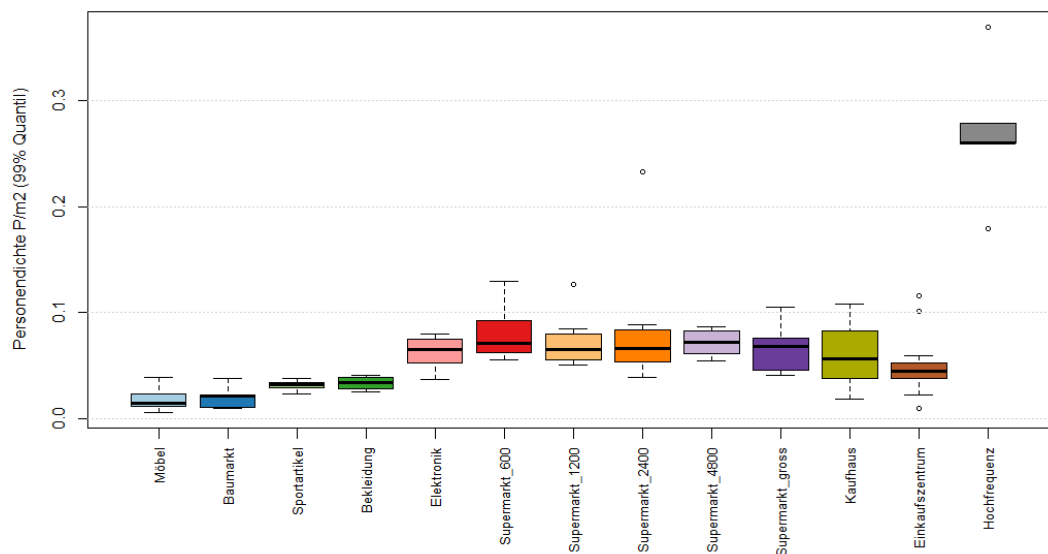


Abbildung 18. Verteilung der 99%-Quantile sämtlicher Nutzungskategorien (Verfahren 1; logarithmischer Massstab).

3.5.3 Auswertung pro Nutzungskategorie (Verfahren 2)

Die Quantile der Personendichte pro Nutzerkategorie sind in Tabelle 3 dargestellt. Abbildung 19 zeigt verschiedene Quantile der Personendichte pro Nutzerkategorie. Das 99%-Quantil ist bei allen Kategorien unter 0.3 Pers./m². Nur die Hochfrequenz Kategorie überschreitet im 99%-Quantil die Personendichte von 0.15 Pers./m².

Abbildung 20 bis Abbildung 22 zeigen die invertierte empirische kumulative Verteilungsfunktion der Personendichte. Der Fokus liegt dabei auf den höchsten 1% der auftretenden Personendichten. Dabei gibt es sehr grosse Unterschiede zwischen den Kategorien. Während in der Hochfrequenz Kategorie Personendichten bis 0.74 Pers./m² erreicht werden, befinden sich die Maximalwerte der restlichen Supermärkte unter 0.45 Pers./m². Die Maximalwerte der Fachmärkte sind sogar alle unter 0.2 Pers./m². Da für diese Abbildungen insbesondere die maximalen 1% der gemessenen Dichten relevant sind, ist davon auszugehen, dass nur in einer oder wenigen Filialen diese Werte gemessen wurden. Dies führt auch dazu, dass die Verteilungsfunktion der Kategorie Supermarkt_600 eine treppenförmige Form aufweist. Die Daten für die Personendichte über dem 99%-Quantil stammen alle von einer einzigen Filiale mit einer kleinen Verkaufsfläche von 100 m², was zu der groben Auflösung in der Personendichte führt.

Nutzungskategorie	Quantil						
	0%	1%	10%	50%	90%	99%	100%
Möbel	0.000	0.000	0.001	0.003	0.011	0.027	0.068
Baumarkt	0.000	0.000	0.002	0.005	0.013	0.026	0.068
Sportartikel	0.000	0.000	0.002	0.008	0.018	0.033	0.073
Bekleidung	0.000	0.000	0.002	0.007	0.018	0.035	0.081
Elektronik	0.000	0.000	0.004	0.015	0.039	0.071	0.165
Supermarkt_600	0.000	0.000	0.005	0.022	0.048	0.091	0.400
Supermarkt_1200	0.000	0.001	0.007	0.023	0.048	0.080	0.396
Supermarkt_2400	0.000	0.001	0.007	0.022	0.055	0.126	0.438
Supermarkt_4800	0.000	0.001	0.010	0.025	0.048	0.077	0.151
Supermarkt_gross	0.000	0.000	0.005	0.018	0.044	0.082	0.145
Kaufhaus	0.000	0.002	0.008	0.027	0.055	0.099	0.218
Einkaufszentrum	0.000	0.001	0.004	0.016	0.047	0.088	0.150
Hochfrequenz	0.000	0.002	0.018	0.057	0.147	0.286	0.743

Tabelle 3. Quantile der Personendichte pro Nutzerkategorie.

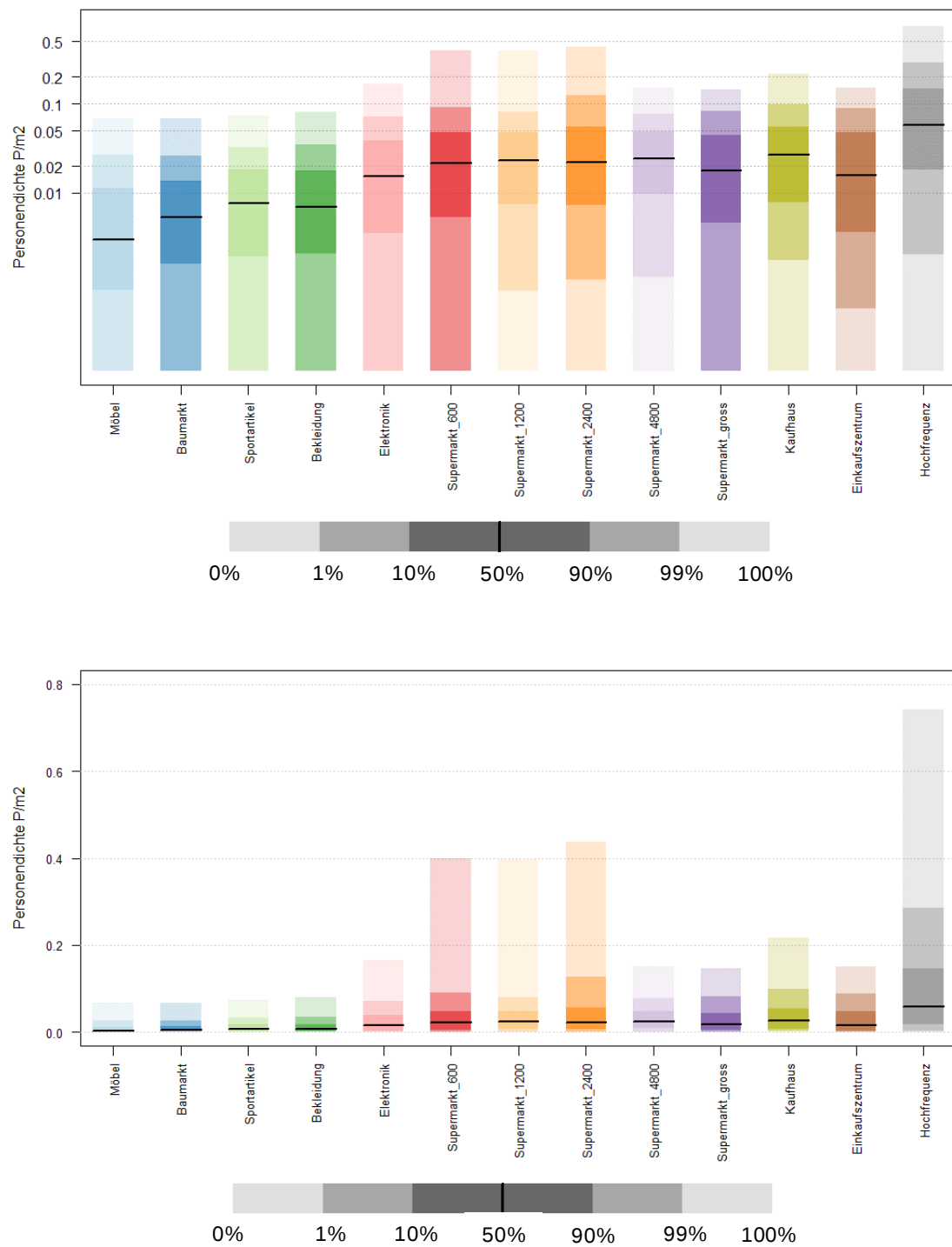


Abbildung 19. Quantile der Personendichte pro Nutzerkategorie im logarithmischen Massstab (oben) und im normalen Massstab (unten).

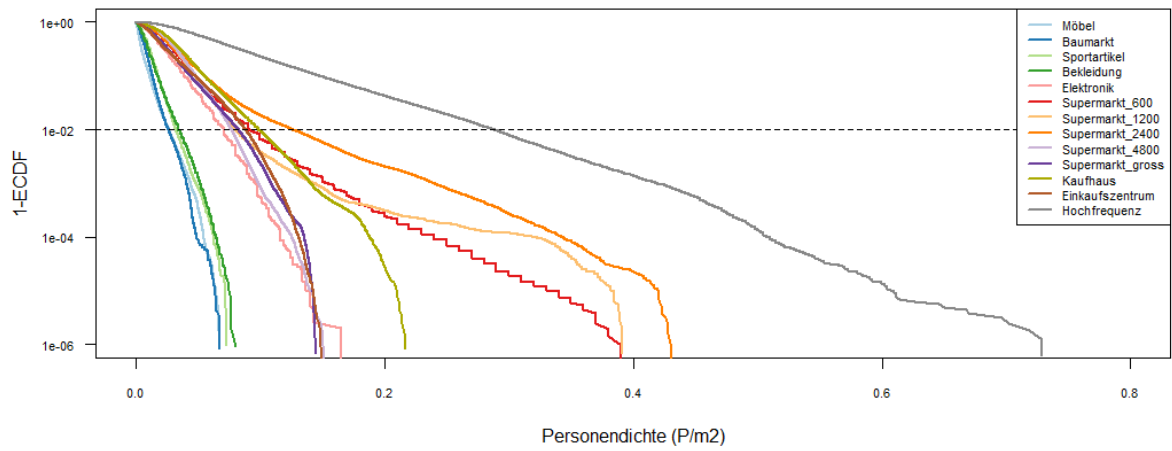


Abbildung 20. Invertierte empirische kumulative Verteilungsdichte aller Nutzerkategorien.

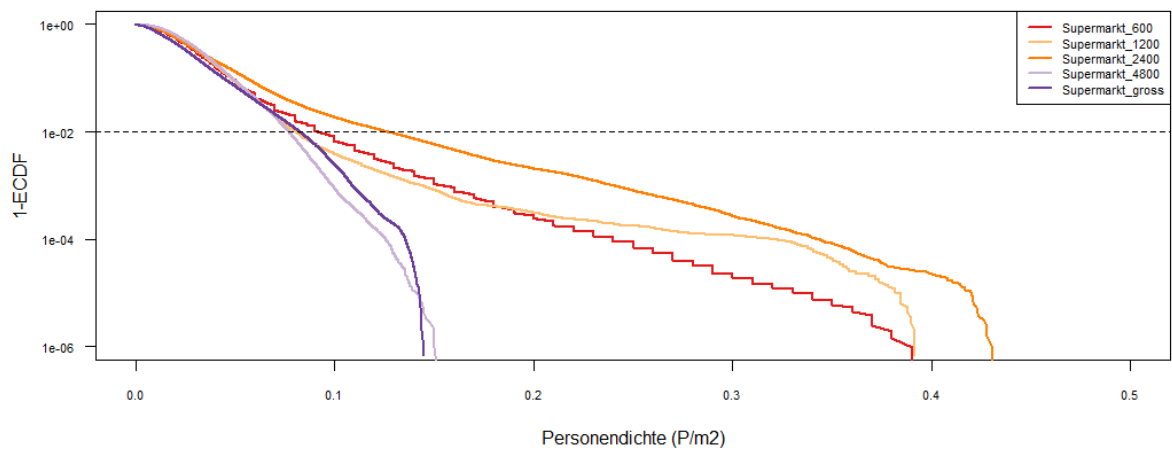


Abbildung 21. Invertierte empirische kumulative Verteilungsdichte der Supermärkte ohne die hochfrequenten Supermärkte.

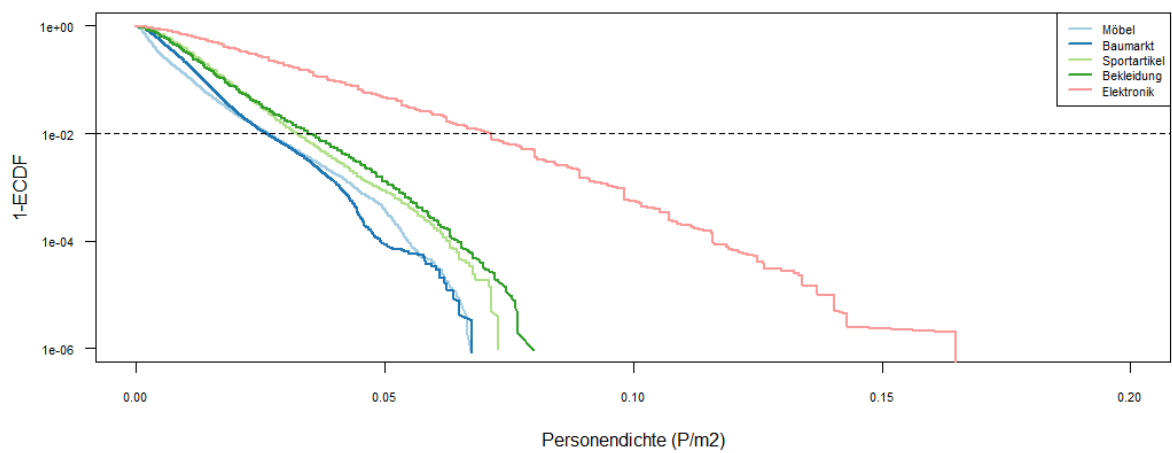


Abbildung 22. Invertierte empirische kumulative Verteilungsdichte der Fachmärkte.

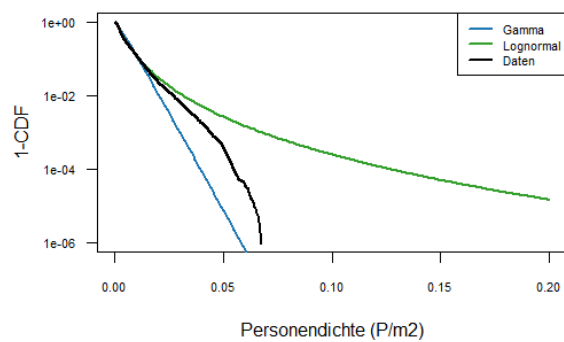
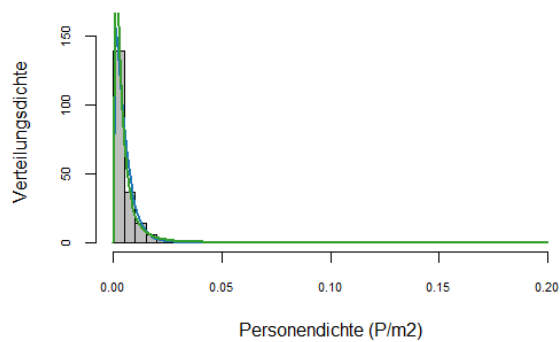
Verteilungsparameter

Die Personendichte jeder Nutzungskategorie wird mittels Gamma-Verteilung und Lognormal-Verteilung repräsentiert (Definition im Anhang A3). Die geschätzten Parameter sind in Tabelle 4 enthalten. Abbildung 23 zeigt jeweils den Vergleich zwischen Modell und den Daten im Histogramm (links) und der invertierten Verteilungsfunktion. Je nach Nutzungskategorie passt entweder die Gamma-Verteilung oder die Lognormal-Verteilung besser zu den Daten. Die Lognormalverteilung passt vor allem bei den Nutzungskategorien gut, bei denen einzelne Filialen relativ hohe Personendichten aufweisen. Die Mehrheit der Personendichten kann mit einer Gamma-Verteilung repräsentiert werden.

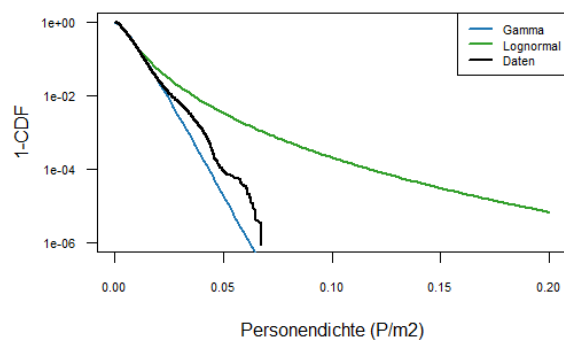
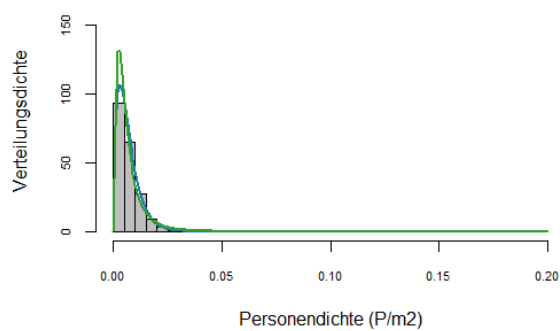
	Gamma Verteilung		Lognormal Verteilung		Wahl der repräsentativen Verteilung
	shape	rate	meanlog	sdlog	
Möbel	1.22	249.36	-5.78	1.00	Gammaverteilung
Baumarkt	1.77	260.07	-5.29	0.85	Gammaverteilung
Sportartikel	2.09	217.19	-4.90	0.77	Gammaverteilung
Bekleidung	1.95	210.96	-4.96	0.79	Gammaverteilung
Elektronik	1.91	95.66	-4.20	0.80	Gammaverteilung
Supermarkt_600	2.35	89.04	-3.86	0.70	Lognormalverteilung
Supermarkt 1200	2.29	86.49	-3.87	0.76	Lognormalverteilung
Supermarkt 2400	1.78	62.24	-3.86	0.83	Lognormalverteilung
Supermarkt 4800	2.65	96.85	-3.80	0.72	Gammaverteilung
Supermarkt gross	1.57	71.06	-4.16	0.99	Gammaverteilung
Kaufhaus	2.08	69.30	-3.76	0.81	Gammaverteilung
Einkaufszentrum	1.34	62.24	-4.26	1.04	Gammaverteilung
Hochfrequenz	1.78	24.23	-2.92	0.84	Gammaverteilung

Tabelle 4. Parameter der Gamma- und Lognormal-Verteilung für die Personendichte pro Nutzungskategorie. Grau eingefärbt sind jeweils die Parameter derjenigen Verteilung, die nicht repräsentativ sind.

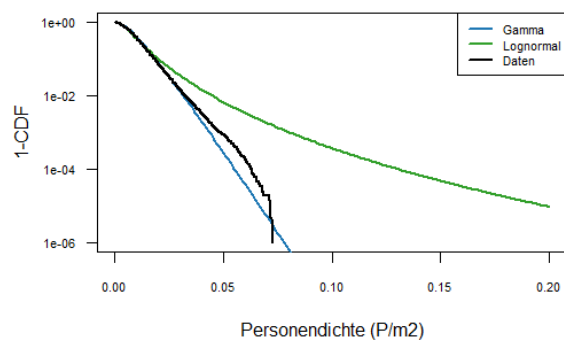
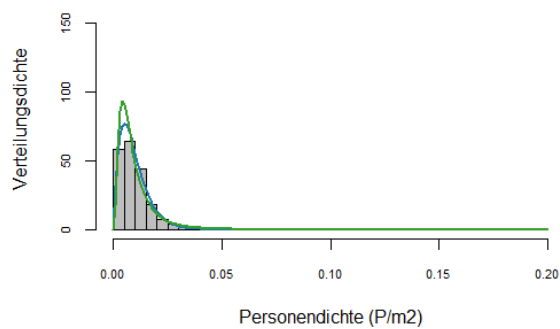
Möbel



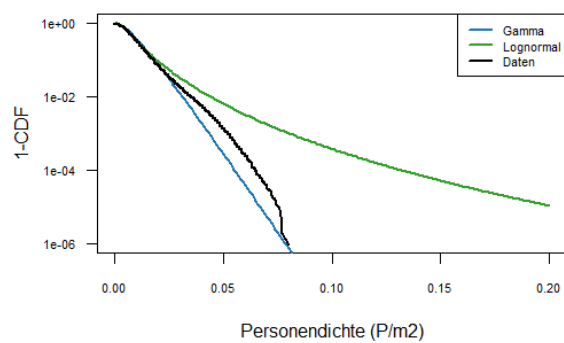
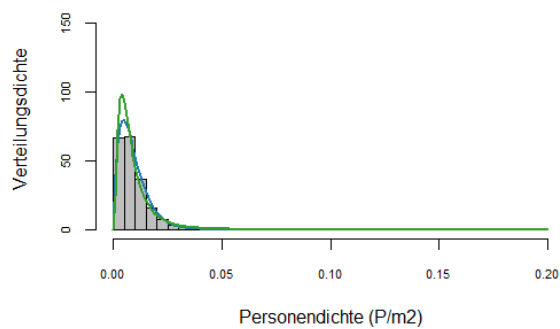
Baumarkt



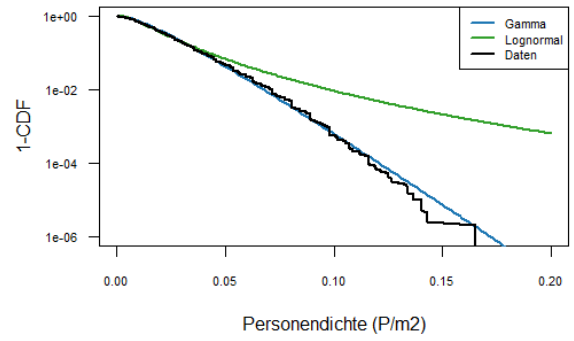
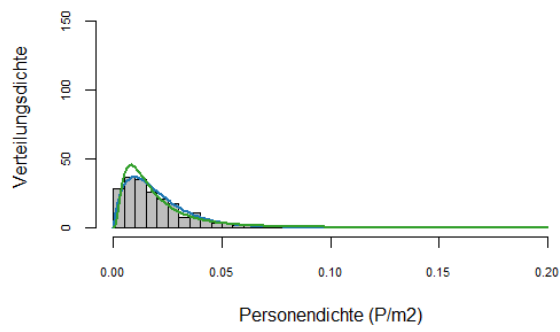
Sportartikel



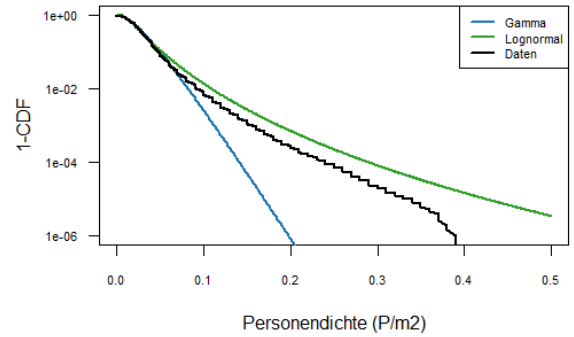
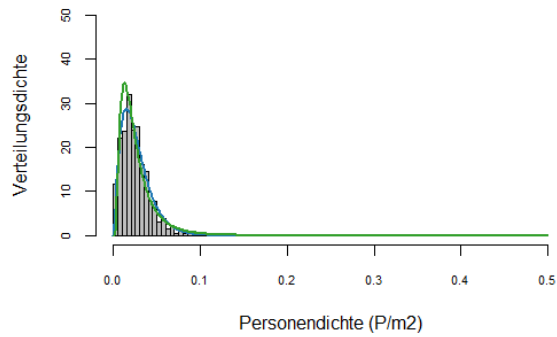
Bekleidung



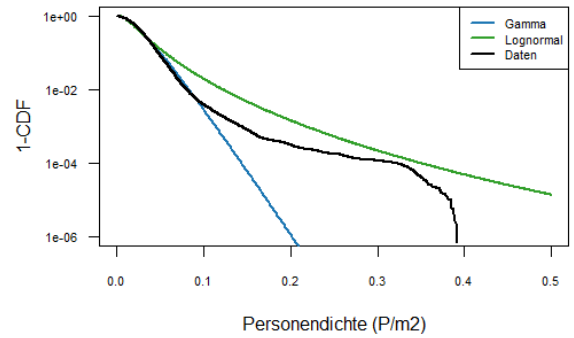
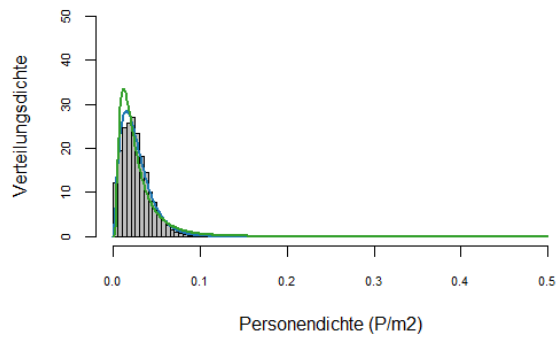
Elektronik



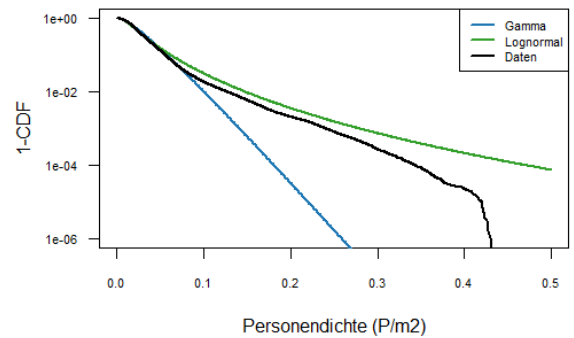
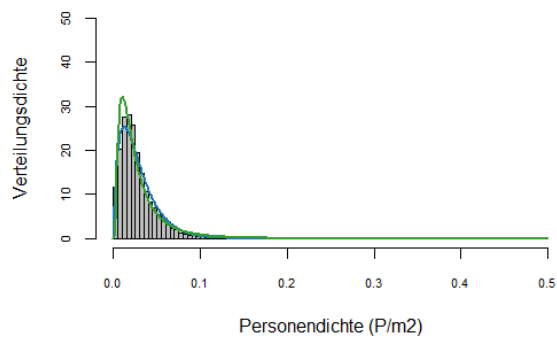
Supermarkt_600



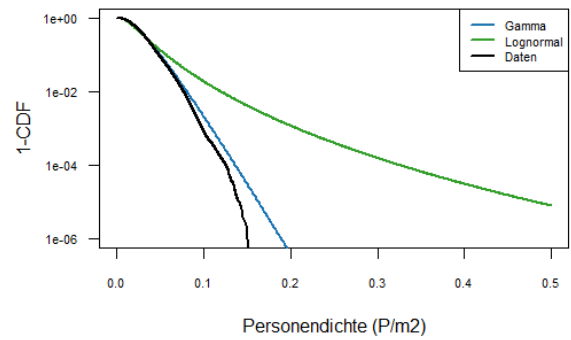
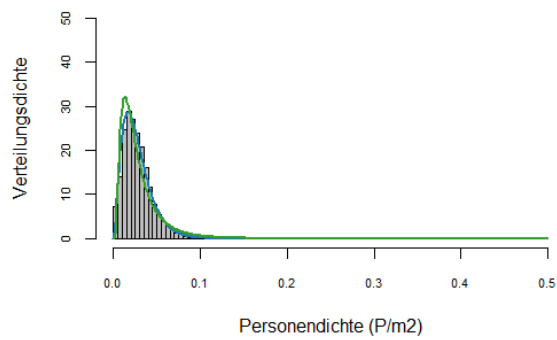
Supermarkt_1200



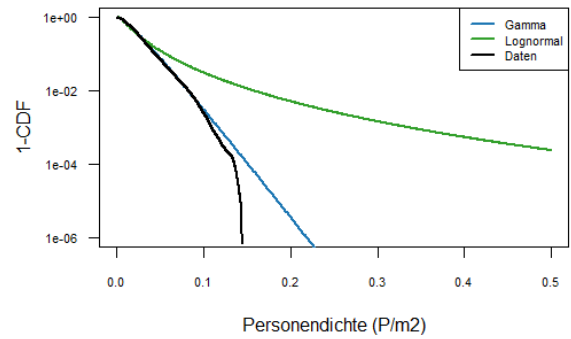
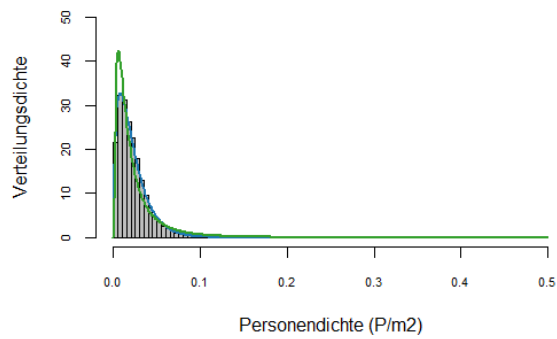
Supermarkt_2400



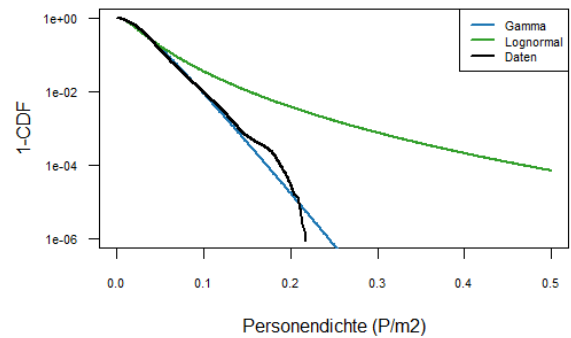
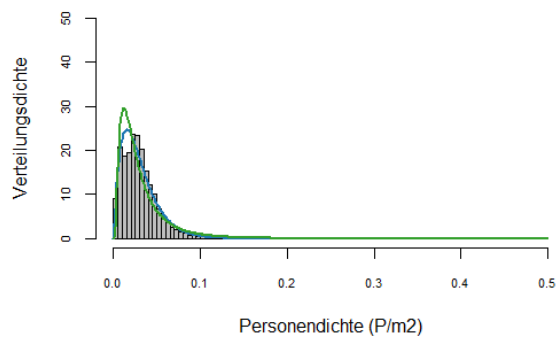
Supermarkt_4800



Supermarkt_gross



Kaufhaus



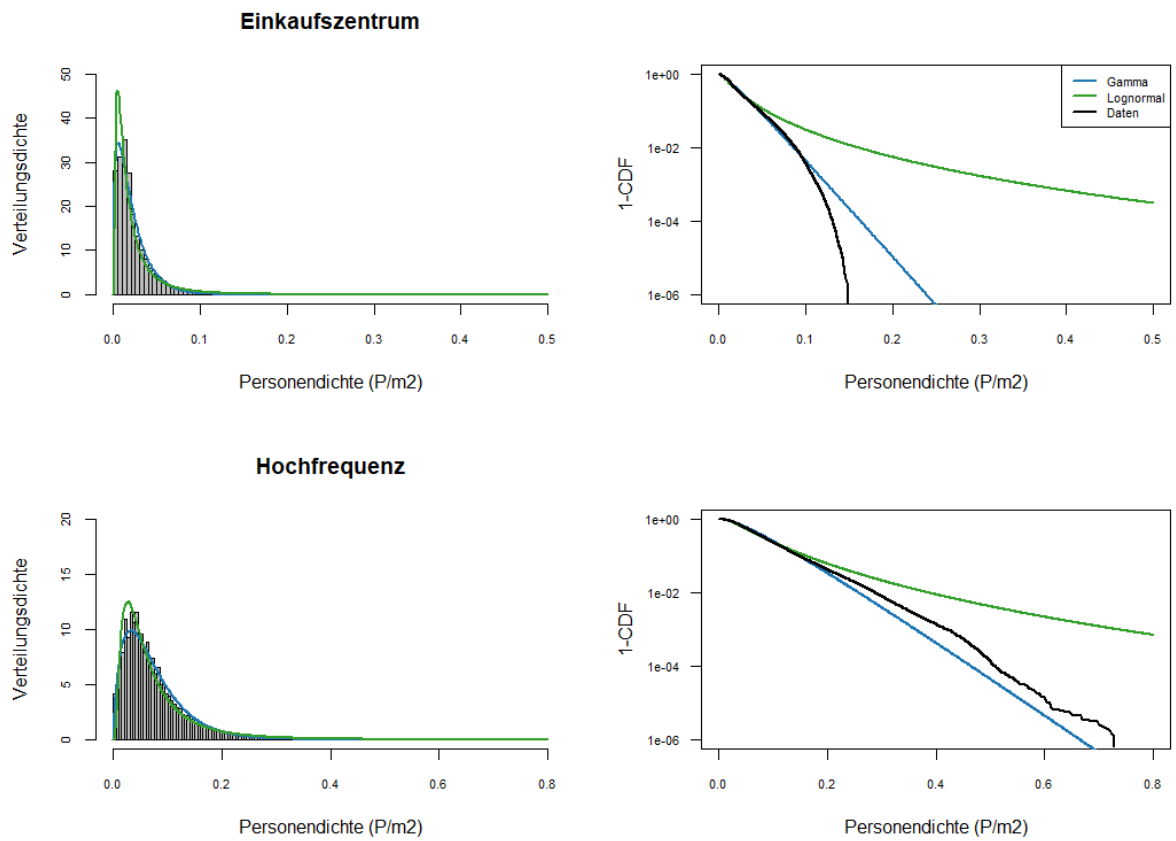


Abbildung 23. Vergleich zwischen Modell und Daten im Histogramm (links) und der invertierten Verteilungsfunktion.

Zusammenstellung statistischer Kennwerte

Nutzungs-kategorie	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient	Median	80%-Quantil	90%-Quantil	99%-Quantil	Max. gemessener Wert
Möbel	0.005	0.005	1.110	0.003	0.007	0.011	0.027	0.068
Baumarkt	0.007	0.005	0.802	0.005	0.010	0.014	0.026	0.068
Sportartikel	0.009	0.007	0.742	0.008	0.014	0.018	0.033	0.073
Bekleidung	0.009	0.007	0.810	0.007	0.014	0.018	0.035	0.081
Elektronik	0.019	0.015	0.791	0.015	0.029	0.039	0.071	0.165
Supermarkt_600	0.025	0.019	0.754	0.022	0.038	0.048	0.091	0.400
Supermarkt_1200	0.026	0.018	0.675	0.023	0.038	0.048	0.080	0.396
Supermarkt_2400	0.029	0.025	0.874	0.022	0.041	0.055	0.126	0.438
Supermarkt_4800	0.027	0.016	0.586	0.025	0.039	0.048	0.077	0.151
Supermarkt_gross	0.022	0.017	0.791	0.018	0.033	0.044	0.082	0.145
Kaufhaus	0.030	0.020	0.679	0.027	0.044	0.055	0.099	0.218
Einkaufszentrum	0.022	0.019	0.879	0.016	0.033	0.048	0.088	0.150
Hochfrequenz	0.073	0.059	0.807	0.057	0.107	0.147	0.286	0.743

Tabelle 5: Zusammenstellung statischer Kennwerte für die Personendichten in Pers./m².

3.5.4 Geschosslage

In den Brandschutzvorschriften wird für die angenommene Personendichte zwischen dem Erdgeschoss und anderen Geschosslagen unterschieden. Zu diesem Zweck werden die Quantile der Personendichte pro Nutzungskategorie abhängig vom Geschoss ausgewertet (siehe Abbildung 24). Entgegen den Vorgaben in der Richtlinie weisen die Filialen im Erdgeschoss tendenziell eine leicht tiefere Personendichte auf. Das Ergebnis ist allerdings durch die kleine Stichprobengrösse mit Vorsicht zu geniessen. Dennoch kann die Auslegung in den Richtlinien, bei der von einer Reduktion der Personendichte für Unter- und Obergeschosse ausgegangen wird, in Frage gestellt werden. Zudem werden frequenzstarke Läden meist strategisch platziert, d.h. an Standorten, an denen mit einem grossen Personenstrom zu rechnen ist (z.B. Fussgängerpassagen in Bahnhöfen). Diese Standorte können sowohl im Erdgeschoss als auch auf anderen Geschossen liegen.

Nutzungskategorie	Erdgeschoss (EG)	Andere (UG/OG)
Baumarkt	6	0
Bekleidung	2	0
Einkaufszentrum	5	3
Elektronik	6	4
Hochfrequenz	3	2
Kaufhaus	0	4
Möbel	3	2
Sportartikel	2	3
Supermarkt_1200	6	0
Supermarkt_2400	7	2
Supermarkt_4800	6	2
Supermarkt_600	9	0
Supermarkt_gross	5	2

Tabelle 6: Stichprobengrösse für die Geschoss-spezifische Auswertung der Personendichte nach Nutzungskategorie

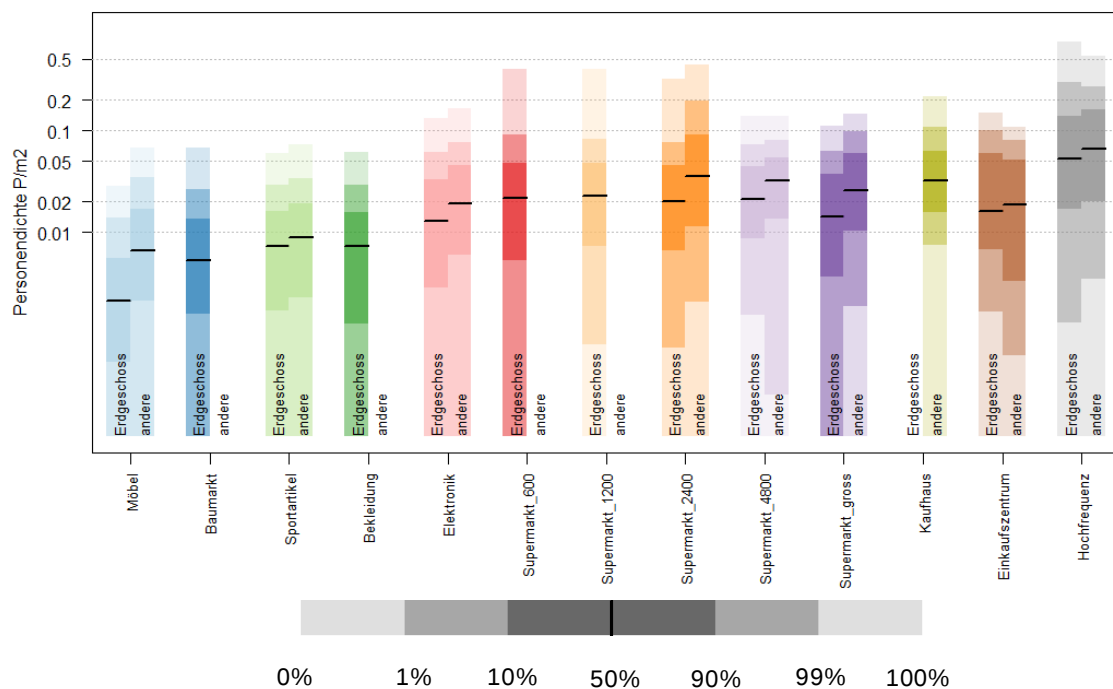


Abbildung 24: Quantile der Personendichte pro Nutzungskategorie abhängig von der Geschosslage.

3.5.5 Quantil unter Berücksichtigung des Messfehlers

Abbildung 25 zeigt das 99%-Quantil der Personendichte aller gemessenen Filialen $\pm \Delta$ in Abhängigkeit der täglichen Besucherfrequenz pro Quadratmeter. Die Toleranz der gemessenen Personendichte ist generell grösser bei hoher Besucherfrequenz. Die Messung der Filiale mit der höchsten Besucherfrequenz von 16 Pers./m² pro Tag (ein Supermarkt_2400 der Kategorie Hochfrequenz) weist gleichzeitig auch die grösste Toleranz von $\Delta = 0.20$ Pers./m² bei einem 99%-Quantil von 0.26 Pers./m² auf. Auf die restlichen Filialen hat der Messfehler nur einen geringen Einfluss. Abbildung 26 zeigt die Verteilung der oberen Fehlerschwanke $+\Delta$ der 99%-Quantile sämtlicher Nutzungskategorien. Abgesehen von den hochfrequenten Supermärkten, unterscheiden sich diese nur leicht von der Verteilung in Abbildung 18.

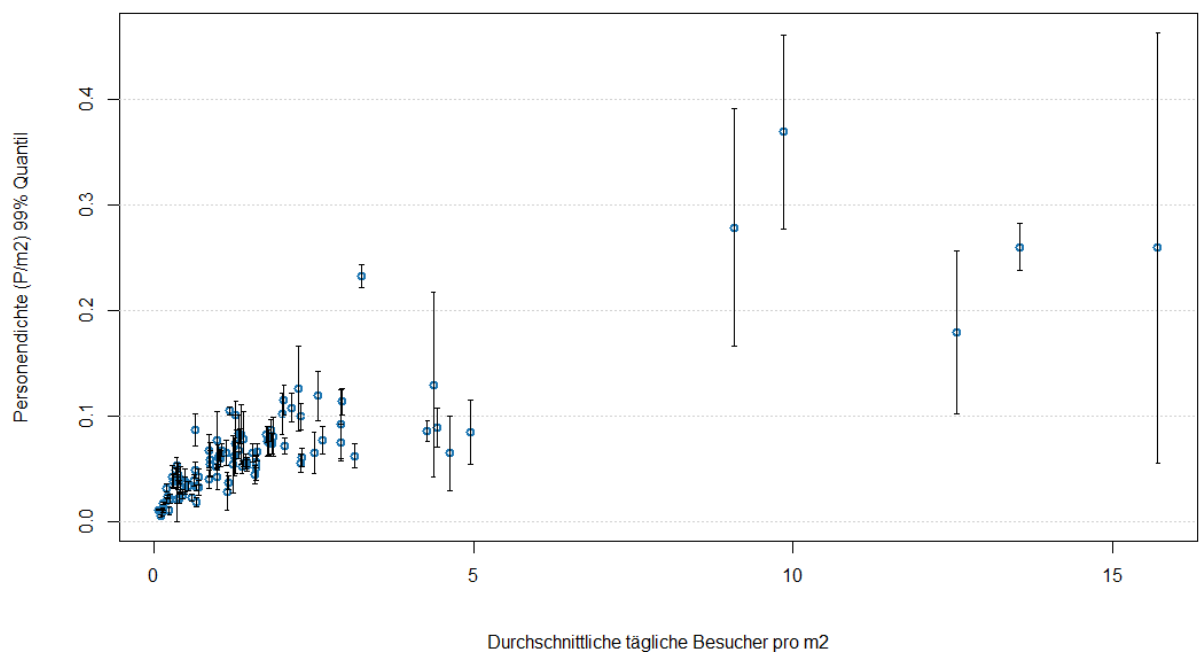


Abbildung 25. 99%-Quantil der Personendichte aller gemessenen Filialen $\pm\Delta$ in Abhängigkeit der täglichen Besucherfrequenz pro Quadratmeter.

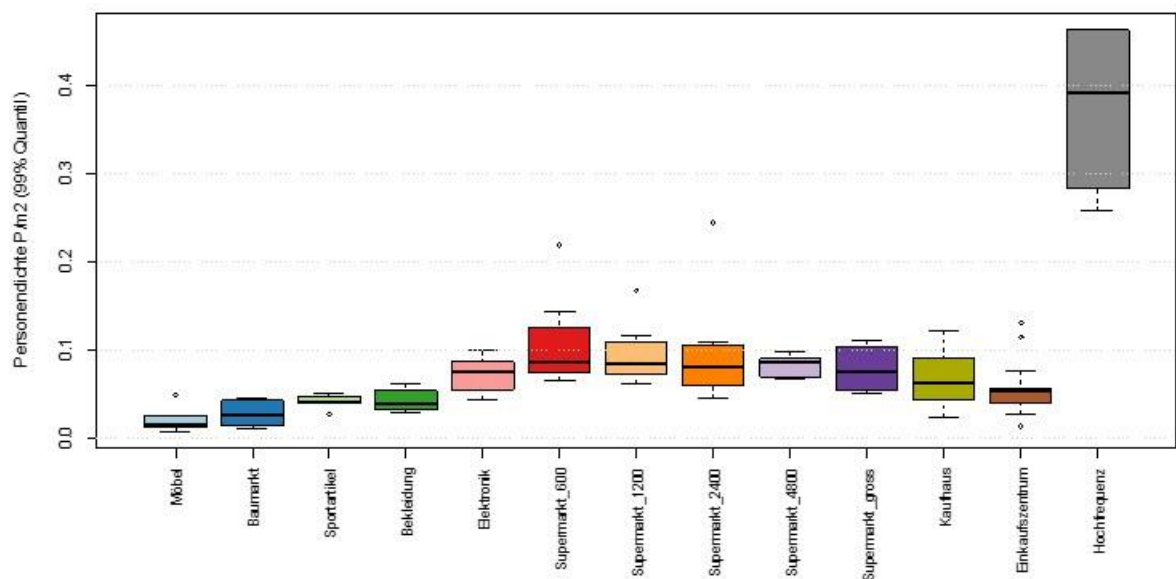


Abbildung 26. Verteilung der oberen Fehlerschranke der 99%-Quantile sämtlicher Nutzungskategorien.

3.5.6 Tagesmaximum

Im Kapitel 2.5 wird die Korrelation der Personenbelegung von der Brandhäufigkeit diskutiert. Es wird begründet, dass eine schwache Korrelation bzw. sogar eine Unabhängigkeit vermutet wird und dies als Grund für eine minütliche Auswertung angebracht wird (Point-in-Time-Verteilung). Das Vorhandensein einer Korrelation wäre ein Hinweis darauf, dass Brände dann stattfinden, wenn gerade eine hohe Personenbelegung vorhanden ist. Um diesen Effekt zu untersuchen, wird für die Personendichte das Tagesmaximum pro Nutzungskategorie ausgewertet (Abbildung 27).

Verglichen mit der Auswertung aller Daten (Abbildung 19) hat die Auswertung des Tagesmaximums höhere Werte für die unteren Quantile. Auf die 100% Quantile hat es keinen

Einfluss, da diese bereits durch die Tagesmaxima bestimmt sind. Für die anderen oberen Quantile gibt es eine deutliche Erhöhung der Personendichten insbesondere für kleine Supermärkte und für hochfrequente Supermärkte gegenüber der Point-in-Time-Verteilung. Dies deutet darauf hin, dass diese Nutzungskategorien ausgeprägte Tagesspitzen haben.

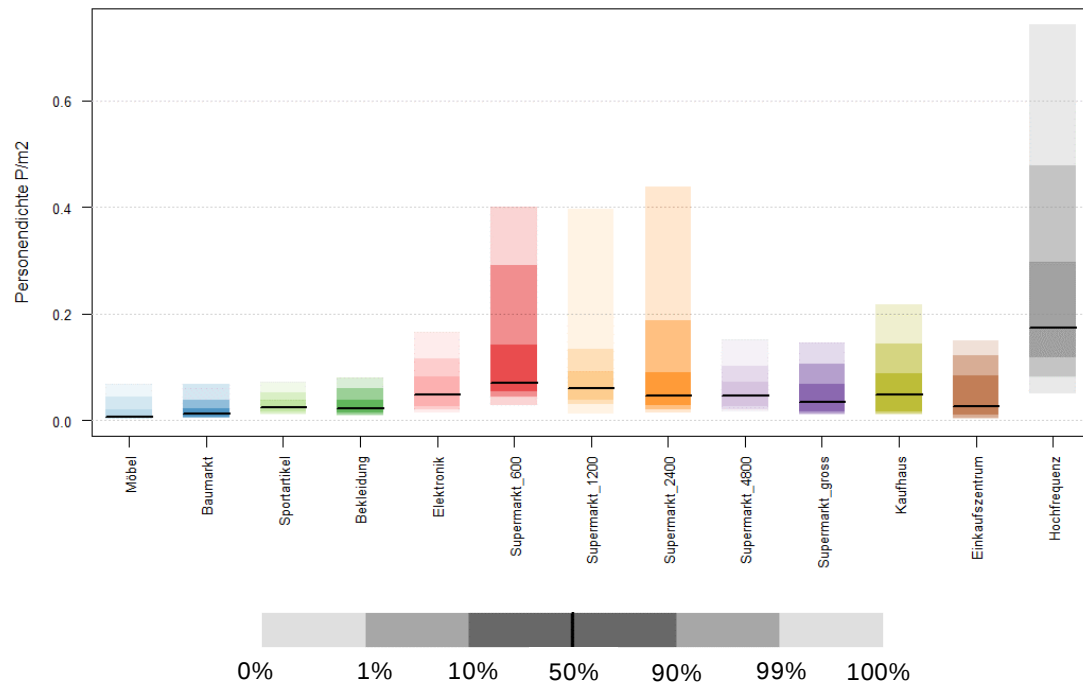


Abbildung 27. Quantile des Tagesmaximums der Personendichte pro Nutzerkategorie.

4. Festlegung von Bemessungswerten für die Personendichte

Basierend auf den Ergebnissen der Studie wird ein Vorschlag für Bemessungswerte der Personendichte in Verkaufsgeschäften ausgearbeitet. Die vorgeschlagenen Bemessungswerte und die Auswirkungen auf die Fluchtweganforderungen und somit auf das Sicherheitsniveau werden in den folgenden Kapiteln ausgiebig analysiert. In diesem Kapitel wird zusammengefasst, welche Überlegungen hinter der Festlegung stecken.

Nutzungskategorie

Die statistische Erhebung hat gezeigt, dass die Personendichte stark von der Nutzung abhängt. Es wird vorgeschlagen die Personendichte anhand von drei Kategorien zu differenzieren:

- **Non-Food-, Near-Food-Verkaufsgeschäfte, Kaufhäuser und Einkaufszentren** (zusammengefasst als Non-Food-Verkaufsgeschäfte bezeichnet): Fachmärkte mit keinem oder nur kleinem Anteil an Food-Artikel. Die Nutzungskategorie umfasst Fachmärkte wie beispielsweise Möbelhäuser, Baumärkte, Sportartikel, Bekleidung und Elektronik. Near-Food-Verkaufsgeschäfte (z.B. Personal Care, Tierbedarf) fallen auch in diese Kategorie. Bereiche in Kaufhäuser und Einkaufszentren mit keinem oder nur kleinen Anteil an Food-Artikeln.
- **Supermärkte:** Verkaufsgeschäfte, die mehrheitlich Food-Artikel verkaufen, aber auch Near-Food- und Non-Food-Artikel im Sortiment haben können.
- **Hochfrequente Supermärkte:** Darunter fallen insbesondere Supermärkte an grossen Verkehrsknotenpunkten mit einem Sonntagsverkauf. In der Regel kann dabei eine totale Tagesbesucherzahl von mehr als 7 Personen pro Quadratmeter Bruttogeschossfläche pro Tag erwartet werden.

Geschosslage

Der Einfluss der Geschosslage auf die Personendichte ist nicht eindeutig. Dies zeigt auch der Vergleich verschiedener normativer Auslegungen (vgl. Abbildung 2). Die statistische Analyse zeigte, dass im Gegensatz zur jetzigen Auslegung, eher von einer höheren Personendichte ab dem ersten Unter-/Obergeschoss auszugehen wäre. Jedoch ist die Personenbelegung stark vom Standort und den angebotenen Produkten abhängig. Wenn die Nachfrage von Produkten vorhanden ist, spielt es nur eine kleine Rolle auf welchem Geschoss diese angeboten werden.

Die Geschosszahl kann für die Personendichte eine Rolle spielen, wenn andere Produkte entlang der Gehwege in andere Geschosslagen angeboten werden. Dies ist beispielsweise in Kaufhäusern der Fall, in denen im Erdgeschoss Produkte angeboten werden, die strategisch platziert werden, um Kunden anzulocken. In Fachmärkten und Supermärkten hat eine solche strategische Platzierung von Produkten eine untergeordnete Auswirkung auf die Personendichte. Für Kaufhäuser und Einkaufszentren kann eine geschossweise Differenzierung der Personendichte Sinn machen. Diese Differenzierung hängt aber stark von der Verkaufsstrategie ab. Deswegen wird empfohlen bei der Bemessung von Kaufhäusern und Einkaufszentren zuerst die gesamte Personenbelegung im Gebäude entsprechend der Nutzungskategorie festzulegen und anschliessend objektspezifisch die Verteilung der Personen auf die Geschosslagen vorzunehmen.

Für die Festlegung eines charakteristischen Wertes der Personendichte wird daher keine Differenzierung nach Geschosslage empfohlen.

Grösse der Verkaufsgeschäfte

Bei Supermärkten konnte keine klare Abhängigkeit der Verkaufsfläche und der Personendichte festgestellt werden. Ein Verzicht einer flächenbezogenen Abstufung erleichtert auch die Anwendung dieser Werte. Deswegen wird auf eine flächenbezogene Abstufung der Personendichte verzichtet.

