



Fachgutachten zu Fluchtwegen in Arbeitsstätten – Einfluss von Wegbreite, Treppen, Türen und Einengungen auf die Entfluchtung

baua: Bericht

A. Kneidl
R. Könnecke

Fachgutachten zu Fluchtwegen in Arbeitsstätten – Einfluss von Wegbreite, Treppen, Türen und Einengungen auf die Entfluchtung

2., überarbeitete Auflage 2020
Dortmund/Berlin/Dresden

Diese Veröffentlichung ist das „Fachgutachten zu Fluchtwegen in Arbeitsstätten – Einfluss von Wegbreite, Treppen, Türen und Einengungen auf die Entfluchtung“ im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Die 2. Auflage wurde um den Anhang 2 „Ergänzung zu Szenario 4: Vertikale Entfluchtung“ erweitert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor/der Autorin.



IST GmbH



Autor/Autorin: Dr. Angelika Kneidl, accu:rate GmbH
Dr. Rainer Könnecke, IST GmbH

Projektleitung: Dr. Kersten Bux
Stephan Gabriel
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Titelbild: phochi/iStock.com

Umschlaggestaltung: Susanne Graul
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund
Postanschrift: Postfach 17 02 02, 44061 Dortmund
Telefon 0231 9071-2071
Telefax 0231 9071-2070
E-Mail info-zentrum@buaa.bund.de
Internet www.buaa.de

Berlin: Nöldnerstraße 40 – 42, 10317 Berlin
Telefon 030 51548-0
Telefax 030 51548-4170

Dresden: Fabricestraße 8, 01099 Dresden
Telefon 0351 5639-50
Telefax 0351 5639-5210

Die Inhalte der Publikation wurden mit größter Sorgfalt erstellt und entsprechen dem aktuellen Stand der Wissenschaft. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte übernimmt die BAuA jedoch keine Gewähr.

Nachdruck und sonstige Wiedergabe sowie Veröffentlichung, auch auszugsweise, nur mit vorheriger Zustimmung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.



doi:10.21934/buaa:bericht20200116 (online)

www.buaa.de/dok/8826778

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzreferat	5
Abstract	6
1 Einleitung	7
1.1 Hintergrund	7
2 Aufgabenbeschreibung und Umfang	8
3 Vorgehensweise	10
3.1 Modellierung von Personenströmen	11
3.1.1 Das Personenräumungsprogramm ASERI	12
3.1.2 Das Personenräumungsprogramm crowd:it	16
4 Ergebnisse	19
4.1 Stand von Vorschriften und Regeln	19
4.1.1 Musterbauordnung (MBO) [27]	19
4.1.2 Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättVO) [28]	19
4.1.3 Muster-Schulbau-Richtlinie – MSchulbauR	20
4.1.4 Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) (§ 9 Abs. 3) [33]	21
4.1.5 Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) (§ 4 Abs. 4) [31]	21
4.1.6 Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR) [29][30]	21
4.1.7 Gültige Rechtsvorschriften in Österreich	26
4.1.8 Zusammenfassung und Vergleich deutscher und österreichischer Rechtsvorschriften	28
4.2 Untersuchte Szenarien	30
4.2.1 Begriffsklärung	30
4.2.2 Szenario 1: Einfluss von Einengungen in Fluchtwegen auf die Entfluchtung	32
4.2.3 Szenario 2: Einfluss von Treppen auf die Entfluchtung	49
4.2.4 Szenario 3: Zusammenwirken von Einengungen und Treppen	56
4.2.5 Szenario 4: Vertikale Entfluchtung	62
4.3 Ergebnisse	80
4.4 Zusammenfassung	82
Literaturverzeichnis	83
Anhang 1 Szenario Schulgebäude	87
Anhang 2 Ergänzung zu Szenario 4: Vertikale Entfluchtung	104

Fachgutachten zu Fluchtwegen in Arbeitsstätten – Einfluss von Wegbreite, Treppen, Türen und Einengungen auf die Entfluchtung

Kurzreferat

Zur Gewährleistung von Sicherheit und Schutz der Gesundheit der Beschäftigten beim Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten muss der Arbeitgeber Vorkehrungen treffen, damit sich die Beschäftigten bei Gefahr unverzüglich in Sicherheit bringen und schnell gerettet werden können. Ein wesentlicher Faktor ist dabei die Gestaltung der Fluchtwege und Notausgänge. Deren Anzahl, Anordnung und Abmessung wird in Deutschland über die Technische Regel für Arbeitsstätten ASR A2.3 geregelt. Dabei stammen die dort enthaltenen Anforderungen z. T. noch aus früheren Richtlinien. Der Ausschuss für Arbeitsstätten (ASTA) führt deswegen eine Prüfung und Fortschreibung der ASR A2.3 durch. Im Rahmen dieser Überarbeitung wurde in vorliegendem Gutachten mithilfe von zwei unabhängigen mikroskopischen Simulationsmodellen untersucht, inwieweit Einengungen und Treppen auf Fluchtwegen sowie eine zeitlich versetzte Nutzung der Fluchtwege die Entfluchtungszeit beeinflussen.

Als ein Ergebnis der Studie ist festzuhalten, dass eine geringe beidseitige Einengung von bis zu 15 cm über eine kurze Länge in horizontalen Fluchtwegen keinen signifikanten Einfluss auf die Entfluchtungszeit hat. Bei Fluchtwegen, die vertikale Fluchtwegelemente (Treppen) enthalten, stellen diese die flussverringende Komponente dar und bestimmen die Entfluchtungszeit. Daher sind Einengungen wie Türen vor Treppen vernachlässigbar, sofern sich deren Breite innerhalb des zulässigen Bereichs befindet. Weiter konnte festgestellt werden, dass eine zeitlich versetzte Alarmierung die Entfluchtung der betroffenen Ebenen positiv beeinflusst. Um die dafür erforderlichen Fluchtwegbreiten zu definieren und in Abhängigkeit der Anzahl der Personen pro Ebene zu setzen, wurden weitere Untersuchungen ausgeführt.

Als weiteres Szenario wurde ein Schulgebäude betrachtet, um zu untersuchen, welchen Einfluss die Breite von Unterrichtsraumtüren auf die Entfluchtungszeit hat. Dazu wurde ein Schulgebäude herangezogen, das den Vorschriften der Muster-Schulbau-Richtlinie (MSchulbauR) entspricht. Die Simulationen zeigen deutlich, dass die Breite der Unterrichtsraumtüren in den Varianten 0,90 m und 1,20 m keinen signifikanten Einfluss auf die Entfluchtungszeit der Schule hat, vielmehr stellt die Breite der Treppen den dominierenden Kapazitätsengpass dar.

Schließlich konnte belegt werden, dass der Sprung in der Tabelle 1 der ASR A2.3 Punkt 5 Absatz 3 von 1,00 m Fluchtwegbreite für bis zu 20 Personen auf 1,20 m Fluchtwegbreite für bis zu 200 Personen die in Experimenten bereits nachgewiesene Korrelation zwischen Anzahl Personen und notwendiger Fluchtwegbreite nicht widerspiegelt. Es wird daher empfohlen, diese Korrelation auch in der ASR A2.3 abzubilden.

Schlagwörter:

Arbeitsstätte, Schule, Fluchtwege, Türen, Treppen, Personenstromsimulation, Entfluchtung

Expert report on the escape routes in workplaces – influence of path width, stairs, doors and restrictions on the evacuation

Abstract

For guaranteeing employee health and safety in the workplace, employers are required to implement precautions, which ensure that workers are brought to safety immediately in the case of emergencies. Here, the design of escape routes and emergency exits is paramount. In Germany, their number, locations and dimensions are regulated by the Technical Rules for Workplaces ASR A2.3. Some of the requirements contained therein are derived from earlier guidelines. The Committee for Workplaces (ASTA) therefore is currently examining and revising ASR A2.3. As part of the revision, two independent microscopic simulation models are utilized to investigate the extent to which narrowing escape routes, stairways, and the timely staggering of evacuations influence evacuation time.

The study reports that a small narrowing on both sides of an escape route, which is at most 15 cm wide over a short length in horizontal routes has no significant influence on the escape time. Moreover, escape routes which include vertical elements (stairs) are influenced by the stairs only. That is, employee flow is reduced by the stairs alone and any narrowing of the escape route is negligible, provided its dimensions lie within permissible limits. It was also found that a delayed alarm has a positive effect on the evacuation of affected floors. In order to define the necessary escape route widths and to set them depending on the number of people per level, further investigations were carried out.

School buildings were also investigated to examine the influence of classroom door width on evacuation time. A school that is compliant with the regulations of the Model School Building Directive (MSchulbauR) was used. The simulations clearly show that changing the width of classroom doors between 0.90 m and 1.20 m has no significant influence on school evacuation times. Instead, the width of the stairs was shown to be the biggest factor for limiting evacuation capacity.

Finally, it was possible to prove that the jump contained in Table 1 of ASR A2.3 Point 5 Paragraph 3 from an escape route with of 1.00 m for up to 20 people to a width of 1.20 m for up to 200 people does not reflect the correlation between the number of people and the necessary escape route width already proven in experiments. We recommend mapping this correlation in ASR A2.3.

Key words:

Workplace, school, escape routes, doors, stairs, flow simulation, evacuation

1 Einleitung

Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) hat vor dem Hintergrund einer Überarbeitung der ASR A2.3 "Fluchtwege und Notausgänge, Flucht- und Rettungsplan" die Erstellung eines Gutachtens zu „Fluchtwege in Arbeitsstätten – Einfluss von Breite, Treppen, Türen und Einengungen auf die Entfluchtung“ in Auftrag gegeben. Ziel dieses Gutachtens ist es, eine Aussage über Einflussfaktoren auf Fluchtwege zu treffen, die die Räumungszeit beeinflussen. Als Werkzeug werden hierfür mikroskopische Personenstromsimulationen eingesetzt und zum Vergleich makroskopische Modellrechnungen durchgeführt, sowie bisherige Studien und Daten zusammengetragen.

1.1 Hintergrund

Zur Gewährleistung von Sicherheit und Schutz der Gesundheit der Beschäftigten beim Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten muss der Arbeitgeber Vorkehrungen treffen, dass die Beschäftigten sich bei Gefahr unverzüglich in Sicherheit bringen und schnell gerettet werden können. Ein wesentlicher Faktor ist dabei die Gestaltung der Fluchtwege und Notausgänge. Deren Anzahl, Anordnung und Abmessungen wird in Deutschland über die Technische Regel für Arbeitsstätten ASR A2.3 (Ausgabe August 2007) [29] geregelt. Dabei rühren die dort enthaltenen Anforderungen z. T. noch von früheren Richtlinien (z. B. ASR 10/1 Ausgabe September 1985, ASR 17/1.2 Ausgabe Januar 1988) her. Der Ausschuss für Arbeitsstätten (ASTA) hat deswegen eine Prüfung und ggf. Fortschreibung der ASR A2.3 beschlossen. Währenddessen sind einige Fragen aufgetaucht, die innerhalb der Projektgruppe nicht beantwortet werden konnten. Dieses Gutachten hat zum Ziel, Aussagen zu folgenden Fragestellungen zu treffen:

1. Welchen Einfluss haben Türen sowie Einengungen bei horizontalen Fluchtwegen?
2. Welchen Einfluss hat eine Treppe im Verlauf eines Fluchtweges auf die Entfluchtungsrate und wie ist dieser Einfluss im Vergleich zur Fluchtwegbreite auf die Entfluchtungsrate zu werten?
3. Wie wirkt sich bei gleichzeitiger Alarmierung die zeitlich versetzte Nutzung der Fluchtwege auf die erforderliche Fluchtwegbreite aus (insbesondere bei mehrgeschossigen Gebäuden)?
4. Welche Fluchtwegbreiten sind in Abhängigkeit der Anzahl von Personen, die auf einen Fluchtweg angewiesen sind, anzusetzen?

2 Aufgabenbeschreibung und Umfang

Ziel des Fachgutachtens ist es, Antworten zum Thema Fluchtwege und Notausgänge in Arbeitsstätten zu liefern, deren Gestaltung, Anzahl, Anordnung und Abmessungen sowie Einflüsse von einengenden Elementen (wie bspw. Türzargen, Heizungen) zu bewerten ist. Zur Untersuchung der Einflüsse von Breiten, Treppen, Türen sowie Einengungen bei Entfluchtungen kommen detaillierte Parameterstudien mit zwei verschiedenen und voneinander unabhängigen Individualmodellen crowd:it [1] und ASERI [2] zum Einsatz, die als raumkontinuierliche mikroskopische Personenstrommodelle in der Lage sind, kleinskalige geometrische Designvariationen abzubilden. Zudem werden zu Vergleichszwecken Berechnungen nach dem hydraulischen Ansatz von Predtetschenski und Milinski [38] durchgeführt. Die Resultate der Berechnungen werden mit dem Stand von Vorschriften und Regeln der Technik verglichen, wie sie zum Beispiel im Beitrag von M. Schleich auf den Braunschweiger Brandschutztagen im September zum Stand der Normung DIN 18009 Teil 2: Räumungssimulationen und Personensicherheit ausgeführt wurden [53].

Ziel dabei ist es, belegbare Ergebnisse für die Gestaltung von Fluchtwegen, insbesondere für die Fluchtwegbreiten zu erarbeiten. Im Rahmen dessen sollen insbesondere kleine und mittlere Unternehmen die vorgeschlagenen Lösungen abbilden können. Der Fokus der Untersuchungen von Fluchtwegbreiten liegt vorwiegend auf Auswirkungen bei der Heranziehung der unteren Grenzwerte der Vorgaben in Vorschriften und Regeln.

In diesem Gutachten wird untersucht, welche Größen einen wesentlichen Einfluss auf die Entfluchtungszeiten haben.

Die zu untersuchenden Größen wurden vom Auftraggeber auf folgende Größen priorisiert:

- Türbreiten sowie Einengungen in Fluchtwegen,
- Steigungsverhältnis von Treppen,
- Treppen(-geometrie),
- Anzahl von Ebenen und Personen, die ausschlaggebend sind, bis sich ein zeitweilig stationärer Gleichgewichtszustand einstellt.

Um die Größen in einem realistischen Umfeld zu untersuchen, sollen die Szenarien einen bürotypischen Grundriss aufweisen (Kombinutzung Arbeits- und Besprechungsräume, mehrere Ebenen).

Insbesondere sollen Szenarien über mehrere Ebenen abgebildet werden, um

- a) den Einfluss von Treppen und
- b) die Frage nach der Ausbildung von Staus im und vor dem Treppenraum zu untersuchen.

Folgende Rahmenbedingungen gelten bei allen untersuchten Szenarien:

- keine Regelbrüche: Annahme, dass Personen die Regeln befolgen,
- Betrachtungen zur Barrierefreiheit werden nicht miteinbezogen,
- keine Variation der Fluchtweglängen,

- keine Untersuchung von Aufschlagrichtung der Türen.

Als Ergebnis werden zunächst Zeiten und der Einfluss der untersuchten Parameter auf diese Parameter gesetzt. Die Ergebnisse werden ins Verhältnis zu bestehenden Regelungen (Arbeitsschutzrecht, Bauordnungsrecht) gesetzt und sollen so für die Ableitung von Regeln dienen.

3 Vorgehensweise

Die Erstellung des Gutachtens lässt sich in drei Teile untergliedern:

- a) Untersuchen der Einflüsse von Breiten, Treppen, Türen sowie Einengungen bei Entfluchtungen mithilfe detaillierter Parameterstudien:

Für die Parameterstudien werden die zwei von den beteiligten Unternehmen bereitgestellten, voneinander unabhängigen Programme crowd:it [1] und ASERI [2] eingesetzt, die beide auf den neuesten Erkenntnissen der Wissenschaft basieren und fortlaufend anhand der RiMEA (Richtlinie für mikroskopische Entfluchtungsanalysen) Testfälle [19] sowie der NIST Testfälle [21] (crowd:it) bzw. der Auswertungen von Realbeobachtungen von Personenströmen in den EVA-, BASIGO- und SIKET-Projekten (ASERI) validiert werden [6][7][8][9].

Ziel der Parameterstudie ist es, diejenigen Einflussfaktoren zu identifizieren, die einen relevanten Einfluss auf die Entfluchungsraten besitzen. Dazu werden festgelegte maßgebliche Szenarien mit den Programmen modelliert, simuliert, visualisiert und analysiert (Kapitel 4.2).

Zur breiteren Einordnung der Simulationsresultate werden gebräuchliche makroskopische Strömungsmodelle einbezogen. Kapazitätsanalysen (Handrechnungen nach dem „effective width model“ [39]) und hydraulische Berechnungen nach Predtetschenski und Milinski [38] kommen für maßgebliche Szenarien zum Einsatz, soweit dies aufgrund der Modellierungsdetails mit einem makroskopischen Ansatz sinnvoll möglich ist. Im Gegensatz zu mikroskopischen Modellen bilden makroskopische Modelle aggregierte Werte – wie gemittelte Flüsse und Dichten – ab und bestimmen auf deren Grundlage Räumungszeiten. Zu den Grundannahmen bei diesen Verfahren zählen der gleichzeitige Beginn der Evakuierung, ein mit diesem Beginn ausgebildeter kontinuierlicher Personenstrom ohne Unterbrechungen (z. B. durch individuelle Handlungsentscheidungen) sowie die Forderung, dass alle Personen ausreichend mobil sind, sich mit der kollektiven Gruppengeschwindigkeit bewegen zu können (vgl. Kapitel 3.1 und [26]).

- b) Vergleichen und Bewerten der Studien mit dem Stand der Technik:

Die in den Parameterstudien erhaltenen Ergebnisse werden in Bezug zu den bestehenden Vorschriften und Regeln für Arbeitsstätten in Deutschland sowie der europäischen Nachbarländer gesetzt.

Weiterhin werden zum Abgleich Resultate von Experimenten herangezogen, die Personenströme im Kontext einer Gebäuderäumung untersucht haben, um auf diese Weise eine Einschätzung der zu den in den Normen und Rechtsvorschriften niedergelegten qualitativen und quantitativen Vorgaben herbeizuführen und den Bezug zu der in der Leistungsbeschreibung aufgeworfenen Fragestellung herzustellen.

- c) Aufbereiten der Ergebnisse, sodass sie als Grundlage für Rechtsnormen herangezogen werden können und somit für die anstehende Aktualisierung der Technischen Regel für Arbeitsstätten ASR A2.3 eine Entscheidungsbasis bieten:

Die Ergebnisse der Parameterstudie werden systematisch ausgewertet, interpretiert und dokumentiert.

Während der Arbeiten zu diesem Gutachten standen die Autoren in regelmäßigem Austausch zur Projektgruppe Fluchtwege des ASTA; die hier vorgestellten Ergebnisse wurden in gemeinsamen Treffen am 12.03.2019, 15.05.2019, 25.07.2019 und 28.08.2019 in der Fachgruppe 2.4 „Arbeitsstätten, Maschinen- und Betriebssicherheit“ der BAuA diskutiert und abgestimmt.

3.1 Modellierung von Personenströmen

Modelle zur Beschreibung von Personenströmen reichen von einfachen Handrechnungsverfahren bis zu komplexen Simulationsverfahren, die – wie jede vereinfachende Regelung – ein mathematisches Abbild eines in der Realität mit nicht unerheblichen Schwankungen versehenen Räumungsablaufs in unterschiedlicher Exaktheit beschreiben. Die Genauigkeit, mit der abstrahierende Modelle (Räumungs-)Realitäten abbilden, muss den Erfordernissen der Aufgabenstellung entsprechen.

Wie im vfdb-Leitfaden [26] ausführlicher ausgeführt, wird zwischen makroskopischen und mikroskopischen Modellen unterschieden. Erstere werden auch als Strömungsmodelle bezeichnet und beschreiben kollektiv eine kompakte Personenmenge entlang von relevanten Elementen der Fluchtwegführung. So wird der Weg eines kontinuierlichen Personenstroms in einzelne Wegelemente unterteilt und für diese Segmente – wie horizontale Wegabschnitte, Durchgänge/Engstellen, aufwärts und abwärts führende Treppen – jeweils eine mittlere Geschwindigkeit, eine mittlere Dichte und eine mittlere Aufenthaltsdauer für die sich in diesen Abschnitten befindlichen Personen bestimmt. Alle Aspekte individueller Eigenschaften der flüchtenden Personen, wie deren Mobilität, Reaktionszeiten oder persönliche Handlungsalternativen lassen sich in diesen Modellvarianten nicht berücksichtigen und müssen demzufolge durch Sicherheitszuschläge oder sehr konservative Parametrisierung kompensiert werden.

Hingegen können Individualmodelle mit ihrem mikroskopischen Ansatz die unterschiedliche Bewegung einzelner Personen, ihren individuellen Platzbedarf und ihre situativen Handlungsalternativen (wie z. B. Reaktionszeiten, Fluchtwegewahl) erfassen. Es lassen sich z. B. gemischte Populationen von jüngeren und älteren Personen mit einem Anteil von mobilitätseingeschränkten Menschen bilden, die auch vereinzelt Wegabschnitte begehen können, was sich in (kollektiven) makroskopischen Modellen nicht abbilden lässt.

Die Abbildung des Bewegungsverhalten einzelner Personen – modelltechnisch auch „Agenten“ genannt – kann raumdiskret oder raumkontinuierlich erfolgen. Bei raumdiskreten Individualmodellen wird der Platzbedarf von Agenten durch kachelförmige, typischerweise 40 x 40 cm große Flächen beschrieben (auch als Zellularautomaten bezeichnet). Die Bewegungsflächen werden durch eine zusammenhängende Zellstruktur begehbare Kacheln abgebildet. Die Agenten „springen“ dann entsprechend der individuellen Zielvorgaben auf eine unbesetzte Kachel und bieten Nachfolgenden die Möglichkeit, die verlassene Kachel zu besetzen. Die Bewegungsfläche ist daher diskretisiert und die Gehgeschwindigkeit kann den spezifischen Eigenschaften der Personen angenähert werden, jedoch lassen sich individuelle Körpermaße und Abmessungen

von Objekten entlang des Fluchtwegs (z. B. Türen, Treppen, Hindernisse) nur in Vielfachen der Rastergröße einer Kachel abbilden.

Bei raumkontinuierlichen Modellen entfällt die Diskretisierung der Bewegungsflächen, d. h., alle Personen nehmen entsprechend ihrer unterschiedlichen Körperfläche und deren Orientierung ihren Raum neben den anderen Agenten auf der Bewegungsfläche ein. Entsprechend der individuellen (ungestörten) Gehgeschwindigkeit versuchen sich die Agenten zu bewegen, bis ihnen andere Agenten den direkten Weg versperren oder sie auf Wände bzw. Engstellen stoßen oder modifizierte Bewegungsparameter für Treppenabschnitte anzuwenden sind.

Individualmodelle bieten die Möglichkeit, neben der Anfangsverteilung der Personen auch bestimmte individuelle Entscheidungen im Ablauf der Bewegung (z. B. die konkrete Fluchtwegwahl) zufallsgesteuert statistisch einzubeziehen. Damit ergeben wiederholt ausgeführte Simulationsläufe des gleichen Szenarios unterschiedliche Resultate, weil die Auswirkungen der fortwährend variierenden Abfolgen individueller Bewegungen der Personen im Zeitablauf mannigfaltige Konstellationen hervorbringen. Dies deckt sich mit der Realität: Mehrfach durchgeführte reale Räumungen (z. B. Räumungsübungen) führen ebenfalls zu abweichenden Räumungszeiten. Die Streuung der Teil- und Gesamträumungszeiten gibt Aufschluss über die Bestimmtheit des Systems, d. h., wenn individuelle Eigenschaften und Verhaltensweisen großen Einfluss besitzen, stellt sich eine breite Streuung der Resultate ein.

3.1.1 Das Personenräumungsprogramm ASERI

ASERI ist ein von der IST GmbH entwickeltes Computerprogramm zur Simulation der zielgerichteten Personenbewegung in räumlich komplexer Umgebung, das im Rahmen eines vom damaligen Bundesministerium für Forschung und Technologie BMFT geförderten Forschungsprojekts entwickelt wurde [3]. Dies beinhaltet insbesondere die Räumung von großen baulichen Anlagen, wie z. B. Bahnhöfe, Versammlungs- oder Verkaufsstätten und Sportarenen sowie von Gelände, die für (Groß-)Veranstaltungen genutzt werden. Als externe Einflussgrößen können gegebenenfalls die mit einem Brandereignis einhergehenden Effekte – die Ausbreitung von Rauch und toxischen Verbrennungsprodukten sowie die Wärmebelastung durch heiße Brandgase – berücksichtigt werden.

Grundlage von ASERI ist eine Beschreibung der individuellen Bewegung aller beteiligten Personen (der sogenannten Agenten), wobei wesentliche Verhaltensaspekte (Reaktions- und Verzögerungszeiten, Wahl des Fluchtweges, Verhalten bei Staubildung) und individuelle Eigenschaften (Mobilität und Raumbedarf) explizit in der Simulation berücksichtigt werden. ASERI gehört damit zur Klasse der mikroskopischen Evakuierungsmodelle (Individualmodelle).

Die Gebäude- bzw. Geländegeometrie wird in allen für den Ablauf der Evakuierung wichtigen Details in den drei Raumdimensionen modelliert. Alle Bereiche sind dabei den Personen prinzipiell zugänglich (räumlich kontinuierliche Modellierung). Die Wahl des individuellen Fluchtweges erfolgt entweder auf der Basis des lokal (bezogen auf einen Raum oder bestimmten Gebäudeabschnitt) oder global (bis ins Freie oder einen anderen sicheren Bereich) kürzesten Weges oder anhand vorgegebener Fluchtwegen.

Dabei sind jedoch gegebenenfalls lokale Abweichungen möglich, z. B. durch individuelle Präferenzen, als Reaktion auf Staubbildung vor Engpässen oder infolge der Ausbreitung von Rauch.

Die Personenbewegung basiert auf der Simulation elementarer Bewegungsabläufe innerhalb einer Menschenansammlung (Aufschließen, Ausweichen, Überholen, Mindestabstand) unter Beachtung der durch die Gebäudegeometrie gegebenen Einschränkungen. Dieses der tatsächlichen Natur des menschlichen Verhaltens nachempfundene und anhand empirischer Daten validierte Modellierungsverfahren verwendet stochastische Verteilungen und hat so den Vorteil, dass es Mittelwerte der Räumungszeiten sowie statistische Schwankungen um diese Mittelwerte liefern kann [10].

Bezüglich ihres Raumbedarfs ist in ASERI eine Person durch ihre Schulter- und Brustbreite sowie durch ihre momentane Bewegungsrichtung charakterisiert. Schulter- und Brustbreite können für jede Person individuell gewählt werden, entweder durch explizite Zuordnung oder durch geeignete Verteilungsfunktionen entsprechend der zu untersuchenden Population. Außerdem lässt sich durch die geeignete Wahl effektiver Körpermaße und gegebenenfalls spezieller Umrissformen der erhöhte Raumbedarf von gehbehinderten Personen, Personen mit Gepäck oder Kinderwagen, Rollstuhlnutzern, kompakten Kleingruppen (z. B. Erwachsener mit Kind) u. Ä. berücksichtigen.

Der Betrag der individuellen Fortbewegungsgeschwindigkeit ergibt sich zunächst aus der (explizit oder durch eine Verteilungsfunktion vorgegebenen) mittleren Fortbewegungsgeschwindigkeit bei unbehinderter Bewegung. Dieser Wert liegt bei einem durchschnittlichen Erwachsenen bei etwa 1,2 – 1,5 m/s und wird bei Kindern, älteren oder gehbehinderten Menschen oder bei Personen mit Gepäck entsprechend reduziert (siehe Abschnitt Mobilitätseigenschaften der Personen). Kontextgebunden ergeben sich Änderungen dieses Wertes bei der Bewegung auf Treppen, beim Durchgang durch (sehr) schmale Öffnungen sowie durch die Wirkung von Verbrennungsprodukten. Außerdem wird die Gehbewegung durch die Anwesenheit anderer Personen und den mit zunehmender Personendichte abnehmenden verfügbaren Raum für die Bewegung beeinflusst, was schließlich zu einer Staubbildung führen kann.

Zur Vermeidung von Kollisionen wird ein Anpassungsmechanismus aktiviert, der verschiedene Bewegungsalternativen zulässt: Die Person kann so weit wie möglich, ohne Änderung der Bewegungsrichtung, aufschließen oder sie kann versuchen, die vorangehenden Personen zu überholen. Die Wahl erfolgt unter der Prämisse einer möglichst effektiven Annäherung an das anzusteuern Ziel in Abhängigkeit von der Raumgeometrie und der Anwesenheit anderer Personen. Dabei wird berücksichtigt, dass situationsbedingt gewisse Mindestabstände zu anderen Personen, Wänden, Hindernissen und Barrieren eingehalten werden, wobei bei ASERI drei alternative Bewegungsmodi unterscheiden werden: Komfort, Standard (zügig und zielgerichtet, z. B. Räumungsübung) und Gefahr.

Mit diesem Simulationsverfahren ergibt sich bei der Nachrechnung von Evakuierungsexperimenten bzw. Räumungsübungen eine sehr gute Übereinstimmung mit ermittelten Räumungszeiten und beobachteten Personenmustern, wie bereits 1996 in einem

norwegisch-deutschen Verbundprojekt unter Federführung des norwegischen Brandforschungslaboratoriums der SINTEF in Trondheim durchgeführte Validierungsvergleiche belegten [4].

Mobilitätseigenschaften der Personen:

Die grundlegenden Mobilitätseigenschaften einer Personengruppe (Population) werden in einer ASERI-Simulation durch die Verteilung der unbehinderten ebenerdigen Gehgeschwindigkeit und der Körpergröße bzw. des Raumbedarfs (Projektion des Körpermrisses auf die Lafebene) beschrieben. Die Abbildungen 3.1 und 3.3 zeigen die standardmäßig für Personenstromanalysen mit ASERI benutzten Verteilungen für Fußgänger.

Für einen Erwachsenen ermittelten Predtetschenski und Milinski Werte für die projizierte effektive Körperfläche zwischen $0,100 \text{ m}^2$ (Sommerkleidung) und $0,125 \text{ m}^2$ (Winterstraßenkleidung) [38]. Die mittlere unbehinderte ebenerdige Gehgeschwindigkeit eines Erwachsenen liegt nach dem SFPE Handbook of Fire Protection Engineering bei $1,4 \text{ m/s}$ ([5]). Tabelle 3-13.2 des SFPE-Handbook [5] listet die mittlere ebenerdige Gehgeschwindigkeit von Personen mit eingeschränkter Mobilität auf: Gehbehinderte ohne Hilfsmittel zur Fortbewegung $0,95 \text{ m/s}$, Gehbehinderte mit Krücken $0,94 \text{ m/s}$, Gehbehinderte mit Spazierstock $0,81 \text{ m/s}$.

Die für die ASERI-Simulationsrechnungen benutzten Verteilungen sind demnach also ausreichend sensitiv für eine vergleichende Analyse von Durchgangskapazitäten unter realistischen Bedingungen. Die Mittelwerte der Verteilungen liegen mit $1,1 \pm 0,2 \text{ m/s}$ bzw. $0,13 \pm 0,01 \text{ m}^2$ bezüglich ihrer Konsequenzen für die Mobilität deutlich ungünstiger als empirisch festgestellte Mittelwerte für Erwachsene (vgl. Abb. 3.1 und 3.3). Die Verteilungen beinhalten somit auch bereits in ihrer Mobilität eingeschränktere Personen als auch einen Anteil, der sich „sportlicher“ bewegt.

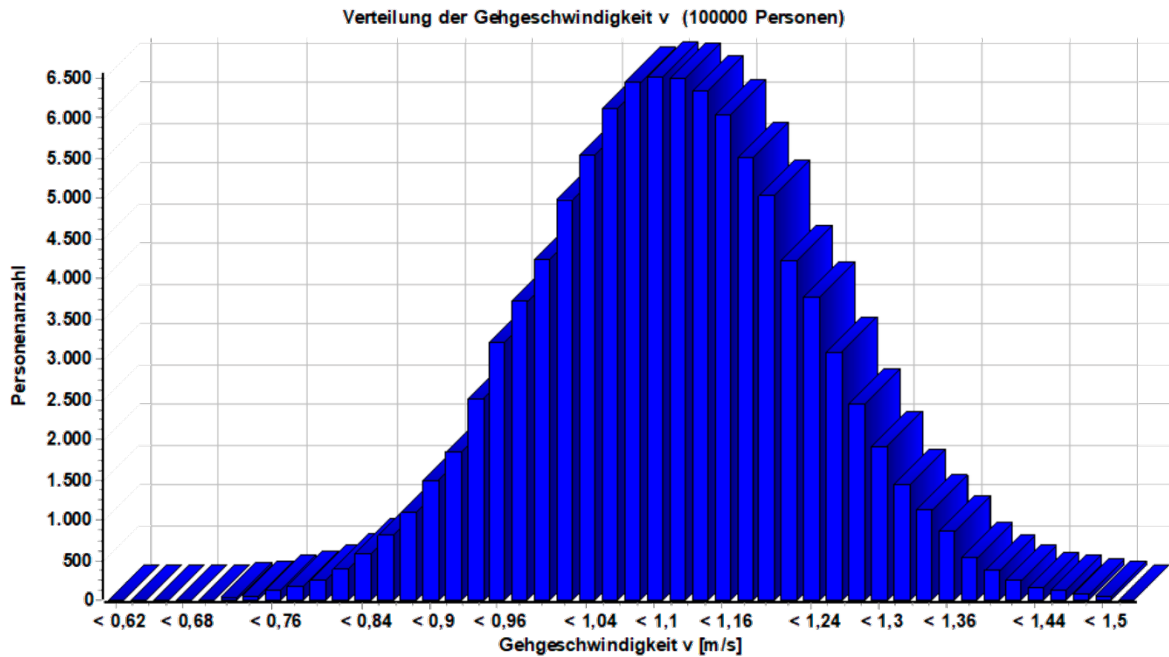


Abb. 3.1 Verteilungsfunktion der individuellen unbehinderten ebenerdigen Gehgeschwindigkeit bei 100.000 Personen (Das Maximum liegt bei $v = 1,1$ m/s, die Standardabweichung bei $\sigma = 0,2$ m/s.)

In gleicher Weise ergeben sich Streuungen für die Körpergröße, ausgedrückt durch Schulter- und Brustbreiten, die im Bereich von

Schulterbreite	$0,525 \pm 0,035$ m
Brustbreite	$0,315 \pm 0,020$ m

variieren (vgl. Abbildung 3.2) und als Ellipse berechnet eine resultierende Körperfläche von

Körperfläche	$0,13 \pm 0,01$ m ²
--------------	--------------------------------

aufweisen, siehe Abbildung 3.2.

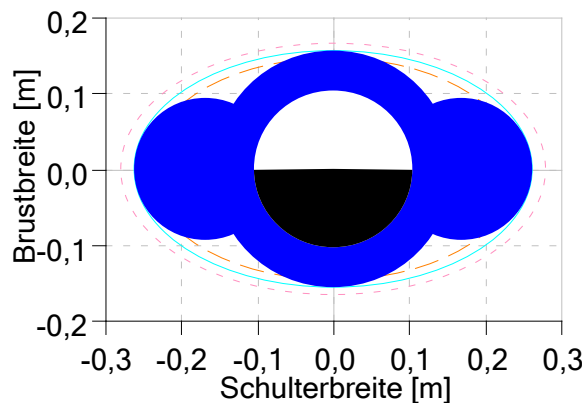


Abb. 3.2 Modellierung der Personen (Agenten) mit Schulter- und Brustbreite in ASERI

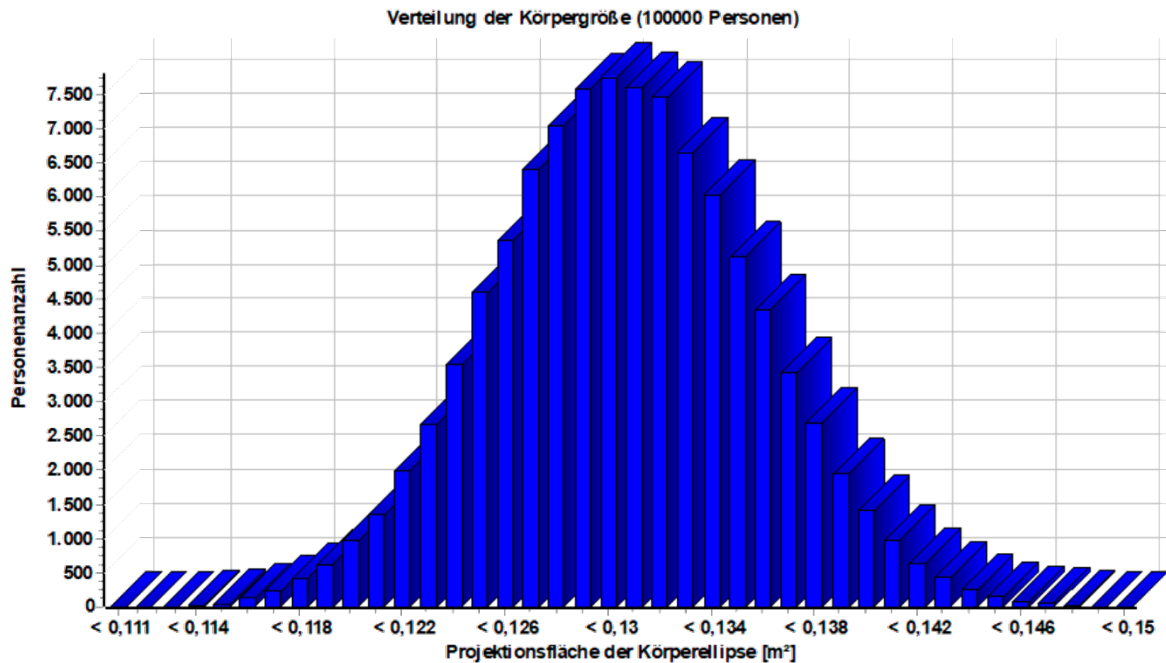


Abb. 3.3 Verteilungsfunktion der projizierten effektiven Körperfläche von 100.000 Agenten (Das Maximum liegt bei $f = 0,13 \text{ m}^2$, die Standardabweichung bei $\sigma = 0,01 \text{ m}^2$.)

Sofern nicht ausdrücklich anders angegeben, wurden die Berechnungen mit dieser Standardpopulation und dem Standardbewegungsmodus für eine zielgerichtete zügige Fortbewegung durchgeführt.

Alle für den Bericht getätigten Simulationen wurden mit der Software Version 5.0(e) durchgeführt, wobei die beschriebenen Standardeinstellungen des Programms zum Einsatz kamen. D. h., die Eingabedateien für die Simulationsläufe bestehen lediglich aus Angaben zur abzubildenden Geometrie der Szenarien und den Populationsvorgaben (welche Räume werden mit welcher Anzahl von Personen belegt). Die Simulationsergebnisse wurden dem Programm direkt entnommen (Schnitte der betrachteten Ebenen, 3D-Gebäudeansichten, Personenverteilungsdiagramme, Boxplots) und für den Bericht mit den crowd:it-Ergebnissen zusammengeführt.

3.1.2 Das Personenräumungsprogramm crowd:it

crowd:it ist ein mikroskopisches Simulationsmodell [1], das auf dem Optimal Steps Model [11] basiert und von der Firma accu:rate GmbH im Jahr 2014 aufbauend auf einer Dissertation [13] fortlaufend weiterentwickelt und an aktuelle Forschungsergebnisse angepasst wird.

Das räumlich-kontinuierliche Individualmodell charakterisieren die folgenden Grundeigenschaften:

- Jede Person wird durch einen sog. Agenten abgebildet, dem individuelle Eigenschaften zugewiesen werden, wie u. a. seine Wunschgeschwindigkeit, Platzbedarf (als Kreis in der Ebene) sowie seine Position zu Beginn der Simulation. Die Projektionsfläche eines Agenten in die Fläche wird kreisförmig abgebildet.

- Jeder Agent bekommt ein Ziel zugewiesen, in Richtung dessen er sich während der Simulation bewegt. Auf dem Weg zum Ziel können vorgegebene (Zwischen-) Zielpunkte (*Points of Interest = Poi*) abgelaufen werden; diese werden in einem Pfad zusammengefasst und können individuell zugewiesen werden.
- Die Bewegung der Agenten wird auf vier verschiedenen Modellierungsebenen (Strategie-, Navigations-, Lokomotions- und Verhaltensebene) abgebildet.
- Der Algorithmus zur Personenbewegung basiert auf dem Optimal Steps Model [1], [14] in Kombination mit dynamischen Flutungsfeldern [12].
- Das Simulationsmodell wird laufend validiert. Die aktuellen Ergebnisse der RiMEA-Tests [19] können immer aktuell unter <https://www.accu-rate.de/en/rimea-tests/> eingesehen werden.

Die Simulationen wurden mit der Software crowd:it Version 1.5.12 durchgeführt.

Bewegungsmodell der Agenten:

Die Agenten bewegen sich auf der Lokomotionsebene (Bewegungsebene) anhand des Optimal Steps Models [11], das das Schrittverhalten der Menschen nachahmt. Die Wunschgeschwindigkeit einer Person ergibt sich aus der für die Person spezifischen Schrittlänge und -frequenz. Die Zuweisung von Schrittgröße und Geschwindigkeit ist aus [11] entnommen. Jeder Agent strebt eine gewisse „Wunsch“-Schrittlänge an, die jedoch nicht immer erreicht wird, da bspw. andere Agenten oder Raumgegebenheiten den Weg versperren. Entsprechend fällt der Schritt somit kleiner aus, wodurch der Agent abgebremst wird.

Auf Treppen bewegen sich Personen anders als im ebenen Umfeld: Sie werden anhand der Stufentiefe in ihrer Schrittlänge eingeschränkt, wodurch sich individuelle Abbremsfaktoren für Personen auf Treppen ergeben. Je schneller Personen in der Ebene laufen, desto stärker werden sie aufgrund der verringerten Schrittweite abgebremst. Dieses Verhalten konnte in [43] nachgewiesen werden und wurde in crowd:it implementiert.

Navigationsebene:

Die Wegefindung der Agenten wird mithilfe von Bewegungsgraphen in der Navigationsebene abgebildet. Bewegungsgraphen verbinden Pols (Points of Interest) und dienen als Grundlage zur Abbildung unterschiedlichen Navigationsverhaltens (schnellster Weg, kürzester Weg etc.).

Jede Person läuft eine Anzahl von Pols ab – im einfachsten Fall nur von der Quelle zum Ziel. Es können jedoch auch beliebig viele Pols (bspw. Toilette, Garderobe, Aufzug etc.) auf seinem Pfad liegen. Aus einer Menge von möglichen Pols wählt die Person anhand unterschiedlicher Heuristiken (lessCrowded, closest, shortestQueueLane etc.) ihr nächstes Ziel aus.

Gewählte Personeneigenschaften für die Szenarien des Gutachtens:

Für die in diesem Gutachten simulierten Szenarien wurde folgende Standardeinstellung vorgenommen:

- Jede Person hat einen Platzbedarf von 0,15 bis 0,22 m² – dies entspricht einem Durchmesser von 0,42 bis 0,46 m. Diese Werte werden in Anlehnung an [7] gewählt. Dieser Platzbedarf wurde gewählt, da davon ausgegangen werden kann, dass sich die Personen in leichter Bekleidung in den Arbeitsstätten befinden. Die Werte werden innerhalb des Bereichs gleichverteilt.
- Die Geschwindigkeit der Population entspricht einer Normalverteilung (Gauß-Verteilung) mit Mittelwert 1,34 m/s und einer Standardabweichung von 0,26 m/s. Die Wunschgeschwindigkeit der Personen ist auf den Bereich zwischen 0,46 m/s und 1,61 m/s beschränkt. Alle Werte wurden in Anlehnung an [17], [19] und [20] gewählt.
- Es wird keine Mobilitätseinschränkung angenommen.
- Alle Personen laufen entlang des schnellsten Wegs zum nächstgelegenen Ausgang.
- Sobald eine Person das ihr zugewiesene Ziel erreicht hat, also im gesicherten Bereich ist, wird diese Person aus der Simulation entfernt.

4 Ergebnisse

4.1 Stand von Vorschriften und Regeln

Gültige Rechtsvorschriften in Deutschland:

Im Folgenden werden relevante Verordnungen in Deutschland zusammengetragen und in Bezug auf die in diesem Gutachten zu bewertenden Größen analysiert.

4.1.1 Musterbauordnung (MBO) [27]

Das Bauordnungsrecht liegt in der Hoheit der Bundesländer. Die Musterbauordnung ist ein gemeinsames Muster der Bauministerkonferenz als eine Grundlage für die Festlegungen der jeweiligen Landesbauordnung. Die Musterbauordnung (MBO) stellt die bauordnungsrechtliche Grundlage für alle baulichen Anlagen und Bauprodukte dar.

Folgende Vorschriften in Bezug auf Fluchtwege sind hier aufgeführt:

§ 34 Treppen

(5) Die nutzbare Breite der Treppenläufe und Treppenabsätze notwendiger Treppen muss für den größten zu erwartenden Verkehr ausreichen.

§ 36 Notwendige Flure, offene Gänge

(2) ¹Notwendige Flure müssen so breit sein, dass sie für den größten zu erwartenden Verkehr ausreichen. ²In den Fluren ist eine Folge von weniger als drei Stufen unzulässig.

§ 51 Sonderbauten

¹An Sonderbauten können im Einzelfall zur Verwirklichung der allgemeinen Anforderungen nach § 3 Abs. 1 besondere Anforderungen gestellt werden. ²Erleichterungen können gestattet werden, soweit es der Einhaltung von Vorschriften wegen der besonderen Art oder Nutzung baulicher Anlagen oder Räume oder wegen besonderer Anforderungen nicht bedarf. ³Die Anforderungen und Erleichterungen nach den Sätzen 1 und 2 können sich insbesondere erstrecken auf [...]

7. Brandschutzanlagen, -einrichtungen und -vorkehrungen, [...]

4.1.2 Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättVO) [28]

Die MVStättVO bezieht sich unter anderem auf Versammlungsstätten und Versammlungsräume, die einzeln mehr als 200 Besucher fassen. Dabei werden Unterrichtsräume in allgemein- und berufsbildenden Schulen explizit ausgeschlossen (siehe § 1 Abs. 3 Nr. 2). In der Verordnung wird also vorausgesetzt, dass sich vorwiegend Personen in den Stätten aufhalten, die dort nicht regelmäßig verkehren und keine gesonderte Ortskenntnis vorweisen.

Fluchtwegbreiten und -längen sind wie folgt vorgegeben:

§ 7 Bemessung der Rettungswege:

(1) ¹Die Entfernung von jedem Besucherplatz bis zum nächsten Ausgang aus dem Versammlungsraum darf nicht länger als 30 m sein. ²Bei mehr als 5 m lichter Höhe ist je 2,5 m zusätzlicher lichter Höhe über der für Besucher zugänglichen Ebene für diesen Bereich eine Verlängerung der Entfernung um 5 m zulässig. ³Die Entfernung von 60 m bis zum nächsten Ausgang darf nicht überschritten werden. ⁴Die Sätze 1 bis 3 gelten für Tribünen außerhalb von Versammlungsräumen sinngemäß. [...]

(3) Die Entfernung von jeder Stelle eines notwendigen Flures oder eines Foyers bis zum Ausgang ins Freie oder zu einem notwendigen Treppenraum darf nicht länger als 30 m sein.

(4) ¹Die Breite der Rettungswege ist nach der größtmöglichen Personenzahl zu bemessen. ²Dabei muss die lichte Breite eines jeden Teils von Rettungswegen für die darauf angewiesenen Personen mindestens betragen bei

- | | |
|---|-------------------------|
| 1. Versammlungsstätten im Freien sowie Sportstadien | 1,20 m je 600 Personen, |
| 2. anderen Versammlungsstätten | 1,20 m je 200 Personen; |

Zwischenwerte sind zulässig. ³Die lichte Mindestbreite eines jeden Teils von Rettungswegen muss 1,20 m betragen. ⁴Bei Rettungswegen von Versammlungsräumen mit nicht mehr als 200 Besucherplätzen und bei Rettungswegen im Bühnenhaus genügt eine lichte Breite von 0,90 m. ⁵Für Rettungswege von Arbeitsgalerien genügt eine Breite von 0,80 m. [...]

§ 8 Treppen:

„[...] (3) Die lichte Breite notwendiger Treppen darf nicht mehr als 2,40 m betragen. [...]

(4) ¹Notwendige Treppen und dem allgemeinen Besucherverkehr dienende Treppen müssen auf beiden Seiten feste und griffsichere Handläufe ohne freie Enden haben. ²Die Handläufe sind über Treppenabsätze fortzuführen. [...]

(6) Wendeltreppen sind als notwendige Treppen für Besucher unzulässig. [...]

Die MVStättVO gibt also eine Mindestbreite von 1,20 m für Rettungswege vor, von der bei Personenzahlen unterhalb von 200 Personen abgewichen werden kann. Zudem können Zwischenwerte gewählt werden abhängig von den Personenzahlen. Zu Treppen finden sich nur Maximalbreiten, die Mindestbreiten sind bereits über § 7 geregelt.

4.1.3 Muster-Schulbau-Richtlinie – MSchulbauR

Die Richtlinie bezieht sich auf allgemeinbildende und berufsbildende Schulen, soweit sie nicht ausschließlich der Unterrichtung Erwachsener dienen und legt folgende Werte in Bezug auf Fluchtwege fest:

3 Rettungswege

3.1 Allgemeine Anforderungen

„¹Für jeden Unterrichtsraum müssen in demselben Geschoss mindestens zwei voneinander unabhängige Rettungswege zu Ausgängen ins Freie oder zu notwendigen Treppenträumen vorhanden sein. [...]“

3.4 Breite der Rettungswege, Sicherheitszeichen

„¹Die nutzbare Breite der Ausgänge von Unterrichtsräumen und sonstigen Aufenthaltsräumen sowie der notwendigen Flure und notwendigen Treppen muss mindestens 1,20 m je 200 darauf angewiesener Benutzer betragen. ²Staffelungen sind nur in Schritten von 0,60 m zulässig. ³Es muss jedoch mindestens folgende nutzbare Breite vorhanden sein bei

- a) Ausgängen von Unterrichtsräumen und sonstigen Aufenthaltsräumen 0,90 m
- b) notwendigen Fluren 1,50 m
- c) notwendigen Treppen 1,20 m [...]

⁴Ausgänge zu notwendigen Fluren dürfen nicht breiter sein als der notwendige Flur. ⁵Ausgänge zu notwendigen Treppenträumen dürfen nicht breiter sein als die notwendige Treppe. ⁶Ausgänge aus notwendigen Treppenträumen müssen mindestens so breit sein wie die notwendige Treppe. [...]“

4 Treppen, Geländer und Umwehrungen

„¹Die nutzbare Breite notwendiger Treppen darf 2,40 m nicht überschreiten. ²Treppen müssen Tritt- und Setzstufen haben. ³Notwendige Treppen dürfen keine gewendelten Läufe haben. ³Geländer und Umwehrungen müssen mindestens 1,1 m hoch sein.“

4.1.4 Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) (§ 9 Abs. 3) [33]

„Der Arbeitgeber hat Maßnahmen zu treffen, die es den Beschäftigten bei unmittelbarer erheblicher Gefahr ermöglichen, sich durch sofortiges Verlassen der Arbeitsplätze in Sicherheit zu bringen. [...]“

4.1.5 Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) (§ 4 Abs. 4) [31]

„Der Arbeitgeber hat dafür zu sorgen, dass Verkehrswege, Fluchtwege und Notausgänge ständig freigehalten werden, damit sie jederzeit benutzbar sind. Der Arbeitgeber hat Vorkehrungen so zu treffen, dass die Beschäftigten bei Gefahr sich unverzüglich in Sicherheit bringen und schnell gerettet werden können. [...]“

4.1.6 Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR) [29][30]

„Die Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) geben den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse für das Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten wieder.“

Dort niedergeschrieben sind untere Grenzen für Fluchtwegbreiten und Fluchtwege, insbesondere in den Regeln ASR A2.3 (Fluchtwege und Notausgänge, Flucht- und Rettungsplan), ASR A1.8 (Verkehrswege) und ASR A1.7 (Türen und Tore).

ASR A2.3 Fluchtwege und Notausgänge, Flucht- und Rettungsplan

4 Allgemeines

„[...]“

Das Erfordernis eines zweiten Fluchtweges ergibt sich aus der Gefährdungsbeurteilung unter besonderer Berücksichtigung der bei dem jeweiligen Aufenthaltsort bzw. Arbeitsplatz vorliegenden spezifischen Verhältnisse, wie z. B. einer erhöhten Brandgefahr oder der Anzahl der Personen, die auf den Fluchtweg angewiesen sind. Ein zweiter Fluchtweg kann z. B. erforderlich sein bei Produktions- oder Lagerräumen mit einer Fläche von mehr als 200 m², bei Geschossen mit einer Grundfläche von mehr als 1.600 m² oder aufgrund anderer spezifischer Vorschriften. [...]“

5 Anordnung, Abmessung

„[...]“

(2) Die Fluchtweglänge muss möglichst kurz sein und darf

- a) für Räume ohne oder mit normaler Brandgefährdung, ausgenommen Räume nach b) bis f) bis zu 35 m
- b) für Räume mit erhöhter Brandgefährdung mit selbsttätigen Feuerlöscheinrichtungen bis zu 35 m
- c) für Räume mit erhöhter Brandgefährdung ohne selbsttätige Feuerlöscheinrichtungen bis zu 25 m
- d) für giftstoffgefährdete Räume bis zu 20 m
- e) für explosionsgefährdete Räume, ausgenommen Räume nach f) bis zu 20 m
- f) für explosivstoffgefährdete Räume bis zu 10 m

betragen (bezüglich der Begriffsbestimmungen der Brandgefährdungen siehe ASR A2.2 „Maßnahmen gegen Brände“). Die tatsächliche Laufweglänge darf jedoch nicht mehr als das 1,5fache der Fluchtweglänge betragen.

[...]

(3) Die Mindestbreite der Fluchtwege bemisst sich nach der höchstmöglichen Anzahl der Personen, die im Bedarfsfall den Fluchtweg benutzen müssen und ergibt sich aus Tabelle 1:

Tabelle 1: Mindestbreite der Fluchtwege

Nr.	Anzahl der Personen (Einzugsgebiet)	Lichte Breite (in m)
1	bis 5	0,875
2	bis 20	1,00
3	bis 200	1,20
4	bis 300	1,80
5	bis 400	2,40

Bei der Bemessung von Tür-, Flur- und Treppenbreiten sind sämtliche Räume und für die Flucht erforderliche und besonders gekennzeichnete Verkehrswege in Räumen zu berücksichtigen, die in den Fluchtweg münden. Tür-, Flur- und Treppenbreiten sind aufeinander abzustimmen.

Die Mindestbreite des Fluchtweges darf durch Einbauten oder Einrichtungen sowie in Richtung des Fluchtweges zu öffnende Türen nicht eingeengt werden. Eine Einschränkung der Mindestbreite der Flure von maximal 0,15 m an Türen kann vernachlässigt werden. Für Einzugsgebiete bis 5 Personen darf die lichte Breite jedoch an keiner Stelle weniger als 0,80 m betragen. [...]"

ASR A1.7 Türen und Tore

4. Planung von Türen und Toren

„[...]“

(3) Türen und Tore müssen so angebracht sein, dass sie in geöffnetem Zustand die erforderliche Mindestbreite vorbeiführender Verkehrswege nicht einengen (siehe ASR A1.8 „Verkehrswege“).

[...]

(6) [...]

Türen und Tore in Zugängen, die nur der Bedienung, Überwachung und Wartung dienen, sollen 0,50 m in der lichten Durchgangsbreite und 1,80 m in der lichten Durchgangshöhe nicht unterschreiten. [...]"

ASR A1.8 Verkehrswege

4.1 Allgemeines

„[...]“

(4) Schrägrampen für den Fahr- und Gehverkehr dürfen in Abhängigkeit von der Art der Nutzung die in Tabelle 1 aufgeführten Neigungen nicht überschreiten.

Tabelle 1: Maximale Neigungen für unterschiedliche Nutzungsarten von Schrägrampen

	Art der Rampe	Maximale Neigung
1	Schrägrampe im Verlauf von Fluchtwegen	3,5° (6 %)
2	Schrägrampe beim Einsatz von Flurförderzeugen ohne Fahrtrieb bzw. manuell zu bewegendem Transportmittel (bei der Neuanlage von Arbeitsstätten)	3,5° (6 %)
3	Schrägrampen im Regelfall (sofern nicht Ziffer 1 oder 2 anzuwenden ist)	5° (8 %)
4	Schrägrampe zur Anwendung im Einzelfall entsprechend Gefährdungsbeurteilung	7° (12,5 %)*

* Abweichungen von Ziffer 4 sind gemäß Bauordnung der Länder möglich, z. B. bei Garagen. [...]"

„[...]“

(1) Die Mindestbreite der Wege für den Fußgängerverkehr ist nach Tabelle 2 zu bemessen.

Tabelle 2: Mindestbreite der Wege für den Fußgängerverkehr

Verkehrsweg	Lichte Breite [m]
Die Mindestbreite von Verkehrswegen ergibt sich aus den Breiten von Fluchtwegen der ASR A2.3 (diese richten sich nach der Anzahl der Personen im Einzugsgebiet):	
bis 5	0,875
bis 20	1,00
bis 200	1,20
bis 300	1,80
bis 400	2,40
	Eine Unterschreitung der Mindestbreite der Flure von maximal 0,15 m an Türen kann vernachlässigt werden. Die lichte Breite darf jedoch an keiner Stelle weniger als 0,80 m betragen.
[...]	

[...]

(4) Unmittelbar vor und hinter Türen müssen Absätze und Treppen einen Abstand von mindestens 1,0 m, bei aufgeschlagener Tür noch eine Podesttiefe von 0,5 m einhalten (siehe Abb. 2).

