

BACHELORARBEIT

Möglichkeiten, Varianten und Grenzen der Rettungswegskalierung in Versammlungsstätten auf Grundlage der Versammlungsstättenverordnung

vorgelegt am 14.02.2020 von
Simon Fabian Witt

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Thomas Schiemann
2. Prüfer: Dipl. Ing. Andreas Kattge

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Fakultät Life Sciences
Ulmenliet 20
21033 Hamburg

In Zusammenarbeit mit der
Feuerwehr Hamburg

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1 Einleitung	2
2 Hauptteil	4
2.1 Geschichte der Versammlungsstättenverordnung	4
2.1.1 Vorläufer der Versammlungsstättenverordnung	4
2.1.2 Versammlungsstättenverordnung 1978	6
2.1.3 Muster-Versammlungsstättenverordnung 2002	7
2.1.4 Muster-Versammlungsstättenverordnung 2005	9
2.1.5 Muster-Versammlungsstättenverordnung 2014	11
2.1.6 Einführung Rettungswegbreiten	12
2.2 Grundlagen	15
2.2.1 Grundlagen der Entfluchtung	15
2.2.2 Grundlagen der Entfluchtungsberechnung	17
2.2.3 Stand der Forschung	21
2.3 Methode	26
2.3.1 Simulationsprogramm Pathfinder	26
2.3.2 Simulationseingaben	28
2.3.3 Ergebnisauswertung	41
2.4 Ergebnisse der Simulation	43
2.4.1 Ergebnisse Modell 1	43
2.4.2 Auswertung der Ergebnisse für Modell 1	43
2.4.3 Ergebnisse Modell 2	50
2.4.4 Auswertung der Ergebnisse für Modell 2	51
2.4.5 Ergebnisse Modell 3	56
2.4.6 Auswertung der Ergebnisse für Modell 3	58
2.4.7 Diskussion der Ergebnisse	61
3 Fazit	62
Literaturverzeichnis	68

Anhang	69
I. Inhalt des digitalen Anhangs auf CD	69
II. Grundriss Modell 1	70
III. Grundrisse Modell 2	71
IV. Grundrisse Modell 3	72
V. Einstellungen Simulationsparameter Pathfinder	74
VI. Einstellungen Agenten-Standardprofil Pathfinder	79
VII. Vergrößerte Darstellung Durchflussraten	84
VIII. Simulationsergebnisse Modell 1	88
IX. Simulationsergebnisse Modell 2	105
X. Simulationsergebnisse Modell 3	122
Erklärung	126

Abbildungsverzeichnis

1	Individuelle Zusammensetzung von t_{Flucht} [1]	16
2	Diskretisierung des Grundrisses am Beispiel eines Raums [2, S. 14]	19
3	Darstellung des Verhältnisses von Geschwindigkeit und Dichte der Personenströme nach Nelson und Mowerer. Eigene Darstellung nach [3, 4]	22
4	Darstellung der Trajektorien bei verschiedenen Breiten der Engstelle, bearbeitet nach [5]	24
5	Darstellung des schematischen Aufbaus des Evakuierungsassistenten [6]	25
6	Grundriss Modell 1	29
7	Perspektivischer Blick auf Modell 2	31
8	Perspektivischer Blick auf Modell 3	32
9	Einstellung der Reaktionszeiten am Beispiel des Modell 1	33
10	Gegenüberstellung maximaler Evakuierungszeiten und Gesamtausgangsbreite nach MVStättVO 2005	46
11	Gegenüberstellung maximaler Evakuierungszeiten (Modell 1) nach MVStättVO 2005 und MVStättVO 2014	47
12	Vergleich der Evakuierungszeiten (Modell 1) nach MVStättVO 2014 mit den Evakuierungszeiten nach MVStättVO 2005 bei voller Auslastung	48
13	Maximale Gesamtstauungszeiten Modell 1 im Vergleich	49
14	Evakuierungsdauern Vergleichsszenarien mit 800 Personen	51
15	Vergleich der Türdurchflussraten im Modell 2	52
16	Modell 2 Szenario 5 Durchlauf 4: Agent 1486 (Markierung) blockiert die rechte Tür untere Tür des Veranstaltungsraums im ersten OG zum Zeitpunkt 143,9 Sekunden	53
17	Modell 2 Szenario 14 Durchlauf 9 zum Zeitpunkt 191,6 Sekunden mit dargestellter Geschwindigkeit der Agenten	53
18	Gegenüberstellung maximaler Evakuierungszeiten (Modell 2) und Ausgangsbreite nach MVStättVO 2005 und MVStättVO 2014	54