Quantilwert

Die statistische Analyse der Personendichte zeigte, dass diese sehr variabel ist. In leistungsbasierten Nachweisverfahren und vermutlich auch in präskriptiven Richtlinien wird üblicherweise ein Worst-Credible-Case für die Festlegung eines Szenarios bzw. eines Parameters verlangt. Es ist aber nicht genauer definiert, wie ein solcher definiert ist. Entsprechend wird als charakteristischer Wert ein Wert gewählt, der mindestens einem 99%-Quantilwert der entsprechenden Nutzung entspricht, d.h. ein Wert, der in 99% nicht überschritten wird. Im Vergleich zu anderen Sicherheitsbereichen ist die Wahl eines 99%-Quantilwertes eher als hoch zu werten. In der internationalen Literatur werden für Brandparameter 80% bis 95%-Quantile angegeben [17] (z.B. Brandlast und Wärmefreisetzungsrate). Beispielsweise basiert der charakteristische Wert der Brandlast bei der Heissbemessung von Tragwerken auf einem 80%-Quantilwert [18].

Für die Festlegung des charakteristischen Wertes wird für jede Nutzungskategorie dasjenige 99%-Quantil der einzelnen Nutzungen mit dem höchsten Wert verwendet. Die 99%-Quantilwerte werden aufgerundet und unterstützen die Anwendungsfreundlichkeit der charakteristischen Werte.

	Non-Food [Pers./m ²]	Supermarkt [Pers./m ²]	Supermarkt Hochfrequent [Pers./m ²]
99%-Quantil	0.099 ⁽⁵⁾	0.126 ⁽⁶⁾	0.286
Vorgeschlagener charakteristischer Wert	0.10	0.15	0.30

Tabelle 7: Vorgeschlagene charakteristische Werte für die Personendichte in Verkaufsgeschäften.

Die Anwendung der Werte würde generell eine Erleichterung der Fluchtweganforderungen im Vergleich zur gegenwärtigen Auslegung bedeuten. Ausnahme bilden hochfrequente Supermärkte, die tiefer als das 1. UG oder höher als das 1. OG liegen, da die Richtlinie von einer Personendichte von 0.25 Pers./m² ausgeht. Jedoch muss beurteilt werden, ob die Fluchtweganforderungen, die aus diesen Werten abgeleitet werden, eine sichere Flucht ermöglichen. Im Kapitel 8 wird basierend auf einer Risikoanalyse und den risikobasierten Schutzzielen beurteilt, welcher Bemessungswert der Personendichte notwendig ist, um die präskriptiven Fluchtweganforderung sicher auszubilden. Der Bemessungswert der Personendichte p_d setzt sich dabei zusammen aus dem charakteristischen Wert der Personendichte $p_{c,99\%}$ und einem partiellen Faktor γ ⁷:

$$p_d = p_{c,99\%} \cdot \gamma$$

Der partielle Faktor γ repräsentiert eine Kalibriergrösse mit der optimale Fluchtweganforderungen basieren auf dem 99%-Quantil der Personendichte $p_{c,99\%}$ ermittelt werden können.

5 Wert für Einkaufszentrum

6 Wert für Supermarkt_2400

7 Die Bezeichnung «partieller Faktor» wird vom Bemessungsprinzip des Eurocodes für Tragwerke übernommen. Früher wurde dieser Faktor als partiellen Sicherheitsfaktor bezeichnet.

Anwendung der Werte

Ein Ersatz der Personendichten für Verkaufsgeschäfte in den Brandschutzrichtlinien mit den Werten aus Tabelle 7 ist nicht ohne weiteres möglich. Der Grund dafür ist, dass diese Werte die Fluchtweganforderungen (insbesondere die Breite der Fluchtwege) beeinflussen. Eine Änderung dieser Anforderung hat eine unmittelbare Auswirkung auf das Sicherheitsniveau. Diese Änderung des Sicherheitsniveaus muss zuerst untersucht werden. Diese Untersuchung ist das Thema der folgenden Kapitel insbesondere Kapitel 7 und Kapitel 8.

Für leistungsorientierte Ansätze (z.B. ASET/RSET Nachweise) können die Werte in Tabelle 7 verwendet werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass diese einem 99%-Quantil entsprechen. Es ist nicht klar, ob diese Werte einem Worst-Credible-Case entsprechen und vergrößert werden müssten mit einem eigens für leistungsorientierte Nachweisverfahren kalibrierten partiellen Faktor $\gamma > 1$. Wenn man zudem die große Variabilität der Personenbelegung in Betracht zieht, stellt sich die Frage, ob es gerechtfertigt ist, bei der Analyse seltener Brandszenarien eine hohe Personenbelegung anzunehmen, insbesondere im Zusammenhang mit seltenen Brandszenarien mit einem hohen Wert für die Brandausbreitungsrate und andere brandbezogene Parameter. Nur eine probabilistische oder eine risikobasierte Analyse kann diese Frage beantworten. Dies ist aber nicht Teil dieser Studie.

Im Hinblick auf die große Variabilität der Personenbelegung stellt sich auch die Frage, in welchem Ausmass es für leistungsorientierte Nachweise gerechtfertigt ist komplexe Modelle (z.B. auf der Grundlage einer agentenbasierten Evakuierungsanalyse) gegenüber vereinfachten Modellen (z.B. auf der Grundlage der hydraulischen Analogie) vorzuziehen. Wir empfehlen dies in zukünftigen Forschungsprojekten zu erörtern, indem probabilistische Analysen unter Berücksichtigung aller wichtigen Unsicherheiten durchgeführt werden und die Bedeutung jeder Unsicherheit für die Personensicherheit bewertet wird. Dies liefert die Grundlage für die Ableitung von Bemessungsszenarien für den Evakuationsfall, z.B. durch einen semi-probabilistischen Bemessungsansatz.

Wenn probabilistische oder risikobasierte Ansätze innerhalb eines leistungsorientierten Entwurfs gewählt werden, wird empfohlen, die in Tabelle 4 angegebene probabilistische Verteilung zu verwenden. Der Vorteil der Verwendung eines solchen Ansatzes besteht darin, dass die Schiefe der Verteilung der Personenbelegung berücksichtigt werden kann.

5. Methodik zur Überprüfung von präskriptiven Anforderungen

Die ermittelten Personendichten haben eine Auswirkung auf die Dimensionierung der Fluchtwege, wenn diese zur Bemessung verwendet werden. Um abzuschätzen, ob mit diesen Werten eine sichere Evakuierung im Brandfall ermöglicht werden kann, werden im Kapitel 5.1 vereinfachte Referenzfälle gebildet, um die Sicherheit zu überprüfen. Kapitel 5.2 zeigt, wie die vorgeschlagenen Bemessungswerte die Fluchtweganforderungen beeinflussen. Im Kapitel 5.3 werden unterschiedliche Methoden vorgestellt, wie diese neuen Fluchtweganforderungen überprüft bzw. optimiert werden.

5.1 Referenzfälle für die Überprüfung der Fluchtweganforderungen

5.1.1 Layouts

Eine Anpassung der Personendichte in den Richtlinien hat eine Änderung der präskriptiven Anforderungen zur Folge. Um diese zu analysieren, werden Referenzfälle gebildet, mit denen die Anforderungen mit unterschiedlichen Methoden überprüft werden können.

Als Grundlage für die Bildung der Referenzfälle wird die Geschossfläche für die erlaubte Fluchtweglänge von 35 m maximiert (Abbildung 28). Die entsprechende Geschossfläche ist 1225 m^2 pro Ausgang. Dieser Grundriss dient als Basis für die Bildung größerer Grundrisse, durch verdoppeln, verdreifachen, etc. des Grundrisses (Abbildung 29). Zusätzlich wird durch das Halbieren des Grundrisses ein Referenzfall mit kleiner Fläche erstellt. Die sechs Referenzfälle haben somit Geschossflächen zwischen 648 m^2 und 6250 m^2 .

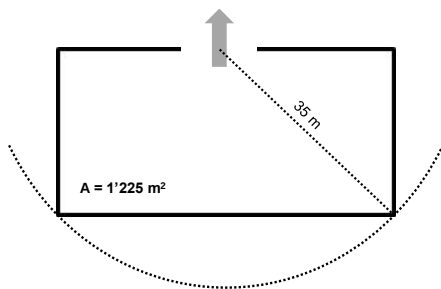


Abbildung 28 Maximierte Geschossfläche als Grundlage für die Bildung der Referenzfälle.

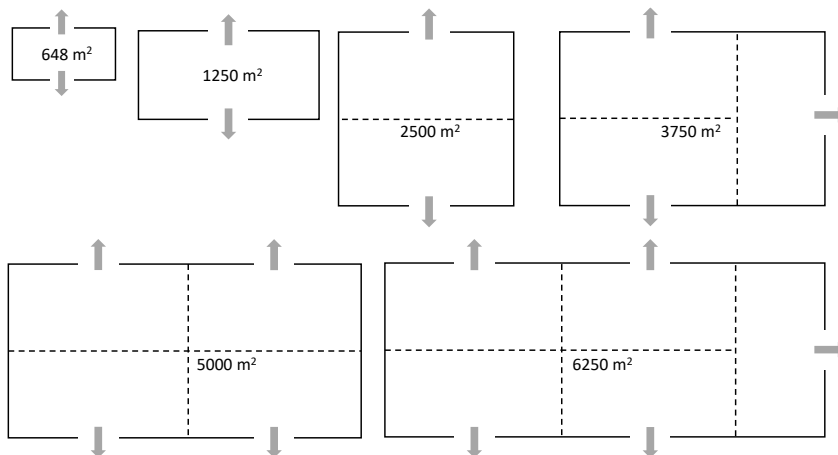


Abbildung 29 Grundrisse der sechs Referenzfälle⁸.

⁸ Für 648 m^2 wurde eine Fluchtweglänge von 25 m angesetzt. Für die anderen Referenzfälle eine Fluchtweglänge von 35 m.

Die Referenzfälle decken die Geschossflächen der bestehenden Supermärkte von einem der beiden grössten Einzelhändler ab (Tabelle 8). Es kann davon ausgegangen werden, dass andere Verkaufsketten ähnliche Flächenklassen haben. Dabei liegt der Fokus auf den Flächenklassen, von denen es vergleichsweise viele Filialen gibt (Klassen 500 m² bis 1270 m²) sowie auf den sehr grossen Flächen (Klassen 2441 m² bis mehr als 4941 m²). Für die grösste Klasse werden zwei Referenzflächen betrachtet. Dabei deckt die grössere Fläche von 6250 m² ein mögliches zukünftiges Bedürfnis der Verkaufsbranche ab.

Flächenklassen [m ²]	Verteilung Filialen
0 - 250	2%
251 - 500	10%
501 - 850	22%
851 - 1270	23%
1271 - 1820	15%
1821 - 2440	12%
2441 - 3080	5%
3081 - 3700	4%
3701 - 4940	5%
4941 -	3%

Tabelle 8: Geschossflächen aller Supermärkte von einem der beiden grössten Einzelhändler der Schweiz.

Für alle Referenzfälle wird eine Raumhöhe von 4 m festgelegt. Diese deckt auch die Raumhöhe von Bestandbauten ab. Neubauten werden mit einer Raumhöhe von mindestens 4.5 m gebaut. Die Analyse liegt für Neubauten also auf der konservativen Seite.

5.1.2 Nutzungskategorien

Analysiert werden die Nutzungskategorien Non-Food-Verkaufsgeschäfte, Supermärkte und hochfrequente Supermärkte. Um die Analyse zu vereinfachen werden aus den verschiedenen Nutzungen der jeweiligen Kategorie repräsentative, statistische Verteilungen für die Nutzungskategorien gewählt. Die repräsentative Verteilung wird so gewählt, dass die höchsten Personendichten, die erhoben wurden, abgebildet werden. Tabelle 9 zeigt die Zuweisung der statistischen Verteilungen gemäss Tabelle 4 zu den übergeordneten Nutzungskategorien.

Übergeordnete Nutzungskategorie	Repräsentative statistische Verteilung	Bemerkungen
Non-Food-Verkaufsgeschäfte	Einkaufszentrum (Gamma-Verteilung)	Die statistische Verteilung für Einkaufszentren führt zu deutlich grösseren Personendichten, im Vergleich zu den anderen Nutzungen (Elektronik, Möbel, Bekleidung, Sportartikel und Baumärkte).
Supermarkt	Supermarkt 2'400 m ² (Lognormal-Verteilung)	Die statistische Verteilung der Personendichte der meisten Supermärkte kann durch eine Gamma-Verteilung charakterisiert werden. Ausnahme bildet die statistische Verteilung der Supermärkte 2'400 m ² , die einer Lognormalverteilung entspricht. Bei der Lognormalverteilung ist der Schwanz der Verteilung relativ lang und führt dazu, dass relativ hohe Personendichten statistisch ermöglicht werden. Dies im Gegensatz zur Gammaverteilung, die vergleichsweise einen kurzen Schwanz hat. Daher wird die Wahl der repräsentativen Verteilung die Personendichten der anderen Kategorien stark überschätzen.
Hochfrequenter Supermarkt	Hochfrequenter Supermarkt (Gamma-Verteilung)	Die Daten der Personendichten werden mit der Gamma-Verteilung repräsentiert. Während häufige Werte gut repräsentiert werden, werden seltene Werte etwas unterschätzt. Dies wird jedoch akzeptiert, da die Charakteristik der Kurve (stark abfallende Tendenz) mit der Gammaverteilung gut repräsentiert werden kann.

Tabelle 9: Festlegung von repräsentativen statistischen Verteilungen für die probabilistische Analyse.

5.2 Einfluss auf Fluchtweganforderungen

5.2.1 Anzahl und Gesamtbreite der Fluchtwege

Wenn die vorgeschlagenen Werte für die Personendichte aus Kapitel 4 mit einem partiellen Faktor von $\gamma = 1.0$ auf die Referenzfälle angewandt werden, würde sich nach der Bemessung nach der BSR 16-15 Art. 2.4.6 und Art. 2.4.7 vor allem die Gesamtbreite gegenüber der Auslegung der gegenwärtigen Brandschutzrichtlinien verkleinern. Auf die Anzahl der Ausgänge hätte die Änderung keinen Einfluss. Eine Übersicht über die Änderungen bezüglich der Gesamtbreite (ebenerdig) geben Tabelle 10 bis Tabelle 12. Für Non-Food-Verkaufsgeschäfte und Supermärkte wären für den ebenerdigen Fall mit den vorgeschlagenen Bemessungswerten nur noch Minimalanforderungen an die Fluchtwegbreiten nötig.

Non-Food

Totale Fläche	Fläche [m ²]	Anzahl Ausgänge	Gesamtbreite Ausgänge nach BSR 2015* [m] (0.5 Pers./m ²)	Gesamtbreite Ausgänge Non-Food [m] mit 0.1 Pers./m ² und $\gamma = 1.0$	
$\frac{1}{2} \times L_F^2$	648	2	2.4	1.8	(2 x 0.9 m)
$1 \times L_F^2$	1250	2	3.8	2.1	(0.9 m + 1.2 m)
$2 \times L_F^2$	2500	2	7.5	2.4	(2 x 1.2 m)
$3 \times L_F^2$	3750	3	11.3	3.6	(3 x 1.2 m)
$4 \times L_F^2$	5000	4	15.0	4.8	(4 x 1.2 m)
$5 \times L_F^2$	6250	5	18.8	6.0	(5 x 1.2 m)

Tabelle 10: Anzahl Ausgänge und Fluchtweg-Gesamtbreiten für verschieden Referenzfälle für die Personendichte gemäss BSR 16-15 (ebenerdig) und gemäss Studie für Non-Food-Verkaufsgeschäfte (mit $\gamma = 1.0$).

Supermärkte

Totale Fläche	Fläche [m ²]	Anzahl Ausgänge	Gesamtbreite Ausgänge nach BSR 2015* [m] (0.50 Pers./m ²)	Gesamtbreite Ausgänge Non-Food [m] mit 0.15 Pers./m ² und $\gamma = 1.0$	
$\frac{1}{2} \times L_F^2$	648	2	2.4	1.8	(2 x 0.9 m)
$1 \times L_F^2$	1250	2	3.8	2.1	(0.9 m + 1.2 m)
$2 \times L_F^2$	2500	2	7.5	2.4	(2 x 1.2 m)
$3 \times L_F^2$	3750	3	11.3	3.6	(3 x 1.2 m)
$4 \times L_F^2$	5000	4	15.0	4.8	(4 x 1.2 m)
$5 \times L_F^2$	6250	5	18.8	6.0	(5 x 1.2 m)

Tabelle 11: Anzahl Ausgänge und Fluchtweg-Gesamtbreiten für verschieden Referenzfälle für die Personendichte gemäss BSR 16-15 (ebenerdig) und gemäss Studie für Supermärkte (mit $\gamma = 1.0$).

Hochfrequente Supermärkte

Totale Fläche	Fläche [m ²]	Anzahl Ausgänge	Gesamtbreite Ausgänge nach BSR 2015* [m] (0.5 Pers./m ²)	Gesamtbreite Ausgänge Non-Food [m] mit 0.3 Pers./m ² und $\gamma = 1.0$
$\frac{1}{2} \times L_F^2$	648	2	2.4	2.1 (0.9 m + 1.2 m)
$1 \times L_F^2$	1250	2	3.8	2.4 (2 x 1.2 m)
$2 \times L_F^2$	2500	2	7.5	4.5 (750 Pers. * 0.6 m / 100 Pers.)
$3 \times L_F^2$	3750	3	11.3	6.8 (1125 Pers. * 0.6 m / 100 Pers.)
$4 \times L_F^2$	5000	4	15.0	9.0 (1500 Pers. * 0.6 m / 100 Pers.)
$5 \times L_F^2$	6250	5	18.8	11.3 (1875 Pers. * 0.6 m / 100 Pers.)

Tabelle 12: Anzahl Ausgänge und Fluchtweg-Gesamtbreiten für verschiedenen Referenzfälle für die Personendichte gemäss BSR 16-15 (ebenerdig) und gemäss Studie für hochfrequente Supermärkte (mit $\gamma = 1.0$).

5.2.2 Notwendigkeit von sprachgesteuerten Informationssystemen

Tabelle 13 gibt eine Übersicht über die Notwendigkeit von sprachgesteuerten Informationssystemen mit der vorgeschlagenen Auslegung. Solche Systeme werden mit den vorgeschlagenen Personendichten erst ab 1'200 m² für Non-Food-Verkaufsgeschäfte und Supermärkte bzw. ab 1'000 m² für hochfrequente Supermärkte notwendig.

Gesamtverkaufsfläche	Kriterium BSR (2015)	Gesamtverkaufsfläche BSR (2015) (0.5 Pers./m ²)	Non Food (0.10 Pers./m ²)	Supermärkte (0.15 Pers./m ²)	Hochfrequente Supermärkte (0.30 Pers./m ²)
Kein System	Personen < 300	bis 600 m ²	bis 1200 m ²	bis 1200 m ²	bis 1000 m ²
Beschallungsanlage	ab 300 Personen bzw. ab 1'200 m ²	von 600 m ² bis 4800 m ²	von 1200 m ² bis 4800 m ²	von 1200 m ² bis 4800 m ²	von 1000 m ² bis 4800 m ²
elektroakustisches Notfallwarnsystem	ab 4'800 m ²	ab 4800 m ²	ab 4'800 m ²	ab 4'800 m ²	ab 4'800 m ²

Tabelle 13: Notwendigkeit von sprachgesteuerten Informationssystemen. Rötlich eingefärbt sind die Änderungen zu den heutigen Anforderungen (mit $\gamma = 1.0$).

5.3 Analysemethodik

Da die Fluchtweganforderungen von den vorgeschlagenen Personendichten teilweise stark verändert werden, ist es wichtig, die Auswirkungen dieser Änderung auf die Personensicherheit zu analysieren. Ziel ist dabei eine sichere Evakuierung der Personen aus dem Raum der Brandentstehung zu gewährleisten. Dabei werden ingenieurmässige Methoden angewandt, mit denen sich die verschiedenen Auslegungen beurteilen lassen. Kapitel 6 gibt einen Überblick über die Grundlagen, Kriterien und die physikalischen Modelle, die bei der Beurteilung mittels Ingenieurmethoden angewandt werden.

Ob eine Auslegung der Fluchtweganforderungen sicher genug ist, wird anhand von zwei Betrachtungsweisen beurteilt:

— Deterministische Betrachtungsweise (Kapitel 7)

Bei dieser Betrachtung werden die Fluchtweganforderungen anhand eines Worst-Credible-Case untersucht. Der Worst-Credible-Case entspricht einer pessimistischen Auslegung der Brandszenarien und der Evakuationsparameter, u.a. der Personendichte. Diese

Betrachtungsweise entspricht der gegenwärtigen Auslegung für leistungsorientierte Nachweisverfahren im Brandschutz. Das Ziel dieser Betrachtung ist aufzuzeigen, dass eine Bemessung mit den vorgeschlagenen Bemessungswerten den Nachweis einer sicheren Evakuierung ebenso erfüllen, wie eine Bemessung mit den gegenwärtigen Bemessungswerten der Brandschutzrichtlinie, die als genügend sicher eingestuft wird (Gleichwertigkeit).

— Risikobasierte Betrachtungsweise (Kapitel 8)

Bei der risikobasierten Betrachtungsweise werden verschiedene Brand- und Evakuationsszenarien betrachtet. Dabei wird nicht nur die Wahrscheinlichkeit eines Szenarios betrachtet, sondern auch das entsprechende Ausmass (Anzahl Todesfälle). Damit lassen sich auch sogenannte Low-Probability-High-Consequence-Probleme analysieren, bei denen die Todesfallwahrscheinlichkeit zwar klein ist, aber das Ausmass hoch ausfallen kann. Zudem lassen sich auch die Zuverlässigkeit technischer Systeme (z.B. Löschanlagen) sehr gut abbilden.

Die risikobasierte Betrachtung dient zur Einschätzung, wie hoch das kollektive Personenrisiko im Brandfall ist. Damit kann beurteilt werden, ob das Risiko mit den neuen Fluchtweg Anforderungen akzeptabel ist, oder ob Massnahmenkosten es rechtfertigen, das Risiko weiter zu reduzieren. Die Beurteilung erfolgt mit risikobasierten Akzeptanzkriterien, d.h. einer Obergrenze für das Nutzerrisiko und mit dem Grenzkostenansatz, mit dem sich die Kosten-Wirksamkeit von Massnahmen beurteilen lässt. Beide Akzeptanzkriterien stammen aus einem Stakeholder-Prozess zur Festlegung risikobasierter Akzeptanzkriterien für die VKF-Brandschutzvorschriften 2026 (vgl. Kapitel 8.1).

6. Grundlagen der Modellierung

Das Ingenieurmodell besteht aus zwei Teilen: Brandmodellierung und Evakuationsmodellierung. Die Brandmodellierung beschreibt den Brandverlauf und modelliert die Ausbreitung des Rauches im Raum. Dabei werden eine rauchführende Schicht (Rauchschicht) und eine raucharme Schicht bestimmt, wobei sich erstere im Verlauf des Brandes von der Decke nach unten senkt (Abbildung 30). In der raucharmen Schicht ist eine sichere Evakuierung möglich. Die Höhe und die Charakteristiken des Rauchs bestimmen die verfügbare Zeit im Raum, bis die Erträglichkeitsgrenze erreicht wird. Diese Zeit wird als ASET (Available Safe Egress Time) bezeichnet und steht den evakuierenden Personen zur Selbstrettung aus dem Gefahrenbereich zur Verfügung. Kapitel 6.1 gibt eine Übersicht wie die ASET modelliert wird und mit welchen Unsicherheiten die Brandparameter assoziiert sind.

Die Evakuationsmodellierung beschreibt die Flucht der evakuierenden Personen. Sie berücksichtigt die Alarmierungszeit, die Reaktionszeit und die Fluchtdauer. Die Evakuationsmodellierung bestimmt abhängig von der Anzahl Personen im Raum, der Fluchtwegbreiten und weiteren Faktoren die benötigte sichere Evakuationszeit. Diese Zeit wird als RSET (Required Safe Egress Time) bezeichnet und beschreibt den Zeitpunkt, an dem die letzte Person den Gefahrenbereich verlässt. Zudem soll die Flucht sicher erfolgen. Dabei müssen Rahmenbedingungen eingehalten werden, die eine sichere Flucht gewährleisten (beispielsweise Vermeidung von zu hohen Staudrücken und Paniksituationen).

Kapitel 6.2 gibt eine Übersicht wie die RSET modelliert wird und welche Rahmenbedingungen für eine sichere Flucht eingehalten werden müssen (insbesondere den maximal ertragbaren Staudruck).

Eine sichere Flucht aus dem Raum der Brandentstehung ist gegeben, wenn die verfügbare Zeit im Raum (ASET) grösser ist als die benötigte sichere Evakuationszeit (RSET):

- $ASET > RSET$
- und wenn Randbedingungen für eine sichere Evakuierung eingehalten werden.

Ziel dieses Kapitels ist nicht nur die Modellierung der ASET und RSET aufzuzeigen, sondern auch eine Übersicht der wissenschaftlichen Grundlagen für die Festlegung der Brand- und Evakuierungsparameter zu geben und darüber, mit welchen Unsicherheiten die Parameter assoziiert sind. Statt Bemessungswerte aus Richtlinien für Ingenieurnachweise zu verwenden, wird deshalb versucht die wissenschaftlichen Grundlagen anzuwenden, die für die Festlegung dieser Bemessungswerte verwendet wurden oder neue wissenschaftliche Erkenntnisse einzuarbeiten. Eine Übersicht über sämtliche Parameter und ihren statistischen Verteilungen ist im Anhang A6 gegeben.

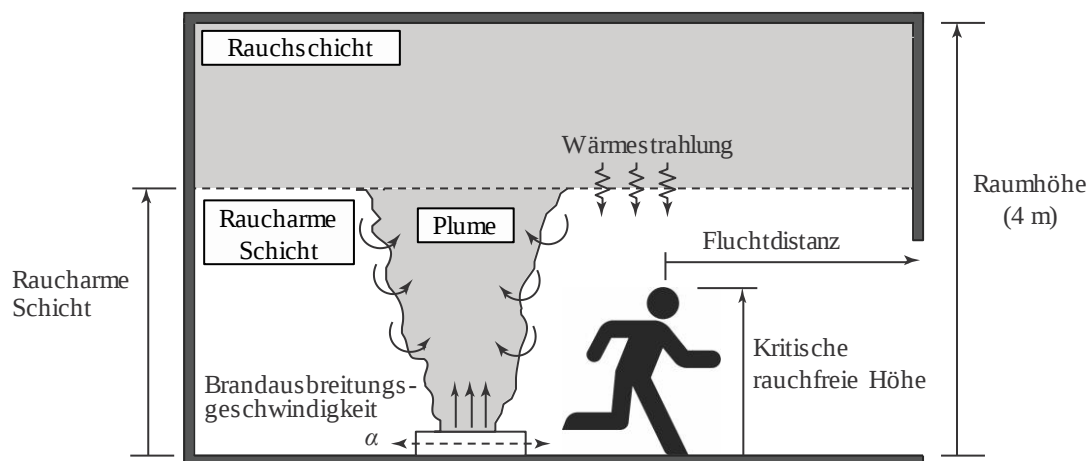


Abbildung 30 Schematische Darstellung der Brand- und Evakuationsmodellierung (adaptiert aus [19]).

6.1 Modellierung des Brandes und dessen Auswirkung

Die Verbrennungsprodukte eines Brandes füllen den Raum kontinuierlich mit Rauch. Da der brandrauch toxische Gase beinhaltet, kann der Rauch im Laufe der Zeit kritisch für die Personen im Gebäude werden, die diesem ausgesetzt sind. Das Ziel der Brandmodellierung ist die Berechnung des Zeitpunkts, an dem Bedingungen für eine sichere Evakuation aus dem Gefahrenbereich nicht mehr gegeben sind. Dieser Zeitpunkt wird als ASET (Available Safe Egress Time) bezeichnet. Dieses Kapitel gibt zuerst einen Überblick wie die Letalitätskriterien definiert werden, die für die Festlegung der ASET verwendet werden. Anschliessend wird auf die Modellierung und die Beschreibung der Brandparameter eingegangen und schliesslich auf die Auswertung der ASET.

6.1.1 Letalitätskriterien

Die Zeit bis zum Erreichen von unhaltbaren Bedingungen wird als ASET bezeichnet. In diesem Kapitel geht es um die Formulierung der Erträglichkeitsgrenzen, d.h. der unhaltbaren Bedingungen, die zu Personenschäden führen können. Leistungsorientierte Ansätze (performance-based-Ansätze) verwenden Nachweiskriterien zur Berücksichtigung der maximal zulässigen Exposition der Personen gegenüber:

- Wirkung toxischer Stoffe auf Personen
- Hitzewirkung auf Personen
- Einschränkung der Sichtweite durch den Rauch.

Mit diesen Nachweiskriterien lässt sich durch Brandmodelle die ASET bestimmen. Die Kriterien sind in Tabelle 14 zusammengestellt.

Wirkung toxischer Stoffe auf Personen

Da die Nachweiskriterien für die Exposition an toxischen Gasen mit der Höhe der raucharmen Schicht zusammenhängen, kann der Nachweis vereinfachend auch über die Höhe der raucharmen Schicht erfolgen [17]: Wenn die raucharme Schicht kleiner wird als die kritische rauchfreie Höhe (Abbildung 30), dann ist mit Personenschäden zu rechnen. Dieser Ansatz ist konservativ ausgelegt, da:

- ausgegangen wird, dass die Konzentration der toxischen Stoffe in der Rauchschicht jederzeit über dem zulässigen toxischen Grenzwert liegt (die Konzentration von toxischen

Stoffen hängt stark vom Brandgut und von der Rauchausbeute ab; durch diesen Ansatz gibt es keine Einschränkungen des Brandguts, da vom schlimmsten Fall ausgegangen wird)

- Personenschäden erst nach einer bestimmten Dosis an toxischen Stoffen eintreten (Eingeatmete Menge über einen gewissen Zeitraum)
- die maximale Dosis für Personenschäden selbst von Person zu Person streut.

Dieser Ansatz findet vor allem bei Zonenmodellen Anwendung, bei denen die Schichthöhe Bestandteil des Berechnungsmodells ist.

Für ingenieurmässige Nachweise in der Schweiz werden üblicherweise kritische rauchfreie Höhen von 2.5 m bis 3.5 m von den Behörden gefordert und decken sich mit den Grenzwerten des deutschen Leitfadens für Ingenieurmethoden des Brandschutzes [17]. Diese angesetzten Höhen sind wesentlich höher als eine durchschnittliche Personenhöhe. Die Körpergrösse von 90% aller Männer und Frauen liegt zwischen 1.60 bis 1.85 m [20]. Erst wenn die raucharme Schicht diese Höhe erreicht, kann von einer Inhalation von toxischen Gasen ausgegangen werden. Zudem werden in Richtlinien in Ländern, in denen leistungsorientierte Nachweisverfahren langjährig etabliert sind (z.B. Schweden und Neuseeland) von Evaluationshöhe zwischen 1.8 m und 2.5 m ausgegangen [21]. Die Höhendifferenz zur üblichen Körpergrösse wird oft mit Sicherheitsmargen und die Abdeckung von Modellunsicherheiten der Rauchausbreitungsmodelle begründet. Allerdings ist unklar, wie diese Werte entstanden sind und welche Unsicherheiten und konservativen Annahmen diese wirklich beinhalten.

In De Sanctis [19] wurde der Beitrag der unsicheren bzw. streuenden Parameter⁹ auf die ASET untersucht. Statistisch konnte gezeigt werden, dass die Streuung der Brandparameter, insbesondere der Brandentwicklungszeit, derart gross ist, dass die Unsicherheit aller anderen Parameter praktisch vernachlässigbar ist (vgl. auch Kapitel 6.1.5). Für eine konservative Auslegung eines ingenieurmässigen Nachweises ist es also sinnvoll einen hohen Quantilwert der Verteilung der Brandentwicklungsgeschwindigkeit festzulegen, d.h. eine schnelle oder gar sehr schnelle Brandentwicklungsgeschwindigkeit. Statistisch gibt es aber keine Begründung, um die raucharme Schichthöhe wegen der Modellunsicherheit zu erhöhen. Die Höhendifferenz zwischen einer normalen Körperhöhe und der angesetzten Evaluationshöhe von 2.5 m bis 3.5 m ist eher mit einer angesetzten Sicherheitsmarge zu begründen.

Für die Analyse in dieser Studie macht die Berücksichtigung einer Sicherheitsmarge (wie beispielsweise für die kritische rauchfreie Höhe) keinen Sinn, da möglichst eine erwartungstreue Abschätzung der Risiken erwünscht ist. Im Hinblick auf die Analysen wird die Streuung der Brandparameter und die Modellunsicherheit des Rauchausbreitungsmodells aber explizit mitberücksichtigt.

Die Evaluationshöhe – und somit das Letalitätskriterium für toxische Gase – wird einfachhalber auf 2 m hohe rauchfreie Schicht festgelegt. Diese Auslegung sollte die meisten Körpergrössen abdecken.

Hitzewirkung auf Personen

Ein anderes Letalitätskriterium ist die Hitzeeinwirkung auf Personen. Dabei wird unterschieden zwischen konvektiver Hitzewirkung auf Personen in der raucharmen Schicht und Wärmestrahlung aus der rauchführenden heissen Schicht (vgl. Abbildung 30). Personenschäden durch konvektive Hitzeeinwirkungen können entstehen, wenn Personen längere Zeit einer erhöhten Umgebungstemperatur ausgesetzt sind, die jedoch noch nicht

9 Brandentwicklungszeit, Masseverlustrate, Brennwert, Verbrennungseffektivität, Modellunsicherheit und kritische Höhe der raucharmen Schicht (Körpergrösse)

unmittelbar zu Hautverbrennungen führt. Entsprechende kritische Temperaturen hängen von der Luftfeuchtigkeit und der Expositionsdauer ab und reichen von 120 °C bei trockener Luft bis hin zu etwa 80 °C [17]. Wenn die Körpertemperatur über 40 °C steigt, führt dies zu einem thermischen Schock, d.h. Bewusstseinsbeeinträchtigungen und körperliche Schäden. Steigt die Körpertemperatur über 42.5 °C kann dies innerhalb weniger Minuten zum Tode führen. Bis sich kritische Bedingungen für Personen einstellen, ist eine Expositionszeit von 15 bis 25 Minuten nötig. Diese Dauer wird bei einer Evakuierung nicht erreicht.

Personenschäden sind auch durch Wärmestrahlung zu erwarten. Die kritische Wärmestrahlung liegt etwa bei 2.5 kW/m² und bereits nach einer Expositionszeit von 3 bis 4 Minuten ist mit Personenschäden zu rechnen [17]. Statt die kritische Wärmestrahlung direkt zu berechnen, wird bei ingenieurmässigen Nachweisen oft mit einer kritischen Temperatur der heissen Schicht von 200°C gerechnet [22], die eine entsprechende Hitzestrahlung bewirkt. Dies ist eine einfache Kontrollgrösse für die kritische Wärmestrahlung.

Anhand von Brandsimulationen konnte gezeigt werden, dass für die Referenzfälle keine der beiden Kriterien – weder die kritische konvektive Hitzeeinwirkung noch die kritische Wärmestrahlung – erreicht wird, nicht bevor die Wirkung toxischer Stoffe auf Personen massgebend wurde. Nur in Brandnähe ist mit einer erhöhten Wärmestrahlung der Rauchsicht zu rechnen. Jedoch gelangt man durch eine Flucht schnell in einen Bereich, in dem die Temperatur unkritisch ist. Für die Berechnung der ASET werden deswegen diese beiden Kriterien nicht weiter berücksichtigt. Berücksichtigt wird hingegen, dass ein Brand, der in der Nähe eines Ausgangs stattfindet, durch seine Hitzestrahlung ein Ausgang unbenutzbar machen kann. Dies kann durch die Evaluation von verschiedenen Evakuierungsszenarien erfolgen (vgl. Kapitel 7.1 und Kapitel 8.2.1).

Einschränkung der Sichtweite durch den Rauch

Zwar stellt die Sichtweite kein Letalitätskriterium dar, aber für eine sichere Flucht ist sie ein wichtiger Faktor. Mit der Festlegung der kritischen raucharmen Schicht auf 2 m wird sichergestellt, dass die Rauchsicht oberhalb des Sichtbereichs liegt und damit eine ausreichend weite Sicht gewährleistet werden kann. Wenn die Rauchsicht auf 2 m sinkt, können Fluchtwegzeichen, die üblicherweise in 2.5 m Höhe angebracht sind, unter Umständen nicht mehr erkannt werden. Allerdings ist bei der Beurteilung der Sichtbarkeit von Fluchtwegen folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Bei der Modellierung mit dem Zwei-Zonen-Modell wird nur die Rauchsichthöhe und nicht die Konzentration des Rauches berechnet (diese konservative Vereinfachung vermeidet kritische Annahmen bezüglich der Rauchausbeute). Je nach Konzentration der Rauchgase wären die Fluchtwegzeichen, auch wenn sich die Rauchsicht auf 2 m sinkt, noch erkennbar.
- Nicht nur die Sichtbarkeit von Fluchtzeichen sind für eine sichere Flucht von Personen verantwortlich. In realen Entfluchtungen spielen andere Effekte eine ebenso grosse Rolle, z.B.: Vertrautheit der Räume, Anweisungen von Personal, Tätigkeiten anderer Flüchtenden, Verwendeter Eingang beim Eintritt in den Raum, etc. Diese Effekte sind von der kritischen raucharmen Höhe unabhängig.

Zudem kann davon ausgegangen werden, dass die Personen zum Zeitpunkt der ASET sich bereits auf der Flucht befinden oder – insbesondere im Zusammenhang mit einer hohen Personenbelegung – bereits im Stau befinden. In diesem Fall spielt die Sichtweite eine untergeordnete Rolle. Die Auslegung auf 2.0 m ist als eine pragmatische Vereinfachung für

diese Studie zu betrachten, die verschiedene Aspekte der Modellierung und des Fluchtverhalten miteinbezieht.

Letalitätskriterien	Indikator	Bemerkungen
Exposition von Personen an reizenden oder toxischen Rauchgasen	Raucharme Schicht unter 2 m Höhe	
Zu grosse konvektive Hitzeeinwirkung auf Personen	Temperatur der raucharmen Schicht über 50 °C.	Die kritische Temperatur in der raucharmen Schicht wurde bei keinem Referenzfall erreicht. Entsprechend wird dieses Kriterium für die weitere Analyse nicht weiter berücksichtigt.
Zu grosse Wärmestrahlung der rauchführenden Schicht	Temperatur der rauchführenden Schicht über 200 °C.	Die kritische Temperatur wird nur in Brandnähe erreicht. Durch eine Flucht gelangt man schnell in einen Bereich, in dem die Temperatur unkritisch ist. Für die Analyse wird dieses Kriterium daher nicht weiter berücksichtigt.
Keine ausreichende Sichtweite für eine sichere Flucht	Raucharme Schicht auf unter 2 m Höhe	Kein Letalitätskriterium, aber wichtige Randbedingung für eine sichere Flucht. Es wird davon ausgegangen, dass eine Evaluation auf 2 m ausreicht, um eine genügend weite Sichtweite sicherzustellen.

Tabelle 14: Übersicht der Letalitätskriterien für die Analyse.

6.1.2 Vergleich und Wahl des Modells

Für die Modellierung von Rauchgasen stehen verschiedene Modelle zur Verfügung. Für die Berechnung der Rauchausbreitung im Raum und Modellierung der ASET werden für einen Standardfall (Referenzfall 1250 m²) zwei Programme mit unterschiedlichen Modellierungsansätzen verwendet und miteinander verglichen:

- CFAST¹⁰, ein Zwei-Zonen-Brandmodell, das für mehrere Kompartimente (Mehr-Raum-Zonen-Modell) die Entwicklung der Rauchsicht anhand einer oberen heissen rauchgesättigten Schicht und einer unteren kalten raucharmen Schicht ermittelt. Ein Kompartiment ist eine virtuelle Aufteilung des Raumes, in dem die zwei Zonen gebildet werden.
- FDS¹¹, ein numerisches Fluidynamik-Feldmodell, das geeignet ist, für komplexe Geometrien und Ventilationsbedingungen Rauchausbreitungen zu simulieren. FDS benötigt mehr Eingabeparameter als CFAST, kann dafür aber physikalische Wirkungen besser abbilden. Oft sind diese Eingabeparameter jedoch unbekannt, was einen quantitativen Vergleich der beiden Modellierungsansätze schwierig macht.

Zonenmodelle können kinetische Eigenschaften einer Rauchausbreitung nicht berücksichtigen (keine Impulserhaltung). Daher kann beispielsweise der Back-Layering-Effekt (Absenkung des Rauches infolge eines Auftreffens des Rauches auf ein Hindernis) mit Zonenmodellen nicht abgebildet werden. Für die geometrischen Eigenschaften der Referenzfälle sind diese Effekte aber nicht massgebend. Wichtiger ist die Abbildung des Abkühlens des Rauches ausserhalb

¹⁰ CFAST Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport, Version 7; NIST National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce

¹¹ FDS Fire Dynamics Simulator; VTT Technical Research Centre of Finland and NIST National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce

des thermischen Einflussbereichs des Brandes. Um diesen Effekt mit CFAST abzubilden, wird darauf geachtet, dass der Raum mit mehreren virtuellen Unterkompartimenten modelliert wird, so dass die Rauchausbreitung besser erfasst werden kann. Daher wird in dieser Studie CFAST als Mehr-Kompartiment-Modell angewandt. Vergleichsrechnungen mit FDS zeigen, dass mit CFAST zumindest phänomenologisch das Verhalten des Rauches abgebildet werden kann, insbesondere das Absenken des Rauches mit zunehmender Distanz zum Brandherd (vgl. Anhang A4.1). Ein Grund für die Vergleichbarkeit der Modelle ist, dass die Geometrie und die Lüftungsverhältnisse nicht allzu komplex sind.

Deswegen wird in dieser Studie die Rauchausbreitung mit CFAST modelliert. Dies bietet vor allem auch bei der Parameteranalyse und bei der Risikoermittlung grosse Vorteile, da Zonenmodelle um einiges schneller rechnen als Feldmodelle. Mehr Informationen zu Modellvergleich und -auswahl stehen in Anhang A4.1 zur Verfügung.

6.1.3 Brandparameter

Ein Vollbrand in grösseren Räumen – zumindest für die Zeitdauer der Flucht – ist wegen der Grossräumigkeit von Verkaufsgeschäften nicht zu erwarten. Es kann davon ausgegangen werden, dass letale Bedingungen für Personen durch Rauchgase sich viel früher einstellen als ein Flashover, der zu einem Vollbrand führt. Deswegen kann von einem gut belüfteten lokalen Brand ausgegangen werden.

Ein lokaler Brand in einem grossen Raum lässt sich vereinfacht in drei Phasen unterteilen:

- eine Brandentwicklungsphase
- eine voll entwickelte Brandphase
- und eine Abklingphase

Brandentwicklungszeit

Ein Brand wird generell durch die Wärmefreisetzung in Kilowatt beschrieben und beschreibt die durch die Brandlast freigesetzte Energie. Die Brandentwicklungsphase wird generell mit einem sogenannten t^2 -Modell beschreiben. Dabei nimmt die Wärmefreisetzung HRR (aus dem englischen: Heat Release Rate) mit der Zeit t quadratisch zu. Die Brandausbreitungsgeschwindigkeit α beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich ein Brand ausbreiten kann. Die Wärmefreisetzung lässt sich beschreiben als:

$$HRR = \alpha \cdot t^2$$

In Richtlinien sind Bemessungswerte für die Brandausbreitungsgeschwindigkeit zu finden. Für Verkaufsgeschäfte wird beispielsweise im Eurocode [23] eine schnelle Brandentwicklungsgeschwindigkeit ($\alpha = 0.047 \text{ kW/sec}^2$) festgelegt. Einen Hinweis zur zugrunde gelegten statistischen Verteilung wird nicht gegeben.

In der Literatur lassen sich zwei Ansätze finden, mit denen die statistische Verteilung der Brandentwicklungsgeschwindigkeit eruiert werden kann. Eine ausführliche Diskussion der Ansätze ist in De Sanctis [19] zu finden:

- Auswertung von Brandfällen und Rückschluss auf Brandentwicklungsgeschwindigkeit mit erhobenen Brandflächen an bestimmten Interventionszeitpunkten:

Dieser Ansatz wurde von Holborn et al. [24] und Deguchi et al. [25] verfolgt. Beide haben Brandentwicklungsgeschwindigkeiten für Verkaufsgeschäfte ausgewertet. Holborn et al. haben auch Schwelbrände miteinbezogen, die streng genommen nicht wirklich mit einem t^2 -Modell abgebildet werden können. Deguchi et al. haben nur Brände untersucht, die sich

rasch entwickeln und eine Gefahr für Personen darstellen. Deshalb eignet sich die statistische Verteilung von Deguchi et al. besser zur Repräsentation der Brandausbreitungsgeschwindigkeit für Evakuationsanalysen.

— Simulation der Brandausbreitung mit bekannter Initialzündquellen

Der Ansatz besteht darin, den Brandverlauf der Brandentwicklungsphase aufgrund von Initialzündquellen zu simulieren. Die Initialzündquellen stammen aus realen Brandfällen. Dieser Ansatz wurde für Verkaufsgeschäfte von Nilsson et al. [26] verfolgt. Allerdings weist die Modellierung noch Lücken auf. Beispielsweise wurde nur die Brandausbreitung auf dem Objekt der Brandentzündung simuliert. Der Brandübertritt auf andere Objekte wurde nicht simuliert. Deswegen entspricht diese Abschätzung nur der Brandausbreitungsgeschwindigkeit auf dem Brandobjekt, bei dem der Brand startete.

Die Studien von Holborn et al. und Deguchi et al. kommen auf ähnliche Quantilwerte für schnelle (88.4% bis 91.0%) und sehr schnelle (97.5% bis 99.6%) Brandentwicklungsgeschwindigkeiten. Bei den langsameren Geschwindigkeiten gibt es unter den Studien grössere Unterschiede. Da bezüglich der Personensicherheit aber schnellverlaufende Brände die grössere Gefahr stellen, sind grössere Abweichungen bei den langsameren Brandentwicklungsgeschwindigkeiten eher tolerierbar. Für diese Studie wird die statistische Verteilung von Deguchi et al. [25] verwendet, die vor allem schnelle Brände statistisch gut repräsentiert. Als statistische Verteilung wird eine Lognormalverteilung mit einem Mittelwert von 0.0236 kW/sec^2 und einer Standardabweichung von 0.03 kW/sec^2 verwendet. Anhand der statistischen Verteilung lassen sich für die Geschwindigkeitsklassen die Häufigkeiten ableiten (vgl. Tabelle 15).

Brandausbreitungsgeschwindigkeit	[kW/sec ²]	Klassenhäufigkeit ¹²
Sehr langsam	0 bis 0.0029	5.0%
Langsam	0.0029 bis 0.012	37.1%
Mittel	0.012 bis 0.047	46.3%
Schnell	0.047 bis 0.19	11.2%
Sehr schnell	ab 0.19	0.4%

Tabelle 15: Brandausbreitungsgeschwindigkeit und deren Häufigkeiten.

Maximale Wärmefreisetzungsrate

Bei ausreichender Luftzufuhr des Brandes (brandlastgesteuerter Brand) wird die gesamte Energie der Brandlast in Form von Wärme freigesetzt. Damit tritt die voll entwickelte Brandphase ein. Die maximale Wärmefreisetzungsrate eines Brandes hängt von drei Faktoren ab:

- Massenverlust des Materials [kg/sec]
- Verbrennungseffektivität [-]
- Verbrennungswärme [MJ/kg]

Zu den einzelnen Faktoren findet man in der Literatur Werte, die vor allem aus Versuchsreihen stammen. Eine Übersicht der verschiedenen Werte ist in De Sanctis [19] zu finden. In Richtlinien und Leitfäden ist oft auch die maximale Energiefreisetzungsrate zu finden. Für Verkaufsgeschäfte ist im Eurocode [23] ein Wert von 250 kW/m^2 zu finden. Wie De Sanctis [19] und Hosser [8] ausführen, kann dieser als Mittelwert einer normalverteilten Wahrscheinlichkeitsverteilung der maximalen Wärmefreisetzungsrate aufgefasst werden. Der

12 Die Klassenhäufigkeit ist als Überschreitungswahrscheinlichkeit bis zur nächsten Klassengrenze zu verstehen (Ausnahme: «sehr langsame Brände» – Häufigkeit im Intervall von $[0, 0.0029 \text{ kW/sec}^2]$)

Variationskoeffizient entspricht 0.2. Diese Verteilung wird der Studie zugrunde gelegt. In Tabelle 16 ist zur Veranschaulichung der Verteilung die maximale Wärmefreisetzungsrate in vier Klassen eingeteilt und die entsprechende Klassenhäufigkeit angegeben.

Maximale Wärmefreisetzungsrate	[kW/m ²]	Klassenhäufigkeit ¹³
Tief	0 bis 150	2.3%
Tief – mittel	150 bis 250	47.7%
Mittel – hoch	250 bis 350	47.7%
Hoch	ab 350	2.3%

Tabelle 16: Maximale Wärmefreisetzungsrate und deren Häufigkeiten.

Bei Bränden mit beschränkter Luftzufuhr kann sich die maximale Wärmefreisetzung wegen des Sauerstoffmangels nicht ausbilden. Man spricht von einem ventilationsgesteuerten (oder unterventilierten) Brand. In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass aufgrund der Dimensionen der Räumlichkeiten, ausreichend Sauerstoff durch genug grosse Ventilationsöffnungen zur Verfügung steht und der Brand – zumindest für die Fluchtdauer – relativ zum Raumvolumen klein bleibt.

Der Brand breitet sich in der Brandentwicklungsphase oft nur in einem begrenzten Bereich aus, beispielsweise wegen grossen Abständen zu anderen Brandlasten, Bränden in offenen, aber abgegrenzten Räumen, etc. Die maximale Brandfläche wird auf 20 m² festgelegt und entspricht im Mittel einer Wärmefreisetzung von 5 MW. Diese Wärmefreisetzung wird bei einem schnellen Brand nach ca. 5 min erreicht. Die Auswertungen der RSET zeigen (vgl. Kapitel 6.2.7, Kapitel 7.2 und Kapitel 8.2.2), dass oft die Evakuierung zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen ist. Entsprechend hat diese Annahme eher einen untergeordneten Einfluss auf die Berechnungen.

Brandlast

Die Abklingphase eines Brandes stellt sich ein, wenn die Brandlast durch die Verbrennung sich dem Ende zuneigt. Für die Studie wird angenommen, dass die Brandlast gross genug ist, so dass die Abklingphase erst nach der Beendigung der Evakuierung einsetzt.

6.1.4 Brandszenarien für die Referenzfälle

Die Rauchausbreitung wird für die sechs Referenzfälle berechnet (Tabelle 17). In CFAST wurden die Raumgeometrie der Referenzfälle mit 2 bis 24 Kompartimenten umgesetzt.

Nr.	Referenzfall	Fläche [m ²]	Breite x Länge [m]	Anzahl Kompartimente	Kantenlänge der Kompartimente [m]
1	Referenzfall 648	648	18 x 36	2	18.0 x 18.0
2	Referenzfall 1250	1250	25 x 50	8	12.5 x 12.5
3	Referenzfall 2500	2500	50 x 50	16	12.5 x 12.5
4	Referenzfall 3750	3750	50 x 75	24	12.5 x 12.5
5	Referenzfall 5000	5000	50 x 100	8	25.0 x 25.0
6	Referenzfall 6250	6250	50 x 125	10	25.0 x 25.0

Tabelle 17: Umsetzung der Referenzfälle in CFAST.

¹³ Die Klassenhäufigkeit ist als Überschreitungswahrscheinlichkeit bis zur nächsten Klassengrenze zu verstehen (Ausnahme: «tief» – Häufigkeit von im Intervall von [0, 100 kW/m²])

Für jeden Referenzfall werden mehrere Brandorte berücksichtigt, da die Rauchausbreitung im Raum abhängig vom Standort leicht variieren kann (Abbildung 73 bis Abbildung 78 im Anhang A4.2).

6.1.5 Auswertung der ASET (Available Safe Egress Time)

Die ASET entspricht dem Zeitpunkt, bei dem die definierten Letalitätskriterien erreicht werden und mit Personenschäden zu rechnen ist. Die ASET wird durch die Höhe der Rauchschicht festgelegt. Da diese Höhe im Raum wegen unterschiedlichen Standorten des Brandes unterschiedlich ausfallen kann, wird die ASET in gewissen Bereichen des Raumes früher erreicht als in anderen. Vereinfachend wird die ASET als Zeitpunkt festgelegt, bei dem die Letalitätskriterien in einem beliebigen Kompartiment des Raumes als erstes tangiert werden (vgl. Abbildung 31). Durch diese Festlegung wird die ASET konservativ abgeschätzt und das Risiko tendenziell überschätzt. Jedoch bietet diese Annahme mehr Flexibilität bei der Wahl der Raumgeometrie und der Standortwahl des Fluchtwegs ins Freie, da keine Rücksicht auf die Entwicklung des Brandrauchs genommen werden muss.