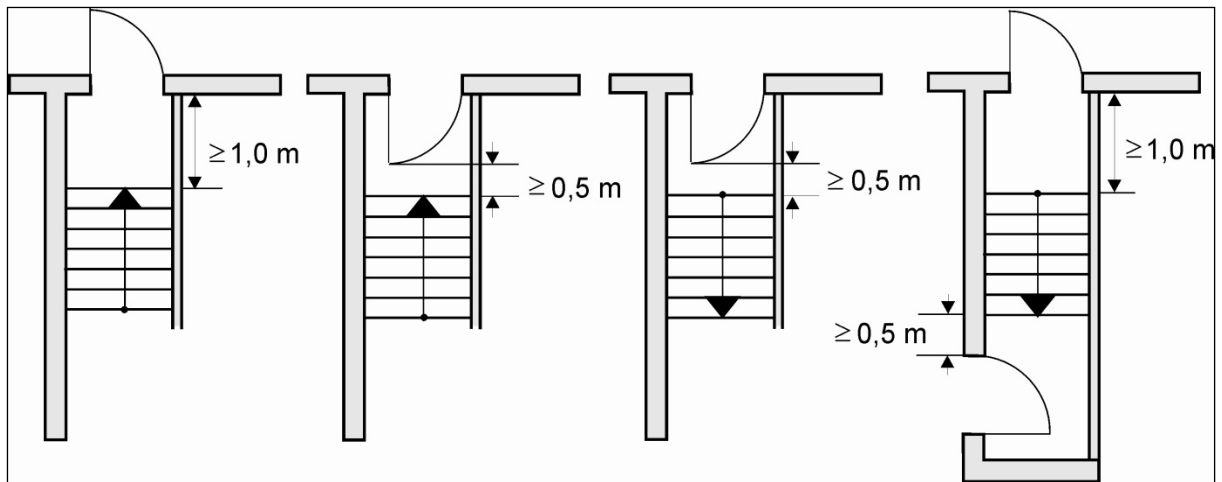


Abb. 2: Abstandsmaße von Treppen zu Türöffnungen [...]"

4.5 Treppen

„[...]“

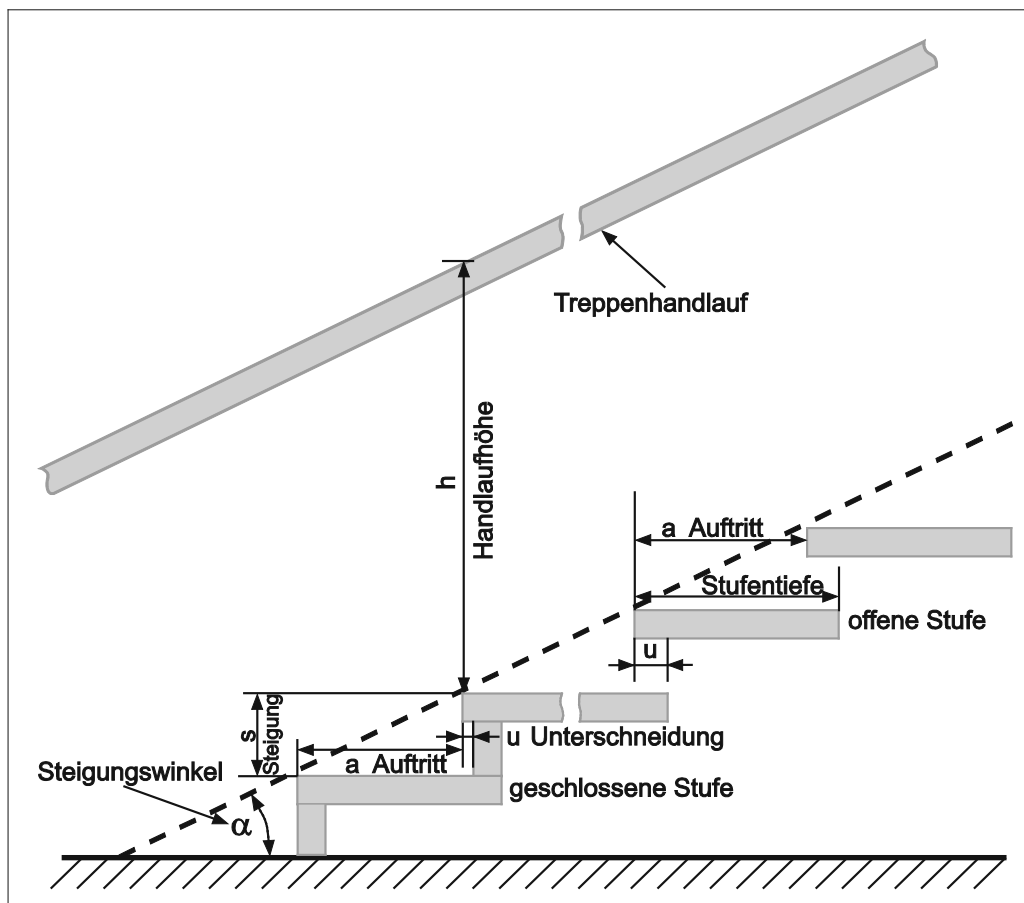


Abb. 4: Benennung einzelner Teile an Treppen

(4) Für Treppen (siehe Abb. 4) ergibt sich als Beziehung zwischen Schrittlänge (SL), Auftritt (a) und Steigung (s) die Schrittmaßregel $2 \times s + a = SL$. Für eine gute Begehbarkeit einer Treppe soll die Schrittlänge zwischen 59 und 65 cm betragen.

In Arbeitsstätten darf die Steigung (s) zwischen 14 bis 19 cm, der Auftritt (a) zwischen 26 bis 32 cm und der Steigungswinkel (α) zwischen 24° bis 36° variieren (siehe Tabelle 4).

Als besonders sicher begehbar haben sich Treppen erwiesen, deren Stufen einen Auftritt von 29 cm und eine Steigung von 17 cm aufweisen.

[...]

(6) Bei Treppenläufen mit einem Steigungswinkel bis 36° muss nach höchstens 18 Trittstufen ein Zwischenpodest vorhanden sein. [...]

(7) Die freien Seiten der Treppen, Treppenabsätze und Treppenöffnungen müssen durch Geländer gesichert sein. [...]

(10) Treppen müssen:

- einen Handlauf haben,
- an beiden Seiten Handläufe haben, wenn die Stufenbreite mehr als 1,5 m beträgt und zusätzlich
- Zwischenhandläufe haben, mit denen die Stufenbreite in zwei gleiche Breitenabschnitte unterteilt wird, wenn sie mehr als 4,0 m beträgt. [...]"

4.1.7 Gültige Rechtsvorschriften in Österreich

Um die gültigen Rechtsvorschriften in Deutschland besser einzuordnen, werden diese mit den in Österreich geltenden Vorschriften verglichen.

Arbeitsstättenverordnung (Fassung vom 12.08.2019) [32]:

§ 2 Verkehrswege:

„(1) Verkehrswege sind so zu gestalten und freizuhalten, daß sie, sofern nicht die Bestimmungen über Fluchtwege anzuwenden sind, folgende nutzbare Mindestbreite aufweisen:

1. Verkehrswege ohne Fahrzeugverkehr: 1,0 m;
2. Durchgänge zwischen Lagerungen, Möbeln, Maschinen oder sonstigen Betriebs-einrichtungen, ferner Bedienungsstiegen und -stege: 0,6 m; [...]"

§ 3 Ausgänge:

„(1) Ausgänge sind so zu gestalten und freizuhalten, daß sie, sofern nicht die Bestimmungen über Notausgänge anzuwenden sind, folgende nutzbare Mindestbreite aufweisen:

1. Ausgänge ohne Fahrzeugverkehr: 0,8 m;

[...]

§ 4 Stiegen:

„[...]

(2) Stiegen sind so zu gestalten, daß

1. die Höhe der Stufen höchstens 18 cm beträgt und innerhalb eines Stiegenlaufs einheitlich ist,
2. die Auftrittsbreite der Stufen in der Gehlinie mindestens 26 cm beträgt
[...]
4. in folgenden Fällen Podeste vorhanden sind, deren Länge, gemessen in der Gehlinie, betragen muß:
 - a. nach maximal 20 Stufen: mindestens 1,2 m Länge,
 - b. vor Türen, die zur Stiege führen: mindestens die Länge der größten Türblattbreite.

[...]

(3) Bei Stiegen mit mehr als vier Stufen ist ein fester Handlauf anzubringen. Bei Stiegen mit mehr als vier Stufen und einer Stiegenbreite von mehr als 1,2 m sind an beiden Seiten der Stiege feste Handläufe anzubringen. Die Handläufe sind so zu gestalten, daß sich Arbeitnehmer/innen nicht verletzen und nicht mit der Kleidung hängenbleiben können.

[...]

§ 17 Fluchtwege, gesicherte Fluchtbereiche, Notausgänge

- „(1) Arbeitsstätten sind so zu gestalten, daß von jedem Punkt der Arbeitsstätte aus
1. nach höchstens 10 m ein Verkehrsweg erreicht wird, der in seinem gesamten Verlauf bis zum Endausgang den Anforderungen der §§ 18 und 19 entspricht (Fluchtweg) und
 2. nach höchstens 40 m jene Bereiche, durch die der Fluchtweg führt (wie z. B. Gänge, Stiegenhäuser, Foyers), in ihrem gesamten Verlauf bis zum Endausgang den Anforderungen des § 21 entsprechen (gesicherte Fluchtbereiche).
[...]

- (2) Weiters sind Arbeitsstätten so zu gestalten, daß
1. aus jedem Arbeitsraum ein Ausgang direkt auf einen Fluchtweg führt und
 2. aus folgenden Arbeitsräumen mindestens zwei hinreichend weit voneinander entfernte und nach Möglichkeit auf verschiedenen Seiten des Raumes liegende Ausgänge direkt auf einen Fluchtweg führen:
 - a) Arbeitsräume mit einer Bodenfläche von mehr als 200 m², in denen mehr als 20 Arbeitnehmer/innen beschäftigt werden oder
 - b) Arbeitsräume mit einer Bodenfläche von mehr als 500 m².

[...]"

§ 18 Abmessungen von Fluchtwegen und Notausgängen

„(1) Fluchtwegen müssen folgende nutzbare Mindestbreite aufweisen:

1. für höchstens 20 Personen: 1,0 m;
2. für höchstens 120 Personen: 1,2 m;
3. bei mehr als 120 Personen erhöht sich die Breite nach Z 2 für je weitere zehn Personen um jeweils 0,1 m.

(2) Notausgänge müssen folgende nutzbare Mindestbreite aufweisen:

1. für höchstens 40 Personen: 0,8 m;
2. für höchstens 80 Personen: 0,9 m;
3. für höchstens 120 Personen: 1,0 m;
4. bei mehr als 120 Personen erhöht sich die Breite nach Z 3 für je weitere zehn Personen um jeweils 0,1 m.

(3) Die Personenzahlen in Abs. 1 und 2 bezeichnen jeweils

1. die höchstmögliche zu erwartende Anzahl gleichzeitig anwesender Personen, die im Gefahrenfall auf den Fluchtweg oder Notausgang angewiesen sein könnten oder
2. sofern ein Fluchtweg mehr als drei Geschoße miteinander verbindet, nur die höchstmögliche zu erwartende Anzahl gleichzeitig in drei unmittelbar übereinanderliegenden Geschoßen anwesender Personen, die im Gefahrenfall auf den Fluchtweg oder Notausgang angewiesen sein könnten. [...]"

4.1.8 Zusammenfassung und Vergleich deutscher und österreichischer Rechtsvorschriften

Die zusammenfassende Tabelle 4.1 zeigt auf, dass Unterschiede in der Auslegung der Rechtsvorschriften existieren. Im Folgenden werden die Szenarien daher so gewählt, dass Fluchtwegbreiten und -einengungen vor allem bei geringen Fluchtwegbreiten und bei niedriger Personenzahl analysiert werden.

Tab. 4.1 Gegenüberstellung der Fluchtwegbreiten und -einengungen nach ASR und AStV

	ASR	AStV
Fluchtwegbreiten		
5 Personen	0,875 m	1,00 m
20 Personen	1,00 m	1,00 m
120 Personen	1,20 m	1,20 m
200 Personen	1,20 m	2,00 m
300 Personen	1,80 m	3,00 m
400 Personen	2,40 m	4,00 m
Notausgänge		
5 Personen	0,875 m	0,80 m
20 Personen	1,00 m	0,80 m
40 Personen	1,20 m	0,80 m
80 Personen	1,20 m	0,90 m
120 Personen	1,20 m	1,00 m
200 Personen	1,20 m	1,80 m
300 Personen	1,80 m	2,80 m
400 Personen	2,40 m	3,80 m
Schmalste Stelle im Fluchtweg		
5 Personen	0,80 m	0,80 m
20 Personen	0,95 m	0,80 m
40 Personen	1,05 m	0,80 m
80 Personen	1,05 m	0,90 m
120 Personen	1,05 m	1,00 m
200 Personen	1,05 m	1,80 m
300 Personen	1,65 m	2,80 m
400 Personen	2,25 m	3,80 m
Fluchtweglänge		
Luftlinie bis zum gesicherten Bereich	35 m, reale Lauflänge darf das 1,5fache nicht überschreiten	40 m
Luftlinie zum nächsten Verkehrsweg	Keine Angabe	10 m
Anzahl Fluchtwege		
Grundfläche > 200 qm, Anzahl Personen > 20	1	2
Produktions- oder Lagerräume > 200 qm	2	?
Grundfläche > 1,600 m ²	2	?
Treppen		
Steigung (s)	0,14 – 0,19 m	<= 0,18 m
Auftritt (a)	0,26 – 0,32 m	>= 0,26 m
Steigungswinkel	24° – 36°	Keine Angabe
Schrittlänge (SL)	0,59 – 0,65 m	Keine Angabe
max. Stufenanzahl bis Podest	18 (Steigungswinkel <= 36°)	20
Abstandsmaß zwischen Tür und Treppe	mind. 0,5 m zwischen aufschlagener Tür und Treppe, sonst 1 m	Breite des größten Türblatts
Handlauf notwendig	ab 3 Stufen, Treppenbreite > 1,50 m beidseitig	ab 4 Stufen, Treppenbreite > 1,20 m beidseitig

4.2 Untersuchte Szenarien

Bevor auf die unterschiedlichen Szenarien eingegangen wird, sollte zunächst der Begriff „Szenario“, wie er in diesem Gutachten verstanden wird, festgelegt werden.

Im Gegensatz zu der üblichen laut [26] festgelegten Definition weichen wir hier ab, da wir hier vielmehr Parameterstudien durchführen als Szenarien zum Nachweis der Personensicherheit. Wird im Weiteren also von Szenarien gesprochen, so beziehen wir uns darauf, dass wir bei einer gegebenen Geometrie unterschiedliche Einflussgrößen wie z. B. Anzahl Personen, Einengungen variieren, um so die Auswirkungen auf die Entfluchtungszeiten zu analysieren.

Um die Einflüsse von Engstellen auf Fluchtwege zu untersuchen, werden insgesamt vier verschiedene Szenarien zur Beantwortung der Fragestellungen betrachtet.

Zunächst wird in Szenario 1 eine Vergleichsbasis zur bestehenden Tabelle 1 der ASR A2.3 Punkt 5 Abs. 3 geschaffen. Dazu werden die Fluchtwegbreiten mit den entsprechenden Personenzahlen simuliert. Des Weiteren werden Einengungen auf horizontalen Fluchtwegen untersucht: Sowohl die Eindringtiefe als auch die Länge von einengenden Hindernissen werden in Parameterstudien analysiert und bewertet.

Szenario 2 überprüft den Einfluss von Treppen und deren Steigungsverhältnis und setzt dieses ins Verhältnis zu den Entfluchtungszeiten.

In Szenario 3 und 4 werden horizontale und vertikale Fluchtwegselemente kombiniert; in Szenario 3 die Beeinflussung von Türbreite zu Treppenbreite und in Szenario 4 der Einfluss von mehreren Ebenen und zeitversetzter Entfluchtung.

Die Ergebnisse der Analyse werden in Bezug auf die zu beantwortenden Fragestellungen ausführlich diskutiert und dokumentiert.

4.2.1 Begriffsklärung

In den folgenden Auswertungen und Ergebnissen untersuchen wir unterschiedliche Zielgrößen. Um Mehrdeutigkeit zu vermeiden, werden zunächst Definitionen für die im Weiteren verwendeten Größen gegeben.

Geometrische Kenngrößen:

Eindringtiefe:

Wenn Objekte in Bewegungsflächen eingebracht werden, beschreibt die Eindringtiefe die Verengung des Raums, die durch die Reduktion der Passagebreite durch den Gegenstand herbeigeführt wurde.

Kenngrößen pro Simulationslauf:

Passagezeit:

Die Passagezeit betrachtet die Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt, ab dem die erste Person einen definierten Messbereich (der jeweils für ein Szenario vorab festgelegt

wird) betritt bis zu dem Zeitpunkt, zu dem die letzte Person diesen Messbereich wieder verlässt.

Gesamtentfluchtungszeit:

Die Gesamtentfluchtungszeit betrachtet die Zeitspanne ab dem Beginn der Simulation bis die letzte Person das Szenario verlassen hat.

(Personen-)Fluss(rate) und Personenstrom:

Die Anzahl von Personen, die ein definiertes Linienelement (z. B. Türlinie) in einer Zeitspanne überschreiten, bildet einen Personenstrom. Dieser Fluss wird in Personen pro Sekunde [P/s] oder Personen pro Minute [P/min] angegeben und stellt typischerweise eine über ein Zeitintervall (z. B. 5 Sekunden) gemittelte Größe dar.

spezifischer (Personen-)Fluss und spezifischer Personenstrom:

Wird der Personenstrom auf eine Längeneinheit des zugrundeliegenden Linienelements (z. B. Türlinie) normiert, ergibt sich der spezifische (Personen-)Fluss bzw. spezifische Personenstrom. Er wird demzufolge in Personen pro Meter und Sekunde [P/m/s] oder Personen pro Meter und Minute [P/m/min] angegeben.

individuelle Passagezeit:

Um die individuelle Passagezeit zu ermitteln, wird für jede Person die Zeit gemessen, die sie benötigt, den Messbereich zu durchqueren.

Da in den meisten Szenarien mehr als eine Person erzeugt wird, wird diese Zeit weiter ausgewertet nach

- minimale individuelle Passagezeit: Hier wird die Zeit der „schnellsten“ Person angegeben
- individuelle Passagezeit (Median): Hier wird der Median über die Zeiten aller Personen gebildet
- maximale individuelle Passagezeit: Hier wird die Zeit der langsamsten Person angegeben

Aggregierte Kenngrößen pro Szenario

Da die Simulationsläufe aufgrund probabilistischer Eingangsgrößen – wie z. B. Anfangspositionierung der Person, individuelle Wunschgeschwindigkeit, Körperumfang – in ihren Ergebnissen variieren können, werden die Ergebnisse aller Simulationsläufe herangezogen, um Aussagen über die untersuchten Größen zu treffen und die Streuung der Größen zu ermitteln.

Die Ergebnisse werden als Boxplot dargestellt, sodass die Bandbreite der Ergebnisse und Verteilungen der Datenwerte gut abgelesen werden kann.

4.2.2 Szenario 1: Einfluss von Einengungen in Fluchtwegen auf die Entfluchtung

4.2.2.1 Szenariendefinition

Untersucht wird ein 35 m langer Gang und Einengungen innerhalb dieses Gangs (siehe Abb. 4.1). Vor dem Gang befindet sich ein Raum, in dem sich die Personen zu Beginn befinden. Zu Beginn laufen alle Personen gleichzeitig los, sodass ein kontinuierlicher Personenzufluss in den Gang besteht. Die Personen werden aus dem Szenario „entfernt“, sobald sie das Ende des Gangs erreicht haben.

Ziel ist es, den Einfluss von Einengungen in Länge und Tiefe auf die Entfluchtungszeit zu untersuchen.

Zunächst werden die Werte aus Tabelle 1 der ASR A2.3 Punkt 5 Abs. 3 herangezogen und mithilfe der Simulation untersucht. Für geringe Gangbreiten wird zudem die Anzahl der Personen variiert, um den Einfluss der Gangbreiten auf die Gesamtpassagezeiten sowie auf die individuellen Laufzeiten zu untersuchen (Szenario 1.1).

In Szenario 1.2 wird untersucht, inwieweit die zulässigen 15 cm (ASR A2.3 Punkt 5 Abs. 3) Einengung (verursacht bspw. durch Türzargen) einen Einfluss auf die Entfluchtungszeiten haben.

In Szenario 1.3 wird der Einfluss der Eindringtiefe eines Hindernisses näher betrachtet; dazu wird die Länge des Hindernisses (Parameter d , siehe auch Abb. 4.1) konstant auf 0,13 m gesetzt (analog der Länge einer Türzarge). Die Eindringtiefe wird bis zu 0,7 m variiert, die Gangbreite wird fest auf 1,20 m gesetzt. Dabei wird die zulässige Mindestbreite lt. ASR zum Teil unterschritten; der Fokus liegt darauf, die Auswirkungen auch von sehr hohen Eindringtiefen (Parameter c) zu eruieren.

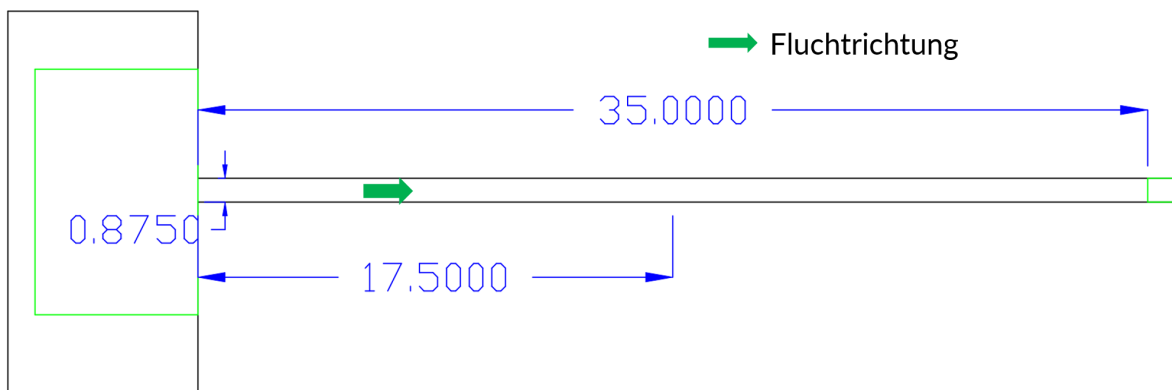
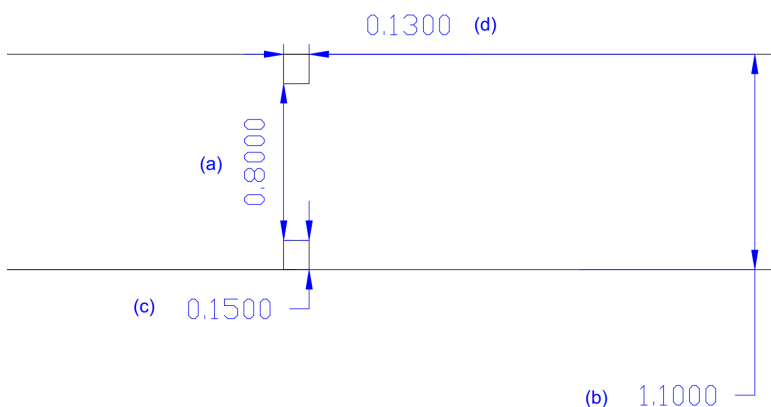
Schließlich wird in Szenario 1.4 der Einfluss der Hindernislänge (Parameter d) untersucht. Wir setzen die Eindringtiefe (Parameter c) fix auf 0,4 m bei einer Gangbreite (Parameter b) von 1,20 m (so sind die zulässigen Mindestmaße lt. ASR eingehalten) und variieren die Länge des Hindernisses (Parameter d) von 0,2 m bis 25 m. Auch hier soll ermittelt werden, welche Auswirkungen Hindernisse (wie bspw. Schränke) über eine längere Strecke hinweg auf die Entfluchtungszeit haben.

Für alle Varianten gelten die in folgender Tabelle aufgelisteten grundlegenden Eigenschaften:

Tab. 4.2 Eigenschaften der Variation im Szenario 1

Eigenschaft	Ausprägung
Fragestellung	Wieviel Einfluss haben Einengungen im Fluchweg auf die Fluchtzeit?
Population	Jeweils Standardpopulation
Zielgröße	Gesamtpassagezeit inklusive Standardabweichung
Anzahl Durchläufe pro Variante	100
Messbereich für die Entfluchtungszeit	Gesamter Gang (Personen werden gezählt, ab dem Moment, in dem sie den Gang betreten)

Alle für das Szenario 1 untersuchten Varianten sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

**Abb. 4.1** Gesamtaufbau Szenario 1 (Angaben in m)**Abb.4.2** Detailbereich Einengungen bei 17,5 m (Angaben in m)

Tab. 4.3 Varianten für Szenario 1

	Anzahl Personen	Anzahl Hinder- nisse	Para- meter (a)	Para- meter (b)	Para- meter (c) zu un- tersu- chen	Para- meter (d) zu un- tersu- chen
lt. ASR A2.3 Punkt 5 Abs. 3			a > 80 cm	b >= 87,5cm		
Szenario 1.1-87.5	5	0	wie b)	87,5	0	0
Szenario 1.1-100	20	0	wie b)	100	0	0
Szenario 1.1-120	200	0	wie b)	120	0	0
Szenario 1.1-180	300	0	wie b)	180	0	0
Szenario 1.1-240	400	0	wie b)	240	0	0
Szenario 1.2-80-15-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	80	110	15	13
Szenario 1.2-87.5-15-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	87,5	117,5	15	13
Szenario 1.2-90-15-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	90	120	15	13
Szenario 1.2-95-15-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	95	125	15	13
Szenario 1.2-100-15-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	100	130	15	13
Szenario 1.2-105-15-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	105	135	15	13
Szenario 1.2-110-15-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	110	140	15	13
Szenario 1.2-115-15-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	115	145	15	13
Szenario 1.2-120-15-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	120	150	15	13
Szenario 1.2-80-7.5-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	80	95	7,5	13
Szenario 1.2-87.5-7.5-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	87,5	102,5	7,5	13
Szenario 1.2-90-7.5-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	90	105	7,5	13
Szenario 1.2-95-7.5-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	95	110	7,5	13
Szenario 1.2-100-7.5-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	100	115	7,5	13
Szenario 1.2-105-7.5-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	105	120	7,5	13
Szenario 1.2-110-7.5-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	110	125	7,5	13
Szenario 1.2-115-7.5-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	115	130	7,5	13
Szenario 1.2-120-15-13	5,10,15,20,50,100,200,400	2	120	150	15	13
Szenario 1.3-100-20-13	5,10,15,20,50,100,200,400	1	100	120	20	13
Szenario 1.3-95-25-13	5,10,15,20,50,100,200,400	1	95	120	25	13
Szenario 1.3-90-30-13	5,10,15,20,50,100,200,400	1	90	120	30	13
Szenario 1.3-85-35-13	5,10,15,20,50,100,200,400	1	85	120	35	13

	Anzahl Personen	Anzahl Hinder- nisse	Para- meter (a)	Para- meter (b)	Para- meter (c)	Para- meter (d)
Szenario 1.3-80-40-13	5,10,15,20,50,100,200,400	1	80	120	40	13
Szenario 1.3-75-45-13	5,10,15,20,50,100,200,400	1	75	120	45	13
Szenario 1.3-70-50-13	5,10,15,20,50,100,200,400	1	70	120	50	13
Szenario 1.3-65-55-13	5,10,15,20,50,100,200,400	1	65	120	55	13
Szenario 1.3-60-60-13	5,10,15,20,50,100,200,400	1	60	120	60	13
Szenario 1.3-55-65-13	5,10,15,20,50,100,200,400	1	55	120	65	13
Szenario 1.3-50-70-13	5,10,15,20,50,100,200,400	1	50	120	70	13
Szenario 1.4-80-40-20	5,10,15,20,50,100,200,400	1	80	120	40	20
Szenario 1.4-80-40-50	5,10,15,20,50,100,200,400	1	80	120	40	50
Szenario 1.4-80-40-100	5,10,15,20,50,100,200,400	1	80	120	40	100
Szenario 1.4-80-40-200	5,10,15,20,50,100,200,400	1	80	120	40	200
Szenario 1.4-80-40-500	5,10,15,20,50,100,200,400	1	80	120	40	500
Szenario 1.4-80-40-1000	5,10,15,20,50,100,200,400	1	80	120	40	1000
Szenario 1.4-80-40-1500	5,10,15,20,50,100,200,400	1	80	120	40	1500
Szenario 1.4-80-40-2000	5,10,15,20,50,100,200,400	1	80	120	40	2000
Szenario 1.4-80-40-2500	5,10,15,20,50,100,200,400	1	80	120	40	2500

4.2.2.2 Ergebnisse Szenario 1.1

Das Szenario 1 dient dazu, die Fluchtwegbreiten in der horizontalen Fluchtrichtung zu untersuchen. Dazu wurde als Bezugsgröße zunächst die Personenzahl in Relation zur Fluchtwegbreite entsprechend der ASR A2.3 Punkt 5 Abs. 3 Tabelle 1 gesetzt.

In Abbildung 4.3 ist ein beispielhafter zeitlicher Verlauf der Simulation für 200 Personen in einem 1,20 m breiten Gang dargestellt: Zu Beginn werden alle Personen vor dem Gang platziert; die Personen betreten den Gang und verteilen sich je nach Geschwindigkeit; die schnellsten Personen setzen sich zu Beginn ab, danach folgt die Masse. Innerhalb des Gangs bildet sich ein kontinuierlicher Personenfluss aus; wenn zwei langsamere Personen nebenherlaufen, kann es zu einem Abbremsen der darauffolgenden Personen kommen, wie nach zwei Minuten gut zu sehen ist.

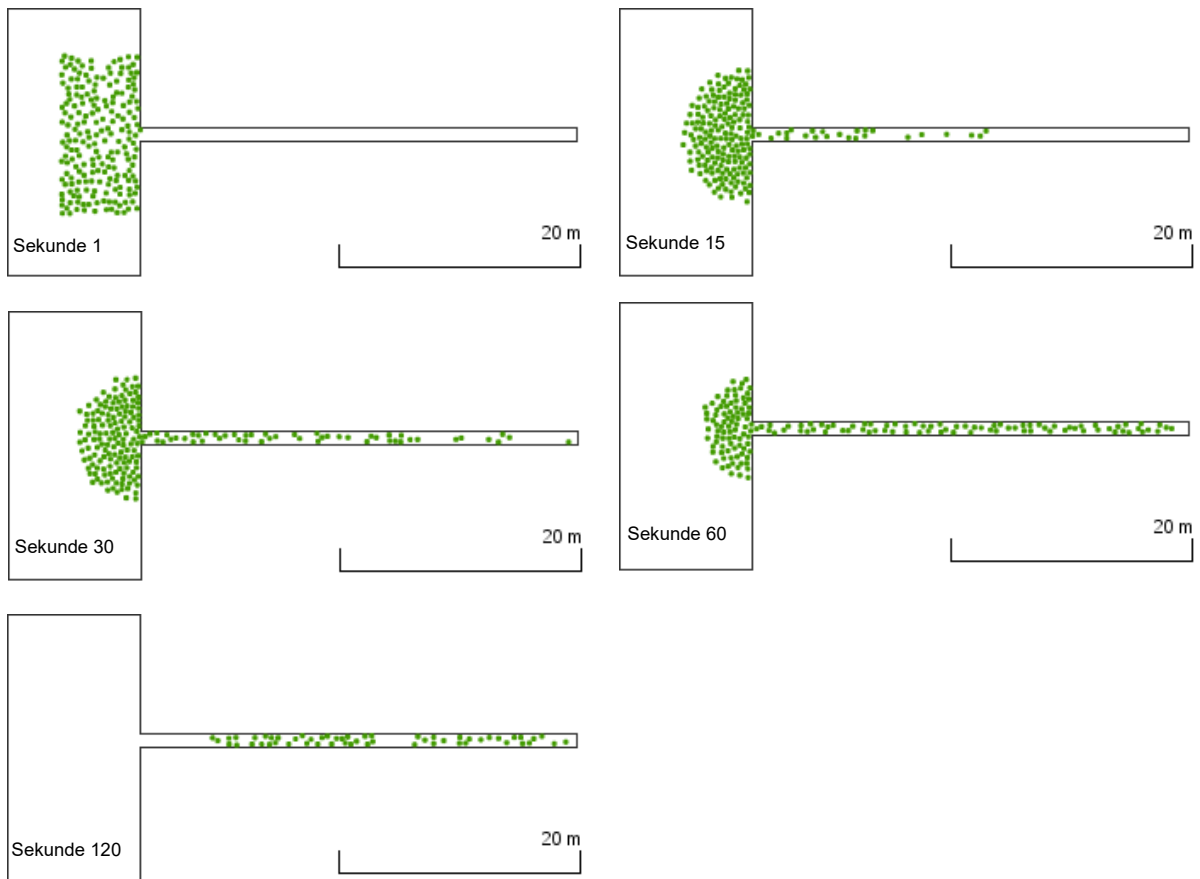


Abb. 4.3 Zeitlicher Verlauf für das Szenario 1.1 mit 200 Personen bei 1,20 m Gangbreite. Die Bilder zeigen den Simulationsverlauf für die Zeitpunkte $t = 1, 15, 30, 60$ und 120

Die Ergebnisse von Szenario 1.1 zeigen Folgendes:

Gerade bei einer sehr geringen Anzahl von Personen sowie geringer Fluchtwegbreite sind die Gesamtentfluchtungszeiten unerheblich. Sie liegen im Median bei ca. 40 Sekunden für 5 Personen und einer Gangbreite von 0,875 m bzw. bei 57 Sekunden für 20 Personen bei 1 m Gangbreite. Würde eine einzelne Person die Strecke zurücklegen, so würde sie je nach individueller Wunschgeschwindigkeit zwischen 24 Sekunden und 38 Sekunden benötigen (siehe Abbildung 4.4 rechts).

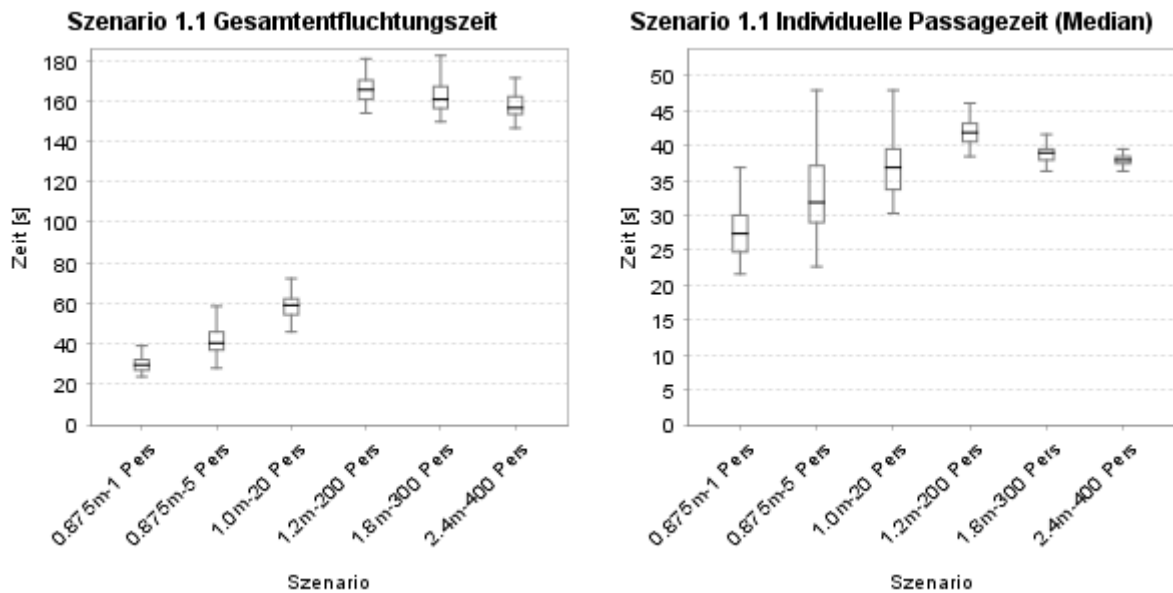


Abb. 4.4 Gesamtpassagezeit sowie individuelle Passagezeit für unterschiedliche Fluchtbreiten und Personenzahl

Erst bei der Entfluchtung von 200, 300 Personen bzw. 400 Personen steigt die Entfluchtungszeit signifikant an und befindet sich in allen drei Fällen zwischen 2,5 Minuten und 3 Minuten mit einem Median von ca. 160 Sekunden (2:44 Minuten) bei 200 Personen bzw. etwas darunter bei 2:37 Minuten für 400 Personen. Dieser Sprung ist sehr deutlich in Abbildung 4.4 zu erkennen. Die Bandbreite der Zeiten liegt bei allen drei Szenarien im selben Bereich. Die Spreizung wird etwas geringer bei 400 Personen und einer Gangbreite von 2,4 m: Die Personen können in den breiteren Gängen einander überholen, und langsamere Personen bremsen die Entfluchtung nicht aus. Es entsteht eine Stauung vor Betreten des Gangs, innerhalb des Fluchtwegs kommt es zu keinen Stockungen.

Die individuellen Passagezeiten steigen ebenfalls bei erhöhter Personenzahl an, jedoch nur geringfügig (siehe Abbildung 4.4 rechts). Bei größeren Personenzahlen wird die Spreizung geringer; Die Geschwindigkeit innerhalb des Gangs gleicht sich aufgrund der Dichte eher den langsameren Personen an.

Festzustellen ist also, dass

- die Gesamtentfluchtungszeiten erwartungsgemäß mit steigenden Personenzahlen bei gleichbleibenden Gangbreiten steigen,
- bei einer geringen Anzahl von Personen sich nur eine unwesentliche Verzögerung einstellt,
- die Passagezeiten sich bei höherer Personenzahl und entsprechend breiteren Gängen im gleichen Größenbereich einstellen.

Um die Auswirkungen in engen Gängen bei höheren Personenzahlen zu betrachten, wurden schmale Fluchtbreiten näher untersucht.

In Abbildung 4.6 sind die individuellen Passagezeiten für Fluchtbreiten 0,9 m, 1,0 m sowie 1,1 m mit jeweils unterschiedlicher Personenzahl eingetragen.

Zu erkennen ist, dass die individuellen Passagezeiten für eine Gangbreite von 1,0 m – wie zu erwarten war – mit steigender Personenzahl tendenziell ansteigt (siehe Abbildung 4.4 rechts). Jedoch ist bis zu einer Personenzahl von 20 Personen statistisch kein signifikanter Unterschied erkennbar, da die Quartilswerte überlappen und die Minimal- und Maximalwerte nahezu gleiche Werte aufweisen. Selbst bei 30 – 200 Personen vor dem Engpass liegen die Streuungen in der gleichen Bandbreite, sodass eine klare Unterscheidbarkeit der individuellen Passagezeiten nicht gegeben ist, lediglich die Tendenz einer höheren Passagezeit ist zu konstatieren.

Selbst bei einer Gangbreite von 0,9 m ändern sich die individuellen Passagezeiten nicht in einer statistisch relevanten Weise; auch der Trend der Medianwerte bleibt erhalten. Dieses Erscheinungsbild ist auch für eine Gangbreite von 1,10 m zu beobachten.

Vergleicht man die individuellen Passagezeiten (Abbildung 4.6) mit den Zeiten aus Abbildung 4.4, so liegt der Median der Zeiten unterhalb der Vergleichswerte von 28 – 42 Sekunden (Median) aus Abbildung 4.4 bei allen drei Gangbreiten bis 50 Personen. Ist der Gang breiter, so nähern sich die Zeiten (Median) den Zeiten aus Abbildung 4.4 an, bleiben jedoch oberhalb dieser Werte.

Die Gesamtentfluchtungszeiten (Abbildung 4.7) steigen flach bis zu einer Personenzahl von 20 Personen an, danach linear. Dies deckt sich mit experimentellen Versuchen aus [41] (Abbildung 4.5): Dort wurden Daten aus Experimenten, die weltweit durchgeführt wurden, zusammengetragen. Es wurden Flussraten in Bezug zu den Fluchtwegbreiten gesetzt; erkennbar ist ein linearer Anstieg; diese Erkenntnisse sind bereits in die MVStättVO §7(3) eingeflossen und können auch hier wieder bestätigt werden.

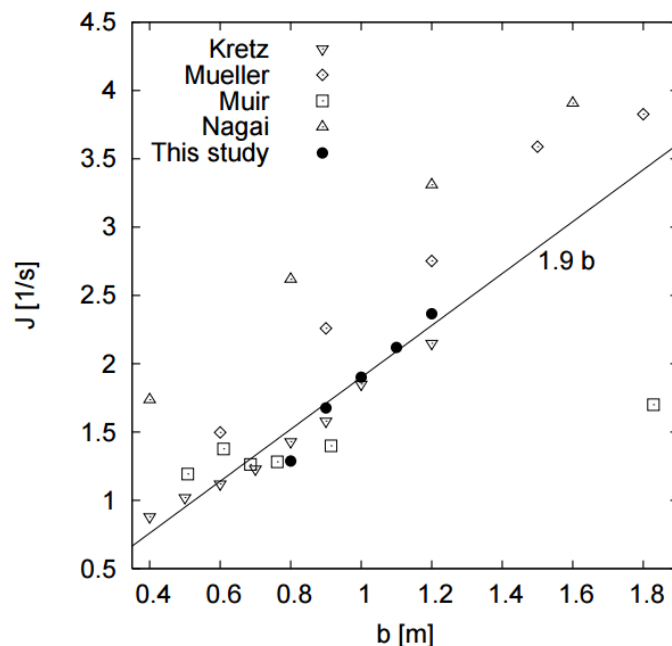
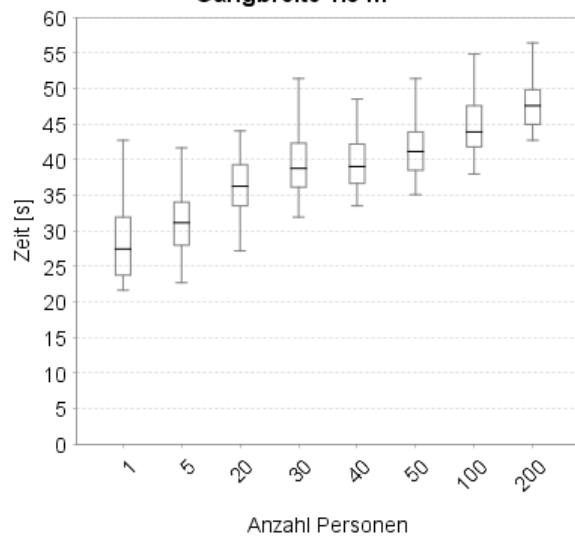
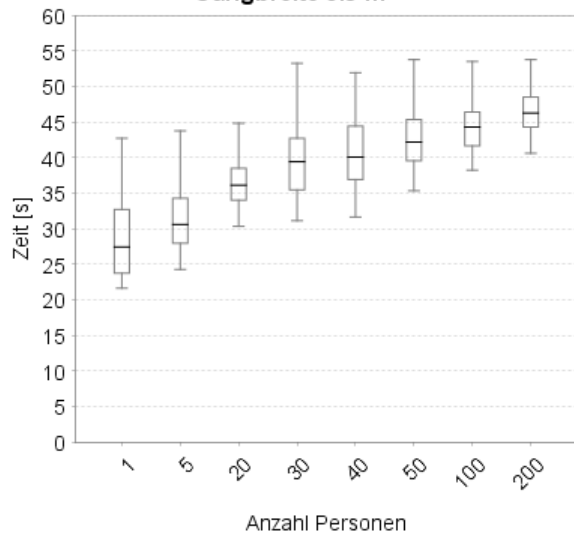


Abb. 4.5 Zusammenhang zwischen Personenfluss J [P/s] und Fluchtwegbreite b [m] ermittelt aus Experimenten (entnommen aus [41])

Szenario 1.1 Individuelle Passagezeit (Median) für Gangbreite 1.0 m



Szenario 1.1 Individuelle Passagezeit (Median) für Gangbreite 0.9 m



Szenario 1.1 Individuelle Passagezeit (Median) für Gangbreite 1.1 m

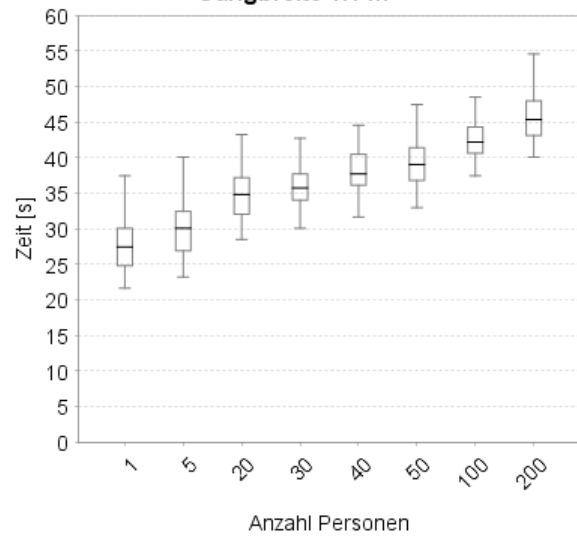


Abb. 4.6 Individuelle Passagezeiten für unterschiedliche Gangbreiten und Personenzahlen

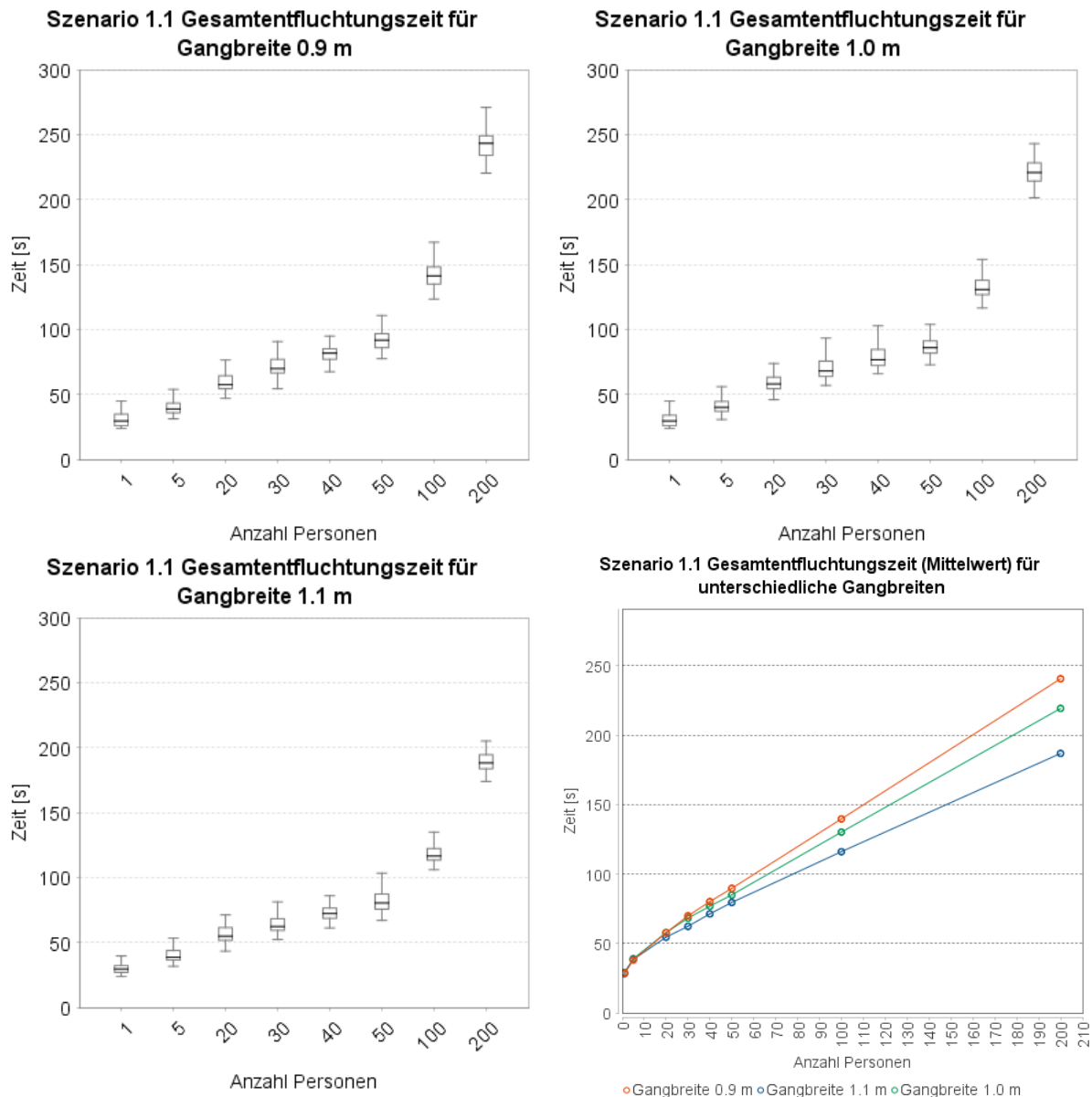


Abb. 4.7 Gesamtentfluchtungszeiten für unterschiedliche Gangbreiten und Personenzahlen (crowd:it)

Die Ergebnisse zeigen, dass Gesamtentfluchtungszeiten bei geringer Personenzahl bis 50 Personen nicht ausschlaggebend sind und weit unter den zugelassenen Werten für höhere Personenzahlen liegen. Die individuellen Passagezeiten liegen bei geringen Gangbreiten etwas oberhalb der Passagezeiten, die sich lt. ASR A2.3 Punkt 5 Abs. 3 Tabelle 1 ergeben.

4.2.2.3 Ergebnisse Szenario 1.2

In diesem Szenario werden die Einengungen von Türcargen in Fluchtwegen untersucht; um Effekte zu sehen, haben wir die Einengungen bei unterschiedlichen Gangbreiten sowie unterschiedlicher Personenzahl getestet (siehe auch Tabelle 4.3). Aufbauend auf der Geometrie des Szenarios 1.1 wird zusätzlich eine Türcarge in der Mitte des Gangs (also nach 17,5 m) eingefügt. Diese mittige Position soll Effekte vor und

nach Einengungen zu gleichen Teilen miteinbeziehen. Die Gangbreiten werden so gewählt, dass die schmalste Stelle minimal 0,8 m beträgt (entsprechend der ASR A2.3 Punkt 3 Abs. 5).

In Abbildung 4.8 ist der zeitliche Verlauf des Szenarios für einen 1,20 m breiten Gang und 200 Personen dargestellt. Es ist kaum ein Unterschied zu dem zeitlichen Verlauf aus Abb. 4.8 zu erkennen; die Türzarge hat keinen sichtbaren Einfluss auf die Passagezeit.

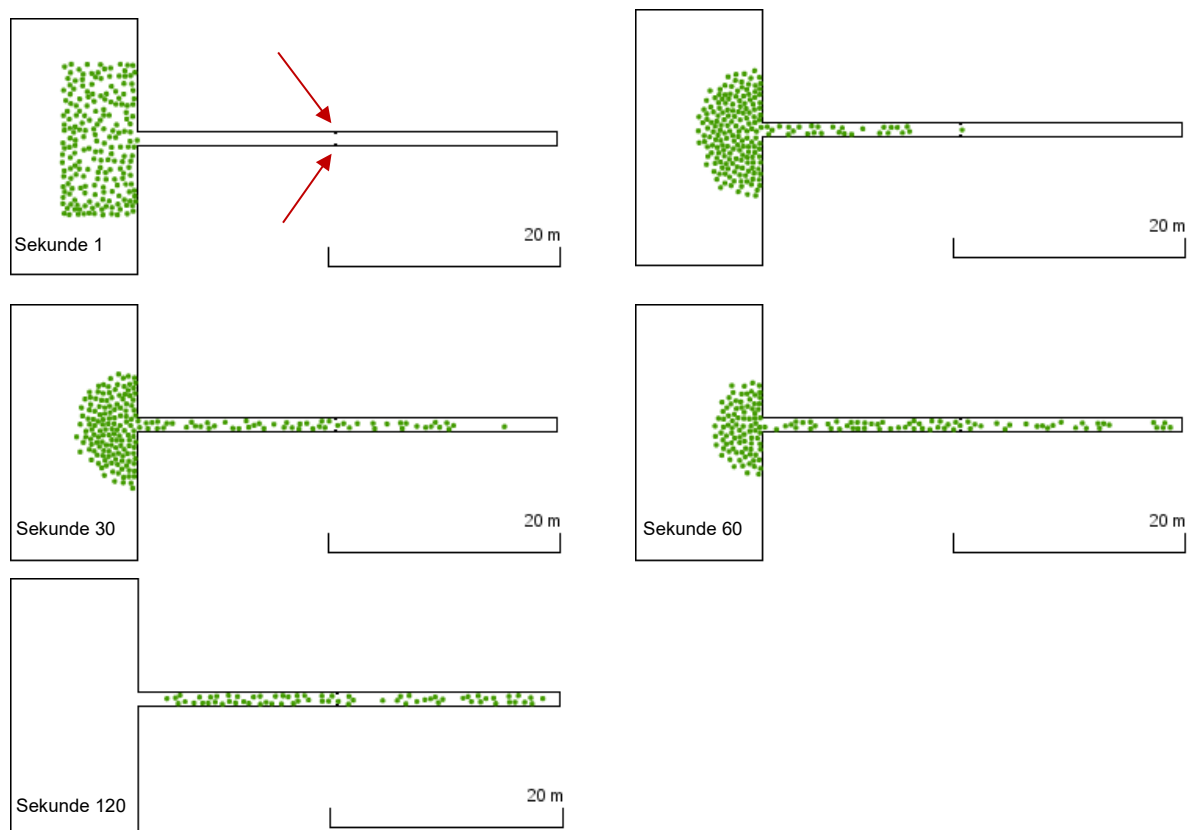


Abb. 4.8 Simulationsverlauf für Szenario 1.2 in einem 1,20 m breiten und 35 m langen Gang mit zwei Einengungen in der Mitte des Gangs (siehe Pfeile) für die Zeitpunkte $t = 1, 15, 30, 60$ und 120 Sekunden (crowd:it). Die jeweils unten rechts eingetragene Referenzlänge beträgt 20 m. Die exakten Abmessungen sind den Abbildungen 4.1 und 4.2 zu entnehmen.

Diese visuellen Eindrücke bestätigen auch die Diagrammangaben in den Abbildungen 4.9 und 4.10: Zu erkennen ist, dass die Gangbreite per se einen Einfluss auf die Passagezeit hat, jedoch nicht die Einengung durch eine Türzarge (Abbildung 4.10). Die kurze Einengung führt zwar dazu, dass sich Personen für eine kurze Strecke nicht überholen können, aber dieser kurze Moment hat keine signifikante Auswirkung auf die Passagezeit des gesamten Flurs.

Um dies besser zu analysieren, werden im Folgenden einzelne Gangbreiten mit und ohne Einengung miteinander verglichen.

Szenario-1-2 mit zwei Hindernissen à 15 cm Tiefe und 13 cm Länge - Gesamtentfluchtungszeit (Mittelwert)

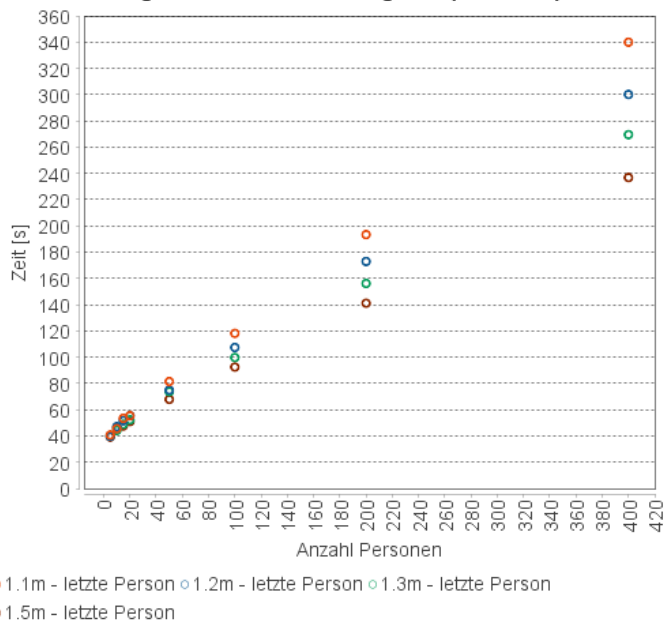


Abb. 4.9 Die mittlere Gesamtentfluchtungszeit des Gangs mit zwei Hindernissen in Abhängigkeit der Personen und der Gangbreite (crowd:it)

Szenario-1-2 ohne Einengung - Gesamtentfluchtungszeit (Mittelwert)

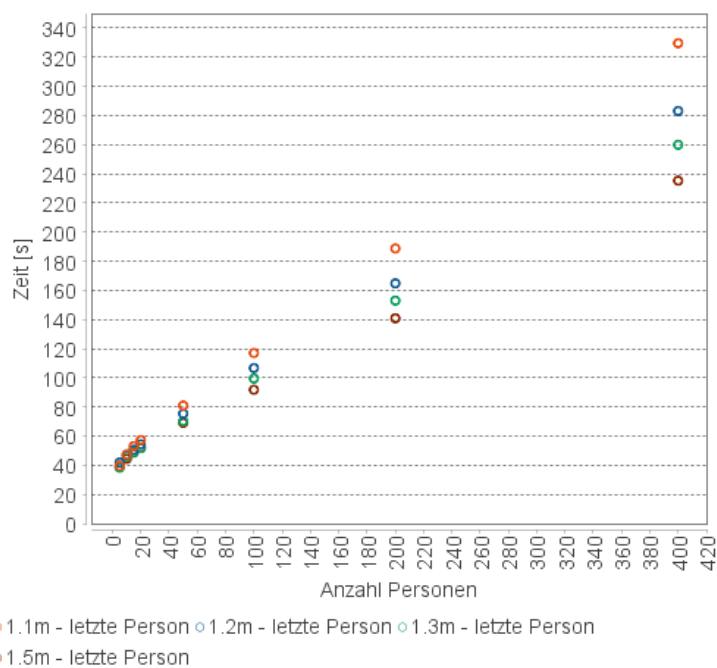


Abb. 4.10 Mittlere Gesamtentfluchtungszeit ohne Einengung in Abhängigkeit der Personen und der Gangbreite (crowd:it)

Wie in der Abbildung 4.11 zu sehen ist, bewegen sich die Passagezeiten mit und ohne Einengung sogar bei sehr geringen Gangbreiten exakt in denselben Bereichen. Eine leichte Erhöhung des Medians der Gesamtentfluchtungszeit kann bei einer Gangbreite

von 1,10 m und 1,20 m und 200 Personen erkannt werden. Die Spreizung der Zeiten liegt bei diesen Gangbreiten dennoch im selben Bereich.