19	Vergleich der Evakuierungszeiten nach MVStättVO 2014 (ohne Szenario 8) mit den Evakuierungszeiten nach MVStättVO 2005 bei voller Auslastung der Rettungswegbreite	55
20	Vergleich der Personendurchflussraten der Türen zwischen Foyer und jeweiligem Veranstaltungsraum im ersten und zweiten Obergeschoss im Modell 3	56
21	Personendurchflussraten an den Türen des Veranstaltungsraums des zweiten Obergeschosses im Modell 3	57
22	Boxplotauswertung Evakuierungszeiten Modell 3 Szenario 19	58
23	Vergleich der Personendurchflussraten am Beginn der Foyertreppen (1.OG → EG) im Modell 3	59
24	Vergleich der Stauungssituationen (rot eingekreist) vor den Foyertreppen im Modell 3	59

Tabellenverzeichnis

1	Rettungswegbreiten der Verordnungen im Vergleich	13
2	Spezifischer Fluss pro Engstellenbreite und Teilnehmerzahl [5]	23
3	Überblick Rahmenbedingungen Szenario 1 bis 8	38
4	Überblick Rahmenbedingungen Szenario 9 bis 16	38
5	Beispiel einer CSV-Datei erzeugt von <i>Pathfinder</i>	41
6	Beispiel der Darstellung der Simulationsergebnisse am Beispiel von Modell 1 Szenario 1	42
7	Vergleich der Maxima und Mittelwerte der Evakuierungszeit, kontinuierlichen und gesamten Stauungszeit aller Szenarien in Modell 1	44
8	Vergleich der Maxima und Mittelwerte der Evakuierungszeit, kontinuierlichen und gesamten Stauungszeit aller Szenarien in Modell 2	50
9	Vergleich der Maxima und Mittelwerte der Evakuierungszeit, kontinuierlichen und gesamten Stauungszeit aller Szenarien in Modell 3	56

Abkürzungsverzeichnis

ABH	Amt für Bauordnung und Hochbau Hamburg
ARGEBAU	Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister
EITW	Europäisches Institut für Tagungswirtschaft GmbH
MBO	Muster-Bauordnung
MVStättVO	Muster-Versamlungsstättenverordnung
M-FLBauR	Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb Fliegender Bauten
RIMEA	Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen
vfdb	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V.
VStättVO	Versamlungsstättenverordnung

Zusammenfassung

Das Amt für Bauordnung und Hochbau Hamburg beabsichtigt die Novellierung der Versammlungsstättenverordnung Hamburg anhand der Muster-Versammlungsstättenverordnung 2014. Bei der Vorbereitung hierzu ergaben sich hinsichtlich der neu eingeführten Interpolation von Rettungswegbreiten in Versammlungsstätten Vorbehalte. Diese sollen in der vorliegenden Arbeit überprüft werden.

Zur Einordnung wird ein kurzer Einblick in die Entwicklung der Verordnung und die Einführung von Mindestrettungswegbreiten gegeben. Um herauszufinden, ob das, anhand der Rettungswegbreiten und der damit verbundenen Dauer der Evakuierung bestimmte, Sicherheitsniveau zwischen der Muster-Versammlungsstättenverordnung 2005 und 2014 unterschiedlich hoch ist, werden mithilfe der Simulationssoftware *Pathfinder* verschiedene Entfluchtungsszenarien in einer fiktiven Versammlungsstätte simuliert. Dabei soll die Interpolation der Rettungswegbreiten an Türen und auf Treppen untersucht werden. Die so erhaltenen Simulationsergebnisse werden anhand der Evakuierungszeiten mit der bisherigen Regelung verglichen. Die erzielten Ergebnisse deuten auf keine Veränderung des Sicherheitsniveaus durch die Anwendung der Interpolation hin.

Kapitel 1

Einleitung

Täglich finden deutschlandweit mehrere tausend Veranstaltungen aller Arten in verschiedenen Versammlungsstätten statt. Allein im Jahr 2018 wurden rund 2,89 Millionen Veranstaltungen mit 412 Millionen Teilnehmern durch das Europäische Institut für Tagungswirtschaft GmbH (EITW) gezählt. Den Großteil dieser Veranstaltungen machen kleine Veranstaltungen mit bis zu 250 Teilnehmern aus (ca. 81 Prozent). Die meisten dieser Veranstaltungen finden in Tagungshotels statt, der Rest in Eventlocations (11 Prozent) oder Veranstaltungszentren (39 Prozent) [7].