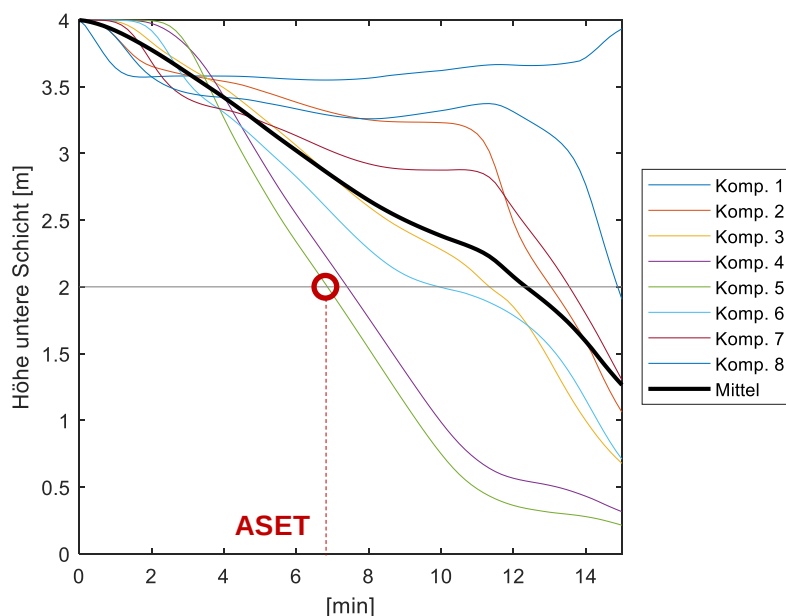


Abbildung 31: Beispiel einer Entwicklung der Höhe der Rauchschicht für Brände in verschiedenen Kompartimenten (für Referenzfall 2 – 1250 m²).

Die ASET als Funktion der Brandausbreitungsgeschwindigkeit ist für die sechs Referenzfälle in Abbildung 32 dargestellt. Die Punkte in Abbildung 32 stellen verschiedenen Brandstandorte und verschiedenen maximale Wärmefreisetzungsraten dar. Eine Parameteranalyse für den Referenzfall 1250 m² ist in Anhang A4.3 aufgezeigt. Es ist ersichtlich, dass die Brandausbreitungsgeschwindigkeit die ASET stärker beeinflusst als die maximale Wärmefreisetzungsrate.

Ein Regressionsmodell für die ASET wird in dieser Studie als Metamodell für die Zonenmodellierung verwendet, um die Berechnungsgeschwindigkeit insbesondere für die probabilistische Analyse zu erhöhen. Die Linien sind eine zu den berechneten Szenarien gefittete, quadratische Regression. Die maximale Wärmefreisetzungsrate wird wegen ihrer schwachen Abhängigkeit auf die ASET als Regressionsparameter vernachlässigt. Die maximale Wärmefreisetzungsrate und ihre statistische Verteilung fließen jedoch als

Regressionsfehler in die Analyse mit ein und werden daher in der Risikoanalyse implizit berücksichtigt.

Für alle Referenzfälle sinkt die ASET mit einer schnelleren Brandausbreitungsgeschwindigkeit (Abbildung 32). Die ASET ist tiefer für die Referenzfälle mit kleineren Geschossflächen (648 m², 1250 m² und 2500 m²) als für die Referenzfälle mit grossen Geschossflächen (3750 m², 5000 m² und 6250 m²). Während die ASET für die kleineren Geschossflächen bei sehr langsamer Brandausbreitung zwischen 8 min und 12 min liegt, führt eine sehr schnelle Brandausbreitung zu einer ASET zwischen 2 min und 5 min. Für die Referenzfälle mit grossen Geschossflächen (3750 m², 5000 m² und 6250 m²) liegt die ASET bei sehr langsamer Brandausbreitung zwischen 12 min und 20 min. Bei sehr schneller Brandausbreitung sinkt die ASET auf 5 min bis 10 min.

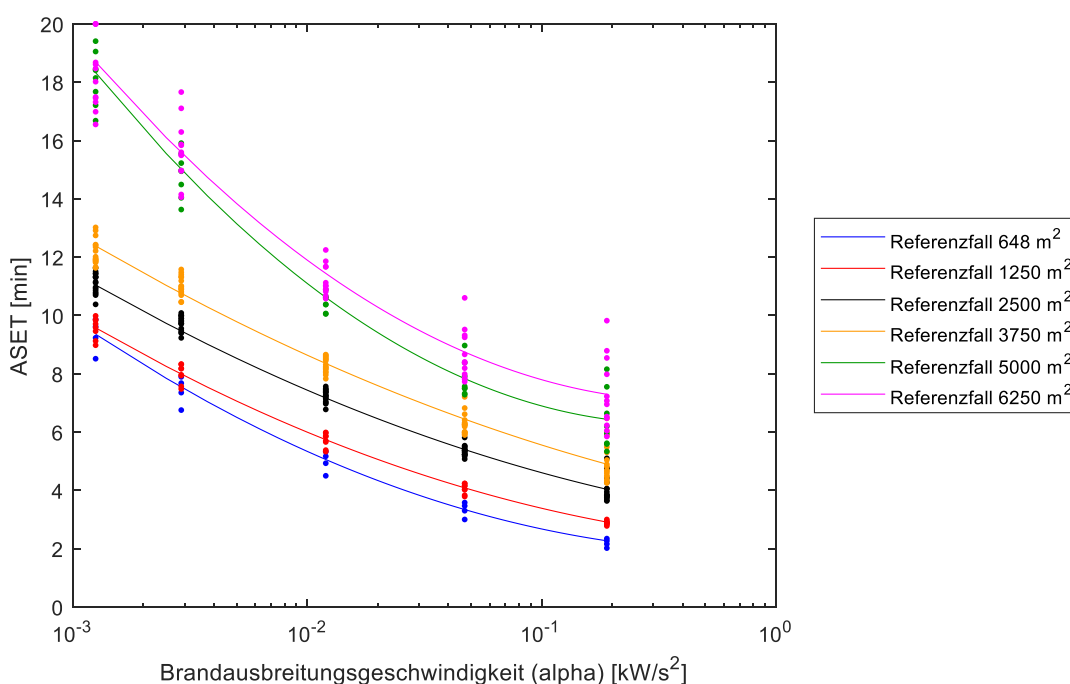


Abbildung 32 ASET als Funktion der Brandausbreitungsgeschwindigkeit (alpha) für die sechs analysierten Referenzfälle

Im Anhang A4.4 sind die Regressionen der ASET als Funktion der Brandausbreitungsgeschwindigkeit für die sechs Referenzfälle in Abbildung 81 bis Abbildung 86 einzeln dargestellt. Für jeden Referenzfall wurden dabei die berechneten Fälle (Varianten von Brandort, Brandausbreitungsgeschwindigkeit, maximale Wärmefreisetzungsrate) gemäss der Normalverteilung der maximalen Wärmefreisetzungsrate berücksichtigt.

Einfluss der Modellunsicherheit

Brand- und Rauchausbreitungsmodelle sind immer eine Annäherung an die wirklichen physikalischen Prozesse. Die Abweichung zwischen Modellvoraussage und Wirklichkeit kann mit einer Modellunsicherheit beschrieben werden. Eine Studie der NUREG [27] hat breite Validierungsrechnungen für verschiedene Softwarepakete durchgeführt und daraus Modellunsicherheiten abgeleitet. Die Modellunsicherheit der rauchführenden heissen Schicht vom 2-Zonen-Modell (CFAST) kann durch eine Lageabweichung (Bias) und einen Streuparameter der Normalverteilung beschrieben werden. Diese Unsicherheit wird bei der Berechnung der ASET berücksichtigt.

Abbildung 33 zeigt den Einfluss des Regressionsfehlers – der die Streuung der Wärmefreisetzungsrate beinhaltet (Datenpunkte in Abbildung 32) – und der Modellunsicherheit auf die Berechnung der Verteilung der ASET für den Referenzfall von 2500 m². Diese Unsicherheiten haben einen kleinen Einfluss auf die Verteilung der ASET, da diese vor allem von der Verteilung der Brandentwicklungsgeschwindigkeit abhängt. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Erkenntnissen von De Sanctis [19], bei der eine vertiefte Betrachtung der Unsicherheiten, welche die ASET beeinflussen, durchgeführt wurde. Dies zeigt auch, dass eine verfeinerte Modellierung, die (womöglich) zu einer kleineren Modellunsicherheit führt (beispielsweise durch CFD-Berechnungen), nicht erheblich zur Verbesserung der Verteilung der ASET führt. D.h. in Anbetracht der Unsicherheiten der Brandentwicklungsgeschwindigkeit ist die Wahl einer Zonenmodellierung mit CFAST für die Studie genügend genau, um die Verteilung der ASET zu bestimmen. Für die Risikoermittlung wird deswegen an der Modellwahl festgehalten und die Modellunsicherheit – auch wenn sie einen geringen Einfluss hat – bei der Bestimmung der ASET mitberücksichtigt.

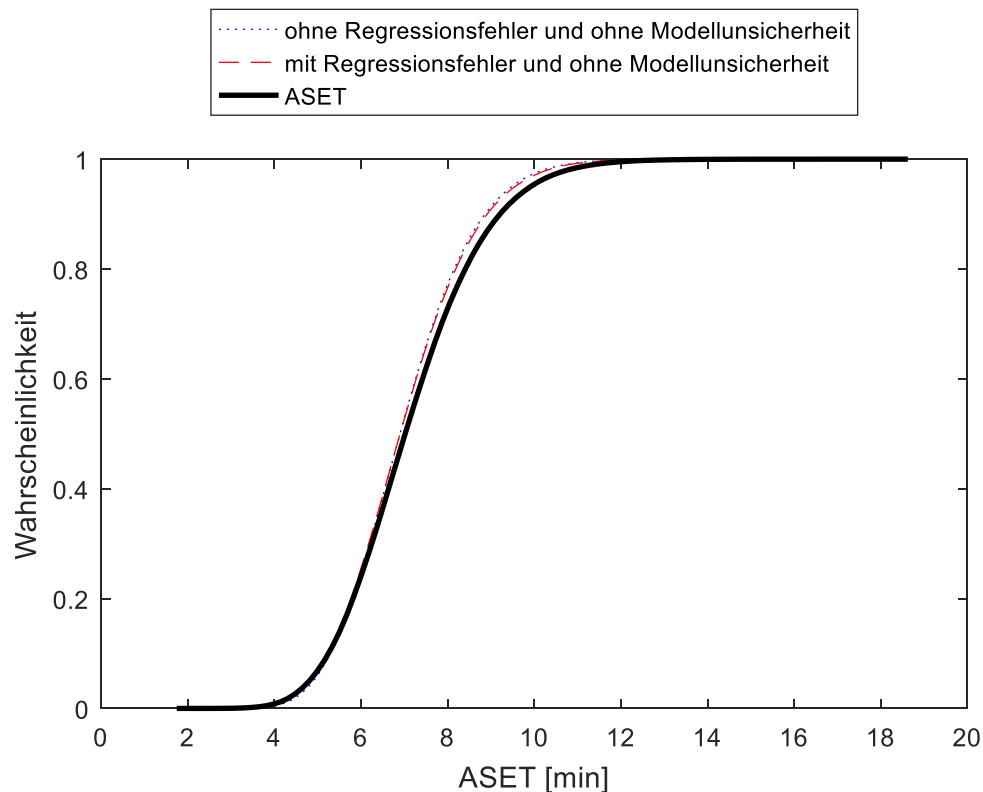


Abbildung 33: Einfluss des Regressionsfehlers und der Modellunsicherheit auf die Verteilung der ASET für den Referenzfall 2'500 m².

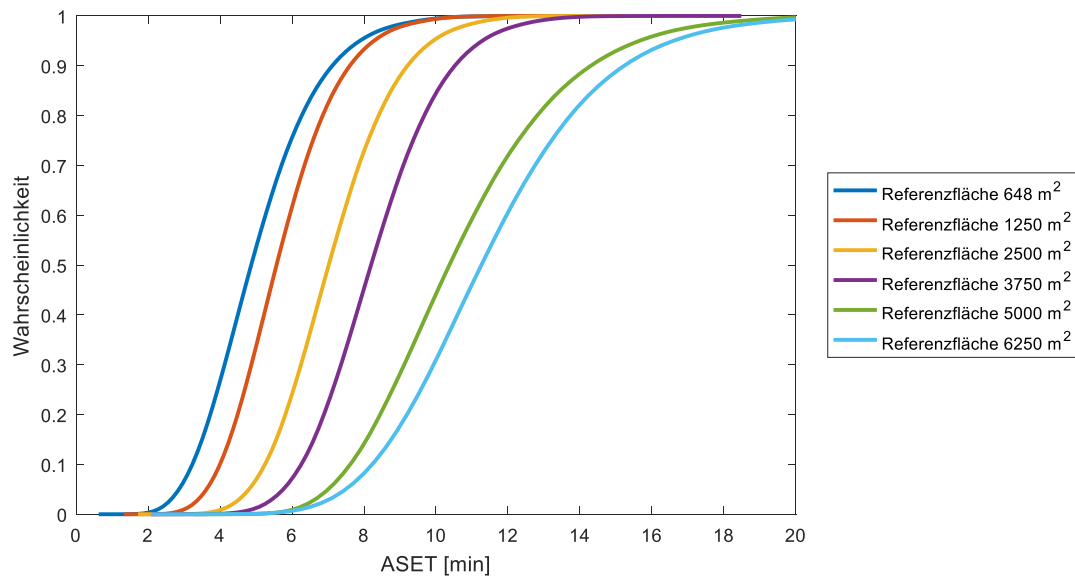


Abbildung 34: Statistische Verteilungen der ASET für verschiedene Referenzfälle.

6.2 Modellierung der Evakuierung

Die erforderliche sichere Fluchtzeit (RSET) ist die Zeit von Brandbeginn bis zum Zeitpunkt, an dem die letzte Person den Raum verlässt, um einen sicheren Ort zu gelangen. Die RSET wird von verschiedenen Parametern beeinflusst (vgl. Abbildung 35), u.a. durch:

- die Zeit bis Personen über den Brand informiert werden (visuelle, akustisch oder olfaktorisch)
- die individuellen Reaktionszeiten (Zeit bis Personen sich Entscheiden die Flucht anzutreten) und individuellen Charakteristiken der Personen (z.B. Gehgeschwindigkeiten)
- die Ausgestaltung der Fluchtwege und ob Staus an Engstellen zu erwarten sind

Neben der Vermeidung von kritischen Bedingungen seitens der Brandrauchentwicklung (z.B. Vermeidung der Exposition von Personen an reizenden Stoffen), ist für eine sichere Flucht auch eine vernünftig ablaufende Evakuierung massgebend. Daher sollten Zustände vermieden werden, die eine Panik oder unhaltbare Zustände bei einer Evakuierung auslösen können. Ein entsprechendes Kriterium, mit dem sich solche Zustände vermeiden lassen, wird in Kapitel 6.2.5 diskutiert.

Durch eine probabilistische Analyse der RSET und der ASET lässt sich die Wahrscheinlichkeit von Todesfällen berechnen. Für die Risikoanalyse ist jedoch entscheidend wie viele Personen im Raum sind, wenn die ASET erreicht wird. Daher ist das Ziel den gesamten zeitlichen Verlauf der Evakuierung abzubilden, d.h. der zeitliche Verlauf der Anzahl Personen im Raum. So lässt sich zum Zeitpunkt der ASET ermitteln wie viele Personen im Raum sind.

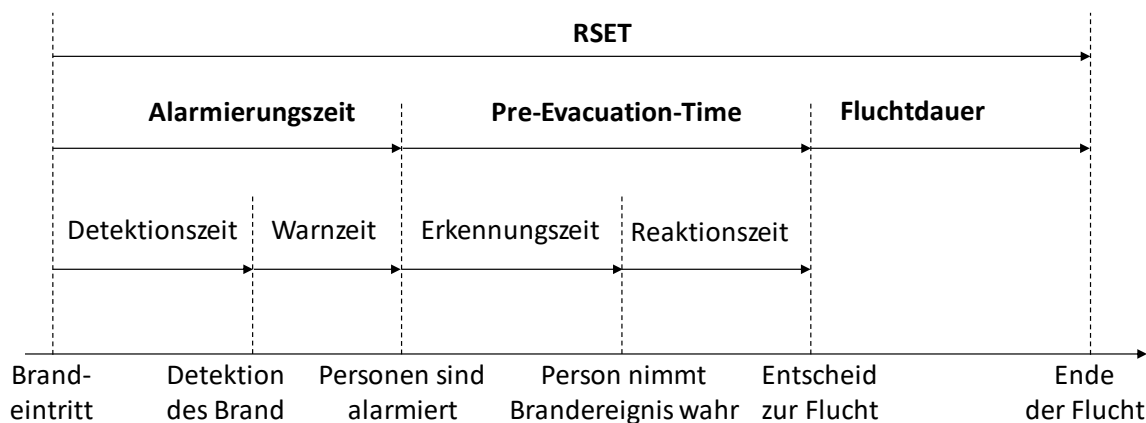


Abbildung 35: Zusammenstellung der RSET.

6.2.1 Alarmierungszeit

Die Alarmierungszeit bezeichnet das Zeitintervall von der Brandentstehung bis zur Benachrichtigung der Gebäudenutzer. Das Intervall hat zwei Komponenten:

— die Detektionszeit

Unter der Detektionszeit versteht man die Dauer von der Brandentstehung bis zur ersten Detektion des Brandes durch eine Person oder durch einen Brandmelder. Ein Brand gilt als detektiert, auch wenn der genaue Ort des Brandes unbekannt ist. So können Gebäudenutzer Rauch visuell oder geruchlich wahrnehmen und so auf einen Brand schliessen. Dies trifft vor allem auf den Raum der Brandentstehung zu. Ist eine Brandmeldeanlage vorhanden, kann diese bei Branddetektion auch andere Personen ausserhalb des Brandraumes benachrichtigen.

— die Warnzeit

Die Warnzeit entspricht der Dauer zwischen der Detektion eines Brandes und der Auslösung eines Alarmsignals oder der Benachrichtigung der Gebäudenutzer. Die akustische Alarmierung der Gebäudenutzer kann beispielsweise durch eine Vorwarnzeit verzögert werden. In der Schweiz beträgt die Vorwarnzeit 3 min bis zur Quittierung des internen Alarms und weitere 5 min bis zur automatischen Alarmübermittlung an die Feuerwehr.

In Verkaufsgeschäften muss eine Brandmeldeanlage nur auf Verlangen der Brandschutzbehörde installiert werden. Es wird also davon ausgegangen, dass keine Brandmelder installiert werden. Bei der Absenz von Brandmeldern spielt die Warnzeit keine Rolle, da die Alarmierung über den Geruch oder die visuelle Detektion der einzelnen Personen unverzüglich erfolgt. Deswegen steht für diese Studie die unverzügerte Alarmierung der Personen im Vordergrund. Zudem werden durch die Betätigung von Handtaster, alle Personen alarmiert. Dies wird vereinfachend vernachlässigt zu Gunsten einer konservativen Betrachtung.

In Verkaufsgeschäften kann man grundsätzlich davon ausgehen, dass die Personen wach sind und Brände im selben Raum relativ schnell entdecken bzw. von anderen Personen darauf hingewiesen werden. Für die Modellierung der Detektionszeit wird auf ein vereinfachtes Modell zurückgegriffen, das bereits im Projekt «Wirtschaftlichen Optimierung im Brandschutz» [15] verwendet wurde. Da Brände relativ rasch detektiert werden, wird die Detektionszeit als Exponentialverteilung modelliert. Der Verteilungsparameter λ wird in Abhängigkeit der Brandentwicklungsgeschwindigkeit $\propto$ modelliert. Es wird davon ausgegangen, dass ein Brand

mit einer bestimmten Wärmefreisetzung HRR_D von 99% aller Personen im Raum detektiert wird.

$$\lambda = -\ln(1 - 0.99) \sqrt{\frac{\alpha}{HRR_D}}$$

Die notwendige Wärmefreisetzung HRR_D zur Detektion ist abhängig von der Objektgrösse: Brände in grossen Räumen, werden tendenziell später detektiert als in kleineren Räumen. Daher wird die notwendige Wärmefreisetzung zur Detektion abhängig von der Fläche modelliert (vgl. Tabelle 18).

Allerdings ist bei dieser Modellierung zu beachten, dass die Brandentwicklungsgeschwindigkeit eine grosse Streuung aufweist und auch sehr langsame Brände beinhaltet. Dies kann mathematisch zu langen Detektionszeiten und zu langen RSET führen, welche die ASET überschreiten und rechnerisch zu Todesfällen führen können. Jedoch ist das Gefährdungspotenzial von langsamen Bränden kleiner im Vergleich zu den schnellen Bränden und Personen haben tendenziell mehr Zeit, um sich zu informieren und gefahrengerecht zu handeln. Deswegen ist das Modell für Detektionszeiten bei langsamen Brandverlauf ungeeignet. Daher wird angenommen, dass spätestens, wenn 25% der ASET erreicht ist, 99% der Personen alarmiert sind. Die resultierenden Zeiten sind in Tabelle 18 aufgeführt für langsame und schnelle Brandentwicklung.

Bei der kleinsten Fläche von 648 m² beträgt die notwendige Wärmefreisetzung zur Detektion 50 kW und entspricht der Brandgrösse eines Abfallbehälters. D.h. ein Brand eines Papierkorbs wird zwischen 33 sec (schnelle Brandentwicklung) und 113 sec (langsame Brandentwicklung) von 99% der Personen im Raum entdeckt. Beim grössten Referenzfall mit einer Fläche von 6250 m² entspricht die Brandgrösse, bei der 99% der Personen diesen wahrnehmen, 1500 kW und entspricht etwa einem Vollbrand eines Kühl-/Gefrierschranks oder eines Verkaufstandes mit Kleider [22].

Referenzfall	Fläche [m ²]	HRR_D [kW]	$t_{99\%}$ für langsame Brandentwicklung [sec]	$t_{99\%}$ für schnelle Brandentwicklung [sec]	Beispiele eines Vergleichsbrandes [22]
Referenzfall 648	648	50	113	33	Abfallbehälter mit Hülle RF1
Referenzfall 1250	1'250	100	120	46	Abfallbehälter mit nicht brennbarer, aber schmelzender Hülle
Referenzfall 2500	2'500	250	142	73	Abfallbehälter mit brennbarer Hülle
Referenzfall 3750	3'750	500	161	97	Brand eines hölzernen Schreibtisches
Referenzfall 5000	5'000	1'000	225	118	Matratzenbrand
Referenzfall 6250	6'250	1'500	234	131	Brand eines Verkaufsstandes mit Kleider, Kühl- /Gefrierschranks

Tabelle 18: Festlegung der notwendigen Wärmefreisetzung HRR_D zur Detektion.

Das verwendete Modell zur Detektion des Brandes basiert auf der Idee, dass die Gebäudenutzer im Raum der Brandentstehung den Brand selbst sehen bzw. anderweitig

wahrnehmen. In verwinkelten Räumen oder Räumen mit einer besonderen Geometrie kann die Alarmierung durch andere Nutzer, durch das Personal oder über Durchsagen eine grössere Rolle spielen. Dies verzögert die Detektionszeit etwas. Allerdings ist in diesen Fällen die ASET auch etwas verzögert, da es länger dauert bis die Rauchausbreitung kritische Bedingungen erreicht. Diese Effekte können nur durch eine detaillierte objektspezifische Untersuchung, beispielsweise anhand Ingenieurmethoden, analysiert werden.

6.2.2 Pre-Evacuation-Time

In der Literatur kursieren unterschiedliche Begriffe für die Zeit zwischen der Alarmierung der Personen und den Zeitpunkt des Antretens der Flucht in Richtung Ausgang. In dieser Studie wird der Begriff verwendet, der im SFPE Handbook verwendet wird [28]. Die Pre-Evacuation-Time besteht aus zwei zeitlichen Komponenten:

— die Erkennungszeit

Bezeichnet das Intervall zwischen dem Zeitpunkt, bei dem das Alarmsignal von einer Person wahrgenommen wird, und dem Zeitpunkt, bei dem die Person dieses Signal als Hinweis auf ein Brandereignis interpretiert. Diese Zeit beinhaltet Aktivitäten zur Informationsbeschaffung über die Situation.

— die Reaktionszeit

Bezeichnet das Zeitintervall von der Wahrnehmung eines Brandes bis zum Zeitpunkt, an dem die Person mit der Flucht in Richtung eines Ausgangs beginnt. Dieses Intervall beinhaltet Aktivitäten wie Brandbekämpfung, Warnung anderer Gebäudenutzer, Sammeln von Familienmitgliedern, sich bekleiden, Abholen von persönlichen Gegenständen, Benachrichtigung der Feuerwehr, etc.

Bereits in den 90er Jahren gab es zahlreiche Untersuchungen zur Pre-Evacuation-Time in Verkaufsgeschäften. Charters et al. [13] analysierte, die von der Feuerwehr rapportierte Zeit von der Detektion des Brandes (vorwiegend durch eine BMA) bis hin zur Einsetzung der Flucht. (Warnzeit + Pre-Evacuation-Time) bei Bränden in Verkaufsgeschäften (die Autoren bezeichneten diese als Pre-Movement Time). Charters et al. stellten vorwiegend eine rechtsschiefe Verteilung mit einem langen Schwanz fest. Die Zeit bis zur Flucht variiert zwischen einer unmittelbaren Flucht bis hin zu 7 min Wartezeit. Allerdings sei hier darauf hingewiesen, dass eine Vorwarnzeit der BMA mitberücksichtigt wurde. Zudem sind lange Zeiten verbunden mit Fällen, in denen die Personen in anderen Brandabschnitten waren und durch die BMA alarmiert wurden oder in Fällen, bei denen der Brand klein war und die Gefahr von den Gebäudenutzer als klein eingestuft wurde. Im Brandentstehungsraum konnten Zeiten von bis zu 2 min festgestellt werden. Diese Zeiten sind für die vorliegende Studie eher massgebend, da die Alarmierung visuell oder geruchlich erfolgt.

Sandberg [29] und Shields & Boyce [30] führten insgesamt sechs unangekündigte Evakuierungsübungen im Einzelhandel durch, um die Reaktionszeit von Personen zu quantifizieren und um das Verhalten der Personen zu analysieren. In beiden Studien wurden die Gebäudenutzer (einschließlich des nicht-informierten Personals) von einem akustischem Signalton benachrichtigt. Die Auswertung der Pre-Evacuation-Time (die Autoren bezeichneten diese Zeit als Pre-Movement Time) erfolgte anhand von Videoanalysen. Es ist zu beachten, dass Sandberg und Shields & Boyce einen grossen Einfluss von gut ausgebildeten (wenn auch uninformierten) Mitarbeitern ausmachten, die die Personen motivierten, das Gebäude zu verlassen und diese zu einem sicheren Ort zu führten. Bei schlecht ausgebildetem Personal ist deswegen tendenziell von längeren Reaktionszeiten auszugehen. Beide Studien sind in ihren Ergebnissen vergleichbar. Natürlich entsprechen solche Evakuierungsübungen aufgrund

des Fehlens einer tatsächlichen Gefährdung, wie beispielsweise Rauch, und induzierte Effekte wie Stress, nur annähernd dem tatsächlichen Verhalten wie bei einem echten Brand. Dennoch liefern die Ergebnisse wertvolle Daten für die Beschreibung der Pre-Evacuation-Time.

Purser & Bensilum [31] haben Untersuchungen von Evakuierungsübungen und realen Evakuierungen durch Brandereignisse für verschiedene Gebäudenutzungen untersucht, u.a. für Verkaufsgeschäfte. Für zwei Evakuationsanalysen von Verkaufsgeschäfte wurde die Pre-Evacuation-Time statistisch untersucht. Auch hier weisen die Autoren einen hohen Einfluss von gutem Sicherheitsmanagement auf Evakuationszeiten aus.

In den Regelwerken und Leitfäden für ingenieurmässige Nachweise sind für Verkaufsgeschäfte, die mit einer BMA ausgerüstet sind und eine Alarmorganisation aufweisen, Zeiten zwischen 0.5 min und 4 min zu finden. Für Verkaufsgeschäfte ohne BMA wird auf grössere Unsicherheiten bei der Pre-Evacuation Time hingewiesen und Zeiten zwischen 15 min und 30 min veranschlagt. Zumindest für Personen im Brandraum kann letztere Auslegung in Frage gestellt werden, da diese entsprechend der Gefahr reagieren können. Shields & Boyce [30] bemerken im Jahr 2000, dass keine Referenz zu den in den Normen aufgeführten Zeiten vorahnden sind und diese eher auf Annahmen beruhen. Die Werte werden – teils in leicht abgeänderter Form – noch heute in den Regelwerken und Leitfäden verwendet.

Für die vorliegende Studie wird auf die vorhandenen Studien [29–31] Bezug genommen und nicht auf die Regelwerke und Leitfäden, da diese bereits (zu) konservative Auslegungen enthalten können. Sandberg [29] und Purser & Bensilum [31] schlugen eine Lognormalverteilung vor, um die Pre-Evacuation-Time darzustellen. Basierend auf den Daten von Sandberg [29] (zwei unangekündigte Evakuierungsübungen) und Shields & Boyce [30] (vier unangekündigte Evakuierungsübungen) wurde von De Sanctis [19] eine Lognormalverteilung mit Mittelwert von 32 sec und einer Standardabweichung von 16 sec vorgeschlagen, die in dieser Studie übernommen wird. Die statistische Verteilung passt auch gut zu den von Purser & Bensilum [31] erhobenen Daten (vgl. Abbildung 36).

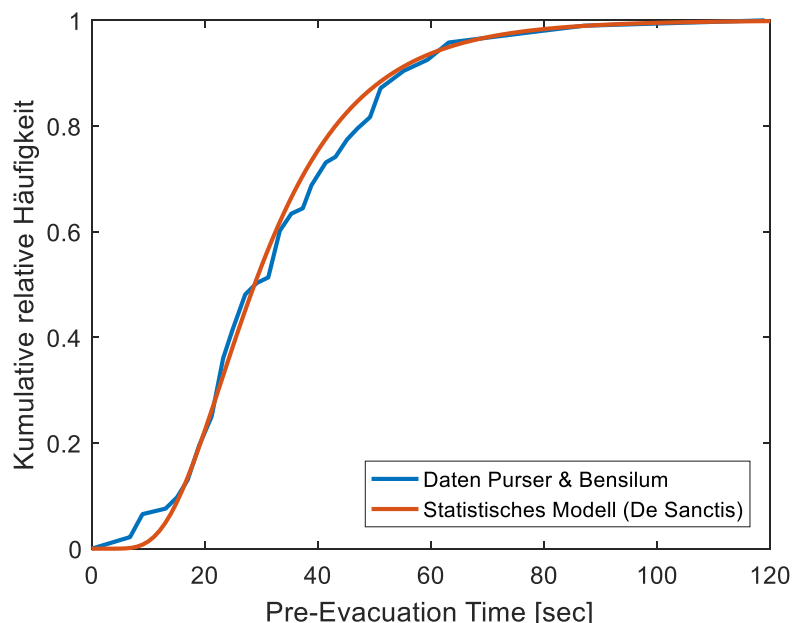


Abbildung 36: Statistische Verteilung der Pre-Evacuation Time (De Sanctis) im Vergleich zu den Daten von Purser & Bensilum [31].

Die Verteilung der Pre-Evacuation-Time gilt für gut informiertes Personal und für die Alarmierung durch einen Signalton. Wenn die Personen den Brand visuell oder geruchlich erkennen, wird davon ausgegangen, dass die Personen die Gefahr richtig einschätzen können und ähnliches Fluchtverhalten aufweisen, wie wenn gut trainiertes Personal die Anweisung zur Flucht geben. Deshalb wird bei Personen, die sich in demselben Raum wie der Brand befinden, dieselbe Pre-Evacuation-Time angesetzt, wie wenn gut trainiertes Personal Anweisungen zur Flucht gegeben.

6.2.3 Gehgeschwindigkeiten

Die Gehgeschwindigkeit einer Person hängt neben individuellen Eigenschaften von der Fähigkeit ab, sich frei zu bewegen, z.B. ohne die körperliche Interaktion mit anderen Personen (unbeeinflusste Bewegungsgeschwindigkeit) und hängt von der lokalen Personendichte entlang des Weges ab [32]. Dabei ermöglichen niedrige Dichten eine höhere Gehgeschwindigkeit. Die Gehgeschwindigkeiten der Personen sind bei niedrigen Dichten variabler, da die Hauptfaktoren, welche die Geschwindigkeit bestimmen, eher die individuellen Eigenschaften der Personen sind [33], z.B. Alter, körperliche Einschränkungen und Gruppeneffekte. Wenn es um die Überprüfung der Fluchtwegbreiten geht, dann spielen vermehrt Situationen eine Rolle, bei denen es zu einer Stausituation kommt. Die Bewegungsfähigkeit wird dann vermehrt von der Kapazität der Engstelle bestimmt, als durch die individuellen Eigenschaften der Personen. Deshalb wird der Einfluss der lokalen Personendichte auf die Gehgeschwindigkeit im Sinne einer vereinfachenden Betrachtung vernachlässigt.

Ein weiterer Faktor, der die Gehgeschwindigkeit beeinflusst, ist die Exposition der Personen gegenüber reizenden Stoffen im Rauch und die Einschränkung der Sicht durch Verdunkelung des Rauchs. Da die ASET auf einer Höhe von 2 m definiert ist (d.h. Personenschäden treten ab einer raucharmen Schicht unterhalb von 2 m auf), ist dieses Kriterium bei der Ausmassberechnung automatisch berücksichtigt. Deshalb wird eine Reduzierung der Bewegungsgeschwindigkeit infolge einer Exposition gegenüber reizenden Stoffen nicht berücksichtigt.

Die Gehgeschwindigkeit wurde gemäss der Entfluchtungsrichtlinie RiMEA [34] erstellt. Dabei wurde für die Standardpopulation die Altersverteilung der Schweizer Bevölkerung gemäss dem Bundesamt für Statistik zugrunde gelegt (vgl. Tabelle 19, Abbildung 37a). Um Personen mit beeinträchtigter Mobilität zu berücksichtigen, wurde mit einer die Personengruppe der über 80-jährigen auf 5% erhöht und die anderen Werte entsprechend angepasst. Für die probabilistische Analyse wurde zur Vereinfachung mit einer über alle Altersklassen gehenden statistischen Verteilung gerechnet, welche die Bandbreite der Gehgeschwindigkeiten ausreichend genau widerspiegelt (vgl. Abbildung 37b).

Rinne et al. [35] analysierten die Bewegungsgeschwindigkeiten von Erwachsenen in Evakuierungsstudien und schlugen als statistisches Modell eine linksgerichtete Weibull-Verteilung vor, um die mit der unbeeinflussten Bewegungsgeschwindigkeit verbundene Unsicherheit darzustellen. Diese Verteilung eignet sich zur Darstellung seltener Fälle, die mit einer reduzierten Bewegungsgeschwindigkeit verbunden sind, z.B. bei schwangeren Frauen, Kindern, Behinderten oder älteren Menschen. Diese Verteilung wird in der Studie verwendet.

Altersklasse	Häufigkeit BfS	gem. Mittelwert [m/sec]	Std.abw. [m/sec]
Unter 30 Jahre	15%	1.61	0.32
30 bis 50 Jahre	32%	1.49	0.30
Über 50 Jahre	48%	1.18	0.23
Personen mit beeinträchtigter Mobilität (z.B. Gehbehinderte und über 80-jährige)	5%	0.61	0.06
Mittlere Gehgeschwindigkeit (aggregiert über alle Altersklassen)		1.31	0.34

Tabelle 19: Gehgeschwindigkeiten nach Altersklasse gemäss BfS und RiMEA [34].

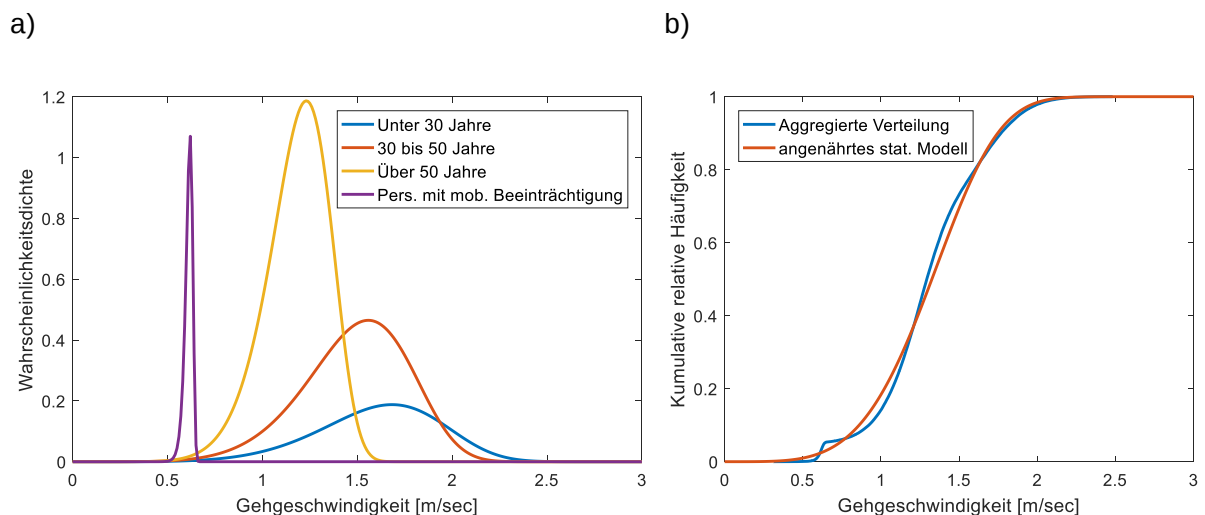


Abbildung 37: a) Verteilung der Gehgeschwindigkeiten nach Altersklasse und b) angenäherte Verteilung an die altersgewichtete aggregierte Verteilung der Gehgeschwindigkeiten.

6.2.4 Fluchtdauer

Die erforderliche Zeit für die Flucht beschreibt die Zeit von der ersten Bewegung in Richtung eines Ausgangs bis zum Zeitpunkt, bei dem die Person einen sicheren Ort erreicht, z.B. ein Treppenhaus oder das Freie. Wenn bei Engpässen keine Stausituationen auftreten, entspricht die Fluchtdauer der Gehzeit für die Fluchtdistanz, die mit einer unbehinderten Gehgeschwindigkeit begangen werden kann. Die RSET entspricht der Gesamtfluchtzeit, derjenigen Person, die am längsten hat, um den Raum zu verlassen. Das gleiche gilt auch für Stausituationen, die sich wieder auflösen bevor alle Personen den Raum verlassen haben (Abbildung 38a).

Eine Stausituation tritt ein, wenn die Anzahl der an einem Engpass ankommenden Personen die Durchflusskapazität des Engpasses überschreitet. Dann müssen die Personen vor dem Engpass warten, bis sie durchgehen können. Dementsprechend bestimmt die Durchflusskapazität einer Tür, ob sich eine Stausituation einstellt oder nicht. Bei einer Evakuationsanalyse interessiert die individuelle Stauzeit nicht, sondern nur wie viele Personen

sich im Raum befinden. Wenn eine Stausituationen auftritt und diese, bis alle Personen den Raum verlassen haben anhält, dann muss die Wartezeit für die Berechnung der RSET miteingerechnet werden (Abbildung 38b).

De Sanctis [19] hat basierend auf einer hydraulischen Analogie ein Modell entwickelt, das die individuellen Eigenschaften, wie Alarmierungszeit, Pre-Evacuation-Time und Gehgeschwindigkeiten berücksichtigt, und Zugleich differenziert, ob eine Stausituation auftritt oder nicht. Ein ähnliches Modell wurde bereits im Forschungsprojekt «Wirtschaftliche Optimierung im vorbeugenden Brandschutz» [15] verwendet, um Personenschutzanforderungen zu überprüfen.

Das vereinfachte Evakuierungsmodell von De Sanctis [19] wurde im Rahmen dieser Studie mit mikroskopischen Evakuierungssimulationen [36] für unterschiedliche Türbreiten und Personenzahlen verglichen (vgl. Anhang A5). In Stausituationen führt das vereinfachte Modell tendenziell zu einer grösseren Anzahl an wartenden Personen als die mikroskopische Simulation. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass dieser Effekt stark von der Personenflusskapazität des Ausgangs abhängt. Wie im nachfolgenden Kapitel diskutiert wird, ist diese Grösse mit Unsicherheiten behaftet und wird in der probabilistischen Analyse als Zufallsvariable eingeführt. In der mikroskopischen Evakuationsanalyse kann diese Streuung nur durch die individuellen Eigenschaften der Personen und durch Modellparameter abgebildet werden. Dabei handelt es sich beim Parameter, der für die Staubildung bei der mikroskopischen Simulation verantwortlich ist, um einen an Versuchen kalibrierten Faktor, der ebenfalls eine Streuung aufweist. Grundsätzlich sind diese Modelle aber vergleichbar. Darum wird in dieser Studie das vereinfachte Evakuierungsmodell verwendet.

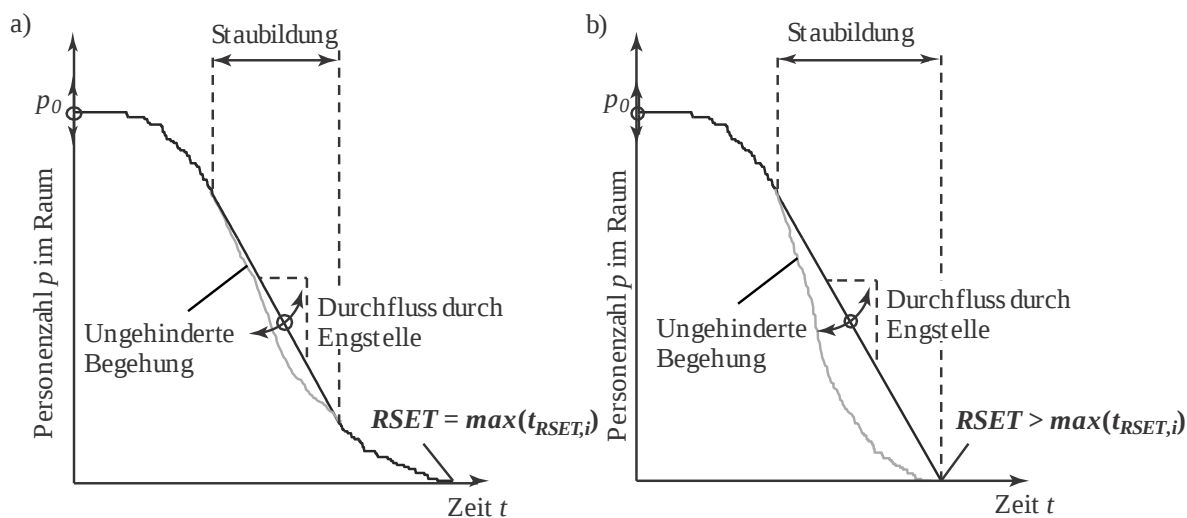


Abbildung 38: Evakuationsprozess für a) auflösende Stausituation und b) für eine nicht-auflösende Stausituation (nach [19]).

6.2.5 Maximal ertragbarer Staudruck

Bei einer grossen Anzahl an Flüchtenden kann ein Ausgang einen Engpass darstellen und sich davor ein Stau bilden. Dabei können Personen in physischen Kontakt kommen oder anfangen zu drängen. Dadurch entstehen hohe Personendichten, die Paniksituationen auslösen können. Durch die lokal hohe Personendichte in einer Stausituation können auch grosse Staudrücke auftreten, die zu lebensbedrohlichen Bedingungen führen können, aber auch Personen psychisch belasten.

Gemäss Fruin [37] treten Verletzungen oder gar Todesfälle in Stausituationen vor allem durch Erstickung auf und weniger durch Todtrampeln. Durch den hohen Staudruck werden die Lungen komprimiert, so dass das Atmen nicht mehr möglich ist (Asphyxie). Eine Analyse von Ereignissen mit Todesfällen zeigte, dass Staudrücke von mehr als 4'500 N entstehen können, die zu Todesfällen führten.

Pro Person kann ca. 30% bis 75% des Körpergewichts als horizontaler Staudruck aufgebracht werden [37]. Dies entspricht etwa 250 bis 600 N pro Person. Wenn man davon ausgeht, dass eine Person im Durchschnitt ca. 400 N Druck ausüben kann und der maximale ertragbare bei ca. 4'000 N liegt, so könnte eine solche Kraft durch 10 drückende Personen aufgebracht werden.

In der Literatur wird oft eine Personendichte von 4 Pers/m² als Grenzwert für kritische Personendichten angesetzt [34]. Legt man die Abmessung einer Standardperson zu Grunde (Abbildung 40b), berühren sich stillstehende Personen erst ab einer Personendichte von ca. 4.75 Pers/m². Erst ab diesem Wert können sich Staudrücke bilden.

Für gehende Personen können Versuche und Modelle für den spezifischen Fluss durch ebenerdige Ausgänge betrachtet werden (Fundamentaldiagramm; Abbildung 39) [38]. Die Modelle von Weidmann und Hanking, sowie die Versuchsergebnisse von Mori zeigen, dass Bewegungen bis zu Personendichten von 4 bis 6 Pers/m² möglich sind, jedoch die Geschwindigkeit in diesem Bereich stark abnehmen kann. Daher ist in der Literatur anzutreffende Grenzwert von 4 Pers/m² als relativ konservativ zu werten.

Zu beachten ist zudem, dass eine kurzzeitige Überschreitung des Staudrucks nicht direkt zu lebensbedrohlichen Bedingungen führen muss. Gemäss RiMEA [34] liegt ein signifikanter Stau vor, wenn eine lokale Dichte von 4 Personen pro Quadratmeter länger als 10% der Gesamtentfluchtungszeit (RSET) überschritten wird. Diese signifikanten Staus werden im Rahmen einer mikroskopischen Entfluchtungsanalyse genauer untersucht. Die Anwendung dieses Kriteriums auf die Staudruckproblematik ist etwas fragwürdig, da bei längeren Entfluchtungen, auch eine längere Dauer als unkritisch betrachtet wird. Da sich die meisten Todesfälle wegen Erstickung ereignen, wird im Rahmen dieser Studie eine fixe Dauer von 30 Sekunden festgelegt, in dem der Staudruck kurzfristig überschritten werden darf.

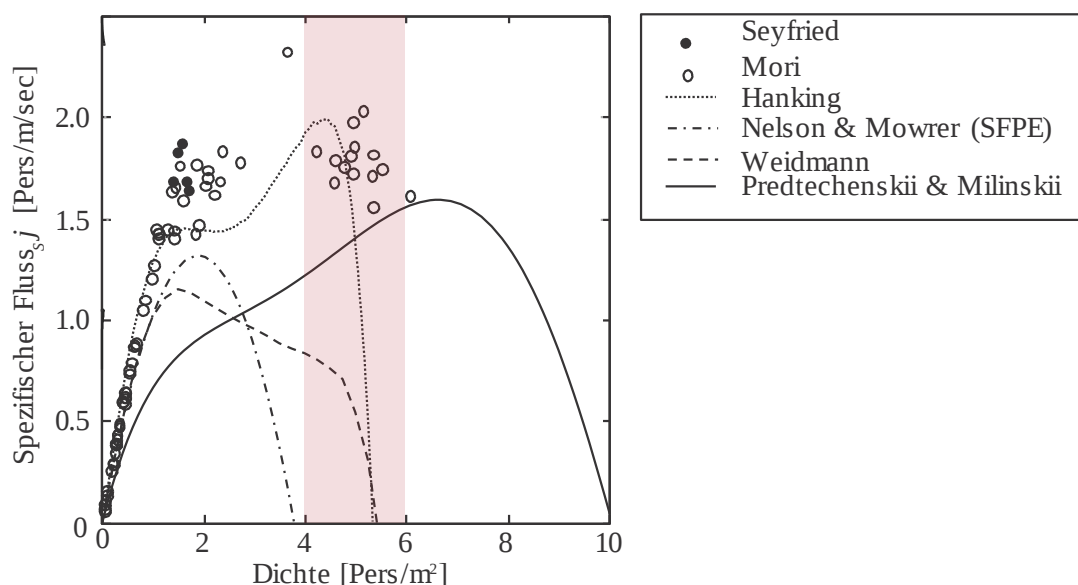


Abbildung 39: Modelle und Versuche zu spezifischen Flüssen durch Engstellen als Funktion der Personendichte.

Um eine erfolgreiche und sichere Evakuierung zu gewährleisten muss sichergestellt werden, dass sich keine untragbaren Staudrücke entwickeln. Dadurch können auch Paniksituationen vermieden werden. Darum wird ein Grenzkriterium eingeführt, das untragbare Staudrücke erfasst. Als Indikator für den Staudruck wird die lokale Personendichte im Bereich des Ausgangs verwendet. Um diesen Bereich zu definieren wird angenommen, dass der maximale Staudruck von 10 Personen verübt werden kann. Legt man eine durchschnittliche Breite einer Person von ca. 0.4 m fest, lässt sich um eine Tür ein 4 m (10 Personen $\times$ 0.4 m) kritischer Bereich definieren, in dem untragbare Staudrücke auftreten könnten. Im Modell wird angenommen, dass alle sich im Stau befindenden Person in diesen Bereich reindrücken.

Die Annahme, dass alle Personen in einem Stau in den kritischen Bereich mit Abstand 4 m um die Tür drängen werden, ist recht konservativ gewählt. Damit wird die reale Situation überschätzt, da sich in Wirklichkeit – insbesondere bei einer langen ASET – die Personen in einem grösseren Bereich verteilen werden und warten, bis sich der Stau sich auflöst. Bei schnellen Bränden mit einer kürzeren ASET ist das Modell realistischer, da die Personen einer höheren Gefahr ausgesetzt sind und den Raum so schnell wie möglich verlassen möchten. Deswegen ist davon auszugehen, dass sich die Personen in den kritischen Bereich drängen. Diese Abhängigkeit von der ASET wird vereinfachend nicht modelliert und führt zu einem konservativen Ergebnis, da die Mehrzahl der Brände keinen schnellen Brandverlauf aufweisen. Allerdings sei hier darauf hingewiesen, dass es auch andere Ereignisse geben kann, die eine schnelle Evakuierung erfordern (Amoklauf, Erdbeben, etc.). Für diese Ereignisse würde das Modell wieder realistischere Ergebnisse liefern. Diese Ereignisse sind aber nicht Teil der vorliegenden Studie.

Da der Grenzwert für den maximalen ertragbaren Staudruck mit Unsicherheiten behaftet ist und eine gewisse Variabilität aufweist, wird eine Verteilung der maximalen lokalen Personendichte verwendet. Als Verteilung wird eine Dreiecksverteilung mit unterem Wert von 4 Pers/m² und oberem Wert von 6 Pers/m² und ein Mittelwert von 5 Pers/m² verwendet. Der untere Wert ist sehr konservativ ausgelegt, repräsentiert aber den Grenzwert für kritische Personendichten in der Literatur [34]. Dadurch lässt sich die maximale ertragbare Staugrösse (maximale Anzahl an Personen, die im Stau sind, ohne zu hohen Staudrücken ausgesetzt zu sein) berechnen und ist in Abbildung 41 für einen Ausgang abgebildet. Sind mehrere Ausgänge vorhanden, vergrößert sich die maximale ertragbare Staugrösse für den Raum entsprechend.

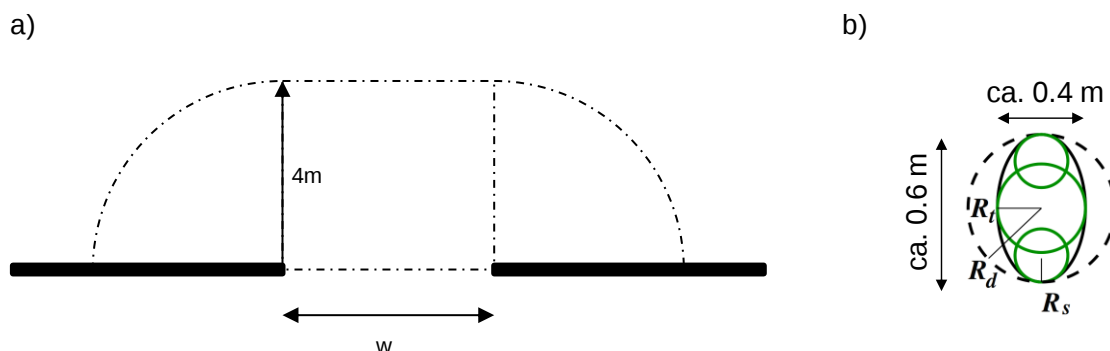


Abbildung 40: a) Evaluationsbereich für den maximalen Staudruck und b) Horizontale Projektion des Körpers dargestellt durch Körperellipsen.

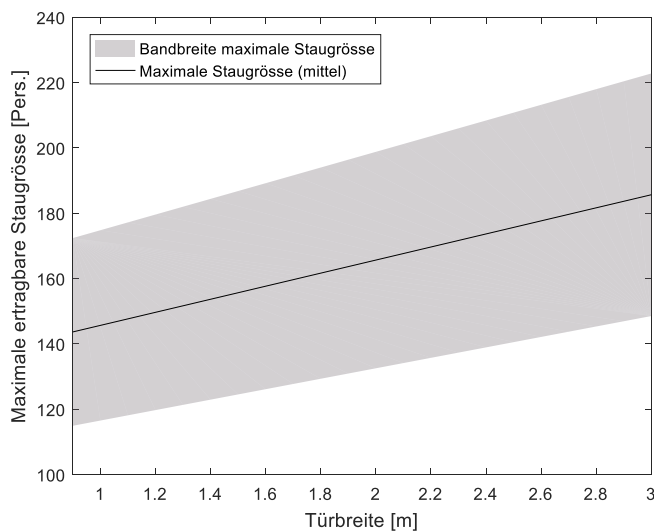


Abbildung 41: Maximal ertragbare Staugröße für einen Ausgang in Abhängigkeit der Türbreite.