Betrachtet man die Ergebnisse von zwei Einengungen zu je 7,5 cm, so liegen die Werte völlig übereinstimmend. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 4.12 eingetragen.

Daher ist der Einfluss von Einengungen, die sehr gering in den Fluchtweg ragen (beispielsweise Türzargen), auf die Gesamtentfluchtungszeit nur sehr gering und nur in schmalen Gängen bis 1,20 m sichtbar. Im Folgenden wird die Tiefe einer Einengung näher untersucht.

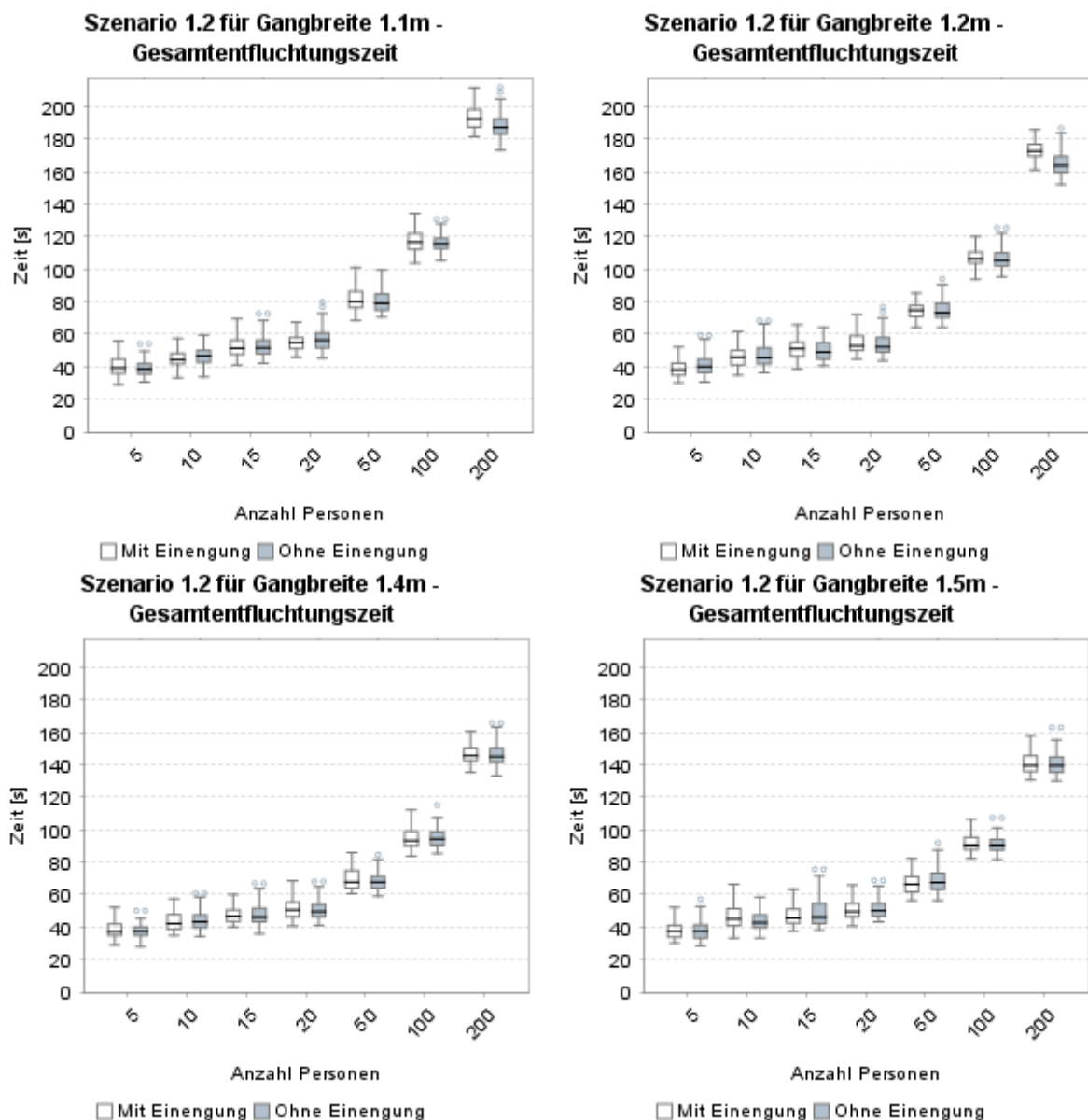


Abb. 4.11 Gesamtentfluchtungszeiten für unterschiedliche Gangbreiten. Die Einengung besteht jeweils aus zwei gegenüberliegenden Hindernissen von 15 cm Eindringtiefe und 13 cm Länge in der Mitte des Gangs. (crowd:it)

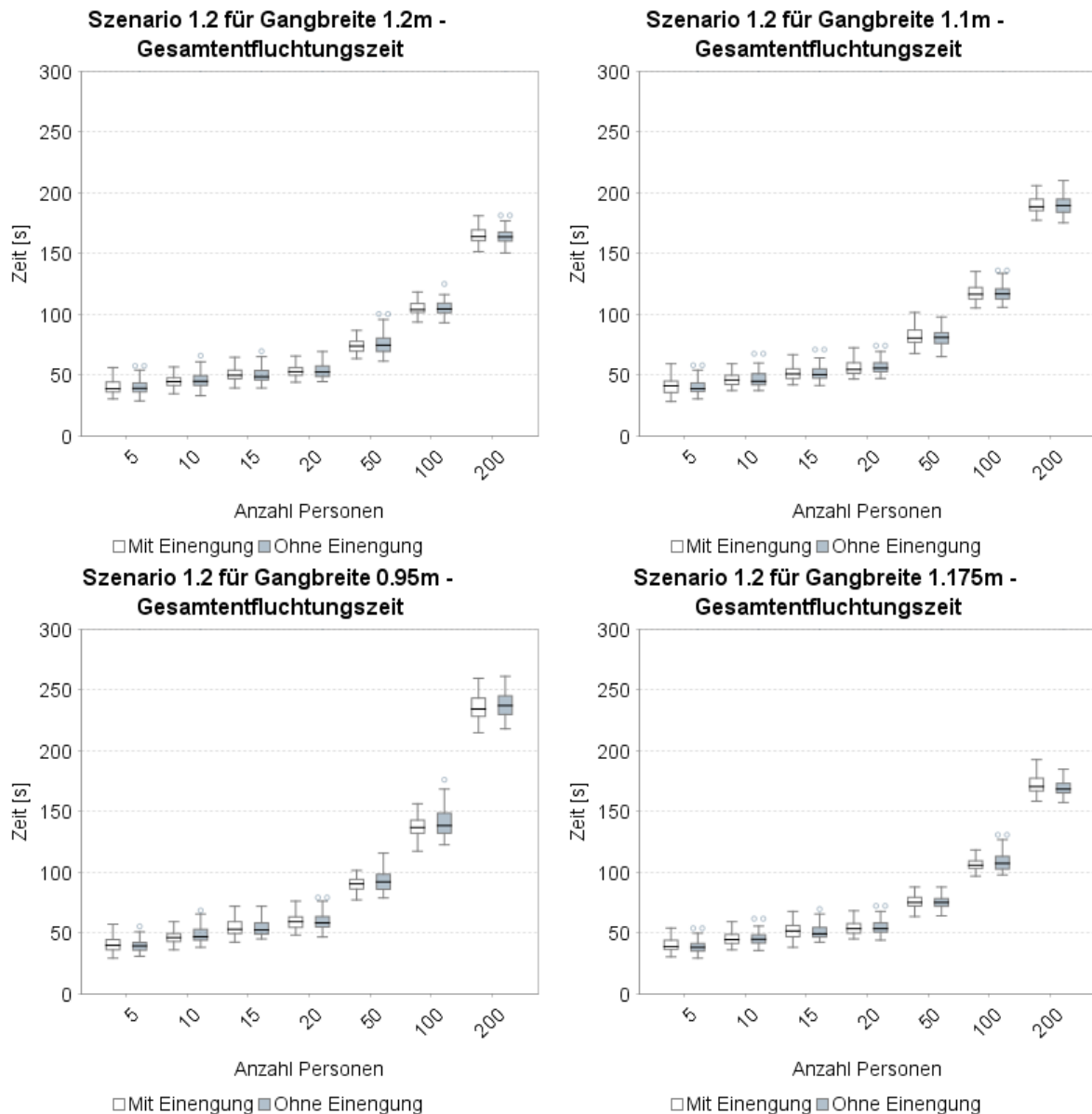


Abb. 4.12 Gesamtentfluchtungszeiten für unterschiedliche Gangbreiten. Die Einengung besteht jeweils aus zwei gegenüberliegenden Hindernissen von 7,5 cm Eindringtiefe und 13 cm Länge in der Mitte des Gangs. (crowd:it)

4.2.2.4 Ergebnisse Szenario 1.3

Um zu untersuchen, ab wann eine Einengung in einem Gang Auswirkungen zeigt, variieren wir im nächsten Schritt die Tiefe der Einengung. Dazu wird in dem Gang aus Szenario 1.1 in der Mitte (also bei 17,5 Metern) eine Einengung der Länge 13 cm (analog zur Türzarge) platziert. Die Gangbreite wird konstant auf 1,20 m gesetzt. Die Eindringtiefe wird von 0,2 m bis 0,7 m variiert. Die Obergrenze ergibt sich daraus, dass die Personen in der Simulation mit einem Körperdurchmesser von bis zu 0,5 m modelliert werden (crowd:it), und damit bei einer größeren Eindringtiefe Personen stecken bleiben.

Der zeitliche Verlauf des Szenarios mit einem 1,20 m breiten Gang und 200 Personen mit einer Einengung von 0,7 m ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Personen in der vorderen Hälfte des Gangs zu Beginn relativ ungestört gehen können. Bereits nach 30 Sekunden bildet sich ein Rückstau aus und die Personen werden an der Stelle mit dem Hindernis vereinzelt. Erst nach sechs Minuten löst sich der Stau vor der Einengung auf. Der Personenfluss nach der Einengung verringert sich sehr stark.

Diese Auswirkung lässt sich gut aus dem Diagramm in Abbildung 4.14 ablesen: Bis zu einer Eindringtiefe von 0,55 m gibt es kaum Rückstaueffekte bei einer Personenzahl von 200 Personen und damit keine signifikante Verlangsamung. Oberhalb der Eindringtiefe von 0,55 m steigt die Passagezeit deutlich an und bei einer Eindringtiefe von 0,7 m ist der Einfluss erheblich.

Zu bemerken ist hier, dass es sich bei einer verbleibenden Restbreite von 0,5 m um einen Randwert handelt und darüber in der Literatur keine Werte aus Experimenten zu finden sind. Im Allgemeinen wird von einer Spurbreite von 0,6 m ausgegangen, da hier gewährleistet werden kann, dass Personen die Engstelle passieren können, ohne dass der Körper ggf. verdreht werden muss. Lt. [42] bewegt sich die Schulterbreite bei Personen zwischen 18 und 65 Jahren zwischen 39 cm (5. Perzentil) bei Frauen bis 52,5 cm (95. Perzentil) bei Männern. Bei einer Durchgangsbreite von 50 cm kann es also zu „Durchquetscheffekten“ kommen, die vermieden werden sollten.

Eine kurze, aber starke Einengung hat also einen Effekt auf die Gesamtentfluchtungszeit; die Zeit erhöht sich gering aber kontinuierlich, je tiefer das Hindernis in den Gang hineinragt.

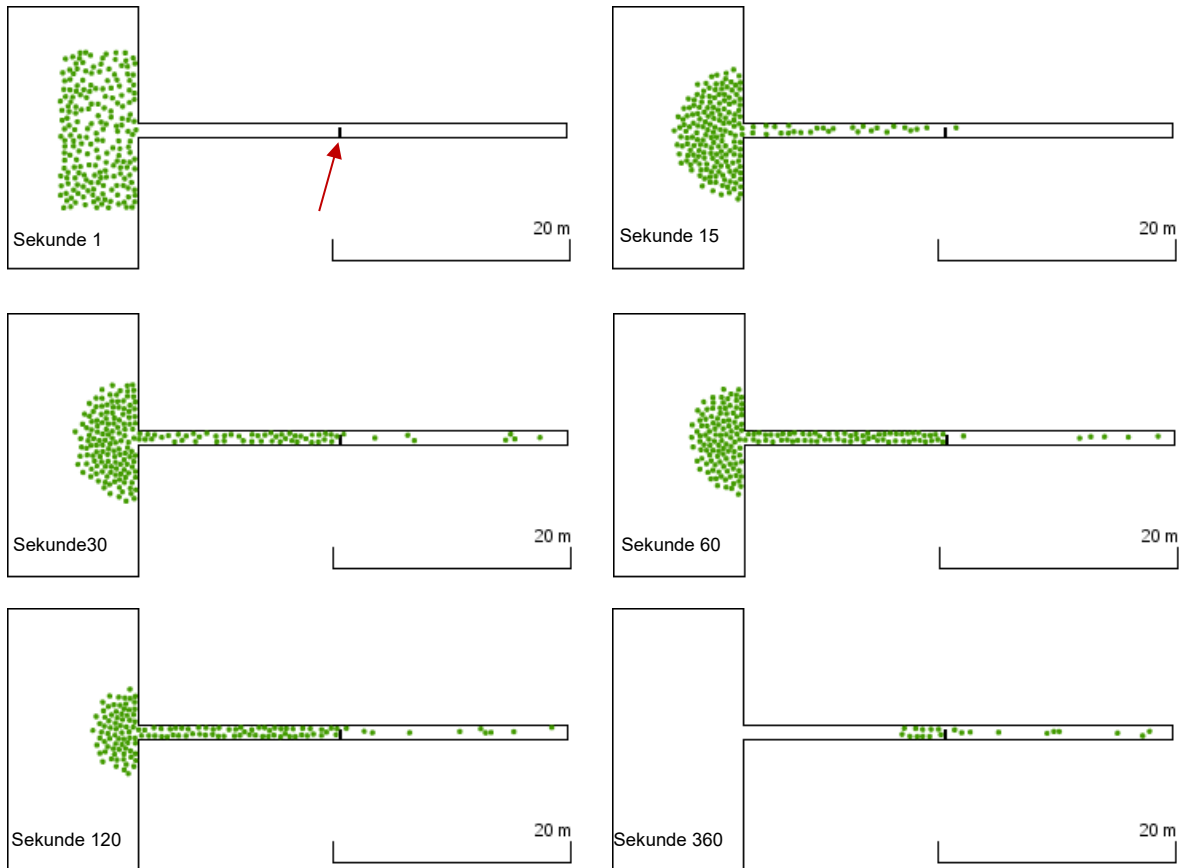
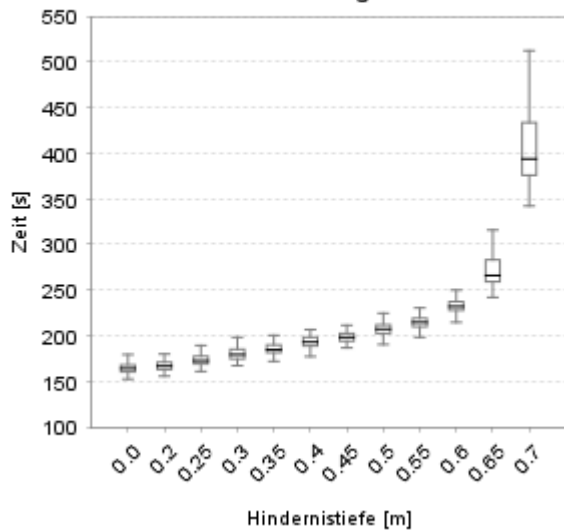


Abb. 4.13 Entfluchtungsverlauf der Simulation des Szenario 1.3 mit Gangbreite von 1,20 m bei einer Länge von 35 m, Hindernistiefe von 0,7 m in der Mitte des Gangs (Pfeil) und 200 Personen (crowd:it). Die exakten Abmessungen sind in den Abbildungen 4.1 und 4.2 dargestellt. Die Bilder zeigen den Simulationsverlauf für die Zeitpunkte $t = 1, 15, 30, 60, 120$ und 360

**Szenario-1-3-Gangbreite-1200mm 200 Personen
Gesamtentfluchtungszeit**



**Szenario-1-3-Gangbreite-1200mm 200 Personen
Individuelle Passagezeit (Median)**

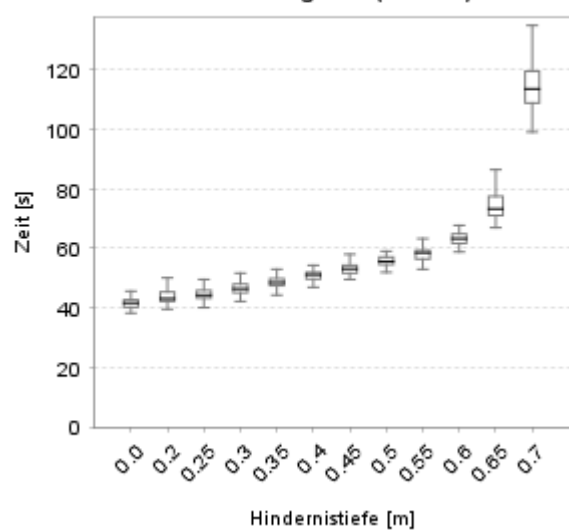


Abb. 4.14 Gesamtpassagezeiten für unterschiedliche Hindernistiefen bei einer Gangbreite von 1,20 m (links) und individuelle Zeiten für dieselben Hindernistiefen (rechts) (crowd:it)

4.2.2.5 Ergebnisse Szenario 1.4

Szenario 1.4 betrachtet den Einfluss der Hindernislänge; dazu wurde ebenfalls auf der Geometrie von Szenario 1.1 aufgesetzt und mittig das Hindernis platziert. Die Eindringtiefe wurde fix auf 0,4 m gesetzt, sodass bei einer Gangbreite von 1,20 m die lt. ASR zugelassene Mindestbreite von 0,8 m als engste Stelle nicht unterschritten wird. Das Hindernis wurde symmetrisch um den Mittelpunkt bei 17,5 m mit bis zu 25 m Länge konstruiert. Die untersuchten Szenarien sind in Tab. 4.3 zusammengefasst.

In Abbildung 4.15 ist der zeitliche Verlauf für Szenario 1.4 mit einer Gangbreite von 1,20 m und einem Hindernis der Länge 2 m für 200 Personen dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Personen über die Länge des Hindernisses hinweg vereinzelt werden. Dies hat zur Folge (nach 30 Sekunden erkennbar), dass sich der Gangbereich vor der Einengung verdichtet. Noch deutlicher ist dieser Effekt nach 60 Sekunden zu sehen. Nach dem Passieren des Hindernisses bildet sich wieder ein lockerer Personenstrom aus, in dem es nur zu kurzen Verlangsamungen durch langsamere Personen kommt.

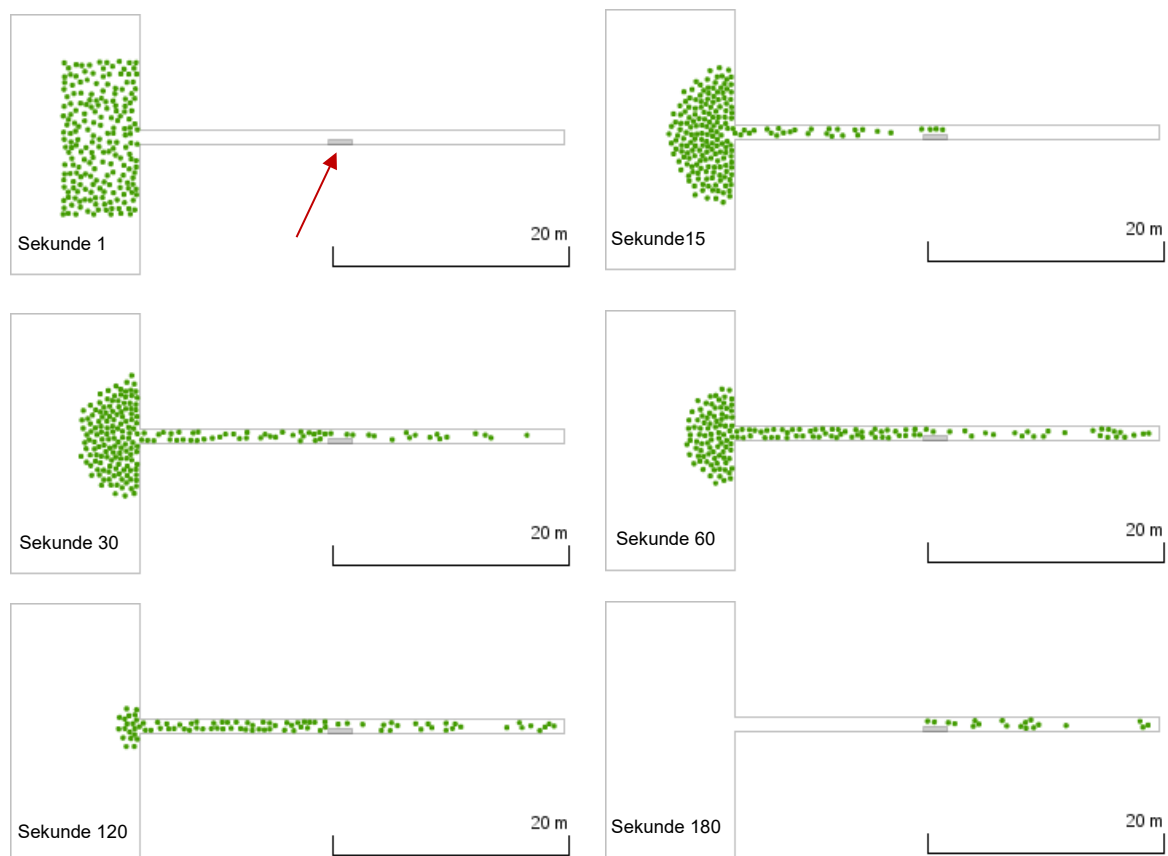


Abb. 4.15 Entfluchtungsverlauf der Simulation des Szenario 1.4 mit Gangbreite 1,20 m, Ganglänge 35 m, Hindernislänge von 2 m in der Mitte des Gangs (siehe Pfeil) und 200 Personen (crowd:it). Die exakten Abmessungen sind in den Abbildungen 4.1 und 4.2 dargestellt. Die Bilder zeigen den Simulationsverlauf für die Zeitpunkte $t = 1, 15, 30, 60, 120$ und 180 .

Aus den Ergebnissen in Abbildung 4.16 ist erkennbar, dass eine Einengung von 0,2 m bis ca. 2 m Länge einen geringen Einfluss auf die Gesamtentfluchtungszeit hat. Danach steigt der Einfluss an: je länger das Hindernis besteht, desto höher wird auch die Gesamtentfluchtungszeit. Jedoch ist ein bereits deutlicher Anstieg der Zeit zwischen keinem Hindernis und einem Hindernis der Länge 0,2 m zu erkennen. Vergleicht man die Ergebnisse aus Szenario 1.2 (Abbildung 4.14), so ist im ersten Moment verwunderlich, warum die Eindringtiefe von 0,4 m einen größeren Einfluss auf die Gesamtentfluchtungszeit hat als zweimal 0,15 m (also insgesamt 0,3 m). Zu erklären ist dies dadurch, dass die Personen in Szenario 1.3 symmetrisch etwas von der Wand ausweichen müssen und die Personen per se bereits einen Abstand zur Wand halten, der sich im Bereich von ca. 0,15 m bewegt. Der Effekt der kurzen Einengung ist also nicht so groß wie bei einem Hindernis, das tiefer hineinragt.

Interessant zu beobachten ist der Effekt, der sich bei sehr langen Hindernissen einstellt: In Abbildung 4.16 für die Passagezeit ist zu erkennen, dass die Zeiten bei einer Hindernislänge von mehr als 10 m wieder etwas absinken. Dies ist mit dem Effekt zu begründen, dass durch die Hindernislänge der Bereich vor dem Hindernis verkürzt wird, in dem Stauungen auftreten; das heißt, dass Personen länger benötigen, um den Gang zu betreten – sich also der Stau in den Vorraum verschiebt. Dies ist in den Gesamtentfluchtungszeiten zu erkennen.

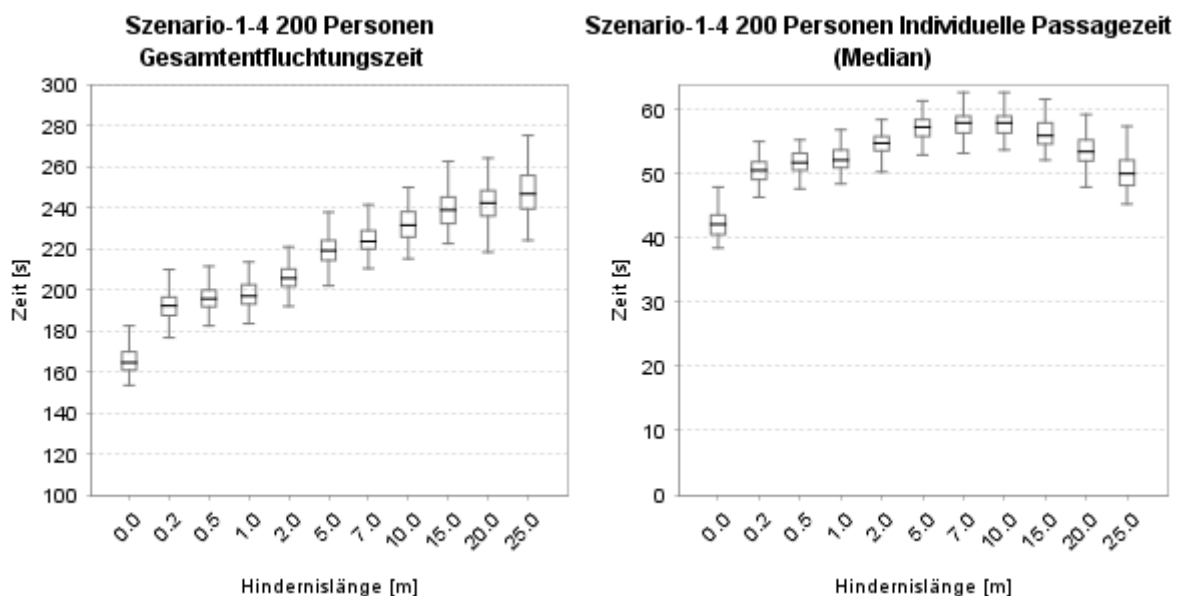


Abb. 4.16 Gesamtentfluchtungszeiten sowie individuelle Passagezeiten für 200 Personen durch einen 1,20 m breiten Gang mit einem 0,4 m tiefen Hindernis abhängig der Hindernislänge. (crowd:it)

Zusammenfassung Szenario 1

In Szenario 1 wurden Einflüsse von Gangbreiten und Einengungen auf horizontalen Fluchtwegen untersucht. Die Ergebnisse der Variationen zeigen, dass kurze Einengungen auf Fluchtwegen kaum Auswirkungen auf die Gesamtentfluchtungszeit sowie auf die Passagezeit Einzelner haben. Die Zeiten liegen oftmals in einer gewissen Streuung abhängig von der Personenzusammensetzung. Bei längeren Einengungen stellen sich Einflüsse auf die Zeiten ein. Insgesamt ist zu erkennen, dass ein steter

linearer Zusammenhang zwischen Fluchwegbreite und Gesamtentfluchtungszeit besteht: Je breiter der Gang, desto höher auch die Durchflussrate. In Bezug auf Tabelle 1 der ASR A2.3 Punkt 5 Abs. 3 ist hier zu empfehlen, eine Anpassung so vorzunehmen, dass die Linearität abgebildet wird.

4.2.3 Szenario 2: Einfluss von Treppen auf die Entfluchtung

Bei diesem Szenario wird der Einfluss des Steigungsverhältnisses von Treppen untersucht. Dazu wird der Gang aus Szenario 1 um eine Treppe erweitert. Die Treppe wird in der Gangmitte (bei 17,5 m) platziert. Die Geometrie der Treppe wird entsprechend der in der ASR A1.8 Punkt 4 Absatz 2 (1.4) zulässigen Werte modelliert.

Um Abbremsseffekte durch andere Personen zu umgehen, wird in diesem Szenario jeweils nur eine Person betrachtet. Die Person betritt das Szenario durch den Vorraum und läuft durch den Gang über die Treppe abwärts zum Zielbereich am Ende des Gangs (siehe auch Abbildung 4.17).

Um dennoch eine hohe Bandbreite von Werten zu bekommen, werden pro Treppengeometrie 1.000 Simulationsläufe durchgeführt. Alle untersuchten Treppengeometrien sind in Tabelle 4.5 aufgelistet.

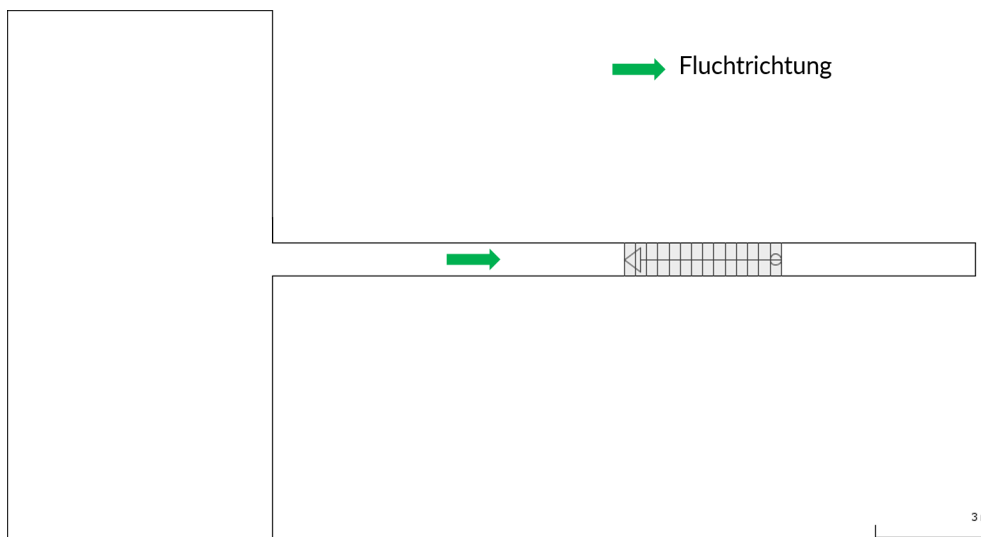


Abb. 4.17 Aufbau wie Szenario 1 jedoch mit abwärtsführender Treppe bei 17,5 m (Gangmitte).

In folgender Tabelle sind die grundlegenden Eigenschaften für das Szenario 2 zusammengefasst:

Tab. 4.4 Eigenschaften der Variation im Szenario 2

Eigenschaft	Ausprägung
Fragestellung	Welchen Einfluss haben Treppen auf die Entfluchtung?
Population	jeweils Standardpopulation
Zielgröße	Horizontale Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Steigungswinkels und der Schrittweite
Anzahl Durchläufe pro Variante	1.000
Anzahl Personen	1
Treppe	Lichte Breite: 1,00 m Anzahl Stufen: 10 Richtung: Abwärts Stufentiefe und -höhe wird variiert
Messbereich für die Entfluchtungszeit	Treppe

Tab. 4.5 Untersuchte Treppengeometrien

	s (Steigung)	a (Auftritt)	SL (Schrittlänge)	Steigungswinkel
zulässig lt. ASR A1.8 Pkt. 4 Abs. 2 (1.4)	14..19 cm	26..32 cm	59..65 cm	24..36
Szenario-2-14-31	14	31	59	24,30
Szenario-2-15-32	15	32	62	25,11
Szenario-2-15-31	15	31	61	25,82
Szenario-2-15-30	15	30	60	26,57
Szenario-2-15-29	15	29	59	27,35
Szenario-2-16-32	16	32	64	26,57
Szenario-2-16-31	16	31	63	27,30
Szenario-2-16-30	16	30	62	28,07
Szenario-2-16-29	16	29	61	28,89
Szenario-2-16-28	16	28	60	29,74
Szenario-2-16-27	16	27	59	30,65
Szenario-2-17-31	17	31	65	28,74
Szenario-2-17-30	17	30	64	29,54
Szenario-2-17-29	17	29	63	30,38
Szenario-2-17-28	17	28	62	31,26
Szenario-2-17-27	17	27	61	32,20
Szenario-2-17-26	17	26	60	33,18
Szenario-2-18-29	18	29	65	31,83
Szenario-2-18-28	18	28	64	32,74
Szenario-2-18-27	18	27	63	33,69
Szenario-2-18-26	18	26	62	34,70
Szenario-2-19-27	19	27	65	35,13

Die gewählten Stufenmaße für den Auftritt a und die Steigung s decken das in den Vorschriften erlaubte Spektrum ab, welches sich einerseits aus der Schrittmaßregel $60 \leq a + 2 \cdot s \leq 66$ cm, die bereits von Nicolas-François Blondel im 17. Jahrhundert angegeben wurde, sowie seiner Sicherheitsregel $45 \leq a + s \leq 47$ cm und Bequemlichkeitsregel $a - s = 12$ cm ableiten lässt. Die DIN 18065 nennt als Schrittmaß einen Bereich von 590 – 650 mm und orientiert sich dabei an einem normalgroßen Mitteleuropäer, woraus hervorgeht, dass es kein Steigungsverhältnis geben kann, dass für alle Menschen generell sicher und bequem ist.

Letztlich entscheiden die angegebenen Bandbreiten, ob eine Treppe für einen großen Querschnitt aller Nutzer ein akzeptables Steigungsverhältnis aufweist. Alle drei Regeln sind für die Mittelwerte der drei Bemessungen nur in einem Punkt erfüllt, der bei einem Auftritt von $a = 29$ cm und einer Steigung $s = 17$ cm liegt. Die Abbildung 4.18 gibt diesen Sachverhalt wieder und zeigt dabei auf, dass die Bandbreiten der Schrittmaß-

und der Sicherheitsregel (dargestellt durch die parallelen unterbrochenen Linien) einen kompakten Überlappbereich besitzen.

Die Vorgaben für Büros und öffentliche Gebäude der DIN 18065 legen bei notwendigen Treppen die Steigung auf mindestens 14 cm und maximal 19 cm (horizontale Linien in Abbildung 4.18) und den Auftritt auf minimal 26 cm und maximal 37 cm (vertikale Linien in Abbildung 4.18) fest. Das sich daraus ergebende Rechteck umschließt weitestgehend den Streubereich der angegebenen Regeln und sorgt bei baulichen Vorgaben bezüglich der Stufenmaße nahezu weltweit für eine enge Toleranz.

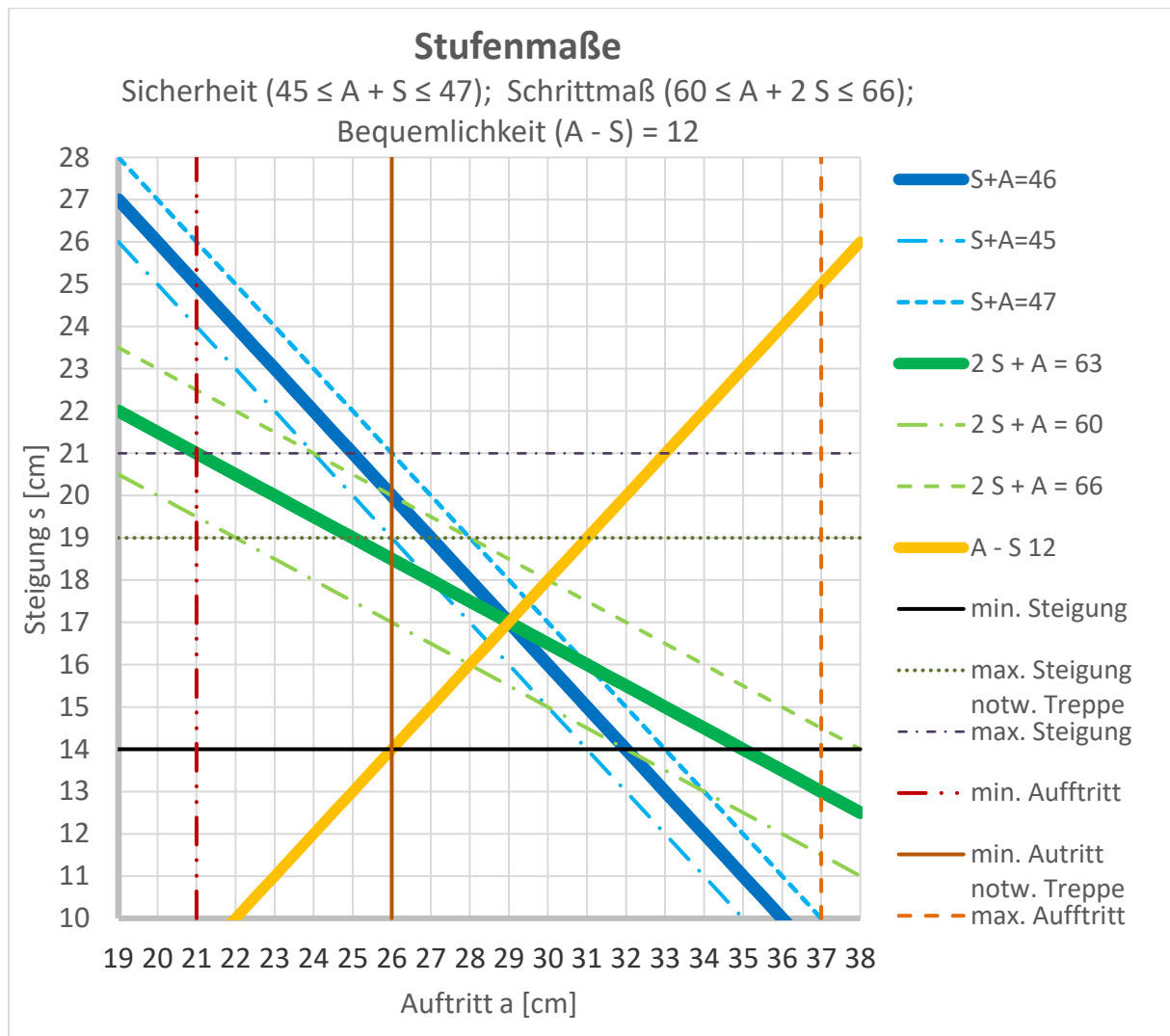


Abb. 4.18 Stufenmaße mit Auftritt (a) und Steigung (s) von Treppen sowie deren bauordnungsrechtlichen Beschränkungen für notwendige und nicht notwendige Treppen als vertikale und horizontale Graphen

Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass die Stufengeometrie einen Einfluss auf die Abbremsung der Personen hat, jedoch innerhalb der erlaubten Treppengeometrien nur unwesentlich schwankt. Während die Geschwindigkeiten (Median) in crowd:it (siehe Abbildung 4.19) im Bereich zwischen 0,45 bis 0,6 m/s abhängig vom Steigungswinkel

schwanken, ergeben sich mit ASERI etwas höhere Werte. Die Spannbreite der Werte pro Treppengeometrie schwanken in crowd:it stark zwischen etwas unter 0,3 m/s bis etwas unter 0,8 m/s. Diese Schwankungen begründen sich durch die Wunschgeschwindigkeiten der Personen in der Ebene: Tendenziell sind Personen, die sich in der Ebene schneller bewegen, auch auf Treppen schneller.

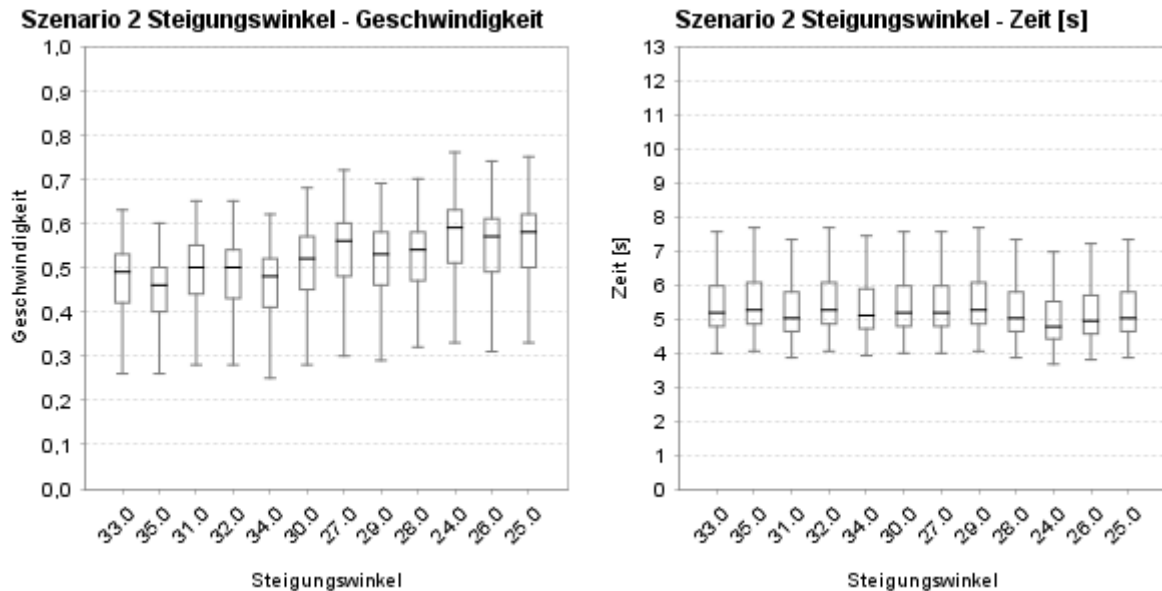


Abb. 4.19 Individuelle Geschwindigkeiten (links) und Zeiten (rechts) auf der Treppe abhängig vom Steigungswinkel der Treppengeometrie (crowd:it)

Überprüft man die Literatur, so wird deutlich, dass sehr hohe Spannbreiten an Geschwindigkeiten angegeben werden. Oftmals fehlt in der Literatur die Angabe der Geschwindigkeiten in der Ebene. Daher ist ein direkter Vergleich mit den Werten aus der Simulation nur bedingt möglich.

In [44] wurde eine umfassende Studie zu Entfluchtungsübungen in Hochhäusern in den USA durchgeführt und zusammengetragen. Dabei wurden mehr als 5.000 Datensätze über Videodaten erfasst und ausgewertet. Insgesamt wurden 14 Gebäude untersucht; darunter 11 Bürogebäude und 3 Wohngebäude. Bei den beiden Wohngebäuden handelte es sich um zwei Gebäude mit älteren Personen. Die Gebäude umfassten zwischen 6 und 62 Ebenen. Die Ergebnisse dieser umfassenden Studie sind in der Tabelle 4.6 zusammengefasst. Insgesamt lagen die Geschwindigkeitswerte bei 0,44 m/s im Mittel über alle Gebäude. Diese Geschwindigkeiten fallen im Vergleich zu Geschwindigkeiten aus anderen Studien eher gering aus. Die Autoren identifizieren als signifikante Einflussgrößen die Anzahl der Personen sowie die Gebäudehöhe.

Tab. 4.6 Zusammenfassende Tabelle der Studie aus [39], S. 7 in deutscher Übersetzung

Variable	Stichprobenumfang	Mittelwert \pm Standardabw.	Median
Zeitspanne bis zum Beobachtungsbeginn [s]	5249	230,0 \pm 53	170
Gesamtgeschwindigkeit [m/s]	5244	0,44 \pm 0,19	0,47
max. Personendichte [P/m ²]	21303	1,87 \pm 0,16	2,04

In [35] wurde eine Studie durchgeführt, in der ein 25-stöckiges Hochhaus in Japan im Rahmen einer Räumungsübung evakuiert wurde. Die erhobenen Daten beziehen sich auf 1136 Personen. Die Geometrie der Treppen mit $s=17$ cm und $a=28$ cm lag im Normbereich, die Treppenbreite betrug 1,20 m. Die Geschwindigkeiten gemessen entlang der Schräge lag – abhängig von der Dichte – zwischen knapp unter 1,0 m/s bis 0,2 m/s. Umgerechnet bei angegebener Steigung auf die Horizontalgeschwindigkeit liegen die Werte zwischen 0,85 m/s bis zu 0,17 m/s bei sehr hohen Dichten.

Die spezifischen Flussraten (gemessen als Anzahl Personen, die den Messbereich durchquert haben, geteilt durch die Zeit und Breite des Laufwegs) wurden beim Ausgang im Mittel bei 0,96 P/m/s, in den oberen Ebenen etwas geringer unter dem Einfluss von einfädelnden Personen im Mittel bei um die 0,6 P/m/s.

In [43] haben die Autoren eine Studie im universitären Umfeld durchgeführt und in ihrer Feldstudie die Durchschnittsgeschwindigkeiten auf einer Treppe mit insgesamt 124 Datenpunkten erhoben und ausgewertet. Da es sich bei der Studie um überwiegend männliche Personen im Alter zwischen 18 und 30 Jahren handelt, waren die Geschwindigkeiten in der Ebene überdurchschnittlich hoch. Die Horizontalgeschwindigkeiten treppauf und treppab unterschieden sich nur gering und lagen im Mittel zwischen 0,59 m/s (treppauf) bzw. zwischen 0,64 und 0,69 m/s (treppab).

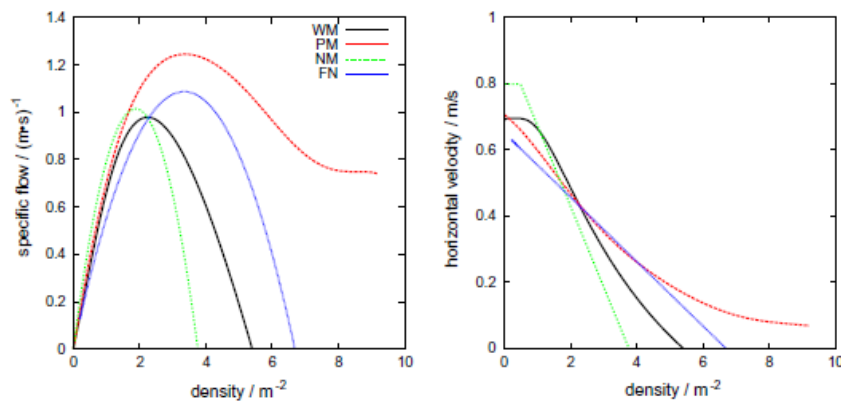
In [37] wurde ein Experiment im Stadionumfeld durchgeführt; zudem wurden die bestehenden Fundamentaldiagramme der gängigen Handbücher miteinander verglichen und die Ergebnisse vergangener Studien sowie der eigens durchgeführten Studie eingeordnet. Deutlich zu sehen sind die sehr unterschiedlichen Werte von Predtetschenski & Milinski aus dem Jahr 1971 [38] zu den übrigen Vorgaben aus den Handbüchern nach Nelson und Mowrer aus dem Jahr 2002 [39], Fruin von 1971 [40] sowie Weidmann aus 1993 [20] (siehe Abbildung 4.20).

Die verglichenen Experimente zeigen Flussraten in Abhängigkeit der Dichte von bis zu 1,2 P/m/s auf und stehen damit im Einklang mit den aus den Handbüchern vorgegebenen Flussraten. In Tabelle 4.7 sind die experimentell bestimmten Basisgrößen aus [37] dargestellt. Dort ist ersichtlich, dass die Werte durchaus schwanken, aber zumindest keine großen Ausreißer festzustellen sind.

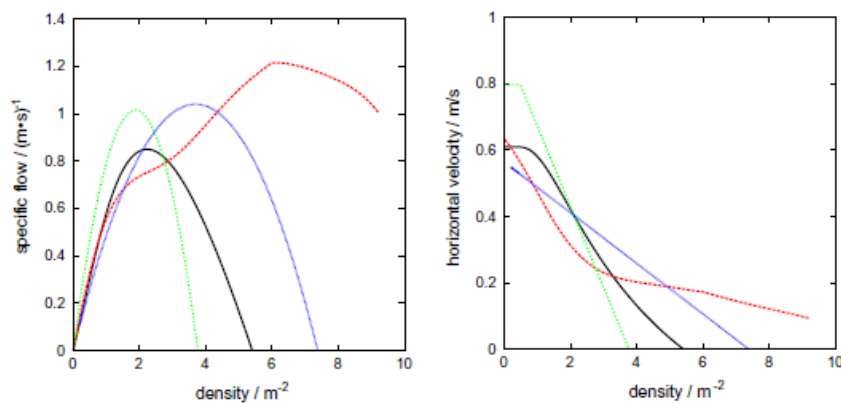
Auch die Ergebnisse der Simulationen liegen in dem Bereich.

Tab. 4.7 Zusammenfassende Tabelle aus [37], S. 271 in deutscher Übertragung: Spannen der experimentell bestimmten Basisgrößen.

beobachtete Größe	Größe/Einheit	Treppe abwärts	Treppe aufwärts
mittlere Geschwindigkeit	$v_{\text{mittl.}}$ [m/s]	0,6 – 0,9	$\approx 0,6$
maximaler spezifischer Personenfluss	$F_{s, \text{max}}$ [P/m/s]	1,1 – 1,4	1,0 – 1,3
Personendichte beim max. spez. Personenfluss	$\rho (F_{s, \text{max}})$ [P/m ²]	1,0 – 3,2	2,4 – 2,5
max. Personendichte	ρ_{max} [P/m ²]	1,7 – 3,5	2,6 – 2,8



(a) Downwards



(b) Upwards

(density – Personendichte, specific flow – spezifischer Personenfluss)

Abb. 4.20 Unterschiedliche Fundamentaldiagramme aus unterschiedlichen Handbüchern aus [37], S. 269

Nach heutigem Stand der Technik kann also ein Abbremsverhalten auf Treppen nachgewiesen werden, die Stärke der Abbremsung schwankt jedoch beträchtlich.

Für vertikale Fluchtwege bedeutet dies, dass es auf Treppen zu einer Verringerung des Personenflusses kommt (aufgrund der geringeren Geschwindigkeiten) und damit zu einer langsameren Entfluchtung.

Mit den in der ASR A1.8 Punkt 4.2 (1.4) vorgeschriebenen Treppengeometrien wurden keine wesentliche Abweichungen nach oben oder unten erkannt, sodass die Technische Regel hier bestätigt werden kann.

4.2.4 Szenario 3: Zusammenwirken von Einengungen und Treppen

Um die Wechselwirkung von Einengungen auf horizontalen Fluchwegen und Treppen zu untersuchen, wurde in Szenario 3 ein Gang konstruiert, an dessen Ende eine Türe zu einem Fluchtreppenhaus führt. In der Folge sollen die Personen einen Treppenlauf hinabsteigen, bevor sie in den sicheren Bereich gelangen (siehe Abbildung 4.21).

Die Fluchrichtung entlang der Treppe ist abwärts. Alle Personen befinden sich zu Beginn des Szenarios in dem Raum vor dem Gang und beginnen ohne Verzögerung mit der Bewegung.

Die Gangbreite wird auf 1,50 m festgelegt, um die Engstelle der Tür bei zwei Türzargen von 15 cm auf 1,20 m zu setzen; die Länge der Gangs bis zur Tür beträgt 17,5 m, insgesamt werden 100 Personen betrachtet.

Die Abstandsmaße zwischen Tür und Treppe wurden anhand der ASR A1.8.Punkt 4.2 gesetzt. Für beide Szenarien wurden 0,5 m zwischen Türblatt bei geöffneter Tür und Treppe eingehalten.

Das Szenario wird variiert, indem einmal die Treppe im 90° Winkel zum Gang orientiert ist (Szenario 3.1, Abbildung 4.21) und einmal in der Verlängerung des Gangs (Szenario 3.2, siehe Abbildung 4.22). So kann der Einfluss eines Richtungswechsels miteinbezogen werden.

Innerhalb beider Szenarien wird die lichte Breite der Türe (Parameter a) sowie der Treppe (Parameter b) variiert, um Einflüsse zu untersuchen (siehe Abbildungen 4.21 und 4.22). Mit der Treppenbreite wird jeweils auch die Podesttiefe verändert, sie entspricht in jeder Variation der Treppenbreite. Sämtliche simulierten Kombinationen sind in Tabelle 4.9 aufgelistet.

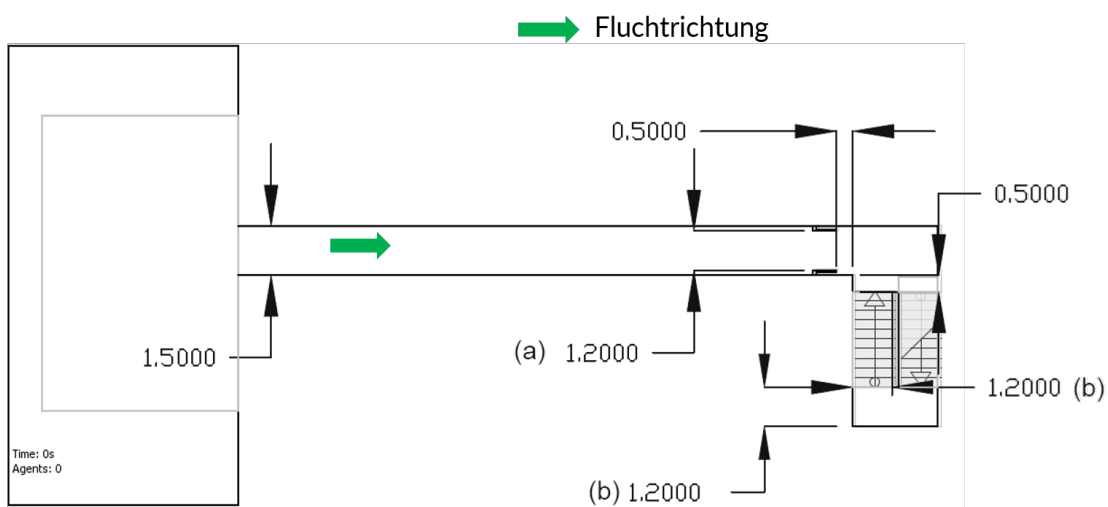


Abb. 4.21 Aufbau von Szenario 3.1. Alle Angaben in m.

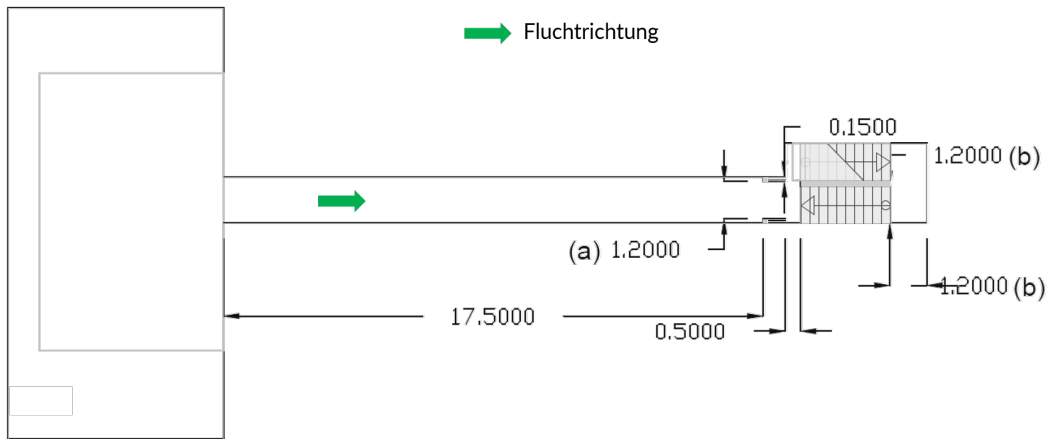


Abb. 4.22 Aufbau Szenario 3.2. Alle Angaben in m.

Tabelle 4.8 beschreibt die grundlegenden Eigenschaften beider Szenarien.

Tab. 4.8 Eigenschaften der Variation im Szenario 3

Eigenschaft	Ausprägung
Fragestellung	Welche Wechselwirkung haben Türbreite und Treppenbreite?
Population	jeweils Standardpopulation
Zielgröße	Gesamtentfluchtungszeit
Anzahl Durchläufe pro Variante	100
Anzahl Personen	100
Treppeneigenschaften	Lichte Breite: wird variiert Anzahl Stufen: 10 Richtung: abwärts Stufentiefe 29 cm, Stufenhöhe 17 cm, 10 Stufen
Messbereich	Gesamtes Szenario

Tab. 4.9 Kombinationen von Tür- und Treppenbreiten für Szenario 3.1 und 3.2

	Anzahl Personen	lichte Türbreite (a)	lichte Treppenbreite (b)	Treppenpodest
		mm	mm	mm
Szenario-3-1-800-800	100	800	800	800
Szenario-3-1-900-800	100	900	800	800
Szenario-3-1-1000-800	100	1000	800	800
Szenario-3-1-1200-800	100	1200	800	800
Szenario-3-1-800-900	100	800	900	900
Szenario-3-1-900-900	100	900	900	900
Szenario-3-1-1000-900	100	1000	900	900
Szenario-3-1-1200-900	100	1200	900	900
Szenario-3-1-800-1000	100	800	1000	1000
Szenario-3-1-900-1000	100	900	1000	1000
Szenario-3-1-1000-1000	100	1000	1000	1000
Szenario-3-1-1200-1000	100	1200	1000	1000
Szenario-3-1-800-1200	100	800	1200	1200
Szenario-3-1-900-1200	100	900	1200	1200
Szenario-3-1-1000-1200	100	1000	1200	1200
Szenario-3-1-1200-1200	100	1200	1200	1200
Szenario-3-2-800-800	100	800	800	800
Szenario-3-2-900-800	100	900	800	800
Szenario-3-2-1000-800	100	1000	800	800
Szenario-3-2-1200-800	100	1200	800	800
Szenario-3-2-800-900	100	800	900	900
Szenario-3-2-900-900	100	900	900	900
Szenario-3-2-1000-900	100	1000	900	900
Szenario-3-2-1200-900	100	1200	900	900
Szenario-3-2-800-1000	100	800	1000	1000
Szenario-3-2-900-1000	100	900	1000	1000
Szenario-3-2-1000-1000	100	1000	1000	1000
Szenario-3-2-1200-1000	100	1200	1000	1000
Szenario-3-2-800-1200	100	800	1200	1200
Szenario-3-2-900-1200	100	900	1200	1200
Szenario-3-2-1000-1200	100	1000	1200	1200
Szenario-3-2-1200-1200	100	1200	1200	1200

4.2.4.1 Ergebnisse Szenario 3.1

In Abbildung 4.23 ist der zeitliche Verlauf der Simulation für das Szenario 3.1 mit Tür- und Treppenbreite von 1,20 m zu sehen.

Zu Beginn befinden sich alle Personen im Raum vor dem Gang; innerhalb des Gangs ist der Personenfluss kontinuierlich; es kommt erst nach 60 Sekunden zu einem Rückstau, der auf die Flussverringerng auf der Treppe zurückzuführen ist. Bereits nach

90 Sekunden löst sich der Stau wieder auf und nach zwei Minuten betreten die letzten Personen den zweiten Treppenlauf.

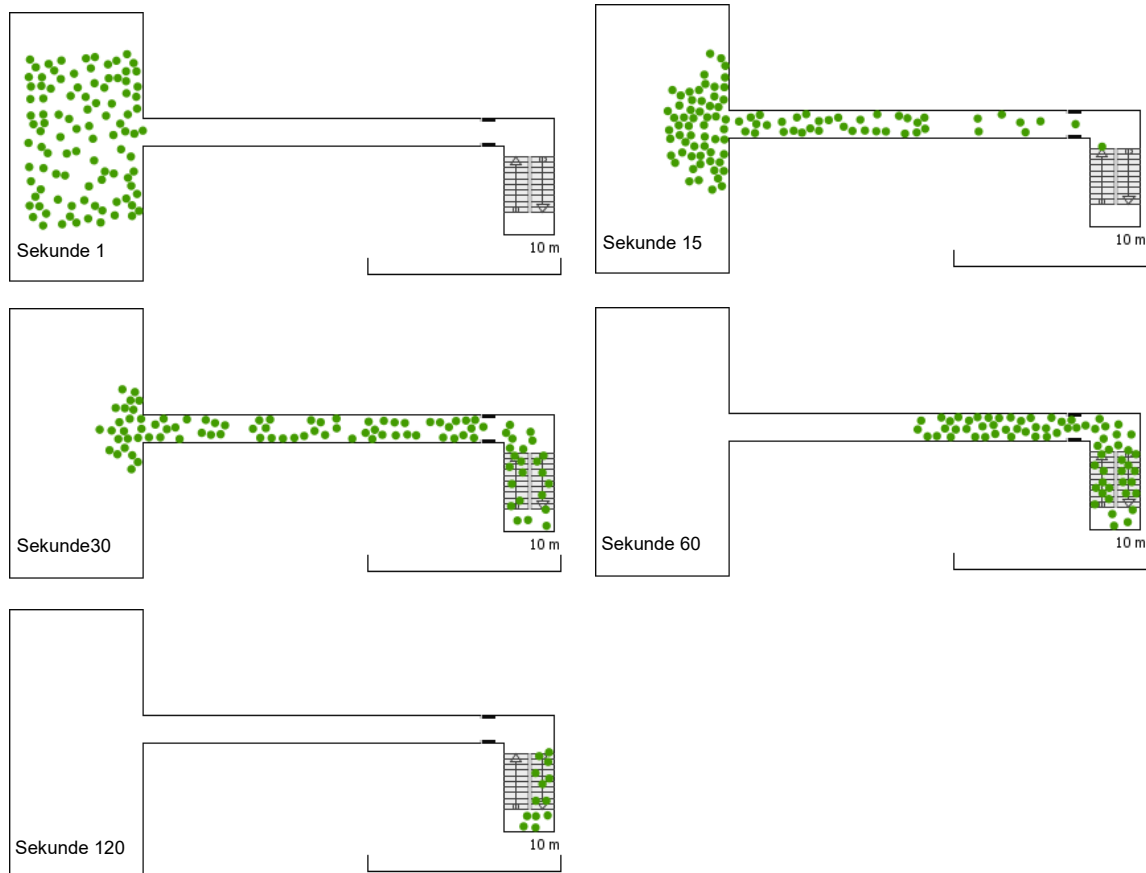


Abb. 4.23 Entfluchtungsverlauf der Simulation des Szenario 3.1 mit Türbreite und Treppenbreite von 1,20 m (crowd:it). Die Bilder zeigen den Simulationsverlauf für die Zeitpunkte $t = 1, 15, 30, 60$ und 120 .

Die Ergebnisse für unterschiedliche Kombinationen von Treppen- und Türbreiten sind in Abbildung 4.24 dargestellt. Deutlich herauszulesen ist, dass die Türbreite keinen Einfluss auf die Entfluchtungszeiten hat; vielmehr stellt die Treppenbreite den primären Engpass dar. Je geringer die Treppenbreite, desto höher steigt die Entfluchtungszeit und der Rückstau in den vorliegenden Gang wächst an.

Die Ergebnisse der beiden Simulationsmodelle unterscheiden sich hier deutlich in den Bereichen, in denen extreme, nicht zugelassene Kombinationen auftreten. Auch nach einschlägiger Literaturrecherche konnten die Autoren hierüber keine empirischen Daten finden. Dies ist naheliegend, da in Experimenten, die in realen Gebäuden durchgeführt wurden, die Standards immer erfüllt waren (vgl. Studien aus [44][36][35][43]).

Zum jetzigen Zeitpunkt kann die Aussage getroffen werden, dass – so lange sich die Mindestbreiten im zulässigen Bereich bewegen, der das Entfluchtungszenario bestimmende Faktor die Treppe darstellt und den Personenfluss entsprechend verlangsam.

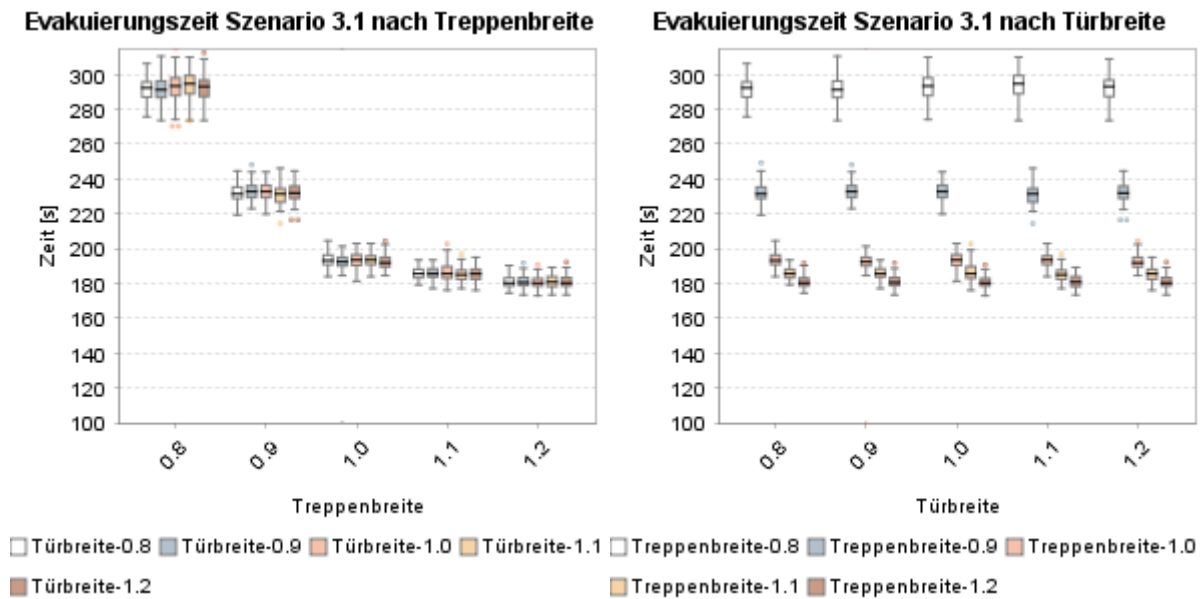


Abb. 4.24 Entfluchtungszeiten von Szenario 3.1, einmal nach Treppenbreite (links) und einmal nach Türbreite (rechts) gruppiert. (crowd:it)

4.2.4.2 Ergebnisse Szenario 3.2

In Szenario 3.2 folgt der Treppenlauf dem Gang und die Personen müssen keine Richtungsänderung vornehmen, um auf die Treppe zu gelangen.

In Abbildung 4.25 ist der zeitliche Verlauf für Szenario 3.2 bei einer Tür- und Treppenbreite von 1,20 m dargestellt. Der Gang hat sich nach 30 Sekunden gefüllt und auch in diesem Szenario bildet sich ein Rückstau nach 60 Sekunden aus. Dieser Rückstau löst sich ebenfalls nach kurzer Zeit wieder auf und nach zwei Minuten verlassen die letzten Personen den zweiten Treppenlauf.

Betrachtet man die Gesamtentfluchtungszeiten in Abbildung 4.26, so liegen diese in einem ähnlichen Bereich wie in Szenario 3.1. Die Zeiten sind etwas niedriger, was sich darauf zurückführen lässt, dass in Szenario 3.2 die Personen keinen Richtungswechsel vornehmen müssen und dadurch etwas weniger abgebremst werden. Daraus lässt sich schließen, dass ein Richtungswechsel innerhalb des Fluchtwegs sich eher nachteilig auf die Entfluchtungszeit auswirkt. Diese Empfehlung geben auch die Autoren aus [37]: Sie verweisen als Ergebnis ihrer Studie in einem Stadion darauf, dass kritische Stellen bei höheren Dichten vor allem bei Richtungswechsel und auf dem Podest auftreten können.

Der Effekt, dass die Treppenbreite der flussvermindernde Faktor ist, zeigt sich auch in Szenario 3.2.

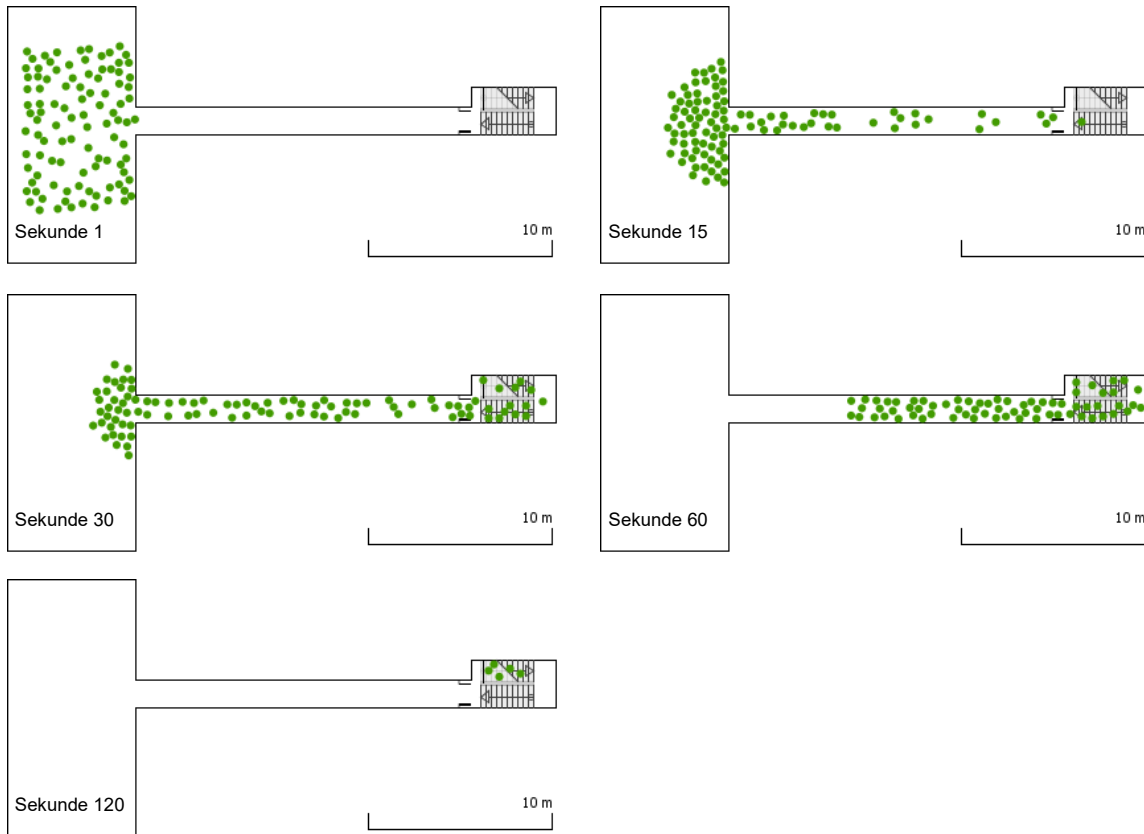


Abb. 4.25 Entfluchtungsverlauf der Simulation des Szenario 3.2 mit Türbreite und Treppenbreite von 1,20 m (crowd:it). Die Bilder zeigen den Simulationsverlauf für die Zeitpunkte $t = 1, 15, 30, 60$ und 120 .

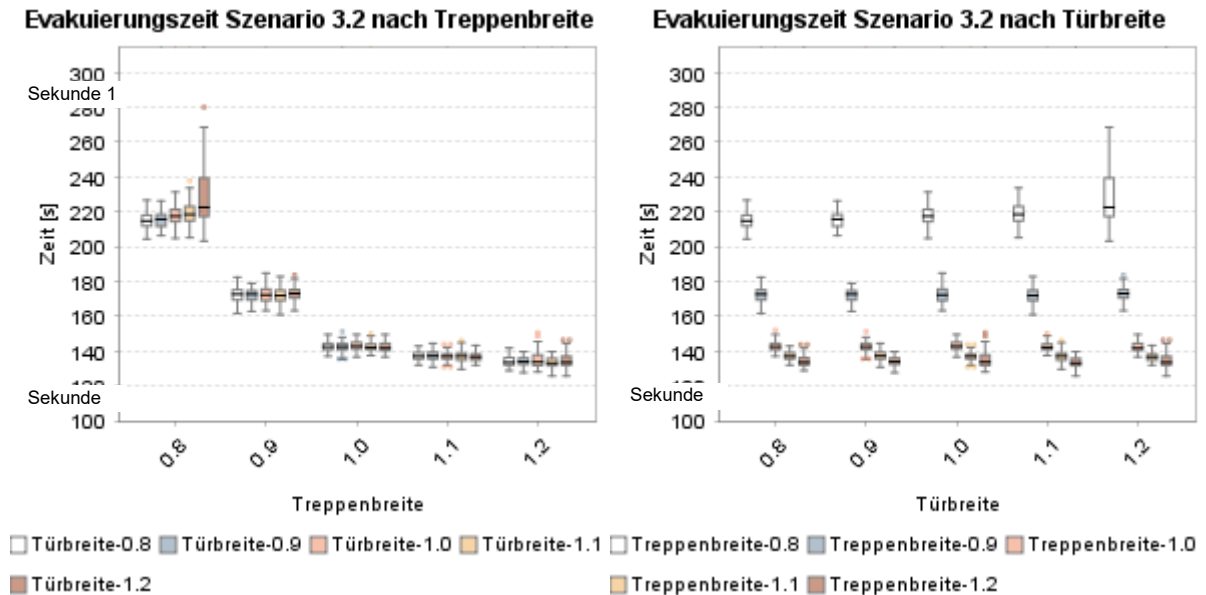


Abb. 4.26 Entfluchtungszeiten von Szenario 3.2, einmal nach Treppenbreite (links) und einmal nach Türbreite (rechts) gruppiert. (crowd:it)

4.2.5 Szenario 4: Vertikale Entfluchtung

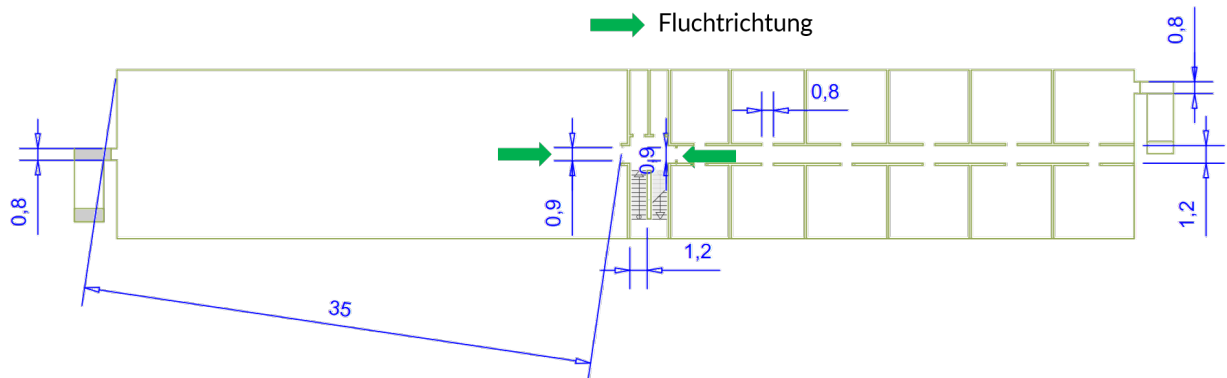


Abb. 4.27 Aufbau von Szenario 4. Alle Angaben in m.

Tab. 4.10 Eigenschaften der Variation im Szenario 4

Eigenschaft	Ausprägung
Fragestellung	Einfluss von Fluchwegbreiten auf vertikalen Fluchtwegen
Population	jeweils Standardpopulation
Zielgröße	Gesamtentfluchtungszeit
Anzahl Durchläufe pro Variante	10
Anzahl Personen	szenarienabhängig
Anzahl Ebenen	3 bis 8
Treppen	Stufenhöhe: 16,5 cm Stufentiefe: 30 cm Anzahl Stufen: 11 Ebenenhöhe: 3,63 m

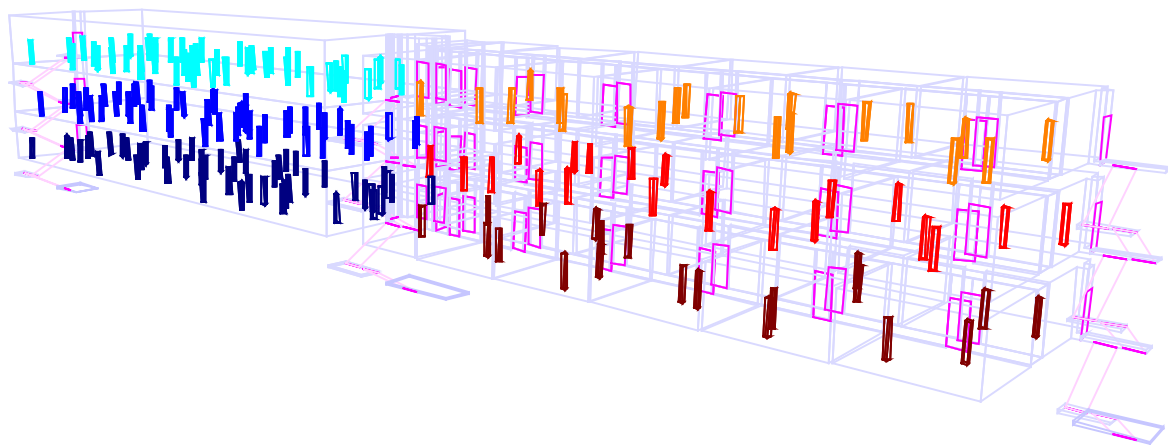
Das Szenario 4 bildet ein Gebäude ab, das aus mehreren Ebenen besteht, die einerseits eine Büronutzung auf einer Fläche von 365 m² aufweist, aus der ein Fluchtweg von 35 m bis zur abschließenden Tür zum Treppenvorraum herausführt (rechter Gebäudeteil in obiger Abbildung 4.25). Auf der linken Seite befindet sich ein Schulungsraum, der durch eine höhere Personenbelegung gekennzeichnet ist und aus dem ebenfalls ein maximal 35 m langer Fluchtweg zum Treppenraum führt.

Die jeweiligen Türen zum innenliegenden Treppenraum besitzen eine lichte Weite von 0,9 m, die Bürotüren von 0,8 m, der Flur ist 1,2 m breit ebenso wie die Treppen- und Podestbreite des zentralen Treppenraums. Bei einer angenommenen Geschosshöhe von 3,63 m führen 22 Stufen mit dem Stufenmaß von 16,5/30 cm (Steigung/Auftritt) über ein Zwischenpodest nach 11 Stufen mit einem Treppenauge von 0,25 m in die nächstuntere Ebene. Da die Beeinflussung der Entfluchtung der Personen über die

Ebenen hinweg zu untersuchen ist, soll eine beliebige Abfolge von 3 und später 8 Ebenen betrachtet werden, ohne dass Effekte der direkten Entfluchtung aus dem Erdgeschoss ohne Treppenbenutzung hineinspielen. Daher laufen Personen aus der unteren Ebene ebenfalls die Treppen über die Geschosshöhe hinunter, ehe sie in sichere Bereiche gelangen.

Ausgangspunkt soll eine Belegung mit ca. 200 Personen über alle drei Ebenen sein, deren gegenseitige Beeinflussung zu untersuchen ist. Da im Weiteren auch zusätzliche Ebenen betrachtet werden (z. B. 8 Ebenen), gehen wir aufgerundet von 70 Personen pro Ebene aus und verteilen diese auf 20 Personen im Bürotrakt (6 Büros x 2 Personen + 8 zusätzliche Mitarbeiter bzw. Besucher) und 50 Personen auf der 401 m² großen Fläche des Schulungsbereichs (linke Seite in der obigen Abbildung).

Szenario »Sz 4 (Ebenen)«



1. Lauf: 0 s

Abb. 4.28 Perspektivische Sicht auf das Gebäude mit drei Ebenen und der Belegung mit 70 Agenten (= Personen) pro Ebene in ihrer zufälligen Ausgangsposition ($t = 0$ s) im ersten Simulationslauf (1. Lauf). (ASERI)

In allen Szenarien soll lediglich der innere Treppenraum mit seiner 1,2 m breiten Treppe genutzt werden. Somit bewegen sich alle Agenten (= Personen) aus dem hier im vorderen Bildteil zu sehenden Bürotrakt auf den mittleren Treppenraum zu, ebenso die Agenten im hinteren Schulungsraum. Agenten in der unteren Ebene (A) sind dunkler markiert, die in der oberen Ebene heller. Agenten im Bürotrakt sind in Rottönen eingefärbt, die in den Schulungsräumen in blau.

Die Entfluchtung dieses Gebäudes wird wie in folgender Tabelle dargestellt variiert:

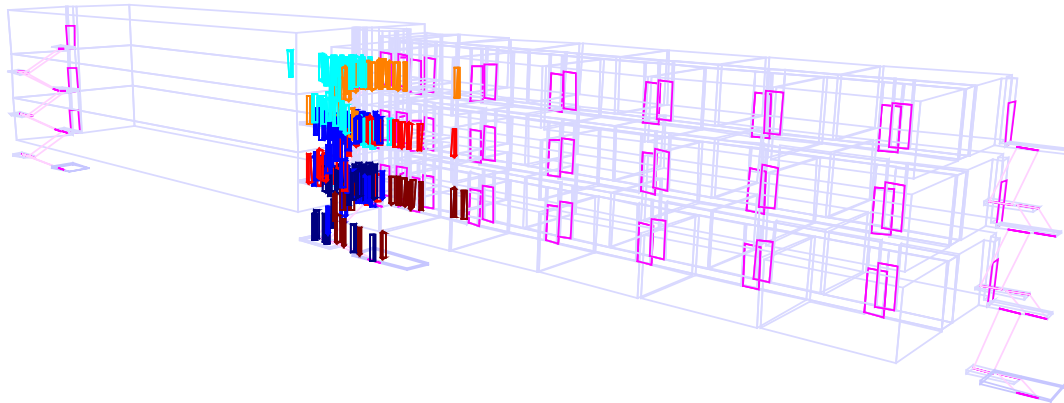
Tab. 4.11 Parametervariationen Szenario 4.1

Szenario	Anzahl Ebenen	Anzahl Personen pro Ebene	Alarmierung	Reaktionszeit
Szenario 4.1	3,4,5,6,7,8	20,30,40,50,60,70,80,90,100	Gleichzeitige Alarmierung aller Ebenen	keine
Szenario 4.2	8	20,30,40,50,60,70,80,90,100	Gleichzeitige Alarmierung aller Ebenen	1 bis 3 Minuten
Szenario 4.3	8	20,30,40,50,60,70,80,90,100	Ebene 4 – 6 sofort, Ebene 1 – 3 und 7,8 zeitversetzt nach zwei Minuten	Keine
Szenario 4.4	8	20,30,40,50,60,70,80,90,100	Ebene 4 – 6 sofort, Ebene 1 – 3 und 7,8 zeitversetzt nach zwei Minuten	Ebene 4 – 6: $\frac{1}{2}$ – 1 Minute, da Gefahr war, sonst 1 bis 3 Minuten

4.2.5.1 Ergebnisse Szenario 4.1 Gleichzeitige Alarmierung und Entfluchtung aller Ebenen ohne Verzögerung

Alle Agenten beginnen ihre Entfluchtung mit dem Zeitpunkt der Alarmierung, d. h., es gibt in den folgenden Szenarien vorerst keine Verzögerung durch ‚Pre-Evacuation‘-Aktivitäten (Informationsbeschaffung, Abstimmung mit anderen Personen, Suchen von persönlichen Gegenständen). Nach einer halben Minute stehen somit nahezu alle Personen vor dem Zugang zum Treppenraum, da sie bei einer mittleren Gehgeschwindigkeit von ca. 1 m/s bereits 30 m zurücklegen konnten – also der in den Nutzungseinheiten vorgegebene längste Fluchtweg wurde bereits bis zum Stau vor den Zugangstüren zum Treppenraum abgelaufen (vgl. Abbildung 4.29).

Szenario »Sz4 (Ebenen)«



1. Lauf: 30 s

Abb. 4.29 Bewegungsbild nach einer halben Minute (ASERI)

Nunmehr spielt sich das gesamte Geschehen vor und im inneren Treppenraum ab, wie es die Projektion über alle Ebenen in der Abbildung 4.30 zeigt. Nach 2½ Minuten befinden sich keine Personen aus den unteren Ebenen mehr im Gebäude, lediglich Agenten aus der oberen Ebene (helle Farben) halten sich noch im Treppenraum auf (Abbildung 4.31). Ein Übersichtsdiagramm, dem sich die Dynamik des Geschehens entnehmen lässt, stellt das Verteilungsdiagramm der Abbildung 4.32 dar. Die drei zu Beginn ($t = 0$ s) mit jeweils 70 Personen belegten Ebenen (untere Ebene A [blau], mittlere Ebene B [hellblau], obere Ebene C [orange]) werden in der ersten halben Minute stetig verlassen.

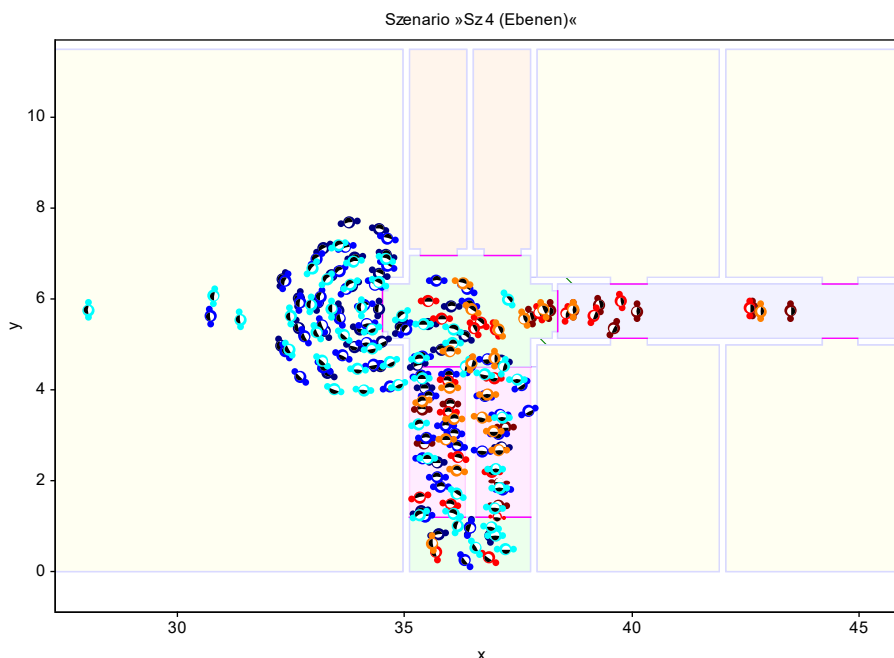
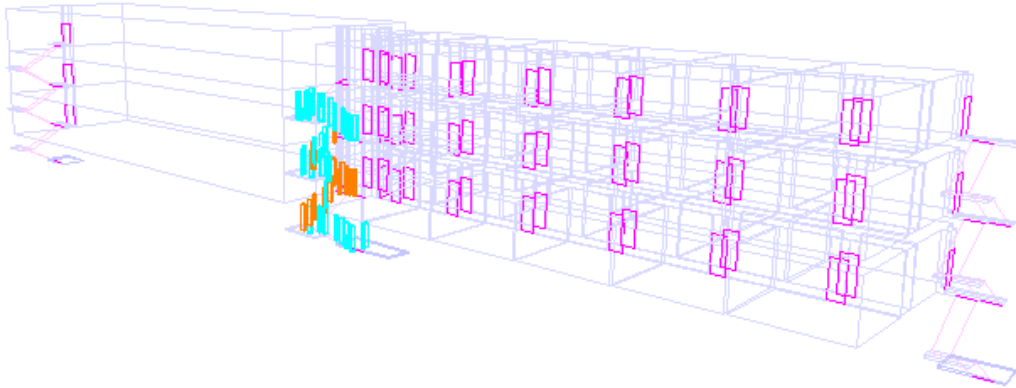


Abb. 4.30 Projektion aller Personen über die 3 Ebenen. Die letzten Personen laufen in den Stau vor dem Schulungsraum, während auf der Büroseite nahezu keine Anstehzeiten entstehen (Die Farbe der Personen zeigt die Ebene an). (ASERI)

Szenario »Sz 4 (Ebenen)«



1. Lauf: 2 min 30 s (150 s)

Abb. 4.31 Bewegungsbild nach 2½ Minuten (ASERI)

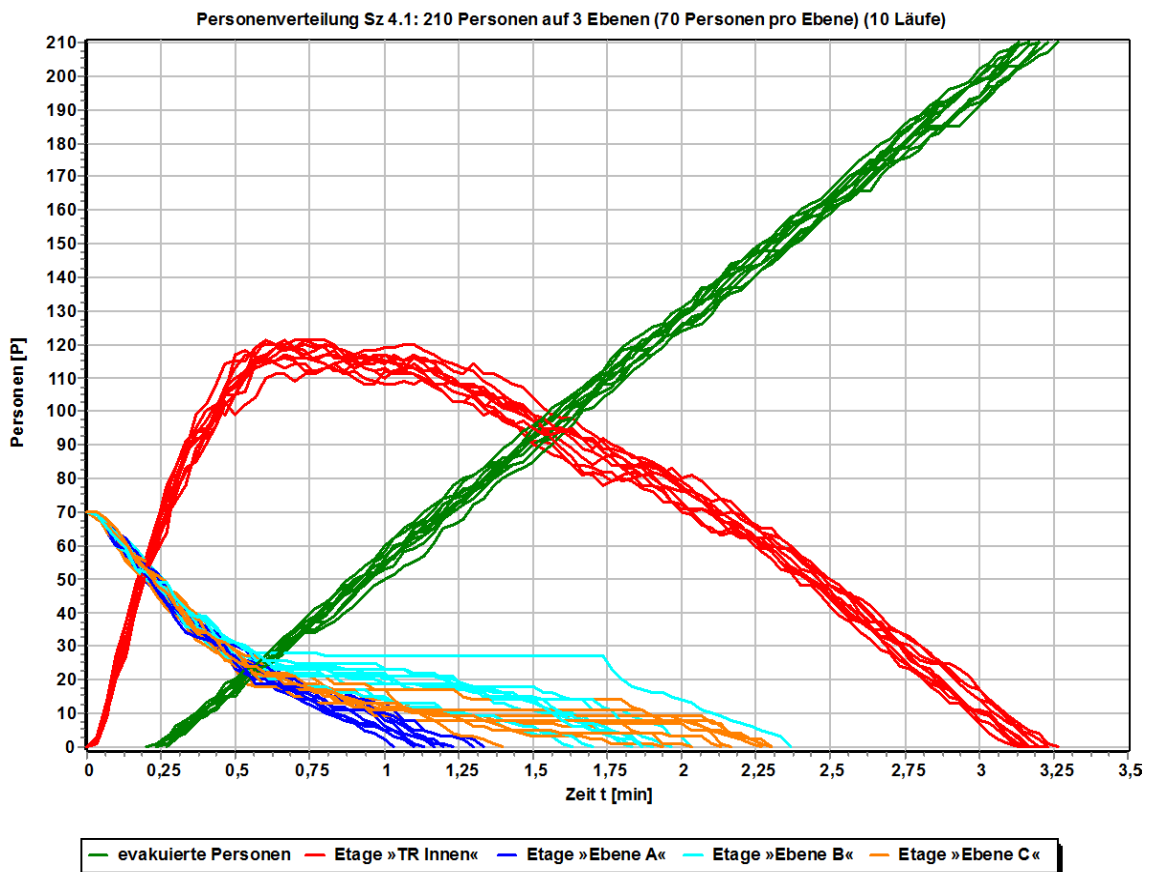


Abb. 4.32 Distributionsdiagramm, das die zeitliche Entwicklung der Entfluchtung der einzelnen Ebenen (unterste Ebene A, oberste Ebene C), des inneren Treppenraums (roter Graph) und der Personen im sicheren Bereich am unteren Ausgang (grüne Graphen) für 10 unabhängige Simulationsläufe zeigt. (ASERI)

Danach sind der Treppenvorraum und die Treppen aufgefüllt (roter Graph). Während die Ebene A nach 1–1¼ min (sowohl der Bürotrakt als auch der Schulungsraum) verlassen ist, warten noch Personen in Ebene B zwischen 1¾ bis 2 Minuten vor der Tür des Schulungsraums. In Ebene C ist dieser Vorgang erst zwischen 2 und 2 min 20 s abgeschlossen.

Alle drei Ebenen sind nach 3 min 14 s \pm 4 s bis zur darunterliegenden Ebene geräumt, wie der Abbildung 4.33 zu entnehmen ist. Da die Gesamtentfluchtungszeit (rote Quadrate) nahe an den 98%- (magentafarbene Dreiecke) und 95%-Perzentilwerten (orangefarbene Dreiecke) liegt, haben sich auch keine relevanten Verzögerungen entlang des Fluchtweges eingestellt. Zudem fällt der Median (50%-Werte; gelbe Rauten) nahezu auf den arithmetischen Mittelwert (blaue Quadrate), womit auch keine schiefe Verteilung vorliegt, d. h., die erste Hälfte der Personen kommt genauso schnell aus dem Gebäude wie die zweite Hälfte.

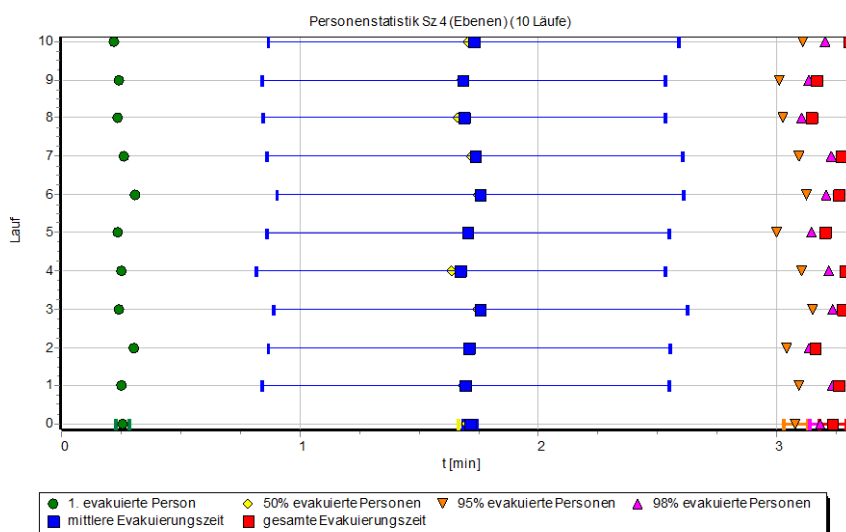


Abb. 4.33 Personenstatistik für 10 Läufe. Lauf 0 zeigt die gemittelten Resultate über alle Läufe. (ASERI)

Der nebenstehende Boxplot gibt die Verteilung der Gesamtentfluchtungszeit analog der Darstellung der Personenstatistik der Abbildung 4.33 (rote Quadrate) wieder. Der Mittelwert wird hierbei durch das x-Zeichen dargestellt.

Parallel zur x-Achse verlaufende Abschnitte der Graphen für die Personen in den Ebenen A, B und C zeigen die Wartezeiten auf, die Personen vor dem Betreten des Treppentraums verbringen müssen. Zwar liegen diese im Bereich von ca. einer Minute und wären nach Erläuterungen der ARGEBAU zur Muster-Versammlungsstättenverordnung als akzeptabel einzuordnen [46], aber es stellt sich die Frage, wie sich diese Zeiten ändern, wenn mehr oder weniger Personen in den Ebenen platziert werden. Die Tabelle 4.12 führt die berechneten Szenarien mit den Personenzahlen pro Ebene und Räumen, sowie die Gesamtzahl über 3 und 8 Etagen auf.

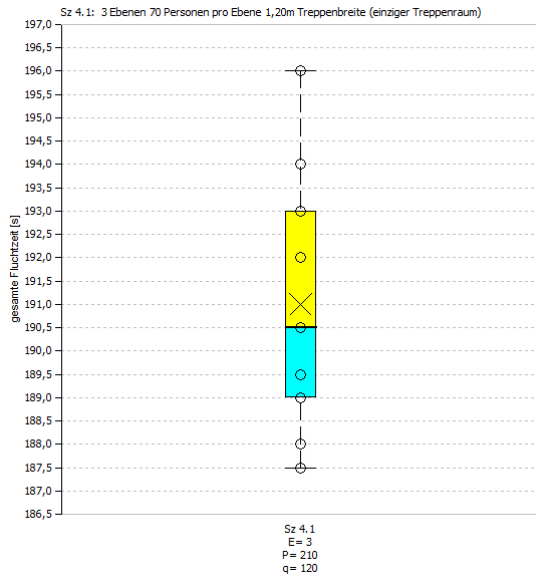


Abb. 4.34 Boxplot der Gesamtfluchtzeiten über 10 Läufe (ASERI)

Tab. 4.12 Personenbelegung der Ebenen im Szenario 4

Personen pro Ebene	Schulungsraum	Bürotrakt	3 Ebenen	8 Ebenen
10	5	5	30	80
20	10	10	60	160
30	15	15	90	240
40	20	20	120	320
50	30	20	150	400
60	40	20	180	480
70	50	20	210	560
80	60	20	240	640
90	70	20	270	720
100	80	20	300	800

Neben der vorgestellten Variante (unterlegte Zeile) treten noch zwei höhere Belegungen auf, die längere, klar nach Ebenen unterscheidbare Wartezeiten zur Folge haben (Abbildung 4.35).

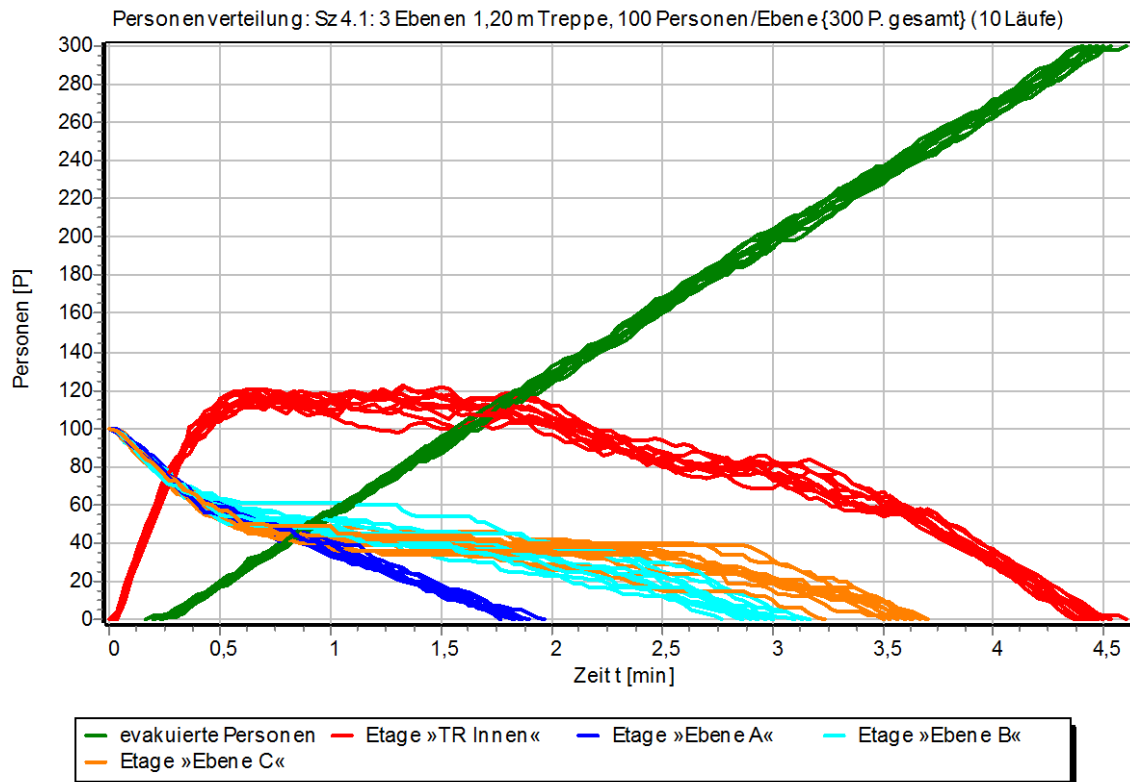


Abb. 4.35 Distributionsdiagramm für 100 Personen pro Ebene und somit 300 über alle drei Ebenen. (ASERI)

Für die geringeren Auslastungen zeigt sich ein gänzlich anderes Bild: Die Entfluchtungszeiten für alle drei Ebenen fallen gleich aus, wie am Beispiel von 40 Personen pro Etage festzuhalten ist (Abbildung 4.36). In diesen Fällen erfolgt die Entfluchtung aus jeder Ebene unabhängig von den anderen, d. h., die Flüchtenden aus einer Ebene kommen im Mittel nicht mit den Personen der oberen Ebenen in Kontakt und treffen bei ihrer Entfluchtung auch nicht auf Personen aus den darunterliegenden Ebenen.

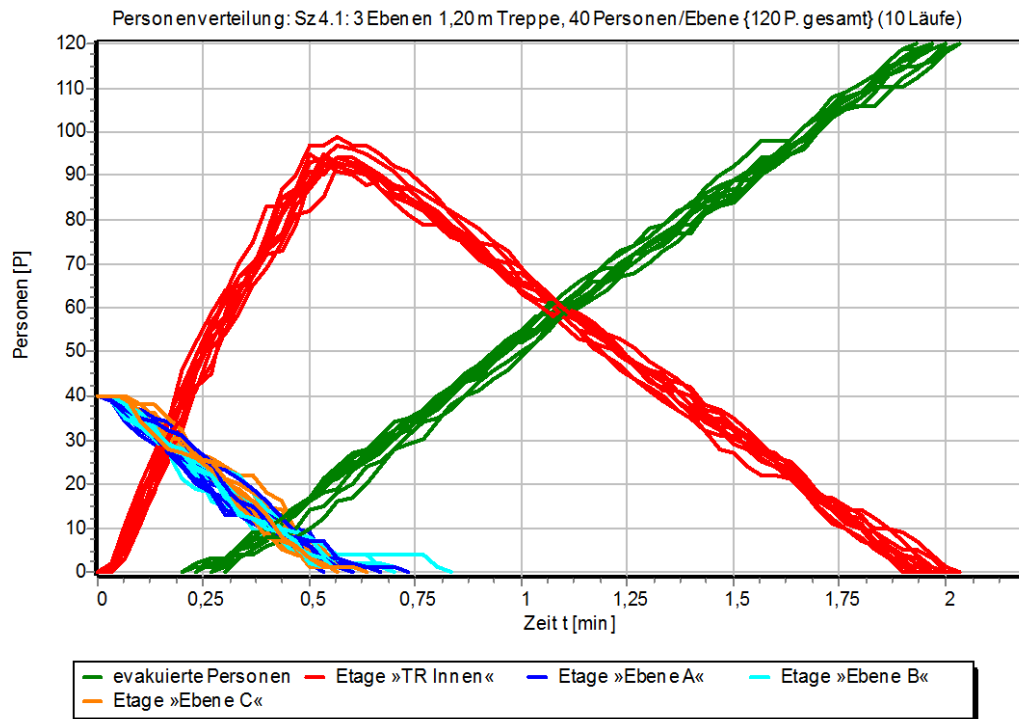
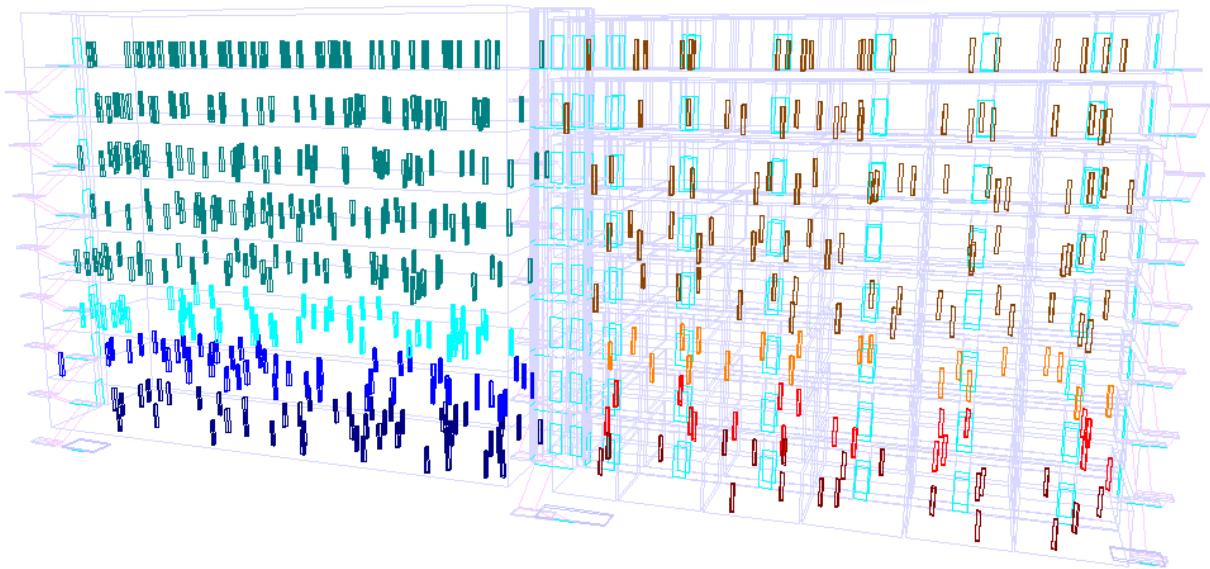


Abb. 4.36 Distributionsdiagramm für 40 Personen pro Ebene und somit 120 über alle drei Ebenen. (ASERI)

Noch offensichtlicher wird dieser Effekt, wenn statt 3 Ebenen 8 Ebenen betrachtet werden (vgl. Tabelle 4.12 letzte Spalte und Abbildung 4.37): Die Gesamtentfluchtungszeit steigt erwartungsgemäß mit der Anzahl der Personen an (dunkelroter Graph in Abbildung 4.38). Der grüne Graph zeigt die Entleerung der ersten Ebene (Ebene A – die unterste) und der blaue Graph die Entfluchtung der letzten Ebene (typischerweise die oberste Ebene).

Szenario »Sz 4.2: 560 Personen auf 8 Ebenen mit 70 Personen pro Ebene; Reaktionszeit: 1...3 min«



1. Lauf: 0 s

Abb. 4.37 Perspektivische Sicht auf das Gebäude mit acht Ebenen und der Belegung mit 70 Agenten (= Personen) pro Ebene in ihrer zufälligen Ausgangsposition ($t = 0$ s) im ersten Simulationslauf (1. Lauf). (ASERI)

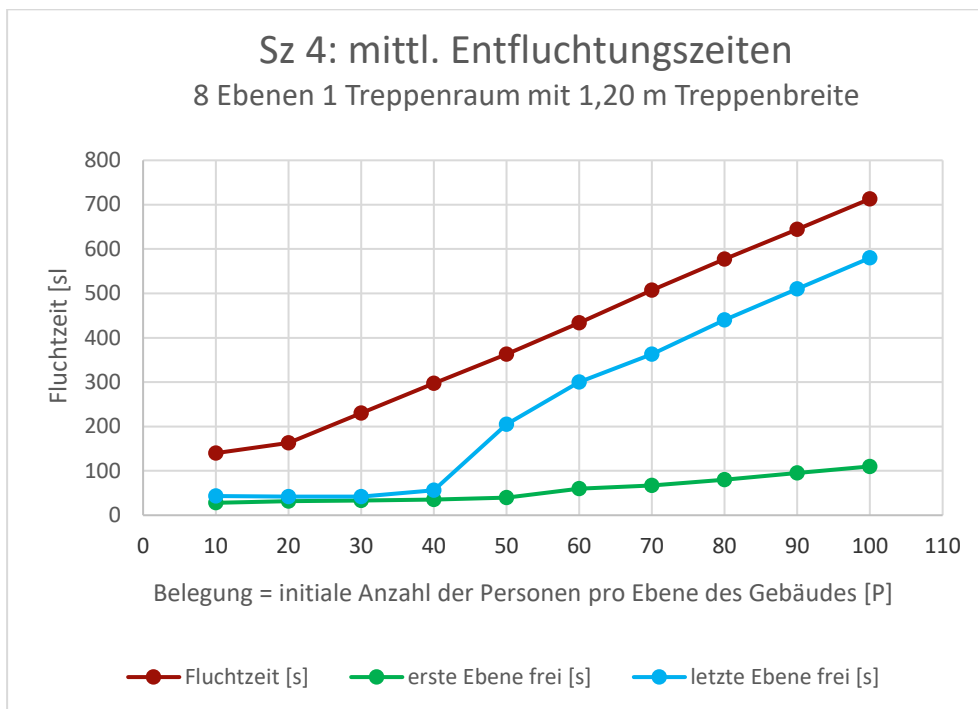


Abb. 4.38 Fluchtzeiten bei der Entfluchtung von 8 Ebenen bei 1,20 m breiten Treppen mit unterschiedlicher Personenbelegung pro Ebene (ASERI)

Klar ist der Übergang von der ungekoppelten (freien) Entfluchtung aller Ebenen (hier zwischen 40 und 50 Personen pro Ebene) zur gestauten Entfluchtung durch einen aufgefüllten Treppenraum ersichtlich.

In Abbildung 4.39 sind die Ergebnisse aller Ebenen eingetragen – als Ergebnis der Simulation mit crowd:it. Auch hier sind dieselben Effekte zu sehen; der Anstieg der Kurve beginnt hier bei einer Belegung von 50 Personen pro Ebene.

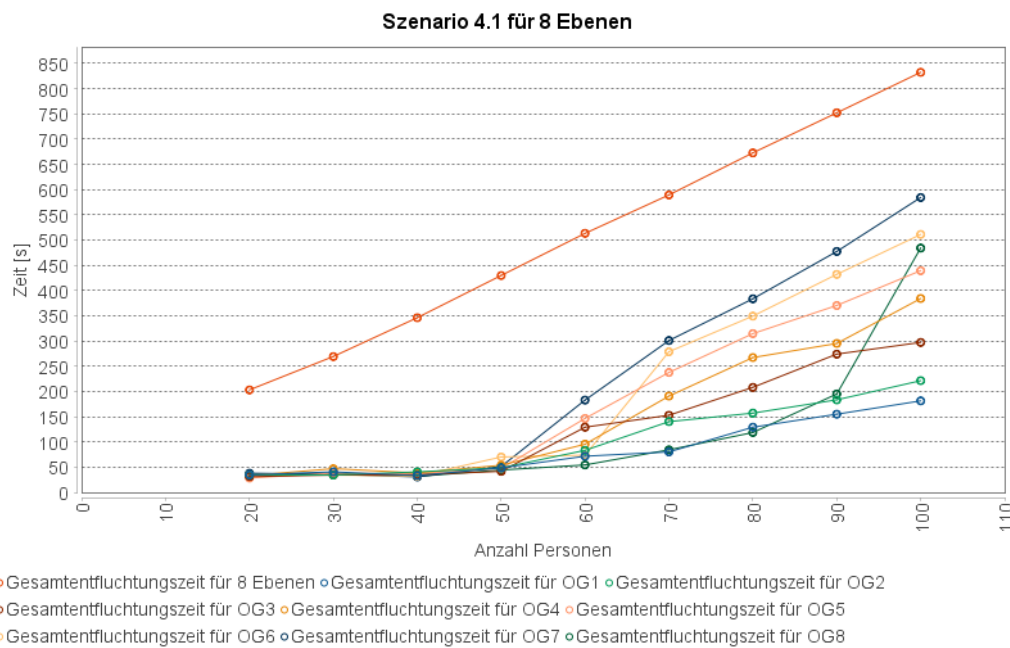


Abb. 4.39 Ergebnisse der Simulationen mit crowd:it. Hier ist der Beginn der Spreizung bei 50 Personen deutlich zu erkennen.

4.2.5.2 Ergebnisse Szenario 4.2 Entfluchtung mit Reaktionszeit

Bisher wurde in den Simulationen unterstellt, dass alle Personen die Flucht unmittelbar mit der Alarmierung beginnen, d. h., zum Zeitpunkt $t = 0$ s starten. Realistischer hingegen sind Verzögerungszeiten, die dem Umstand Rechnung tragen, sich erst einmal untereinander zu beraten, ob ein Verlassen des Gebäudes tatsächlich angezeigt ist, persönliche Gegenstände zusammensuchen, Arbeitsvorgänge abzuschließen etc. Wie die einschlägigen Leitfäden/Richtlinien ausführen ([19], [26], [45]), beträgt diese Reaktionszeit („Pre-evacuation-time“) im Falle eines vertrauten Umfelds bei wachem Zustand der Personen zwischen einer und drei Minuten. Daher wird im Folgenden eine Reaktionszeit eingeführt, indem den Agenten gleichverteilt über das Intervall 1...3 Minuten eine zufällig festgelegte Startzeit zugewiesen wird. Die Ergebnisse zeigen einen graduell anderen Verlauf der Entfluchtung (Abbildungen 4.40 und 4.41): Aufgrund der Reaktionszeiten verschieben sich alle Zeiten um bis zu knapp 3 Minuten, jedoch bleibt der Übergang zwischen einer (nahezu) etagenunabhängigen Entfluchtung und einer starken Beeinflussung durch Personen aus anderen Ebenen zwischen 40 und 50 Personen pro Etage erhalten.