6.2.6 Spezifischer Fluss durch eine Engstelle

Ebenerdige Flucht

Seyfried et al. [38] fassten die Durchflussmessung von verschiedenen Evakuierungsversuchen zusammen (siehe Abbildung 42) und sind zu dem Schluss gekommen, dass der Durchfluss j [Pers./sec] durch einen Engpass mit einer kontinuierlichen und nahezu linearen Zunahme der Engpassbreite (für Türbreiten > 0.7 m) vereinbar ist. Zudem erhöht eine hohe Personendichte zwischen 1.8 bis 5 Pers./m² vor der Engstelle die resultierenden Strömungswerte. Dies steht im Einklang mit den Erkenntnissen von Daamen & Hoogendoorn [39], welche die spezifische Durchflusskapazität pro Meter Türbreite j_s [Pers./m/sec] durch Evakuierungsversuche für Fluchttüren mit einer Breite von 50 cm bis 275 cm bewerteten. Sie setzten die Teilnehmer starken Belastungen aus, um eine Stresssituation zu simulieren, z.B. durch visuelle und akustische Signale. Sie kamen zum Schluss, dass die höchsten Strömungskapazitäten für den höchsten Stresspegel und der niedrigste für den niedrigsten Stresspegel erreicht werden. Eine interessante Feststellung war, dass obwohl die Teilnehmer keinen lebensbedrohlichen Bedingungen ausgesetzt waren, führte mehr Druckverhalten nicht zum "faster-is-slower"-Effekt, wie von Helbing et al. [40] diskutiert. Darüber hinaus gibt es einige selbstorganisierende Effekte, z.B. den Reißverschluss-Effekt, die zu einer Optimierung der verfügbaren Flächen und Geschwindigkeiten innerhalb des Engpasses führen [38]. Zudem beobachteten Daamen & Hoogendoorn [39] bei ihren Versuchen mit unterschiedlichen Türbreiten eine hohe Variabilität der durchschnittlichen Personenflüsse, die zwischen 2.2 und 3.1 Pers./m/sec variierten. Bei Verbreiterung der Türbreiten konnte kein Trend einer Veränderung des spezifischen Personenflusses festgestellt werden. Dies untermauert die lineare Abhängigkeit zwischen Türbreite w und Durchflusskapazität j . Diese Ergebnisse stehen im Widerspruch zu den grundlegenden Diagrammen im SFPE-Handbuch [32], wo eine Reduktion des Durchflusses bei einer Dichte von 2 Pers./m² aufgeführt ist (vgl. Abbildung 42 – Nelson & Mowrer). Es wird vermutet, dass diese eher für die Dimensionierung der Fluchtwege und damit konservativ ausgelegt wurde.

Beim dem aufsteigenden Verlauf der Kurven in Abbildung 42 (bei lokalen Personendichten zwischen 0 und 2 Pers./m²) wird die Durchflusskapazität durch die Anzahl der Personen nahe dem Ausgangsbereich beeinflusst: Je weniger Leute in diesem Bereich, desto niedriger ist die Durchflusskapazität. Die maximale Durchflusskapazität wird aber erst erreicht, wenn genügend

Personen am Ausgang «warten» und sich eine Stausituation einstellt. Die maximale Durchflussskapazität kann als Kriterium angesehen werden, um zu entscheiden, ob man in einer Stausituation ist (unbehinderte Begehung des Ausgangs gemäss Abbildung 38) oder nicht (Staubildung). Wenn eine Stausituation erreicht wird, wird mit der maximalen Durchflussskapazität gerechnet. Bei der unbehinderten Begehung wird die Durchflussskapazität von der Anzahl ankommenden Personen und deren Gehgeschwindigkeiten definiert. Was beim aufsteigenden Ast nicht modelliert wird, ist die Reduktion der Gehgeschwindigkeit bei zunehmender lokaler Personendichte. Dies würde dazu führen, dass sich der Stau früher einstellt, was einer optimistischen Modellierung entspricht. In Anbetracht der Unsicherheit der Personendichte und der Durchflussskapazität wird dieser Effekt eine untergeordnete Rolle spielen.

Anhand der Punktwolke in Abbildung 42 liegt die maximale spezifische Durchflussskapazität $j_{s,Tür}$ bei Stausituation vor einer Tür zwischen 1,5 und 2 Pers./m/sec. Für die probabilistische Analyse wird angenommen, dass diese Werte jeweils das 10%- bzw. das 90%-Quantil einer normalverteilten Wahrscheinlichkeitsverteilung entsprechen. Der Mittelwert der Verteilung liegt bei 1.75 Pers./m/sec. Eine Reduktion des Personenflusses ist nur für sehr hohe Personendichten (> 6 Pers./m²) zu erwarten. Dies führt aber zu einer Überschreitung des maximal ertragbaren Staudruck der zwischen 4 und 6 Pers./m² angesetzt ist (vgl. Kapitel 6.2.5). Daher wird auf eine Reduktion des spezifischen Personenflusses durch eine hohe lokale Personendichte vereinfachend verzichtet.

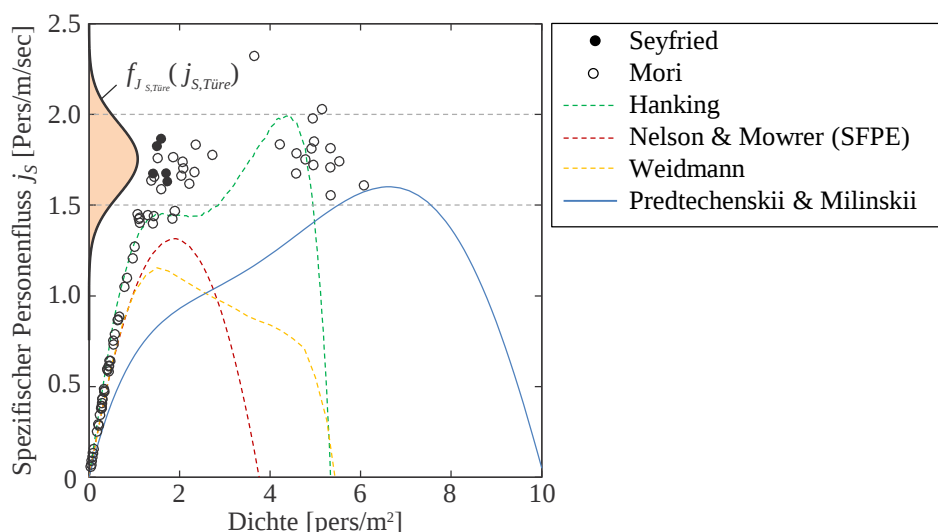


Abbildung 42: Spezifischer Personenfluss durch einen Ausgang als Funktion der Personendichte [38].

Flucht über Treppen

Bei mehrgeschossigen Bauten erfolgt die Evakuierung über das Treppenhaus. Auf Treppen weisen Personen eine niedrigere Gehgeschwindigkeit auf, als wenn sie ebenerdig durch eine Engstelle gehen. Wenn die Treppenbreite nicht gross genug dimensioniert werden, kann es so zu einem Rückstau in den Raum der Brandentstehung führen. Um dies zu vermeiden, sehen diverse Richtlinien eine Verbreiterung der Treppen vor, so dass der Durchfluss demjenigen eines ebenerdigen Ausgangs entspricht.

In der Schweizer Brandschutzrichtlinie [1] wird dies berücksichtigt indem pro 60 Personen eine Breite von 0.6 m angesetzt wird. Im Vergleich zu ebenerdigen Ausgängen kann für 100 Personen eine Breite von 0.6 m angesetzt werden. Mit der Verbreiterung der Treppenanlagen wird die geringere Gehgeschwindigkeit auf Treppen kompensiert, um einen vergleichbaren

Personenfluss zu erreichen wie bei ebenerdigen Ausgängen. Implizit wird in der Schweizer Richtlinie davon ausgegangen, dass der spezifische Fluss auf Treppen 40% kleiner ist als bei ebenerdigen Ausgängen. Dies scheint eine konservative Annahme zu sein, wenn die maximalen spezifischen Flüsse auf Treppen und ebenerdigen Ausgängen anderer Datenquellen verglichen wird (z.B. SFPE Handbook [41]). Allerdings ist zu beachten, dass die nutzbare Breite gemäss BSR 16-15 beidseitig durch Handläufe (je 10 cm) reduziert werden kann. Je nach Ausgestaltung der Treppen liegt da der maximale spezifische Fluss für Treppen, zwischen 15% und 30% tiefer als derjenige für ebenerdige Ausgänge. Dies bedeutet, dass die Entfluchtung über entsprechend dimensionierte Treppenanlagen (über breitere Treppen) mindestens genauso schnell verläuft, wie eine ebenerdige Entfluchtung bei gleicher Personenzahl.

6.2.7 Auswertung der RSET

Die RSET hängt von zahlreichen Parametern ab. Um zu zeigen, welche Parameter den grössten Einfluss auf die RSET haben, wird in diesem Kapitel eine Parameteranalyse für den Referenzfall 2500 m² mit zwei Ausgängen durchgeführt. Die Gesamtbreite der Ausgänge wird zwischen 2.4 m (2 Ausgänge à 1.2 m) und 7.5 m variiert.

In Abbildung 43a ist für eine schnelle Brandentwicklung (diese beeinflusst die Alarmierungszeit der Personen) der Verlauf der RSET in Abhängigkeit der Personendichte für verschiedene Türbreiten ersichtlich. Nur bei Personendichten über 0.15 Pers./m² gibt es einen Einfluss der Türbreite auf die RSET. Der Grund ist, dass unterhalb dieser Personendichte die RSET nicht von der Stausituation definiert wird (Staus – falls es welche gibt – werden vor der RSET aufgelöst), sondern vom Verhalten der Personen, insbesondere durch die Alarmierungszeit und der Pre-Evacuation-Time. Die Datenanalyse hat gezeigt, dass für die meisten Nutzungskategorien eine Personendichte von 0.15 Pers./m² nur selten erreicht wird. Der Einfluss bzw. Sensitivität der Personendichte auf die RSET ist also eher gering zu werten.

Anders sieht es bei Staudruck aus. Abbildung 43b zeigt, inwiefern die Türbreite und die Personendichte die maximale Staugrösse, d.h. die maximale Anzahl wartender Personen beeinflussen. Die Ergebnisse sind nicht überraschend:

- Je grösser die Gesamtbreite der Ausgänge, desto kleiner wird die maximale Staugrösse.
- Je höher die Personendichte, desto grösser wird die maximale Staugrösse.

Allerdings treffen diese Aussagen nur ab einer gewissen Grenzpersonendichte zu, bei der es zu einer Staubildung kommt. Die Grenze ist stark von der Türbreite abhängig. Beispielsweise gibt es ab Gesamttürbreiten von 4.5 m keine Stausituationen bis Personendichten von 0.10 Pers./m². Die Staugrössen können für hohe Personendichten rechnerisch sehr hoch werden (> 200 Personen). Der einzige Weg diese zu reduzieren ist mehr Ausgänge oder breitere Ausgänge zur Verfügung zu stellen. Die Datenanalyse zeigt aber, dass für Supermärkte, Non-Food-Verkaufsgeschäfte, Kaufhäuser und Einkaufszentren sehr selten der Wert von 0.11 Pers./m² überschritten wird¹⁴. Diese Dichte führt bei einer Gesamtbreite von 2.4 m zu Staugrössen von bis zu 100 Personen, die auf zwei Ausgänge verteilt werden. Das heisst, dass sich pro Ausgang 50 Personen im Stau befinden.

14 Vgl. 99% Quantil der verschiedenen Nutzungskategorien (Tabelle 5).

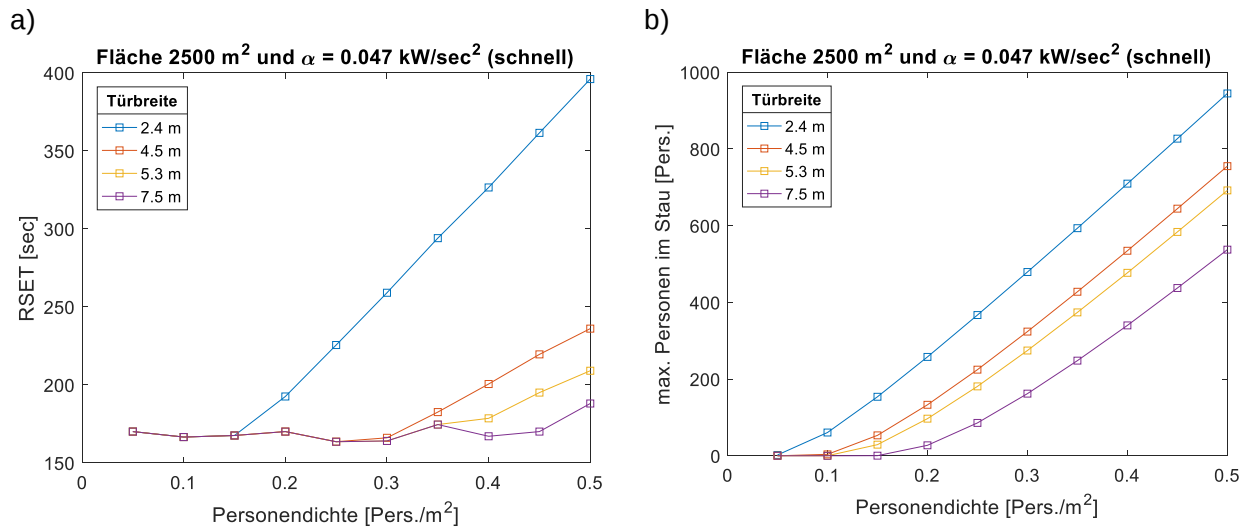


Abbildung 43: Einfluss der Personendichte und der Gesamtbreite der Ausgänge a) auf die mittlere RSET und b) auf die maximale Anzahl wartenden Personen im Stau.

In Abbildung 44 ist der Einfluss Brandentwicklungsgeschwindigkeit und der Personendichte auf die RSET abgebildet. Bei grossen Gesamtbreiten (vgl. Abbildung 44a), bei denen die RSET stark vom individuellen Verhalten der Personen abhängt, hat die Personendichte einen kleineren Einfluss auf die RSET als die Brandentwicklungsgeschwindigkeit. In diesen Fällen wird die RSET nur von der Brandentwicklungsgeschwindigkeit beeinflusst, welche einen Einfluss auf die Alarmierungszeit hat: Je schneller der Brand ist, desto eher wird dieser entdeckt und desto geringer fällt die RSET aus.

Bei kleinen Türbreiten (vgl. Abbildung 44b), steigt der Einfluss der Personendichte auf die RSET, jedoch erst ab einer gewissen Personendichte von 0.15 Pers./m². Unterhalb dieses Wertes wird die RSET vom Verhalten der Personen definiert und nicht von einer möglichen Stausituation.

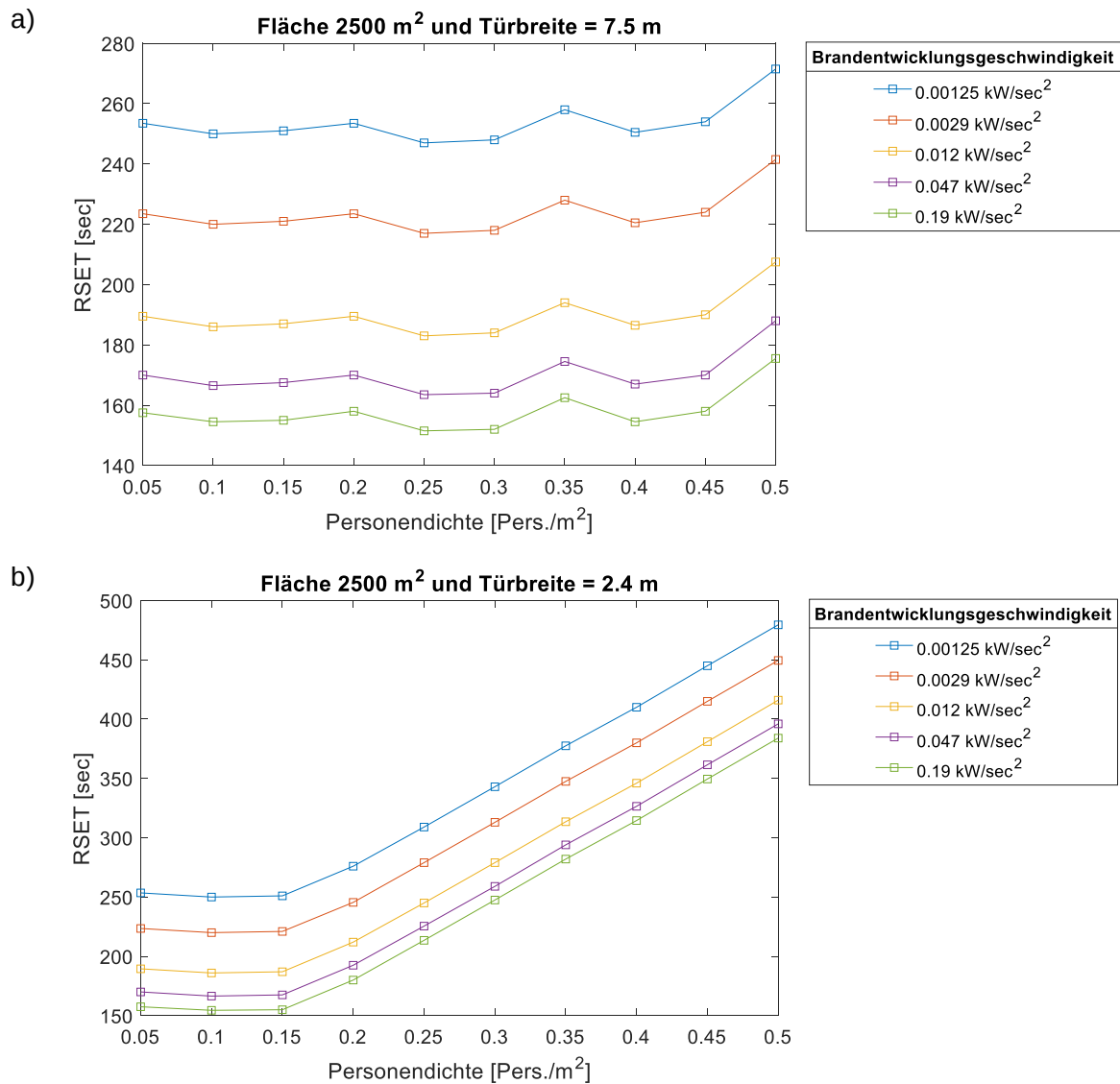


Abbildung 44: Einfluss der Brandentwicklungsgeschwindigkeit auf die RSET für a) breite Ausgänge (bei der von einer freien Begehung ausgegangen werden kann) und b) für schmale Ausgänge (bei der mit einer Stausituation gerechnet werden muss). Die Brandentwicklungsgeschwindigkeit beeinflusst die Alarmierungszeit.

7. Deterministische Beurteilung der Fluchtweg Anforderungen

Bei einem deterministischen Evakuierungsnachweis geht es um den Nachweis, dass die zur Verfügung stehende sichere Evakuierungsdauer ASET grösser ist als die benötigte Evakuierungszeit RSET, d.h. $ASET > RSET$. Für den Bemessungsfall wird gemäss der VKF Richtlinie «Nachweisverfahren im Brandschutz» [42] ein sogenannter Worst-Credible-Case zugrunde gelegt. Allerdings gibt es keine Hinweise wie ein solcher Bemessungsfall definiert ist. Der Bemessungsfall wird in der Praxis jeweils in Absprache mit der kantonalen Brandschutzbehörde festgelegt. Durch die fehlende Definition führt dies für ähnliche Gebäude in unterschiedlichen Kantonen oft zu unterschiedlichen Bemessungsfällen. Dabei wird das gleichzeitige Auftreten von ungünstigen (und teilweise unabhängigen) Bemessungsparametern angesetzt, um die schlimmstmöglichen Brandszenarien abzudecken. Eine andere Philosophie verfolgt die Tragwerksnorm, die auf risikobasierten Grundlagen erstellt wurden. Dort lassen sich Einwirkungen von gleichzeitig auftretenden Einwirkungen anhand von Lastfallkombinationen und Sicherheitsbeiwerten reduzieren, da das gleichzeitige Auftreten als unwahrscheinlich beurteilt wird. Diese Sichtweise wird bei gegenwärtigen Entrauchungs- und Evakuationsnachweisen nicht angewandt¹⁵.

Der Bemessungswert für die Personendichte stellt die Grundlage für die Dimensionierung der Fluchtwege dar, d.h. er definiert die Anzahl notwendiger Ausgänge und die Gesamtbreite aller Ausgänge. Mit den aus der Studie ermittelten Daten der statistischen Verteilung der Personendichte kann untersucht werden, ob die Dimensionierung mit dem vorgeschlagenen Bemessungswert eine gleichwertige Sicherheit aufweist, wie die heutige Auslegung gemäss Richtlinie 16-15. Da Todesfälle in Verkaufsgeschäften sehr selten sind, wird das Sicherheitsniveau der heutigen Auslegung als akzeptabel eingestuft. Das Brand- und Evakuationsszenario entspricht dabei einem Worst-Credible-Case Szenario (vgl. Kapitel 7.1). Für die Bemessung der Fluchtwegbreiten werden zwei Auslegungen untersucht:

- Es wird das vorgeschlagene Bemessungskonzept aus Kapitel 4 verwendet mit einem partiellen Faktor von $\gamma = 1.0$ (vgl. Tabelle 7). Abgesehen vom Wert der Personendichte, wird das Verfahren zur Dimensionierung der Fluchtwege beibehalten (Bemessungsregeln der VKF BSR für die Anzahl Ausgänge und Breite der Ausgänge).
- Zum Vergleich wird der Nachweis auch für die Bemessungswerte der Richtlinie 16-15 «Flucht- und Rettungswege» [1] geführt (Tabelle 20). Die Bemessungspersonendichte der Richtlinie differenzieren nicht nach Nutzung, sondern nach der Geschosslage. Hier wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Verkaufsgeschäfte ebenerdig (im EG) sind.

Bemessungspersonendichte	Nutzung	Bemessungswert [Pers./m2]
BSR 16-15 (ebenerdig)	Non-Food, Supermarkt, hochfrequente Supermärkte	0.50
Bemessungswerte (gem. Tabelle 7 mit $\gamma = 1.0$)	Non-Food	0.10
Bemessungswerte (gem. Tabelle 7 mit $\gamma = 1.0$)	Supermarkt	0.15
Bemessungswerte (gem. Tabelle 7 mit $\gamma = 1.0$)	Hochfrequente Supermärkte	0.30

Tabelle 20: Bemessungswerte gemäss Richtlinie 16-15 «Flucht- und Rettungswege» [1] und die vorgeschlagene Bemessungswerte mit $\gamma = 1.0$.

¹⁵ Für die Tragwerksbemessung im Brandfall wird in der Brandschutzrichtlinie [42] auf den Eurocode [23] verwiesen. Im Eurocode ist ein semi-probabilistischer Nachweis integriert und entspricht nicht einem Nachweis mit einem Worst-Credible-Bemessungsbrand. Dies bildet ein Widerspruch in den Richtlinien.

7.1 Definition des Worst-Credible-Case Szenario

Da der Worst-Credible-Case nicht explizit vorgegeben ist, wird er hier durch einen 99%- und einen 100%-Quantilwert gemäss der Datenerhebung für die entsprechende Kategorie definiert. Das 100%-Quantil entspricht dem maximalen Wert, der in der Erhebung in einer Kategorie ermittelt wurde. Der 99%-Quantilwert wurde auch als Grundlage für die Festlegung des Bemessungswerts verwendet (vgl. Kapitel 4). Die Werte sind in Tabelle 21 aufgelistet.

Da Brände die Benutzung von einzelnen Ausgängen verunmöglichen können, wird auch dieses Szenario berücksichtigt. Dabei wird angenommen, dass sich die Anzahl der Ausgänge um einen Ausgang reduziert wird und sich die Personen auf den anderen verfügbaren Ausgängen gleichmässig verteilen.

Die anderen Parameter für das Worst-Credible-Case-Szenario sind in Tabelle 21 aufgelistet und wurden mit der Spurgruppe der VKF abgestimmt.

Brandfall	Evaluationswert (Worst-Credible-Case)			
Auswertung mit Personendichte für Non-Food	99%-Quantil	0.099 Pers./m ²	100%-Quantil	0.218 Pers./m ²
Auswertung mit Personendichte für Supermärkte	99%-Quantil	0.126 Pers./m ²	100%-Quantil	0.438 Pers./m ²
Auswertung mit Personendichte für hochfrequentierte Supermärkte	99%-Quantil	0.286 Pers./m ²	100%-Quantil	0.743 Pers./m ²
Brandausbreitungsgeschwindigkeit	schnell	0.047 kW/sec ²		
Kapazität des Ausgangs (ebenerdig)	1%-Quantil	1.5 Pers/sec/m		
Grenzpersonendichte für maximal ertragbarer Staudruck	Unterer Grenzwert	4 Pers/m ²		
Alarmierungszeit [sec]	gemäss statistischer Verteilung (vgl. Anhang A6)			
Pre-Evacuation Time [sec]	gemäss statistischer Verteilung (vgl. Anhang A6)			
Gehgeschwindigkeit [m/s]	gemäss statistischer Verteilung (vgl. Anhang A6)			
RSET	90%-Quantil der RSET-Verteilung von insgesamt 1000 Durchgängen der vereinfachten Evakuationssimulation			
Verfügbare Ausgänge	a)	Alle Ausgänge verfügbar		
	b)	Ein veränderter Ausgang		

Tabelle 21: Parameter für das Worst-Credible-Case-Szenario.

7.2 Ergebnisse der deterministischen Auswertung

Eine sichere Evakuierung erfolgt, wenn:

- das Staudruck-Kriterium erfüllt ist (keine Staudrücke über 4 Pers/m² länger als 30 sec) und
- das RSET/ASET-Kriterium erfüllt ist (ASET > RSET)

Für jede Bemessungsgrösse kann nun evaluiert werden, ob eine sichere Evakuierung für die Referenzfälle rechnerisch nachgewiesen werden kann. Die Ergebnisse sind für die einzelnen Fälle im Anhang A7 zu finden. Tabelle 22 stellt eine Zusammenstellung der Ergebnisse dar. Rot markiert sind diejenigen Fälle, bei denen der Nachweis bei einem oder mehreren

Referenzfällen nicht erbracht werden konnte (Anzahl Referenzfälle mit erbrachtem Nachweis / Anzahl betrachteter Referenzfälle).

In den meisten Fällen, in denen der Nachweis nicht erbracht werden kann, wird das Staudruckkriterium vor dem ASET/RSET-Kriterium erreicht. Insbesondere bei kleinen Räumen kann es jedoch vorkommen, dass das ASET/RSET-Kriterium schneller erreicht wird als das Staudruckkriterium, da kein grosses Volumen für die Rauchausbreitung zur Verfügung steht. Entsprechend fällt die ASET für kleine Räume auch relativ kurz aus.

Bei den grösseren Räumen ist die Personenbelegung grösser. Damit wird es wahrscheinlicher, dass eine lange (individuelle) Alarmierungszeit oder Pre-Evacuation-Time realisiert wird, so dass es eine längere RSET entsteht und das ASET/RSET-Kriterium nicht erfüllt werden kann. Im Gegensatz dazu, verbessert sich bei grösseren Räumen aber die Situation bzgl. des Staudruckes, wenn ein Ausgang verhindert ist: grössere Räume haben auch mehr Ausgänge zur Verfügung, auf die sich die Personen, die einen Ausgang nicht nutzen können, aufteilen können.

7.3 Schlussfolgerung der deterministischen Auswertung

Die deterministische Analyse erlaubt keine abschliessende Beurteilung, ob die Bemessungswerte ein ausreichendes Sicherheitsniveau gewährleisten können, da die Analyse je nach Festlegung des Worst-Credible-Case-Szenario eine andere Schlussfolgerung zulässt. Wenn ein 99%-Quantilwert angesetzt wird, kann gezeigt werden, dass die vorgeschlagenen Bemessungswerte den Nachweis genauso gut erfüllen, wie die Bemessungswerte der Personendichte in der Richtlinie 16-15. Voraussetzung ist allerdings, dass alle Ausgänge für eine Evakuierung zur Verfügung stehen. Wird als Worst-Credible-Case-Szenario ein Ausgang als unbenutzbar betrachtet, so fällt die Auswertung zwischen der gegenwärtigen Richtlinie 16-15 «Flucht- und Rettungswege» [1] und den neuen Bemessungswerten unterschiedlich aus:

- für Non-Food-Verkaufsgeschäfte kann gezeigt werden, dass der Nachweis mit den neuen Bemessungswerten gleichwertig erfüllt werden kann.
- für Supermärkte kann mit der Richtlinie 16-15 eher eine Entfluchtung gewährleistet werden, als mit den vorgeschlagenen Bemessungswerten. Mit dem vorgeschlagenen Bemessungswert konnte jedoch der Nachweis für eine sichere Entfluchtung für 5 von 6 Referenzfällen gezeigt werden.
- Für hochfrequentierte Supermärkte mit einem verhinderten Ausgang konnte der Nachweis für eine sichere Evakuierung weder mit den Bemessungswerten aus der Richtlinie [1] noch mit den vorgeschlagenen Bemessungswerten für alle Referenzfälle erbracht werden.

Die Sachlage verschärft sich umso mehr, wenn statt mit dem 99%-Quantilwert, mit dem maximalen gemessenen Wert gerechnet wird (100%-Quantilwert). Dann kann selbst die jetzige Auslegung der Personendichte nicht alle Nachweise für Supermärkte und für hochfrequente Supermärkte erfüllen – selbst, wenn alle Ausgänge zur Verfügung stehen.

Die Auswertung zeigte auch, dass die fehlende Unterscheidung der Nutzung in den aktuellen Richtlinien problematisch ist, insbesondere für hochfrequente Supermärkte. Sobald ein Szenario mit einem verhinderten Ausgang angesetzt wurde, konnte der Nachweis nicht mehr für jeden Referenzfall erbracht werden.

Historisch bedingt bleibt unklar, welches Worst-Credible-Case-Szenario mit den Bemessungswerten in den Richtlinien abgedeckt werden soll. Ob es sich dabei um ein Maximalszenario (100%-Quantilwert) oder um ein Szenario mit einem versperrten Ausgang handelt, für beide Szenarien gibt es Fälle, in denen der Nachweis nicht erbracht werden konnte.

Nur wenn ein Szenario angesetzt wird, bei dem alle Ausgänge zur Verfügung stehen und ein 99%-Quantilwert der Personendichte angesetzt wird, können die Vorgaben der Richtlinie die Nachweise lückenlos erfüllen. Für dieses Szenario, kann aber auch die vorgeschlagenen Bemessungswerte die Nachweise lückenlos erfüllen.

Eine risikobasierte Beurteilung kann für viele der angesprochenen Probleme Abhilfe schaffen. Dabei können sowohl günstige als auch ungünstige Lastkombinationen konsistent berücksichtigt werden. Beispielsweise werden so auch Personendichten, die grösser sind als das 99%-Quantil und seltene Brandszenarien entsprechend ihrer Häufigkeit mitberücksichtigt. Die problematische Definition eines Worst-Credible-Case-Szenario erübrigt sich somit und wird implizit in der Risikobetrachtung als eines von vielen Szenarien mitberücksichtigt.

			Bemessungswerte der Personendichte			
			Richtlinie 16-15	Non-Food	Supermarkt	Hochfrequenter Supermarkt
			0.50 Pers./m ²	0.10 Pers./m ²	0.15 Pers./m ²	0.30 Pers./m ²
Auswertung mit 99%-Quantil der Personendichte						
<i>Alle Ausgänge verfügbar</i>						
Non-Food	0.099 Pers./m ²	6/6	6/6			
Supermarkt (normal)	0.126 Pers./m ²	6/6		6/6		
Supermarkt (hochfrequent)	0.286 Pers./m ²	6/6			6/6	
<i>Ein Ausgang verhindert</i>						
Non-Food	0.099 Pers./m ²	6/6	6/6			
Supermarkt (normal)	0.126 Pers./m ²	6/6		5/6		
Supermarkt (hochfrequent)	0.286 Pers./m ²	4/6			2/6	
Auswertung mit 100%-Quantil der Personendichte						
<i>Alle Ausgänge verfügbar</i>						
Non-Food	0.218 Pers./m ²	6/6	6/6			
Supermarkt (normal)	0.438 Pers./m ²	4/6		0/6		
Supermarkt (hochfrequent)	0.743 Pers./m ²	0/6			0/6	
<i>Ein Ausgang verhindert</i>						
Non-Food	0.218 Pers./m ²	6/6	1/6			
Supermarkt (normal)	0.438 Pers./m ²	0/6		0/6		
Supermarkt (hochfrequent)	0.743 Pers./m ²	0/6			0/6	

Tabelle 22: Übersicht der deterministischen Auswertung und Angabe der Anzahl Referenzfälle, welche die Kriterien erfüllt haben (in Bezug auf die sechs betrachteten Referenzfälle).

8. Risikobasierte Beurteilung der Fluchtweganforderungen

8.1 Risikobasierte Schutzziele

Die Revision der Brandschutzvorschriften 2026 soll auf Basis eines risikoorientierten Ansatzes durchgeführt werden mit dem Ziel eine Deregulierung, eine Vereinfachung der Vorschriften, sowie einen einheitlicheren Vollzug zu erreichen. Die Definitionen der Schutzziele stammen aus einem Stakeholder-Prozess zur Festlegung risikobasierter Akzeptanzkriterien für die VKF-Brandschutzvorschriften 2026 und wurden am 17. September 2020 an der Hauptversammlung des IOTH verabschiedet.

Die Gewährleistung der Personensicherheit wird dabei durch eine Kombination von festen Risiko-Grenzwerten (Minimales Sicherheitsniveau bzw. oberer Grenzwert für das Nutzerrisiko) und dem Grenzkostenprinzip gemäss der ALARP (As Low As Reasonably Possible / Practicable) Ansatz erreicht:

- Zunächst wird durch einen Vergleich mit einem oberen Grenzwert für die Todesfallrate geprüft, ob das minimal geforderte Sicherheitsniveau für Personen erreicht ist (nicht akzeptabler Bereich bzw. roter Bereich). Risiken, die über dieser „roten Linie“ liegen, können unter keinen Umständen akzeptiert werden.
- Sind die Minimalstandards erfüllt, muss das Risiko so lange weiter reduziert werden, bis keine weiteren verhältnismässigen Massnahmen mehr verfügbar sind (ALARP). Das verbleibende Restrisiko wird akzeptiert (orange/grüner Bereich). Die Verhältnismässigkeit von Personenschutzmassnahmen wird mit dem Grenzkostenprinzip beurteilt.

Die Obergrenze für das Nutzerrisiko bestimmt, wieviel Geld im ALARP-Bereich maximal zur Verfügung steht, um das Risiko weiter zu reduzieren. Die Risikoakzeptanz wird somit primär dadurch bestimmt, dass die verbleibenden Risiken «ALARP» sind, also so niedrig wie mit verhältnismässigen Massnahmen erreichbar. Das erreichte Sicherheitsniveau hängt von den verfügbaren Massnahmen ab.

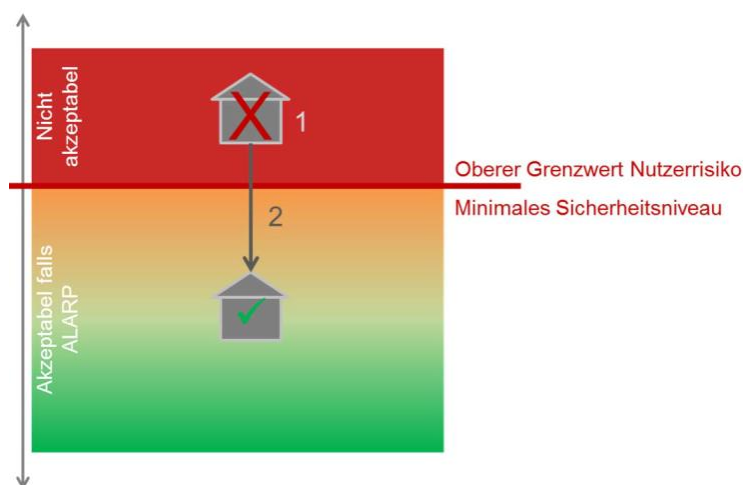


Abbildung 45: Schematische Darstellung¹⁶ der Obergrenze für das Nutzerrisiko und des ALARP-Ansatzes.

16 Stakeholder-Workshop der VKF zur Festlegung von risikobasierten Schutzzielen.

8.1.1 Beurteilung mit der Obergrenze für das Nutzerrisiko

Die Obergrenze für das Nutzerrisiko ist als Todesfallrate definiert. Als Obergrenze für das Nutzerrisiko wird der Wert von $5 \cdot 10^{-5}$ pro Gebäudenutzer und Jahr verwendet¹⁷. Um zu beurteilen, ob eine Baute den Grenzwert erfüllt, wird das kollektive Risiko (erwartete Anzahl Tote) berechnet, mit der durchschnittlichen Personenbelegung normiert und mit dem Grenzwert verglichen:

$$\gamma = \frac{R}{\varnothing E} \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ pro Nutzer und Jahr}$$

γ : individuelle Todesfallrate pro Nutzer und Jahr

R : Erwartete Anzahl Todesopfer pro Jahr und Filiale einer Nutzungskategorie

$\varnothing E$: durchschnittliche kumulierten Expositionszeiten aller Gebäudenutzer im Laufe eines Jahres (Gebäudenutzerjahr) einer Nutzungskategorie

Die Todesfallrate ist definiert als erwartete (durchschnittliche) Anzahl Todesopfer in einem Gebäude (vgl. kollektives Risiko), normiert mit der mittleren Personenbelegung und wird wie folgt berechnet:

$$\gamma = \frac{R}{\varnothing E} = \frac{R}{\varnothing P \cdot \varnothing V / (24 \cdot 365)}$$

$\varnothing V$: durchschnittliche Verweildauer der Kunden im Geschäft [h]

$\varnothing P$: durchschnittliche Anzahl Kunden pro Jahr [Pers.]
= Anzahl Tagesbesucher [Pers.] x Anzahl geöffneter Tage

Die durchschnittliche Verweildauer $\varnothing V$ kann mit Hilfe von Littles Theorem [43] berechnet werden:

$$\varnothing V = \frac{\varnothing L}{\varnothing \lambda}$$

$\varnothing L$: durchschnittliche Anzahl Kunden in einer Filiale [Pers.]

$\varnothing \lambda$: durchschnittliche Ankunftsrate der Kunden [Pers. / h] = Durchschnittliche Anzahl Tagesbesucher [Pers.] / durchschnittliche Öffnungszeit [h]

Zur Abschätzung der durchschnittlichen Anzahl Kunden in einer Filiale und der durchschnittlichen Anzahl Tagesbesucher wird die mittlere Personendichte $\varnothing PD$ verwendet. Eingesetzt erhält man folgende Beziehung und Werte (Tabelle 23):

$$\varnothing E = \varnothing PD \cdot \text{Verkaufsfläche} \cdot \varnothing \text{Öffnungszeit} \cdot \text{Anzahl offener Tage} / (24 \cdot 365)$$

Nutzungskategorie	mittlere Personen- dichte $\varnothing PD$	durchschnittliche Öffnungszeit	Anzahl Offener Tage	flächenbezogenes Gebäudenutzerjahre $\varnothing E''$
Non-Food ¹⁸	0.022 Pers./m ²	12 h	312	0.0094 / m ²
Food ¹⁹	0.029 Pers./m ²	12 h	312	0.0124 / m ²
Hochfrequente Supermärkte	0.073 Pers./m ²	17 h	365 (mit Sonntagsverkauf)	0.0517 / m ²

Tabelle 23: Flächenbezogene Normierungsfaktoren für die Berechnung des Nutzerrisikos.

¹⁷ Der Wert wurde an der Hauptversammlung des IOTH am 17. September 2020 genehmigt.

¹⁸ Wert für Kaufhäuser verwendet (analog zur Verwendung des Quantilwerts für die Bemessungswerte)

¹⁹ Wert für Supermarkt mit 2'400 m² verwendet (analog zur Verwendung des Quantilwerts für die Bemessungswerte)

8.1.2 Beurteilung mit dem ALARP-Ansatz (Grenzkosten)

Sofern das Kriterium für das obere Nutzerrisiko erfüllt ist, können die Fluchtweg Anforderungen mit dem Grenzkostenkriterium optimiert werden. Für den Grenzwert der Grenzkosten (im Folgenden nur als Grenzkosten bezeichnet) wird der Wert von 6.7 Mio. CHF für die Vermeidung eines Todesfalls durch präventive Massnahmen verwendet²⁰. Der Wert stammt vom Bundesamt für Raumentwicklung ARE und wird laufend angepasst (hier Basis 2017)²¹. Das Grenzkostenkriterium kann wie folgt definiert werden:

$-\frac{\Delta K}{\Delta R} \leq 6.7 \text{ Mio. CHF pro verhinderten Todesfall}$	
ΔK :	Kostendifferenz $\Delta K = K_2 - K_1$ von zwei zu evaluierenden Massnahmen mit Kosten K_1 und K_2
ΔR :	Risikodifferenz $\Delta R = R_2 - R_1$ von zwei zu evaluierenden Massnahmen mit Kosten R_1 und R_2

Zur Evaluation von kontinuierlichen Massnahmen kann diese Beziehung auch in Differentialform gebracht werden. Das negative Vorzeichen erklärt sich, da bei einer Erhöhung der Anforderung in der Regel die Kosten steigen und gleichzeitig die Risiken sinken.

8.2 Berechnung des kollektiven Risikos

Das kollektive Risiko R kann als der erwartete Anzahl Todesopfer pro Jahr betrachtet werden und wird mit einem szenariobasierten Ansatz berechnet:

$$R = \sum_i p_i \cdot a_i$$

Dabei bezeichnet p_i die Wahrscheinlichkeit (pro Jahr) und a_i das erwartete Ausmass (erwartete Anzahl Todesopfer pro Jahr) eines Szenarios i . Unter Szenarien können Ereignisabläufe eines Brandes verstanden werden, die üblicherweise mit einem Ereignisbaum dargestellt werden können.

Abbildung 46 zeigt den Ereignisbaum, der für die Studie verwendet wurde. Die Ausmassberechnung ist jeweils abhängig vom jeweiligen Szenario. Für jedes Szenario wird die erwartete Anzahl Todesfälle infolge einer Überschreitung des Staudruckkriteriums und infolge einer Überschreitung des ASET-RSET-Kriteriums berechnet. Dabei werden die identifizierten Unsicherheiten im physikalischen Modell (Kapitel 6) mit probabilistischen Methoden berücksichtigt. Sowohl der Wahrscheinlichkeitsteil als auch die Ausmassberechnung werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

20 Der Wert wurde an der Hauptversammlung des IOTH am 17. September 2020 genehmigt.

21 Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Value of Statistical Life (VOSL): Empfohlener Wert der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos in der Schweiz, 30. Oktober 2019

<https://www.are.admin.ch/are/de/home/verkehr-und-infrastruktur/grundlagen-und-daten/kosten-und-nutzen-des-verkehrs.html>

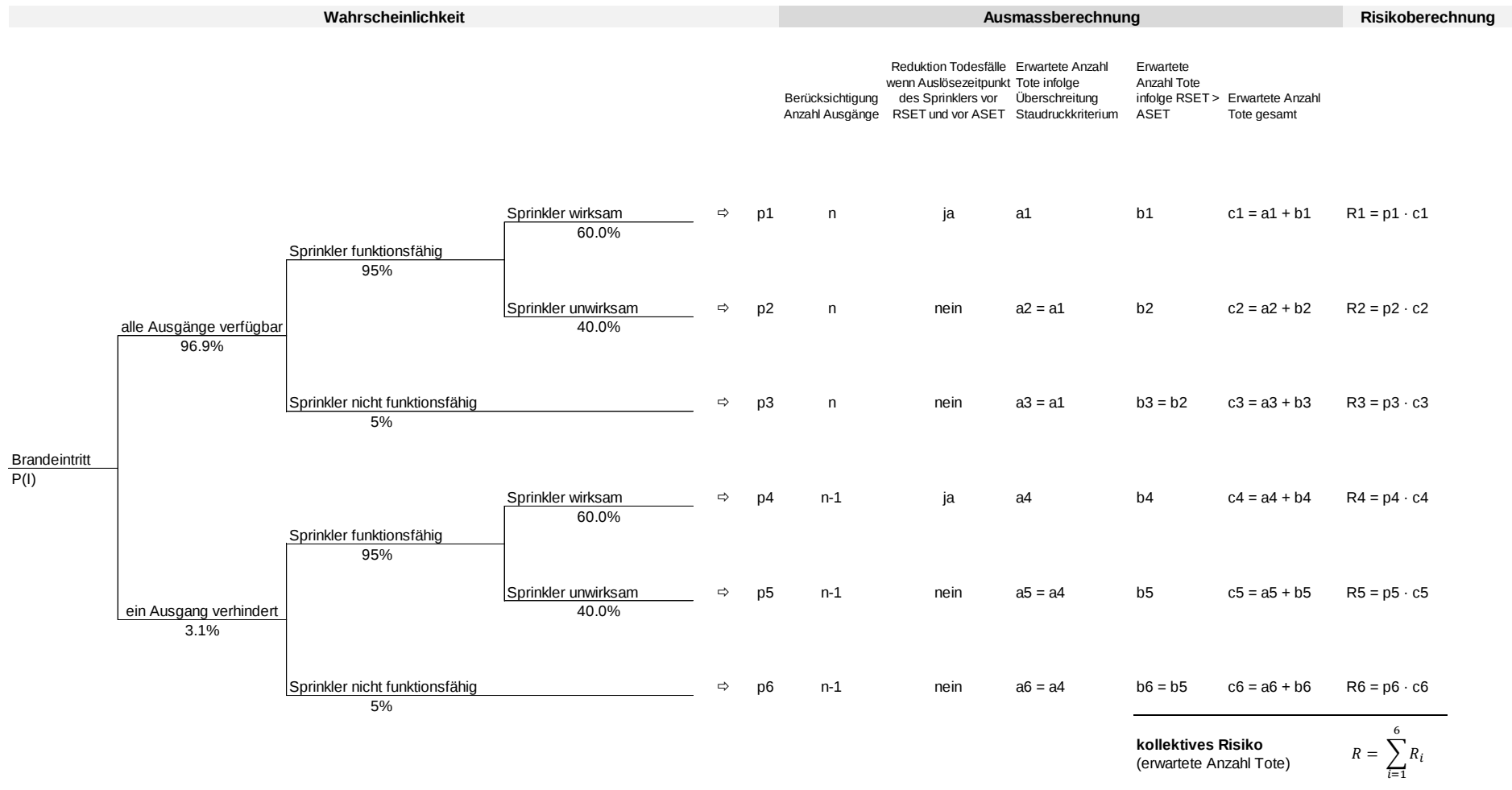


Abbildung 46: Ereignisbaum für die Ermittlung des kollektiven Risikos, wenn ein Sprinkler vorhanden ist. Wenn kein Sprinkler vorhanden ist, wird rechnerisch die Funktionsfähigkeit der Sprinkleranlage auf 0% gesetzt.

8.2.1 Wahrscheinlichkeiten

Für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit eines Szenarios wird der Ereignisbaum in Abbildung 46 verwendet. Darin sind folgende Szenarien mit deren Wahrscheinlichkeiten enthalten:

- Wahrscheinlichkeit eines Brandeintritts
- Wahrscheinlichkeit eines versperrten Ausgangs
- Wahrscheinlichkeit einer Auslösung des Sprinklers (falls vorhanden) und deren Löschwahrscheinlichkeit

Im Folgenden werden die einzelnen Wahrscheinlichkeiten kurz umschrieben.

Brandeintrittswahrscheinlichkeit

Die Brandeintrittswahrscheinlichkeit wird gemäss der Potenzgleichung aus Kapitel 2.5 modelliert:

$$\lambda = e^{\alpha} \cdot Vol^{\beta}$$

Dabei entspricht λ der jährlichen Brandeintrittsrate, Vol dem Volumen und α und β sind die Kalibriergrössen. Für die Zweckbestimmung «Handel» entsprechen die Kalibriergrössen $\alpha = -8.979 \pm 0.472$ und $\beta = 0.4447 \pm 0.051$ (Angabe des Erwartungswert und Standardabweichung). Diese Zweckbestimmung beinhaltet nicht nur öffentlich zugängliche Räume, sondern auch Lagerbereiche und nicht öffentlich zugängliche Räume in Verkaufsgeschäften. Da der Fokus dieser Studie auf den öffentlich zugänglichen Räumen liegt²², stellt die Verwendung dieses Ansatzes eine eher konservative Abschätzung der Brandeintrittshäufigkeit dar. Zudem wird vereinfachend angenommen, dass alle Brände während den Öffnungszeiten stattfinden. Damit wird das Risiko überschätzt.

Zudem repräsentiert diese Häufigkeitsabschätzung jeden Brandschaden (mit Ausnahme der Blitzschäden), der an die kantonalen Versicherungen gemeldet wurde [15]. Doch nicht jeder gemeldete Brandschaden ist eine Gefahr für die Personensicherheit. Oft handelt es sich um kleinere Elektrobrände, die zwar einen Schaden anrichten, aber keine besonders hohe Rauchentwicklung produzieren und für die Personensicherheit irrelevant sind. Darum wird davon ausgegangen, dass Schäden unter 2'000 CHF (entspricht ca. den Gesamterneuerungskosten eines Sicherungskastens) keine Gefahr für die Personensicherheit (bzgl. einer Evakuierung) darstellen. Aus der kumulativen Verteilung des Schadenbetrages aus Fischer et al. [15] (vgl. Abbildung 47) lässt sich eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 80% ableiten.

Für die in dieser Studie verwendete Brandeintrittsrate mit Relevanz für die Personensicherheit wird folgende Beziehung verwendet:

$$P(I) = \lambda \cdot 80\%$$

²² Diese machen ca. 60% der Brände aus. Abgeschätzt aufgrund der Brandstatistik eines Einzelhändlers.

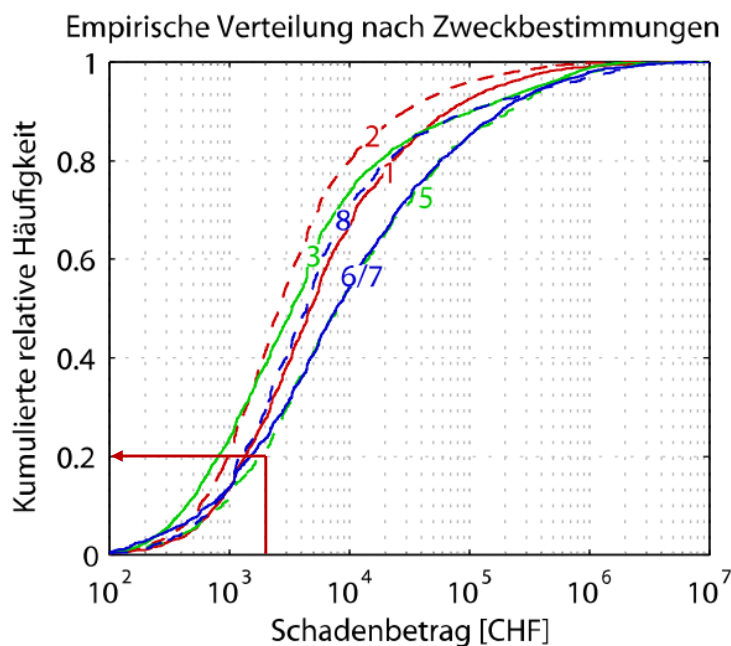


Abbildung 47: Kumulative Verteilung des Schadenbetrages nach Zweckbestimmung (5 = Handel) [15].

Wahrscheinlichkeit eines versperrten Ausgangs

Brände können infolge ihres Standorts und ihrer Hitzestrahlung Ausgänge unbenutzbar machen. Hier wird davon ausgegangen, dass ein Brand, der sich 5 m oder näher bei einem Ausgang befindet, diesen unbenutzbar macht. Wenn der Brand uniformverteilt auf der Fläche stattfinden kann, ist die Wahrscheinlichkeit eines unbenutzbaren Ausganges am Beispiel des Referenzfalls 2'500 m² mit zwei Ausgängen:

$$p_{\text{Ausgang}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (5 \text{ m})^2 \cdot \pi}{\frac{1}{2} 2'500 \text{ m}^2} = 3.1\%$$

Einfluss einer Löschanlage

Löschanlagen werden gemäss BSR 19-15 für Verkaufsgeschäfte ab einer Brandabschnittsfläche von 2'400 m² verlangt. Für Verkaufsgeschäfte mit einer kleineren Fläche als 2'400 m², wird davon ausgegangen, dass keine Löschanlage vorhanden ist.

Grundsätzlich lässt sich die Effektivität einer Löschanlage mit deren Betriebszuverlässigkeit und deren Wirksamkeit umschreiben. Die Betriebszuverlässigkeit kann mit der Wahrscheinlichkeit, dass ein System oder eine Komponente, wie vorgesehen funktioniert, beschrieben werden. Die Wirksamkeit beschreibt, ob ein System nach dem Betrieb seine Funktion erfüllt hat. Mit anderen Worten: Hat das System in Übereinstimmung mit seinem Design und Zweck funktioniert?

Für Verkaufsgeschäfte wird oft ein Sprinkler verbaut. Sowohl für die Betriebszuverlässigkeit als auch für die Wirksamkeit von Sprinklern lassen sich Statistiken finden. In Tabelle 24 sind die Ergebnisse dieser Statistiken zusammengefasst.