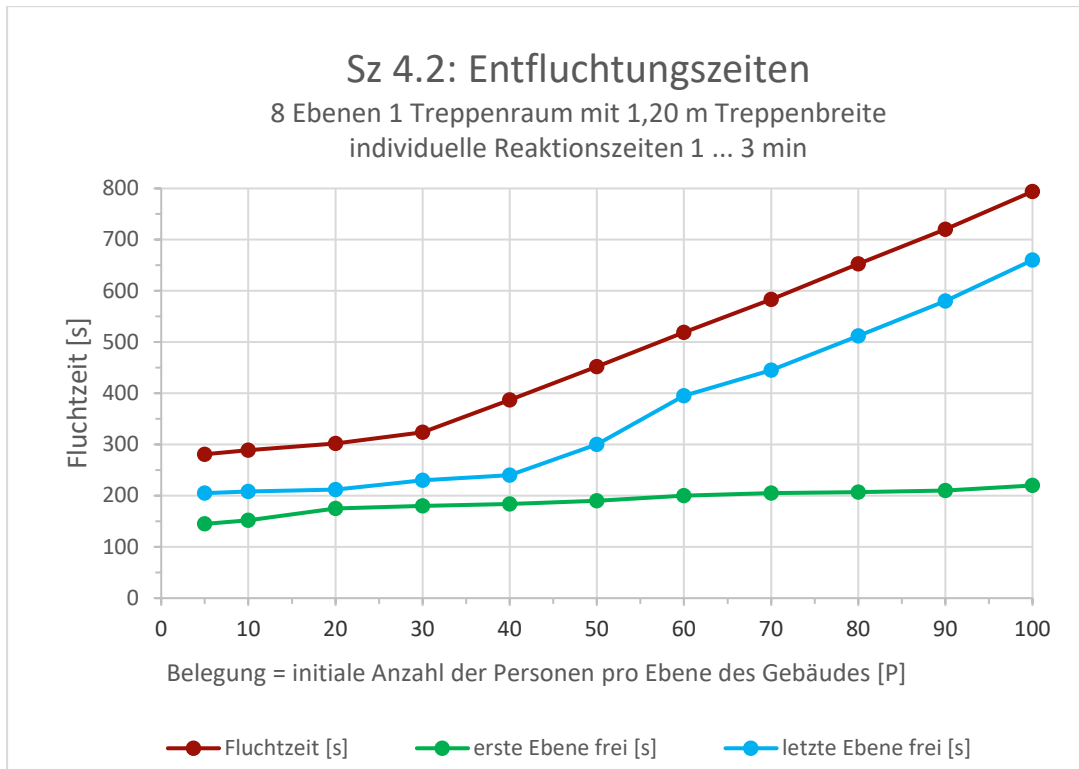


Abb. 4.40 Fluchtzeiten bei der Entfluchtung von 8 Ebenen bei 1,20 m breiten Treppen mit unterschiedlicher Personenbelegung pro Ebene und einer individuellen Reaktionszeit zwischen 1 und 3 Minuten (ASERI)

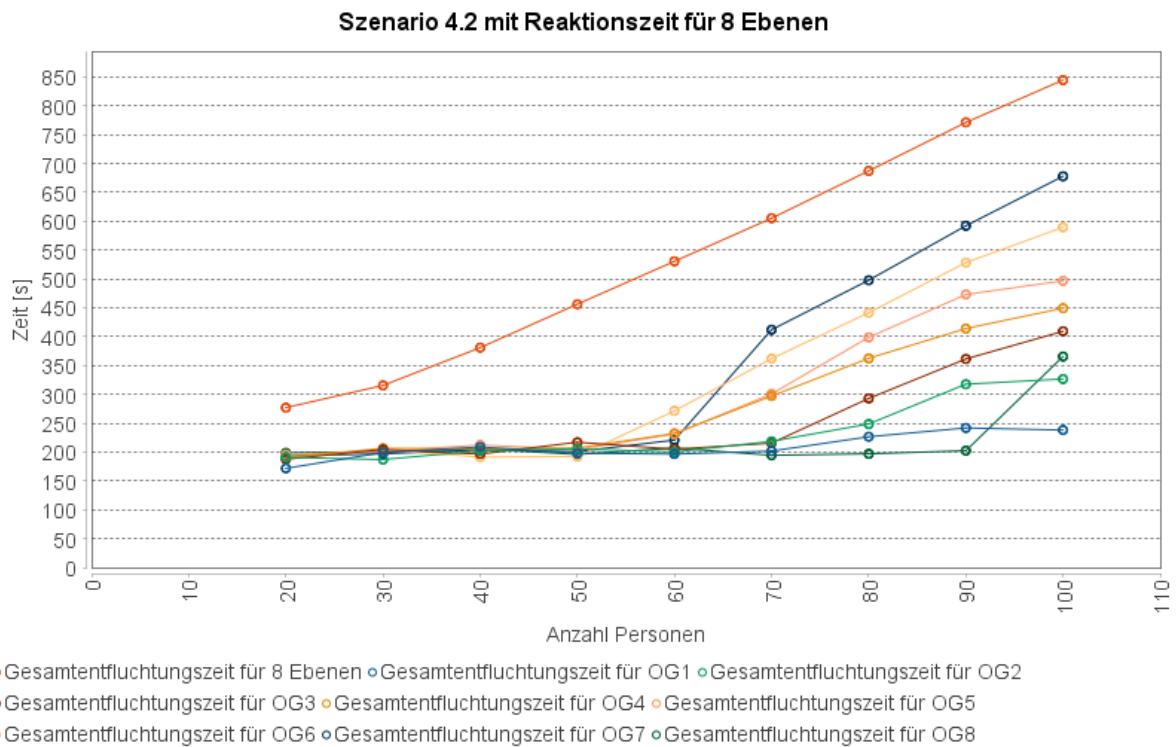


Abb. 4.41 Die Entfluchtungszeiten in Abhängigkeit der Personenzahl pro Ebene mit einer Reaktionszeit gleichverteilt zwischen 1 ... 3 Minuten (crowd:it)

4.2.5.3 Ergebnisse Szenario 4.3 Sequentielle Alarmierung

Die Auswirkung einer selektiven Alarmierung von drei Ebenen (eine vom Brand betroffene Ebene sowie die darüber und darunterliegende Ebene) soll hier durch die Brandebene 5 für das 8 Ebenen hohe Gebäude simuliert werden. Die Ebenen unterhalb (1 – 3) wie auch Ebenen oberhalb (7 – 8) werden zeitverzögert alarmiert. Um den Personen aus den Ebenen 4 bis 6 ein schnelleres Verlassen des unmittelbar gefährdeten Bereiches zu ermöglichen, wird die Alarmierung der restlichen Ebenen um 2 Minuten verzögert (sequentielle Alarmierung).

Den Abbildungen 4.42 und 4.44 lässt sich entnehmen, dass die Entfluchtung der Ebenen 4 – 6 für bis zu 40 Personen pro Ebene in gleicher Weise verläuft wie im Falle ohne versetzte Alarmierung (vgl. Abbildung 4.38), allerdings hier bezogen auf die betroffenen Ebenen 4 – 6 – also genau der gewünschte Effekt erzielt wird (grüner Graph für die Ebene 4; der blaue Graph zeigt den Zeitpunkt des Verlassens der letzten Personen aus den Ebenen 4 – 6 in Abbildung 4.42). Selbst bei bis zu 70 Personen pro Ebene müssen sich die Personen nicht länger als 2 Minuten in den Ausgangsebenen 4 – 6 aufhalten (blauer Graph, Abbildung 4.42). Sehr deutlich ist dies auch in Abbildung 4.43 für die Resultate von crowd:it zu erkennen: Dort bündeln sich die Entfluchtungszeiten in diejenigen der sofort alarmierten Ebenen und die nach zwei Minuten alarmierten Ebenen. Bei einer Personenbelegung von 90 Personen pro Ebene „vermischen“ sich die Kurvenverläufe und die schnellere Entfluchtung der zuerst alarmierten Ebenen ist nicht mehr gewährleistet.

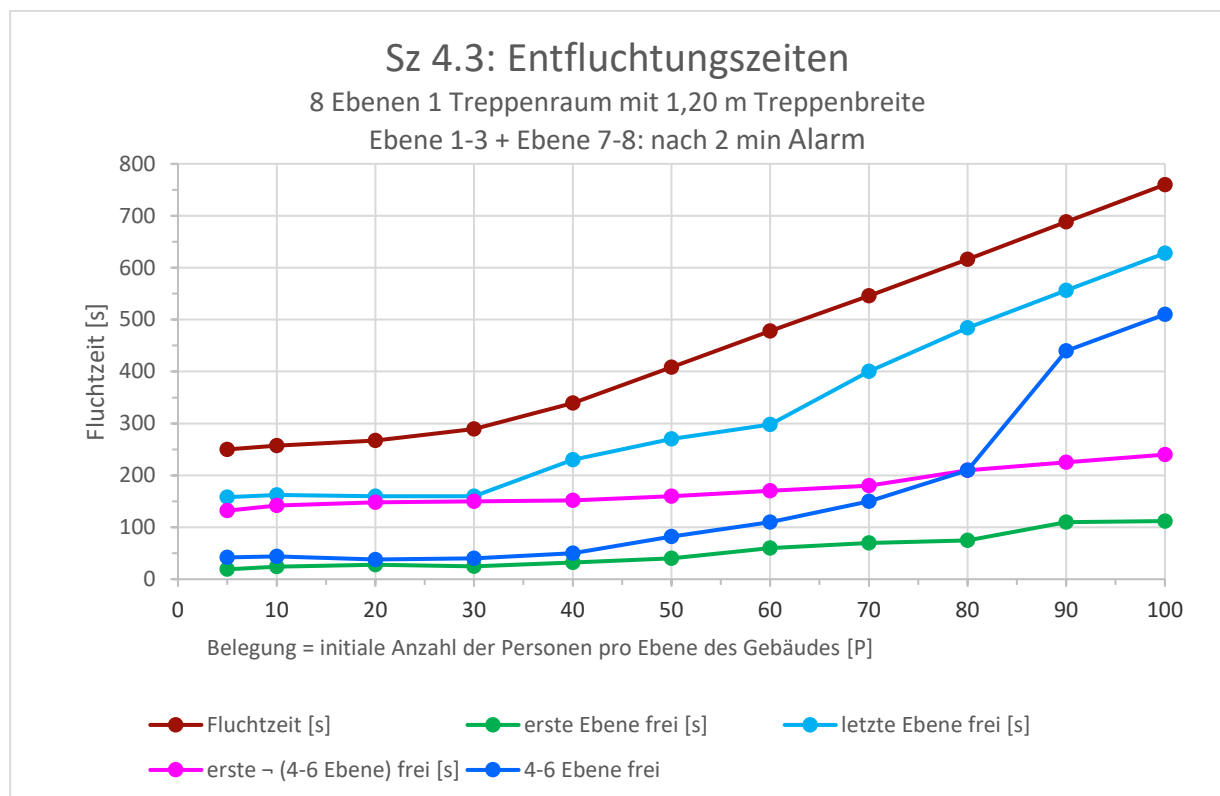


Abb. 4.42 Fluchtzeiten bei der Entfluchtung von 8 Ebenen bei 1,20 m breiten Treppen mit unterschiedlicher Personenbelegung pro Ebene sowie einer direkten Alarmierung der Ebenen 4 – 6 ($t = 0$ s) bzw. nach 2 Minuten für die Ebenen 1 – 3 und 7 – 8 (ASERI)

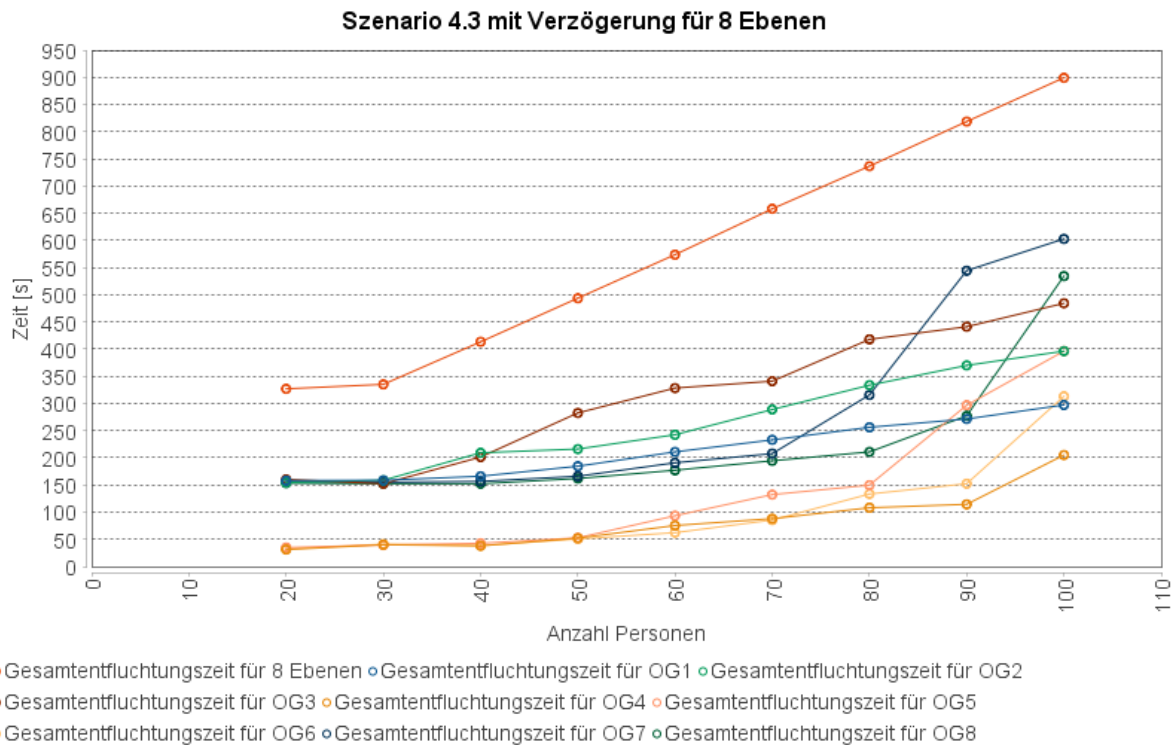


Abb. 4.43 Entfluchtungszeiten für sequentielle Entfluchtung: Die Ebenen 3 – 5 werden sofort alarmiert, die übrigen Ebenen nach zwei Minuten (crowd:it)

Ein Vergleich der hellblauen Graphen der Abbildung 4.42 mit der Abbildung 4.40 zeigt, dass bei bis zu 40 zu Personen pro Ebene trotz der verzögerten Alarmierung auch die Ebenen 1 – 3, 7 und 8 schneller verlassen sind, als dies für eine über alle Ebenen verteilte Reaktionszeit von 1...3 Minuten der Fall war.

4.2.5.4 Ergebnisse Szenario 4.4 Sequentielle Alarmierung und Reaktionszeiten

Damit stellt sich die Frage, ob bei einer Überlagerung der sequentiellen Alarmierung mit der verzögerten Reaktion beim Verlassen als Ausgangsposition dieses Bewegungsmuster noch erhalten bleibt.

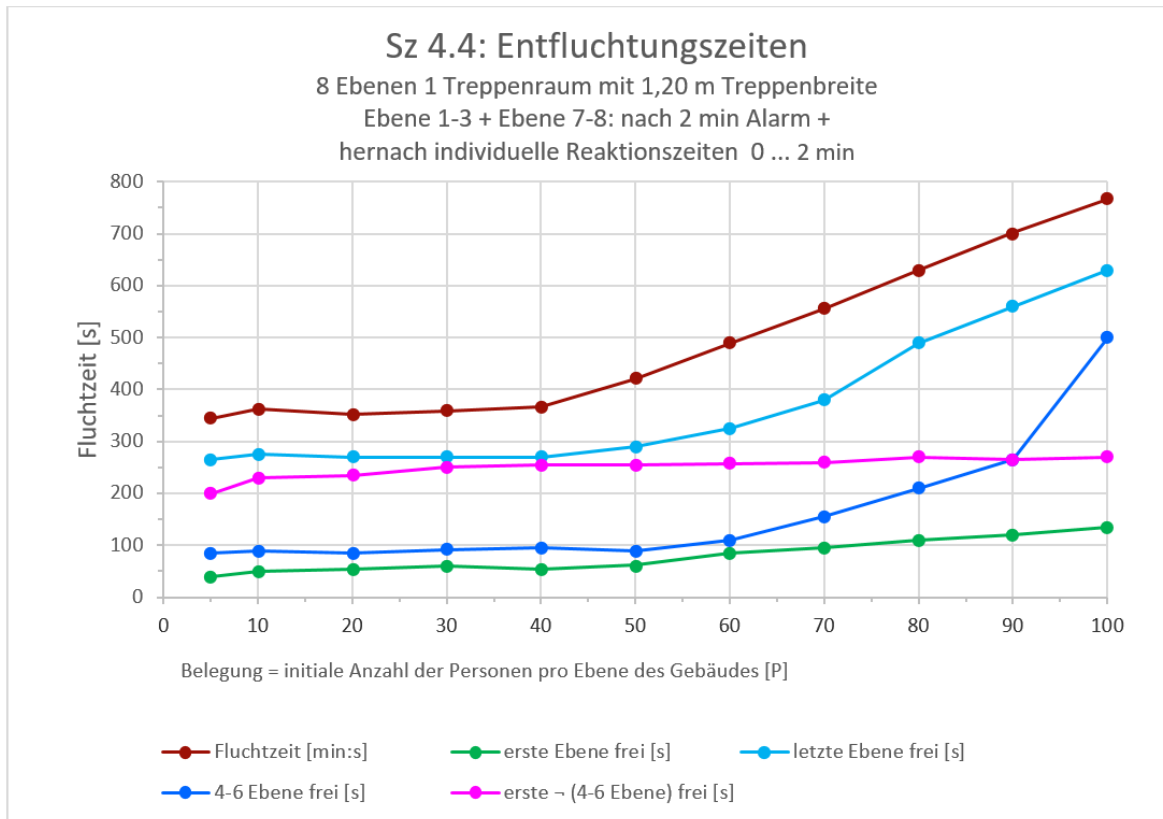


Abb. 4.44 Fluchtzeiten bei der Entfluchtung von 8 Ebenen bei 1,20 m breiten Treppen mit unterschiedlicher Personenbelegung pro Ebene sowie einer direkten Alarmierung der Ebenen 4 – 6 ($t = 0$ s) mit einer Reaktionszeit zwischen 30 s bis zu 1 Minute bzw. nach 2 Minuten für die Ebenen 1 – 3 und 7 – 8 mit anschließender gleichverteilter Reaktionszeit im Intervall von 1 ... 3 Minuten (ASERI)

Abbildung 4.44 stellt die positive Wirkung der verzögerten Entfluchtung der nicht direkt betroffenen Ebenen heraus: Erst bei 70 Personen pro Ebene wird eine Zeitschranke von 2 Minuten zum Verlassen der gefährdeten drei Ebenen überschritten (dunkelblauer Graph). Ebenso steht bei 50 Personen pro Etage die letzte Person nach ca. 5 Minuten im Treppenraum (hellblauer Graph), wie dies bei Betrachtung des Szenarios ohne sequentielle Entfluchtung aber mit Reaktionszeiten der Fall war (vgl. Abbildung 4.40).

Der gleiche Übergang zwischen einer etagenunabhängigen Entfluchtung und dem verstärkten Zusammentreffen von Personen aus mehreren Etagen lässt sich auch für andere Parameter, die das Szenario beschreiben, festhalten: Wird bei sonst gleichen Parametern die Treppenbreite von 1,20 m auf 1,50 m verbreitert, verschiebt sich die etagenunabhängige Entfluchtung von 40 – 50 Personen pro Ebene auf 50 – 60 Personen pro Ebene bei Nutzung eines Treppenraums aus den Ebenen (Abbildung 4.45).

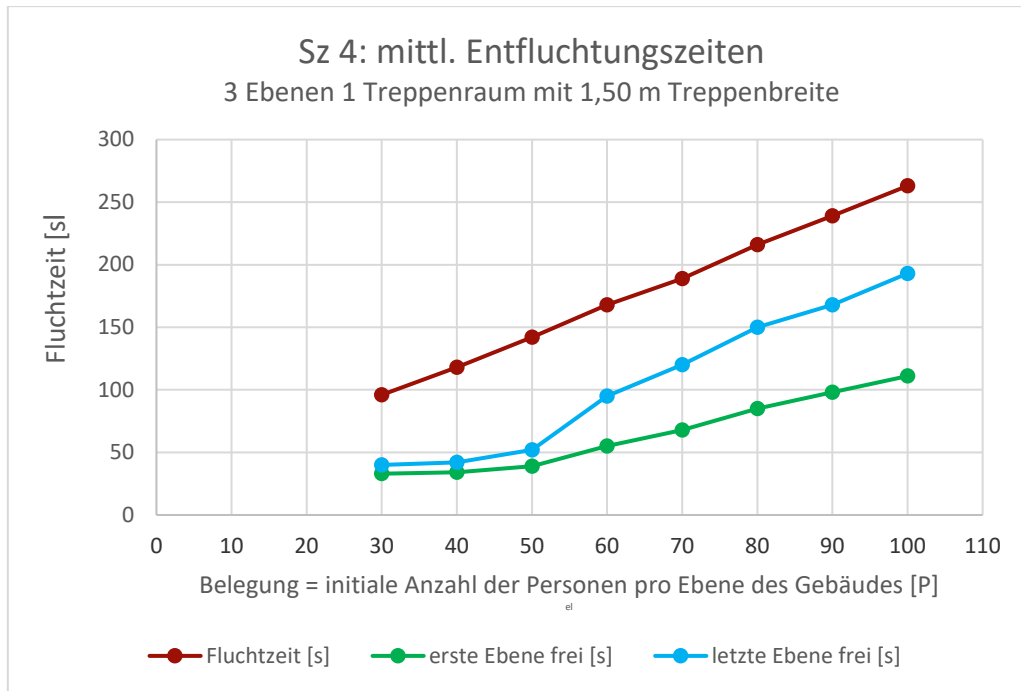


Abb. 4.45 Fluchtzeiten bei der Entfluchtung von 3 Ebenen bei 1,50 m breiten Treppen mit unterschiedlicher Personenbelegung pro Ebene (ASERI)

Da der Treppenraum den wesentlichen Engpass im Gebäude darstellt, sind die Maße für Flure und Türbreiten (innerhalb der hier gebräuchlichen Größen) weniger relevant. Somit spielen kleinere Abweichungen eine untergeordnete Rolle, wie die Variationen aufgezeigt haben.

4.2.5.5 Vergleich mit makroskopischen Modellen

Gerade die verschiedenen Varianten des Szenarios 4 haben verdeutlicht, dass nach dem Auffüllen des Treppenraums dieser Gebäudeabschnitt die Entfluchtung dominiert. Hierbei bewegen sich alle Person entlang eines engbegrenzten Weges über Treppenläufe und Podeste, andere Alternativen sind nicht gegeben. Gerade bei dieser Beschränkung der Optionen lassen sich Modelle einsetzen, die das kollektive Verhalten einer Menschenansammlung im Sinne eines hydraulischen Flusses beschreiben (z. B. das bekannte Verfahren nach Predtetschenski und Milinski (P&M) [38]) oder auch nur die Gegebenheiten an den Engpässen (Kapazitätsmodelle [26]) entlang des Weges betrachten.

Mit Vorgaben zur Geschwindigkeit und Durchsatz für typische Gebäudeabschnitte (ebener Flur, abwärtsführende Treppe und der charakteristische Flächenbedarf von Personen bei P&M) lassen sich für verschiedene Bewegungsmodi (moderat, Optimum, normal, Gefahr) Entfluchtungszeiten bestimmen.

Bei der makroskopischen Betrachtung füllt sich zuerst der Treppenraum auf und danach passieren alle restlichen Personen den Treppenraum, wobei im Szenario 4 die Voraussetzung erfüllt ist, dass die Ebenen gleichmäßig mit Personen belegt sind und das Erdgeschoss frei (bzw. nicht zu berücksichtigen) ist. Berechnet werden die Räumungszeit (Passage- und Laufzeit) für einen Treppenraum mit kürzestem Weg von der (mittleren) Startposition zum Treppenhaus und dem Ausgang aus dem Gebäude. Der

gesamte Treppenraum wird hier vereinfacht wie eine einzige Treppe behandelt, der die (horizontale) Wegstrecke über die Treppenläufe und Podeste erfasst, wie dies in Beispielen des Buchs von P&M [38] auch der Fall ist.

So kommen die Tabellenwerte für die Bewegungsmodi ‚moderat‘ und ‚Optimum‘ für das Kapazitätsmodell zum Tragen [26]

Tab. 4.13 Bewegungsmodi ‚moderat‘ und ‚Optimum‘ für das Kapazitätsmodell [26]

Kapazitätsmodell	Bewegungsmodus	
	moderat	Optimum
Geschwindigkeit vor der Treppe (horizontal) [m/s]	1	0,6
(horizontale) Geschwindigkeit auf der Treppe [m/s]	0,6	0,5
Personenfluss auf der Treppe [P/m/s]	0,8	1

und entsprechende Parameter für die Modellierung nach Predtetschenski und Milinski,

Tab. 4.14 Parameter für die Modellierung nach Predtetschenski und Milinski

Predtetschenski und Milinski	Modus: normal Übergangskleidung	Modus: Gefahr Übergangskleidung	Modus: Gefahr Sommerkleidung	Modus: Gefahr Winterkleidung
Geschwindigkeit vor der Treppe (horizontal) [m/s]	1	1,4	1,4	1,4
(horizontale) Geschwindigkeit auf der Treppe [m/s]	0,69	0,83	0,83	0,83
q Treppe [m/min]	4,44	5,38	5,38	5,38
Flächenbedarf einer Person f [m ²]	0,113	0,113	0,1	0,125

während erwartungsgemäß das Kapazitätsmodell für das Optimum die kürzesten Fluchtzeiten für das Szenario 4 bei der Entfluchtung über 8 Ebenen mit einer Startzeit von $t = 0$ s vorgibt (hellblauer Graph in Abbildung 4.46), gefolgt vom Verlauf des Entfluchtungsmodus ‚Gefahr‘ bei Predtetschenski und Milinski (dunkelblauer Graph), der im oberen Teil mit den Werten der ASERI-Simulation übereinstimmt (grüner Graph). Die entsprechenden Resultate der crowd:it-Simulationen (gelber Graph) sind im oberen Teil nahezu deckungsgleich mit den Berechnungen des moderaten Kapazitätsmodells und P&M im Gefahrenmodus mit Übergangskleidung (roséfarbener Graph). Längere Zeiten liegen für die Optionen ‚Gefahr‘ und ‚Winterkleidung‘ (magentafarbener Graph) und letztlich ‚normal‘ und ‚Übergangskleidung‘ (roter Graph) vor.

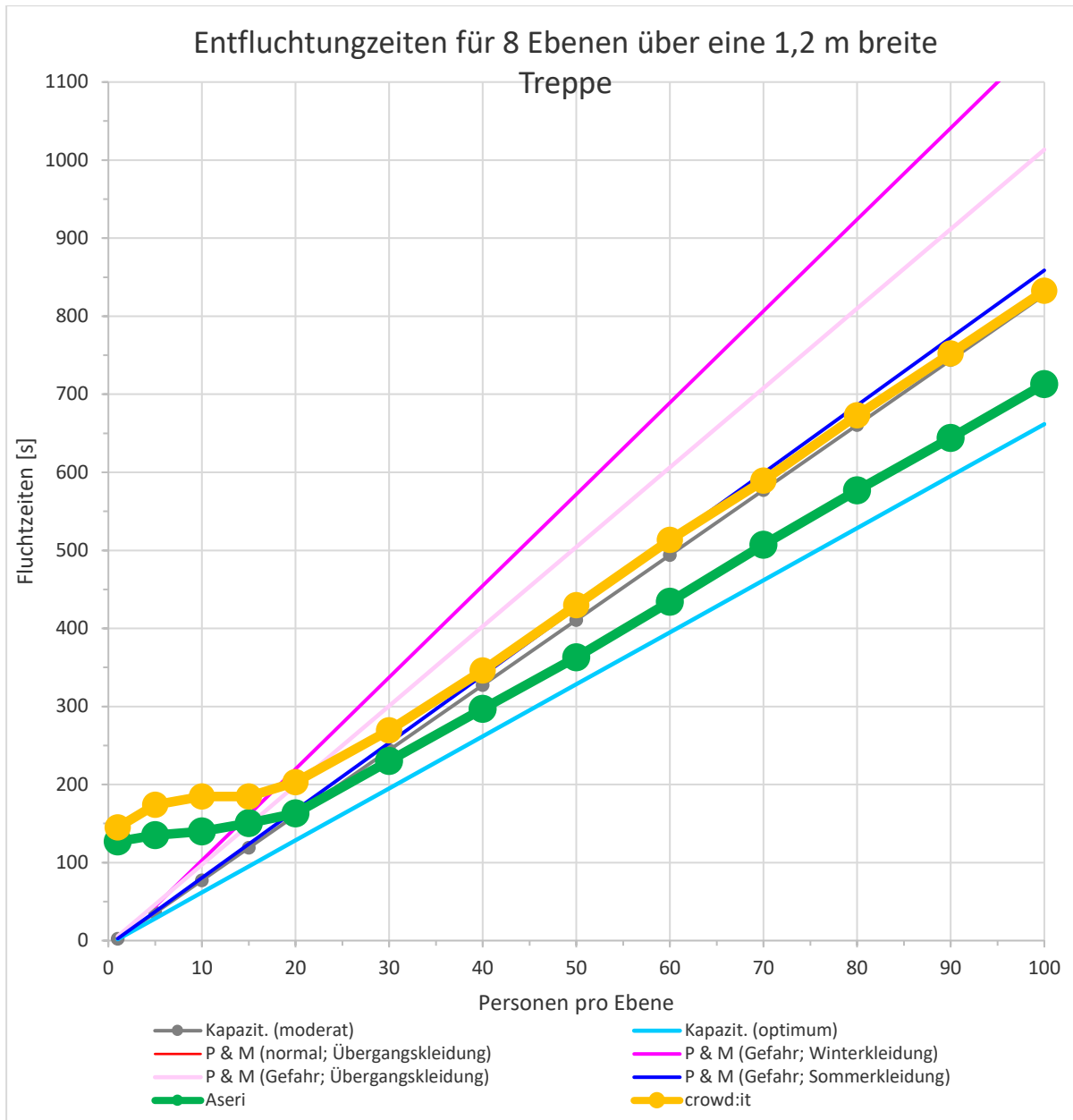


Abb. 4.46 Entfluchtungszeiten im Vergleich von makroskopischen und mikroskopischen Modellen

Der Einfluss der Kleidung (aka die Körperfläche) besitzt bei Predtetschenski und Milinski einen starken Einfluss, der eine breite Spreizung der Ergebnisse zur Folge hat. Dennoch liegt die Gesamtheit der Resultate ab Belegungszahlen von 20 – 60 Personen pro Ebene dicht beieinander und zeigt auf, dass für ein intensiv genutztes System ‚Treppenraum‘, welches das dominante im vorliegenden Fall ist, der Verlust von individuellen Freiheitsgraden zu einem Zustand führt, der auch befriedigend durch ein kollektives (= makroskopisches) Modell beschrieben werden kann. Allerdings zeigt die Abweichung von der linearen Tendenzlinie unterhalb von 20 Personen pro Ebene die Begrenzung dieser Modelle auf, denn dann lässt sich durch die Vereinzelung der Bewegungen der Individuen kein kollektiver Ansatz mehr sinnvoll formulieren.

4.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Parameterstudien in Zusammenhang mit den geltenden Vorschriften sowie Studien und Experimenten lassen die Fragen wie folgt beantworten:

1. Welchen Einfluss haben Türen sowie Einengungen bei horizontalen Fluchtwegen?

Der Einfluss von Einengungen bei horizontalen Fluchtwegen auf die Entfluchtungsrate ist bei kurzen Einengungen im Rahmen der Werte ASR A2.3 gering: Selbst bei einer kurzzeitigen Einengung von zweimal 15 cm (Türzarge) können keine signifikanten Verzögerungen in der Entfluchtungszeit für die zugelassene Personenzahl der Gangbreite festgestellt werden. Anders verhält es sich mit der Hindernislänge: Besteht ein Hindernis über eine längere Strecke, reduziert dies die Entfluchtungsrate und führt zu Verzögerungen. Der Einfluss steigt hier linear: Je länger das Hindernis, desto größer der Einfluss.

2. Welchen Einfluss hat eine Treppe im Verlauf eines Fluchtweges auf die Entfluchtungsrate und wie ist dieser Einfluss im Vergleich zur Fluchtwegbreite auf die Entfluchtungsrate zu werten?

Treppen haben eine Reduktion der Entfluchtungsrate zur Folge; in der Literatur hierzu findet man eine große Bandbreite über die Höhe der Reduktion. Festzustellen ist, dass sämtliche Studien ausschließlich mit bauordnungsrechtskonformen Gebäudegeometrien durchgeführt worden sind und somit in der Literatur keine Grenzfälle beschrieben sind. Besteht ein Fluchtweg aus horizontalen sowie vertikalen Elementen, so sind die Einengungen aus Frage 1 vernachlässigbar, da die eigentliche Flussreduktion durch die Treppen kommt. In Szenario 3 konnte nachgewiesen werden, dass eine Reduktion der Türbreite im aufgeführten Rahmen keinen Einfluss auf die Entfluchtungsrate über die Treppe hat.

Im Weiteren konnte gezeigt werden, dass Richtungswechsel vor oder zwischen Treppenflichten ebenfalls eine verlangsamende Wirkung zeigen.

3. Wie wirkt sich bei gleichzeitiger Alarmierung die zeitlich versetzte Nutzung der Fluchtwegen auf die erforderliche Fluchtwegbreite aus (insbesondere bei mehrgeschossigen Gebäuden)?

Mehrere Ebenen können zeitlich unabhängig voneinander entfluchtet werden, wenn Personen pro Ebene bereits die Treppe passiert haben, bevor die Personen von oberen Ebenen eintreffen. In unserer Analyse hat sich bei einer Belegung bis zu 120 Personen auf drei Ebenen und einer Treppe von 1,20 m dieser Zustand eingestellt. Kommt es zu höheren Belegungszahlen, so beeinflussen sich die Flüchtenden über die Ebenen hinweg und bei größerer Anzahl der Ebenen kommt es entsprechend zu Stauungen. Letztendlich ist der limitierende Faktor die Flussrate auf den Treppen: Übersteigt die Personenzahl die Flussrate auf der Treppe, die zwischen 0,6 und 1,0 Personen pro Meter und Sekunde liegt, so kommt es zu Stauungen, die sich entsprechend erhöhen, je mehr Ebenen auf diesen Fluchtweg angewiesen sind. Im Falle der zeitlich versetzten Nutzung durch unterschiedliche individuelle Reaktionszeiten ergibt sich für

mehrgeschossige Gebäude nur ein Versatz durch die Zeitspanne der verzögerten Aufnahme der Entfluchtung, die Struktur des Entfluchtungsgeschehens bleibt insbesondere für höhere Belegungsdichten gleich. Eine sequentielle Alarmierung kommt den Personen in den betroffenen Ebenen zugute – ohne die Fluchtzeiten für das Gebäude insgesamt nachhaltig zu steigern. Bei mehrstöckigen Gebäuden kann es ab einer bestimmten Personenbelegung der Ebenen zu einem Stau in den Treppenträumen sowie in den angrenzenden Bereichen der Ebenen kommen. Um dafür eine praxisbezogene Empfehlung auszusprechen, wurden Aufbauend auf Szenario 4 in einer weiteren Untersuchung systematisch die Wechselwirkungen zwischen der Anzahl der Ebenen (3 bis 8), Anzahl Personen pro Ebene (20 bis 100), der Treppenbreiten (0,90 m bis 2,40 m) sowie der Geschosshöhe (3,60 m, beispielhaft 2,70 m und 4,50 m) analysiert. Im Ergebnis wurden die mittleren maximalen Entfluchtungszeiten je Ebene für jede Kombination von Anzahl Personen pro Ebene, Treppenbreite und Anzahl der Ebenen in die Bereiche kleiner 1 min, 1 – 2 min und größer 2 min eingeteilt. Bei Entfluchtungszeiten unter einer Minute erfolgt eine unabhängige Räumung aller Ebenen. Im Übergangsbereich gibt es Wartezeiten bis zu zwei Minuten. Aus Sicht des Bauordnungsrechts ist eine Wartezeit von 2 min akzeptabel. Oberhalb von zwei Minuten steigen die Wartezeiten schnell an, d. h. es bilden sich Staus in die Ebenen hinein. Erkennbar ist über alle Gebäude mit 3 bis 8 Ebenen hinweg, eine recht scharfe Trennung der Bereiche mit einem klein ausfallenden Übergangsbereich, der von der Anzahl der Ebenen unabhängig ist. Damit besteht in der ASR A2.3 die Möglichkeit für die Festlegung der notwendigen Treppenbreiten in Abhängigkeit von der den Ebenen zugeordneten Personenzahl. So besteht z. B. unabhängig von der Geschosshöhe ab einer Treppenbreite von $\geq 1,30$ m bei einer Belegung von 50 Personen pro Ebene kein signifikanter Einfluss auf die Entfluchtungszeiten.

4. Welche Fluchtwegbreiten sind in Abhängigkeit der Anzahl von Personen, die auf einen Fluchtweg angewiesen sind, anzusetzen?

Für die in ASR A2.3 Punkt 5 Abs. 1 Tabelle 1 enthaltenen Werte konnte ein großer Sprung in der Gesamtentfluchtungszeit vom Bereich bis 20 Personen und 1 m lichter Fluchtwegbreite auf den Bereich 21 bis 200 Personen und 1,20 m lichte Fluchtwegbreite festgestellt werden. Um diesen Sprung näher zu untersuchen, wurden Fluchtwegbreiten von 0,9 m, 1,0 m und 1,1 m näher untersucht und festgestellt, dass eine Breite von 0,9 m für bis zu 50 Personen ausreicht; wie auch bereits in durchgeführten Studien [41] konnte ein linearer Zusammenhang zwischen Fluchtwegbreite und Personenzahl nachgewiesen werden. Dies geht auch Hand in Hand mit der MVStättVO, die Zwischenwerte zulässt.

4.4 Zusammenfassung

In diesem Gutachten wurde im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) der Einfluss von Breite der Fluchtwege sowie von Treppen, Türen und Einengungen im Verlauf des Fluchtweges auf die Entfluchtung mithilfe von mikroskopischen Personenstromsimulationen vor dem Hintergrund einer Überarbeitung der ASR A2.3 sowie aller weiteren Stellen, die Fluchtwege betreffen, untersucht. Dazu wurden in mehreren Fachtreffen mit der Projektgruppe „Fluchtwege“ des ASTA im Kontext der bestehenden Rechtsvorschriften relevante und zu untersuchende Szenarien definiert, um die zu Beginn aufgeworfenen Fragestellungen zu beantworten. Während der Analyse der Szenarien mit zwei unterschiedlichen mikroskopischen Simulationsmodellen (ASERI und crowd:it) wurden die Ergebnisse mit vorhandener Literatur und Untersuchungen eingeordnet und bewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich auf horizontalen Fluchtwegen die Entfluchtungszeiten in linearer Weise abhängig von der zur Verfügung stehenden Fluchtwegbreite und Anzahl Personen verändern. Dies deckt sich auch mit Ergebnissen aus Experimenten. Der bisher vorhandene „Sprung“ der lichten Fluchtwegbreite von 1,00 m für bis 20 Personen auf 1,20 m ab 21 bis 200 Personen in der Tabelle 1 der ASR A2.3 Punkt 5 Abs. 3 erscheint daher verhältnismäßig hoch. In den untersuchten Szenarien ist zu erkennen, dass bei Fluchtwegbreiten von 90 cm, 1,00 m und 1,10 m kaum ein Unterschied in den Gesamtentfluchtungszeit für bis zu 50 Personen zu erkennen ist. Daher reicht hier auch eine Gangbreite von 90 cm für bis zu 50 Personen aus.

Die Ergebnisse zeigen weiter, dass auf horizontalen Fluchtwegen Einengungen in geringem Umfang (bis beidseitig 15 cm) und über kurze Strecken (bis 20 cm) zu keiner signifikanten Erhöhung der Fluchtzeiten führen. Enthalten Fluchtwege vertikale Komponenten, bestimmen diese Elemente (also Treppen) die Durchflusskapazität und damit auch maßgeblich die Fluchtzeit. Durch die Flussverringerng (aufgrund der verlangsamten Geschwindigkeit auf Treppen) ist festzustellen, dass Einengungen auf horizontalen Wegabschnitten die Fluchtzeit nicht wesentlich beeinflussen, sondern der signifikante Einflussfaktor die Treppenbreite ist.

Dies ist auch in mehrstöckigen Gebäuden zu erkennen. So lange die Kapazität der Treppe es zulässt, dass eine Ebene geräumt ist, bevor die Personen aus den oberen Ebenen in die betrachtete Ebene gelangen, können die Ebenen autark voneinander geräumt werden. Sobald dies nicht mehr der Fall ist, stellen sich kaskadierende Effekte ein. Ab ca. 40 – 50 Personen pro Ebene und einer 1,20 m breiten Treppe bilden sich Stauungen in die Ebenen hinein aus. Durch Iteration unterschiedlicher Anzahl der Ebenen, Personenzahl sowie Treppenbreiten wurde die Stärke dieses Effekts näher analysiert und ein recht scharf abgetrennter Bereich ermittelt, ab dem die Wartezeiten deutlich über 2 min ansteigen und sich Staus in die Ebenen hinein ausbilden. Unter den im Gutachten gewählten Rahmenbedingungen besteht unabhängig von der Geschosshöhe ab einer Treppenbreite von $\geq 1,30$ m und bei einer Belegung von 50 Personen pro Ebene kein signifikanter Einfluss auf die Entfluchtungszeiten mehr. Festzuhalten ist zudem, dass sowohl eine sequentielle Räumung als auch Reaktionszeiten sich positiv auf den Räumungsverlauf auswirken, diesen aber nicht beschleunigen.

Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.accu-rate.de/en/software-crowd-it-en/>
- [2] ASERI – Referenz- und Benutzerhandbuch, IST GmbH, 1993 – 2019
- [3] V. Schneider, R. Könnecke, S. Habip, J. Hofmann: Verbundprojekt Simulation von Bränden, Lösch- und Notfallmaßnahmen – Teilprojekt Brand- und Rauchausbreitung, Evakuierungsmodell, BMFT-Abschlußbericht 13 RG 91141, 1994
- [4] V. Schneider, R. Könnecke: Simulation der Personenevakuierung unter Berücksichtigung individueller Einflussfaktoren und der Ausbreitung von Rauch, vfdB Zeitschrift Forschung und Technik im Brandschutz 3 (1996), Seite 98 – 109
- [5] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Ed. 2002, Seite 3 – 370, Gleichung (3) und Tabelle 3-14.2
- [6] R. Könnecke, V. Schneider: Risk management at major events – Study of behavioral aspects and implementation into the ASERI microscopic evacuation model, 5th International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics (PED), Gaithersburg, MD USA, 8. – 10. März 2010
- [7] V. Schneider, R. Könnecke: Microscopic modelling of crowd movement at major events, Proceedings Interflam2010, Fire Science & Engineering Conference, Nottingham, UK, July 2010
- [8] R. Könnecke, V. Schneider: BaSiGo: Safety of Large Scale Events – Crowd flow modeling of ingress and egress scenarios, Transportation Research Proceedings Vol. 2, 2014, Seiten 501 – 506
- [9] V. Schneider, R. Könnecke: Occupants with mobility impairments and social groups in design calculations, 6th International Symposium on Human Behaviour in Fire, Cambridge, UK, 28. – 30. September 2015
- [10] V. Schneider, R. Könnecke: Simulating Evacuation Processes with ASERI, Tagungsband International Conference on Pedestrian Evacuation Dynamics (PED), 4.–6. April 2001, Duisburg und
V. Schneider: Application of the individual-based evacuation model ASERI in designing safety concepts, 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire, Boston, March 2001
- [11] M. J. Seitz and G. Köster, Natural discretization of pedestrian movement in continuous space, American Physical Society, PHYSICAL REVIEW E 2012, 86, 046108
- [12] Kneidl, A.; Hartmann, D.; Borrmann, A. (2013): A hybrid multi-scale approach for simulation of pedestrian dynamics. In: Transportation Research Part C, in press.

- [13] Kneidl, A. (2013). Methoden zur Abbildung menschlichen Navigationsverhaltens bei der Modellierung von Fußgängerströmen, PhD Thesis, Technische Universität München
- [14] I. v. Sivers, G. Köster (2014): How stride adaption in pedestrian models improves navigation
- [15] G. Köster, F. Treml, M. Seitz & W. Klein (2014) Validation of Crowd Models Including Social Groups, in Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012, Springer.
- [16] M. J. Seitz, „Simulating pedestrian dynamics: Towards natural locomotion and psychological decision making“, PhD Thesis, 2016, Technische Universität München
- [17] G. Köster, D. Lehmborg, F. Dietrich: „Is Slowing Down Enough To Model Movement On Stairs?“, TGF '15, Delft, Netherlands.
- [18] A. Kneidl, “Simulation of the Neuschwanstein Castle: Egress of a fairy castle”, PED '16, Hefei, China, 2016.
- [19] Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen, Version 3.0, 10, März 2016,
http://www.rimea.de/fileadmin/files/dok/richtlinien/RiMEA_Richtlinie_3.0,0_-_D-E.pdf
- [20] Weidmann, U. (1993): Transporttechnik der Fussgänger: Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturauswertung), Strassen- und Eisenbahnbau, ETH Zürich. Tech. Rep. Schriftenreihe des IVT Nr. 90
- [21] Kuligowski, E. D., et al. (2013): The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models, Technical Note 1822, Natl. Inst. Stand. Technol., Gaithersburg, MD.
- [22] Forell, B., Klüpfel H., Schneider, V., Schelter S. (2011) Vergleichende Betrachtung zu Entfluchtungsrechnungen
- [23] Schneider, B., Seyfried, A.: Methods for measuring pedestrian density, flow, speed and direction with minimal scatter, Physica A, vol. 389, no. 9, pp. 1902–1910, 2010
- [24] Oberhagemann, D.: Statische und dynamische Personendichten bei Großveranstaltungen, vfdb Technischer Bericht, März 2012
- [25] Lam, Yuen et al. 2014 – Experimental study on upward movement in a high-rise building, Safety Science 70:397–405
- [26] Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdb TB 04-01, 3. Auflage November 2013, Hrsg.: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB), Referat 4, Prof. Dietmar Hosser

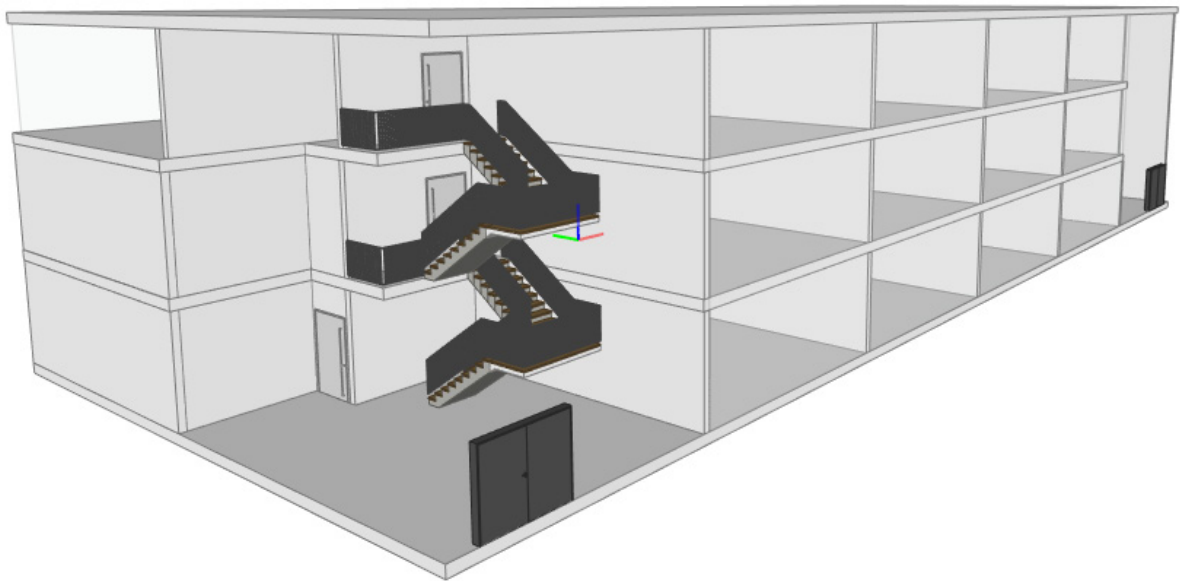
- [27] Musterbauordnung – MBO – Fassung November 2002. Zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 21.09.2012
- [28] Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – (MVStättVO). Fassung Juni 2005. Zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Juli 2014
- [29] Technische Regel für Arbeitsstätten (ASR) 2.3, Fassung: Januar 2017, Zuletzt geändert durch das GBMI am 25.01.2017, Hrsg. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
- [30] Technische Regel für Arbeitsstätten (ASR) 1.8, Fassung: Mai 2018 (zuletzt geändert GBMI 2018, S. 473) Hrsg. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
- [31] Verordnung über Arbeitsstätten (ArbStättV), Bundesamt für Justiz
- [32] Österreichische Arbeitsstättenverordnung (AStV), Fassung vom 12.08.2019 BGBl. II Nr. 309/2017
- [33] Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (ArbSchG), Bundesamt für Justiz
- [34] Noren, J. et al. (2015): Ascending stair evacuation – effects of fatigue, walking speed & human behaviour. In: International symposium on Human Behaviour in Fire, 2015 p. 155 – 160
- [35] Sano, T et al. (2015): Human behavior in a staircase during a total evacuation drill in a high-rise building. In: International symposium on Human Behaviour in Fire, 2015 p. 97 – 108
- [36] Delin, M et al. (2015): Ascending evacuation – walking speed in stairs as a function of height. In: International symposium on Human Behaviour in Fire, 2015 p. 161 – 172
- [37] Burghardt S., Seyfried A., Klingsch W. (2013): Performance of stairs – Fundamental diagram and topographical measurements, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 37, 2013, Pages 268 – 278
- [38] Predtechenskii, V.M., Milinskii, A.I., (1978). Planning for Foot Traffic Flow in Buildings. Amerind Publishing, New Delhi, Translation of: Proekttirovanie Zhdanniiis Uchetom Organizatsii Dvizheniya Lyuddskikh Potokov. Stroizdat Publishers, Moscow, 1969
- [39] Nelson, H.E., Mowrer, F.W. (2002). Emergency movement. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, third ed. National Fire Protection Association, Quincy, MA, pp. 367–380 (Chapter 14).
- [40] Fruin, J.J. (1971). Pedestrian Planning and Design. Elevator World, New York.

- [41] Seyfried, A. et al. (2009): New Insights into Pedestrian Flow Through Bottle-necks, *Transportation science, INFORMS*, 43, 395 – 406
- [42] Lange, W.; Windel, A.: Kleine ergonomische Datensammlung. Köln: TÜV-Verlag 2013
- [43] Köster, G., Lehmborg, D., and Kneidl, A. (2019): Walking on stairs: Experiment and model, *Phys. Rev. E* 100, 022310
- [44] Kuligowski, E. D., et al. (2014): "Movement on Stairs During Building Evacuation," Technical Note 1839, Natl. Inst. Stand. Technol., Gaithersburg, MD.
- [45] ISO/TR 16738:2009(E), Fire-safety engineering – Technical information on methods for evaluating behaviour and movement of people, International Organization for Standardization (ISO), 2009
- [46] http://www.verordnungen-berlin.de/bundeslaender/downloads/MustervstaettV2005/Begruendung_MVSTaettV_2005.pdf S. 14
- [47] C. Peveling, Mit adäquaten Ingenieurmethoden können gesellschaftlich akzeptierte Stauzeiten in Schulen nachgewiesen werden, *Der Prüflingenieur*, Mai 2019, S. 33
- [48] David A. Purser, Behaviour and Travel Interactions in Emergency Situations and Data Needs for Engineering Design, Proceedings of the 2nd International Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003, Greenwich, U.K., S. 355 – 369
- [49] H. Stolzenberg, H. Kahl, K.E. Bergmann; Körpermaße bei Kindern und Jugendlichen in Deutschland, *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz* 5/6 2007, S. 659
- [50] J. Lyzwa, Personenstromsimulationen – Herausforderung bei der Parametrisierung menschlicher Eigenschaften, *Braunschweiger Brandschutz-Tage 2017 Heft 232* S. 45
- [51] B. Bartels, Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr – Teil 1, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. FAT 267, Verkehrsforschungsstelle TU Dresden GmbH (VUFO) <https://www.vda.de/dam/vda/publications/2014/fat-schriftenreihe-267.pdf>
- [52] A. Larusdottir, A. Dederichs, Evaluation of Children: Movement on Stairs and on Horizontal Plane, *Fire Technology*, Volume 48, Issue 1, S. 43 – 53, 2012
- [53] M. Schleich, Ministerium für Heimat, Kommunales, Bau und Gleichstellung des Landes Nordrhein-Westfalen, DIN 18009 Teil 2: Räumungssimulation und Personensicherheit – Stand der Normung, *Braunschweiger Brandschutz-Tage 2019 Heft 235* S. 55

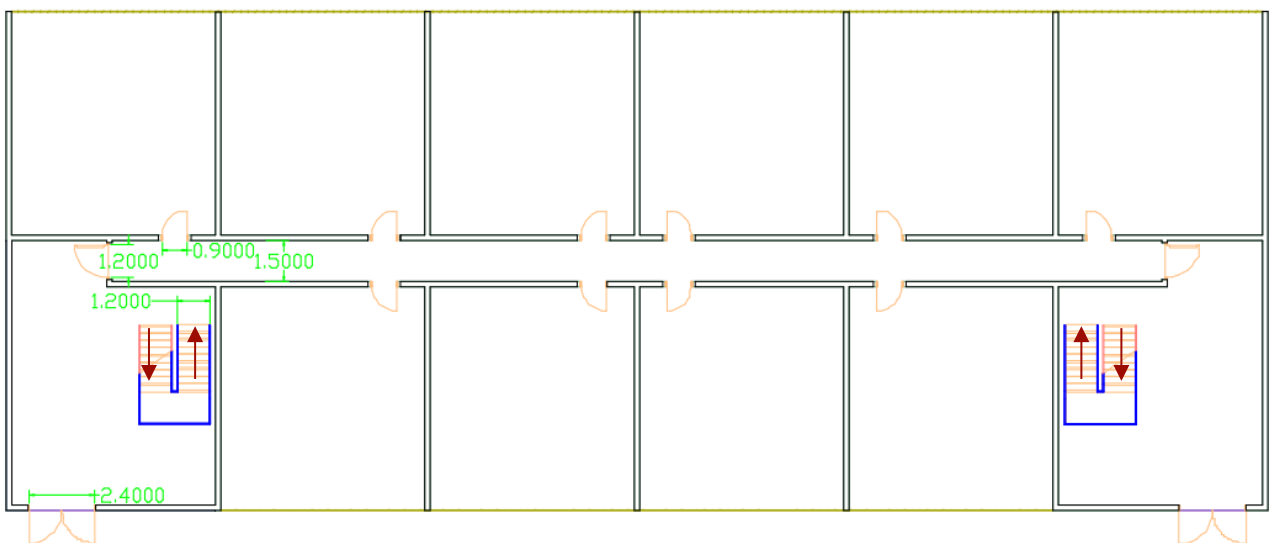
Anhang 1 Szenario Schulgebäude

Um die Fluchtwege speziell in Schulgebäuden zu untersuchen – angepasst an die Population von Schulen – wurde ein normgerechtes Schulgebäude mit maximalen Auslastungen betrachtet. Das betrachtete Gebäude besteht aus einem Erdgeschoss sowie zwei weiteren Ebenen. Insgesamt gibt es 30 Unterrichtsräume, die auf einen 1,50 m breiten Gang führen. Die Treppen sind mit 1,20 m bemessen.

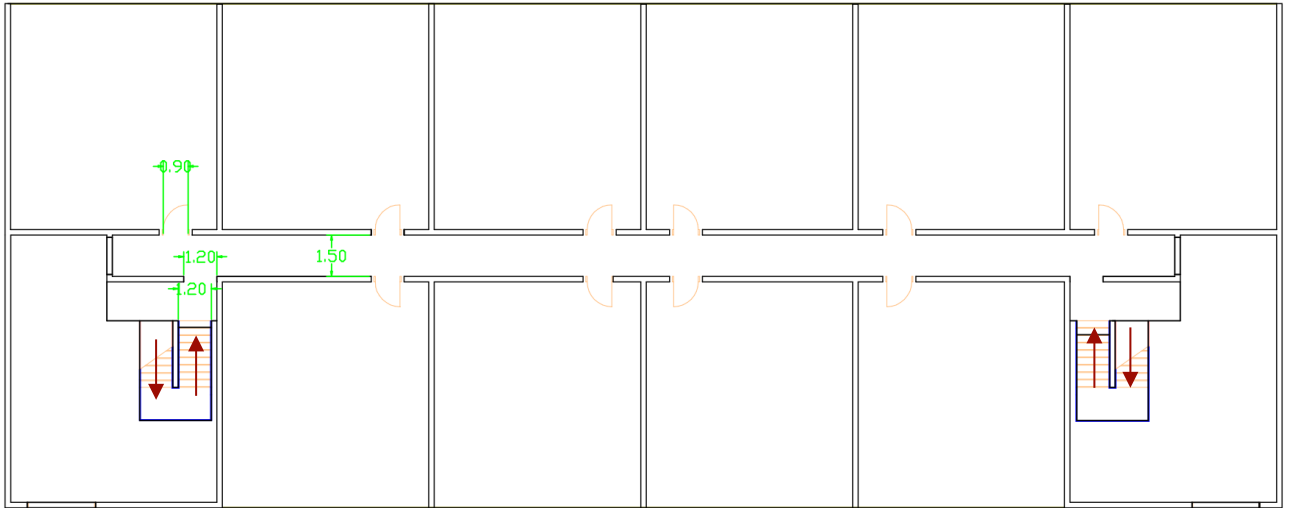
Eine perspektivische Ansicht gibt Abbildung 1 des Anhangs 1 wieder, ebenso wie der Grundriss in den Abbildungen 2 und 3 des Anhangs 1 dargestellt ist.



Anh. 1, Abb. 1 3D-Ansicht des Schulgebäudes



Anh. 1, Abb. 2 Grundriss des Schulgebäudes mit Außentüren im Erdgeschoss.



Anh. 1, Abb. 3 Grundriss des Schulgebäudes Ebenen 1 und 2

Die Maße entsprechen den Vorgaben der MSchulbauR und wurden bereits für ein Referenzgebäude zu Schulbauten herangezogen, wie in der Studie von C. Peveling detailliert dargelegt wurde [47].

Um den Einfluss der Türbreiten von Unterrichtsräumen auf die Gesamtentfluchtungszeit zu untersuchen, wurden insgesamt zwei Varianten untersucht: einmal Türbreiten von 0,90 m, sowie Türbreiten von 1,20 m für alle Türen aus den Unterrichtsräumen.

Es wurden entsprechend [48] Reaktionszeiten zwischen einer und zwei Minuten angesetzt, da wir davon ausgehen können, dass die Schüler wach und vertraut mit der Umgebung sind, es geschulte Brandschutzhelfer gibt bzw. regelmäßig Räumungsübungen durchgeführt werden (Kategorie M2 für das Brandschutzmanagement nach vfdb- und RiMEA-Leitfaden) und es sich um einen einfachen, mehrgeschossigen Grundriss handelt (Gebäudekomplexität B2 nach vfdb- und RiMEA-Leitfaden) [26] [19].

Im Falle der crowd:it-Simulationen beginnt die Flucht pro Unterrichtsraum jeweils gesammelt: Nach einer zufällig gewählten Reaktionszeit zwischen 1 und 2 Minuten beginnen die Schüler in einem Unterrichtsraum gemeinsam mit der Flucht aus diesem Raum. Im Falle von ASERI beginnen die Schüler die Flucht ebenfalls nach einer Minute und die letzten verlassen ihren Platz im Unterrichtsraum nach 2 Minuten, jedoch ist der Startzeitpunkt individuell auf die Schüler verteilt. Tabelle 1 des Anhangs 1 führt die für die Simulation festgelegten Parameter auf.

Anh. 1, Tab. 1 Eigenschaften der Variation im Szenario Schulgebäude

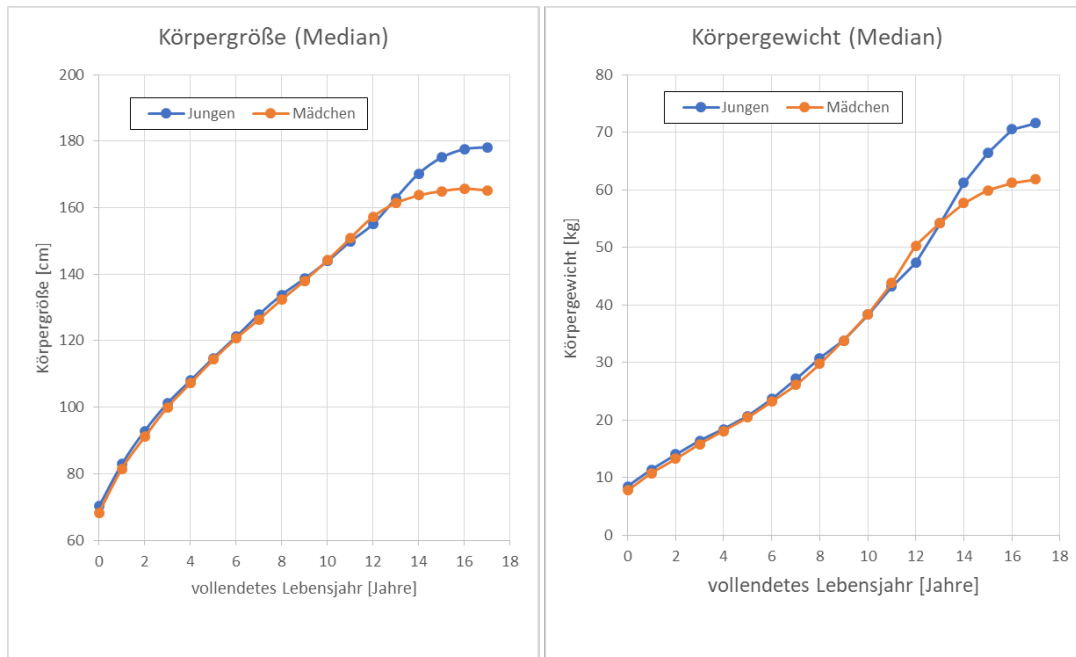
Eigenschaft	Ausprägung
Fragestellung	Inwiefern beeinflusst die Türbreite der Unterrichtsräume die Gesamtfluchtzeit?
Population	siehe Tabelle 2 des Anhangs 1
Zielgröße	Gesamtfluchtzeit
Anzahl Durchläufe pro Variante	50
Messbereich für die Entfluchtungszeit	Gesamtes Gebäude

Die Tabelle 2 des Anhangs 1 führt Variationen bezüglich der Belegung der Unterrichtsräume und Populationseigenschaften auf, die jeweils für Unterrichtsraumtüren von 0,9 m und 1,2 m simuliert worden sind.

Anh. 1, Tab. 2 Variationen für das Schulgebäude

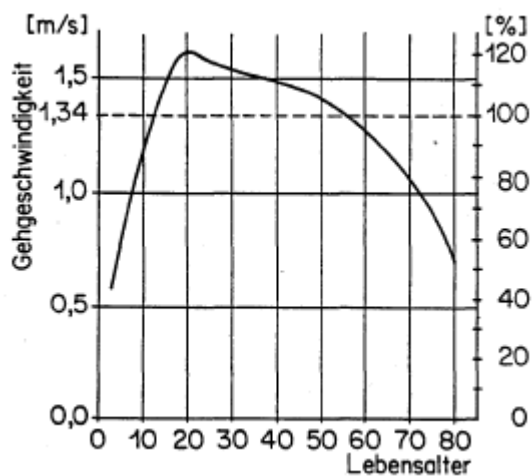
Variation	Anzahl Personen pro Unterrichtsraum	Reaktionszeit	Einstellungen
25 Schüler (6 – 10 Jahre)	25	Zwischen 1 ... 2 Minuten	Körperfläche: 0,08 – 0,10 m ² (normalverteilt um den Mittelwert 0,09 m ²) Geschwindigkeit: 0,5 – 1,1 m/s (normalverteilt um den Mittelwert 0,8 m/s)
30 Schüler (6 – 10 Jahre)	30	Zwischen 1 ... 2 Minuten	
35 Schüler (6 – 10 Jahre)	35	Zwischen 1 ... 2 Minuten	
25 Schüler (11 – 18 Jahre)	25	Zwischen 1 ... 2 Minuten	Standardeinstellungen von ASERI (vgl. Pkt. 3.1.1) und crowd:it (vgl. Pkt. 3.1.2)
30 Schüler (11 – 18 Jahre)	30	Zwischen 1 ... 2 Minuten	
35 Schüler (11 – 18 Jahre)	35	Zwischen 1 ... 2 Minuten	

Die Angaben von Körpergrößen und ungehinderten Gehgeschwindigkeiten von Kindern und Jugendlichen variieren stark. So zeigen empirische Erhebungen des Robert-Koch-Instituts und der Charité im Rahmen der Ergebnisse des Kinder- und Jugendgesundheitssurveys (KiGGS) von 2007 [49] anhand der Erfassung von 17.641 Probanden eine stete Zunahme von Körpergröße und -gewicht über die Jahre. Erst ab dem 13. Lebensjahr unterscheiden sich die Verläufe zwischen Jungen und Mädchen stärker, wodurch auch die Körperfläche und die Schrittweite eine Aufteilung nach Geschlecht erfahren, die ebenfalls bei Erwachsenen zu beobachten ist.

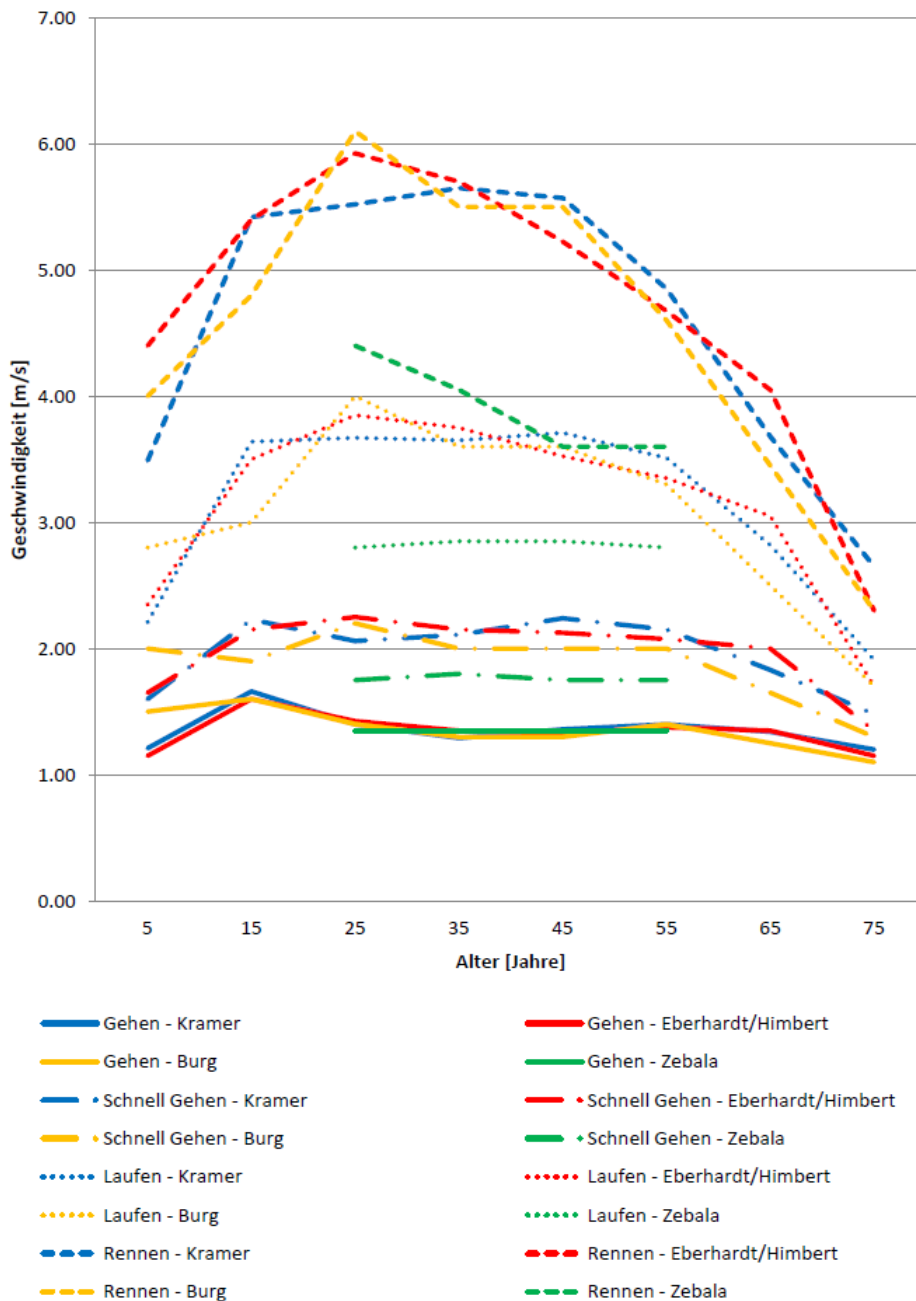


Anh. 1, Abb. 4 Entwicklung der Körpergrößen und des Gewichts von Kindern und Jugendlichen aus [49]

Die umfassende Zusammenstellung der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. zum altersabhängigen Bewegungsverhalten von Fußgängern zeigt sowohl für Männer/Jungen als auch für Frauen/Mädchen auf, dass sich sowohl die Geh- als auch die Laufgeschwindigkeiten nicht wesentlich über die Lebensjahre ändern, wohl aber deren Spreizung [51]. Die in den Simulationen angesetzten Werte entsprechen den konservativen Annahmen, wie sie beispielsweise Weidmann in [20] zusammengetragen hat. Somit soll sichergestellt werden, dass auch ungünstige Bedingungen abgebildet werden. Die Wahl der freien Gehgeschwindigkeit wird dennoch nicht den Ausschlag geben, da sich in vorliegendem Szenario Staus entwickeln, sodass diese Wunschgeschwindigkeit lediglich zu Beginn erreicht werden kann.



Anh. 1, Abb. 5 Gehgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Lebensalters; entnommen aus [20], S. 45.



Anh. 1, Abb. 6 Zusammenstellung der Geh- und Laufgeschwindigkeiten beispielhaft für Frauen über die Lebensjahre. [51], S. 36

Entsprechend der Vorgehensweise bei unterschiedlichen Personenstrommodellen, wie sie J. Lyzwa in seinem Beitrag zu den Braunschweiger Brandschutz-Tagen 2017 ausgeführt hat [50], soll hier eine Reduktion der Körpergröße für Schüler auf eine mittlere Ellipsenfläche von $0,09 \text{ m}^2$ mit einer Schwankungsbreite vom $0,08 - 0,1 \text{ m}^2$ und eine Verringerung der Geschwindigkeit auf $0,5 - 1,1 \text{ m/s}$ (normalverteilt um den Mittelwert von $0,8 \text{ m/s}$) konservativerweise vorgenommen werden.

Anhand den Abbildungen 7 und 8 des Anhangs 1 (ASERI) sowie der Abbildung 12 des Anhangs 1 (crowd:it) lässt sich der Entfluchtungsverlauf nachvollziehen: Die zufällig in

den zehn Unterrichtsräumen auf jeder Ebene verteilten Personen verlassen ihre Position für die erste Minute nicht (oberes Bild in Abbildung 12 des Anhangs 1). Dann beginnen nach und nach die Personen in den Unterrichtsräumen gemeinschaftlich den Weg in Richtung auf die Tür – hier zufällig links und rechts oben sowie unten der zweite Unterrichtsraum von links zum Zeitpunkt von $1\frac{1}{2}$ Minuten im mittleren Bild in der Abbildung 12 des Anhangs 1 der crowd:it-Simulation). Die Zuweisung, wann Personen in welchen Unterrichtsräumen die Flucht in crowd:it antreten, wird dabei völlig zufällig gewählt und ist in jedem der 50 Simulationsläufe anders. Zum letzten abgebildeten Zeitpunkt ($t = 2\frac{1}{2}$ Minuten; unteres Bild) stehen nunmehr alle Personen im Stau vor den Türen zum Treppenraum, der die Entfluchtungszeit für das Verlassen der Unterrichtsräume zunehmend bestimmt.

Obwohl die Personen in der gleichen Zeitspanne in der ASERI-Simulation zu laufen beginnen, startet in diesem Fall jede Person zufällig die Flucht, ohne einem Klassenverband zu folgen. Im Resultat läuft die Simulation jedoch auf die gleiche Situation hinaus, wie der Vergleich der Abbildungen 8 und 12 des Anhangs 1 zeigt.

Die Dynamik der Entfluchtung lässt sich anhand des Personenverteilungsdiagramms der Abbildung 9 des Anhangs 1 ablesen: Im Falle einer Population 11 – 18-jähriger Schüler, die Unterrichtsräume mit 90 cm breiten Türen verlassen, ist beispielhaft der Verlauf der Entleerung der obersten Ebene mit allen Unterrichtsräumen für 50 Simulationsläufe dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ s befinden sich alle Personen in ihren jeweiligen Räumen (30 Personen je Raum im dargestellten Falle). Die zentralen Unterrichtsräume (2.03, 2.04, 2.08 und 2.09; vgl. Abbildung 7 des Anhangs 1) sind bis zur 80. Sekunde entleert (1. Graphenbündel ab $t = 0$ s), während die anderen zwischen $2\frac{1}{2}$ bis $3\frac{1}{2}$ Minuten zur Räumung benötigen (2. Graphenbündel). Entsprechend ist der Flur des 2. OGs über $3\frac{1}{2}$ Minuten stark ausgelastet; danach entleert er sich schneller durch die geringer beschickten Treppenräume (orangefarbenes Graphenbündel), da weniger Personen aus dem 1. OG in die beiden Treppenräume drängen (hellblaues Graphenbündel); denn die Entfluchtung des 1. OGs ist nach 200 – 230 s beendet, während das EG bereits nach 110 – 120 s entleert ist (dunkelblaues Graphenbündel). An der Spreizung der Graphenschar lässt sich die Streuung ablesen, die in der zusammenfassenden Darstellung (Abb. 13) durch die Höhe der einzelnen Boxplotdarstellungen wiedergegeben wird.

Im Falle 1,20 m breiter Türen aus den Unterrichtsräumen bei sonst gleichen Bedingungen ergibt sich das Personenverteilungsdiagramm der Abbildung 10 des Anhangs 1, das keine statistischen Unterschiede zur Abbildung 13 des Anhangs 1 mit der Auswertung für Unterrichtsraumbtüren von 0,90 m Breite aufzeigt, da die Verläufe der Entfluchtung für alle Räume gleiches Verhalten aufweisen.

Den Entfluchtungsverlauf der Unterrichtsräume im 2. OG mit Schülern im Alter von 6 – 10 Jahren, ebenfalls mit jeweils 30 Personen belegt, geben die Personenverteilungsdiagramme der Abbildungen 11 und 12 des Anhangs 1 wieder. Das Graphenbündel, das zum Alarmierungszeitpunkt $t = 0$ s mit 30 Personen beginnt, zeigt die Belegung der Unterrichtsräume. Die zentralen (ausgangsfernen) Unterrichtsräume sind in beiden Fällen nach knapp 1 bis unter 2 Minuten entleert, während die treppenraumnahen Räume zwischen $2\frac{1}{2}$ und 4 Minuten benötigen. In beiden Fällen ist die Räumung des 2. OGs (orangefarbenes Graphenbündel) mit 5 – 6 Minuten schneller abge-

schlossen als die des 1. OGs (6 – 7 Minuten; hellblaues Graphenbündel). Für Türbreiten der Unterrichtsräume von 0,90 m (siehe Anh. 1, Abb. 11) und 1,20 m (siehe Anh. 1, Abb. 12) ergeben sich – ebenso wie im Falle der 11 – 18-jährigen Schüler – keine statistischen Unterschiede.

Die Entfluchtungszeit der Unterrichtsräume weichen weder zwischen den Resultaten für 0,90 m oder 1,20 m Türen bei der jüngeren Population noch gegenüber den Ergebnissen der älteren Schülerpopulation signifikant ab (vgl. Anh. 1, Abb. 10 und Anh. 1, Abb. 11). Allerdings fällt die Spreizung nunmehr breiter aus, da die häufiger auftretenden geringen Gehgeschwindigkeiten die Entfluchtungszeiten im stärkeren Maße an den Engpassstellen und auf Treppen beeinflussen. Diese Effekte führen beim Zusammentreffen der Schüler in der ersten Ebene zu einem statistischen Vorrang derjenigen Personen, die aus dem 2. OG kommen, wodurch diese Ebene – im Gegensatz zum Szenario mit den älteren Schülern – schneller entleert ist. Daher weist das orangefarbene Graphenbündel (= Flur des 2. OGs) sowohl für 0,90 m wie auch 1,20 m breite Türen geringere Entfluchtungszeiten aus als sie sich für das hellblaue Graphenbündel (= Flur des 1. OGs) einstellen.

Die Auswirkungen der Türbreitenvariation von 0,9 m bzw. 1,2 m für die Unterrichtsraumtüren für die crowd:it-Simulationen gibt Abb. 13 des Anhangs 1 wieder: Ausgehend von der Entfluchtungszeit im Erdgeschoss für 6 – 10 Jahre alte Schüler, kann kein signifikanter Unterschied zwischen den Resultaten für 0,9 m Türbreite (dunkle Boxplots) und 1,2 m Breite (helle Boxplots) ausgemacht werden. Für alle drei aufgeführten Belegungen liegen die Resultate innerhalb der jeweiligen Quartilspanne, lediglich die gleichmäßige Zunahme der Fluchtzeiten führt auf die erwartete Variation der Ergebnisse.

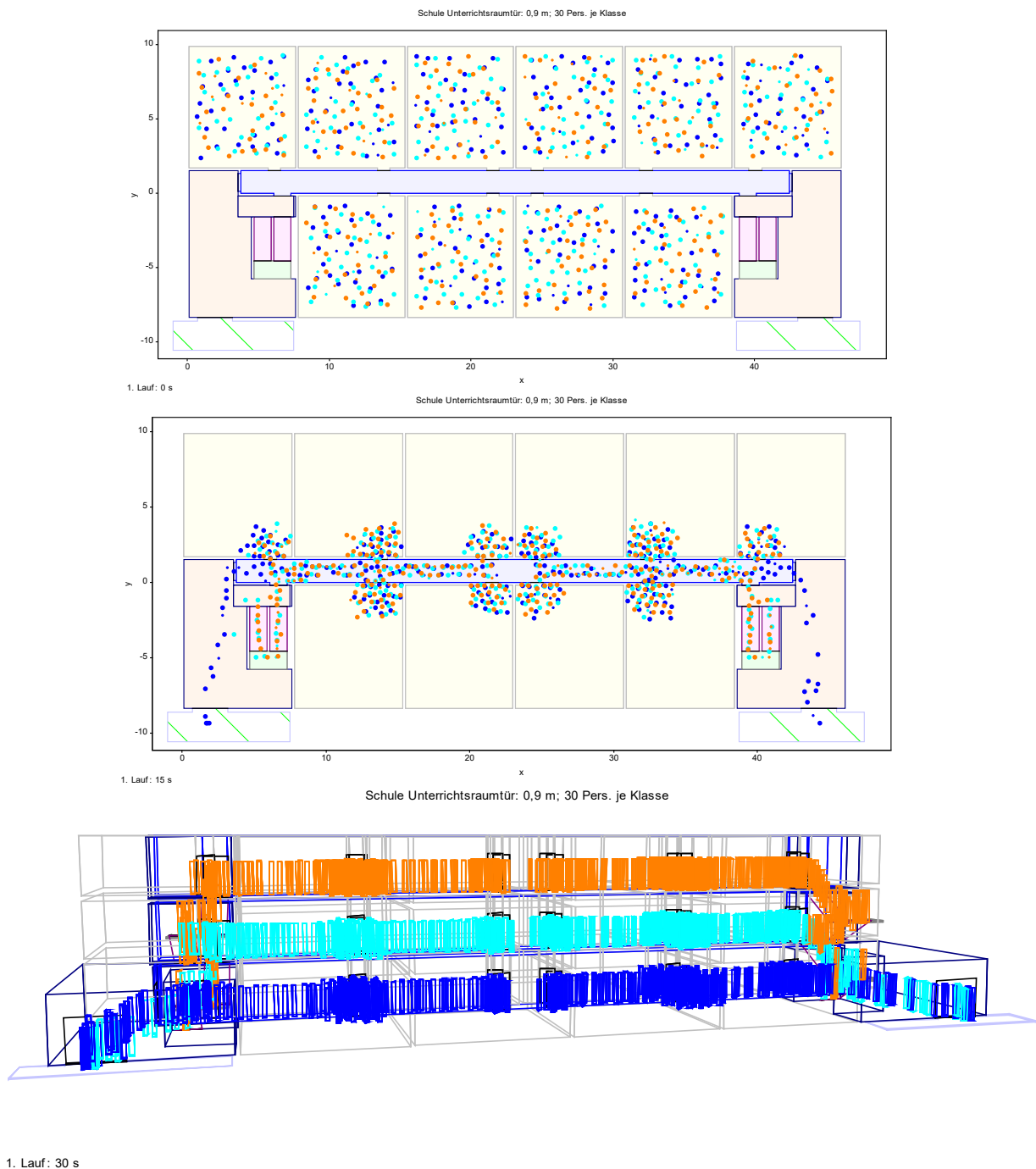
Gleiches gilt für den geänderten Populationstyp der 11 – 18-Jährigen, wie in der rechten oberen Grafik in Abbildung 13 des Anhangs 1 abzulesen ist. Innerhalb der Streuung der Fluchtzeiten liegen auch hier die Resultate für die Türbreiten 0,9 m und 1,2 m statistisch nicht unterscheidbar bei gleichen Werten und weisen auch bezüglich des Unterschiedes zur jüngeren Population nahezu identische Werte auf.

Das Bild für die beiden Obergeschosse ändert sich ebenfalls nicht. Lediglich eine Verschiebung zu längeren Zeiten wegen der zunehmenden Einschränkung des Austritts in den sich füllenden Fluren spielt hier jetzt eine größere Rolle, insbesondere wenn die Belegung der Unterrichtsräume erhöht wird (vgl. die rechten beiden Boxplots im letzten Diagramm).

Der Effekt, dass sich die Evakuierungszeit in OG 2 tendenziell sogar verschlechtert bei 1,20 m breiten Klassentüren lässt sich dadurch erklären, dass die Treppenräume schneller gefüllt sind mit den Personen aus OG 1, da diese nun schneller das Treppenhaus erreichen, und die Personen aus OG 2 damit länger warten müssen.

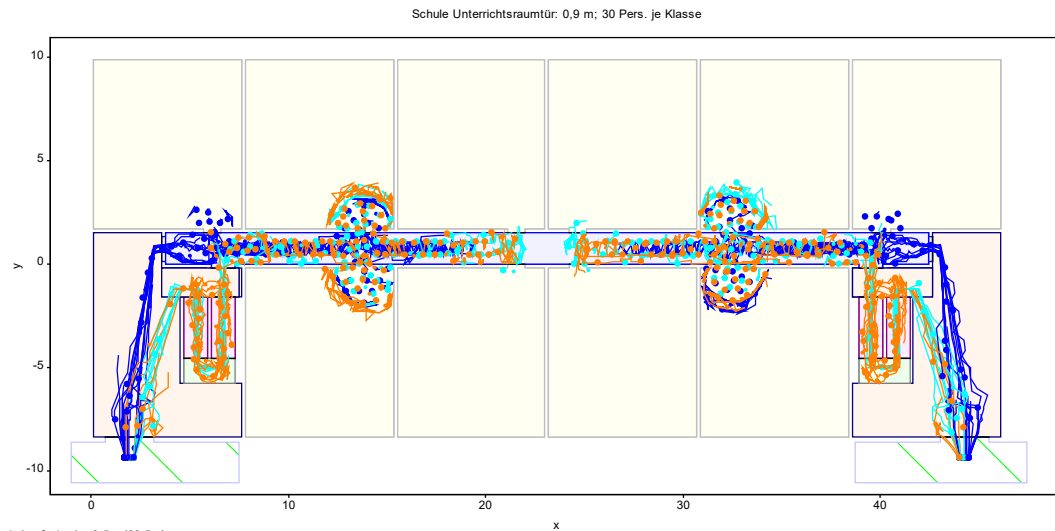
Über alle Unterrichtsräume hinweg betrachtet wird deutlich, dass der Türbreitenunterschied keinen nachhaltigen Einfluss auf die Entfluchtungszeiten der Räume ausübt. Andere Parameter besitzen einen gewichtigeren Einfluss (z. B. Aufwand für die Organisation einer gemeinschaftlichen Entfluchtung, sich aufbauende Stausituation auf dem Flur/Treppenraum etc.)

In Abbildung 14 des Anhangs 1 sind zusammenfassend die Gesamtevakuierungszeiten dargestellt. Hier wird deutlich, dass die Türbreite der Unterrichtsräume auch keinen Einfluss auf die Evakuierungszeit der gesamten Schule hat.

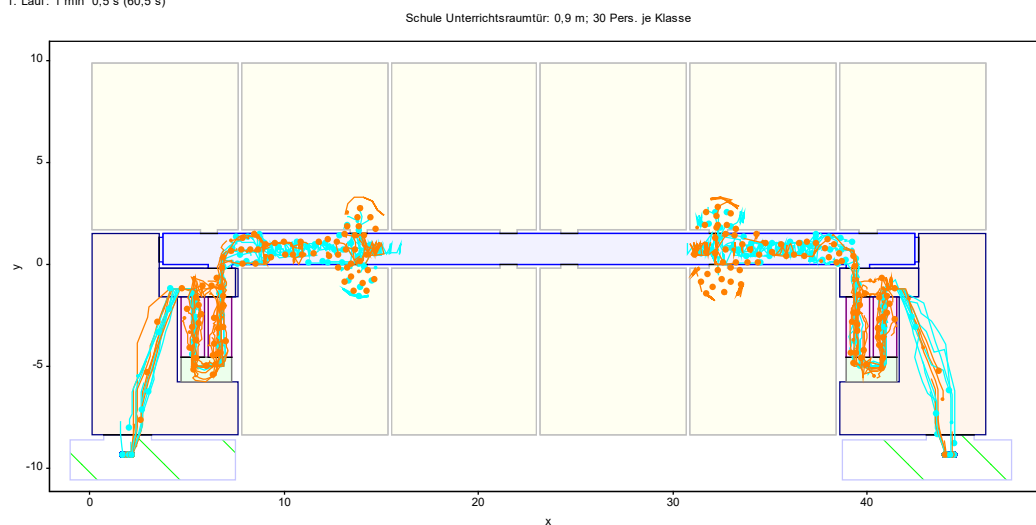


Anh. 1, Abb. 7

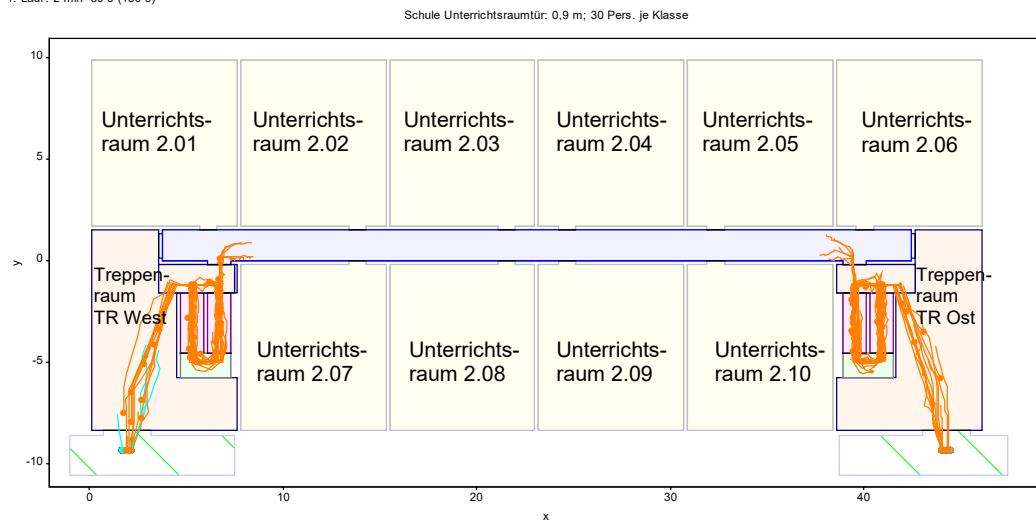
Ausgangsverteilung von 30 Personen pro Unterrichtsraum über alle drei Ebenen zum Zeitpunkt $t = 0$ s (oberes Bild; Personen im 2. OG: gelb, 1. OG: hellblau und EG: blau). 15 s nach der Alarmierung haben sich sowohl vor den Unterrichtsraumtüren als auch vor den Zugängen zu den Treppenträumen Stauungen ergeben (mittleres Bild). Die Verteilung über alle drei Ebenen nach einer halben Minute zeigt die 3D-Ansicht, die auch die intensive Auslastung von Fluren und Treppenträumen verdeutlicht (unteres Bild). (ASERI)



1. Lauf: 1 min 0,5 s (60,5 s)



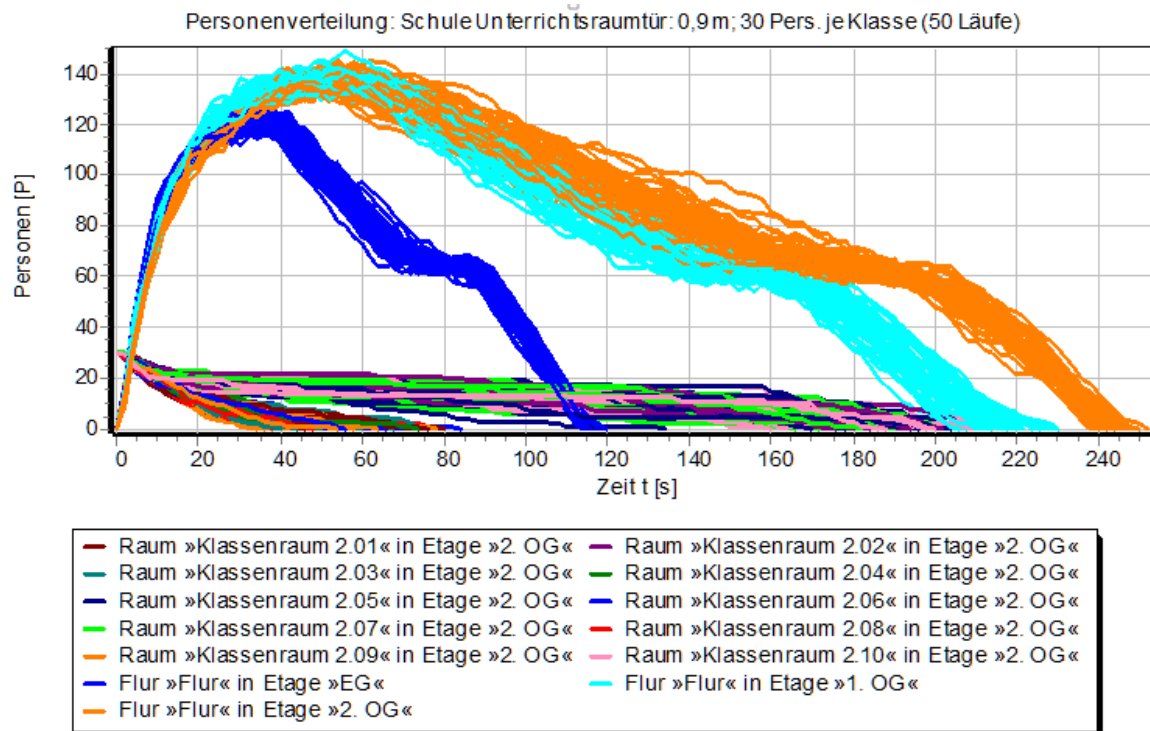
1. Lauf: 2 min 30 s (150 s)



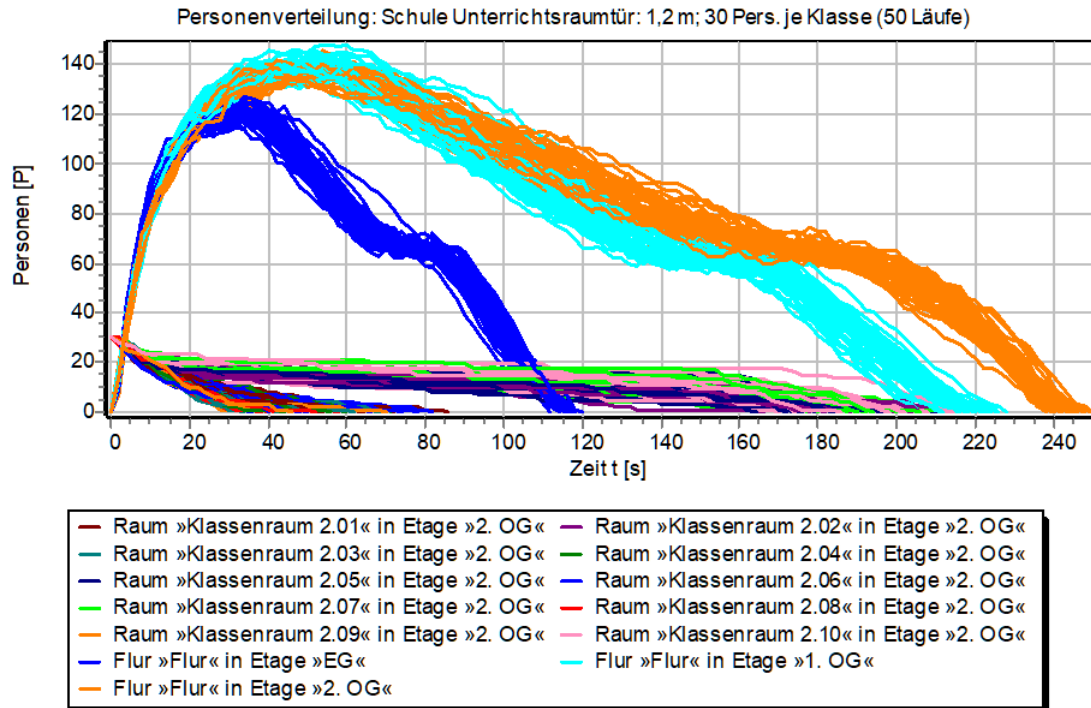
1. Lauf: 4 min (240 s)

Hinweis: In Anh.1 Abb. 9, Anh.1 Abb. 10 und Anh.1 Abb. 11 Klassenraum = Unterrichtsraum

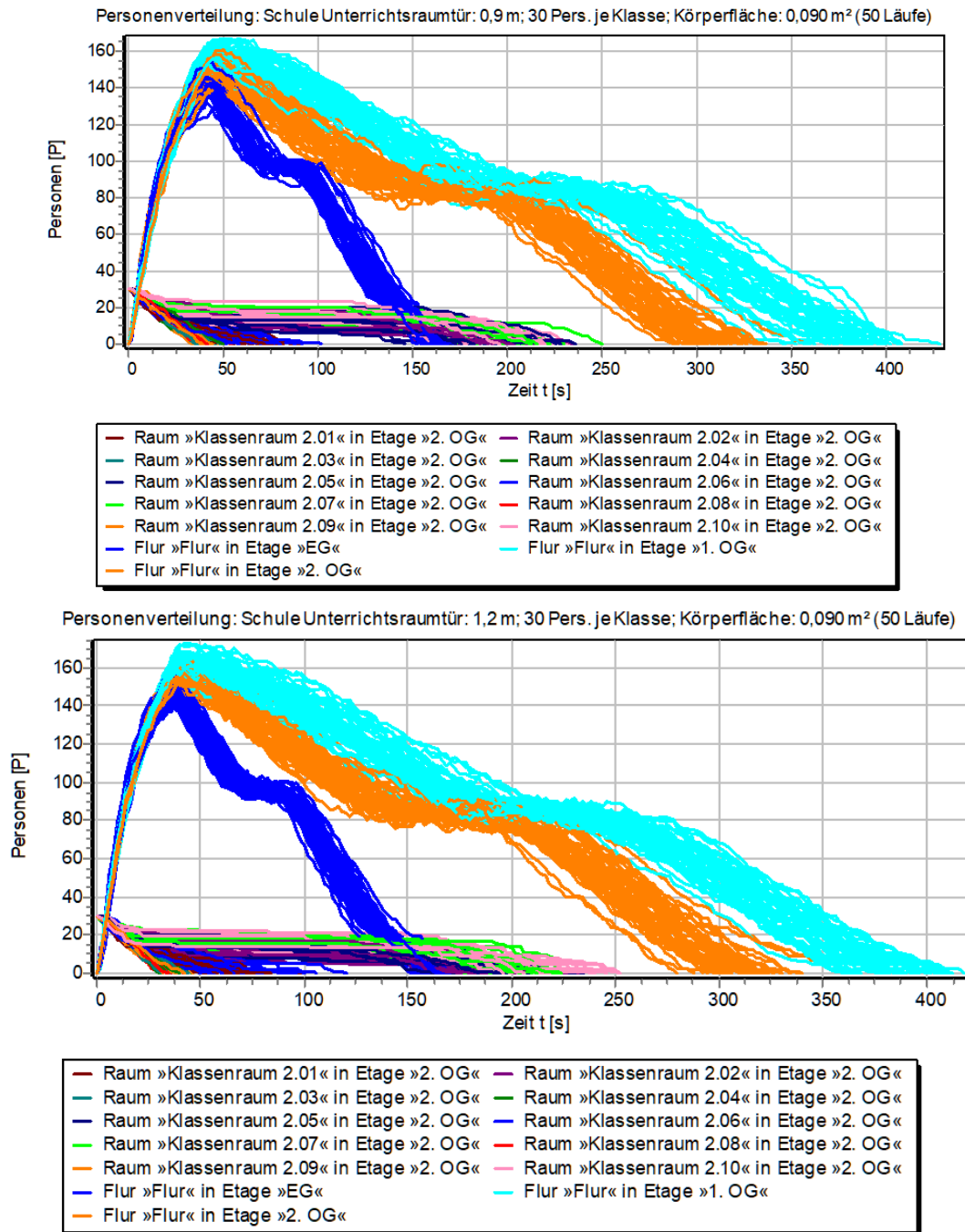
Anh. 1, Abb. 8 Nach einer Minute entleeren sich die zentralen Unterrichtsräume des 1. OG. und 2. OG, während die des EG bereits geräumt sind (oberes Bild). Nach 2½ Minuten verbleiben lediglich noch Personen in vier Unterrichtsräumen im 1. und 2. OG, während nach 4 Minuten alle Flure mit den letzten Personen im 2. OG geräumt sind (unteres Bild). (ASERI)



Anh. 1, Abb. 9 praxisbezogenes Personenverteilungsdigramm zur Räumung von 30 Personen im Alter von 11 – 18 Jahren in den Unterrichtsräumen des 2. OG mit 0,90 m breiten Türen für 50 Simulationsläufe. Die zentralen Unterrichtsräume (2.03, 2.04, 2.08, 2.09; vgl. Abbildung 7 des Anhangs 1) sind bis zur 80. Sekunde entleert. (ASERI)



Anh. 1, Abb. 10 Personenverteilungsdigramm zur Räumung von 30 Personen im Alter von 11 – 18 Jahren in den Unterrichtsräumen des 2. OGs mit 1,20 m breiten Türen zeigt statistisch keine Unterschiede zur Abbildung 9 des Anhangs 1 mit Unterrichtsraumtüren von 0,90 m bei sonst gleichen Voraussetzungen. (ASERI)

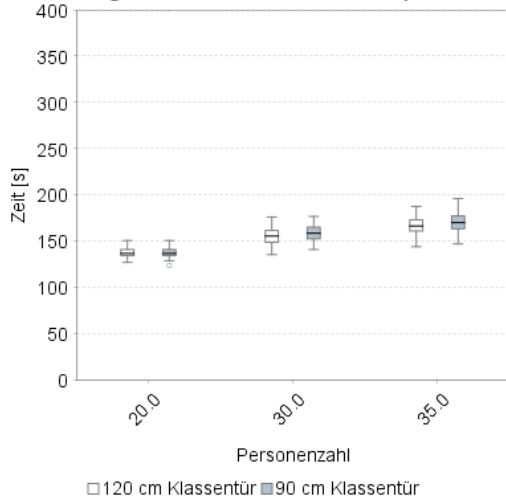


Anh. 1, Abb. 11 Personenverteilungsdiagramm zur Räumung von 30 Personen im Alter von 6 – 10 Jahren in den Unterrichtsräumen des 2. OGs mit 0,90 m breiten Türen. (ASERI)

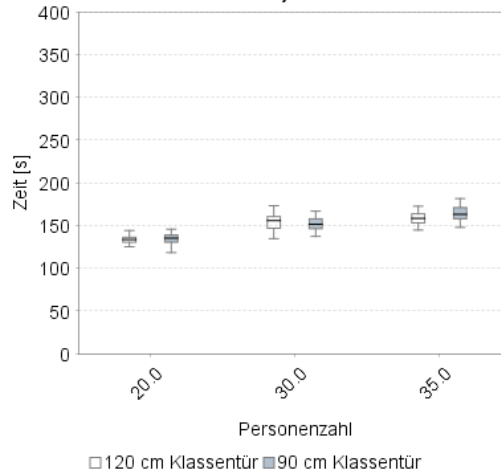


Anh. 1, Abb. 12 Abfolge einer Entfluchtung im 2. OG der Schule mit je 35 Personen im Unterrichtsraum und Türbreite der Unterrichtsräume von 0,9 m, die pro Unterrichtsraum gemeinsam ihre Flucht beginnen. Die Zeitspanne von $t = 0$ s bis $t = 1$ min gibt das obere Bild wieder, nach 1½ Minuten ergibt sich das mittlere und schließlich nach 2½ Minuten das untere. (crowd:it)

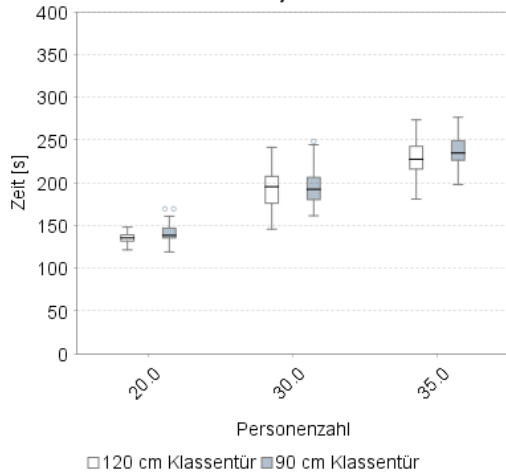
Evakuierungszeit Klassenzimmer im EG (6-10 Jahre)



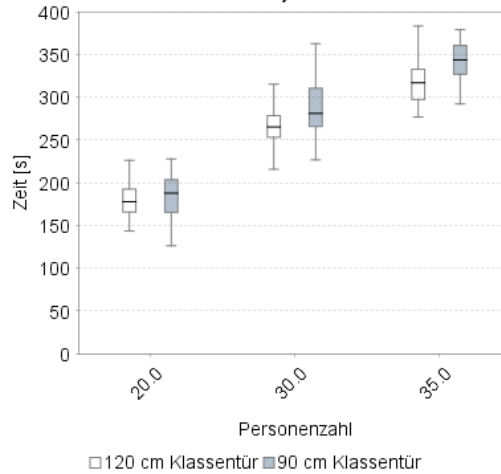
Evakuierungszeit Klassenzimmer im EG (11-18 Jahre)



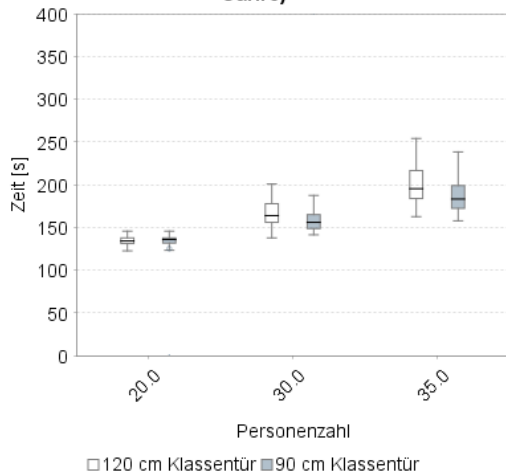
Evakuierungszeit Klassenzimmer im OG1 (6-10 Jahre)



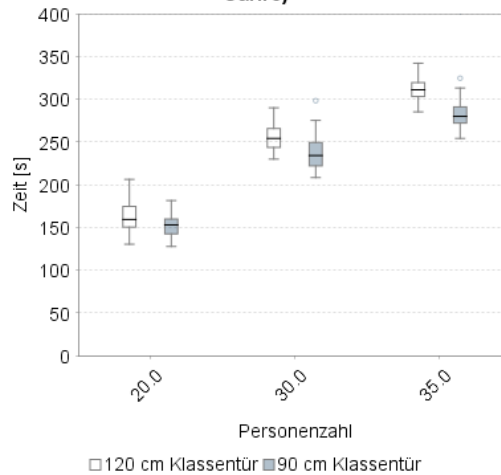
Evakuierungszeit Klassenzimmer im OG1 (11-18 Jahre)



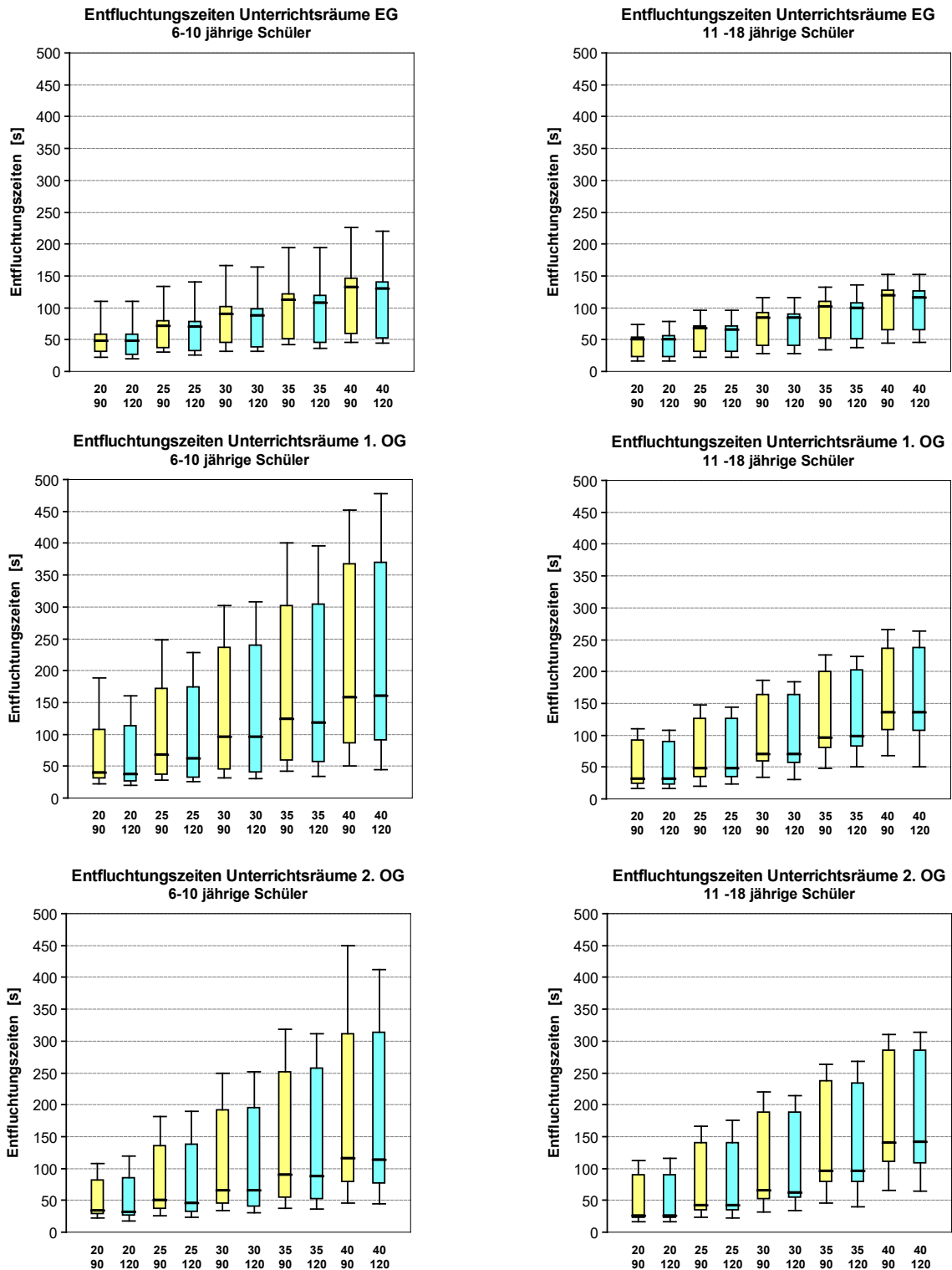
Evakuierungszeit Klassenzimmer im OG2 (6-10 Jahre)



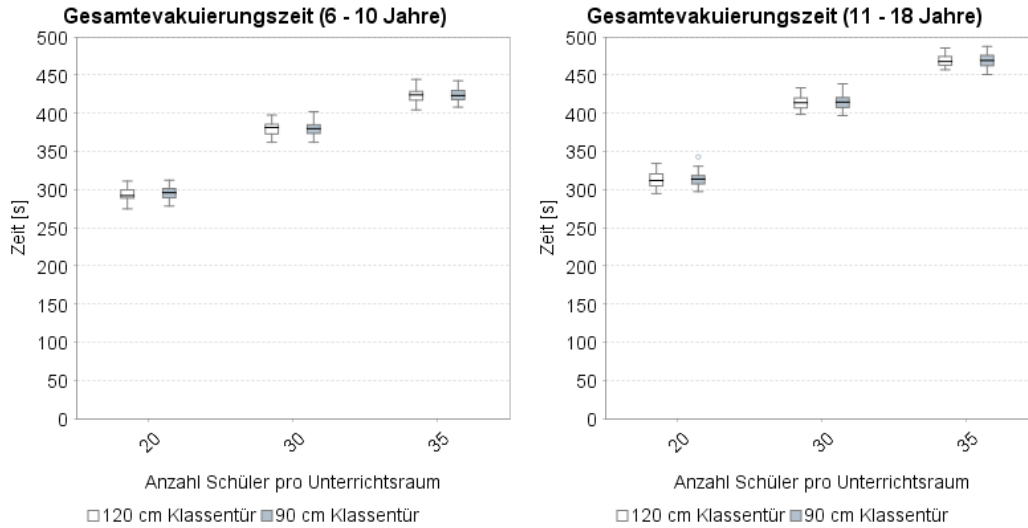
Evakuierungszeit Klassenzimmer im OG2 (11-18 Jahre)



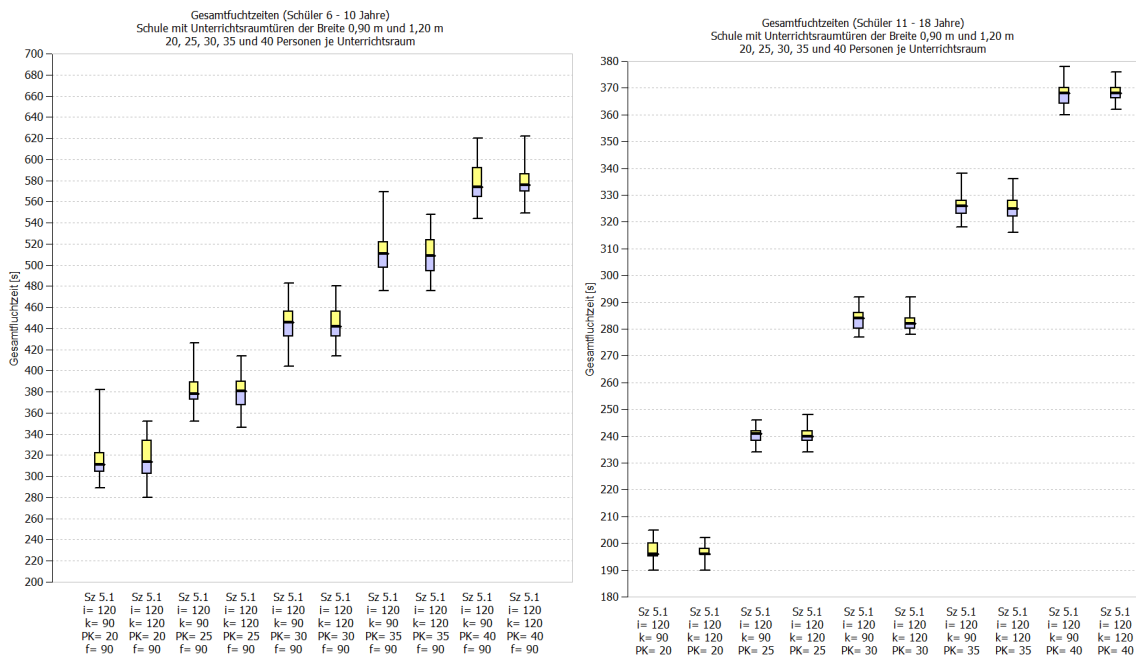
Anh. 1, Abb. 13 Entfluchtungszeiten der Unterrichtsräume in den drei Ebenen der Schule für eine Population von 6 – 10 Jahren (linke Spalte) und 11 – 18 Jahren (rechte Spalte) bei Belegung mit 20, 30 und 35 Personen pro Unterrichtsraum und Türbreiten der Unterrichtsräume von 0,9 m (dunkle Boxplots) bzw. 1,2 m (helle Boxplots) mit crowd:it berechnet.



Anh. 1, Abb. 14 Entfluchtungszeiten der Unterrichtsräume in den drei Ebenen der Schule für eine Population von 6-10 Jahren (linke Spalte) bzw. 11-18 Jahre (rechte Spalte) bei Belegung mit 20, 25, 30, 35 und 40 Personen pro Unterrichtsraum [1. Zeile unter den Diagrammen] und Türbreiten der Unterrichtsräume von 90 cm (gelbe Boxplots) bzw. 120 cm (blaue Boxplots) [2. Zeile unter den Diagrammen] mit ASERI für jeweils 50 Simulationsläufe berechnet.



Anh. 1, Abb. 15 Gesamtevakuiierungszeiten für beide Szenarien, jeweils mit 120 cm Klassentür (weiß) und 90 cm Klassentür (grau). Die Räumungszeiten steigen jeweils an, je mehr Schüler sich in den Unterrichtsräumen befinden; ein Unterschied in den Gesamtevakuiierungszeiten abhängig von den Türbreiten in Unterrichtsräumen ist nicht ersichtlich. crowd:it



Anh. 1, Abb. 16 Gesamtevakuiierungszeiten für eine Schülerpopulation im Alter von 6 – 10 Jahren (linkes Diagramm) und eine im Alter von 11 – 18 Jahren (rechtes Diagramm). Die Wertepaare der Boxplots beziehen sich auf Unterrichtsräume mit Türen der Breite $k = 0,90$ m (links) und $1,20$ m (rechts) für die Personenzahl pro Unterrichtsraum (PK) vom 20, 25, 30, 35 und 40 Personen. In beiden Fällen ist eine lineare Steigerung der Entfluchtungszeiten ablesbar, wobei keine statistischen Unterschiede zwischen den Türbreiten gegeben sind. (ASERI)

Die unterschiedlichen Gesamtevakuiierungszeiten der beiden Modelle ASERI (Anh. 1, Abb. 16) und crowd:it (Anh. 1, Abb. 15) resultieren in den unterschiedlichen Modellierungsansätzen. Während in crowd:it die Agenten kreisförmig abgebildet werden und durch die geringere Körperfläche die Kreisdurchmesser auf zwischen 0,32 und 0,36 m sinken (und damit auch drei Personen nebeneinander die Treppe herabsteigen können), hat die geringere Geschwindigkeit keinen so großen Einfluss, da Agenten auf Treppen nicht prozentual zur ihrer Geschwindigkeit in der Ebene abgebremst werden, sondern anhand der Treppenstufentiefe. In ASERI hingegen hat die Verringerung der Grundfläche eine Schulterbreite von 0,445 m zur Folge, wodurch sich jeweils maximal zwei Personen nebeneinander in 1,20 m breiten Durchgängen oder Treppen bewegen können. Zusätzlich werden Personen in ASERI auf Treppen prozentual zu ihrer Geschwindigkeit in der Ebene abgebremst, was bei diesen bereits geringen Geschwindigkeiten in der Ebene zu sehr geringen Geschwindigkeiten führt und damit zu einer sehr starken Flussverringerng.

Dennoch zeigen beide Modelle dieselben Effekte, sowohl im linearen Anstieg der Gesamtevakuiierungszeit, wenn die Belegung der Unterrichtsräume erhöht wird, als auch bei der Tatsache, dass die unterschiedlichen Türbreiten der Unterrichtsräume von 0,90 m sowie 1,20 m keinen Einfluss auf die Gesamtevakuiierungszeit haben – was Gegenstand dieser Untersuchung ist.

Für eine weitere Differenzierung nach dem Alter zur Erfassung der Kinder in Kindertagesstätten könnten einerseits die Körpergrößen und Geschwindigkeiten entsprechend der Studie [49] (vgl. Anh. 1, Abb. 4) reduziert werden, aber J. Lyzwa weist auf Untersuchungen mit Krippen- und Kindergartenkindern durch A. Larusdottir und A. Dederichs hin, die zwischen 0,41 und 1,40 m/s für die horizontale Gehgeschwindigkeit (mittlere bei 0,84 m/s) von Kindern im Alter zwischen 3 und 6 Jahren ermittelt haben und damit im bereits oben abgedeckten Bereich liegen [50] [52].