	USA [44,45]			UK [46]	Schweden [47]	Europa [48]
Erhebungszeitraum	2003 – 2007	2010 – 2014	2010 – 2014	2011 – 2015	2006-2007	vor 2002
Brand zu klein, eingeschränkt, vorher gelöscht	65%		81%	67%		
Betriebszuverlässigkeit (für Brände, die gross genug sind, um einen Sprinkler auszulösen)	93%	92%	89%	97.4%	95%	96% – 99%
Wirksam (halten / löschen)	97%	96%	97%	100% (23%- 67% / 77%- 33%)	98% (37% / 63%)	
unwirksam	3%	4%	3%	0%	2%	
	Unterschiedliche Nutzungen (exkl. Wohnung)		Retail	Retail	Unterschiedliche Nutzungen (exkl. Wohnung)	Unterschiedliche Nutzungen

Tabelle 24: Zusammenfassung von Statistiken zur Zuverlässigkeit und Wirksamkeit von Sprinkleranlagen.

Für die Risikobeurteilung werden aufgrund der Statistiken und in Absprache mit der Spurgruppe der VKF, folgende Werte zur Berücksichtigung von Löschanlagen festgelegt:

Betriebszuverlässigkeit	95%
Wirksamkeit	
halten	40%
löschen	55%
nicht wirksam	5%

Tabelle 25: Zusammenstellung der bedingten Wahrscheinlichkeit zur Berücksichtigung der Effektivität von Löschanlagen.

Die physikalische Modellierung von Bränden, die von Löschanlagen gehalten werden, ist sehr anspruchsvoll. Eine Löschanlage beeinflusst die gesamte Thermik und die Interaktion mit dem Löschmittel und den Rauchprodukten ist überaus komplex. Für die Studie wird auf diese aufwendige Modellierung verzichtet und eine Grenzbetrachtung angestellt. Von Löschanlagen gehaltene Brände werden in einer optimistischen Betrachtung so berücksichtigt, als ob sie die ASET praktisch ins unendliche Verzögern. Dies kommt aus Sicht der Personensicherheit einer Löschung des Brandes gleich. In einer pessimistischen Sichtweise wird angenommen, dass von der Löschanlage gehaltene Brände keinen Einfluss auf die ASET haben und diese unwirksam ist. Zusammengefasst liegt die Wirksamkeit von Löschanlagen in folgenden Schranken:

Wirksamkeit	wirksam	nicht wirksam
optimistisch (Halten und Löschen)	95%	5%
pessimistisch (nur Löschen)	55%	45%

Tabelle 26: Berücksichtigung der Wirksamkeit von Löschanlagen für die Studie.

Für die Optimierung der Fluchtwegbreiten wird mit einer pessimistischen Auslegung gerechnet. Diese Auslegung hat aber nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse, da das Risiko hauptsächlich vom Staudruckkriterium dominiert wird (vgl. Kapitel 8.4). Für die Beurteilung der Notwendigkeit von Löschanlagen (vgl. Kapitel 8.5) werden beide Auslegungen verwendet.

Für eine Risikoreduktion durch die Löschanlage muss diese bezüglich der Personensicherheit nicht nur betriebstauglich und wirksam sein, sondern sie muss auch:

- vor der ASET (ohne den Einfluss der Löschanlage) auslösen und
- vor der RSET auslösen

Dies ist in Abbildung 48 veranschaulicht. Die Auslösezeit der Löschanlage wurde gemäss der VDI-Richtlinie [49] abhängig von der Brandentwicklungsgeschwindigkeit eingesetzt. Liegt der Auslösezeitpunkt der Löschanlage vor der RSET und vor der ASET, dann reduziert sie das Todesfallrisiko im Brandraum. Liegt der Auslösezeitpunkt nach der RSET und vor der ASET, so wird das Risiko nicht reduziert, da alle bereits geflüchtet sind, ohne dass die Personen toxischen Bedingungen ausgesetzt wurden. Bei sehr langsamen Bränden kann der Auslösezeitpunkt der Löschanlage auch nach der ASET erfolgen. Dann hat sie bezüglich der Personensicherheit keinen positiven Effekt, da tödliche Bedingungen bereits vor der Auslösung erreicht werden.

Die Wahrscheinlichkeiten zur Beschreibung der Effektivität der Löschanlage bezüglich Personenschutz sind von zahlreichen Parametern abhängig, wie beispielsweise der Brandentwicklungsgeschwindigkeit (Einfluss auf ASET, Zeitpunkt der Alarmierung der Personen und Zeitpunkt der Auslösung) und andere Parameter wie Personenbelegung, Pre-Evacuation Time, Gehgeschwindigkeiten und spezifische Personenflüsse durch eine Engstelle. Da diese Parameter eine statistische Verteilung haben, ist die Effektivität der Löschanlage je nach Parameterkonstellation gegeben oder nicht. Das Zusammenspiel dieser Parameter in Zusammenhang mit der Löschanlage wird in der Ausmassberechnung für jede Parameterkonstellation einzeln bewertet und berücksichtigt und fliesst so in das kollektive Risiko mit ein (Ausmassteil, Abbildung 46). Andererseits wird im Ereignisbaum ausschliesslich die Betriebstauglichkeit und Wirksamkeit der Anlage berücksichtigt (Wahrscheinlichkeitsteil, vgl. Abbildung 46).

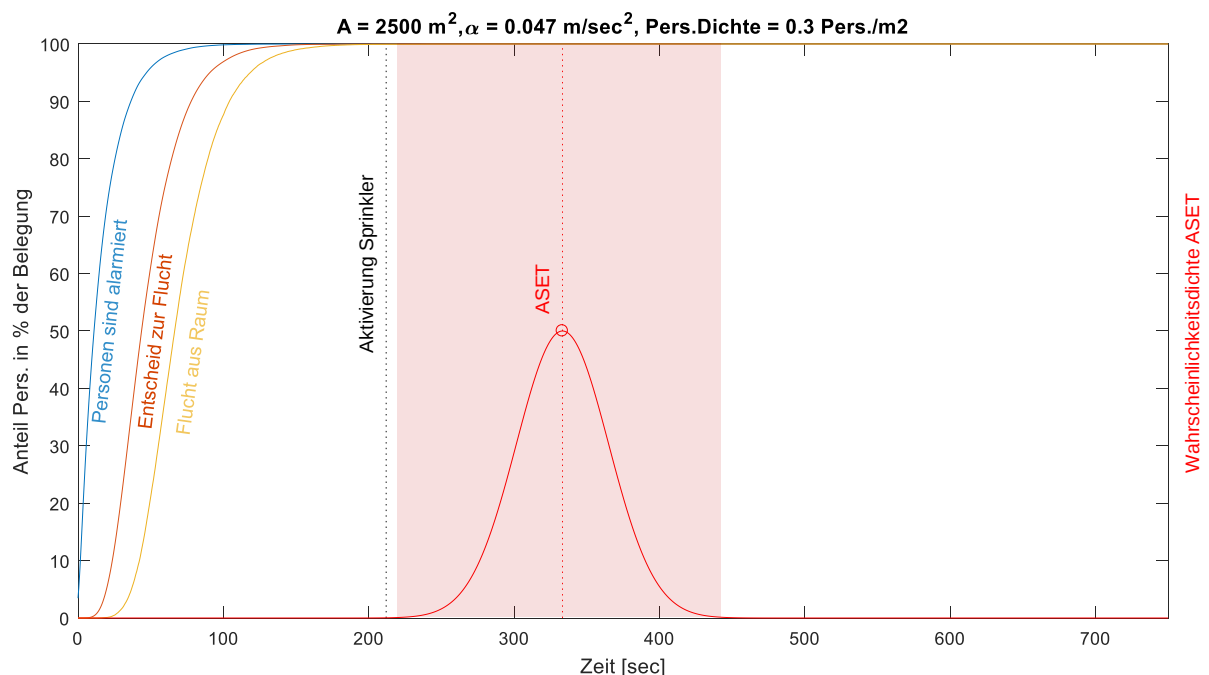


Abbildung 48: Darstellung der Verteilung der Fluchtzeiten, des Auslösezeitpunktes des Sprinklers und der ASET. In diesem Fall löst der Sprinkler vor der ASET aus, hat aber bezüglich der Reduktion des Personenrisikos keinen Einfluss, da die Flucht (RSET) bereits beendet ist.

Die Frage stellt sich, ob eine Löschanlage einen kontraproduktiven Effekt auf das Fluchtverhalten von Personen haben könnte (die Sicht nimmt rapide ab und die Personen verhalten sich unberechenbar). Dies ist jedoch nur der Fall, wenn der Sprinkler vor der RSET auslöst. Folgende Überlegungen zeigen, dass ein kontraproduktiver Effekt unwahrscheinlich ist und für die Studie ausgeschlossen werden kann:

- Personen flüchten in der Regel weg vom Brandherd: Räume ab 2'400 m² bieten genügend alternative Fluchtwegoptionen. Bei der Auslösung des Sprinklers befinden sich die Personen wahrscheinlich nicht mehr im Nahbereich der auslösenden Anlageteile / des Entstehungsbrandes, sondern haben bereits die Flucht angetreten. Eine durch die Löschanlage verursachte Trübung der Sichtweiten im Nahbereich des Brandes, welche das Auffinden von Fluchtwegen beeinträchtigt, ist somit unwahrscheinlich.
- Im Vergleich zu einem nicht-gesprinklerten Brand, stehen, wegen der geringeren Rauchentwicklung des Entstehungsbrandes, im brandentfernten Bereich grössere Sichtweiten und mehr Zeit für die Flucht zur Verfügung. Das heisst, dass sich lokal die Situation bezüglich der Sichtweiten verschlechtern kann, in brandentfernten Bereichen kann aber mit einer verbesserten Fluchtsituation gerechnet werden
- Da die Personenbelegung eine starke Streuung aufweist, sind geringe Personendichten relativ häufig anzutreffen und es kann oft mit einer staufreien Flucht gerechnet werden. Ein Pushing-Effekt in Stausituationen, bei dem hohe Staudrücke durch drängende Personen aufgebaut werden, ist somit unwahrscheinlich.

8.2.2 Ausmassberechnung

Bei der Ausmassberechnung wird pro betrachtetes Szenario die erwartete Anzahl Tote berechnet. Um die im Kapitel 6 eingeführten Streuungen der Inputparameter von Ingenieurmodellen und der Modellunsicherheiten zu berücksichtigen, wird die Monte-Carlo-

Methode angewandt²³. Mit der Monte-Carlo-Methode erhält man einen Schätzwert für das erwartete Ausmass und es werden zahlreiche Berechnungsdurchgänge basierend auf Zufallszahlen (entsprechend der statischen Verteilung der Variablen) durchgeführt, mit denen sich auch seltene Kombinationen von Eingangsparameter entsprechend ihrer Häufigkeit berücksichtigen lassen. Bei jedem Berechnungsdurchgang wird überprüft, ob die folgenden Grenzzustände überschritten werden:

- Überschreitung des maximalen Staudrucks für länger als 30 sec (Staudruckkriterium, vgl. Kapitel 6.2.5)
- Die maximale Evakuationszeit ist grösser als die zur Verfügung stehende Zeit bis tödliche Bedingungen eintreffen (ASET/RSET-Kriterium, vgl. Kapitel 6.1.1 und 6.2.7)

Wird einer dieser Grenzzustände überschritten, gibt es ein Ausmass $a_i > 0$, d.h. eine gewisse Anzahl Todesopfer. Das Ausmass wird jeweils zum frühesten Zeitpunkt berechnet, an dem einer der beiden Grenzzustände überschritten wird, d.h. zum Zeitpunkt ASET oder zum Zeitpunkt, bei dem der maximale Staudruck überschritten wird.

Staudruckkriterium

Abbildung 49 zeigt beispielhaft die Fluchtkurven und die Staukurve für eine bestimmte Kombination (Realisationen) von Parametern (Personendichte, spezifischer Fluss durch Türen und Grenzpersonendichte für maximal ertragbaren Staudruck), die den als maximal zulässig definierten Staudruck (vgl. Kapitel 6.2.5) erreichen. Aufgeführt sind die verschiedenen Realisationen der individuellen Eigenschaften der Personen (Alarmierung, Pre-Evacuation-Time, Gehgeschwindigkeit, etc.). Aufgrund der unterschiedlichen Realisationen der individuellen Eigenschaften erreichen nicht alle Staukurven das Grenzkriterium.

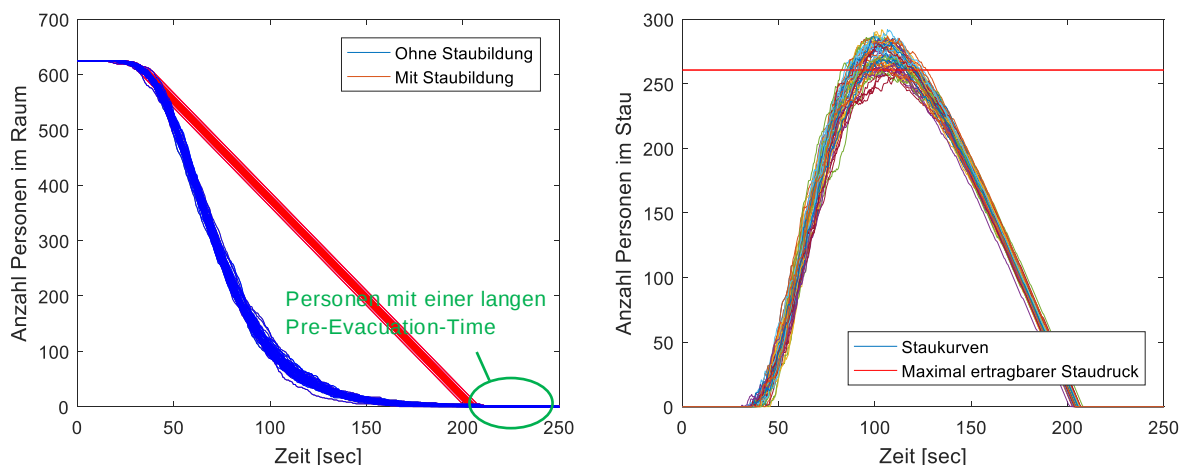


Abbildung 49: Links: Fluchtkurven mit mehreren Simulationen für die Berücksichtigung der individuellen Eigenschaften der Personen für Referenzfall 3 (2'500 m² Verkaufsfläche) für eine Gesamtflechtwegbreite von 2.4 m über 2 Ausgänge für eine Bestimmte Realisation von Parameter. Rechts: dazugehörige Staukurve mit Realisation des maximal ertragbaren Staudrucks.

Wenn das Staukriterium überschritten wird, wird angenommen, dass alle Personen im Raum sterben. Es wird dabei nicht unterschieden, ob sie durch Staudrücke oder durch die Brandeinwirkung sterben. Auch wenn es reale Brandereignisse gibt, in denen dies beobachtet werden konnte (z.B. Station Nightclub Fire, USA, 2003 mit 100 Toten), ist diese Annahme –

23 Importance Sampling Verfahren mit einer Gewichtungsfunktion für die Verteilung der Personendichte. Für eine Evaluation werden mindestens 10'000 Berechnungsdurchgänge durchgeführt.

insbesondere im Zusammenhang mit langsamen Brandentwicklungen – sehr konservativ ausgelegt. Für andere – weniger konservative – Annahmen gibt es aber keine aussagkräftigen Daten oder Modelle, insbesondere weil das Verhalten der Menschen in diesen Situationen völlig unvorhersehbar ist und sehr situationsbezogen ist. Vielmehr geht es mit diesem Modellansatz darum, die auslösenden Faktoren für Paniksituationen und deren Folgen für den Brandfall möglichst zu unterbinden. Dies wird mit diesem konservativen Ansatz erreicht. Zudem ist auch bei langsamen Bränden vorstellbar, dass einzelne Personen in Panik geraten und ein Massenglück verursachen.

In Abbildung 50 sind für den Referenzfall 3 ($2'500 \text{ m}^2$) die Wahrscheinlichkeiten und die erwartete Anzahl Todesfälle in Abhängigkeit der Personendichte illustriert. Es zeigt sich, dass bei einer minimalen Türbreite von $2 \times 0.9 \text{ m}$ ab ca. 0.2 Pers. / m^2 sowohl die Wahrscheinlichkeit als auch der erwartete Schaden rasant ansteigt. D.h. Nutzungen unterhalb dieses Wertes weisen keine bzw. nur geringe Probleme mit dem Staudruck auf. Je grösser die Türbreite, desto weiter nach rechts verschiebt sich dieser Wert. Beispielsweise hätte man bei einer Gesamtbreite von 2.7 m bis 0.25 Pers./m^2 keine Probleme mit dem Staudruck. Allerdings ist die Personendichte in Verkaufsgeschäfte keine feste Grösse, sondern eine Verteilung. Daher muss bei einer gegebenen Gesamtbreite immer mit einer Überschreitung eines solchen Wertes gerechnet werden. Dies wird in der Risikobetrachtung berücksichtigt und es kann ermittelt werden, in wie vielen Fällen eine solche Überschreitung tolerierbar ist.

Diese Analyse weist auch auf den Einfluss des Szenarios hin, wenn ein Ausgang nicht nutzbar ist. Dann vergrössert sich die szenariospezifische Personendichte, d.h. dass sich die gleiche Personenbelegung auf weniger Ausgänge verteilt. Beispielsweise würden bei einem Ausfall eines Fluchtweges beim Referenzfall 3 mit zwei Ausgängen, alle Personen den anderen Ausgang benutzen. Dies entspricht einer Verdoppelung der Personenzahl, die durch diesen Ausgang flüchten muss. Je mehr alternative Fluchtwege zur Verfügung stehen, desto kleiner wird dieser Effekt, solange sich die Personen gleichmässig auf die Ausgänge verteilen.

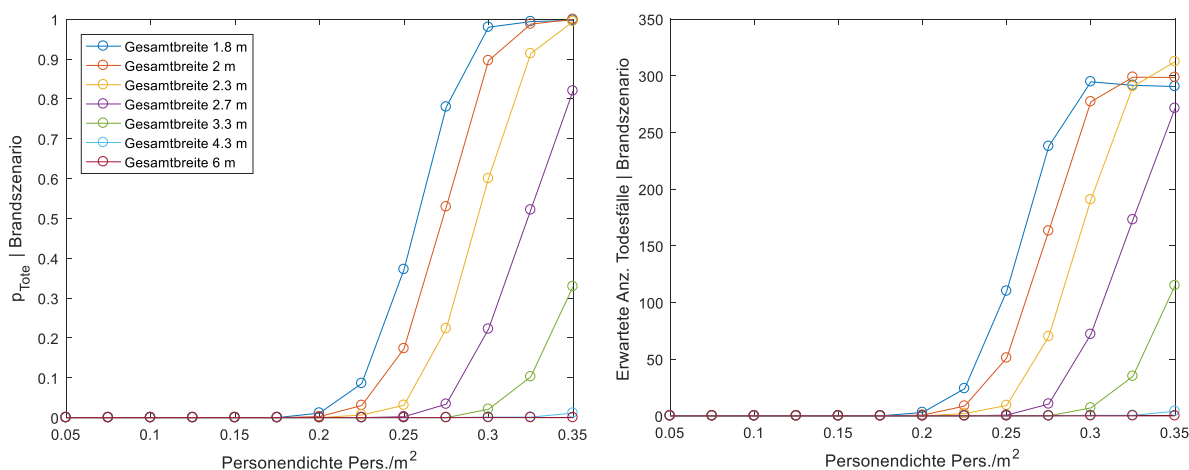


Abbildung 50: Links: Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung des maximalen Staudrucks für verschiedene Türbreiten. Rechts: Erwartete Anzahl Todesfälle (Ausmass) bei einer Überschreitung des maximalen Staudrucks für verschiedene Türbreiten. Für eine Verkaufsfläche von $2'500 \text{ m}^2$ mit 2 Ausgängen (alle Ausgänge verfügbar).

Kriterium ASET/RSET

Abbildung 51 zeigt die Verteilung der ASET und der RSET in Abhängigkeit der Brandentwicklungszeit (Zeitdauer bis zu einem Brand von 1 MW unter t_2 -Kurve). Der Überlappungsbereich der beiden Punktwolken bezeichnet diejenige Parameterkombination bei

der die RSET grösser ist als die ASET. Diese Punkte weisen ein Ausmass $a_i > 0$ auf. Der Überlappungsbereich ist vor allem bei sehr schnellen Bränden zu erwarten.

Der Überlappungsbereich ist bei diesem Beispiel für grössere Räume grösser, da die Evakuierung länger dauert (bei mehr Personen wird eine lange Pre-Evacuation-Time wahrscheinlicher). Allerdings ist die ASET auch grösser, da mehr Volumen für die Rauchausbreitung zur Verfügung steht.

Die Anzahl der Todesfälle bei einer Überschreitung des Grenzzustandes $RSET > ASET$ ist um einiges kleiner als bei einer Überschreitung des Staudruckkriteriums und liegt bei 1 bis 2 Todesfällen. Diese Todesfälle kommen oft wegen langen individuellen Pre-Evacuation-Time zustande, die nur einzelne Personen betreffen (vgl. Abbildung 49 links). Der Grossteil der Personen kann sicher flüchten, sofern das Staudruckkriterium nicht überschritten wird.

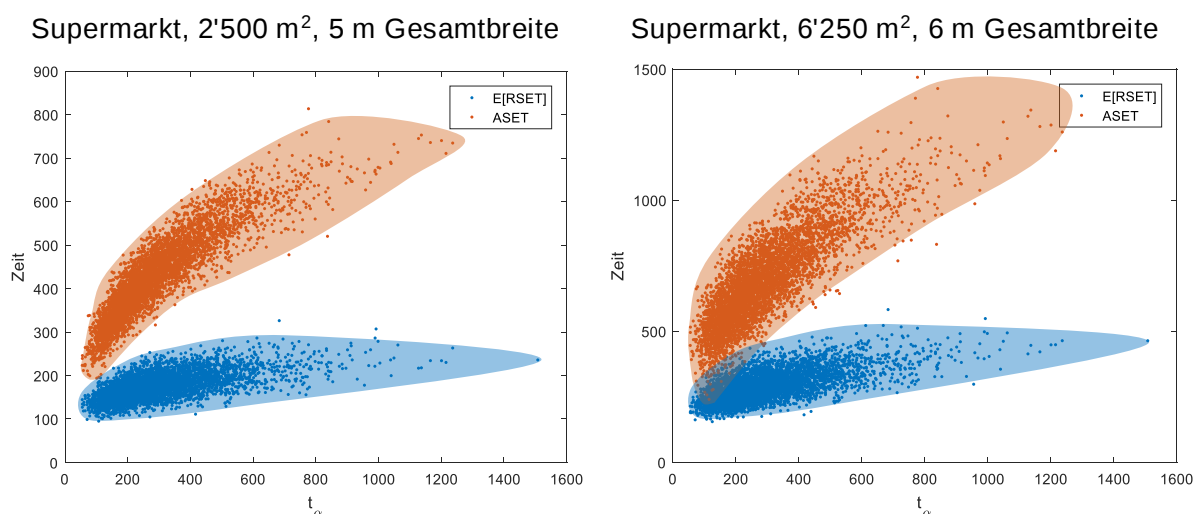


Abbildung 51: Der Erwartungswert der RSET (Mittelwert über die simulierten Entfluchtungen pro Szenario) und ASET [sec] in Abhängigkeit der Brandentwicklungszeit $t_\alpha = \sqrt{\frac{1'000kW}{\alpha}}$ für eine Supermarkt-Verkaufsfläche von 2'500 m² mit einer gewählten Gesamtflechtwegbreite von 5 m (links) und einer Verkaufsfläche von 6'250 m² mit einer gewählten Gesamtflechtwegbreite von 6 m.

8.2.3 Kollektives Risiko

Zur Ermittlung der optimalen Fluchtweganforderungen wird das kollektive Risiko in Abhängigkeit der Entscheidungsvariable dargestellt. Für die Optimierung der Fluchtwegbreiten entspricht dies der Breite des ebenerdigen Ausgangs. Die Breite bestimmt den notwendigen Personendurchfluss der Ausgänge bzw. den Mindestpersonendurchfluss von Treppen. Abbildung 52 zeigt das kollektive Risiko für die drei untersuchten Nutzungen für den Referenzfall 1 und 3 (648 m² und 2'500 m²). Der Risikobeitrag der ASET/RSET-Betrachtung und der Staudruckbetrachtung ist eingefärbt. Es ist ersichtlich, dass für grössere Verkaufsflächen (Abbildung 52, rechts) die Staudruckproblematik den grössten Teil des Risikos ausmacht. Eine Verbreiterung des Ausgangs führt dazu, dass die Risiken überproportional sinken. Ab einem gewissen Punkt (für dieses Beispiel ab 6 m Gesamtflechtwegbreite) ist die Reduktion des Risikos nur gering und es bildet sich ein Plateau aus. In diesem Bereich sind keine grösseren Staus zu erwarten und der Risikoanteil der RSET/ASET-Betrachtung nimmt zu. Bei kleineren Räumen (Abbildung 52, links) ist der Staudruckanteil kleiner am Gesamtrisiko, da sowohl das Ausmass als auch die Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung des Staudruckkriteriums kleiner ist. Entsprechend ist die statistische Unsicherheit aus der Monte-Carlo-Simulation auch grösser. Um diese statistische Unsicherheit zu verschmieren, wird eine

Risikofunktion angenähert und für die Berechnung der optimalen Fluchtweg Anforderungen verwendet.

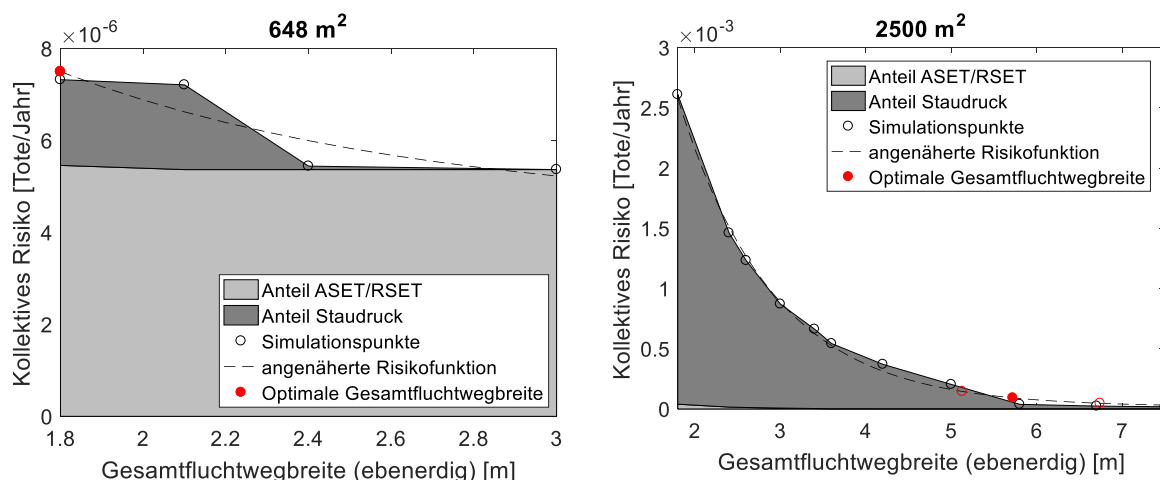


Abbildung 52: Kollektives Risiko und entsprechender ASET/RSET-Anteil und Staudruckanteil. Für Supermarkt mit Verkaufsfläche von 648 m² (links) und mit einer Verkaufsfläche von 2'500 m² (rechts).

8.3 Kostenschätzung

Um das Grenzkostenkriterium für die Optimierung der Fluchtwegbreiten anzuwenden werden die Kosten für eine Verbreiterung des Fluchtweges abgeschätzt. Dabei werden vor allem Kostenbestandteile berücksichtigt, die einen gesellschaftlichen Charakter haben, d.h. gesellschaftliche Ressourcen binden (z.B. Verbrauch von Bauland). Zudem wird angenommen, dass die Kosten für Sicherheitsmassnahmen dem Verbraucher weitergegeben werden und diese damit auch einen gesellschaftlichen Charakter haben. Allerdings wird davon ausgegangen, dass der Bauherr seine Kosten minimiert, soweit er dies beeinflussen kann.

Berücksichtigt werden nur die Kosten, die von der Breite des Fluchtweges (ebenerdig oder über Treppen) beeinflusst werden: Materialkosten, Umsatzeinbussen und das für die Verbreiterung benötigte Bauland. Andere Kostenbestandteile, wie beispielsweise Montagekosten oder Unterhaltskosten, fallen sowieso an und spielen für das Grenzkostenkriterium keine Rolle. Eine Zusammenstellung der Kosten ist im Anhang A8 zu finden.

Die Massnahmenkosten können je nach Projekt und Anspruch des Bauherrn jeweils günstiger, aber auch teurer ausfallen. Bei der Anwendung des Grenzkostenkriteriums wird grundsätzlich angenommen, dass jeweils die günstigste Massnahme umgesetzt wird. Allerdings hängt die Bandbreite auch von zahlreichen Kostenfaktoren ab, die der Bauherr nicht oder nur schlecht beeinflussen kann. Beispielsweise muss er beim Erbauen einer Fluchttüre auch andere gesetzliche Weisungen beachten (z.B. BehiG, SUVA) und auch Massnahmen umsetzen, die betrieblich Sinn machen (z.B. Einbruchschutz). Dies verteuert die Erstellungskosten und kann nur bedingt mit einer günstigsten Massnahme umgesetzt werden. Zudem ist er nur begrenzt frei in der Entscheidung welchen Standort er für die Baute wählen kann (urban, in der Agglomeration, ländlich). Um diese Aspekte zu berücksichtigen, werden die Fluchtwegbreiten mit der ganzen Kostenbandbreite optimiert, so dass der Handlungsraum für die Festlegung der Fluchtweg Anforderungen ersichtlich wird.

Kosten von Brandschutzmassnahmen treten häufig zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf. Generell kann man zwischen einmaligen Investitionskosten und laufende Investitionskosten

unterscheiden. Um beide Kostenbestandteile zu berücksichtigen, kann die Barwertmethode angewandt werden. Bei dieser Methode werden die Kostenbestandteile auf die Lebensdauer gleichmässig annualisiert und summiert. Die annualisierten Kosten c_t lassen sich wie folgt berechnen:

$$c_t = c_0 \frac{(1+r)^T r}{(1+r)^T - 1}$$

c_0 : Investitionskosten zum Zeitpunkt 0

i : Diskontierungszinssatz. Für die Studie wird ein Zinssatz von 3% angesetzt.

T : Lebensdauer.

Investitionskosten Fluchttüre

Die Investitionskosten einer Fluchttüre hängen stark von der Materialisierung (Aluminium, Stahl oder Holz) und von der Oberflächenbehandlung (Anodisation, Einbrennlackierung, etc.) und insbesondere vom Beschlagseinbau (z.B. anstelle eines normalen Schlosses kann ein Motorenschloss eingebaut werden, Türschliesser können aufgesetzt oder im Rahmen integriert sein, Türgriffe können als Standardprodukt oder in edlem Edelstahl ausgeführt werden) ab. Die Ausstattung der Türe generiert den Preis, die Produktionskosten sind dabei eher untergeordnet, da die Arbeitsschritte meist immer die gleichen sind. Die Anzahl Türflügel hat ebenfalls Einfluss auf die Kosten. Einflügelige Türen können bis maximal 1.8 m Breite erstellt werden. Breitere Türen werden zweiflügelig ausgebildet.

Innentüren weisen häufig noch einen Feuerwiderstand auf, da sie brandabschnittsbildende Elemente bilden. Jedoch sind diese oft günstiger als Aussentüren, da sie eine weniger repräsentative Eigenschaft haben und auch weniger Anforderungen an den Beschlagseinbau (z.B. Alarmsicherung, Motorenschloss, etc.) aufweisen.

Die Kosten pro Meter Türbreite werden aus Kostenkennwerten aus dem Elementarten-Katalog geschätzt [50]. Die Kosten betragen rund 5'600 CHF pro Meter Türbreite. Ein Vergleich mit effektiven Kosten aus Bauprojekten von EBP zeigen, dass dieser Wert einem Mittelwert entspricht. Die Effektiven Kosten können aber zwischen 2'000 CHF/m bis 10'000 CHF/m variieren.

Umsatzeinbussen

Je grösser der Ausgang ist, desto mehr Platz muss im Verkaufsgeschäft zur Verfügung gestellt werden, der nicht zum Verkauf der Produkte genutzt werden kann. In Supermärkten kann man von einer durchschnittlich Flächenproduktivität (Umsatz) zwischen 10'000 und 15'000 CHF / m² pro Jahr ausgehen. Die Flächenproduktivität beinhaltet auch beispielsweise eine Gewinnmarge. Diese hat keinen unmittelbaren gesellschaftlichen Charakter. Es ist daher fragwürdig, ob die Flächenproduktivität als Kostenbestandteil für die Evaluation der Personensicherheit mittels Grenzkostenprinzip vollumfänglich berücksichtigt werden darf. Denn eine vollumfängliche Berücksichtigung der Flächenproduktivität (jährliche Umsatz inkl. Gewinnmarge) würde die Anforderungen an die Fluchtwege vermindern. Dadurch würde die Flächenproduktivität aber auf Kosten der Personensicherheit gehen und bei einem öffentlich zugänglichen Gebäude würde dies direkt gesellschaftliche Konsequenzen haben.

Da kaum jemand jährliche Umsatz- und Gewinneinbussen wegen einer Fluchttüre in Kauf nimmt, wird – wenn möglich – vor allem zusätzliches Bauland gekauft, um möglichst das gesamte Sortiment den Kunden anbieten zu können. Der Verbrauch von zusätzlichem Bauland kommt einem Verbrauch an gesellschaftlichen Ressourcen gleich. Deshalb wird fiktiv angenommen, dass Umsatzeinbussen durch die Breite des Fluchtweges mit entsprechendem

Zukauf von Bauland abgedeckt werden. Es ist aber unklar wie gross diese Fläche ist. Einerseits kann eine Tiefenwirkung geltend gemacht werden (Verkehrswege müssen die gleiche Breite haben wie der Ausgang), andererseits muss diese Fläche ohnehin bereitgestellt werden. Deswegen wird eine reduzierte Tiefenwirkung veranschlagt. Die dafür notwendige Fläche ist in Abbildung 53 (links) dargestellt. Eine Sensitivitätsanalyse mit dieser Fläche zeigte, dass die Flächengrösse praktisch keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Da für die Risikobeurteilung vor allem die Kostendifferenz für eine Verbreiterung bzw. Verminderung von Fluchttüren interessiert, wird nur die zusätzlich nicht nutzbare Fläche für die Beurteilung ausschlaggebend sein, da die Fluchttüren ohnehin erstellt werden muss. Die Umsatzeinbussen für Fluchttüren machen zwischen 23% und 36% der Gesamtkosten (vgl. Anhang A8) aus.

Umsatzeinbussen fallen auch für innenliegende Treppenhäuser an. Vor allem im Bestandsbau kann eine Vergrösserung des Treppenhauses nur erreicht werden, wenn Verkaufsfläche dafür zur Verfügung gestellt wird. Daher wird ein analoger Ansatz wie bei der nicht nutzbaren Fläche für Fluchtwegtüren angewandt. Es wird fiktiv angenommen, dass die Umsatzeinbussen mit entsprechendem Zukauf von Bauland abgedeckt werden. Hier liegt der Anteil der Umsatzeinbussen an den Gesamtkosten (vgl. Anhang A8) zwischen 14% und 20%. Der Grund für die tieferen Werten als bei der Fluchttüre, sind die höheren Kosten bei der Erstellung des Treppenhauses.

Bei Aussentreppen fallen nur die Umsatzeinbussen für die Fluchttüren an. Bei Aussentreppen liegt der Anteil der Umsatzeinbussen an den Gesamtkosten (vgl. Anhang A8) zwischen 6% und 8%.

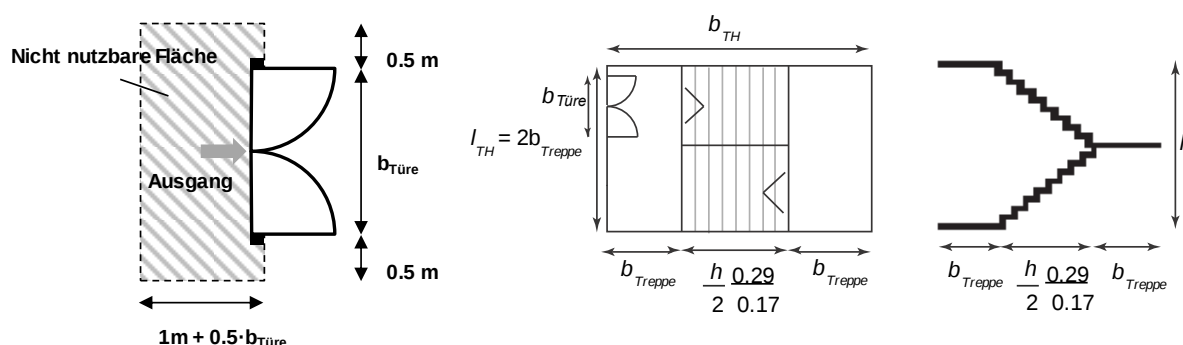


Abbildung 53: Links: Fluchttürbreite und nicht nutzbare Fläche; Mitte: Geometrie eines Treppenhauses; Rechts: Schnitt eines Treppenhauses für ein Geschoss.

Aussentreppen und Treppenhäuser

Führt der Fluchtweg über Treppen, so muss mindestens die gleiche Kapazität erreicht werden wie bei einer ebenerdigen Entfluchtung. Da der Durchfluss auf Treppen niedriger ist als derjenige auf ebenerdigen Flächen, muss diese breiter erstellt werden. Für diese Studie wird angenommen, dass der maximale spezifische Fluss 25% tiefer liegt als derjenige für ebenerdige Ausgänge (vgl. Kapitel 6.2.6). Deshalb muss die Treppenbreite mindestens 25% breiter sein im Vergleich zum ebenerdigen Fall.

Offene Aussentreppen stellen die günstigste Variante dar, um die Flucht über mehrere Stockwerke zu ermöglichen. Die Materialkosten für eine Aussentreppe aus Stahl mit 1.2 m Treppenbreite liegen zwischen 12'000 und 18'000 CHF pro Geschoss²⁴ je nach Ausstattung. Da für das Grenzkostenkriterium vor allem die marginale Kostendifferenz für eine Verbreiterung bzw. Verschmälerung der Treppe interessiert, wird angenommen, dass – bezogen auf die

24 U.a. basierend auf einer Kostenrechner <https://www.iosefsteiner.at/stratos> (nur Materialkosten) und Internetrecherche.

Kosten der 1.2 breiten Treppe – die Kostenzu- bzw. -abnahme zwischen 10% bis 20% pro 20 cm zusätzliche oder verminderte Breite pro Etage²⁴ beträgt. Da für die Risikobeurteilung vor allem die Kostendifferenz für eine Verbreiterung der Treppe interessiert, wird eine etwaige Feuerwiderstandsanforderung an die Fassade nicht berücksichtigt, da diese unabhängig von der Breite der Treppe sowieso erstellt werden muss. Die Materialkosten für die Erstellung einer Aussentreppe bewegen sich zwischen 36% und 56% der Gesamtkosten.

Die Kosten für die Erstellung von Treppenhäusern sind höher als für Aussentreppen aus Stahl, da sie oft Betonierarbeiten umfassen. Die Abschätzung der Kosten basieren auf Volumenkosten [14] und aus Erfahrungswerten. Das Layout, das für die Kostenschätzung verwendet wurde, ist in Abbildung 53 (Mitte und rechts) ersichtlich. Die Kosten liegen zwischen 2'000 und 8'000 CHF pro CHF/m² und Geschoss. Der Mittelwert basiert auf dem Wert für Volumenkosten²⁵ [14] und liegt für das Layout bei rund 3'200 CHF/m². Die Erstellungskosten eines Treppenhauses bewegen sich zwischen 62% und 73% der Gesamtkosten.

Bauland

Sowohl für Aussentreppen als auch für Treppen muss Grundstückfläche zur Verfügung gestellt werden, um die Installation zu ermöglichen. In der Studie werden diese Kosten mit Grundstückspreisen zwischen 500 und 1'500 CHF/m² berücksichtigt (Richtwerte für ländliche und urbane Gebiete). Im Mittel wird mit einem Preis von 1'000 CHF/m² gerechnet (Richtwert für Agglomeration). Diese Kosten sind als Einmalinvestition zu betrachten mit einer relativen langen Nutzungsdauer (ca. 50 Jahre).

Bei Aussentreppen liegt der Anteil der Kosten für das Bauland an den Gesamtkosten zwischen 37% und 58%. Bei den Treppenhäusern liegt der Anteil zwischen 12% und 18%. Bei der ebenerdigen Flucht über eine Fluchttüre werden die Kosten für das Bauland vernachlässigt.

8.4 Optimierung der Fluchtwegbreiten

Zur Ermittlung der optimalen Fluchtwegbreite wird mittels Grenzkostenprinzips die kostenwirksamste Breite ermittelt. Dann wird mit der Obergrenze für das Nutzerrisiko überprüft, ob diese Breite dem Kriterium genügt. Im Kapitel 8.4.2 wird ein Bemessungskonzept vorgeschlagen, um die optimalen Fluchtwegbreiten mit einer Bemessung möglichst gut zu erreichen.

8.4.1 Optimierung

Anwendung des Grenzkostenprinzips

Um die kostenwirksamste Breite zu ermitteln wird zuerst das kollektive Risiko für verschiedene Breiten berechnet (vgl. Abbildung 52). Da die Risikoberechnung rechenaufwendig ist, wird eine Auswahl an Gesamtfluchtwegbreiten simuliert und dazwischen interpoliert. Als Interpolationsfunktion wird eine Exponentialfunktion verwendet (vgl. angenäherte Risikofunktion in Abbildung 54).

In Abbildung 54 (rechts) ist das monetarisierte kollektive Risiko²⁶ in Abhängigkeit der Gesamtfluchtwegbreite ersichtlich. Die Risikokurven für alle Nutzungen und Referenzfälle in Abhängigkeit der Gesamtfluchtwegbreite sind im Anhang A9 zu finden. Das kollektive Risiko setzt sich aus einem Anteil aus der ASET/RSET-Betrachtung und einem Anteil aus der

25 Die Angaben beziehen sich auf die Versicherungssumme pro Kubikmeter für das Gebäude. Im Jahr 1995 lag dieser für Verkaufsgeschäfte bei 700 CHF / m³. Teuerungsbereinigt liegen der Wert bei 809 CHF. Mit einer Geschosshöhe von 4 m betragen die Kosten pro Quadratmeter 3'234 CHF.

26 Monetarisiertes kollektive Risiko [CHF / Jahr] = kollektives Risiko [Tote / Jahr] * Grenzkosten [CHF / vermeidbarer Todesfall]

Staudruck-Betrachtung zusammen. Es ist ersichtlich, dass das Staudruckkriterium für dieses Beispiel das kollektive Risiko dominiert. Dies ist für praktisch alle untersuchten Nutzungen und Referenzfälle der Fall. Ausser wenn die Flächen klein sind und bei Non-Food-Verkaufsgeschäften, bei denen die Personenzahl gering ist, wird der ASET/RSET-Risikoanteil etwas grösser.

Abbildung 54 (rechts) zeigt das kollektive Risiko in Abhängigkeit der Kosten. Das Grenzkostenkriterium entspricht der Tangentensteigung der Risikofunktion bei der optimalen Gesamtfluchtwegbreite. Da mit einer Kostenspanne gerechnet wird, gibt es drei Risiko-Kosten-Funktionen mit drei optimalen Gesamtfluchtwegbreiten. Diese Breiten sind in Abbildung 54 (rechts) als Punkte ersichtlich. Wenn nichts anders vermerkt wird, beziehen sich die Auswertungen in der Studie jeweils auf die mittleren Kosten.

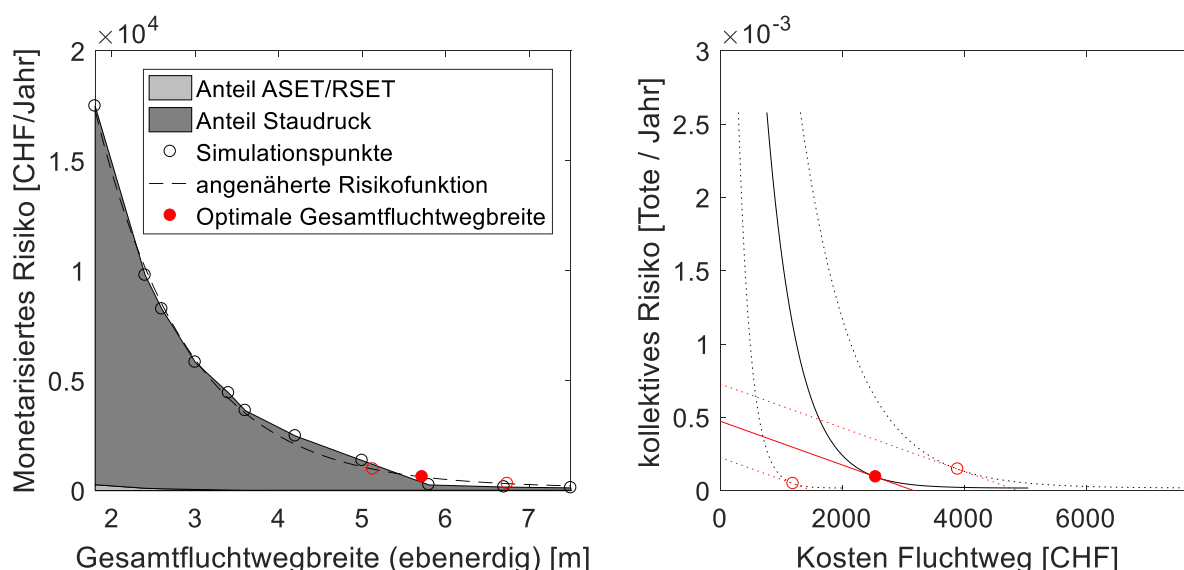


Abbildung 54: Beispiel für die Ermittlung der optimalen Fluchtwegbreiten für einen Supermarkt mit einer Verkaufsfläche von 2'500 m² (Referenzfall 3) und ebenerdiger Flucht. Links: Monetarisiertes kollektives Risiko in Abhängigkeit der Fluchtwegbreite und Interpolationsfunktion. Rechts: Kollektives Risiko in Funktion der Kosten für den Fluchtweg und Grenzkostentangente (rot).

Die Optimierung wird für die drei verschiedenen Nutzungskategorien durchgeführt:

- Non-Food-Verkaufsgeschäfte,
- Supermärkte und
- Hochfrequente Supermärkte

und jeweils für drei verschiedene Fluchtsituationen:

- Ebenerdige Flucht
- Flucht über eine Aussentreppe
- Flucht über ein Treppenhaus.

Die optimierten Gesamtfluchtwegbreiten sind in Tabelle 27 ersichtlich und beziehen sich auf die ebenerdige Flucht. Verläuft die Flucht über Treppen, so ist die Fluchtwegbreite zu vergrössern²⁷, um den gleichen Durchfluss zu gewährleisten (vgl. Kapitel 6.2.6). Die Werte

²⁷ Es gilt $w_{Treppe} = \frac{1}{0.75} w_{ebenerdig} = 1.33 * w_{ebenerdig}$ und entspricht einem 25% reduzierten Durchfluss auf Treppen. In der VKF wird dies berücksichtigt, indem die Fluchtwegbreite ebenerdig mit 0.6 m /100 Personen resp. über Treppen mit 0.6 m / 60 Personen berücksichtigt wird.

berücksichtigen weder die Minimalanforderungen an die Türbreiten (BSR 16-15) noch anderen Gesetzgebungen. In der Erstellung des Bemessungskonzept (Kapitel 8.4.2) werden diese gesetzlichen Rahmenbedingungen jedoch berücksichtigt.

Die Gesamtflechtwegbreite für **Non-Food-Verkaufsgeschäfte** kann über alle Fluchtsituationen auf die minimale Breite von 0.9 m pro ebenerdigen Ausgang ausgelegt werden. Die Berechnung ist robust bezüglich der Kostenbandbreite: auch die günstigsten Varianten rechtfertigen keine Verbreiterung der Fluchtwege über die minimalen Anforderungen. Der Grund ist das geringe kollektive monetarisierte Risiko, das maximal bei 200 CHF / Jahr liegt (vgl. Anhang A9). Der Grund sind die Vergleichsweise kleinen Personendichten (99% unterhalb von 0.1 Pers./m²), für die bereits mit geringen Breiten ein hohes Mass an Sicherheit gewährleistet werden kann (vgl. auch Kapitel 6.2.7). Eine Verbreiterung der Türe muss also sehr günstig ausfallen, um wirtschaftlich zu sein. Zudem fällt die Risikokurve bei zunehmender Breite teilweise nur flach ab, da die Staudrucksituation wegen der geringen Personendichten in Non-Food-Verkaufsgeschäften keine grossen kollektiven Risiken bergen.

Bei den Gesamtflechtwegbreiten von **Supermärkten** gibt es einen Einfluss der Fluchtsituation, d.h. ebenerdige Flucht oder Flucht über Treppen. Bei der ebenerdigen Flucht sind die Fluchtwegbreiten am grössten, da es im Vergleich zu den anderen Fluchtsituationen relativ günstig ist, den Fluchtweg zu verbreitern. Sobald es aber Treppen erfordert, reduziert sich die Gesamtflechtwegbreite im Vergleich zur ebenerdigen Flucht, da die Risikoreduktion mit mehr Investitionskosten verbunden ist.

Das Gleiche trifft bei den **hochfrequenten Supermärkten** zu. Nur ist dort die Risikoreduktion durch eine Verbreiterung der Ausgänge wegen der höheren Personenbelegung viel grösser. Darum sind breitere Fluchtwege im Vergleich zu Supermärkten gerechtfertigt. Bei den hochfrequenten Supermärkten ist aber zu beachten, dass diese oft im Bestand erstellt werden. Dies ist oft mit höheren Kosten verbunden. Auch der Standort dieser Geschäfte ist oft mitten im urbanen Gebiet. Daher entspricht die mittlere Breite eher einer oberen Schätzung der Gesamtflechtwegbreite. Für Neubauten kann aber auch mit mittleren Kosten gerechnet werden.

	Non-Food			Supermärkte			Hochfrequente Supermärkte		
	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max
Ebenerdige Flucht									
648 qm	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
1250 qm	1.8	1.8	1.8	2.1	2.5	3.0	3.1	3.4	4.1
2500 qm	1.8	1.8	1.8	5.1	5.7	6.7	6.1	6.5	7.2
3750 qm	2.7	2.7	2.7	7.5	8.3	9.8	8.3	8.9	9.8
5000 qm	3.6	3.6	3.6	9.3	10.3	11.9	10.4	11.0	12.1
6250 qm	4.5	4.5	4.5	11.6	12.8	14.9	12.8	13.6	14.9
Flucht über Aussenstreppe									
648 qm	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
1250 qm	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	2.1	2.1	2.5	2.9
2500 qm	1.8	1.8	1.8	3.4	3.9	4.6	4.8	5.1	5.6
3750 qm	2.7	2.7	2.7	5.0	5.7	6.8	6.7	7.1	7.8
5000 qm	3.6	3.6	3.6	6.5	7.3	8.6	8.4	8.9	9.8
6250 qm	4.5	4.5	4.5	8.2	9.2	10.7	10.4	11.0	12.1
Flucht über Treppenhaus									
648 qm	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
1250 qm	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	2.1	2.1	2.1
2500 qm	1.8	1.8	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8	4.3	4.6
3750 qm	2.7	2.7	2.7	3.4	4.2	4.9	5.4	6.0	6.5
5000 qm	3.6	3.6	3.6	4.4	5.5	6.4	6.8	7.6	8.2
6250 qm	4.5	4.5	4.5	5.5	6.9	8.0	8.4	9.4	10.1

Tabelle 27: Optimale Gesamtflechtwegbreiten für eine sichere Entfluchtung aus dem Raum der Brandentstehung (ohne Berücksichtigung der Minimalanforderungen gemäss BSR 16-15 und andere Gesetzgebungen).

In Abbildung 55 und Abbildung 56 sind die kollektiven Risiken für die optimierten Fluchtwegbreiten (für mittlere Kosten) ersichtlich für den Fall, dass die Flucht ebenerdig erfolgt und für den Fall, dass die Flucht über das Treppenhaus erfolgt. Die ebenerdige Flucht weist kleinere Risiken auf im Vergleich zur Flucht über das Treppenhaus. Dies hängt mit den kleineren Fluchtwegbreiten zusammen. Gemäss dem Grenzkostenprinzip werden für Mehrgeschossige Verkaufsgeschäfte (Flucht über das Treppenhaus) höhere Risiken akzeptiert, weil die Risikoreduktion teurer ist als bei der Flucht im Erdgeschoss (ebenerdigen Flucht).

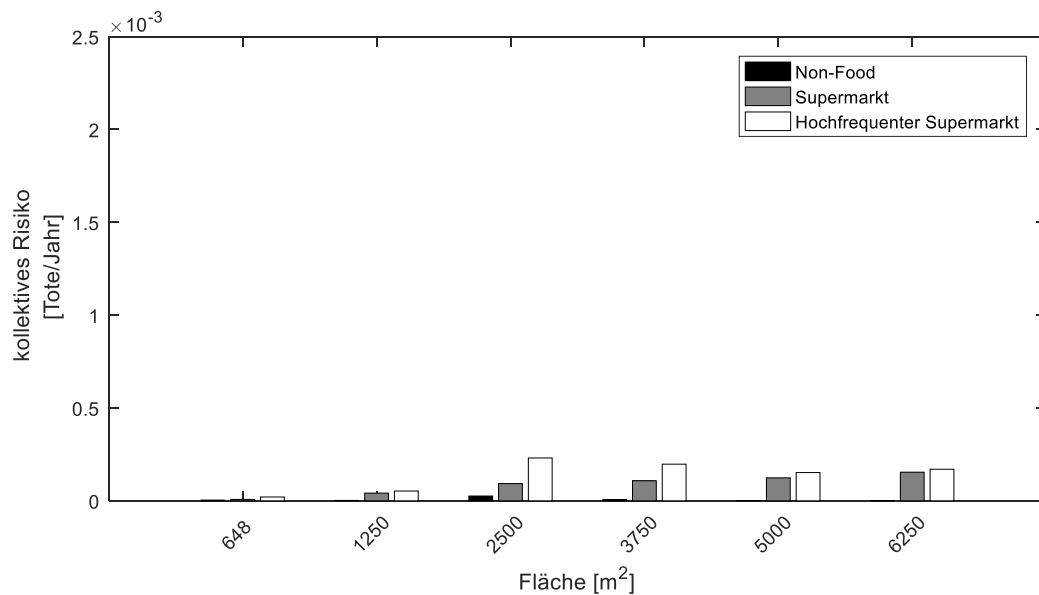


Abbildung 55: Kollektives Risiko für die optimalen Gesamtfluchtwegbreiten für die **ebenerdige Flucht** über eine Fluchttüre.

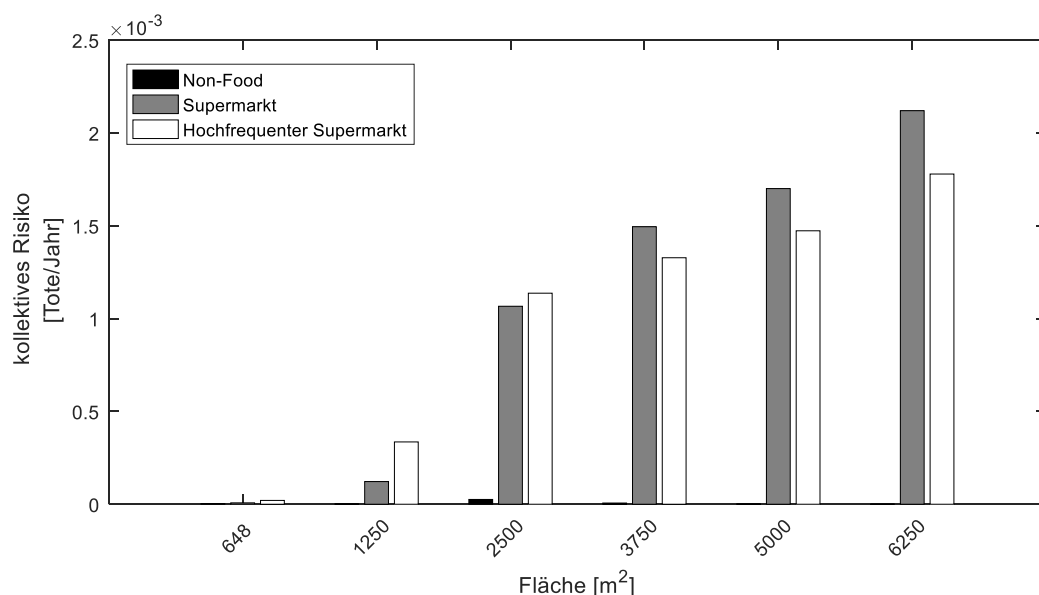


Abbildung 56: Kollektives Risiko für die optimalen Gesamtfluchtwegbreiten für die **Flucht über das Treppenhaus**.

Nutzerrisiko

Zu prüfen ist, ob diese optimalen Gesamtfluchtweganforderungen die obere Grenze des Nutzerrisikos einhalten. Zur Vereinfachung werden jeweils die Gesamtfluchtwegbreiten

bezüglich der Flucht über das Treppenhaus verwendet. Da diese Breiten die schmälestn aller Fluchtsituationen darstellen, entspricht dies einer oberen Abschätzung des Nutzerrisikos für die anderen Fluchtsituationen. In Abbildung 57 ist das Nutzerrisiko für alle Nutzungen abgebildet. Die Non-Food-Verkaufsgeschäfte weisen mit Abstand das kleinste Nutzerrisiko auf. Supermärkte weisen deutlich höhere Nutzerrisiken auf als hochfrequente Supermärkte. Dies überrascht etwas, da das kollektive Risiko von Supermärkten etwa gleich hoch ist, wie dasjenige der hochfrequentierten Supermärkte. Dies ist mit der höheren durchschnittlichen Personenbelegung zu erklären, die beim Normierungsfaktor zur Berechnung des Nutzerrisikos berücksichtigt wird (vgl. Tabelle 23).

Die Nutzerrisiken aller Nutzungstypen und über alle Referenzfälle liegen unterhalb der Obergrenze für das Nutzerrisiko. Entsprechend können die mit dem Grenzkostenkriterium optimierten Gesamtfluchtwegbreiten akzeptiert werden.

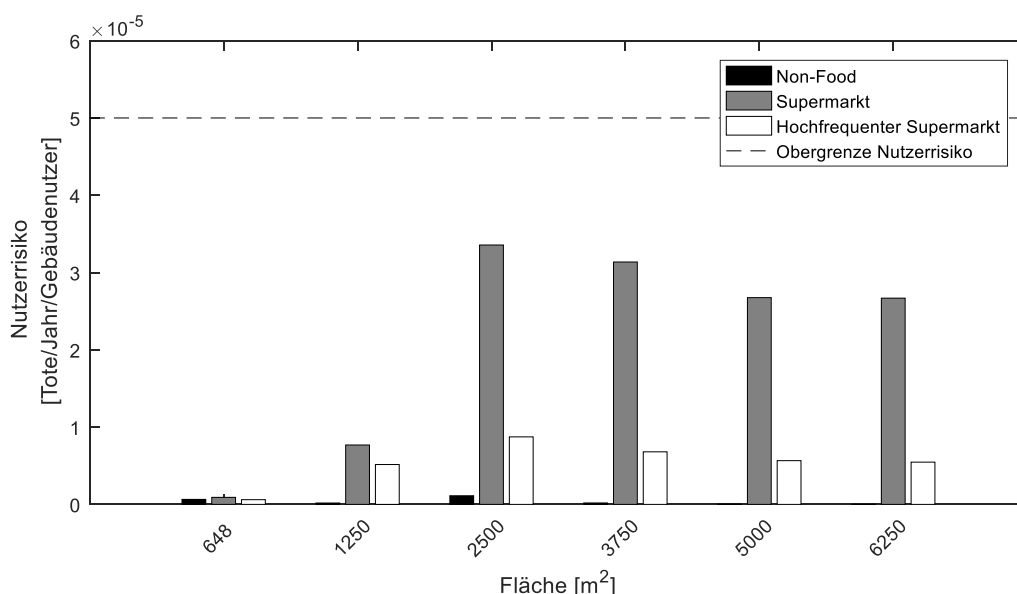


Abbildung 57: Nutzerrisiko der verschiedenen Nutzungstypen für die optimalen Gesamtfluchtwegbreiten bei einer Flucht über das Treppenhaus.

Analyse und Diskussion der Ergebnisse

In Abbildung 58 bis Abbildung 60 ist jeweils links das kollektive Risiko und rechts jeweils die Todesfallwahrscheinlichkeit abgebildet. Die Todesfallwahrscheinlichkeit repräsentiert die Häufigkeit der Fälle, in denen mindestens ein Todesfall vorgekommen ist. Abgesehen von den Non-Food-Verkaufsgeschäften nimmt das kollektive Risiko mit steigender Verkaufsfläche zu. Bei Non-Food-Verkaufsgeschäften hängt dies mit der relativen kleinen Ausprägung des Risikoanteils bezüglich des Staudruckkriteriums zusammen. Bei den anderen Nutzungen wird das kollektive Risiko vor allem durch das Staudruck-Kriterium dominiert. Das ASET/RSET-Kriterium trägt nur einen geringen Teil zum kollektiven Risiko bei. Anders sieht es bei der Todesfallwahrscheinlichkeit aus. Dort hat das ASET/RSET-Kriterium ein grösseres Gewicht. Zusammenfassend bedeutet dies, dass mit einer Überschreitung der Staudrücke seltener zu rechnen ist als mit einer Überschreitung des ASET/RSET-Kriteriums. Aber wenn es passiert, dann ist mit einem grossen Ausmass zu rechnen (mehr als 10 Tote). Häufiger ist mit einer Überschreitung des ASET/RSET-Kriteriums zu rechnen. Allerdings ist das Ausmass in diesen Fällen kleiner (1 bis 2 Tote). Darum trägt das ASET/RSET-Problematik weniger zum kollektiven Risiko bei als die Staudruckthematik.

Bei Non-Food-Verkaufsgeschäften ist das Staudruck-Kriterium wegen der geringen Personenbelegung grösstenteils nicht dominant. Diese Ergebnisse widerspiegeln auch die Erkenntnisse aus Kapitel 8.2.2.

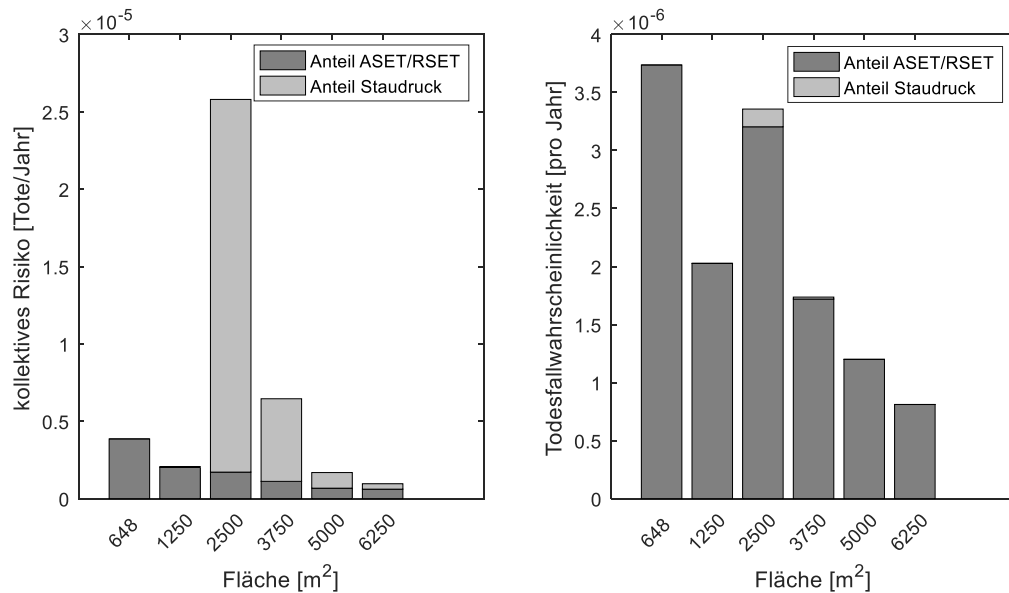


Abbildung 58: Links: kollektives Risiko und rechts: Todesfallwahrscheinlichkeit für **Non-Food-Verkaufsgeschäfte** für die Flucht über das Treppenhaus inkl. Anteil Staudruck- bzw. ASET/RSET-Problematik.

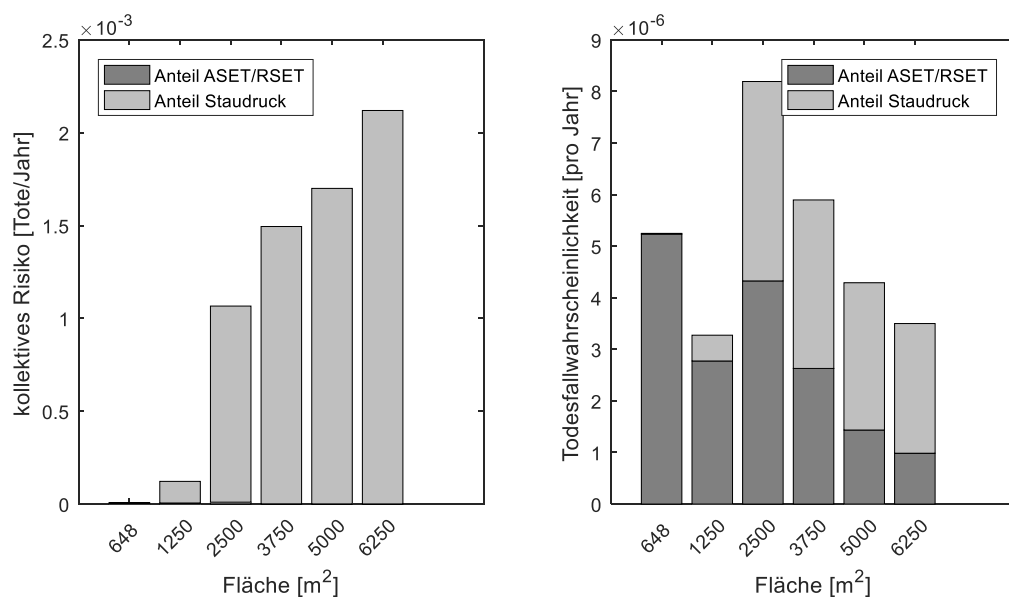


Abbildung 59: Links: kollektives Risiko und rechts: Todesfallwahrscheinlichkeit für **Supermärkte** für die Flucht über das Treppenhaus inkl. Anteil Staudruck- bzw. ASET/RSET-Problematik.

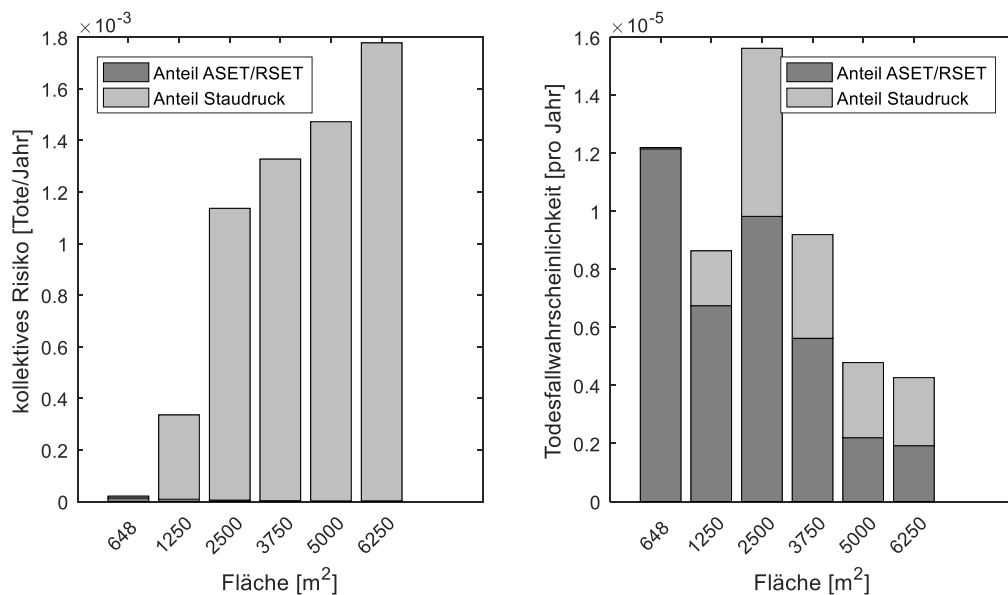


Abbildung 60: Links: kollektives Risiko und rechts: Todesfallwahrscheinlichkeit für **hochfrequente Supermärkte** für die Flucht über das Treppenhaus inkl. Anteil Staudruck- bzw. ASET/RSET-Problematik.

Da das kollektive Risiko hauptsächlich vom Staudruck-Kriterium dominiert wird, hat das Szenario mit einem verhinderten Ausgang eine gewisse Relevanz. Für Supermärkte ist der Anteil dieses Szenarios am kollektiven Risiko in Abbildung 61 ersichtlich. Für hochfrequente Supermärkte in Abbildung 62. Die Relevanz nimmt mit steigender Verkaufsfläche ab, da für grössere Verkaufsflächen mehr Ausgänge zur Verfügung stehen. Bei einem verhinderten Ausgang verteilen sich die Personen also besser auf die verfügbaren Ausgänge. Natürlich haben die Referenzfälle bis 2'500 m² den grössten Anteil, da nur zwei Ausgänge zur Verfügung stehen.

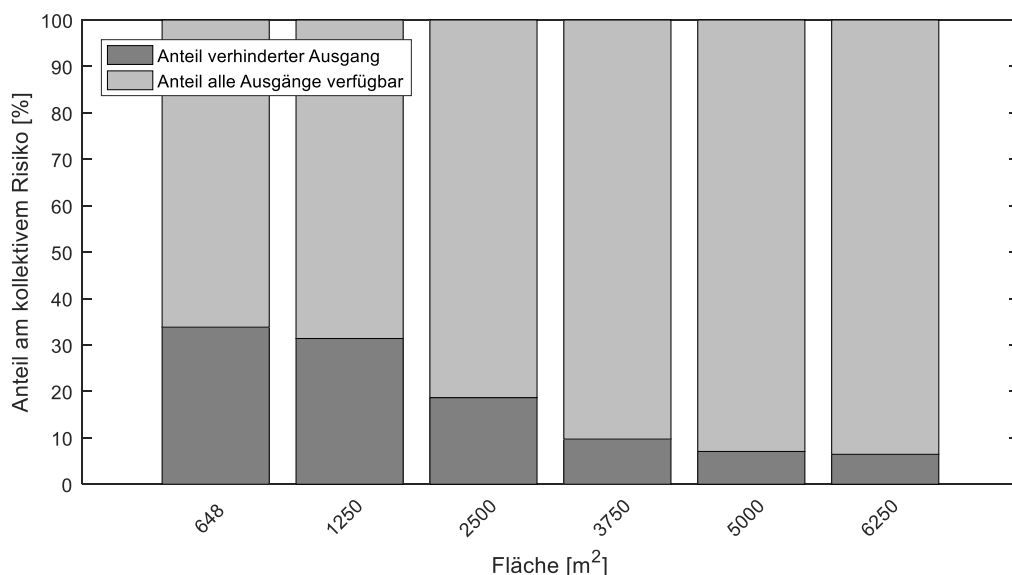


Abbildung 61: Anteil des Szenarios «verhinderter Ausgang» am kollektiven Risiko für **Supermärkte** für die Flucht über das Treppenhaus.

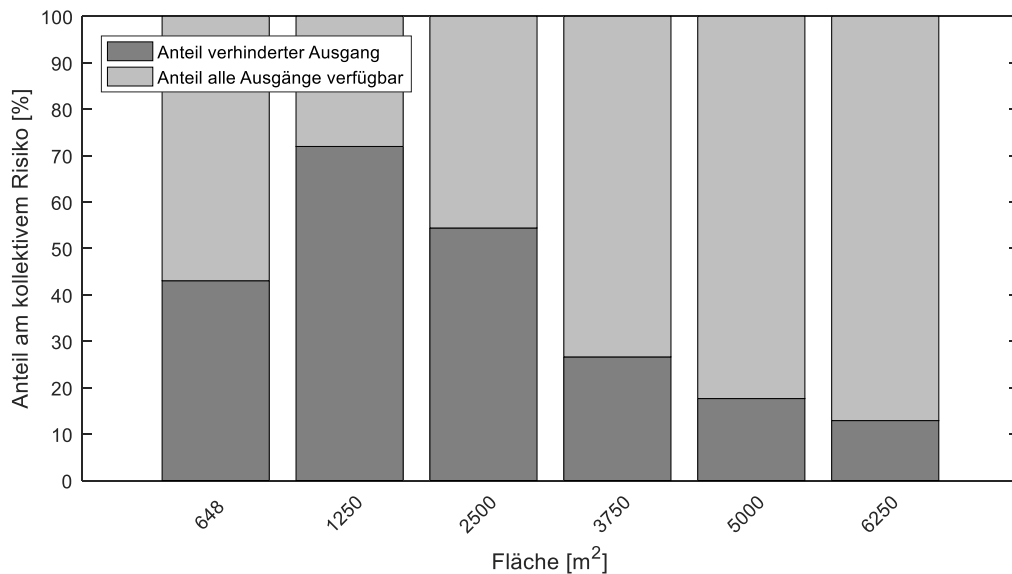


Abbildung 62: Anteil des Szenarios «verhinderter Ausgang» am kollektiven Risiko für **hochfrequente Supermärkte** für die Flucht über das Treppenhaus.

Die Optimierung der Fluchtwegbreiten erfolgte unter einer weitgehend konservativen Abschätzung des Risikos. D.h. die Wirksamkeit einer Verbreiterung des Ausgangs wurde überschätzt, so dass die Kosteneffizienz eines breiteren Ausgangs eher gegeben ist. Für die konservative Abschätzung des Risikos werden die relevantesten Gründe aufgeführt:

- Das Modell zur Berücksichtigung der Todesfälle infolge einer Überschreitung des Staudruckkriteriums ist stark vereinfacht und führt zu zahlreichen Todesfällen. In Wirklichkeit gibt es selbstorganisatorische Effekte bezüglich der Wahl des Ausgangs, die nicht berücksichtigt werden und das Risiko reduzieren würden. Das heisst, dass Personen, die zu einem Stau kommen nicht zusätzlich drücken, sondern versuchen einen alternativen Ausgang zu nehmen. Dies ist nur insofern der Fall, wenn die dafür benötigte Zeit vorhanden ist (ASET), was bei grösseren Räumen eher der Fall ist.
- Der Grenzwert für die Erreichung kritischer Staudrücke wurde zwischen 4 Pers/m² und 6 Pers/m² gesetzt. Der untere Wert stammt aus der RiMEA [34] und ist sehr konservativ ausgelegt, da bei dieser Dichte kaum eine Berührung zwischen den Personen stattfindet.
- Zur Vereinfachung wurde die Nutzungskategorie Non-Food-Verkaufsgeschäfte und für Supermärkte für die Personendichte mit der Wahrscheinlichkeitsverteilung für Einkaufszentren resp. für Supermärkte mit einer Fläche von 2'400 m² gerechnet. Beide entsprechen einer oberen Abschätzung der Personendichte für die jeweilige Nutzungskategorie. Entsprechend fällt die Risikoabschätzung für die anderen Nutzungen in dieser Nutzungskategorie (Sportgeschäfte, Bekleidung, etc. sowie Verkaufsgeschäfte mit einer kleineren oder grösseren Verkaufsfläche) höher aus.
- Die Berechnung der ASET erfolgte unter mehreren konservativen Vereinfachungen (Rauchfreie Höhe von 2 m, Brandort in demjenigen Kompartiment, das als erstes die ASET erreicht, ist massgebend). Allerdings macht der ASET/RSET-Anteil des Risikos nur ein kleiner Teil des kollektiven Risikos aus.

Vor allem die konservative Auslegung des Staudruckkriteriums führt dazu, dass im Vergleich zum ASET/RSET-Kriterium, das konservativ, aber doch realitätsnaher modelliert wurde, das

Risiko vor allem vom Staudruck dominiert wird. Eine realistischere Modellierung des Staudruckkriteriums würde den Einfluss dieses Kriteriums verkleinern.

Neben diesen konservativen Abschätzungen gibt es wegen der vereinfachten Modellierung des Risikos Annahmen in den Ingenieurmodellen, die eher realistisch bzw. sogar optimistisch ausgelegt sind. Zu letzteren gehört vor allem die unbeeinflusste Modellierung der Gehgeschwindigkeit von der lokalen Personendichte. Wie bereits im Kapitel 6.2.6 erläutert, führt diese Annahme zu einer Verzögerung der Staubildung. Wenn die Staubildung früher einsetzen würde, so könnte das Staudruckkriterium schneller erreicht werden. Eine Berücksichtigung dieses Effekts würde die Rolle des Staudruckkriteriums – das ohnehin bereits sehr konservativ modelliert wurde – noch verschärfen.

8.4.2 Bemessungskonzept für präskriptive Fluchtweganforderungen

Das Bemessungskonzept für die Fluchtwegbreiten der VKF BSV hat grundsätzlich drei Komponenten:

- eine nutzungsspezifische Bemessungspersonendichte,
- Minimalanforderungen an die Breite der Ausgänge pro Ausgang und
- eine spezifische Fluchtwegbreite pro Belegung differenziert zwischen ebenerdiger Flucht und Flucht über Treppen.

Grundsätzlich liesse sich durch eine Anpassung dieser drei Komponenten die optimalen Fluchtwegbreiten erreichen. Allerdings sind die letzteren beiden Komponenten nicht nutzungsspezifisch festgelegt, sondern über alle Nutzung gleich (nicht nur Verkaufsgeschäfte, sondern auch andere Nutzungen wie Büro, Beherbergungsbetriebe, Veranstaltungen, etc.). Da die Studie auf Verkaufsgeschäfte fokussiert ist, wird nur die nutzungsspezifische Bemessungspersonendichte angepasst. Eine Anpassung der letzteren beiden Komponenten, würde eine umfassende Studie über alle Nutzungen erfordern. Dies trifft im Übrigen auch auf die Fluchtweglänge im Raum zu, die für diese Studie als gegeben betrachtet wurde. Für die Revision der BSV 2026 könnte eine umfassende Überarbeitung notwendig werden, da die Gesamtheit aller Vorgaben zur Diskussion steht.

Würde die Bemessungspersonendichte auf das 99%-Quantil ausgelegt werden, so würden die optimalen Fluchtwegbreiten nur teilweise erreicht werden. Daher wird das 99%- Quantil der Personendichte mit einem Risikofaktor versehen und die Bemessungspersonendichte angepasst. Wie bereits im Kapitel 4 eingeführt, setzt sich der Bemessungswert der Personendichte p_d zusammen aus dem charakteristischen Wert der Personendichte $p_{c,99\%}$ und einem partiellen Faktor $\gamma_{\text{präskriptiv}}$ für präskriptive Anforderungen:

$$p_d = p_{c,99\%} \cdot \gamma_{\text{präskriptiv}}$$

Da die optimalen Fluchtwegbreiten davon abhängen, ob eine Flucht ebenerdig oder über Treppen erfolgt, wird der partielle Faktor $\gamma_{\text{präskriptiv}}$ geschossabhängig eingeführt. Der partielle Faktor wird so kalibriert, dass die optimalen Fluchtwegbreiten mit dem Bemessungskonzept erreicht werden (vgl. Tabelle 28).

Nutzungskategorie	Partieller Faktor $\gamma_{\text{präskriptiv}}$	
	Flucht ebenerdig	Flucht über Treppen
Non-Food-Verkaufsgeschäfte (inkl. Kaufhäuser und Einkaufszentren)	1.0	1.0
Supermärkte	2.5	1.0
Hochfrequente Supermärkte	1.5	0.7

Tabelle 28: Partielle Faktoren $\gamma_{\text{präskriptiv}}$ für das 99%-Quantil der Personendichte.

Abbildung 63 bis Abbildung 65 zeigen den Vergleich der optimalen Fluchtwegbreiten mit den resultierenden Fluchtwegbreiten aus dem Bemessungskonzept. Die Fluchtwegbreiten der bestehenden BSV sind zum Vergleich ebenfalls aufgeführt. Der graue Bereich bei den optimalen Fluchtwegbreiten zeigt den Einfluss der Kostenbandbreite auf. Die Fluchtwegbreite, die aus der mittleren Kostenschätzung resultieren, ist als schwarze Linie gekennzeichnet. Die partiellen Faktoren werden so gewählt, dass die resultierenden Fluchtwegbreiten mit dem Bemessungskonzept möglichst im Bereich der mittleren und oberen Fluchtwegbreiten zu liegen kommen.

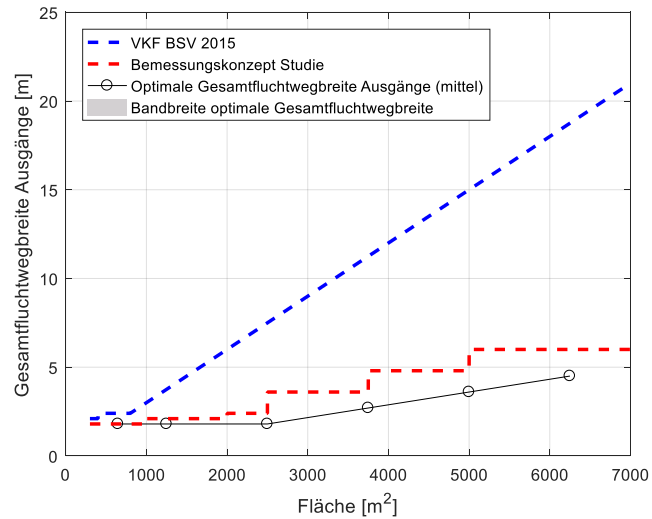
Für **Non-Food-Verkaufsgeschäfte** wird der partielle Faktor sowohl für die ebenerdige Flucht als auch für die Flucht über Treppen auf 1.0 gesetzt. Damit werden die Minimalanforderungen gemäss VKF Richtlinie BSR 16-15 Ziffer 2.4.6 massgebend. Die optimierten Fluchtwegbreiten würden sogar eine Reduktion von 1.2 m auf 0.9 m rechtfertigen für Non-Food-Verkaufsgeschäfte mit mehr als 200 Personen.

Für **Supermärkte** ist der partielle Faktor abhängig vom Geschoss. Für die ebenerdige Flucht wird ein partieller Faktor von 2.5 angesetzt. Dieser hohe Wert weist darauf hin, dass für den ebenerdigen Fall die Verbreiterung eines Fluchtweges mit relativ geringen Kosten verbunden ist und/oder mit dieser eine hohe Risikoreduktion erzielt werden kann. Für die Flucht über Treppen wird angenommen, dass diese vorwiegend in ländlichen Gebieten oder in der Agglomeration zustande kommen. An diesen Standorten ist die Flucht über eine Aussentreppe eher gängig, da mehr Bauland zur Verfügung steht als im urbanen Bereich. Die Aussentreppe ist günstiger in der Ausführung als die Variante mit dem Treppenhaus und führt zu grösseren Fluchtwegen. Deshalb liegen die optimalen Fluchtwegbreiten zwischen den mittleren und günstigen Kosten.

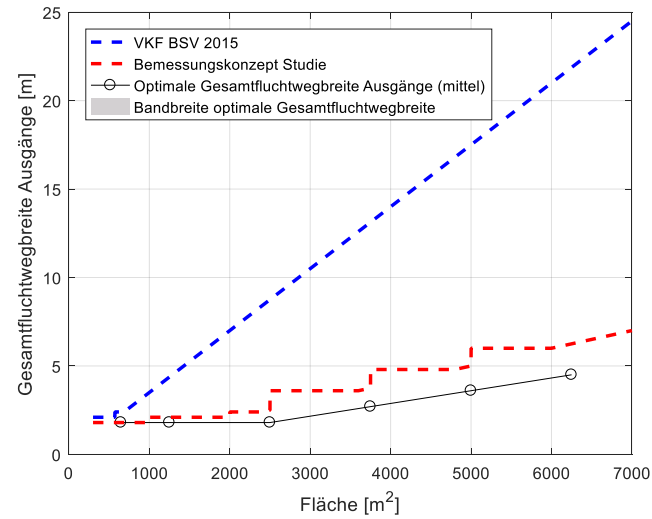
Für **hochfrequente Supermärkte** ist der partielle Faktor auch vom Geschoss abhängig. Für die ebenerdige Flucht wird ein partieller Faktor von 1.5 angesetzt. Dies resultiert in einer Bemessungspersonendichte von 4.5 Pers/m² und entspricht fast den heute in den BSV angesetzten 0.5 Pers/m². Grössere Abweichung zum Optimum (auf der sicheren Seite liegend) sind nur bei sehr grossen Flächen (> 2'500 m²) zu erwarten, die aber in der Regel kaum vorkommen. Bei der Flucht über Treppen kann ein partieller Faktor von 0.7 angesetzt werden. Dies entspricht einer Bemessungspersonendichte von 0.21 Pers/m². Einen Wert des partiellen Faktors kleiner 1 bedeutet, dass das 99%-Quantil, das für den charakteristischen Wert angesetzt wurde, bereits relativ hoch angesetzt ist. Der partielle Faktor wird, wie bei den Supermärkten, für die Flucht über eine Aussentreppe hergeleitet. Jedoch kommen hochfrequente Supermärkte vor allem in urbanen Gebieten zustande und werden oft im Bestand gebaut. Bei diesen ist die Flucht über ein bereits bestehendes Treppenhaus eher gängig. Deswegen ist diese Auslegung des Bemessungskonzepts für hochfrequente Supermärkte als konservativ zu werten.

Non-Food-Verkaufsgeschäfte

Ebenerdige Flucht



Flucht über Aussentreppe



Flucht über Treppenhaus

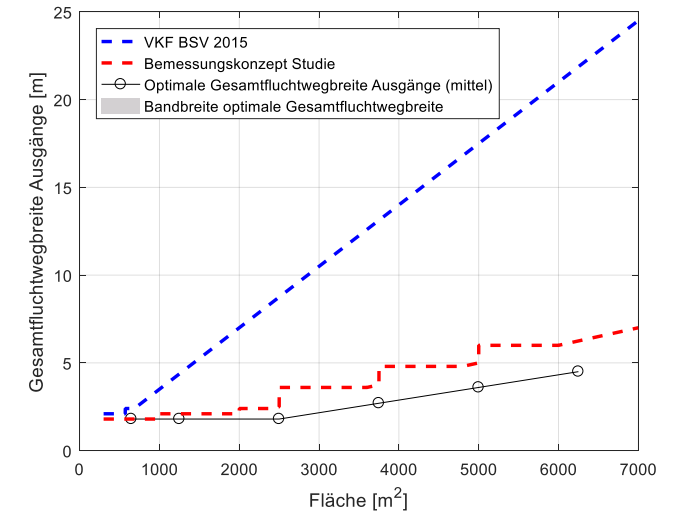
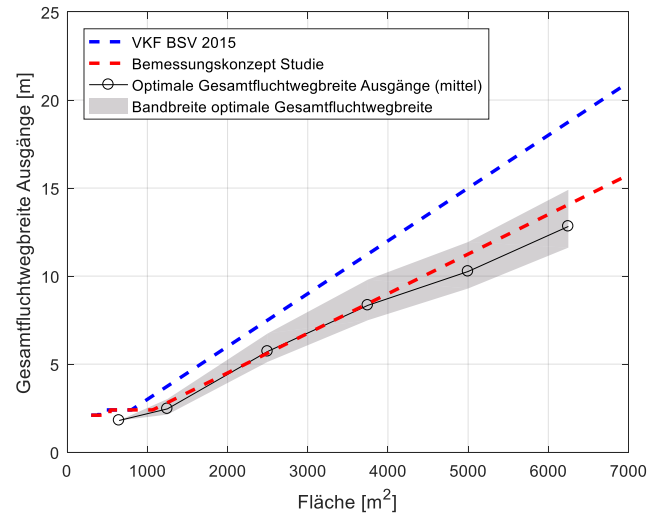


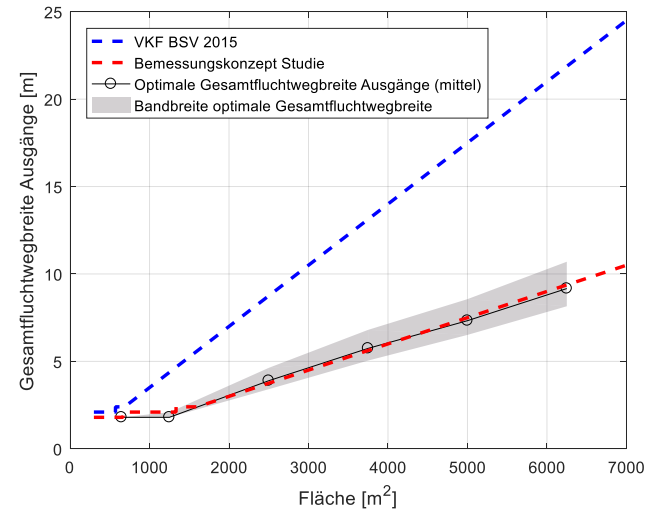
Abbildung 63: Vergleich der Gesamtfuchtwegbreiten der VKF BSV 2015 und der Studie für verschiedene Fluchtsituationen für die Nutzung Non-Food-Supermärkte.

Supermärkte

Ebenerdige Flucht



Flucht über Aussentreppe



Flucht über Treppenhaus

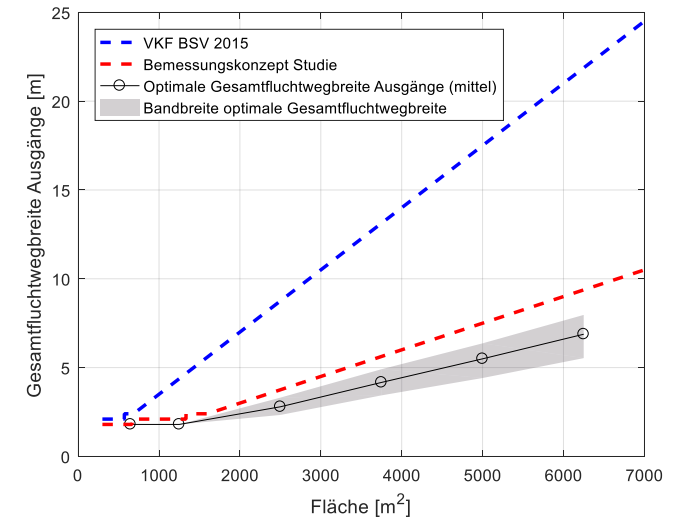
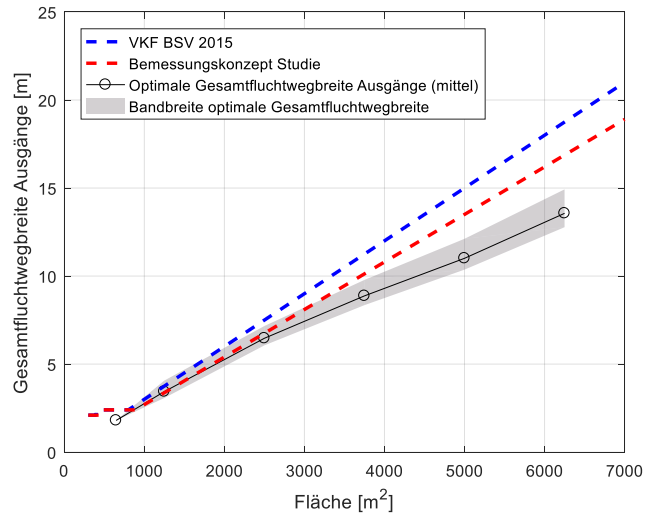


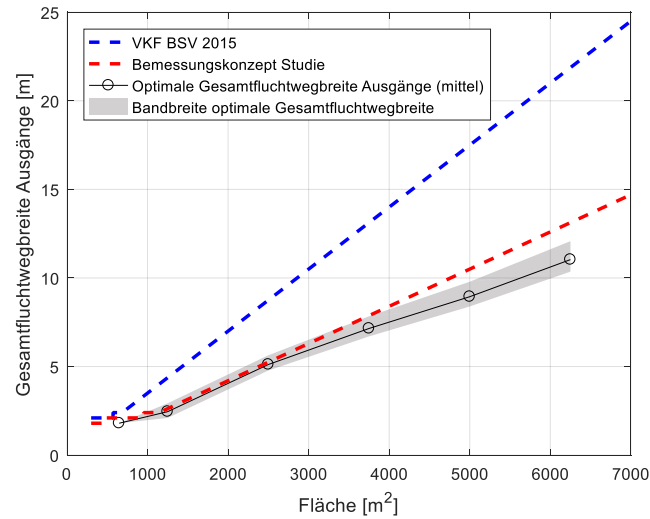
Abbildung 64: Vergleich der Gesamtflichtwegbreiten der VKF BSV 2015 und der Studie für verschiedene Fluchtsituationen für die Nutzung Supermärkte.

Hochfrequente Supermärkte

Ebenerdige Flucht



Flucht über Aussentreppe



Flucht über Treppenhaus

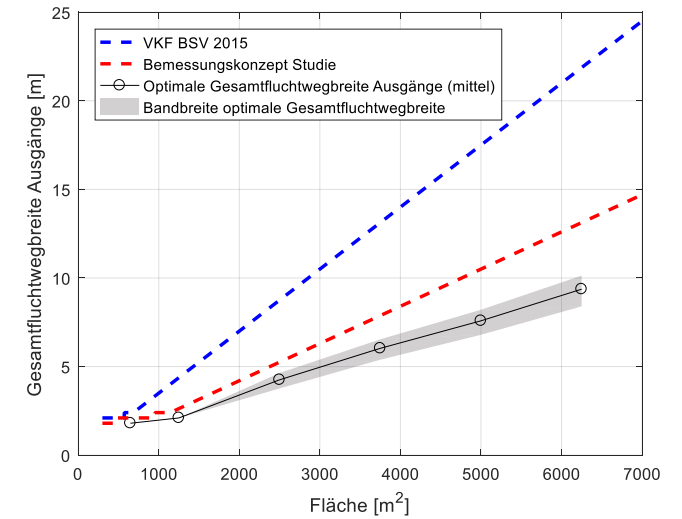


Abbildung 65: Vergleich der Gesamtfuchtwegbreiten der VKF BSV 2015 und der Studie für verschiedene Fluchtsituationen für die Nutzung hochfrequente Supermärkte.

8.5 Notwendigkeit einer Löschanlage für die Personensicherheit

Löschanlagen sind in Verkaufsgeschäften gemäss den BSV 2015 ab einer Fläche von 2'400 m² gefordert. Um die Kosten-Wirksamkeit einer Löschanlage zu beurteilen, wird der erwartete Schadenreduktion (Risikodifferenz) in Relation mit den Kosten einer Löschanlage gesetzt.

Effektivität einer Löschanlage bezüglich Personensicherheit

Das Risiko setzt sich zusammen aus einem Anteil aus Todesfällen infolge zu hohem Staudruck und aus einem Anteil, bei dem die ASET/RSET-Bedingung nicht erfüllt ist. Nur der Risikobeitrag vom letzteren kann von einer Löschanlage reduziert werden. Die monetarisierte absolute Risikoreduktion ΔMR durch eine Löschanlage erfolgt durch die Grenzkosten GK und wird wie folgt berechnet:

$$\Delta MR = GK * (R_{ohne\ Sprinkler} - R_{mit\ Sprinkler})$$

Für die Reduktion des kollektiven Risikos des ASET/RSET-Anteils wird eine optimistische bzw. eine pessimistische Auslegung der Wirksamkeit (vgl. 8.2.1) angesetzt. Die absolute und die relative²⁸ Risikoreduktion für die einzelnen Nutzungskategorien sind in Abbildung 66 bis Abbildung 68 ersichtlich. Die Auswertung zeigt, dass vor allem bei kleinen Flächen eine grössere Risikoreduktion zu erwarten ist, da dort das Risiko mehrheitlich vom ASET/RSET-Anteil dominiert wird. Dieser Anteil nimmt insbesondere bei Supermärkten und hochfrequenten Supermärkten stark ab. Deswegen fällt auch die Effektivität der Löschanlage entsprechend gering aus. Die absolute Risikoreduktion bewegt sich bei allen drei Nutzungskategorien auf tiefem Niveau und liegt unterhalb von 100 CHF / Jahr.

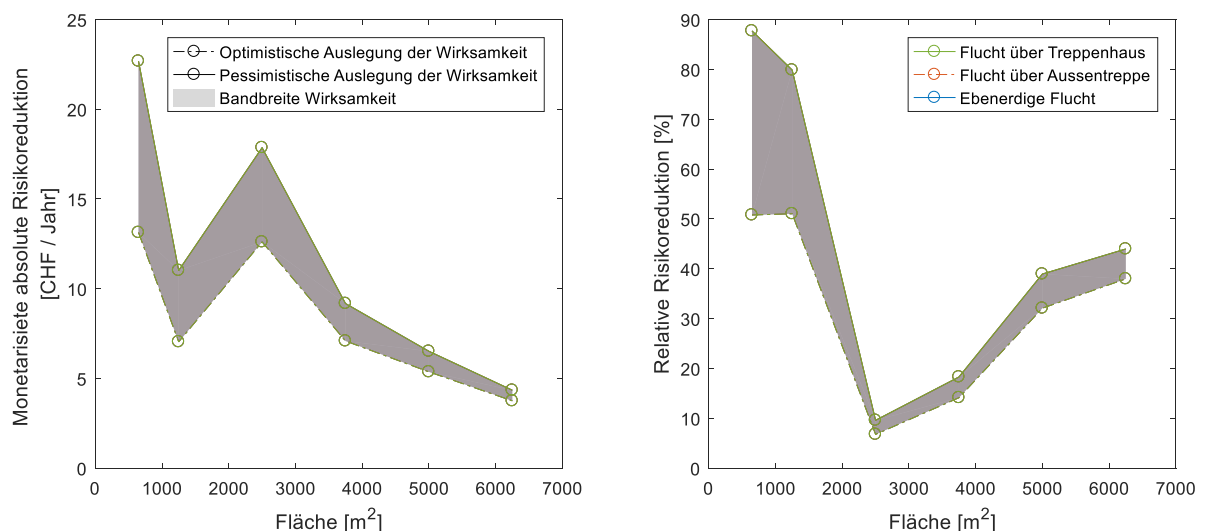


Abbildung 66: Effektivität einer Löschanlage für **Non-Food-Verkaufsgeschäfte**. Links: Monetarisierter absolute Risikoreduktion; rechts: Relative Risikoreduktion in Abhängigkeit der Verkaufsfläche bezogen auf den ASET/RSET Beitrag zum kollektiven Risiko.

28 bezogen auf den ASET/RSET Beitrag zum kollektiven Risiko

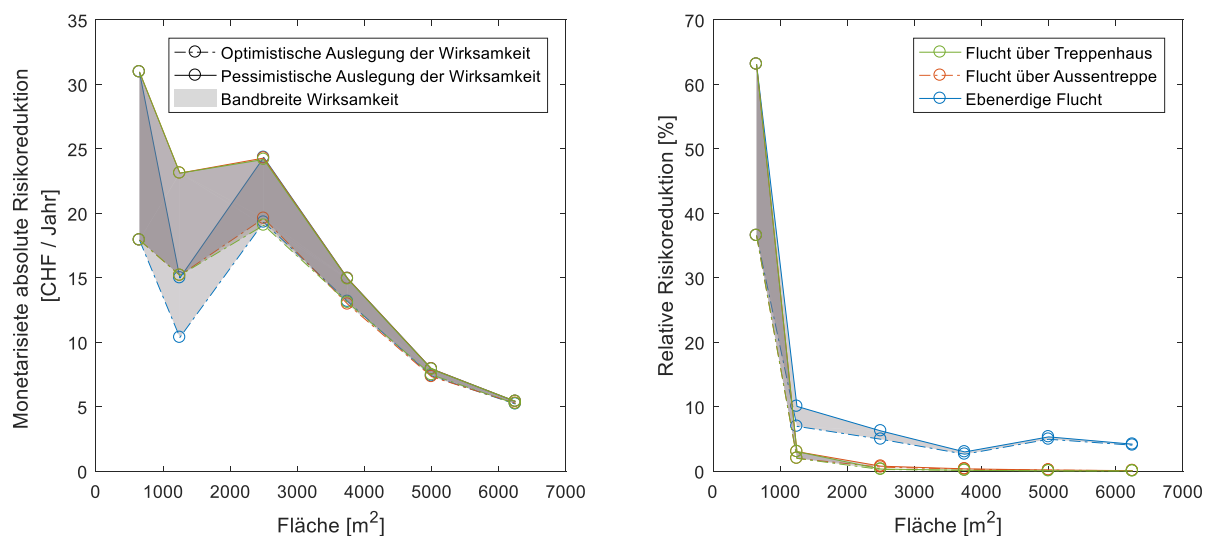


Abbildung 67: Effektivität einer Löschanlage für **Supermärkte**. Links: Monetarisierter absolute Risikoreduktion; rechts: Relative Risikoreduktion in Abhängigkeit der Verkaufsfläche bezogen auf den ASET/RSET Beitrag zum kollektiven Risiko.

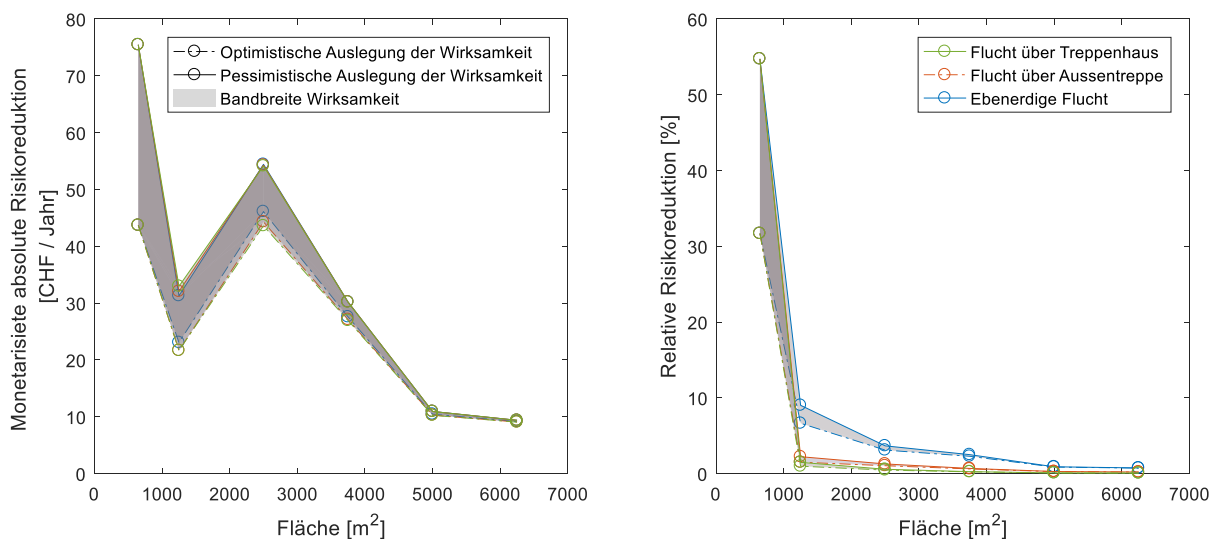


Abbildung 68: Effektivität einer Löschanlage für **hochfrequente Supermärkte**. Links: Monetarisierter absolute Risikoreduktion; rechts: Relative Risikoreduktion in Abhängigkeit der Verkaufsfläche bezogen auf den ASET/RSET Beitrag zum kollektiven Risiko.

Kosten einer Löschanlage

Die Investitionskosten einer Sprinkleranlage liegen zwischen 20 und 40 CHF/m². Andere Löschanlagen können auch teurer sein. Hinzu kommen jährliche Kosten für Wartung (Sicht- und Funktionskontrollen) und Unterhalt. Die Kosten dafür liegen zwischen 500 und 1'000 CHF pro Jahr und machen einen grossen Anteil der Gesamtkosten aus. Die Lebensdauer einer Sprinkleranlage beträgt bis zu 50 Jahre. Tabelle 29 zeigt die annualisierten Kosten für eine Sprinkleranlage auf.

Verkaufsfläche	annualisierte Investitionskosten [CHF / Jahr]		
	min	mittel	max
648 m ²	966	1'700	2'433
1'250 m ²	1'472	2'457	3'443
2'500 m ²	2'443	3'915	5'387
3'750 m ²	3'415	5'372	7'330
5'000 m ²	4'387	6'830	9'273
6'250 m ²	5'358	8'287	11'216

Tabelle 29: Zusammenstellung der Kosten für eine Sprinkleranlage

Beurteilung der Kostenwirksamkeit

Die annualisierten Kosten für eine Löschanlage von mind. 1'000 CHF/Jahr übersteigen klar die erzielte Risikoreduktion von ca. 100 CHF/Jahr. Damit ist die Kostenwirksamkeit mit dem Grenzkostenansatz hinsichtlich des Personenschutzes klar nicht gegeben. Eine Sprinkleranlage sollte in Verkaufsgeschäften punkto Personenschutzes nicht von den Vorschriften gefordert werden. Ob eine allfällige Löschanlagenpflicht Kostenwirksam ist, um andere Schutzziele (Sachwertschutz, Betriebsunterbruch, Brandbekämpfung durch die Feuerwehr) zu erfüllen, bleibt offen und sollte separat untersucht werden.

8.6 Schlussfolgerung der risikobasierten Beurteilung

Fluchtwegbreiten

Für die Nutzungskategorien «Non-Food-Verkaufsgeschäfte», «Supermärkte» und «hochfrequente Supermärkte» wurden Fluchtwegbreiten mittels des Grenzkostenkriteriums risikobasiert optimiert. Für alle drei Nutzungskategorien kann eine Reduktion der Fluchtwegbreiten erfolgen. Die Reduktion ist auch abhängig vom Geschoss und ob die Flucht über ein Treppenhaus oder über eine Aussentreppe erfolgt.

Die grössten Fluchtwegbreiten fallen im Erdgeschoss an. Dort ist die Verbreiterung eines Fluchtweges am günstigsten und rechtfertigt breitere Ausgänge im Vergleich zu Unter- bzw. Obergeschossen. In Ober- und Untergeschossen fallen kleinere Fluchtwegbreiten im Vergleich zum Erdgeschoss an. Die Kosten für eine Verbreiterung des Fluchtweges, welche mit baulichen Massnahmen für eine Aussentreppe oder ein Treppenhaus verbunden sind, rechtfertigen keine breiteren Ausgänge. Dabei wird im Vergleich zum Erdgeschoss ein höheres kollektives Risiko toleriert, welches aber unterhalb der Obergrenze des Nutzerrisikos liegt.