Allerdings sind gerade für diese Altersgruppen andere Faktoren bei der Entfluchtng viel entscheidender, wie z. B. die Einflussnahme der Erzieher und andere gruppensdynamische Abläufe, sodass eine Fokussierung auf hier behandelbare physikalische Parameter (Körpergröße, ungehinderte Gehgeschwindigkeit, Wegfindung) zu kurz greifen würde.

Da die Evakuierungsdauer in allen Szenarien des Abschnitts insbesondere durch die Kapazitäten der Treppenräume dominiert wird, fällt die Entleerungszeit der Unterrichtsräume nicht ins Gewicht. Türbreiten von 0,90 m oder 1,20 m bedingen keine statistisch erkennbaren Unterschiede bei den Evakuierungszeiten. Im Gegensatz dazu besitzen Alarmierungs- und Reaktionszeiten viel stärkere Auswirkungen auf die Evakuierungsabläufe sowohl im Unterrichtsraum als auch im Treppenraum.

Anhang 2 Ergänzung zu Szenario 4: Vertikale Entfluchtung

Inhalt

	Seite	
A1	Gestaltung des Szenarios	105
A1.1	Variationen	105
A1.2	Eigenschaften	106
A1.3	Geometrieanpassungen je Treppenbreite	106
A1.4	Verteilung der Personen je Ebene	108
A2	Ergebnisse	109
A2.1	Gesamtentfluchtungszeit in Abhängigkeit von Treppenbreite und Personenzahl für die jeweilige Anzahl Ebenen	109
A2.2	Gesamtentfluchtungszeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen und der Treppenbreite für die jeweilige Anzahl Personen pro Ebene	110
A2.3	Entfluchtungszeiten einzelner Ebenen in Abhängigkeit von der Treppenbreite und der Anzahl Personen pro Ebene	111
A2.4	Entfluchtungszeiten aus den Ebenen in Abhängigkeit von der Anzahl Ebenen	116
A2.5	Entfluchtungszeiten aus den Ebenen in Abhängigkeit von der Treppenbreite bei steigender Anzahl Ebenen	119
A2.6	Entfluchtungszeiten in Abhängigkeit von Treppenbreite, Anzahl Personen pro Ebene und Anzahl Ebenen	123
A3	Entfluchtungszeiten in Abhängigkeit von der Treppenbreite bei steigender Anzahl Ebenen im makroskopischen Kapazitätsmodell	126
A4	Ergänzende Tabellen und Boxplots	130

A1 Gestaltung des Szenarios

A1.1 Variationen

Bei mehrstöckigen Gebäuden kann es bei der Entfluchtung ab einer bestimmten Personenbelegung der Ebenen zu einer Verdichtung des Personenstroms und einer Verringerung der Geschwindigkeiten in den Treppenräumen kommen. Dies kann auch Auswirkungen in den angrenzenden Bereichen der Ebenen beim Zugang zum Treppenraum haben, bis hin zu einem Stau in den Ebenen. Aufbauend auf Szenario 4 (siehe Abschnitt 4.2.5) wurde in folgendem Szenario eine Parameterstudie durchgeführt, die die Wechselwirkungen zwischen der Anzahl Ebenen, Anzahl Personen pro Ebene sowie der Treppenbreiten systematisch betrachtet und analysiert (Szenario 5).

Dabei wurden folgenden Einflussgrößen auf die Entfluchtungszeit der einzelnen Ebenen und die Gesamtentfluchtungszeit des Gebäudes untersucht:

- Anzahl der Ebenen
- lichte Breiten der Treppen in den Treppenräumen
- maximal mögliche Personenbelegung pro Ebene, bei der eine Entfluchtung ohne Staubildung in den Ebenen und Treppenräumen erfolgt
- Geschosshöhe

Folgende Varianten wurden mit der Projektgruppe Fluchtwege des ASTA abgestimmt:

Anh. 2, Tab. 1 Variantendefinition

	Anzahl Ebenen	Treppenbreite [cm]	Personenbelegung/Ebene
Szenario	3,4,5,6,7,8	90,100,110,120,130,140, 150,160,170,180,190,200, 210,220,230,240	20,30,40,50,60,70,80,90,100

Die Anzahl der Ebenen beschreibt hier jeweils die Ebenenanzahl exklusive des Erdgeschosses. 3 Ebenen bedeuten also, dass das Gebäude aus dem Ausgang im Erdgeschoss plus drei Ebenen besteht.

Damit wurden insgesamt 864 Simulationen für eine Geschosshöhe von 3,60 m durchgeführt. Für jede Variante werden dabei 20 statistische Läufe durchgeführt. Zusätzlich wurden weitere Simulationen für die Geschosshöhen von 2,70 m sowie 4,50 m durchgeführt.

Um eine einheitliche Benennung der vielen Varianten zu gewährleisten, werden die Szenarien nach folgendem Muster benannt:

Sz5_E<Anzahl Ebenen>_T<Treppenbreite in cm>_P<Personenbelegung pro Stockwerk>

Beispiel: Sz5_E8_T90_P90

Variante mit 8 Ebenen, 90 cm Treppenbreite und 90 Personen pro Ebene.

A1.2 Eigenschaften

Anh. 2, Tab. 2 Ausprägung des Szenarios

Eigenschaft	Ausprägung
Fragestellung	Einfluss von Treppenbreiten, Zahl der Ebenen und Personen pro Ebene
Population	jeweils Standardpopulation Keine Reaktionszeiten und Alarmierungszeiten für alle Personen/pro Ebene Programmstandardverhalten auf den Treppen (keine Ermüdung)
Zielgrößen	Gesamtentfluchtungszeit aus dem Gebäude ¹⁾ Entfluchtungszeit aus der Ebene ²⁾
Anzahl Durchläufe pro Variante	20
Anzahl Personen	szenarienabhängig, siehe Tabelle Anh. 2, Tab. 3
Anzahl Ebenen	szenarienabhängig, 3 bis 8
Treppen	Stufenhöhe (Steigung): 18 cm Stufentiefe (Auftritt): 27 cm Anzahl der Steigungen: 20 (10 je Treppenlauf) Ebenenabstand (Geschosshöhe): 3,60 m

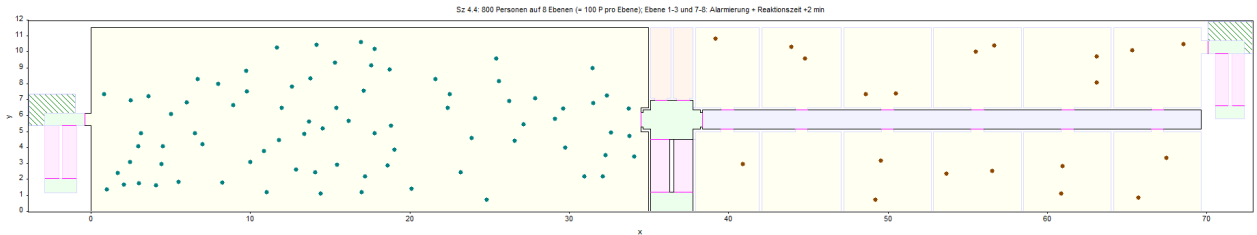
¹⁾ Zeitpunkt zu dem die letzte Person den Notausgang des Gebäudes passiert hat

²⁾ Zeitpunkt zu dem die letzte Person die Tür zum Treppenraum (entspricht im Arbeitsstättenrecht dem Notausgang zum gesicherten Bereich) einer Ebene passiert hat

A1.3 Geometrie Anpassungen je Treppenbreite

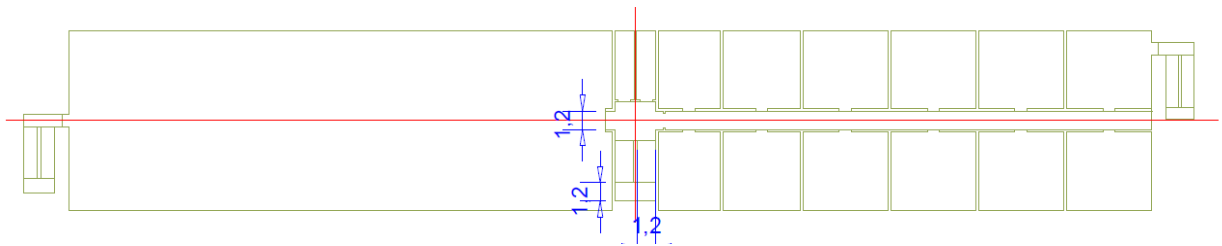
Die Geometrie des Szenarios stützt sich auf die Geometrie von Szenario 4 (siehe Abbildung 4.27) mit einer zweiläufigen gegenläufigen Treppe mit Wendepodest (Richtungswechsel um 180°). Um die unterschiedlichen Treppenbreiten abbilden zu können und gleichzeitig die Laufwege nicht zu verändern, wurde das Gebäude von innen heraus im Bereich des Treppenhauses vergrößert. Der Ausgang aus den Büros wird – aufgrund der geringen Maximalbelegung (max. 2 Personen pro Büro → maximal 24 Personen) – mit 0,90 m Türbreite beibehalten. Für die Tür in den Treppenraum wurde ebenfalls diese Breite gewählt.

Die lichte Breite des Ausgangs aus dem Ausbildungsraum in den Treppenraum wird identisch zur Treppenbreite gewählt, um hier Seiteneffekte auszuschließen. Anh. 2, Abb. 1 - 4 zeigen die Geometrie mit 0,90 m, 1,20 m sowie 2,40 m Treppenbreite und die Auswirkungen auf die Gebäudegeometrie. Die Fluchtweglängen in den Ebenen bleiben jeweils gleich. Die Breite des Ausgangs im Erdgeschoss entspricht jeweils der gewählten Treppenbreite, um hier Seiteneffekte zu vermeiden.

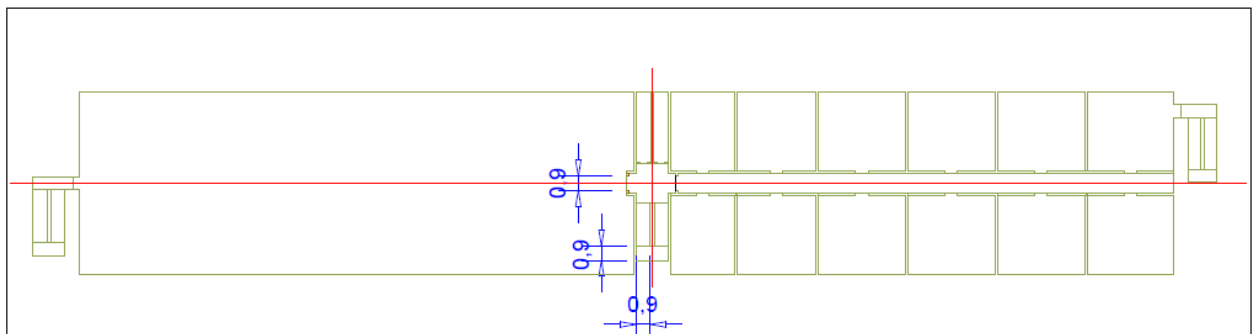


Anh. 2, Abb. 1 Ausgangspunkt Szenario 4 – Ansicht der obersten (8.) Ebene mit 1,20 m breiten Treppen und 1,20 m breiten Podesten zwischen den Ebenen. Belegung mit 100 zufallsverteilten Personen. (ASERI)

Die roten Achsen in Anh. 2, Abb. 2 werden wegen der Konstanzhaltung der Fluchtweglängen aus der Ebene heraus für alle Variationen der Treppenbreite als Ausgangspunkt der Treppen beibehalten. Der leichte Versatz nach innen resultiert daraus, dass die Treppenmaße im Vergleich zu Szenario 4 leicht angepasst wurden. Während in Szenario 4 noch mit 30 cm Stufentiefe (Treppenauftritt) gerechnet wurde, wurden diese an das mittlere Normmaß von 27 cm Stufentiefe (Treppenauftritt) und 18 cm Stufenhöhe (Treppensteigung) angepasst, da dies den in der Realität anzutreffenden Maßen am nächsten kommt.

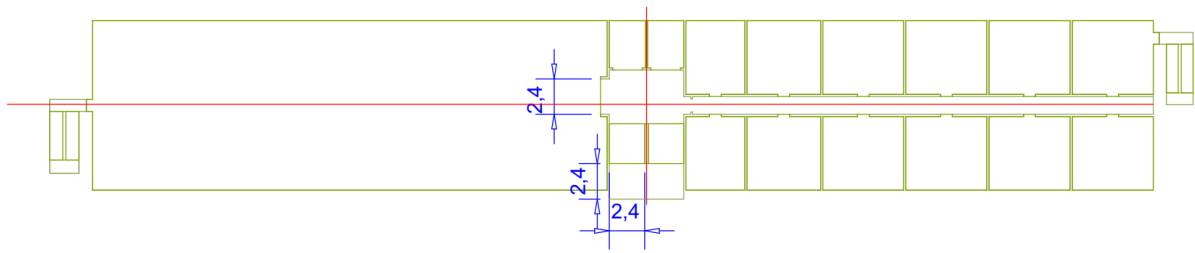


Anh. 2, Abb. 2 Grundriss einer Ebene im Treppenbereich bei 1,20 m Treppenbreite



Anh. 2, Abb. 3 Grundriss einer Ebene bei minimaler Treppenbreite mit 0,90 m Treppenbreite

Demzufolge ergibt sich für die Konstellation mit der schmalsten Treppe von 0,90 m Breite der Grundriss der Anh. 2, Abb. 3 und für die breiteste Treppenkonfiguration der Grundriss der Anh. 2, Abb. 4. Hier ist darauf hinzuweisen, dass das Breitenmaß von 0,90 m einen für die Simulationen notwendigen theoretischen Wert darstellt und in der Praxis nur in Wohngebäuden der Gebäudeklassen 1 und 2 sowie innerhalb von Wohnungen zulässig ist und deshalb praktisch nicht in Arbeitsstätten.



Anh. 2, Abb. 4 Maximale Variation mit 2,40 m Treppenbreite

Das Podest, in gleicher Breite wie die Treppen, ragt bei 2,40 m Treppenbreite aus der Gebäudefront heraus. Die dem Treppenhaus gegenüberliegenden Toiletten werden verkleinert, um die Fläche im Treppenhaus konstant zu halten und den Ausgang aus dem Schulungsraum konstant zur Treppenbreite anwachsen zu lassen.

A1.4 Verteilung der Personen je Ebene

Bei Erhöhung der Personenbelegung wächst die Belegung im Schulungsraum, sobald die maximale Kapazität des Bürotrakts überschritten wurde.

Anh. 2, Tab. 3 Verteilung der Personen in den Ebenen auf Bürotrakt und Schulungsraum

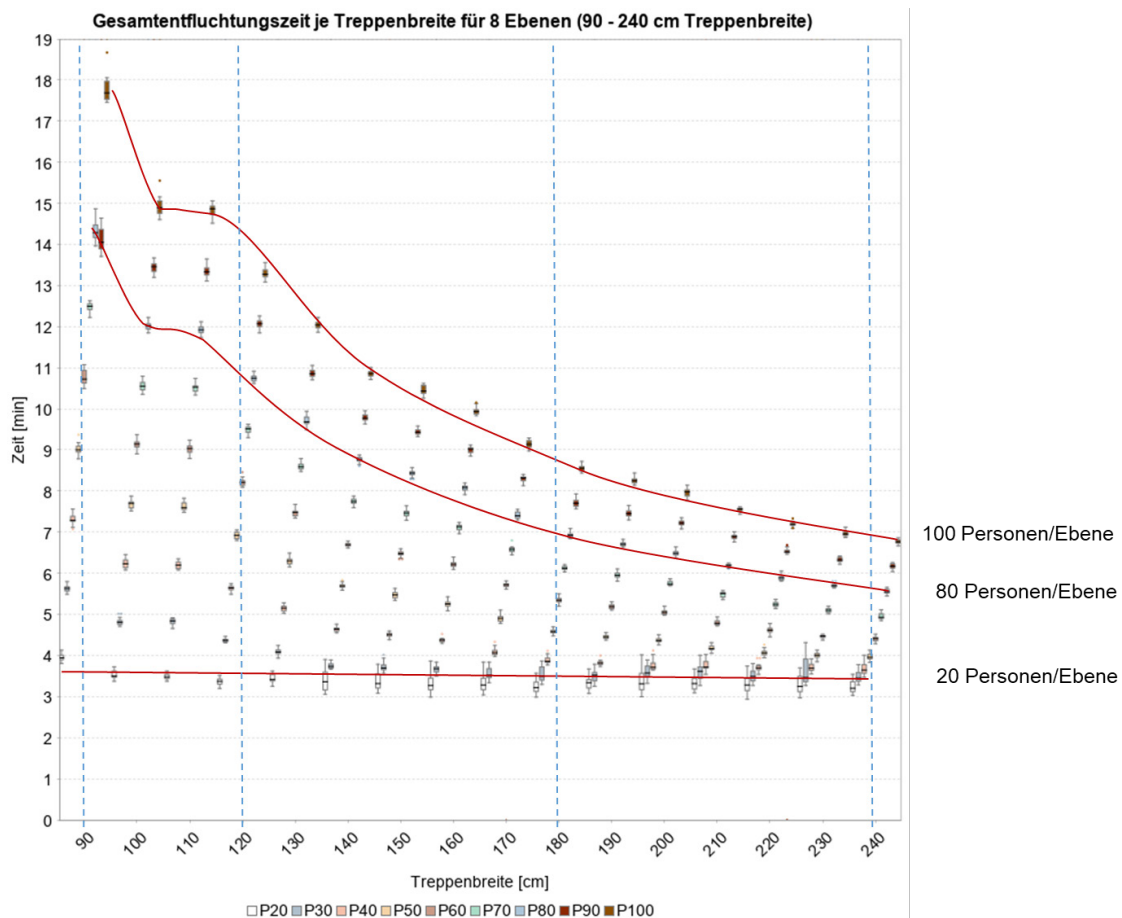
Gesamtanzahl Personen pro Ebene	Anzahl Personen im Bürotrakt	Anzahl Personen im Schulungsraum
20	10	10
30	15	15
40	20	20
50	24	26
60	24	36
70	24	46
80	24	56
90	24	66
100	24	76

A2 Ergebnisse

Um die Ergebnisse der vielen Varianten übersichtlich darzustellen, wird auf unterschiedliche Darstellungsarten zurückgegriffen, z. B. mit Boxplots, Liniendiagrammen und Tabellen.

A2.1 Gesamtentfluchtungszeit in Abhängigkeit von Treppenbreite und Personenzahl für die jeweilige Anzahl Ebenen

Der Boxplot zeigt, dass für geringe Personenbelegung von 20 Personen pro Ebene die Treppenbreite keinen Einfluss hat. Je mehr Personen sich pro Ebene befinden, desto stärker wächst die Gesamtentfluchtungszeit bei gleichbleibender Treppenbreite an (crowd:it). Zur Veranschaulichung dieses Effekts wurden Näherungskurven für ausgewählte Personenbelegung pro Ebene eingetragen. Es ist ein deutlicher Anstieg erkennbar, insbesondere bei sehr geringen Treppenbreiten <1,20 m und gleichzeitig sehr hoher Personenbelegung pro Ebene. Die Näherungskurven flachen ab, je breiter die Treppe wird. Der Sattelpunkt der Gerade zwischen 1,00 m und 1,10 m liegt an der Modellierung der Körpergrößen in (crowd:it) und ist über alle Belegungen hinweg sichtbar: Bei einer Treppenbreite bis 0,90 m können sich die Agenten nicht überholen, ab 1,00 m geht dies unter erschwerten Bedingungen, während ab 1,20 m zwei Agenten nebeneinander auf der Treppe Platz finden.



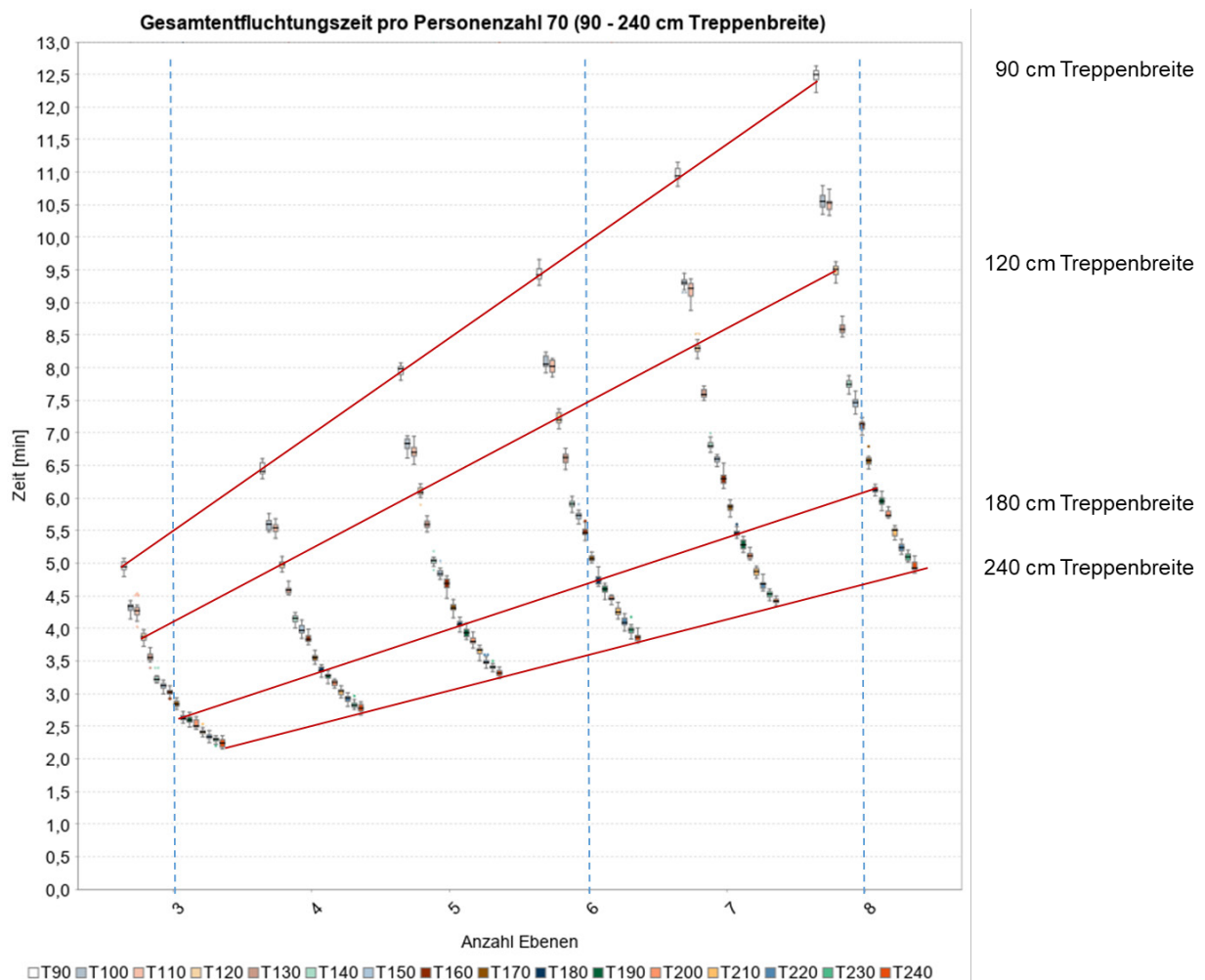
Anh. 2, Abb. 5 Boxplot Gesamtentfluchtungszeit abhängig von Personenzahl und Treppenbreite für 8 Ebenen. (crowd:it)

Hinweis zur grafischen Darstellung:

Die Boxplots sind nicht senkrecht über den jeweiligen Treppenbreiten angeordnet, sondern rechts und links davon in gleichmäßigen Abständen bei allen Treppenbreiten verteilt. Das dient der besseren Darstellung der Boxplots, wenn diese sehr dicht zusammenliegen. Das wird besonders in der nächsten Anh. 2, Abb. 6 deutlich.

A2.2 Gesamtentfluchtungszeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Ebenen und der Treppenbreite für die jeweilige Anzahl Personen pro Ebene

Die Boxplots über die Gesamtentfluchtungszeit in Abhängigkeit der Ebenenanzahl lässt bei gleichbleibender Treppenbreite (hier im Beispiel für 70 Personen) einen linearen Zusammenhang erkennen. Dieser lineare Zusammenhang lässt – wie in Anh. 2, Tab. 4 noch konkret angegeben – darauf schließen, dass die Anzahl der Ebenen die Entfluchtungszeit nicht überproportional ansteigen lässt, sondern die längere Entfluchtungszeit über die längeren Wegstrecken erklärt werden kann.



Anh. 2, Abb. 6 Boxplot für die Gesamtentfluchtungszeit bei Variation der Anzahl der Ebenen für 70 Personen pro Ebene. (crowd:it)

A2.3 Entfluchtungszeiten einzelner Ebenen in Abhängigkeit von der Treppenbreite und der Anzahl Personen pro Ebene

Die Entleerung einzelner Ebenen sowie die Gesamtentfluchtungszeit des Gebäudes werden in Anh. 2, Abb. 7 und 8 im Graphen abgebildet. Hieraus wird die Unabhängigkeit der Entfluchtung je Ebene erkennbar. Während bis zu einer bestimmten Personenzahl je Ebene die Entfluchtungskurven entweder übereinander oder dicht zusammenliegen, fächern sie sich ab einer bestimmten Personenzahl auf und wachsen dann im Regelfall parallel zueinander an, d. h. es bildet sich auf den jeweiligen Ebenen ein Stau aus. Exemplarisch sind in den folgenden Abbildungen die Entfluchtungszeiten für eine Treppenbreite von 1,20 m sowie 3, 6, und 8 Ebenen abgebildet.

Die crowd:it Simulationen (Anh. 2, Abb. 7) zeigen unabhängig von der Ebenenanzahl jeweils bis 40 Personen keine Veränderung der Entfluchtungszeit pro Ebene. Bei 50 Personen beginnt sich die Entfluchtungskurven der Ebenen aufzufächern um dann mehr oder weniger parallel zu verlaufen. Die Kreuzung der einzelnen Entfluchtungskurven nach Auffächerung lässt sich wie folgt erklären. Es ist nicht immer eindeutig, welche Ebene zu welchem Zeitpunkt geleert ist. In Abhängigkeit der Personenzusammensetzung und der zufallsbedingten Verteilung im Schulungsraum ist die eine oder andere Ebene schneller entleert.

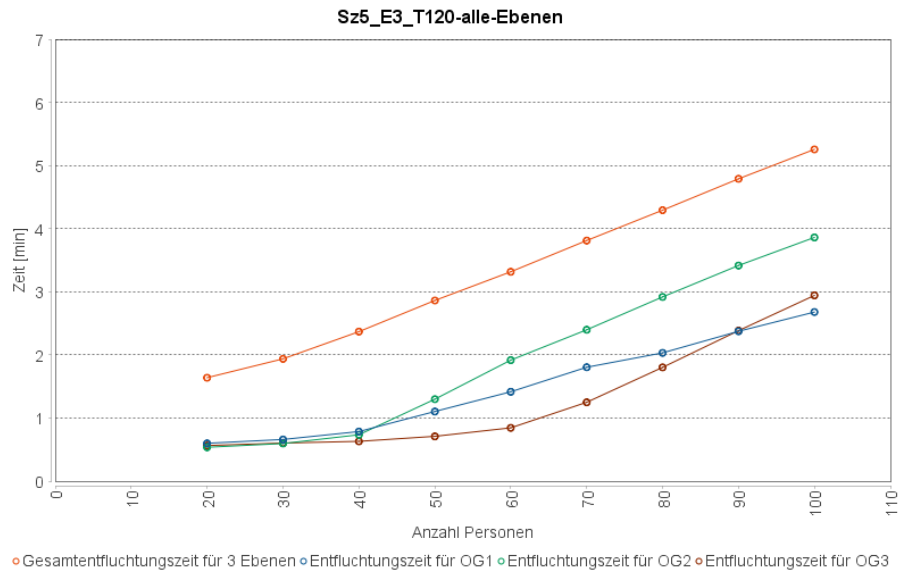
Die ASERI-Simulationen (Anh. 2, Abb. 8) zeigen ebenfalls die stete Zunahme der Entfluchtungszeiten im Gebäude bei Steigerung der Personenzahl. Die Abbildung zeigt die jeweils mittlere maximale Entfluchtungszeit über alle Simulationsläufe in Abhängigkeit von der Personenanzahl pro Ebene für jede Ebene und für das gesamte Gebäude.

Die Zeiten, die für das Passieren der Treppen benötigt werden, steigen von ca. 1,5 Minuten für 10 Personen pro Ebene („freie Bahn“) auf ca. 2 Minuten bei einer Belegung von 100 Personen pro Ebene. Diese relativ geringe Zunahme der Passagezeit im Treppenraum liegt daran, dass sich die Treppenhäuser bis zur Maximalkapazität füllen (bei ASERI ist dies bei ca. 50 Personen pro Ebene, bei crowd:it bei ca. 40 Personen pro Ebene) und sich in der Folge ein steter Personenfluss ausbildet. Daher erhöht sich die Passagezeit nicht wesentlich, die Stauzeit auf den Ebenen hingegen nimmt zu. (vgl. z. B. Anh. 2, Abb. 8b).

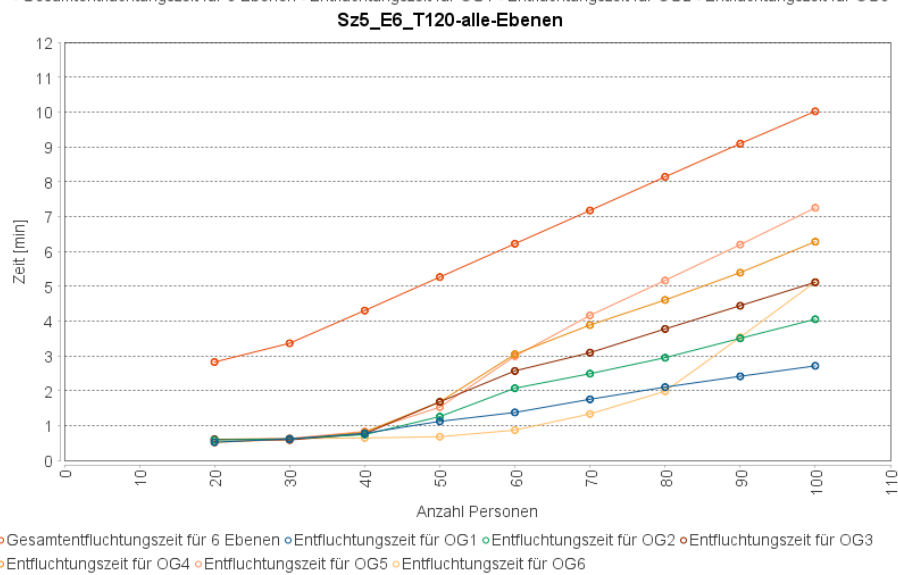
Die Unterschiede des Zeitpunkts der Auffächerung lassen sich mit den unterschiedlichen Modellansätzen der beiden Simulationsprogramme erklären (siehe Abschnitt 3 des Fachgutachtens). Während in ASERI für den in diesen Untersuchungen benutzten Standardparametersatz eher zur unteren Grenze der Bandbreite der Entfluchtungszeiten tendiert, liegen die Ergebnisse von crowd:it eher im mittleren bis oberen Bereich der Bandbreite. Um diese Aussagen zu belegen, wurde ein makroskopisches Modell zum Einsatz gebracht, mit dem ebenfalls das Szenario durchgerechnet wurde. Um spezifische Parameter in der Kapazitätsanalyse zu setzen, können sowohl bestimmte Personendichten angenommen als auch bestimmte Flussraten gesetzt werden. Je nach Wahl dieser Parameter resultieren die Zeiten in Anh. 2, Abb. 9a bzw. 9b. Die Details und die Vorgehensweise der Kapazitätsanalyse sind in Abschnitt 1.3 ausführlich erläutert.

Vergleicht man nun diese Ergebnisse der Kapazitätsanalyse mit den Ergebnissen der mikroskopischen Simulationen der Programme ASERI und crowd:it, so wird deutlich, dass die errechneten Entfluchtungszeiten von ASERI eher den Werten aus Anh. 2, Abb. 9a entsprechen (vgl. Anh. 2, Abb. 8c bzw. Anh. 2, Abb. 10c, Wert für 50 Personen bei 1,20 m ca. 1 Minute) und die Entfluchtungszeiten von crowd:it (vgl. Anh. 2, Abb. 7c, Wert für 50 Personen und 1,20 m ca. 2 Minuten) zwischen denen aus Anh. 2, Abb. 9a (Wert für 50 Personen und 1,20 m etwas über 1 Minute) und Anh. 2, Abb. 9b (Wert für 50 Personen und 1,20 m etwas unter 3 Minuten) liegen. Bei den Übergängen in den Belegungszahlen (ab 40 bzw. 50 Personen pro Ebene) ist daher zu empfehlen, im Einzelfall mithilfe von Ingenieurmethoden des Brandschutzes zu ermitteln, inwieweit eine sichere Entfluchtung gegeben ist. Dazu müssen die speziellen Rahmenbedingungen (z. B. Personenbelegung, Populationsart, Reaktionszeit) für das zu betrachtende Szenario konkret gesetzt werden.

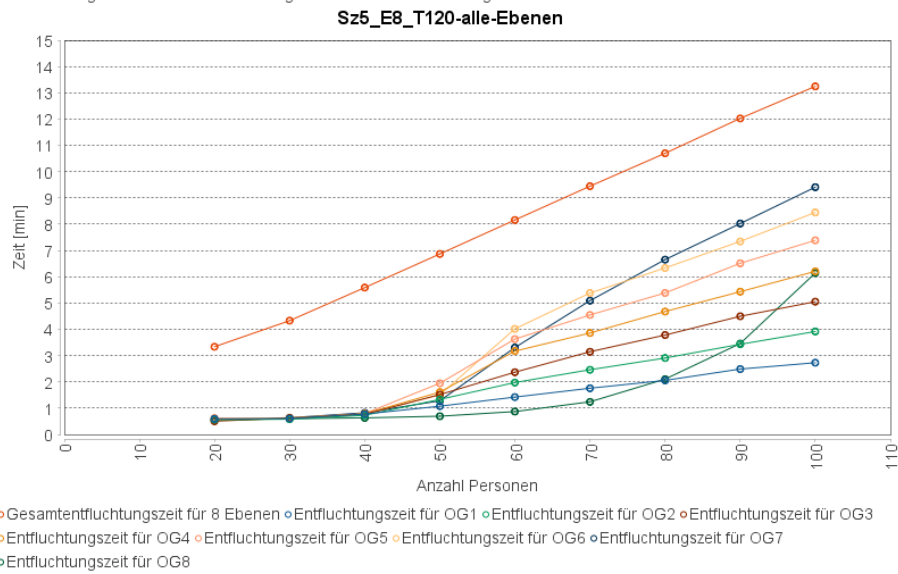
a



b

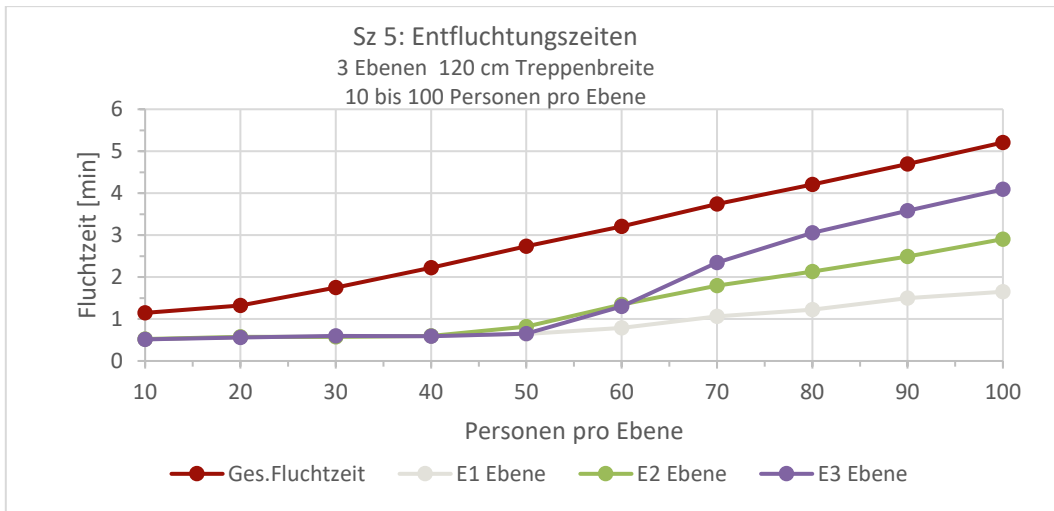


c

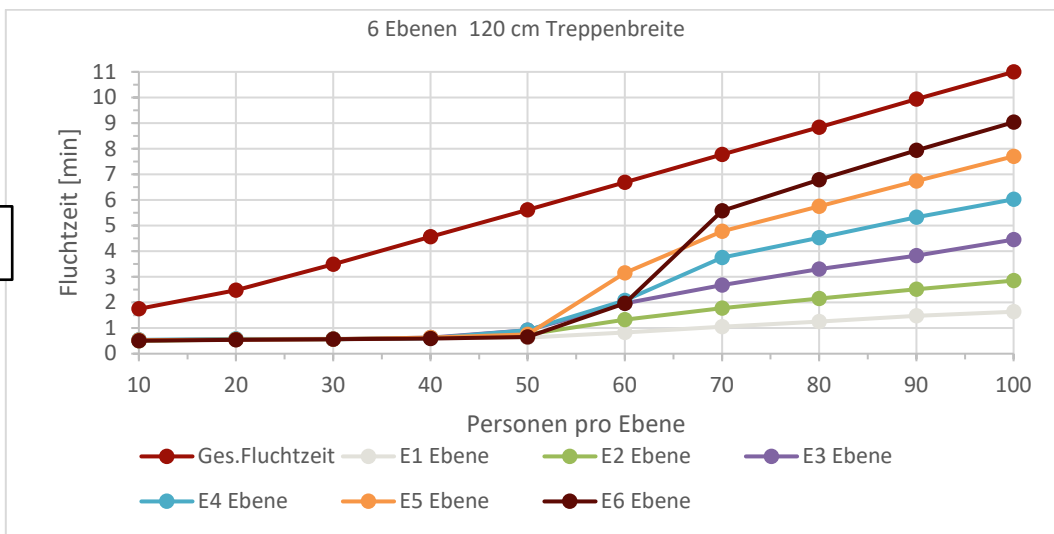


Anh. 2, Abb. 7 Entfluchtungszeit aus der Ebene für 3, 6 und 8 Ebenen bei 1,20 m Treppenbreite (crowd:it)

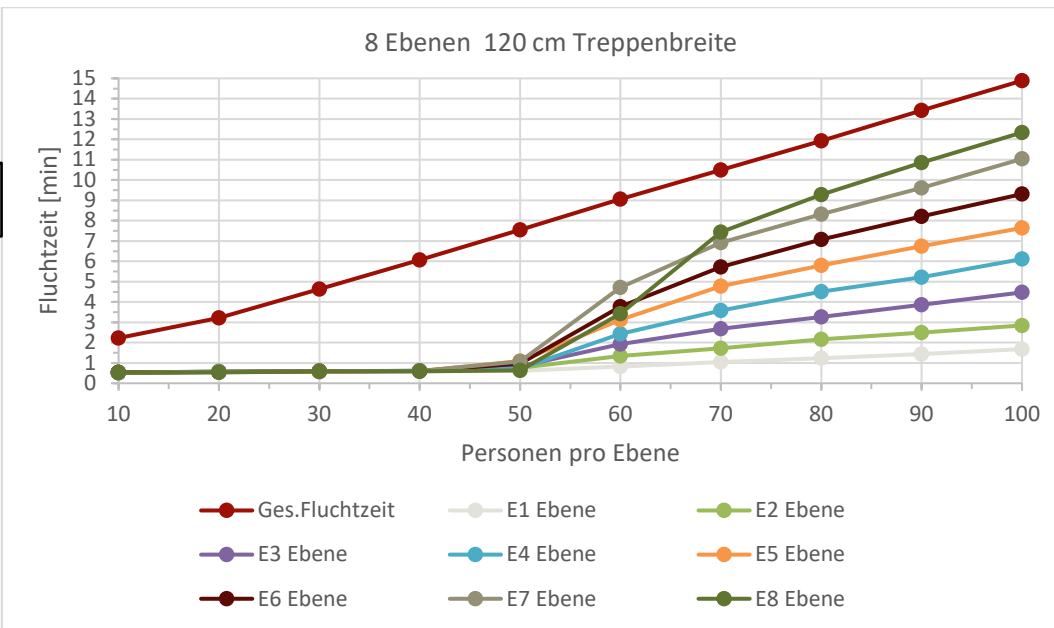
a



b

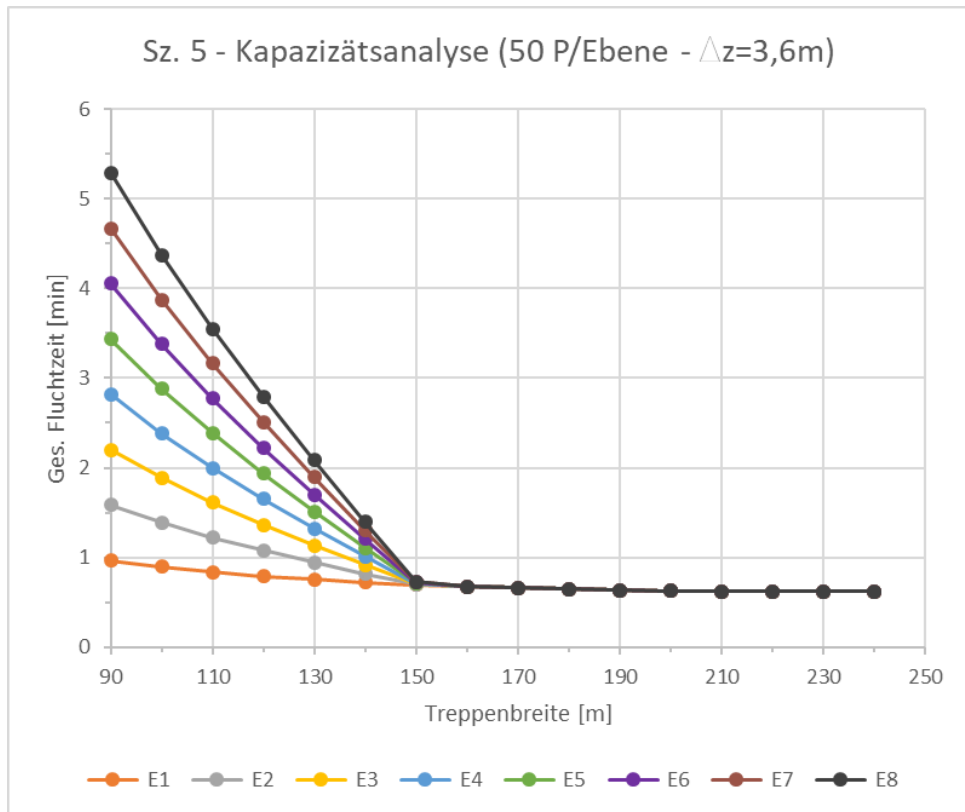


c

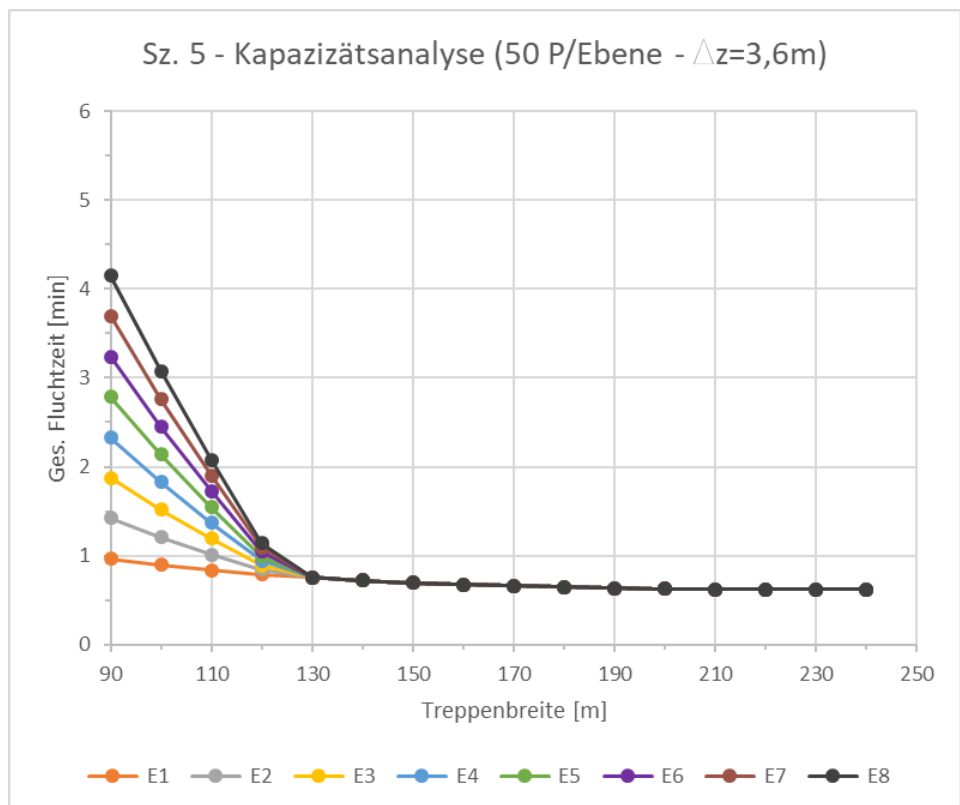


Anh. 2, Abb. 8 Mittlere maximale Entfluchtungszeiten aus der Ebene über alle Simulationsläufe für 3, 6 und 8 Ebenen bei 1,20 m Treppenbreite mit 10 bis 100 Personen pro Ebene (ASERI)

a



b



Anh. 2, Abb. 9 Entleerung von 8 Ebenen nach dem Kapazitätsmodell mit a) LOS G „mäßiges Gedränge“ und b) LOS F „dichter Verkehr“ (LOS = Level of Service) bei einem Ebenenabstand/Geschosshöhe von 3,60 m

A2.4 Entfluchtungszeiten aus den Ebenen in Abhängigkeit von der Anzahl Ebenen

Um die Entfluchtungszeit in Abhängigkeit der Anzahl Ebenen zu untersuchen, wurden die Simulationsergebnisse wie folgt ausgewertet:

Für jede Ebenenanzahl (3, 4...8) wurden in Kombination mit der jeweiligen Personenbelegung (10, 20...100) pro Ebene und für jede Treppenbreite 20 Simulationsläufe ausgeführt. Pro Simulationslauf gibt es einen Agenten, der als letzter die Ebene verlässt und für diesen Fall die maximale Entfluchtungszeit benötigt. Aus den so ermittelten 20 maximalen Entfluchtungszeiten wird dann der Mittelwert gebildet. Dieser Wert wird für alle Treppenbreiten ermittelt. Nun wird die Treppenbreite mit dem höchsten Wert nach diesem Verfahren ausgewählt und im Gutachten diese Zeit als „mittlere maximale Entfluchtungszeiten“ bezeichnet. Typischerweise ist dies der Wert für die geringste Treppenbreite (d. h. hier 0,90 m). In wenigen Fällen kann dies für einzelne Ebenen auch eine größere Treppenbreite sein, da die im Treppenraum befindlichen Personen dort tendenziell andere Bewegungsmuster bevorzugen. Dadurch können die Entfluchtungszeiten aus der Ebene für breitere Treppenräume auch länger ausfallen. Damit sind die Tabellen Anh. 2, Tab. 4 und 5 unabhängig von der Treppenbreite.

Bei einer Belegung von bis zu 50 Personen/Ebene liegen diese „mittleren maximalen Entfluchtungszeiten“ ins Treppenhaus in allen Ebenen durchgängig unter einer Minute (ASERI). Dies entspricht den Erwartungen bei einer ungestört zurückgelegten Fluchtweglänge von max. 35 m und einer individuellen Geschwindigkeit im unteren Bereich der Geschwindigkeitsverteilung (siehe Abb. 3.1).

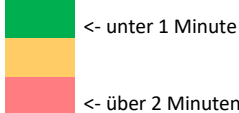
Steigt die Belegung über 50 Personen/Ebene, beeinflussen sich die Personen gegenseitig stärker, sodass es zu ersten Verzögerungen insbesondere im Treppenraum kommt. Ab etwa 60 Personen/Ebene wird die Aufnahmekapazität des Treppenraums erreicht, was zunehmende Wartezeiten und einen Stau in die Ebene hinein zur Folge hat.

Dieser Übergang erfolgt für alle Variationen von Ebenen (3 bis 8 Ebenen) bei ca. 60 Personen/Ebene, wie sich aus Anh. 2, Tab. 4 und 5 ablesen lässt.

Trotz stetig steigender Gesamtentfluchtungszeit (siehe Abschnitt A2.2) ändert sich die Entfluchtungszeit aus den Ebenen zunächst kaum (grüne Felder). Ab einer Belegung von 50 Personen/Ebene verlängert sich die Zeit für die Entfluchtung der Ebenen unabhängig von der Ebenenanzahl auf mehr als 2 Minuten (rote Felder). Die Anzahl der gelben Felder, die den Übergangsbereich zwischen 1 und 2 Minuten darstellen, ist gering, was einen recht abgegrenzten Trennbereich unterstreicht.

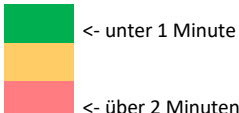
Anh. 2, Tab. 4 Mittlere maximale Entfluchtungszeit der einzelnen Ebenen für 3 bis 5 Ebenen in Abhängigkeit von der Anzahl der Personen pro Ebene (2. Spalte) in Minuten (ASERI) für jeweils ungünstigste Treppenbreiten

Ebenen	Pers./Ebene	E1	E2	E3
3	10	0,5	0,6	0,5
3	20	0,6	0,6	0,6
3	30	0,6	0,6	0,6
3	40	0,6	0,7	0,6
3	50	0,8	1,1	1,4
3	60	1,0	1,7	2,4
3	70	1,2	2,1	2,9
3	80	1,4	2,5	3,4
3	90	1,7	2,8	3,9
3	100	1,9	3,2	4,4



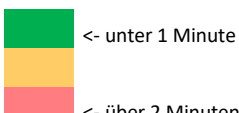
<- unter 1 Minute
<- über 2 Minuten

Ebenen	Pers./Ebene	E1	E2	E3	E4
4	10	0,5	0,6	0,6	0,5
4	20	0,6	0,6	0,6	0,6
4	30	0,6	0,6	0,6	0,6
4	40	0,6	0,7	0,7	0,6
4	50	0,7	1,3	1,6	2,0
4	60	1,0	1,7	2,5	3,2
4	70	1,2	2,1	3,0	3,9
4	80	1,4	2,5	3,6	4,6
4	90	1,6	2,8	4,2	5,3
4	100	1,8	3,2	4,7	6,0



<- unter 1 Minute
<- über 2 Minuten

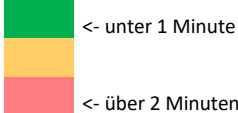
Ebenen	Pers./Ebene	E1	E2	E3	E4	E5
5	10	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6
5	20	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
5	30	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
5	40	0,6	0,7	0,6	0,8	0,6
5	50	0,8	1,1	1,8	2,3	2,0
5	60	1,0	1,7	2,5	3,3	4,0
5	70	1,2	2,1	3,1	4,0	4,9
5	80	1,4	2,5	3,6	4,8	5,8
5	90	1,6	2,9	4,1	5,5	6,7
5	100	1,9	3,2	4,7	6,3	7,6



<- unter 1 Minute
<- über 2 Minuten

Anh. 2, Tab. 5 Mittlere maximale Entfluchtungszeit der einzelnen Ebenen für 6 bis 8 Ebenen in Abhängigkeit von der Anzahl der Personen pro Ebene (2. Spalte) in Minuten (ASERI) für jeweils ungünstigste Treppenbreiten

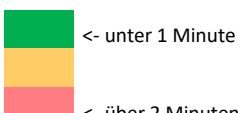
Ebenen	Pers./Ebene	E1	E2	E3	E4	E5	E6
6	10	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
6	20	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
6	30	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
6	40	0,6	0,7	0,8	0,7	0,9	0,6
6	50	0,8	1,2	1,8	2,1	2,7	2,4
6	60	1,0	1,7	2,5	3,3	4,1	4,8
6	70	1,2	2,1	3,0	4,0	5,0	5,9
6	80	1,4	2,5	3,6	4,8	6,0	7,0
6	90	1,6	2,8	4,1	5,5	6,9	8,1
6	100	1,9	3,2	4,7	6,2	7,9	9,2



<- unter 1 Minute

<- über 2 Minuten

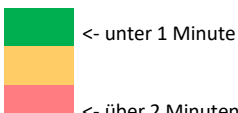
Ebenen	Pers./Ebene	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
7	10	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6
7	20	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
7	30	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
7	40	0,6	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,6
7	50	0,7	1,2	1,7	2,2	2,7	3,0	3,2
7	60	1,0	1,7	2,4	3,3	4,1	5,0	5,6
7	70	1,2	2,1	3,1	4,0	5,0	6,1	6,9
7	80	1,4	2,5	3,6	4,8	6,0	7,2	8,2
7	90	1,6	2,9	4,2	5,5	7,0	8,4	9,5
7	100	1,8	3,2	4,7	6,2	7,9	9,5	10,8



<- unter 1 Minute

<- über 2 Minuten

Ebenen	Pers./Ebene	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
8	10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5
8	20	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
8	30	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
8	40	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	0,6
8	50	0,8	1,2	1,7	2,0	2,6	3,5	3,6	3,4
8	60	1,0	1,7	2,5	3,3	4,1	4,8	5,7	6,5
8	70	1,2	2,1	3,1	4,0	5,0	6,0	7,1	8,0
8	80	1,4	2,4	3,6	4,7	6,0	7,2	8,4	9,5
8	90	1,6	2,8	4,2	5,5	6,9	8,4	9,8	11,0
8	100	1,9	3,2	4,7	6,2	7,9	9,4	11,1	12,4



<- unter 1 Minute

<- über 2 Minuten

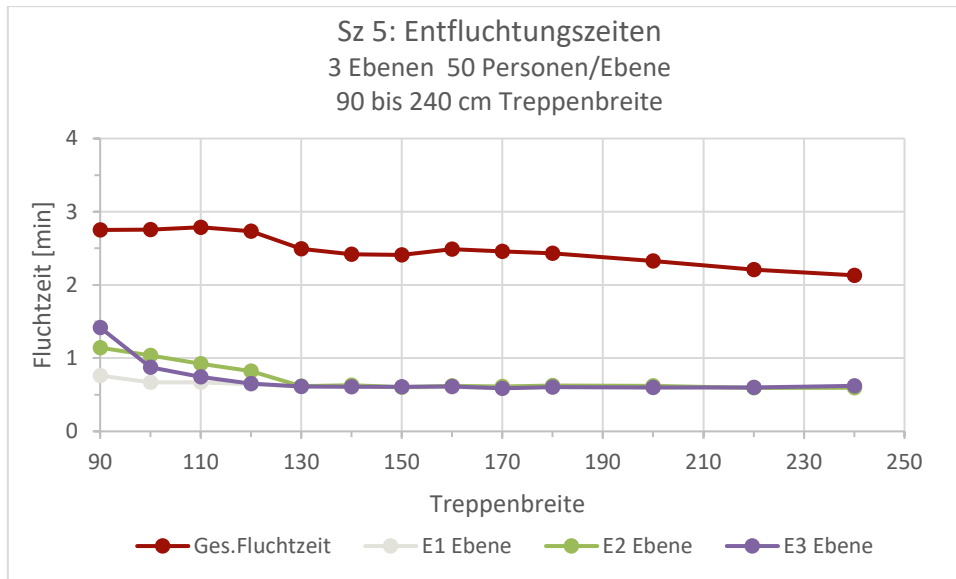
A2.5 Entfluchtungszeiten aus den Ebenen in Abhängigkeit von der Treppenbreite bei steigender Anzahl Ebenen

Die Abhängigkeit der Entfluchtungszeiten aus den Ebenen von der Treppenbreite bei steigender Anzahl Ebenen (und somit auch steigender Anzahl Personen im Gebäude) zeigt Anh. 2, Abb. 10 beispielhaft für den festgestellten Übergangsbereich von 50 Personen pro Ebene. Bei zunehmender Gesamtentfluchtungszeit des Gebäudes (etwa 3 Minuten für 3 Ebenen über 5 Minuten bei 6 Ebenen bis zu 7 Minuten bei 8 Ebenen) verbleibt bei 50 Personen pro Ebene die Entfluchtungszeit aus den Ebenen für Treppenbreiten ab 1,30 m (und größer) konstant unter einer Minute. Erst bei Treppenbreiten unter 1,30 m ergibt sich eine starke Zunahme der Entfluchtungszeiten der Ebenen, was eine signifikante Verzögerung mit Staubbildung auf den Ebenen mit sich bringt.