Das kollektive Risiko besteht aus einem Anteil des ASET/RSET-Kriteriums und einem Anteil des Staudruckkriteriums. Das Staudruckkriterium dominiert mehrheitlich die kollektiven Risiken. Zu beachten ist jedoch, dass zu hohe Staudrücke seltener stattfinden als eine Überschreitung des ASET/RSET-Kriteriums. Letzteres ist aber mit einem deutlich kleineren Ausmass verbunden und trägt mehrheitlich nur gering zum kollektiven Risiko bei.

Löschanlagen für den Personenschutz

Das kollektive Risiko wird massgebend von der Staudruckproblematik beeinflusst. Der Risikoanteil aus der ASET/RSET-Betrachtung ist gering. Da Löschanlagen nur diesen Risikoanteil reduzieren können, ist deren Effektivität begrenzt. Die absolute Risikoreduktion rechtfertigt nicht die Kosten für eine Löschanlage. Dies wurde aber nur hinsichtlich des

Schutzgutes Personenschutz untersucht. Ob und wann Löschanlagen kostenwirksam sind bezüglich anderer Schutzgüter (z.B. Sachwertschutz, Betriebsunterbruch), ist nicht Teil dieser Studie und sollte überprüft werden.

9. Schlussfolgerungen und Ausblick

9.1 Schlussfolgerungen

Durch die Datenerhebung der Personendichten im Retail konnte gezeigt werden, dass die gegenwärtigen Personendichten der Brandschutzrichtlinien nie oder nur sehr selten erreicht werden. Ein grosser Einfluss auf die Personendichte hat zudem die Nutzungskategorie des Verkaufsgeschäfts.

Der Einfluss der Geschosslage auf die Personenbelegung konnte mit der Studie nicht nachgewiesen werden. Allerdings beeinflusst die Geschosslage die Kosten-Wirksamkeit von Fluchtweg Anforderung und sollte im Bemessungskonzept entsprechend berücksichtigt werden. Um dies angemessen zu differenzieren, wurde ein Bemessungskonzept vorgeschlagen, das einerseits auf einen statistisch erhobenen charakteristischen Wert der Personendichte beruht und andererseits auf einen partiellen Faktor, der die entsprechende Kosten-Wirksamkeit von Massnahmen repräsentiert, die geschoss- und nutzungsabhängig sind.

Für mehrgeschossige Verkaufsgeschäfte wird empfohlen, die Gesamtbelegung anhand der vorgeschlagenen Dichten zu ermitteln und dann die Verteilung der Personen auf die Geschosse individuell je nach Verkaufsstrategie festzulegen. Aus Sicht des Studienteams liegt es in der Verantwortung von Bauherren, Nutzern und Planern, die Personendichte für Verkaufsgeschäfte mit häufigen Nutzungsänderungen, entsprechend flexibel auszulegen. Veranstaltungen und flexible Nutzung von Verkaufsflächen, wie z.B. Events in Mall-Flächen, sind objektspezifisch in Nutzungsvereinbarungen verbindlich zu definieren und betrieblich einzuhalten.

Allerdings lassen sich die Personendichten nicht direkt für die Bemessung der Fluchtwege verwenden. Eine Überprüfung der Anforderungen hinsichtlich der Sicherheit erfolgte basierend auf Ingenieurmethoden. Diese Methoden berücksichtigen Todesursachen sowohl infolge von zu hohen Staudrücken bei Engpässen als auch infolge von untragbaren Brandbedingungen (Hitzewirkung und toxische Wirkung). Die Beurteilung erfolgt anhand einer deterministischen und einer risikobasierten Betrachtung:

— Deterministische Betrachtung

Die Betrachtung beruht auf der Festlegung eines Worst-Credible-Case. Die Analyse erlaubt keine abschliessende Beurteilung, ob die vorgeschlagenen Bemessungswerte ein ausreichendes Sicherheitsniveau gewährleisten können. Denn einerseits ist nicht klar, auf welchen Wert der statistischen Verteilung der Personendichte der Worst-Credible-Case ausgelegt werden soll. Andererseits kann gezeigt werden, dass die vorgeschlagenen Bemessungswerte den Nachweis, je nach angesetztem Szenario, genauso gut oder schlecht erfüllen, wie die Bemessungswerte der Personendichte in der Brandschutzrichtlinie 16-15. Voraussetzung dafür ist, dass alle Ausgänge für eine Evakuierung zur Verfügung stehen. Ist ein Ausgang verhindert, kann nur für Non-Food-Verkaufsgeschäfte ein gleichwertiges Sicherheitsniveau gewährleistet werden. Für hochfrequentierte Supermärkte mit einem verhinderten Ausgang konnte der Nachweis weder mit den Bemessungswerten aus der Richtlinie noch mit den vorgeschlagenen Bemessungswerten erbracht werden.

— Risikobasierten Betrachtung

Die Betrachtung beruht auf der Berechnung der Kosten-Wirksamkeit von Massnahmen und der Beurteilung mittels Grenzkostenprinzips und einer Obergrenze für das Nutzerrisiko. Die Wirksamkeit von Massnahmen wird als Reduktion des Risikos definiert. Dabei werden

sowohl probabilistische Brand- und Evakuierungsparameter betrachtet als auch die Zuverlässigkeit von technischen Massnahmen berücksichtigt. Die optimierten Fluchtwegbreiten liegen alle unterhalb der jetzigen geforderten Fluchtwegbreiten. Zudem konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Löschanlagen für den Personenschutz nicht kosten-wirksam ist.

Die Studie zeigte, dass risikobasierte Betrachtungen mit Ingenieurmethoden eine ganzheitliche Beurteilung der Personensicherheit erlauben und dadurch grosse Erleichterungen in den präskriptiven Vorschriften erzielt werden können und gleichzeitig die Personensicherheit gewährleistet werden kann.

9.2 Weiterführende Fragestellungen

In dieser Studie wurden nur Anforderungen, die direkt mit der Personendichte zusammenhängen betrachtet. Weiterführende Betrachtungen, welche zu wesentlichen Erleichterungen im Brandschutz für Verkaufsgeschäften führen könnten, wären:

- Überprüfung der Fluchtweglängen
- Fluchtwegbreiten für die vertikalen Fluchtwege insbesondere hinsichtlich der Zusammenführung von Personenströmen.
- Anzahl Treppenstufen, ab der man die 0.6 m / 60 Personen Treppenbreite annehmen muss (z.B. dreistufige Treppen)
- Konzept für die stufenweise Alarmierung von Personen in mehrgeschossigen Verkaufsgeschäften.

Die Überprüfung der Fluchtweglängen machen aber nur Sinn, wenn diese über unterschiedliche Nutzungen (Büros, Veranstaltungsräume, etc.) erfolgt. Für die Revision der BSV 2026 könnte eine umfassende Überarbeitung notwendig werden, da die Gesamtheit aller Vorgaben (Fluchtweglänge, Anzahl Ausgänge, Fluchtwegbreiten) zur Diskussion steht. Entsprechend müssten die Erkenntnisse aus dieser Studie angepasst werden. Das entwickelte Risikomodell in dieser Studie lässt sich für andere Nutzungen und Fragestellungen adaptieren und kann als Werkzeug für die Optimierung von Brandschutzanforderungen verwendet werden.

Für den Nachweis der Personensicherheit mit Ingenieurmethoden wäre eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit einem semi-probabilistischen Nachweiskonzept sinnvoll. Mit diesem Konzept könnten unterschiedliche Szenarien berücksichtigt werden, u.a. das Evakuierungsszenario mit einem verhinderten Ausgang. Daraus liesse sich auch ein entsprechender Bemessungswert der Personendichte für leistungsorientierte Nachweise herleiten, der womöglich aus der charakteristischen Personendichte und einem partiellen Faktor $\gamma_{leistungsorientiert}$ für leistungsorientierte Nachweise besteht. Mit dieser Studie hätte man bereits eine gute Grundlage für eine solche Herleitung der partiellen Faktoren.

Die Studie hat gezeigt, dass der Einsatz von Löschanlagen für den Personenschutz nicht kosten-wirksam ist. Zu ermitteln wäre, ob aus Sicht anderer hoheitlichen Schutzziele (z.B. des Sachwertschutzes und der Intervention der Feuerwehr) ein Sprinkler gerechtfertigt ist.

10. Literaturverzeichnis

- [1] VKF, Brandschutzrichtlinie: Flucht- und Rettungswege, 2015.
- [2] G. De Sanctis, J. Kohler, M. Fontana, Probabilistic assessment of the occupant load density in retail buildings, *Fire Saf. J.* 69 (2014) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.07.002>.
- [3] SECO, Wegleitung zur Verordnung 2 zum Arbeitsgesetz, 2006
- [4] M. Spearpoint, C. Hopkin, A Review of Current and Historical Occupant Load Factors for Mercantile Occupancies, *J. Phys. Conf. Ser.* 1107 (2018) 072005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1107/7/072005>.
- [5] J. Courtney, H. Houghton, G. Thompson, Design and Construction of Building Exits, United States Government Printing Office, Washington, DC, 1935.
- [6] NFPA 101, Life Safety Code, 2015.
- [7] International Code Council (ICC), International Building Code (IBC), 2015.
- [8] D. Hosser, Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Altenberge, Braunschweig, Germany, 2009.
- [9] B. Forell, R. Seidenspinner, D. Hosser, Quantitative Comparison of International Design Standards of Escape Routes in Assembly Buildings, in: W.W.F. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, M. Schreckenberg (Eds.), *Pedestr. Evacuation Dyn.* 2008, Springer Berlin Heidelberg, 2010: pp. 791–801. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04504-2_76.
- [10] VKF, Brandschutzrichtlinie: Brandverhütung und organisatorischer Brandschutz, 2015.
- [11] L.T. Wong, Occupant load factor in local residential old high-rise buildings, *Int. J. Eng. Perform.-Based Fire Codes*. Volume 6 (2004) p.197-201.
- [12] M. Angerd, Är utrymningsschablonerna vid brandteknisk dimensionering säkra?, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, 1999.
- [13] D. Charters, D. McGrail, N. Fajemirokun, Y. Wang, N. Townsend, P. Holborn, Preliminary analysis of the number of occupants, fire growth, detection times and pre-movement times for probabilistic risk assessment., in: 2002.
- [14] M. Fontana, J.P. Favre, C. Fetz, A survey of 40,000 building fires in Switzerland, *Fire Saf. J.* 32 (1999) 137–158. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(98\)00034-4](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(98)00034-4).
- [15] K. Fischer, J. Kohler, M. Fontana, M.H. Faber, Wirtschaftliche Optimierung im vorbeugenden Brandschutz, Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2012. doi: 10.3929/ethz-a-007350266.
- [16] I.D. Bennetts, I.R. Thomas, Designing buildings for fire safety: a risk perspective, *Prog. Struct. Eng. Mater.* 4 (2002) 224–240.
- [17] D. Hosser, Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, erarbeitet vom vfdb-Referat 4 Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Braunschweig, 2013.
- [18] DIN EN 1991-1-2, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen Brandeinwirkungen auf Tragwerke, 2003.
- [19] G. De Sanctis, Generic Risk Assessment for Fire Safety – Performance Evaluation and Optimisation of Design Provisions, PhD Thesis, ETH Zurich, 2015. doi:10.3929/ethz-a-010461005.

- [20] Körpergröße nach Geschlecht 2006 | Statistik, Statista. (n.d.). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1825/umfrage/koerpergroesse-nach-geschlecht/> (accessed March 28, 2019).
- [21] D. Rosberg, A. Purchase, K. Fridolf, Acceptance Criteria in Fire Safety Engineering: A Review and Case Study, in: Gaithersburg, Maryland, 2018: p. 14.
- [22] P. Frey, Brandschutzplanung mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden, Basellandschaftliche Gebäudeversicherung, 2015.
- [23] EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire, 2002.
- [24] P.G. Holborn, P.F. Nolan, J. Golt, An analysis of fire sizes, fire growth rates and times between events using data from fire investigations, *Fire Saf. J.* 39 (2004) 481–524. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2004.05.002>.
- [25] Deguchi Y., Notake H., Yamaguchi J., Tanaka T., Statistical Estimations of the Distribution of Fire Growth Factor - Study on Risk-Based Evacuation Safety Design Method, *Fire Saf. Sci.* 10: 1087-1100 (2011). <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.10-1087>.
- [26] M. Nilsson, N. Johansson, P. Van Hees, A New Method for Quantifying Fire Growth Rates Using Statistical and Empirical Data – Applied to Determine the Effect of Arson, 11th IAFSS Symp. (2014).
- [27] NUREG-1934, Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines (NPP FIRE MAG), Nuclear Regulatory Commission (NRC) Electric Power Research Institute (EPRI), 2012.
- [28] S.M.V. Gwynne, K.E. Boyce, Engineering Data, in: M.J. Hurley, D. Gottuk, J.R. Hall, K. Harada, E. Kuligowski, M. Puchovsky, J. Torero, J.M. Watts, C. Wieczorek (Eds.), *SFPE Handb. Fire Prot. Eng.*, Springer New York, New York, NY, 2016: pp. 2429–2551. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_64.
- [29] A. Sandberg, Unannounced evacuation of large retail-stores - An evaluation of human behaviour and the computer model Simulex, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, 1997.
- [30] T.J. Shields, K.E. Boyce, A study of evacuation from large retail stores, *Fire Saf. J.* 35 (2000) 25–49. [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(00\)00013-8](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(00)00013-8).
- [31] D.A. Purser, M. Bensilum, Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations, *Saf. Sci.* 38 (2001) 157–182. [https://doi.org/10.1016/s0925-7535\(00\)00066-7](https://doi.org/10.1016/s0925-7535(00)00066-7).
- [32] H.E. Nelson, F.W. Mowrer, Emergency Movement, in: P.J. DiNenno (Ed.), *SFPE Handb. Fire Prot. Eng.*, 3rd ed., Society of Fire Protection Engineers, Quincy, MA, 2002.
- [33] G. Proulx, Movement of People: The Evacuation Timing, in: P.J. DiNenno (Ed.), *SFPE Handb. Fire Prot. Eng.*, 3rd ed., Society of Fire Protection Engineers, Quincy, MA, 2002.
- [34] RiMEA, Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen (Version 2.2.1), 2009. <http://www.rimea.de/>.
- [35] T. Rinne, K. Tillander, P. Grönberg, Data collection and analysis of evacuation situations, Espoo, Finland, 2010. http://www.vtt.fi/vtt_show_record.jsp?search=64276&view=default.
- [36] PTV Planung Transport Verkehr AG, Vissim, n.d.
- [37] J.J. Fruin, The causes and prevention of crowd disasters, (1993) 10.

- [38] A. Seyfried, O. Passon, B. Steffen, M. Boltes, T. Rupprecht, W. Klingsch, New Insights into Pedestrian Flow Through Bottlenecks, *Transp. Sci.* 43 (2009) 395–406. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0263>.
- [39] W. Daamen, S. Hoogendoorn, Capacity of doors during evacuation conditions, *Procedia Eng.* 3 (2010) 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.07.007>.
- [40] D. Helbing, I. Farkas, T. Vicsek, Simulating dynamical features of escape panic, *Nature*. 407 (2000) 487–490. <https://doi.org/10.1038/35035023>.
- [41] S.M.V. Gwynne, E.R. Rosenbaum, Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement, in: M.J. Hurley, D. Gottuk, J.R. Hall, K. Harada, E. Kuligowski, M. Puchovsky, J. Torero, J.M. Watts, C. Wieczorek (Eds.), *SFPE Handb. Fire Prot. Eng.*, Springer New York, New York, NY, 2016: pp. 2115–2151. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_59.
- [42] VKF, Brandschutzrichtlinie: Nachweisverfahren im Brandschutz, 2015.
- [43] J.D.C. Little, A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$, *Oper. Res.* 9 (1961) 383–387. <https://doi.org/10.2307/167570>.
- [44] J.R.Jr. Hall, U.S. experience with sprinklers and other automatic fire extinguishing equipment, NFPA Fire Analysis and Research Division, 2010.
- [45] M. Ahrens, U.S. Experience with sprinklers, NFPA, 2017.
- [46] National Fire Sprinkler Network, ed., Efficiency and Effectiveness of Sprinkler Systems in the United Kingdom: An Analysis from Fire Service Data, (2017).
- [47] D. Malm, A.-I. Pettersson, Reliability of Automatic Sprinkler Systems, Lund University, 2008.
- [48] J.-B. Schleich, L.-G. Cajot, M. Pierre, D. Joyeux, G. Aurtinetxe, J. Unanua, S. Pustorino, F.-J. Heise, R. Salomon, L. Twilt, J. Van Oerle, Competitive steel buildings through natural fire safety concepts - Final Report, ECCS, 2002.
- [49] VDI 6019 Blatt 1, Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden, 2006.
- [50] CRB, Kostenkennwerte Elementarten-Katalog, CRB Schweizerische Zentralstelle für Baurationalisierung, 2011.

A1 An der Erhebung beteiligte Filialen

Organisation	Objekt	Format	Nutzung	Geschoss
Migros	Marin Centre	Einkaufszentrum	Einkaufszentrum	EG
Migros	Marin Centre	Einkaufszentrum	Einkaufszentrum	OG
Migros	Marin Centre	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_gross	1. UG
Migros	Portes-Rouges	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_1200	EG
Migros	Bern - Westside	Melectronics	Elektronik	1.UG
Migros	Interlaken	Melectronics	Elektronik	1.OG
Migros	Schönbühl - Shoppyland	Melectronics	Elektronik	1.OG
Migros	Thun - Oberland	Melectronics	Elektronik	EG
Migros	Bern - Welle 7	Melectronics	Elektronik	1.UG
Migros	Brügg	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_gross	EG
Migros	Kirchberg	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_2400	EG
Migros	Lostdorf	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_600	EG
Migros	Wynecenter	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_gross	OG
Migros	Bern - Bahnhof	Super- und Verbrauchermarkt	Hochfrequenz	1.OG
Migros	Waldstätterstrasse	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_1200	EG + 1.OG
Migros	Bülach - Süd	Einkaufszentrum	Einkaufszentrum	Gebäude
Migros	Bülach - Süd Fachmarkt	SportXX	Sportartikel	1. UG
Migros	Bülach - Süd Fachmarkt	Do-it Garden	Baumarkt	EG
Migros	Volketswil - MParc	Einkaufszentrum	Einkaufszentrum	EG
Migros	Volketswil - MParc	Einkaufszentrum	Einkaufszentrum	1.OG
Migros	Volketswil - MParc	Micasa	Möbel	1.OG
Migros	Volketswil - MParc	Obi	Baumarkt	EG
Migros	Wädenswil	Melectronics	Elektronik	EG
Migros	Wädenswil - Zürisee Center	SportXX	Sportartikel	EG
Migros	Zürich - Altstetten	Einkaufszentrum	Einkaufszentrum	EG
Migros	Zürich - Altstetten	Einkaufszentrum	Einkaufszentrum	1.OG
Migros	Zürich - Altstetten	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_4800	EG + 1.OG
Migros	Zürich - Wiedikon M-Märt	Einkaufszentrum	Einkaufszentrum	Gebäude
Migros	Zürich - M-City	Einkaufszentrum	Einkaufszentrum	Gebäude
Migros	Zürich - M-City	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_4800	2.OG+3.OG
Migros	Gossau	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_2400	EG
Migros	Limmatplatz	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_4800	1.UG
Migros	Zürich HB	Super- und Verbrauchermarkt	Hochfrequenz	UG
Migros	Illuster	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_gross	EG
Migros	Zumikon Provisorium	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_600	EG
Migros	Rapperswil	Einkaufszentrum	Einkaufszentrum	Gebäude
Migros	Tourbillon Center	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_2400	EG
Migros	Chablais Centre Aigle (offen)	Einkaufszentrum	Einkaufszentrum	Gebäude
Migros	Genève Aeroport Cointrin	Super- und Verbrauchermarkt	Hochfrequenz	EG
Migros	Claramarkt	SportXX	Sportartikel	3.OG
Migros	Paradies	SportXX	Sportartikel	EG
Migros	Schönthal	SportXX	Sportartikel	1.UG
Migros	AMRP Amriswil Provisorium	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_1200	EG
Migros	MEPP Mels Pizolpark	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_4800	EG + 1.OG
Migros	WTRO Winterthur Rosenberg	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_4800	EG
Migros	SGOB Micasa St. Gallen	Micasa	Möbel	1.OG
LiB AG	G101 Globus Bahnhofstrasse	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_2400	1.UG
LiB AG	G101 Globus Bahnhofstrasse	Kaufhaus	Kaufhaus	OG1
LiB AG	G101 Globus Bahnhofstrasse	Kaufhaus	Kaufhaus	OG2
LiB AG	G101 Globus Bahnhofstrasse	Kaufhaus	Kaufhaus	OG3

Organisation	Objekt	Format	Nutzung	Geschoss
LiB AG	G101 Globus Bahnhofstrasse	Kaufhaus	Kaufhaus	OG4
LiB AG	Herren Globus Zürich	Mode	Bekleidung	Gebäude
LiB AG	Herren Globus Baden	Mode	Bekleidung	Gebäude
LiB AG	Herren Globus Aarau	Mode	Bekleidung	Gebäude
LiB AG	Globus Falkenplatz	Mode	Bekleidung	Gebäude
LiB AG	Globus Conthey	Mode	Bekleidung	EG
LiB AG	Globus Schönbühl	Mode	Bekleidung	EG
Coop	Bülach	Bau+Hobby	Baumarkt	EG
Coop	Volketswil G-Center	Bau+Hobby	Baumarkt	EG
Coop	Biberist	Coop	Supermarkt_4800	EG
Coop	Conthey	Coop	Supermarkt_4800	EG
Coop	Dietikon Silbernen	Coop	Supermarkt_4800	EG
Coop	Flims	Coop	Supermarkt_1200	EG
Coop	Giubiasco	Coop	Supermarkt_1200	EG
Coop	Haag	Coop	Supermarkt_4800	EG
Coop	Langnau Ilfischer	Coop	Supermarkt_2400	1. OG
Coop	Matten	Coop	Supermarkt_600	EG
Coop	Möhligen	Coop	Supermarkt_2400	EG
Coop	Münchenstein Gartenstadt	Coop	Supermarkt_4800	EG
Coop	Oron-la-Ville	Coop	Supermarkt_2400	EG
Coop	Porrentruy Ajoie	Coop	Supermarkt_2400	EG
Coop	St.-Blais	Coop	Supermarkt_600	EG
Coop	Zuchwil	Coop	Supermarkt_1200	EG
Coop	Zürich Albisriederplatz	Coop	Supermarkt_1200	EG
Coop	Bern City Marktgasse	Coop City	Kaufhaus	Gebäude/EG/1.OG
Coop	Zürich City Oerlikon	Coop City	Kaufhaus	EG + 1.UG + 2.UG
Coop	Haag Center	EKZ	Einkaufszentrum	EG
Coop	Heimberg Center	EKZ	Einkaufszentrum	EG + 1.OG
Coop	Littoral Centre	EKZ	Einkaufszentrum	EG
Coop	Lyssach Center	EKZ	Einkaufszentrum	EG + 1. OG
Coop	Seewen Markt	EKZ	Einkaufszentrum	2.UG + 1.UG + EG + 1.OG
Coop	Kriens	Interdiscount	Elektronik	EG
Coop	Lyssach	Interdiscount	Elektronik	EG
Coop	Spreitenbach Shoppi	Interdiscount	Elektronik	EG
Coop	Winterthur Rosenberg	Interdiscount	Elektronik	EG
Coop	Dietikon	Toptip	Möbel	EG + 1. OG
Coop	Oberentfelden	Toptip	Möbel	EG
Coop	Pratteln	Toptip	Möbel	EG
Coop	Canobbio Ipermercato Resega	Coop	Supermarkt_gross	EG
Coop	Bachenbülach	Coop	Supermarkt_gross	EG
Coop	Vernier Blandonnet	Coop	Supermarkt_gross	EG
Coop	Luzern Bahnhof	Coop	Hochfrequenz	EG
Coop	Aarau Bahnhof	Coop	Hochfrequenz	EG
Coop	Baden Bahnhof	Coop	Supermarkt_2400	EG
Volg	Aadorf	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_600	EG
Volg	Fülenbach	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_600	EG
Volg	Koppigen	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_600	EG
Volg	Scheuren Forch	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_600	EG
Volg	Schiers	Super- und Verbrauchermarkt	Supermarkt_600	EG
Möbel Pfister	Marin Centre		Möbel	EG
Maus Frères	Bienne	Jumbo	Baumarkt	EG
Maus Frères	Chavannes	Jumbo	Baumarkt	EG

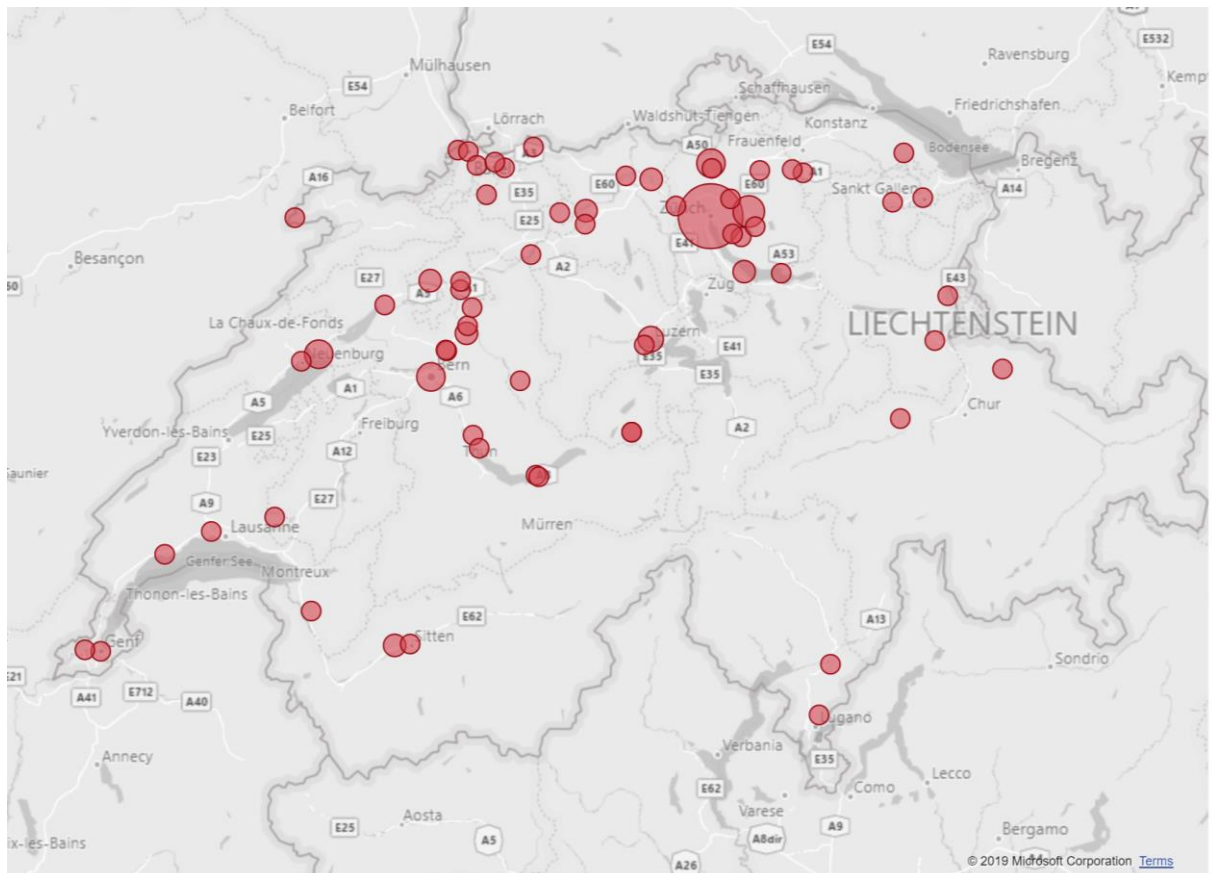


Abbildung 69: Standorte der Filialen

A2 Anforderung an die Messung

A2.1 Dokumentation des Objektes

Für jedes Objekt werden folgende Angaben erfasst:

- Branche / Nutzungskategorie
- Geschoss
- Verkaufsfläche
- Öffnungszeiten

A2.2 Messkonzept

Übersichtsplan

Plan der gemessenen Fläche mit eindeutiger Markierung folgender Angaben:

- Sämtliche Zugänge zur Verkaufsfläche
- Verkaufsflächen
- Flächennutzungen
- Messstellen inklusive Bezeichnungen
- Nicht gemessene Zugänge müssen erläutert werden.

Messdauer

Es wird ein zusammenhängendes Kalenderjahr erfasst. Dabei ist das Start- und Enddatum nicht entscheidend, solange jedes Datum in der Messung vorkommt. Es wird nur während den geöffneten Tagen gemessen.

Perimeter

Alle Zugänge zur Verkaufsfläche werden gemessen. Ausgenommen sind Zugänge, die von weniger als 1% der Besucher verwendet werden. Mitarbeitereingänge werden nicht erfasst.

A2.3 Messgenauigkeit

Toleranz

Für die Erhebung wird mindestens eine Messgenauigkeit von 98% gefordert. Dies konnte weitgehend erreicht werden.

Minimalhöhe

Das Messsystem erkennt Personen erst ab einer gewissen Höhe. Gefordert wurde, dass Personen ab einer Höhe von 120 cm erkannt werden müssen.

Hohe Personenströme

Gefordert wurde, dass das System auch bei hohen Personenströmen bis zu 1.2 Pers./sec je Meter Breite genaue Ergebnisse liefern muss.

Objekte

Gezählt werden nur Personen. Andere Objekte wie beispielsweise Einkaufswagen dürfen die Messung nicht beeinflussen.

Witterung

Das System darf nicht durch Witterungseinflüsse gestört werden und muss bei jeder Aussentemperatur (-20°C bis 40°C) funktionieren.

Licht

Die Messung muss bei jedem Tageslicht funktionieren und darf nicht durch äussere Lichteinflüsse gestört werden.

A2.4 Datenerfassung

Die Daten werden auf einer via Internet zugänglichen Datenbank gespeichert.

Messdaten müssen richtungsgetrennt mindestens minütlich erfasst und gespeichert werden. Auch ereignisbasierte Systeme mit exakter Zeitangabe in Sekunden sind möglich.

Die Messdaten müssen in roher Form vorliegen. Vorberechnete Personenbelegungen sind nicht zulässig.

Beispiel für die Datenspeicherung:

Sensor ID	Time	Count In	Count Out
1065	2017-10-25 11:54:00	10	12
1066	2017-10-25 11:54:00	11	7
1065	2017-10-25 11:53:00	5	3

A3 Probabilistische Modelle

A3.1 Zufallsvariablen

Ein Grossbuchstabe X bezeichnet eine Zufallsvariable und ein Kleinbuchstabe x bezeichnet eine Realisation einer Zufallsvariable X . Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion einer Zufallsvariablen X wird als $f_X(x)$ bezeichnet. Die kumulative Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion einer Zufallsvariablen X wird als $F_X(x)$ bezeichnet und ihre inverse Funktion als $F_X^{-1}(F_X(x)) = x$.

A3.2 Lognormalverteilung

Wenn eine Zufallsvariable X einer Lognormalverteilung $X \sim \text{LN}(\mu, \sigma)$ folgt, dann ist ihre Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_X(x)$ definiert durch:

$$f_X(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2\right)$$

Die Parameter μ (meanlog) und σ (sdlog) sind die Verteilungsparameter der Lognormalverteilung. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ist definiert für $x > 0$. Der Erwartungswert $E[X]$ (oder Mittelwert) von X und dessen Varianz $\text{Var}[X]$ wird berechnet durch:

$$E[X] = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)$$
$$\text{Var}[X] = (\exp(\sigma^2) - 1) \cdot E[X]^2$$

A3.3 Gammaverteilung

Wenn eine Zufallsvariable X einer Gammaverteilung $X \sim \text{GA}(a = \text{shape}, b = 1/\text{rate})$ folgt, dann ist ihre Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_X(x)$ definiert durch:

$$f_X(x|a, b) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x^{a-1} \exp\left(\frac{-x}{b}\right)$$

Die Parameter a (shape) und $b = 1/\text{rate}$ sind die Verteilungsparameter der Gammaverteilung und $\Gamma(\cdot)$ ist die Gammafunktion. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion ist definiert für $x > 0$. Der Erwartungswert $E[X]$ (oder Mittelwert) von X und dessen Varianz $\text{Var}[X]$ wird berechnet durch:

$$E[X] = a \cdot b$$
$$\text{Var}[X] = a \cdot b^2$$

A4 Modellierung der Rauchausbreitung

A4.1 Modellvergleich und -auswahl

Für die Berechnung der Rauchausbreitung wurden für einen Standardfall (1250 m²) zwei Modellansätze geprüft: Zonenmodell (CFAST) und Fluidodynamik-Modell (FDS).

CFAST ist ein Zwei-Zonen-Brandmodell und erlaubt eine Unterteilung des Brandraumes in mehrere virtuelle Kompartimente (Mehrraum-Zonenmodell). Für jedes Kompartiment wird die Massen- und Energiegleichung gelöst und so die Rauchschichthöhe bestimmt. Für den Standardfall wurde das Zonenmodell als Acht-Kompartiment-Modell und als Ein-Kompartiment-Modell verglichen. Dabei wurden die folgenden Raum- und Brandeigenschaften berücksichtigt:

- Raumfläche: 1250 m²
- Maximale Wärmefreisetzungsrate: 1 MW
- Brandausbreitungsgeschwindigkeit: mittel (0.012 kW/s²)
- Brandfläche: 1 m²
- Verbrennungswärme: 23'500 kJ/kg

Die Brandausbreitung der Acht-Kompartiment-Modell von CFAST sowie des FDS-Modells sind phänomenologisch vergleichbar (vgl. Abbildung 70). Die Rauchschicht breitet sich aus und sinkt zuerst auf der dem Brand gegenüberliegenden Seite des Raums ab, da er an kinetischer Energie verliert. Dieser Effekt kann von beiden Programmen abgebildet werden und beeinflusst massgeblich die Rauchschichthöhe. Dort erreicht die Rauchschicht nach ca. 7 Minuten die Höhe von 2 m (Abbildung 72).

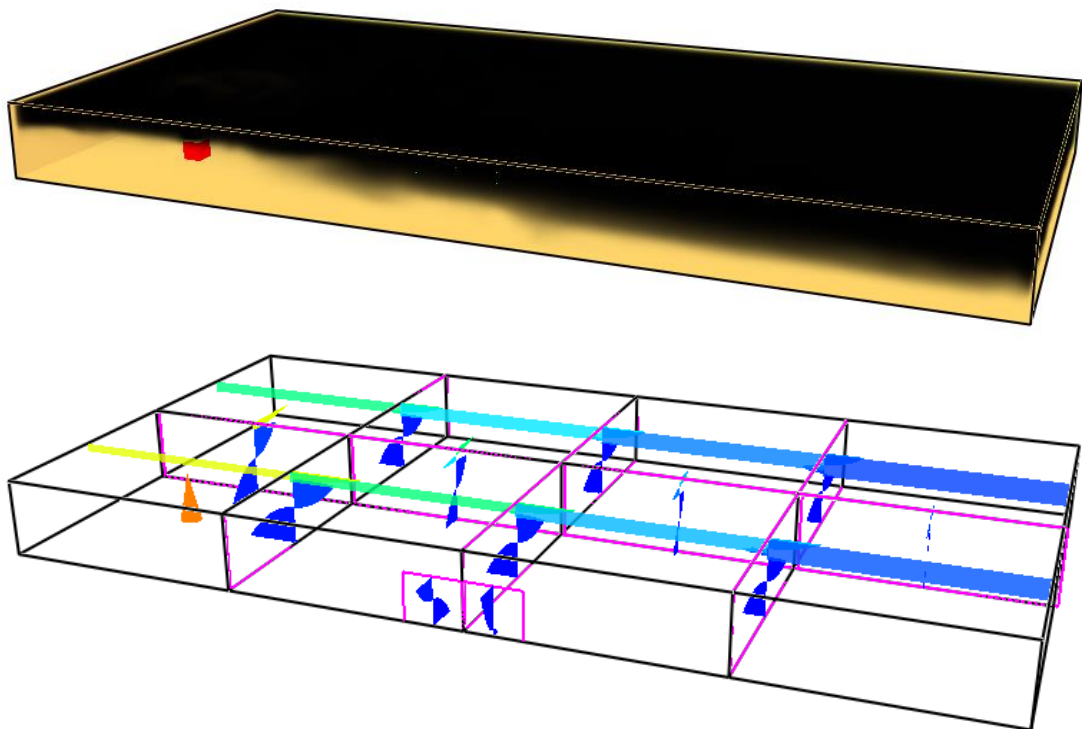


Abbildung 70: Vergleich Brandausbreitung nach 5 min von FDS (oben) und von CFAST (unten).

Im Vergleich zum Ein-Kompartiment-Modell bleibt die Rauchsicht während der gesamten Branddauer oberhalb von 2 m, während im Acht-Kompartiment-Modell die Rauchsicht im ersten Kompartiment bereits nach 7 Minuten unter 2 m sinkt (Abbildung 71).

In der vorliegenden Studie wurde die Rauchausbreitung mit CFAST für mehrere Kompartimente berechnet (Mehrraum-Zonenmodell). Dies erlaubt eine hinreichend genaue Analyse und bietet den Vorteil einer kurzen Berechnungsdauer und ist deswegen vor allem für probabilistische Analysen geeignet.

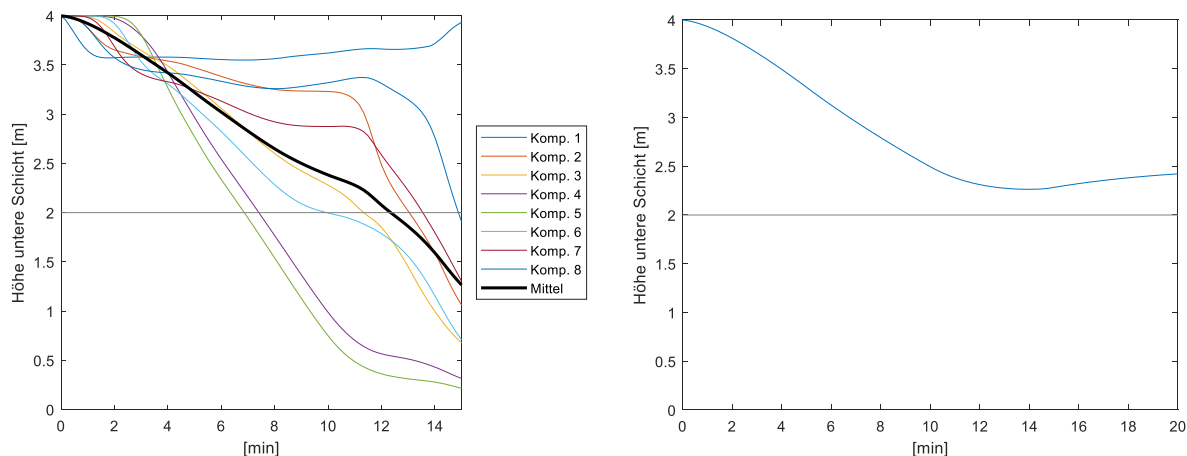


Abbildung 71: Entwicklung der Rauchsicht-Höhe in der Acht-Kompartiment-Version (links) und der Ein-Kompartiment-Version (rechts) von CFAST

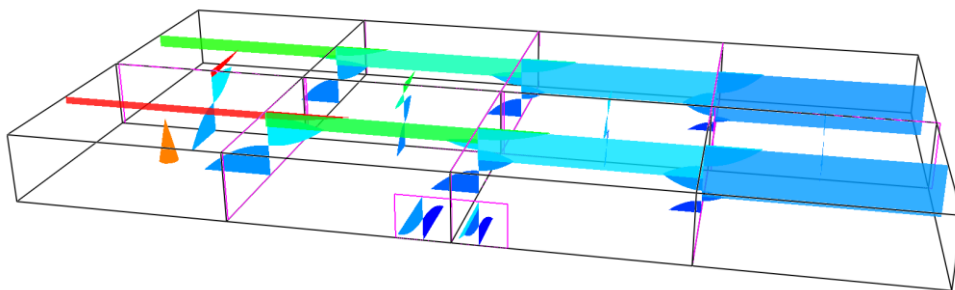


Abbildung 72: CFAST Acht-Kompartiment-Version, Rauchausbreitung nach 10 Minuten. Der Brandort ist orange gekennzeichnet.

A4.2 Brandszenarien für die Referenzfälle

Für die sechs berechneten Referenzfälle sind die Grösse und Anzahl der Kompartimente (gestichelte Linien), Anzahl und Position der Brandorte (rote Punkte) sowie Anzahl analysierter Szenarien pro Referenzfall in Abbildung 73 bis Abbildung 78 dargestellt. Die Standorte der Brände wurden auch aus Symmetrieüberlegungen festgelegt. Zudem kann so auch ein Brand in der Mitte des Raumes modelliert werden. Für jeden Referenzfall sind mögliche relevante Brandorte ausgewählt worden. Die Anzahl Brandorte unterscheidet sich für die Referenzfälle je nach Anzahl Kompartimente.

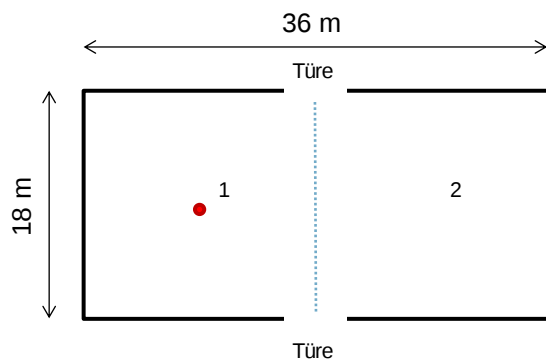


Abbildung 73: Referenzfall 648 m²: 1 Brandort, 5 Brandausbreitungsgeschwindigkeiten, 4 Wärmefreisetzungsraten
= 20 Szenarien

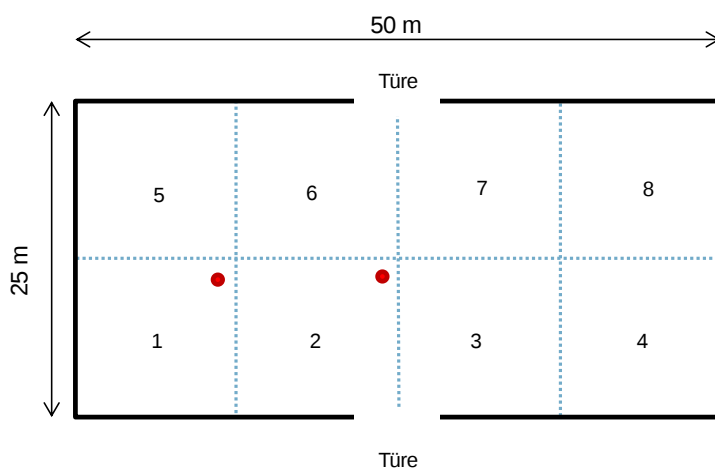


Abbildung 74: Referenzfall 1250 m²: 2 Brandorte, 5 Brandausbreitungsgeschwindigkeiten, 4 Wärmefreisetzungsraten
= 40 Szenarien

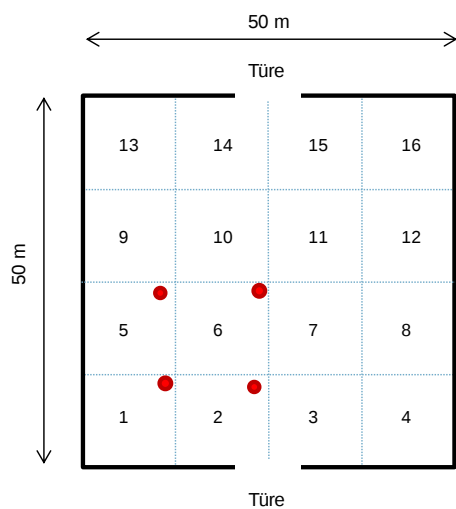


Abbildung 75: Referenzfall 2500 m²: 4 Brandorte, 5 Brandausbreitungsgeschwindigkeiten, 4 Wärmefreisetzungsraten
= 80 Szenarien

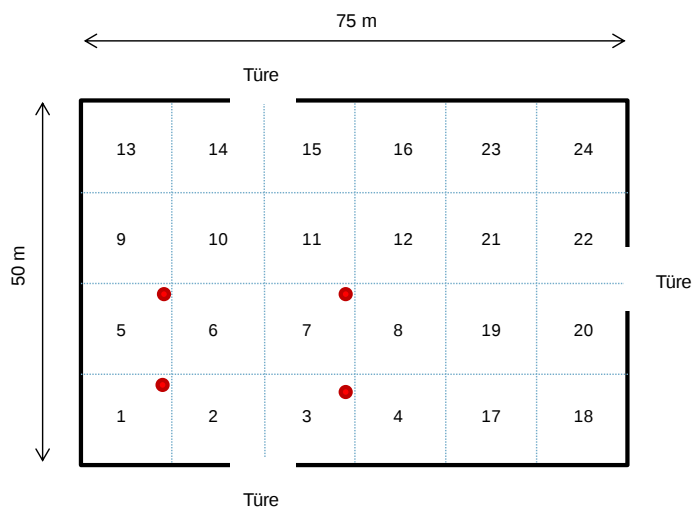


Abbildung 76: Referenzfall 3750 m²: 4 Brandorte, 5 Brandausbreitungsgeschwindigkeiten, 4 Wärmefreisetzungsraten = 80 Szenarien

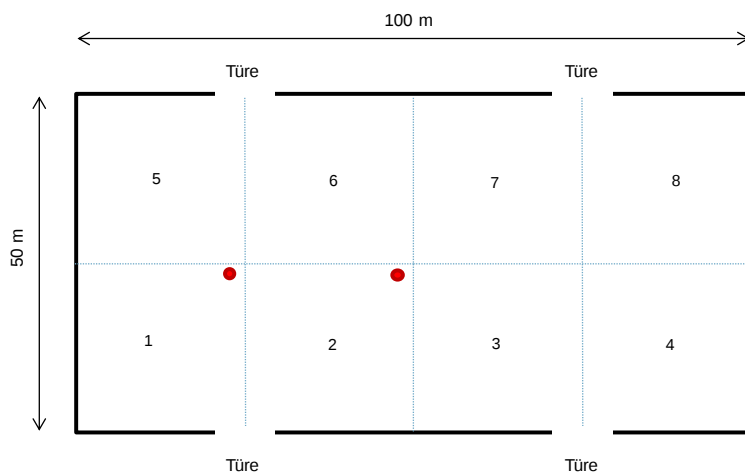


Abbildung 77: Referenzfall 5000 m²: 2 Brandorte, 5 Brandausbreitungsgeschwindigkeiten, 4 Wärmefreisetzungsraten = 40 Szenarien

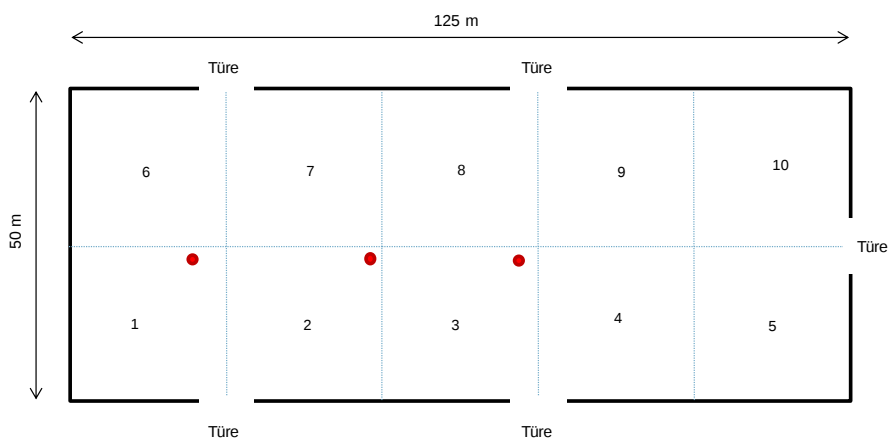


Abbildung 78: Referenzfall 6250 m²: 3 Brandorte, 5 Brandausbreitungsgeschwindigkeiten, 4 Wärmefreisetzungsraten = 60 Szenarien

A4.3 Parameteranalyse für Referenzfall 1250 m²

Für den Referenzfall 1250 m² wurde eine Parameteranalyse durchgeführt. Dabei wurde die ASET in Abhängigkeit der Brandausbreitungsgeschwindigkeit sowie der maximalen Wärmefreisetzungsrate analysiert. Gemäss Abbildung 74 wurden dabei jeweils zwei Brandorte berücksichtigt.

Die ASET sinkt mit einer schnelleren Brandausbreitungsgeschwindigkeit (α) deutlich (Abbildung 79). Während die ASET für die sehr langsame Brandausbreitungsgeschwindigkeit ($\alpha = 0.00125 \text{ kW/s}^2$) bei knapp 10 Minuten liegt, wird sie bei einer sehr schnellen Brandausbreitung ($\alpha = 0.19 \text{ kW/s}^2$) bereits nach ca. 3 Minuten erreicht. Die ASET ist also stark von der Brandausbreitungsgeschwindigkeit abhängig.

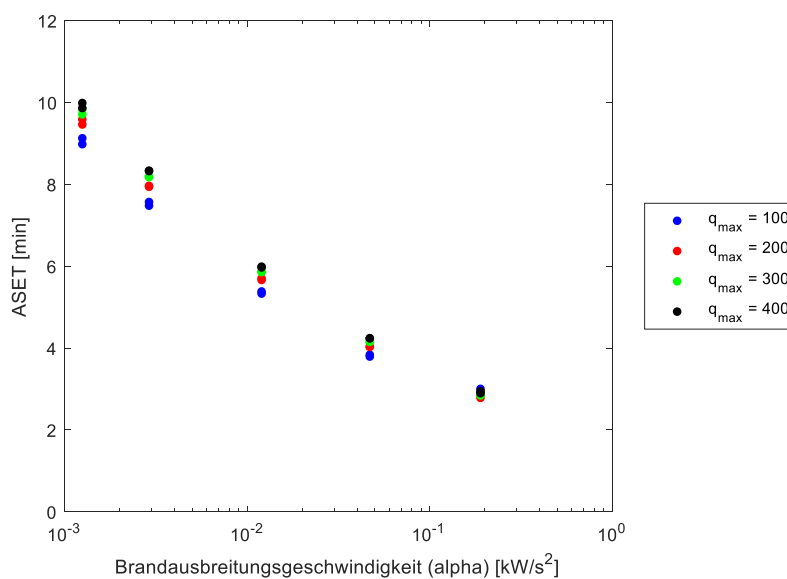


Abbildung 79: ASET in Abhängigkeit der Brandausbreitungsgeschwindigkeit (alpha)

Wie in Abbildung 80 ersichtlich ist, ist die ASET nur schwach abhängig von der maximalen Wärmefreisetzungsrate ($q_{\max}$). Die ASET ist nur unwesentlich tiefer bei einer tieferen Wärmefreisetzungsrate. Wegen dieser schwachen Abhängigkeit wird die maximale Wärmefreisetzungsrate als Regressionsparameter vernachlässigt und es wird nur die Brandentwicklungsgeschwindigkeit explizit als Regressionsparameter verwendet. Jedoch fließt die maximale Wärmefreisetzungsrate und deren statistische Verteilung als Regressionsfehler in die Analyse mit ein und wird daher in der Risikoanalyse implizit berücksichtigt.

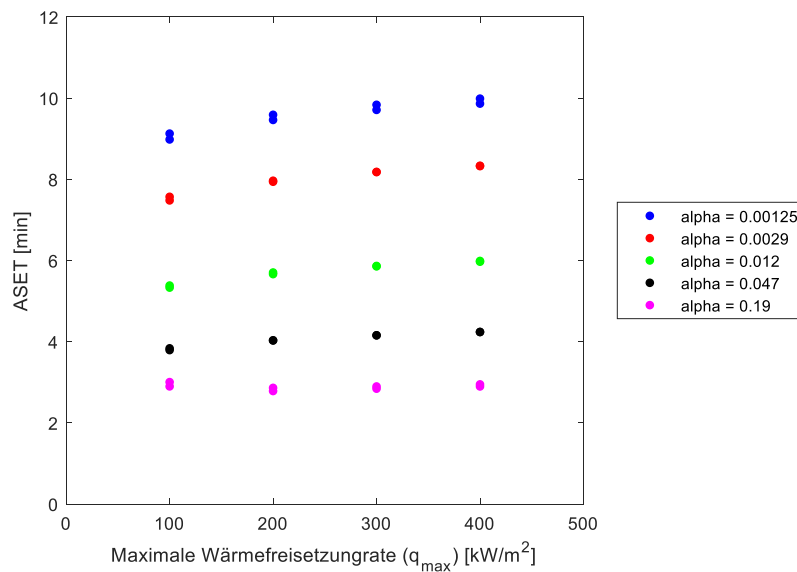


Abbildung 80: ASET in Abhängigkeit der maximalen Wärmefreisetzungsrate ($q_{\max}$).

A4.4 ASET als Funktion der Brandausbreitungsgeschwindigkeit

Die Regressionen der ASET als Funktion der Brandausbreitungsgeschwindigkeit für die sechs Referenzfälle sind in Abbildung 81 bis Abbildung 86 dargestellt.

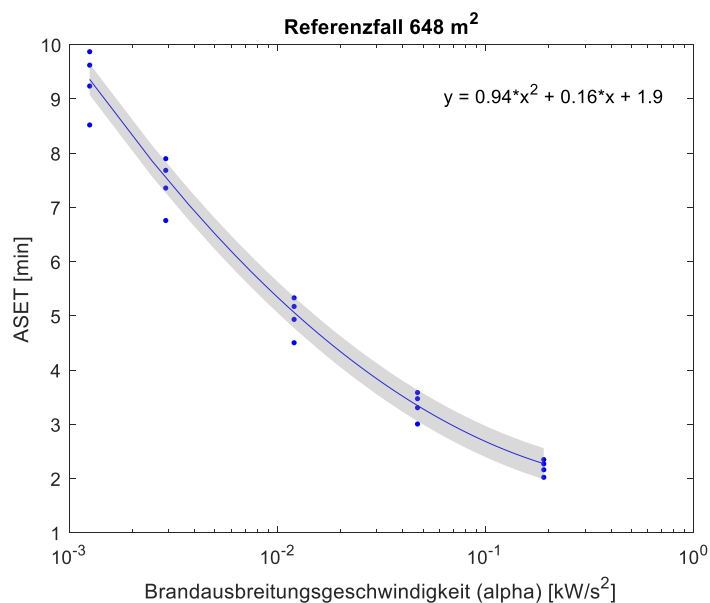


Abbildung 81 ASET als Funktion der Brandausbreitungsgeschwindigkeit für Referenzfall 648 m^2 .

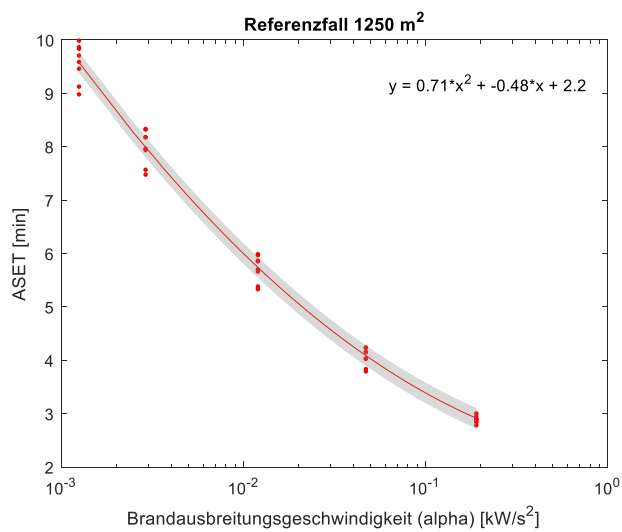


Abbildung 82 ASET als Funktion der Brandausbreitungsgeschwindigkeit für Referenzfall 1250 m².

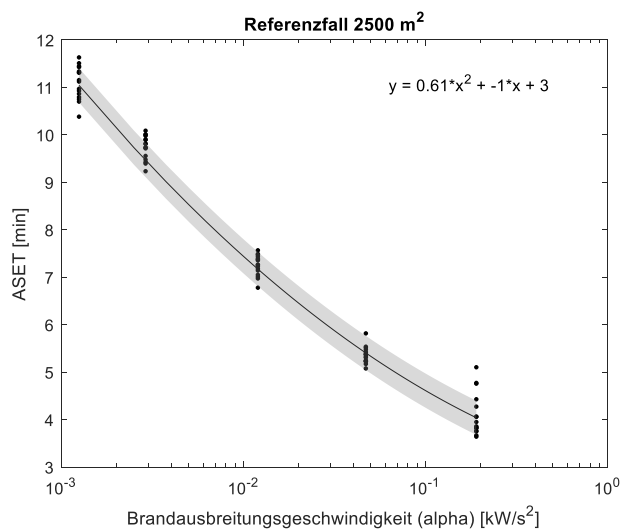


Abbildung 83 ASET als Funktion der Brandausbreitungsgeschwindigkeit für Referenzfall 2500 m².

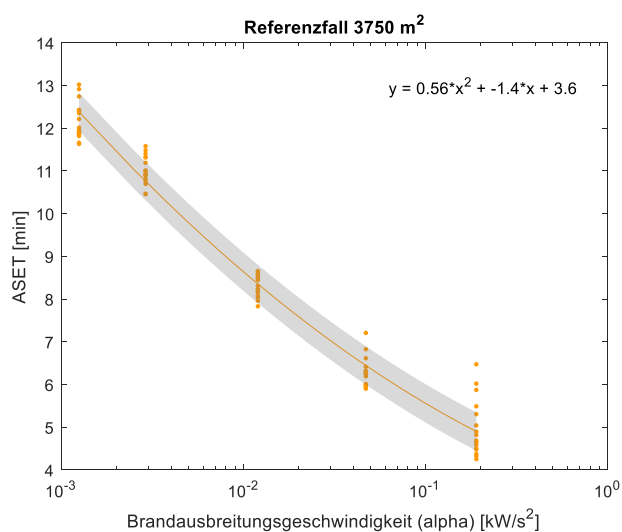


Abbildung 84 ASET als Funktion der Brandausbreitungsgeschwindigkeit für Referenzfall 3750 m².

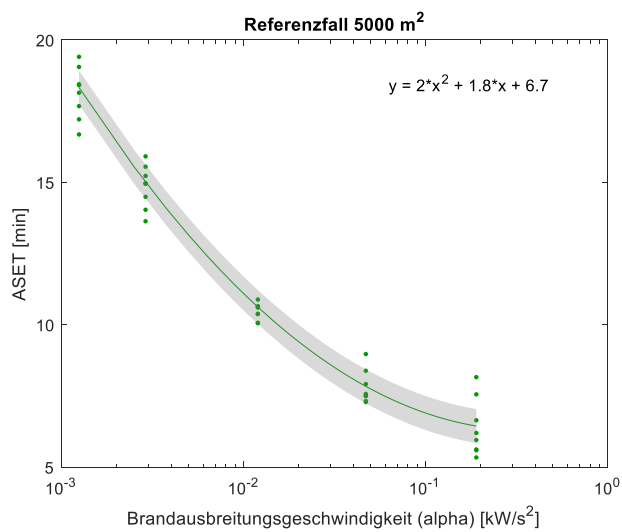


Abbildung 85 ASET als Funktion der Brandausbreitungsgeschwindigkeit für Referenzfall 5000 m².

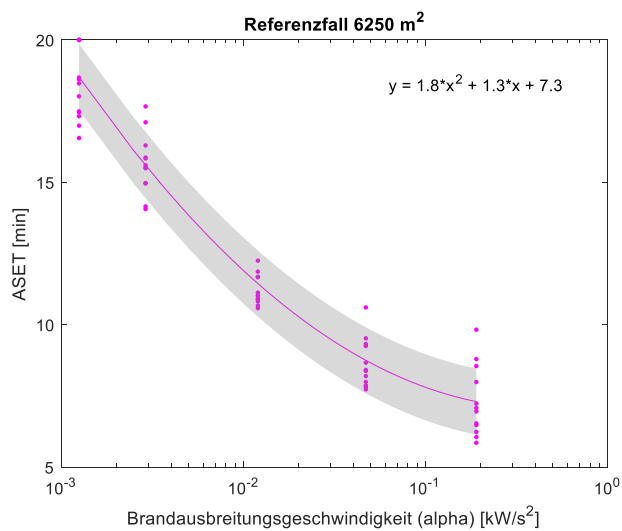


Abbildung 86 ASET als Funktion der Brandausbreitungsgeschwindigkeit für Referenzfall 6250 m².

Referenzfall	σ_{ε}
Referenzfall 648	0.29
Referenzfall 1250	0.19
Referenzfall 2500	0.36
Referenzfall 3750	0.45
Referenzfall 5000	0.60
Referenzfall 6250	1.16

Tabelle 30: Regressionsfehler für die ASET als Funktion der Brandausbreitungsgeschwindigkeit (Normalverteilung mit Mittelwert 0 und Standardabweichung σ_{ε}).

A5 Vergleich vereinfachtes und mikroskopisches Evakuierungsmodells

Das vereinfachte Evakuierungsmodell von De Sanctis [19] wurde mit einem mikroskopischen Evakuierungsmodell basierend auf dem Softwareprogramm VISSIM [36] verglichen (vgl. Abbildung 87). Dabei wurden verschiedene Situationen betrachtet, bei denen es zu einer Stausituation an Engstellen kommt oder bei denen die Flucht ohne Stau erfolgt.

In Stausituationen führt das vereinfachte Modell tendenziell zu einer grösseren Anzahl an wartenden Personen als die mikroskopische Simulation und ist damit für die Risikoabschätzung konservativ ausgelegt. Für die Berechnung der RSET gibt es, vor allem bei der unbehinderten Begehung der Engstelle, kleiner Abweichungen der beiden Modelle. Jedoch sind unbehinderte Situationen bezüglich der Personensicherheit generell unkritischer als Stausituationen.

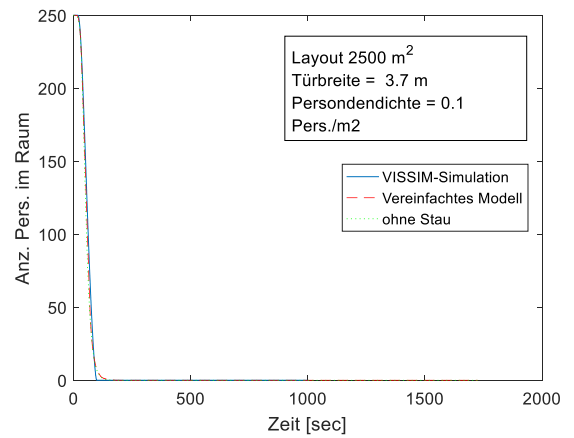
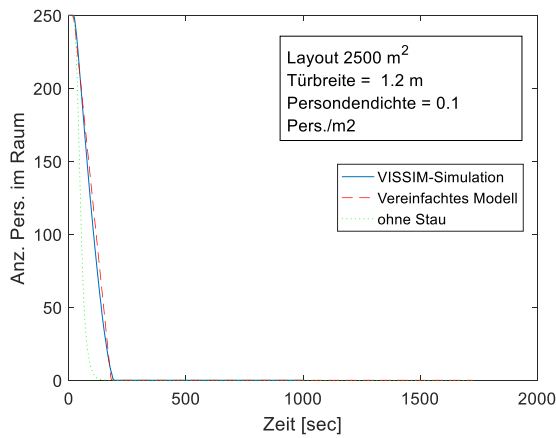
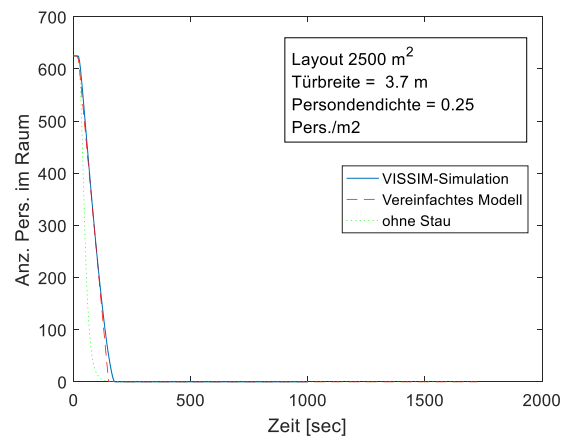
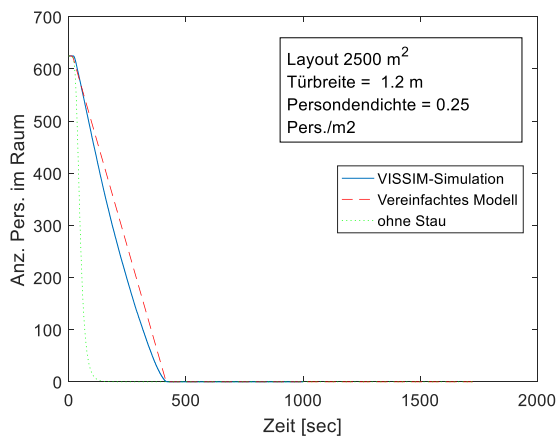
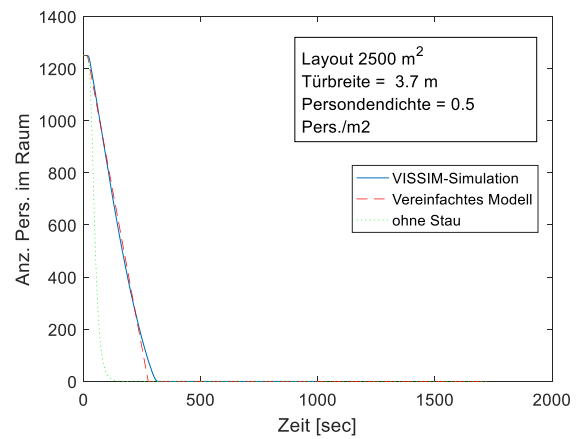
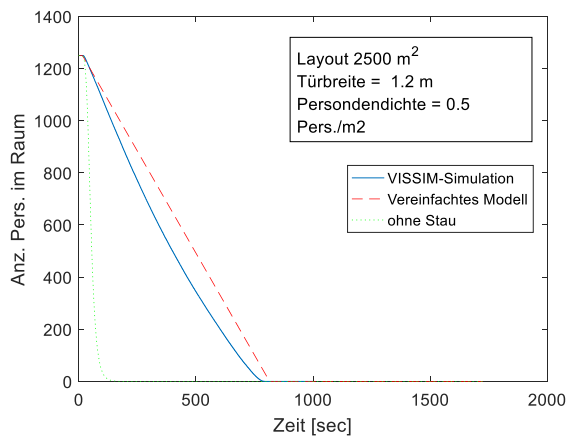


Abbildung 87: Vergleich Vereinfachtes Evakuationsmodelle und VISSIM-Simulation für verschiedene Situationen. Die grüne Linie bezeichnet den Fall, bei dem es zu keiner Stausituation kommt (extrem breite Ausgänge) und ist als Vergleichsgrösse zu betrachten.

A6 Probabilistische Parameter

Brandsimulation

Variable	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	Quelle / Bemerkungen
Brandentwicklungsgeschwindigkeit [kW/sec ²]	Lognormal	0.0236	0.03	[25]
Modellunsicherheit CFAST	Normal	1.04	0.14	[27]
Regressionsunsicherheit ASET	Normal	0	vgl. Tabelle 30	Deckt Unsicherheit bezüglich Wärmefreisetzung und Standort des Brandes ab.

Tabelle 31: Probabilistische Parameter Brandsimulation

Evakuierungssimulation

Variable	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	Quelle / Bemerkungen
Personendichte Non-Food [Pers./m ²]	– Gammaverteilung	0.020	0.019	Entspricht der statistischen Verteilung der Kategorie «Einkaufszentren»; vgl. Kapitel 3.5
Personendichte Supermärkte [Pers./m ²]	– Lognormalverteilung	0.029	0.025	Entspricht der statistischen Verteilung der Kategorie «Supermarkt_2400»; vgl. Kapitel 3.5
Personendichte Hochfrequente Filialen [Pers./m ²]	– Gammaverteilung	0.073	0.059	Entspricht der statistischen Verteilung der Kategorie «Hochfrequenz» (tail fit); vgl. Kapitel 3.5
Kapazität ebenerdiger Ausgänge [Pers./m/sec]	Normalverteilung	1.75	0.11	[19,38], Kapitel 6.2.6
Grenzpersonendichte für maximal ertragbarer Staudruck	Dreiecksverteilung	5.0	0.41	Untere Grenze 4.0 Pers./m ² Obere Grenze 6.0 Pers./m ² Kapitel 6.2.5
Alarmierungszeit [sec]	Exponentialverteilung	funktional abhängig von der Brandentwicklungsgeschwindigkeit und begrenzt durch 25% der ASET		Kapitel 6.2.1 Alarmierungszeiten werden pro Person zufällig realisiert
Pre-Evacuation Time [sec]	Lognormal	32.3	16.4	[19,29–31], Kapitel 6.2.2 Zufallszahlen werden pro Person realisiert
Gehgeschwindigkeit [m/s]	Weibull min	1.31	0.34	[34], Kapitel 6.2.3 Zufallszahlen werden pro Person realisiert
Standort der Person	Uniform	über die gesamte Fläche		Zufallszahlen werden pro Person realisiert

Tabelle 32: Probabilistische Parameter Evakuierungssimulation

A7 Ergebnisse der deterministischen Auswertung

Fläche [m²]	Bemessungs- grösse [Pers./m2]	Anz. Personen	Anzahl Ausgänge	Verfügbarkeit Ausgang	anrechenbare Gesamtbreite Ausgänge [m]	Quantilwert für Evaluation	Personendichte für Evaluation [Pers./m2]	ASET [sec]	RSET _{90%} [sec]	Max. erlaubte wartende Pers.	ASET/RSET- Kriterium	Staudruck- Kriterium	Sichere Evakuierung
648	0.10	65	2	n	1.8	Non-Food (99%)	0.099	167	140	230	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.10	125	2	n	2.1	Non-Food (99%)	0.099	215	166	235	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2500	0.10	250	2	n	2.4	Non-Food (99%)	0.099	275	216	239	erfüllt	erfüllt	erfüllt
3750	0.10	375	3	n	3.6	Non-Food (99%)	0.099	328	255	359	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.10	500	4	n	4.8	Non-Food (99%)	0.099	389	299	479	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.10	625	5	n	6.0	Non-Food (99%)	0.099	399	331	599	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.10	65	2	n-1	0.9	Non-Food (99%)	0.099	167	140	115	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.10	125	2	n-1	1.1	Non-Food (99%)	0.099	215	166	117	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2500	0.10	250	2	n-1	1.2	Non-Food (99%)	0.099	275	216	120	erfüllt	erfüllt	erfüllt
3750	0.10	375	3	n-1	2.4	Non-Food (99%)	0.099	328	255	239	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.10	500	4	n-1	3.6	Non-Food (99%)	0.099	389	299	359	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.10	625	5	n-1	4.8	Non-Food (99%)	0.099	399	331	479	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.15	97	2	n	1.8	Supermarkt (99%)	0.126	167	144	230	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.15	188	2	n	2.1	Supermarkt (99%)	0.126	215	173	235	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2500	0.15	375	2	n	2.4	Supermarkt (99%)	0.126	275	220	239	erfüllt	erfüllt	erfüllt
3750	0.15	563	3	n	3.6	Supermarkt (99%)	0.126	328	261	359	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.15	750	4	n	4.8	Supermarkt (99%)	0.126	389	312	479	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.15	938	5	n	6.0	Supermarkt (99%)	0.126	399	349	599	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.15	97	2	n-1	0.9	Supermarkt (99%)	0.126	167	144	115	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.15	188	2	n-1	1.1	Supermarkt (99%)	0.126	215	173	117	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2500	0.15	375	2	n-1	1.2	Supermarkt (99%)	0.126	275	220	120	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
3750	0.15	563	3	n-1	2.4	Supermarkt (99%)	0.126	328	261	239	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.15	750	4	n-1	3.6	Supermarkt (99%)	0.126	389	312	359	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.15	938	5	n-1	4.8	Supermarkt (99%)	0.126	399	349	479	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.30	194	2	n	2.1	Hochfrequent (99%)	0.286	167	161	235	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.30	375	2	n	2.4	Hochfrequent (99%)	0.286	215	188	239	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2500	0.30	750	2	n	4.5	Hochfrequent (99%)	0.286	275	241	273	erfüllt	erfüllt	erfüllt
3750	0.30	1'125	3	n	6.8	Hochfrequent (99%)	0.286	328	295	410	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.30	1'500	4	n	9.0	Hochfrequent (99%)	0.286	389	341	546	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.30	1'875	5	n	11.3	Hochfrequent (99%)	0.286	399	380	683	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.30	194	2	n-1	1.1	Hochfrequent (99%)	0.286	167	161	117	erfüllt	erfüllt	erfüllt

Fläche [m²]	Bemessungs- grösse [Pers./m2]	Anz. Personen	Anzahl Ausgänge	Verfügbarkeit Ausgang	anrechenbare Gesamtbreite Ausgänge [m]	Quantilwert für Evaluation	Personendichte für Evaluation [Pers./m2]	ASET [sec]	RSET _{90%} [sec]	Max. erlaubte wartende Pers.	ASET/RSET- Kriterium	Staudruck- Kriterium	Sichere Evakuierung
1250	0.30	375	2	n-1	1.2	Hochfrequent (99%)	0.286	215	224	120	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
2500	0.30	750	2	n-1	2.3	Hochfrequent (99%)	0.286	275	243	137	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
3750	0.30	1'125	3	n-1	4.5	Hochfrequent (99%)	0.286	328	295	273	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
5000	0.30	1'500	4	n-1	6.8	Hochfrequent (99%)	0.286	389	341	410	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
6250	0.30	1'875	5	n-1	9.0	Hochfrequent (99%)	0.286	399	380	546	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.50	324	2	n	2.4	Non-Food (99%)	0.099	167	140	239	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.50	625	2	n	3.8	Non-Food (99%)	0.099	215	166	261	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2500	0.50	1'250	2	n	7.5	Non-Food (99%)	0.099	275	216	321	erfüllt	erfüllt	erfüllt
3750	0.50	1'875	3	n	11.3	Non-Food (99%)	0.099	328	255	482	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.50	2'500	4	n	15.0	Non-Food (99%)	0.099	389	299	642	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.50	3'125	5	n	18.8	Non-Food (99%)	0.099	399	331	803	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.50	324	2	n-1	1.2	Non-Food (99%)	0.099	167	140	120	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.50	625	2	n-1	1.9	Non-Food (99%)	0.099	215	166	131	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2500	0.50	1'250	2	n-1	3.8	Non-Food (99%)	0.099	275	216	161	erfüllt	erfüllt	erfüllt
3750	0.50	1'875	3	n-1	7.5	Non-Food (99%)	0.099	328	255	321	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.50	2'500	4	n-1	11.3	Non-Food (99%)	0.099	389	299	482	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.50	3'125	5	n-1	15.0	Non-Food (99%)	0.099	399	331	642	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.50	324	2	n	2.4	Supermarkt (99%)	0.126	167	144	239	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.50	625	2	n	3.8	Supermarkt (99%)	0.126	215	173	261	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2500	0.50	1'250	2	n	7.5	Supermarkt (99%)	0.126	275	220	321	erfüllt	erfüllt	erfüllt
3750	0.50	1'875	3	n	11.3	Supermarkt (99%)	0.126	328	261	482	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.50	2'500	4	n	15.0	Supermarkt (99%)	0.126	389	312	642	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.50	3'125	5	n	18.8	Supermarkt (99%)	0.126	399	349	803	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.50	324	2	n-1	1.2	Supermarkt (99%)	0.126	167	144	120	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.50	625	2	n-1	1.9	Supermarkt (99%)	0.126	215	173	131	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2500	0.50	1'250	2	n-1	3.8	Supermarkt (99%)	0.126	275	220	161	erfüllt	erfüllt	erfüllt
3750	0.50	1'875	3	n-1	7.5	Supermarkt (99%)	0.126	328	261	321	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.50	2'500	4	n-1	11.3	Supermarkt (99%)	0.126	389	312	482	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.50	3'125	5	n-1	15.0	Supermarkt (99%)	0.126	399	349	642	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.50	324	2	n	2.4	Hochfrequent (99%)	0.286	167	161	239	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.50	625	2	n	3.8	Hochfrequent (99%)	0.286	215	188	261	erfüllt	erfüllt	erfüllt

Fläche [m²]	Bemessungs- grösse [Pers./m2]	Anz. Personen	Anzahl Ausgänge	Verfügbarkeit Ausgang	anrechenbare Gesamtbreite Ausgänge [m]	Quantilwert für Evaluation	Personendichte für Evaluation [Pers./m2]	ASET [sec]	RSET _{90%} [sec]	Max. erlaubte wartende Pers.	ASET/RSET- Kriterium	Staudruck- Kriterium	Sichere Evakuierung
2500	0.50	1'250	2	n	7.5	Hochfrequent (99%)	0.286	275	241	321	erfüllt	erfüllt	erfüllt
3750	0.50	1'875	3	n	11.3	Hochfrequent (99%)	0.286	328	295	482	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.50	2'500	4	n	15.0	Hochfrequent (99%)	0.286	389	341	642	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.50	3'125	5	n	18.8	Hochfrequent (99%)	0.286	399	380	803	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.50	324	2	n-1	1.2	Hochfrequent (99%)	0.286	167	161	120	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.50	625	2	n-1	1.9	Hochfrequent (99%)	0.286	215	188	131	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
2500	0.50	1'250	2	n-1	3.8	Hochfrequent (99%)	0.286	275	241	161	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
3750	0.50	1'875	3	n-1	7.5	Hochfrequent (99%)	0.286	328	295	321	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.50	2'500	4	n-1	11.3	Hochfrequent (99%)	0.286	389	341	482	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.50	3'125	5	n-1	15.0	Hochfrequent (99%)	0.286	399	380	642	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.10	65	2	n	1.8	Non-Food (100%)	0.218	167	155	230	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.10	125	2	n	2.1	Non-Food (100%)	0.218	215	184	235	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2500	0.10	250	2	n	2.4	Non-Food (100%)	0.218	275	238	239	erfüllt	erfüllt	erfüllt
3750	0.10	375	3	n	3.6	Non-Food (100%)	0.218	328	281	359	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.10	500	4	n	4.8	Non-Food (100%)	0.218	389	339	479	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.10	625	5	n	6.0	Non-Food (100%)	0.218	399	369	599	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.10	65	2	n-1	0.9	Non-Food (100%)	0.218	167	155	115	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.10	125	2	n-1	1.1	Non-Food (100%)	0.218	215	199	117	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
2500	0.10	250	2	n-1	1.2	Non-Food (100%)	0.218	275	331	120	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
3750	0.10	375	3	n-1	2.4	Non-Food (100%)	0.218	328	281	239	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
5000	0.10	500	4	n-1	3.6	Non-Food (100%)	0.218	389	339	359	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
6250	0.10	625	5	n-1	4.8	Non-Food (100%)	0.218	399	369	479	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
648	0.15	97	2	n	1.8	Supermarkt (100%)	0.438	167	170	230	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt
1250	0.15	188	2	n	2.1	Supermarkt (100%)	0.438	215	200	235	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
2500	0.15	375	2	n	2.4	Supermarkt (100%)	0.438	275	331	239	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
3750	0.15	563	3	n	3.6	Supermarkt (100%)	0.438	328	335	359	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
5000	0.15	750	4	n	4.8	Supermarkt (100%)	0.438	389	368	479	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
6250	0.15	938	5	n	6.0	Supermarkt (100%)	0.438	399	421	599	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt

Fläche [m²]	Bemessungs- grösse [Pers./m2]	Anz. Personen	Anzahl Ausgänge	Verfügbarkeit Ausgang	anrechenbare Gesamtbreite Ausgänge [m]	Quantilwert für Evaluation	Personendichte für Evaluation [Pers./m2]	ASET [sec]	RSET _{90%} [sec]	Max. erlaubte wartende Pers.	ASET/RSET- Kriterium	Staudruck- Kriterium	Sichere Evakuierung
648	0.15	97	2	n-1	0.9	Supermarkt (100%)	0.438	167	232	115	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
1250	0.15	188	2	n-1	1.1	Supermarkt (100%)	0.438	215	370	117	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
2500	0.15	375	2	n-1	1.2	Supermarkt (100%)	0.438	275	633	120	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
3750	0.15	563	3	n-1	2.4	Supermarkt (100%)	0.438	328	484	239	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
5000	0.15	750	4	n-1	3.6	Supermarkt (100%)	0.438	389	437	359	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
6250	0.15	938	5	n-1	4.8	Supermarkt (100%)	0.438	399	421	479	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
648	0.30	194	2	n	2.1	Hochfrequent (100%)	0.743	167	179	235	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
1250	0.30	375	2	n	2.4	Hochfrequent (100%)	0.743	215	281	239	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
2500	0.30	750	2	n	4.5	Hochfrequent (100%)	0.743	275	303	273	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
3750	0.30	1'125	3	n	6.8	Hochfrequent (100%)	0.743	328	341	410	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
5000	0.30	1'500	4	n	9.0	Hochfrequent (100%)	0.743	389	409	546	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
6250	0.30	1'875	5	n	11.3	Hochfrequent (100%)	0.743	399	467	683	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
648	0.30	194	2	n-1	1.1	Hochfrequent (100%)	0.743	167	325	117	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
1250	0.30	375	2	n-1	1.2	Hochfrequent (100%)	0.743	215	537	120	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
2500	0.30	750	2	n-1	2.3	Hochfrequent (100%)	0.743	275	575	137	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
3750	0.30	1'125	3	n-1	4.5	Hochfrequent (100%)	0.743	328	441	273	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
5000	0.30	1'500	4	n-1	6.8	Hochfrequent (100%)	0.743	389	409	410	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
6250	0.30	1'875	5	n-1	9.0	Hochfrequent (100%)	0.743	399	467	546	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
648	0.50	324	2	n	2.4	Non-Food (100%)	0.218	167	155	239	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.50	625	2	n	3.8	Non-Food (100%)	0.218	215	184	261	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2500	0.50	1'250	2	n	7.5	Non-Food (100%)	0.218	275	238	321	erfüllt	erfüllt	erfüllt
3750	0.50	1'875	3	n	11.3	Non-Food (100%)	0.218	328	281	482	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.50	2'500	4	n	15.0	Non-Food (100%)	0.218	389	339	642	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.50	3'125	5	n	18.8	Non-Food (100%)	0.218	399	369	803	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.50	324	2	n-1	1.2	Non-Food (100%)	0.218	167	155	120	erfüllt	erfüllt	erfüllt
1250	0.50	625	2	n-1	1.9	Non-Food (100%)	0.218	215	184	131	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2500	0.50	1'250	2	n-1	3.8	Non-Food (100%)	0.218	275	238	161	erfüllt	erfüllt	erfüllt

Fläche [m²]	Bemessungs- grösse [Pers./m2]	Anz. Personen	Anzahl Ausgänge	Verfügbarkeit Ausgang	anrechenbare Gesamtbreite Ausgänge [m]	Quantilwert für Evaluation	Personendichte für Evaluation [Pers./m2]	ASET [sec]	RSET _{90%} [sec]	Max. erlaubte wartende Pers.	ASET/RSET- Kriterium	Staudruck- Kriterium	Sichere Evakuierung
3750	0.50	1'875	3	n-1	7.5	Non-Food (100%)	0.218	328	281	321	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.50	2'500	4	n-1	11.3	Non-Food (100%)	0.218	389	339	482	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.50	3'125	5	n-1	15.0	Non-Food (100%)	0.218	399	369	642	erfüllt	erfüllt	erfüllt
648	0.50	324	2	n	2.4	Supermarkt (100%)	0.438	167	170	239	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt
1250	0.50	625	2	n	3.8	Supermarkt (100%)	0.438	215	199	261	erfüllt	erfüllt	erfüllt
2500	0.50	1'250	2	n	7.5	Supermarkt (100%)	0.438	275	259	321	erfüllt	erfüllt	erfüllt
3750	0.50	1'875	3	n	11.3	Supermarkt (100%)	0.438	328	309	482	erfüllt	erfüllt	erfüllt
5000	0.50	2'500	4	n	15.0	Supermarkt (100%)	0.438	389	368	642	erfüllt	erfüllt	erfüllt
6250	0.50	3'125	5	n	18.8	Supermarkt (100%)	0.438	399	421	803	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt
648	0.50	324	2	n-1	1.2	Supermarkt (100%)	0.438	167	181	120	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
1250	0.50	625	2	n-1	1.9	Supermarkt (100%)	0.438	215	220	131	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
2500	0.50	1'250	2	n-1	3.8	Supermarkt (100%)	0.438	275	259	161	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
3750	0.50	1'875	3	n-1	7.5	Supermarkt (100%)	0.438	328	309	321	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
5000	0.50	2'500	4	n-1	11.3	Supermarkt (100%)	0.438	389	368	482	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
6250	0.50	3'125	5	n-1	15.0	Supermarkt (100%)	0.438	399	421	642	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt
648	0.50	324	2	n	2.4	Hochfrequent (100%)	0.743	167	179	239	nicht erfüllt	erfüllt	nicht erfüllt
1250	0.50	625	2	n	3.8	Hochfrequent (100%)	0.743	215	215	261	erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
2500	0.50	1'250	2	n	7.5	Hochfrequent (100%)	0.743	275	276	321	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
3750	0.50	1'875	3	n	11.3	Hochfrequent (100%)	0.743	328	341	482	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
5000	0.50	2'500	4	n	15.0	Hochfrequent (100%)	0.743	389	409	642	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
6250	0.50	3'125	5	n	18.8	Hochfrequent (100%)	0.743	399	467	803	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
648	0.50	324	2	n-1	1.2	Hochfrequent (100%)	0.743	167	287	120	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
1250	0.50	625	2	n-1	1.9	Hochfrequent (100%)	0.743	215	353	131	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
2500	0.50	1'250	2	n-1	3.8	Hochfrequent (100%)	0.743	275	357	161	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
3750	0.50	1'875	3	n-1	7.5	Hochfrequent (100%)	0.743	328	341	321	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
5000	0.50	2'500	4	n-1	11.3	Hochfrequent (100%)	0.743	389	409	482	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt
6250	0.50	3'125	5	n-1	15.0	Hochfrequent (100%)	0.743	399	467	642	nicht erfüllt	nicht erfüllt	nicht erfüllt

A8 Kostenzusammenstellung

A8.1 Grundannahmen

Zinssatz 3%

Fluchttüre

		Investitionskosten [CHF]			Laufzeit [Jahre]	annualisierte Kosten [CHF / Jahr]		
		min	mittel	max		min	mittel	max
Materialkosten	pro Meter Türbreite	2'000	5'600	10'000	25	115	322	574
Umsatzeinbussen	pro qm	500	1'000	1'500	50	19	39	58

Aussentreppe

		Investitionskosten [CHF]			Laufzeit [Jahre]	annualisierte Kosten [CHF / Jahr]		
		min	mittel	max		min	mittel	max
Kostenzuwachs / - abnahme von jeweils 10% (min), 15% (mittel) und 20% (max) pro 20 cm zusätzlicher/reduzierter Breite bezogen auf Kosten für 1.2 m Breite Aussentreppe (Daten aus Preisrechner ermittelt)								
Materialkosten	1.2 m pro Ges.	8'000	12'000	18'000	50	311	466	700
	2.4 m pro Ges.	12'800	22'800	39'600	50	497	886	1'539
Bauland	pro qm	500	1'000	1'500	50	19	39	58

Treppenhaus

		Investitionskosten [CHF]			Laufzeit [Jahre]	annualisierte Kosten [CHF / Jahr]		
		min	mittel	max		min	mittel	max
Materialkosten	pro qm pro Ges.	2'000	3'234	8'000	50	78	126	311
Umsatzeinbussen	pro qm	500	1'000	1'500	50	19	39	58
Bauland	pro qm	500	1'000	1'500	50	19	39	58

Sprinkler

		Investitionskosten [CHF]			Laufzeit [Jahre]	annualisierte Kosten [CHF / Jahr]		
		min	mittel	max		min	mittel	max
Investitionskosten	pro qm	20	30	40	50	0.8	1.2	1.6
Wartung und Instandhaltung	pro Anlage					500	1'000	1'500

A8.2 Kostenzusammenstellung

Berücksichtigte Kostenbestandteile als Summe der annualisierten Kosten der Grundannahmen unter Berücksichtigung der relativen Grössen (pro Meter Türbreite, etc.)

- Flucht über Fluchttüren (ebenerdig):
 - Materialkosten
 - Umsatzeinbussen wegen nicht nutzbarer Fläche
- Flucht über Aussentreppe:
 - Kosten Fluchttüre (Materialkosten und Umsatzeinbussen)
 - Materialkosten Aussentreppe
 - Bauland für Aussentreppe
- Flucht über Treppenhaus (1 Geschoss):
 - Kosten Fluchttüre (Materialkosten und Umsatzeinbussen)
 - Materialkosten Treppenhaus
 - Umsatzeinbussen Treppenhaus
 - Bauland für Treppenhaus

- Flucht über Treppenhaus (viele Geschosse --> Baulandkauf verteilt sich auf alle Geschosse und wird vernachlässigt)
 - Kosten Fluchttüre (Materialkosten und Umsatzeinbussen)
 - Materialkosten Treppenhaus
 - Umsatzeinbussen Treppenhaus wegen nicht nutzbarer Fläche (Grundfläche)

Beispiel Kostenzusammenstellung für annualisierte Kosten Aussentreppe (mittel, 1.8 m Fluchtwegbreite)²⁹:

Kostenbestandteil		
Kosten Fluchttüre		786.30 CHF
Materialkosten	322 CHF/m x 1.8 m =	579.60 CHF
Umsatzeinbussen	39 CHF/m ² x 5.3 m ² (nicht nutzbare Fläche innen) =	206.70 CHF
Kosten Aussentreppe		2'422.00 CHF
Materialkosten Aussentreppe	466 CHF * (1 - 15% * (1.2 m – 2.4 m ⁽³⁰⁾) / (0.2 m)) =	885.40 CHF
Bauland Aussentreppe	für 39 CHF / m ² x 39.4 m ² (benötigte Grundfläche Treppen) =	1'536.60 CHF
Total		3'208.30 CHF

29 Hinweis: Im Beispiel werden mit den gerundeten Werten gerechnet. Die Tabelle auf der nächsten Seite stammt aus einer Excel-Berechnung. Dort wird mit ungerundeten Werten gerechnet. Dadurch entstehen kleiner Abweichungen zum Beispiel.

30 Fluchtwegbreite (Treppe)

Annualisierte Kosten

Fluchtwegbreite (ebenerdig)	Fluchtwegbreite (Treppe)	Nicht Nutzbare Fläche (innen)	Benötigte Grundfläche (Treppen)	annualisierte Kosten Fluchttüre (ebenerdige Flucht) [CHF / Jahr]			annualisierte Kosten Aussentreppe (1 Geschoss) [CHF / Jahr]			annualisierte Kosten Treppenhaus (1 Geschoss) [CHF / Jahr]			annualisierte Kosten Treppenhaus pro Geschoss (viele Geschosse) [CHF / Jahr]		
[m]	[m]	[m2]	[m2]	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max
0.9	1.2	2.8	13.9	157	397	677	739	1'405	2'190	1'783	3'234	6'641	1'512	2'692	5'827
1.2	1.6	3.5	21.2	206	523	894	990	1'951	3'107	2'673	4'827	9'940	2'262	4'004	8'706
1.5	2.0	4.4	29.6	257	652	1'116	1'269	2'551	4'104	3'714	6'683	13'791	3'138	5'531	12'063
1.8	2.4	5.3	39.4	310	786	1'344	1'574	3'204	5'181	4'906	8'804	18'195	4'140	7'272	15'897
2.1	2.8	6.4	50.5	365	922	1'576	1'905	3'910	6'337	6'249	11'188	23'152	5'268	9'227	20'210
2.4	3.2	7.5	62.8	421	1'063	1'814	2'263	4'669	7'574	7'743	13'836	28'661	6'522	11'396	25'000
2.7	3.6	8.7	76.4	479	1'206	2'057	2'648	5'482	8'890	9'388	16'749	34'722	7'903	13'779	30'268
3.0	4.0	10.0	91.3	539	1'353	2'306	3'059	6'347	10'287	11'183	19'925	41'336	9'409	16'376	36'014

Barwert (T = 0 mit Lebensdauer von 50 Jahren)

Fluchtwegbreite (ebenerdig)	Fluchtwegbreite (Treppe)	Nicht Nutzbare Fläche (innen)	Benötigte Grundfläche (Treppen)	annualisierte Kosten Fluchttüre (ebenerdige Flucht) [CHF / Jahr]			annualisierte Kosten Aussentreppe (1 Geschoss) [CHF / Jahr]			annualisierte Kosten Treppenhaus (1 Geschoss) [CHF / Jahr]			annualisierte Kosten Treppenhaus pro Geschoss (viele Geschosse) [CHF / Jahr]		
[m]	[m]	[m2]	[m2]	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max
0.9	1.2	2.8	13.9	4'037	10'202	17'431	19'011	36'150	56'353	45'882	83'207	170'862	38'908	69'259	149'939
1.2	1.6	3.5	21.2	5'306	13'450	23'011	25'485	50'207	79'948	68'779	124'189	255'745	58'200	103'031	224'009
1.5	2.0	4.4	29.6	6'620	16'787	28'727	32'644	65'634	105'597	95'561	171'960	354'844	80'738	142'313	310'374
1.8	2.4	5.3	39.4	7'979	20'214	34'577	40'488	82'431	133'302	126'229	226'520	468'158	106'521	187'104	409'033
2.1	2.8	6.4	50.5	9'383	23'732	40'562	49'016	100'598	163'061	160'781	287'870	595'687	135'548	237'404	519'988
2.4	3.2	7.5	62.8	10'833	27'339	46'683	58'230	120'134	194'875	199'218	356'010	737'431	167'821	293'214	643'238
2.7	3.6	8.7	76.4	12'327	31'036	52'938	68'129	141'041	228'745	241'541	430'939	893'390	203'338	354'534	778'783
3.0	4.0	10.0	91.3	13'866	34'824	59'328	78'713	163'318	264'669	287'748	512'657	1'063'563	242'101	421'363	926'622

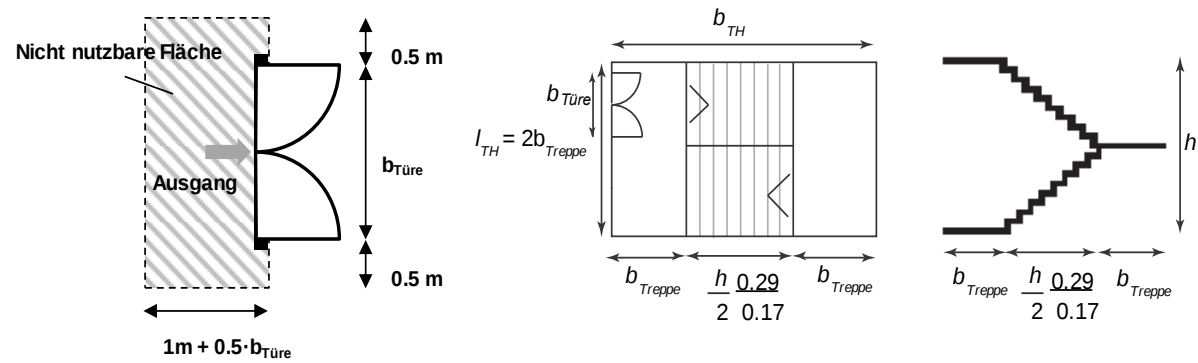
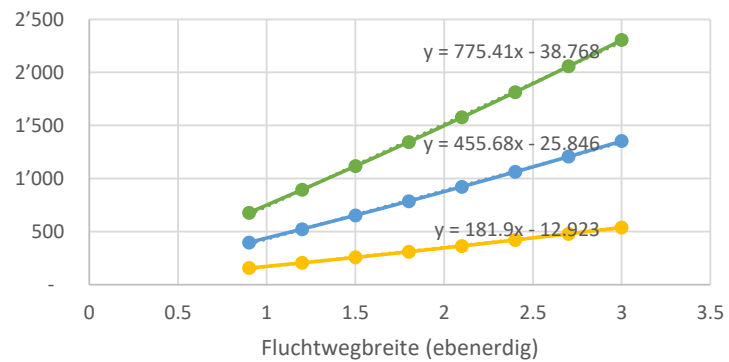
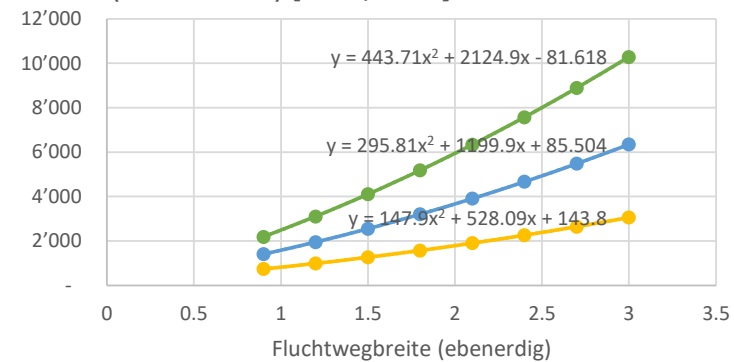


Abbildung 88: Verwendeter Grundriss / Aufriss für die Kostenschätzungen

annualisierte Kosten Fluchttüre (ebenerdige Flucht) [CHF / Jahr]



annualisierte Kosten Aussentreppe (1 Geschoss) [CHF / Jahr]



annualisierte Kosten Treppenhaus (1 Geschoss) [CHF / Jahr]

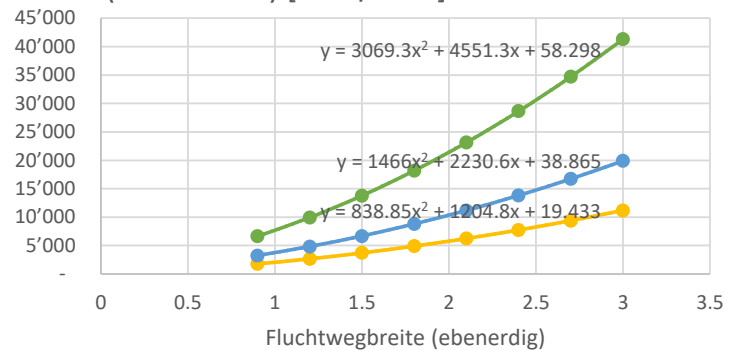
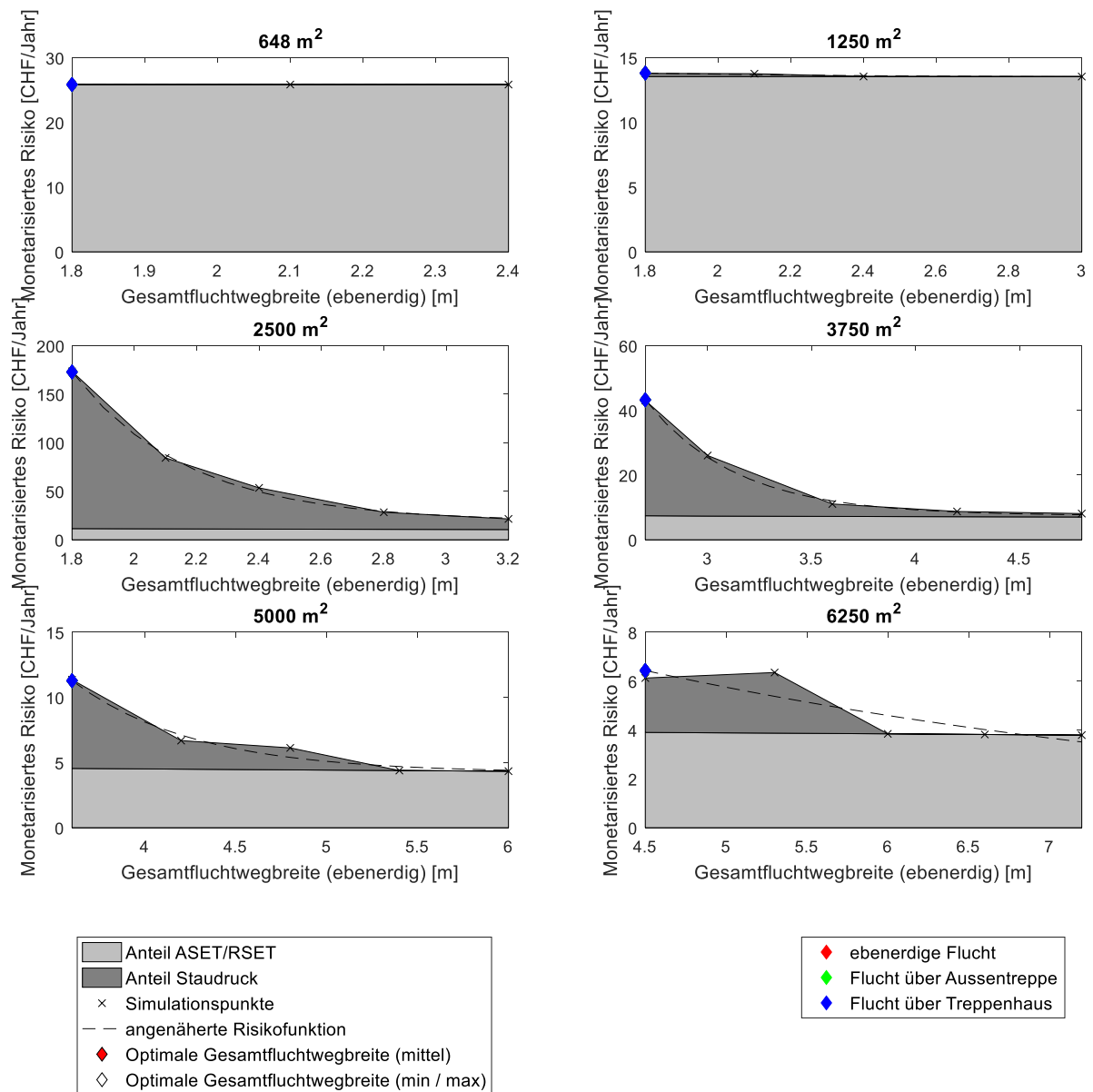


Abbildung 89: Kostenfunktionen der annualisierten Kosten in Abhängigkeit der Fluchtwegbreite (ebenerdig) für verschiedene Fluchttypen.

A9 Risikofunktionen und optimale Gesamtfluchtwegbreiten

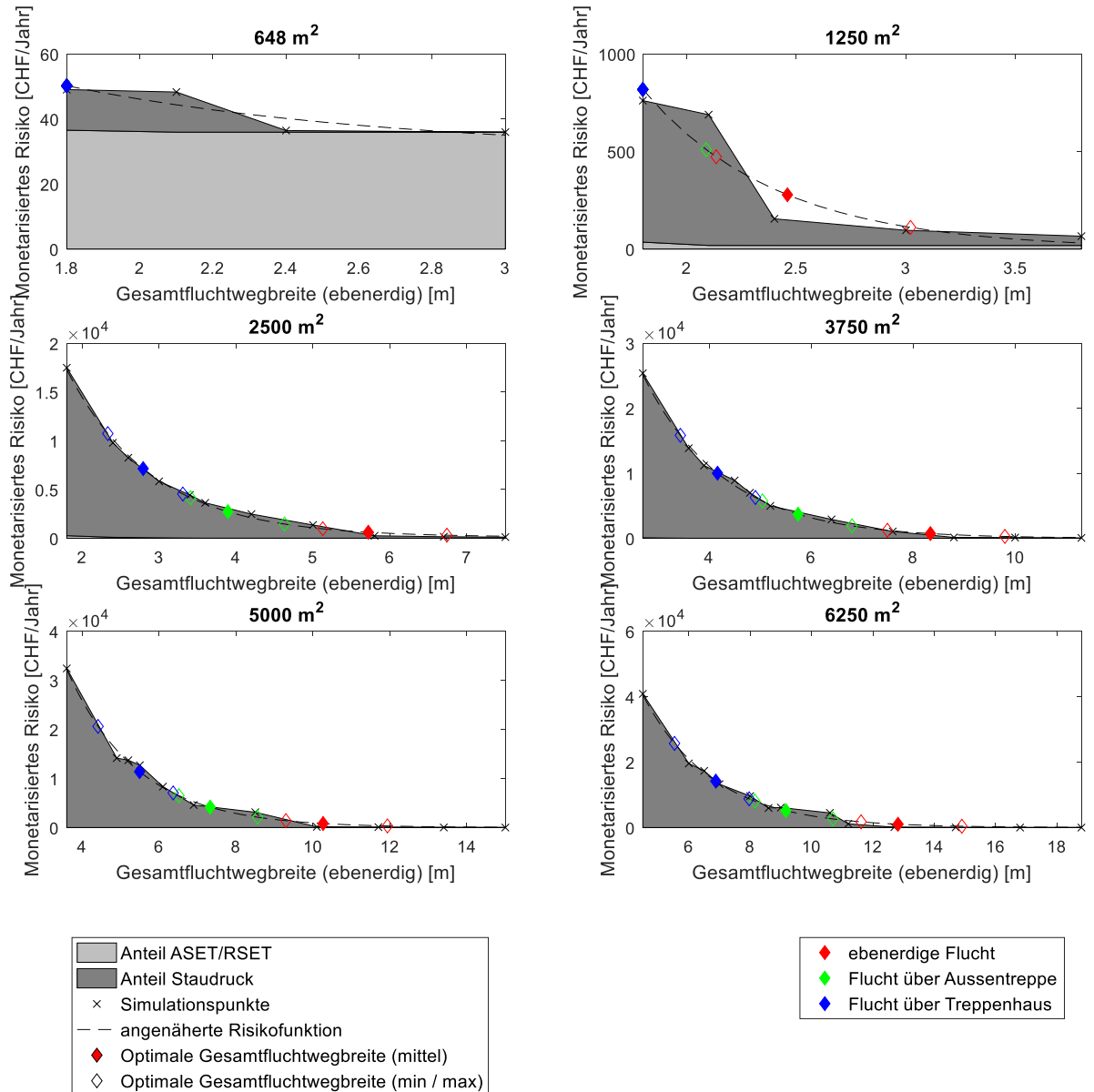
Non-Food-Verkaufsgeschäfte

(Wenn ein einzelner blauer Punkt bei der kleinsten Breite abgebildet ist, liegen die anderen Punkte darunter)



Supermärkte

(Wenn ein einzelner blauer Punkt bei der kleinsten Breite abgebildet ist, liegen die anderen Punkte darunter)



Hochfrequente Supermärkte

(Wenn ein einzelner blauer Punkt bei der kleinsten Breite abgebildet ist, liegen die anderen Punkte darunter)