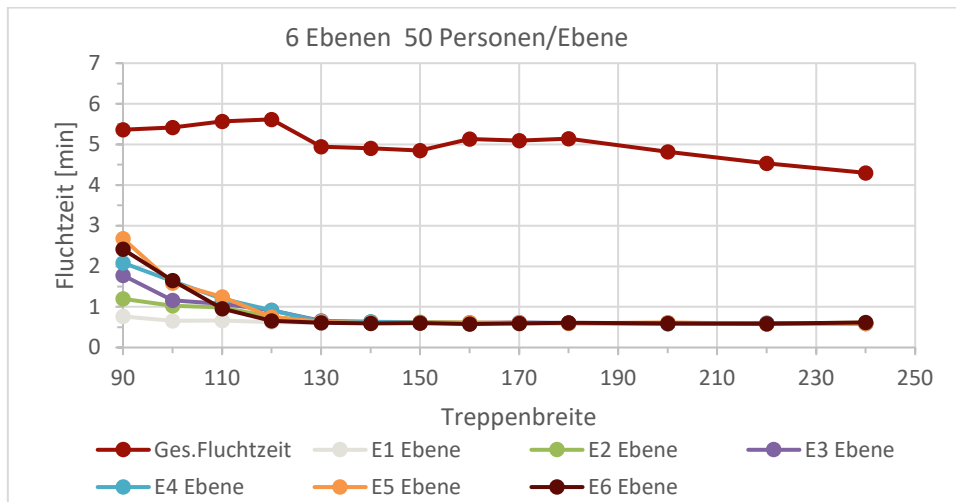
Dieses Muster ändert sich auch nicht, wenn die Geschosshöhe variiert wird. Um Extremfälle mit einzubeziehen, wurden exemplarisch Simulationen für 2,70 m Geschosshöhe als Untergrenze sowie 4,50 m Geschosshöhe als oberer Wert durchgeführt – also ein 0,90 m geringerer und ein 0,90 m höherer Ebenenabstand zum bisher diskutierten Referenzszenario. Die Ergebnisse (siehe Anh. 2, Abb. 11 und 12) zeigen, dass sich die Entfluchtungskurven aller Ebenen ab 1,30 m Treppenbreite vereinen. Die Geschosshöhe hat somit ab einer Treppenbreite von $\geq 1,30$ m und der hier betrachteten Belegung von 50 Personen pro Ebene keinen signifikanten Einfluss auf die Entfluchtungszeiten. Bei Treppenbreiten kleiner 1,30 m hat die Geschosshöhe aber einen Einfluss darauf, wie stark die Entfluchtungszeit einzelner Ebenen ansteigt. Geringere Geschosshöhen führen hier zu deutlich höheren Entfluchtungszeiten aus einzelnen Ebenen.

Ab 1,80 m Treppenbreite fällt die Gesamtentfluchtungszeit aus dem Gebäude durch die Möglichkeiten des Überholens langsamer Personen wegen des freien Platzes auf der Treppe und den Podesten mit zunehmender Breite stetig. Bei schmalen Treppen (0,90 m bis 1,20 m) ist das aneinander Vorbeigehen jedoch beschränkt und die Bewegung an den Stellen des Richtungswechsels vor und auf den Podesten nur eingeschränkt möglich, sodass der Durchsatz durch den gesamten Treppenraum insgesamt nur wenig variiert. Die Gesamtentfluchtungszeiten und der Effekt von Treppenbreiten auf die Gesamtentfluchtungszeit wurden in Szenario 2 (Abschnitt 4.2.3) untersucht und beschrieben.

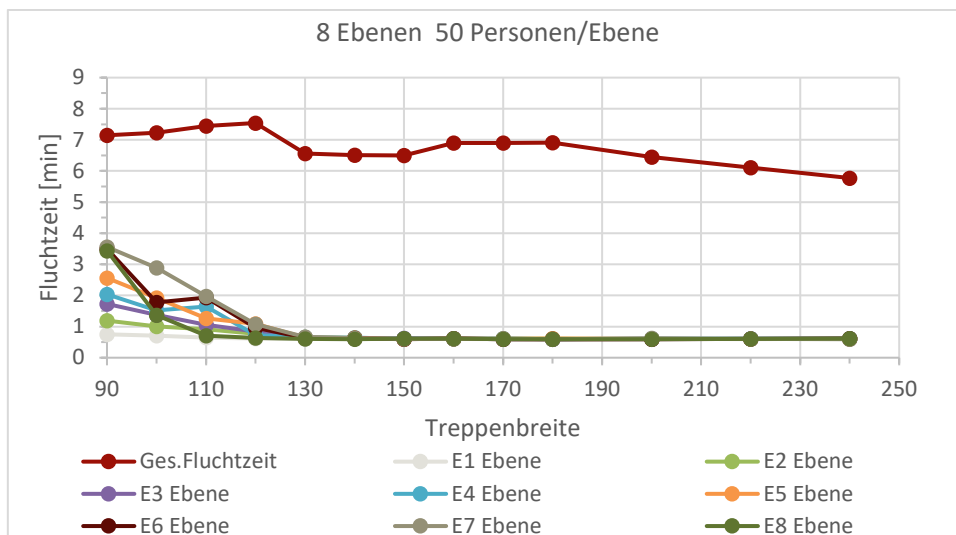
a



b

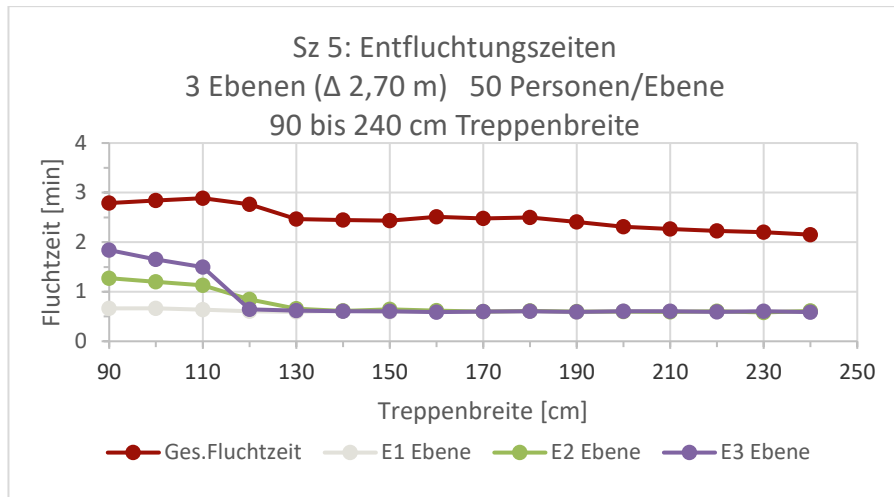


c



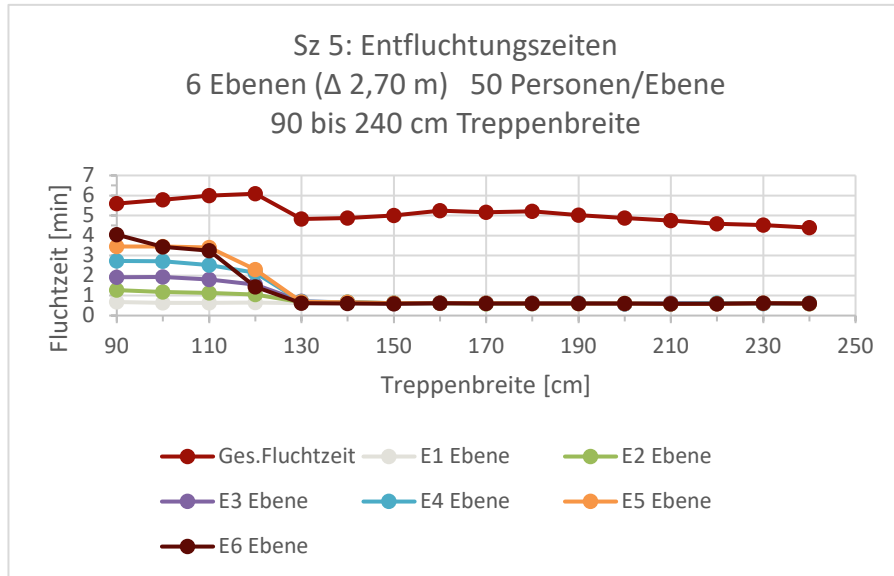
Anh. 2, Abb. 10 Mittlere maximale Entfluchtungszeiten über alle Simulationsläufe für 3, 6 und 8 Ebenen für 50 Personen/Ebene bei Treppenbreiten von 0,90 m bis 2,40 m und 3,60 m Geschosshöhe (ASERI)

a

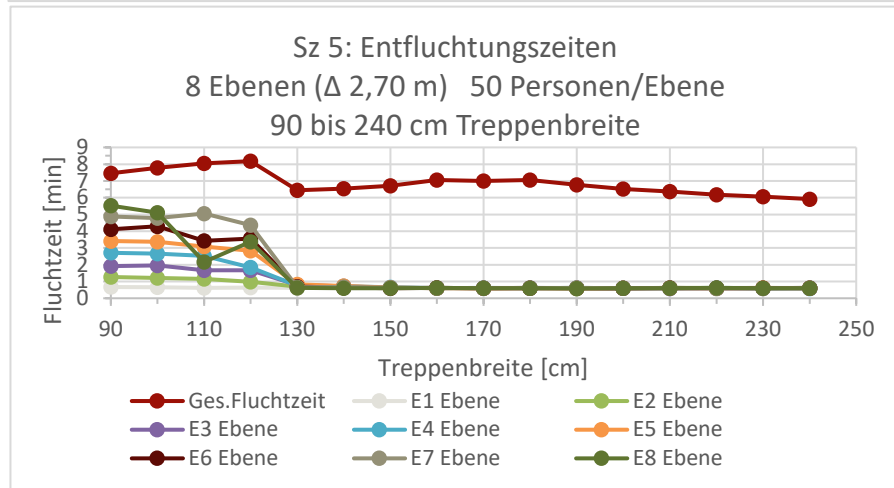


4.4.1

b

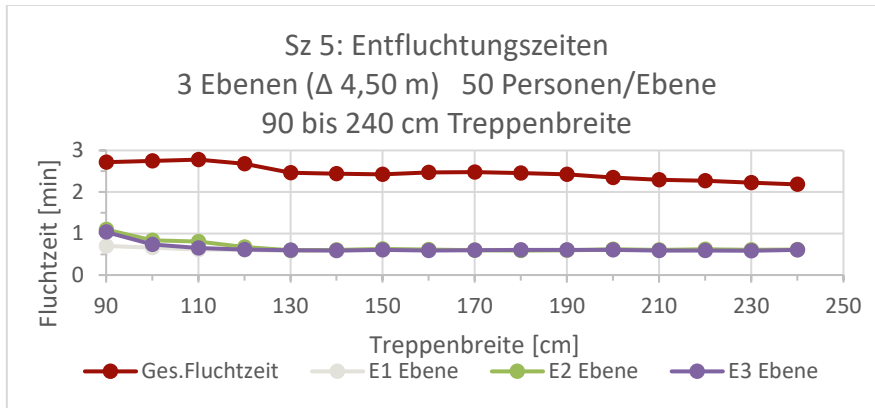


c

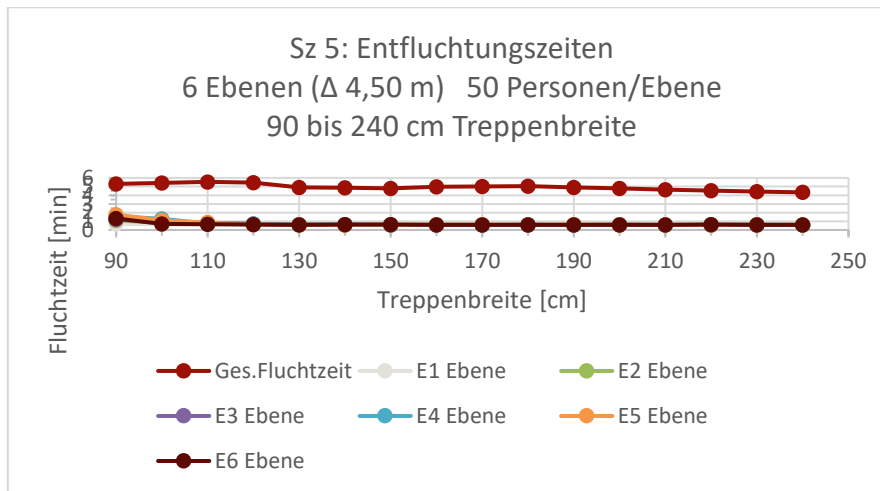


Anh. 2, Abb. 11 Entfluchtungszeiten in Abhängigkeit der Treppenbreite bei steigender Anzahl Ebenen bei verringertem Ebenenabstand (Geschosshöhe 2,70 m statt 3,60 m) (ASERI)

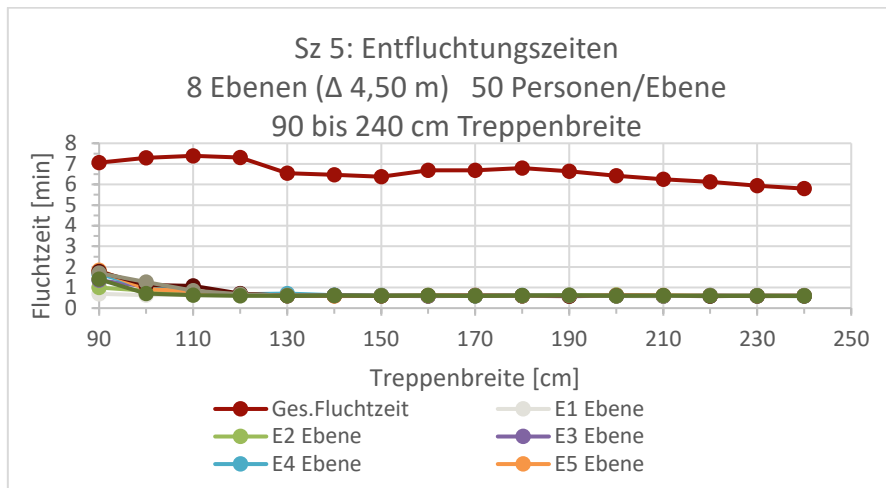
a



b



c



Anh. 2, Abb. 12 Entfluchtungszeiten in Abhängigkeit der Treppenbreite bei steigender Anzahl Ebenen bei vergrößertem Ebenenabstand (Geschosshöhe 4,50 m statt 3,60 m) (ASERI)

A2.6 Entfluchtungszeiten in Abhängigkeit von Treppenbreite, Anzahl Personen pro Ebene und Anzahl Ebenen

Um die analysierten Ergebnisse in einer Form darzustellen, aus der eine Aussage zur Treppenbreite getroffen werden kann, wurde Anh. 2, Abb. 10 sowie Anh. 2, Tab. 7 und 8 als kompakte Zusammenfassung erarbeitet. Hier werden die maximalen Entfluchtungszeiten je Ebene für jede Kombination von Anzahl Personen pro Ebene (Zeilen) und Treppenbreite (Spalte) nach folgendem Schema eingefärbt:

- grün für Entfluchtungszeiten unter einer Minute
(unabhängige Räumung aller Ebenen)
- gelb für den Übergangsbereich mit Wartezeiten bis zu zwei Minuten
- rot für (schnell steigende) Wartezeiten oberhalb von zwei Minuten

Als ein Maß zur Bewertung haben wir eine akzeptable Wartezeit in den Räumen der Ebenen (hier insbesondere den Schulungsraum) angesetzt, der mit der bauordnungsrechtlich motivierten Zeit von 2 Minuten gewählt wurde (siehe Diskussion bzgl. Versammlungsstätten in Abschnitt 4.2.5.1).

Erkennbar ist über alle Gebäude mit 3 bis 8 Ebenen hinweg, eine recht scharfe Trennung der Bereiche mit einem klein ausfallenden Übergangsbereich, der sich in der Lage der Trennlinie nicht markant unterscheidet und daher als unabhängig von der Anzahl der Ebenen festgehalten werden kann.

Damit eröffnet sich für die Festlegung der notwendigen Treppenbreiten in Abhängigkeit von der den Ebenen zugeordneten Personenzahl eine klare Bestimmungsgrundlage, die für die in die Modellierung eingegangenen Rahmenbedingungen:

- Ebenen mit max. 35 m Fluchtwegslänge,
- Türen aus den Nutzungsbereichen, die in der Breite den Treppenbreiten entsprechen (Schulungsraum) bzw. der Personenzahl angemessen ist (Bürotrakt),
- Nutzung eines zugeordneten Treppenraums und
- für alle Personen erfolgt die Aufnahme der Entfluchtung mit der Alarmierung (keine unterschiedlichen Reaktionszeiten oder Handlungsweisen)

einen auch praktisch handhabbaren, linearen Zusammenhang begründet.

Für die in Anh. 2, Abb. 10 bzw. Anh. 2, Tab. 7 und 8 in Gelb dargestellten Übergangsbereiche empfehlen wir in der Praxis anhand der spezifischen Rahmenbedingungen des Gebäudes, der Geometrie, der Belegungszahl pro Stockwerk und Population vorzugehen. Hier kann mithilfe von Ingenieurmethoden des Brandschutzes auf individuelle Besonderheiten eingegangen werden und so spezifische Ergebnisse ermittelt werden.

Anh. 2, Tab. 6 Zusammenstellung der Entfluchtungszeit aus der Ebene für alle berechneten Kombinationen der Ebenen und Treppenbreiten (crowd:it)

		Treppenbreite [cm]															
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
Anzahl Personen pro Ebene	Ebenen: 3																
	20																
	30																
	40																
	50																
	60																
	70																
	80																
	90																
	100																

		Treppenbreite [cm]															
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
Anzahl Personen pro Ebene	Ebenen: 6																
	20																
	30																
	40																
	50																
	60																
	70																
	80																
	90																
	100																

		Treppenbreite [cm]															
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
Anzahl Personen pro Ebene	Ebenen: 8																
	20																
	30																
	40																
	50																
	60																
	70																
	80																
	90																
	100																

- < 60 Sekunden Entfluchtungszeit pro Ebene
- ≤ 120 Sekunden Entfluchtungszeit pro Ebene
- > 120 Sekunden Entfluchtungszeit pro Ebene

Anh. 2, Tab. 7 Mittlere maximale Entfluchtungszeit aus der Ebene über alle berechneten Treppenbreiten von 0,90 bis 2,40 m für die Ebenen 3, 6 und 8 (1. Spalte) und Anzahl der Personen pro Ebene (2. Spalte) in Minuten (ASERI)

Ebenen	Pers./Ebene	Treppenbreite [cm]												
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	200	220	240
3	10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5
3	20	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6
3	30	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
3	40	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
3	50	1,4	1,0	0,9	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
3	60	2,4	2,1	2,0	1,3	0,9	0,9	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
3	70	2,9	2,8	2,8	2,3	1,8	1,5	1,1	1,0	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6
3	80	3,4	3,3	3,3	3,1	2,4	2,2	2,0	1,6	1,4	1,2	0,9	0,8	0,7
3	90	3,9	3,8	3,9	3,6	3,0	2,9	2,7	2,4	2,3	1,5	1,1	1,0	0,9
3	100	4,4	4,4	4,4	4,1	3,5	3,3	3,2	3,1	2,9	2,3	1,5	1,3	1,1
6	10	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6
6	20	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
6	30	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
6	40	0,9	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
6	50	2,7	1,7	1,2	0,9	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
6	60	4,8	4,5	4,3	3,2	1,6	1,2	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
6	70	5,8	5,8	5,9	5,6	3,8	3,4	2,8	1,4	1,1	0,8	0,7	0,7	0,6
6	80	6,9	6,9	7,0	6,8	5,6	5,3	4,4	3,3	2,5	1,9	0,9	0,8	0,7
6	90	7,9	7,9	8,1	7,9	6,7	6,4	6,2	5,8	5,2	2,8	1,5	1,1	0,9
6	100	9,0	9,0	9,2	9,0	7,6	7,4	7,2	7,2	6,9	6,0	2,7	1,5	1,2
8	10	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6
8	20	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
8	30	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
8	40	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
8	50	3,6	2,9	2,0	1,1	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
8	60	6,5	5,9	5,6	4,7	1,7	1,3	0,9	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
8	70	7,9	7,9	8,0	7,4	5,6	3,8	2,8	1,8	1,3	0,9	0,7	0,7	0,6
8	80	9,2	9,3	9,5	9,3	7,7	6,6	6,3	5,6	3,1	1,8	0,9	0,8	0,7
8	90	10,6	10,7	11,0	10,9	9,1	8,7	8,5	7,5	7,2	4,9	1,7	1,1	0,9
8	100	12,0	12,1	12,4	12,3	10,4	10,1	9,9	10,0	9,5	7,6	4,6	1,8	1,2

A3 Entfluchtungszeiten in Abhängigkeit von der Treppenbreite bei steigender Anzahl Ebenen im makroskopischen Kapazitätsmodell

Die Kapazitätsanalyse ist ein makroskopischer Ansatz zur Abschätzung des Zeitaufwands t_{Bewegung} für die Bewegung eines Personenstroms entlang eines festgelegten Weges – hier die Fluchtzeiten. Voraussetzung für die Anwendung der Methode ist das Vorhandensein einer charakteristischen Engstelle (Ausgang, Treppe oder Flur), für welche ein mittlerer spezifischer Personenstrom $[F_s]$ angegeben werden kann. Damit erhält man für eine gegebene Gesamtpersonenzahl $[P]$ die Passagezeit für diese Engstelle, wie u. a. der vfdb-Leitfaden [1] das Vorgehen beschreibt.

Im vorliegenden Szenario 5 liegen folgende Randbedingungen vor:

- Es gibt nur einen Treppenraum mit Treppen variabler Breite $[B]$.
- Die Zugänge zum Treppenraum aus den einzelnen Ebenen sind mit der Treppenbreite in der Weise korreliert, dass der Treppenraum die geometrische Randbedingung darstellt, die den mittleren Personenstrom begrenzt.
- Alle Ebenen sind mit der gleichen Personenanzahl belegt.

Die Engstelle für die Bestimmung der Passagezeit ist daher der Zugang zu dem Treppenabschnitt, der von der 1. Ebene zum Absatz zwischen 1. Ebene und Erdgeschoss führt. Dieser muss von allen Personen passiert werden.

Wendet man die Methode der Kapazitätsanalyse auf diese Engstelle an, lässt sich sowohl die Gesamtentfluchtungszeit bestimmen als auch die Entfluchtungszeit der einzelnen Ebenen angeben, wobei für letztere weitere Annahmen erforderlich sind.

Zunächst lassen sich mit Hilfe der Berechnungsparameter aus Anh. 2, Tab. 8 die Lauf- und Passagezeiten für die einzelnen Ebenen (bestehend aus Bürotrakt und Schulungsraum) bestimmen. Die Untergrenze für die Entfluchtung einer Ebene ergibt sich für die Situation, in der die Personen in den jeweiligen Ebenen ohne Behinderung durch schon im Treppenraum befindliche Personen diesen betreten können. In diesem Fall liefert das Maximum aus den beiden Größen „Passagezeit durch den Ausgang aus der Ebene in den Treppenraum“ und „Laufzeit für den längsten Weg bis zum Zugang Treppenraum“ die Entfluchtungszeit einer Ebene.

Anh. 2, Tab. 8 Berechnungsparameter für Kapazitätsanalysen (horizontale Geschwindigkeiten (v) und spezifischer Personenstrom (F_s)¹

Wegelement	Geschwindigkeit v	Personenstrom F_s
Treppe (moderate Auslastung)	0,6 m/s	0,8 P/(m s)
Treppe (optimale Auslastung)	0,5 m/s	1,0 P/(m s)
Korridor, Mundloch (moderate Auslastung)	1,0 m/s	1,0 P/(m s)
Korridor, Mundloch (optimale Auslastung)	0,6 m/s	1,3 P/(m s)
Ausgang, Türe (moderate Auslastung)	0,6 m/s	1,3 P/(m s)
Ausgang, Türe (optimale Auslastung)	0,6 m/s	1,3 P/(m s)

Die theoretische Obergrenze für die Entfluchtungszeit der Ebenen erhält man durch Einbeziehen der Engstelle Treppenraum. Unter der Annahme, dass sich sukzessive zuerst die untersten Ebenen entleeren (also zuerst Ebene 1 und zuletzt Ebene 8) kann die Obergrenze aus der Passagezeit für die Engstelle Treppenraum abgeschätzt werden. Im Grenzfall, dass sich die Verzögerung an der Engstelle Treppe unmittelbar auf den Zugang zum Treppenraum auswirkt, ergibt sich für die unterste Ebene eine Entfluchtungszeit, welche der Passagezeit für die Engstelle Treppe für die Anzahl der Personen pro Ebene entspricht. Für die folgenden Ebenen erhöht sich die Entfluchtungszeit sukzessive um diese Passagezeit (bei gleicher Personenzahl pro Ebene), abzüglich der Laufzeit im Treppenraum, bis die nächste untere Ebene erreicht ist (2 Treppenläufe und Treppenabsatz). So erhält man nach² für die Treppenbreite 0,90 m und 100 Personen pro Ebene einen spezifischen Personenstrom $F_s = 0,96 \text{ P/m/s}$ für Ebene 1 eine Obergrenze der Räumungszeit von 116 s, für die weiteren Ebenen (bei einer Laufzeit im Treppenraum zwischen den Ebenen von etwa 7 m und einer Geschwindigkeit von 0,5 m/s) eine sukzessive Erhöhung der Räumungszeit um $116 \text{ s} - 14 \text{ s} = 102 \text{ s}$. Für die 8. Ebene ergibt sich so eine Räumungszeit von 13 min 54 s.

Tatsächlich wirkt sich die Engstelle Treppenraum nicht unmittelbar auf die Zugänge zum Treppenraum aus, sondern ihre Wirkung wird durch das Auffüllen des Treppenraums und insbesondere durch die verfügbare Fläche des Podestes mit den Zugängen zum Bürotrakt und zu dem Schulungsraum gepuffert. In diesem Bereich zwischen den Ebenen findet eine Anzahl $[N]$ Personen Raum. Diese Anzahl lässt sich nicht im Rahmen dieses vereinfachten Ansatzes bestimmen, sondern muss extern vorgegeben werden. Für N wird gemäß² eine Personendichte im Treppenraum bzw. ein „Level Of Service“ (LOS) festgelegt. Die für die Abschätzung der Entfluchtungszeit der Ebenen über der ersten Ebene E1 anzusetzende Passagezeit im Treppenraum ergibt sich dann aus der Personenzahl pro Ebene.

¹ vfdb-Leitfaden „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“, 4. Auflage, vfdb TB 04-01, März 2020, Seite 341

² Weidmann, U.: Transporttechnik der Fussgänger, Schriftenreihe des IVT (Literaturstudie Nr. 90). Zürich: Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, ETH Zürich, 1993

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Entfluchtungszeiten für das Szenario 5 mit 8 Etagen und die beiden unterschiedlichen Etagenabstände $DZ = 2,70$ m (Anh. 2, Abb. 13) sowie für $DZ = 3,60$ m (Anh. 2, Abb. 9).

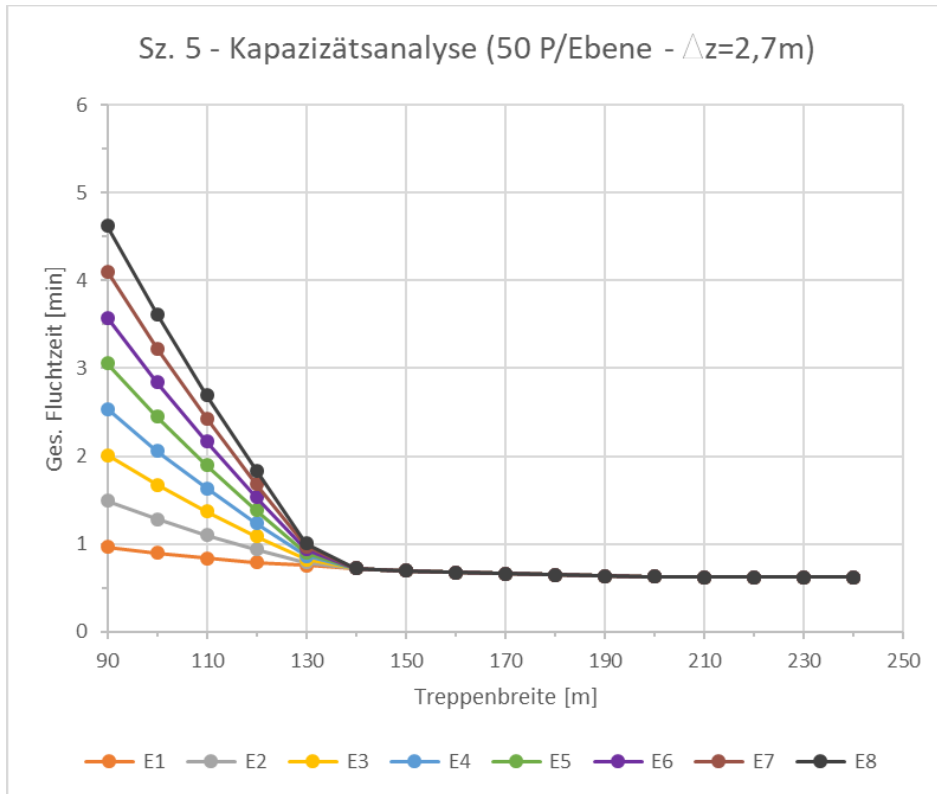
Der spezifische Personenstrom im Treppenraum wird in Abhängigkeit von der Treppenbreite [B] zwischen LOS G (entspricht „mäßigem Gedränge“ $F_s = 0,96$ P/m/s für 0,90 m Treppenbreite) und LOS D („mäßige Behinderung“ - $F_s = 0,56$ P/m/s für Treppenbreite 2,40 m) interpoliert².

Für N wird eine Parametrisierung proportional B^2 (wegen des Podestes mit Ausdehnung in Abhängigkeit von B) und \sqrt{DZ} angenommen, d. h.:

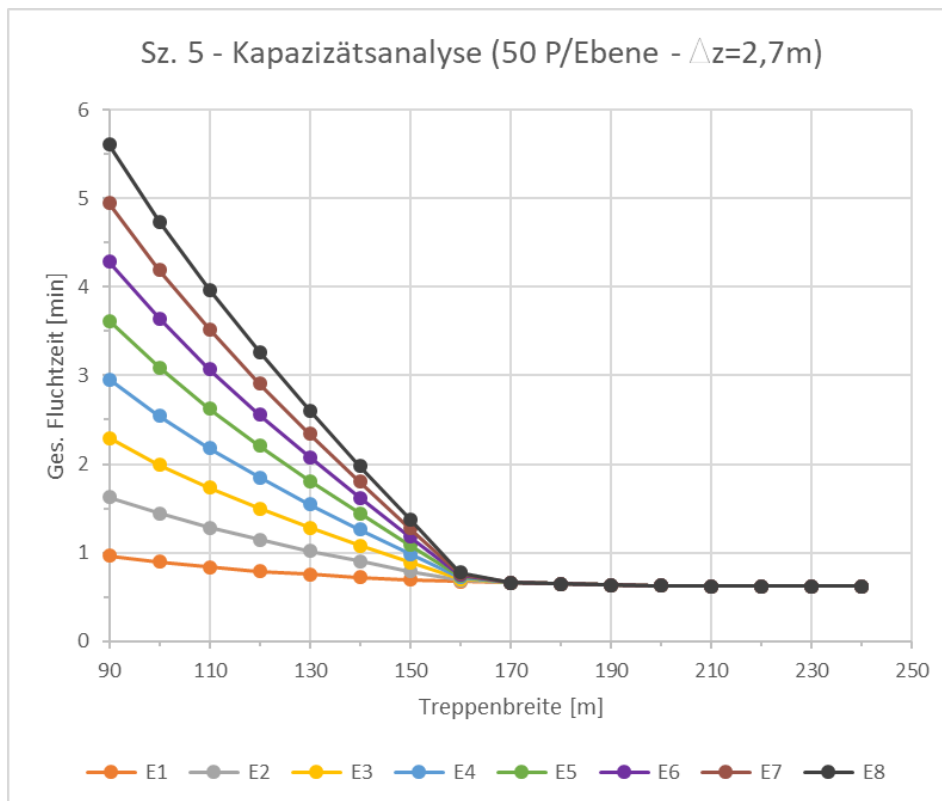
$$N = F \times B^2 \sqrt{(DZ / 2,7)}$$

Der Proportionalitätsfaktor F hängt von der Personenzahl im Treppenraum und damit vom betrachteten Level Of Service ab. Für die Kapazitätsanalyse wurden Werte $F = 28$ und $F = 19$ eingesetzt, welche denen für die minimale Treppenbreite 0,90 m LOS G (mäßiges Gedränge) bzw. LOS F (dichter Verkehr) entsprechen.

a



b



Anh. 2, Abb. 13 Entleerung von 8 Ebenen nach dem Kapazitätsmodell mit a) LOS G „mäßiges Gedränge“ und b) LOS F „dichter Verkehr“ (LOS – Level of Service) bei einem Ebenenabstand von 2,70 m

A4 Ergänzende Tabellen und Boxplots

Ergänzend zu Anh. 2, Tab. 7 sind hier die Ergebnisse für Ebenenanzahl 4, 5 und 7 dargestellt.

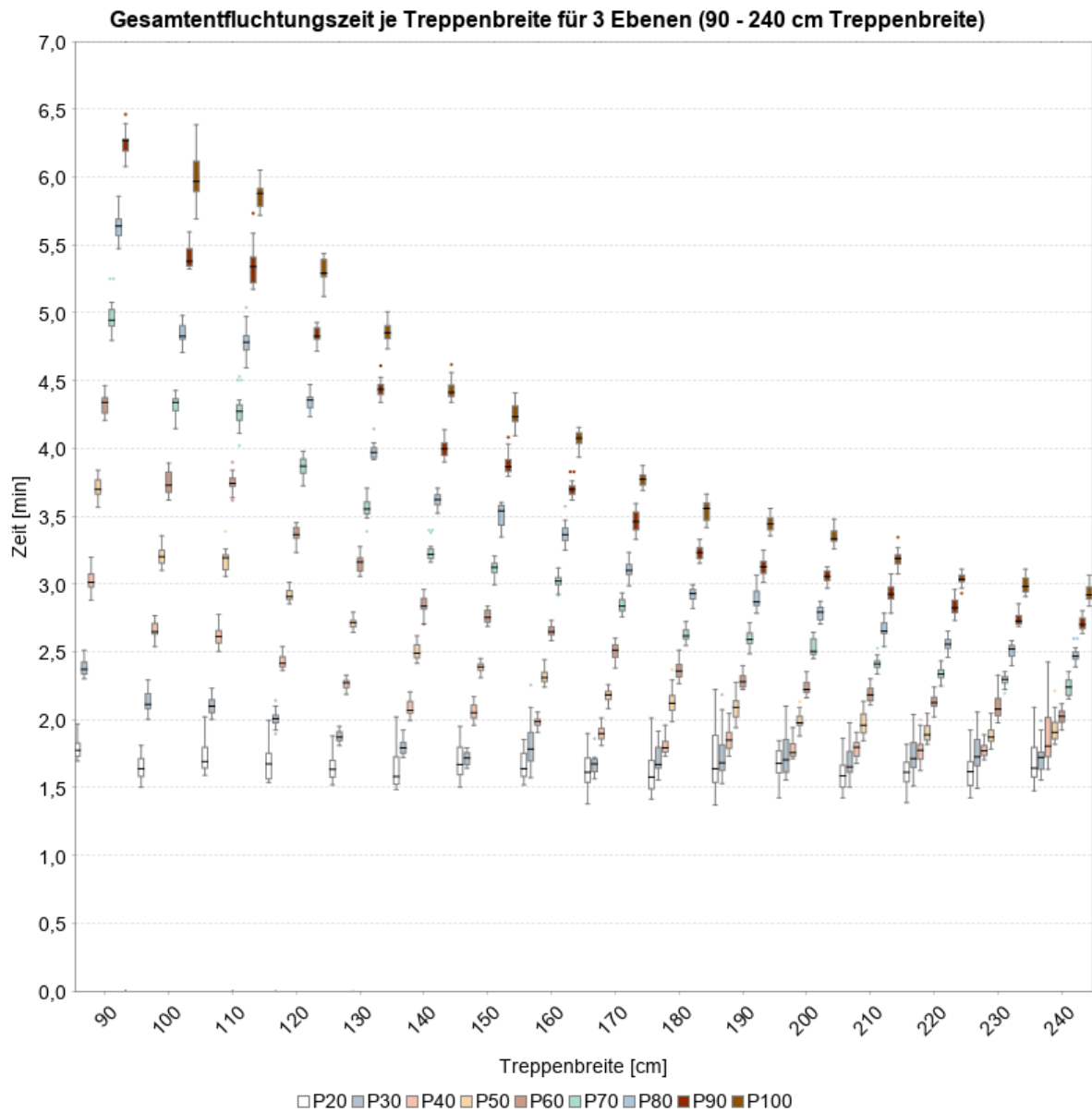
Anh. 2, Tab. 9 Mittlere maximale Entfluchtungszeit aus der Ebene über alle berechneten Treppenbreiten von 0,90 bis 2,40 m für die Ebenen 4, 5, 7 (1. Spalte) und Anzahl der Personen pro Ebene (2. Spalte) in Minuten (ASERI)

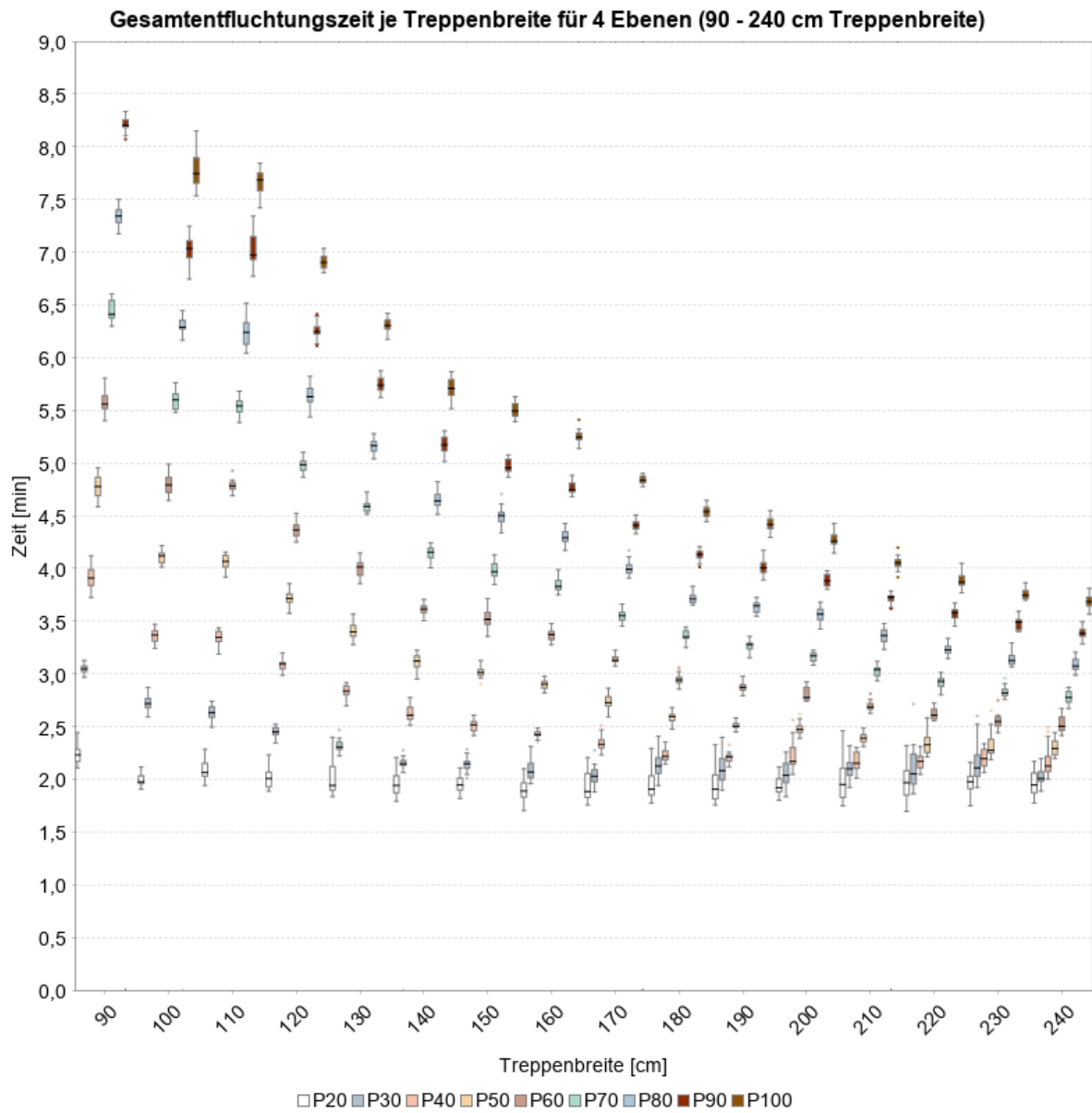
Ebenen	Pers./Ebene	Treppenbreite [cm]												
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	200	220	240
4	10	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
4	20	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
4	30	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
4	40	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
4	50	2,0	1,5	1,0	0,9	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
4	60	3,2	2,9	2,8	1,8	1,2	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
4	70	3,9	3,8	3,8	3,3	2,6	1,8	1,4	1,1	1,0	0,9	0,7	0,6	0,6
4	80	4,6	4,5	4,5	4,3	3,5	3,3	2,6	1,9	1,7	1,3	1,0	0,8	0,7
4	90	5,3	5,2	5,2	5,0	4,2	4,0	3,8	3,3	3,2	1,9	1,3	1,1	0,9
4	100	6,0	5,9	5,9	5,7	4,9	4,7	4,6	4,4	4,1	3,7	1,8	1,3	1,1

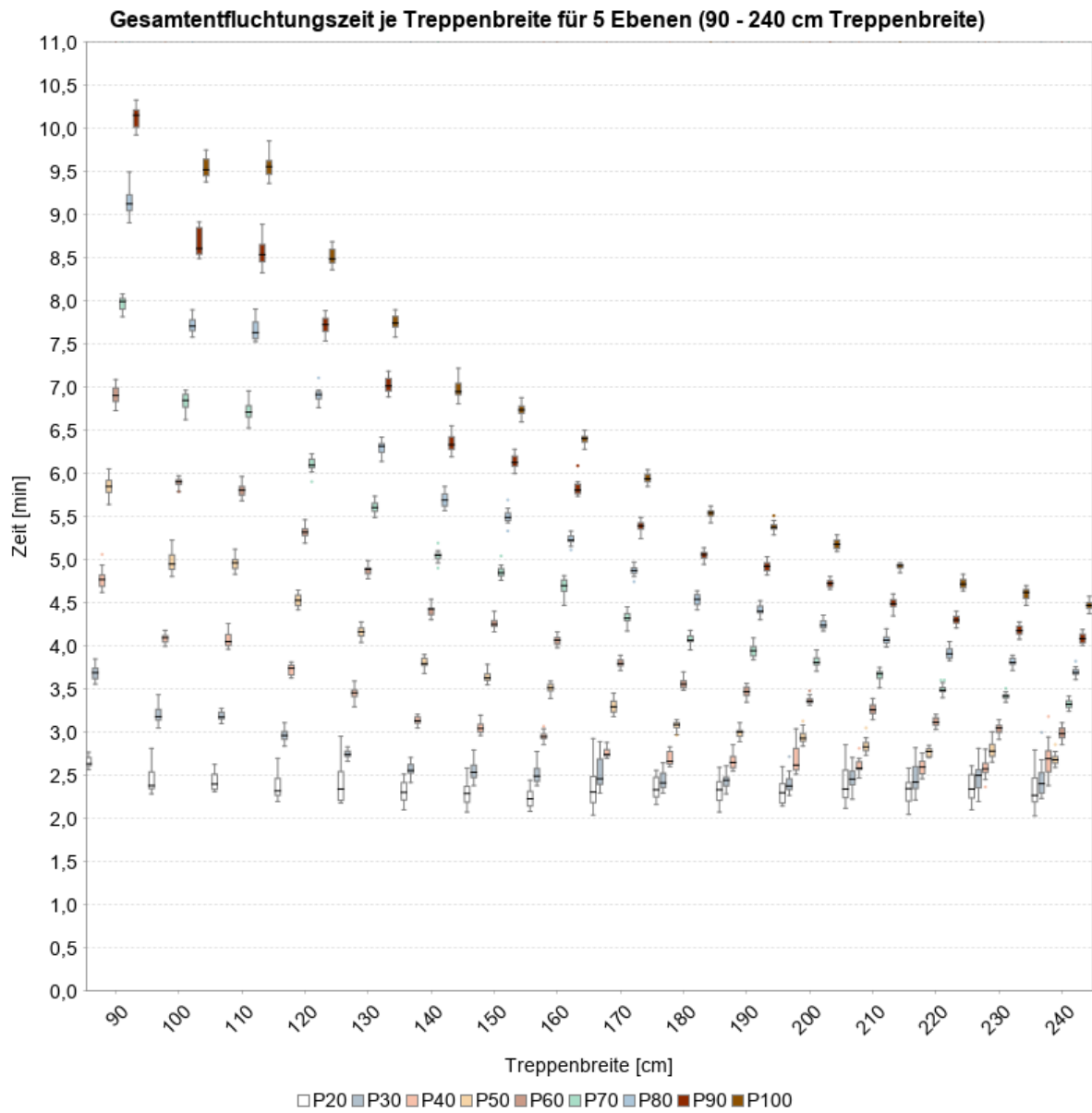
Ebenen	Pers./Ebene	Treppenbreite [cm]												
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	200	220	240
5	10	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
5	20	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
5	30	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
5	40	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
5	50	2,3	1,7	1,0	0,9	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
5	60	4,0	3,8	3,1	2,5	1,4	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
5	70	4,9	4,8	4,9	4,5	2,9	2,8	2,0	1,3	1,0	0,9	0,7	0,6	0,6
5	80	5,8	5,7	5,8	5,5	4,5	4,4	3,5	2,7	2,0	1,7	0,9	0,8	0,7
5	90	6,6	6,6	6,7	6,4	5,4	5,2	4,8	4,6	3,6	2,7	1,5	1,0	0,9
5	100	7,5	7,5	7,6	7,4	6,2	6,0	5,8	5,9	5,4	4,8	2,3	1,6	1,1

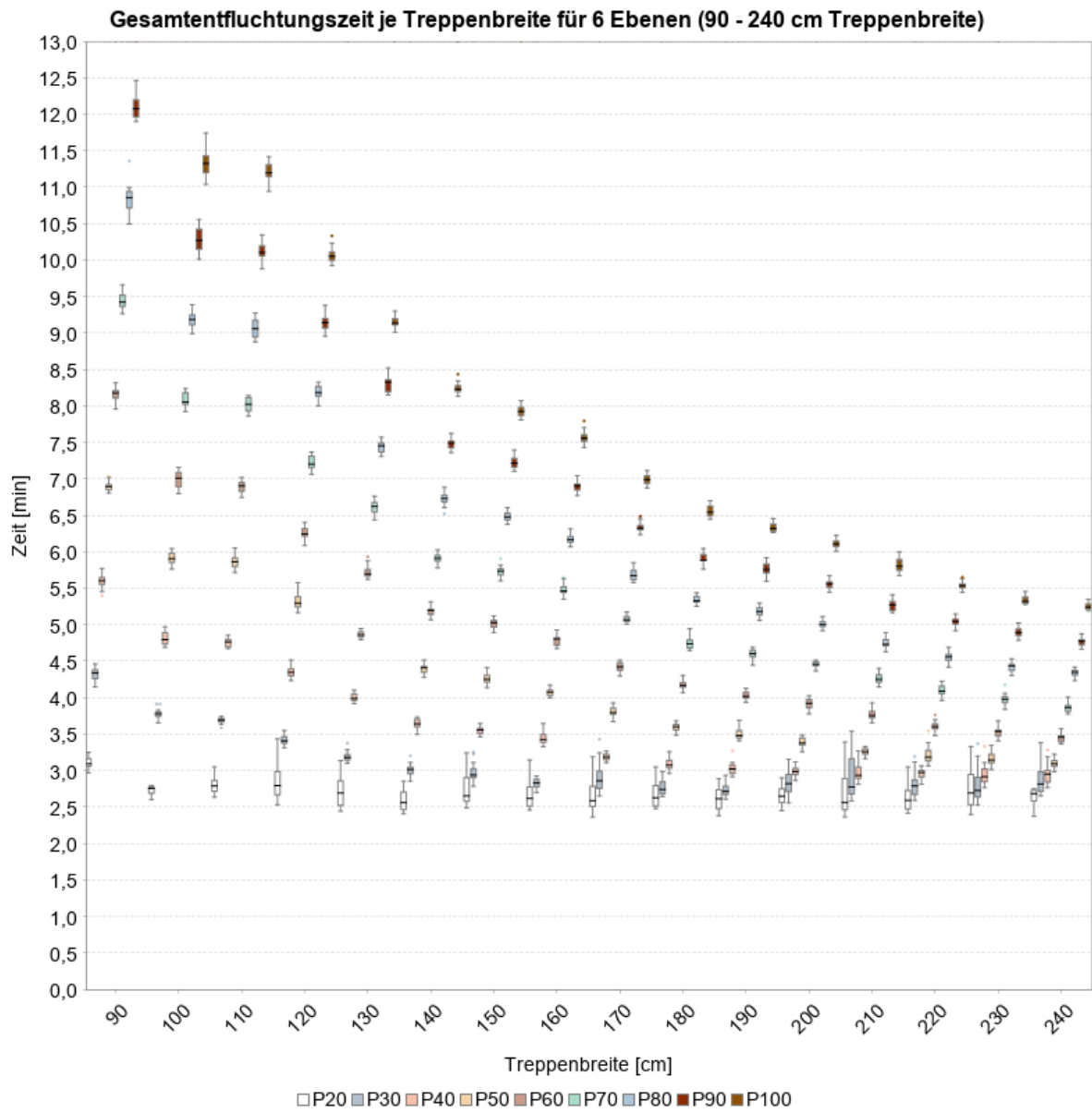
Ebenen	Pers./Ebene	Treppenbreite [cm]												
		90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	200	220	240
7	10	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6
7	20	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
7	30	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
7	40	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
7	50	3,2	2,6	2,1	0,9	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
7	60	5,6	5,5	4,7	3,4	1,8	1,1	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
7	70	6,9	6,8	6,9	6,5	4,2	4,1	2,4	1,5	1,1	0,9	0,7	0,6	0,6
7	80	8,1	8,1	8,2	8,1	6,6	6,3	5,6	4,5	3,0	1,7	1,0	0,8	0,7
7	90	9,3	9,3	9,5	9,4	7,9	7,6	7,4	7,1	5,8	4,5	1,8	1,1	0,9
7	100	10,5	10,6	10,8	10,6	9,0	8,8	8,5	8,6	8,2	6,6	3,0	1,4	1,2

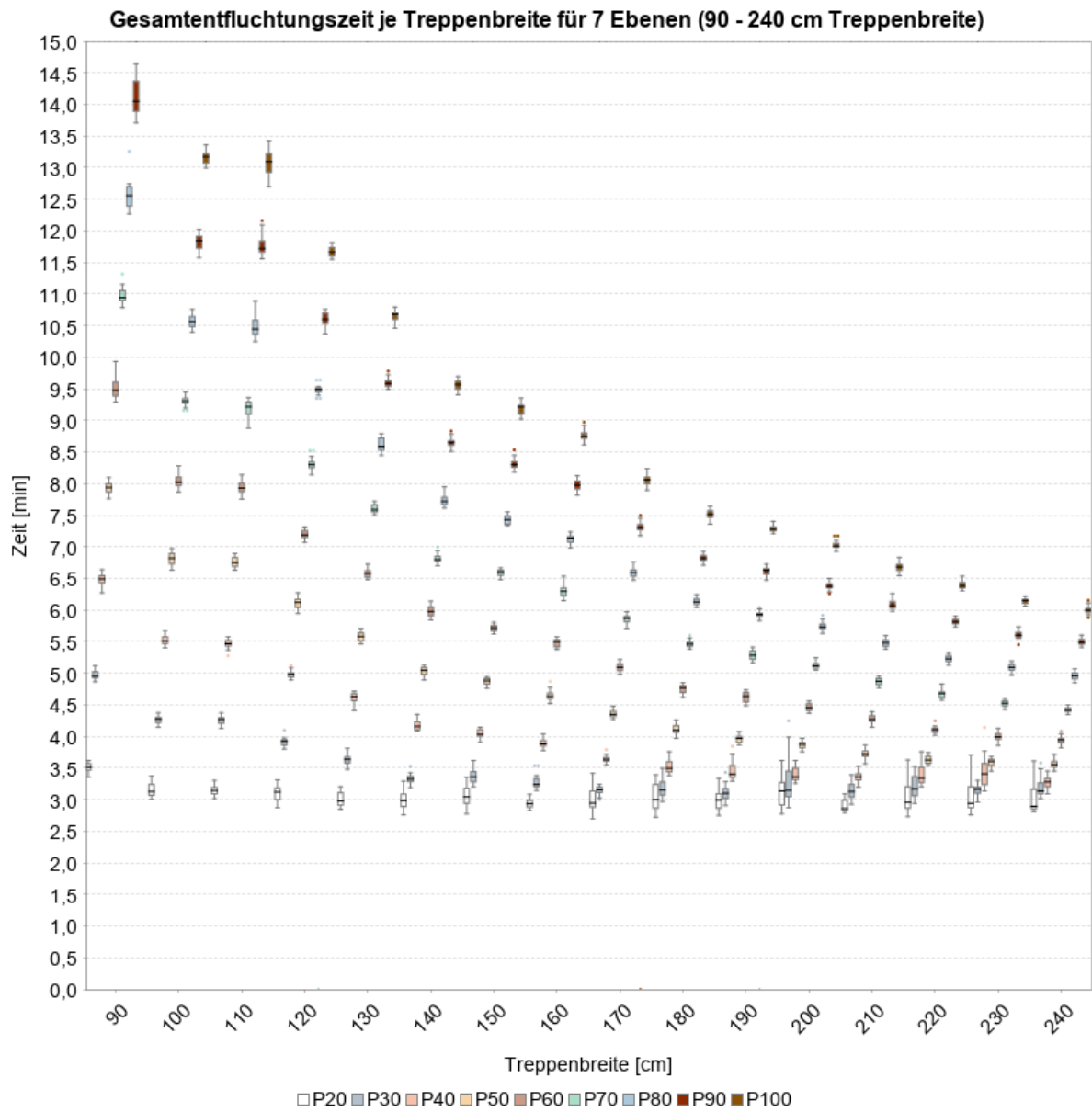
Ergänzend zu Anh. 2, Abb. 5 sind in den folgenden 6 Abbildungen weitere Boxplots für eine unterschiedliche Anzahl von Ebenen dargestellt (crowd:it).

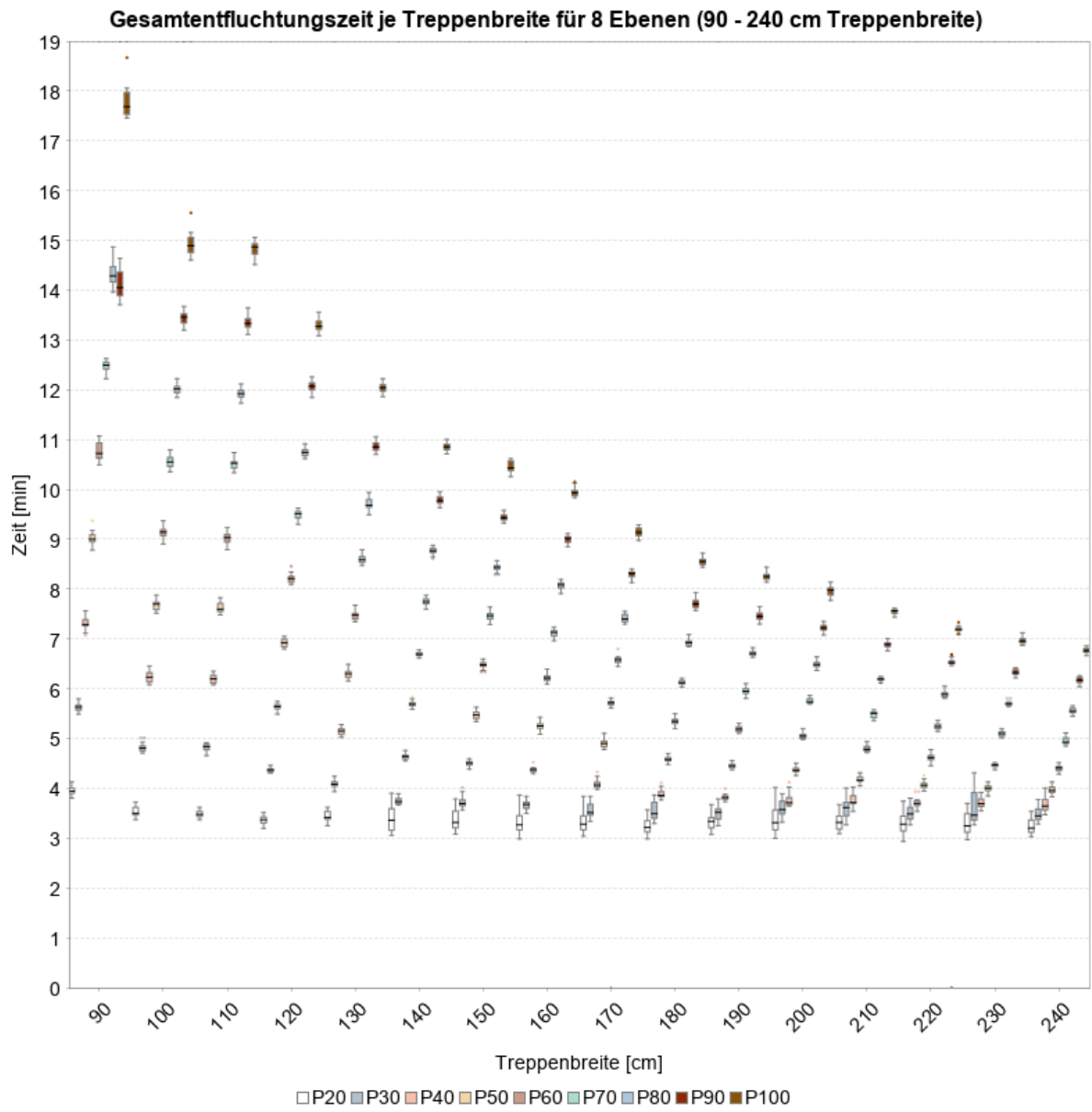












Ergänzend zu Anh. 2, Abb. 6 sind in den folgenden 8 Abbildungen weitere Boxplots für alle Anzahl Personen pro Ebene dargestellt (crowd:it).