Durch die Zusammenkunft vieler Menschen an einem, für diese Menschen oft unbekanntem Ort, ergeben sich Anforderungen an die Versammlungsstätten, die in der Regel nicht über die Muster-Bauordnung (MBO) abgedeckt werden können. Daher werden Versammlungsstätten in der Regel als Sonderbau eingestuft und unterliegen in den meisten Bundesländern einer Sonderbauverordnung beziehungsweise der jeweils gültigen Versammlungsstättenverordnung (VStättVO). Die durch die Länder eingeführten Bauordnungen für Versammlungsstätten beruhen zum größten Teil auf den Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister (ARGEBAU), die in regelmäßigen Abständen diese Empfehlungen aktualisiert.

Wie alle Gebäude unterliegen Versammlungsstätten den vier Schutzziele des Brandschutzes (Brandentstehung verhindern, Brand und Rauchausbreitung vorbeugen, Rettung von Menschen und Tieren ermöglichen und wirksame Löscharbeiten ermöglichen) [8]. Besonderes Augenmerk liegt bei Versammlungsstätten dabei auf der Rettung von Menschen (und Tieren). Da aufgrund der hohen Anzahl von Personen in einem Veranstaltungsgebäude die Rettung der Besucher durch die Feuerwehr nicht möglich ist, sind Versammlungsräume¹ mit mindestens zwei baulichen Rettungswegen auszustatten, um so die selbstständige Evakuierung der Personen jederzeit sicherzustellen.

¹ ab 100 Personen oder 100 m² Grundfläche

Das Amt für Bauordnung und Hochbau Hamburg (ABH) als zuständige Behörde der Stadt Hamburg beabsichtigt die Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättVO) 2014 in Landesbaurecht zu überführen und die bisher geltende VStättVO Hamburg, welche auf Grundlage der MVStättVO 2005 basiert, abzulösen. Für diesen Vorgang wurde die Feuerwehr als zuständige Behörde für Brand- und Gefahrenschutz um Stellungnahme und Mitentwicklung der zukünftigen Verordnung gebeten. Im Rahmen eines Praxissemesters wurde ein neuer, auf dem Text der MVStättVO 2014 basierender Verordnungstext erarbeitet, in den neben Aspekten der Feuerwehr auch Eingaben verantwortlicher Techniker von Theatern und Versammlungsstätten aus Hamburg eingeflossen sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Vorbehalte auf Seiten der Feuerwehr und einiger technischer Leiter gegen die Abschaffung der diskreten Steigerung der Rettungswegbreiten mit Hinblick auf die bisherige Begründung durch die Schulterbreite und Reihenbildung deutlich [9].

Diese Bachelorarbeit soll diese Vorbehalte aufgreifen und im Rahmen einer Personenstromanalyse überprüfen. Um die Entwicklung der heutigen Rahmenbedingungen besser nachvollziehen zu können, wird die Einführung von Mindestfluchtwegbreiten in den einschlägigen Regelwerken im historischen Kontext betrachtet. In der anschließenden Simulation werden verschiedene, auf den Bemessungsgrundlagen der MVStättVO 2005 und 2014 basierende, Szenarien in einer fiktiven Versammlungsstätte betrachtet und die Evakuierungszeiten abschließend miteinander verglichen. Ziel ist es, einen sicherheitstechnisch vertretbaren Lösungsansatz für die zukünftige VStättVO der Stadt Hamburg zu finden. Dabei sollen insbesondere die Vorbehalte der Genehmigungsbehörden überprüft werden und gegebenenfalls ein auf den Simulationsergebnissen beruhender Vorschlag erarbeitet werden.

Kapitel 2

Hauptteil

2.1 Geschichte der Versammlungsstättenverordnung

Um die Entwicklung der Rettungswegbreiten im historischen Kontext zu verstehen, erläutert dieses Kapitel kurz die Entstehung der heutigen MVStättVO. Dabei wird insbesondere auf die Regulierung der Fluchtwegbreiten in Versammlungsstätten eingegangen.

2.1.1 Vorläufer der Versammlungsstättenverordnung

Bis 1945

Als Folge vieler, zum Teil verheerender Theaterbrände entwickelte sich Ende des 19. Jahrhunderts ein Bewusstsein für die Notwendigkeit von Vorschriften über den Bau und Betrieb von Theatern und Vergnügungsstätten [10]. Bereits im Jahr 1879 wurden in München die „Ortspolizeiliche Vorschriften über die Feuerpolizei in Theatern“ erlassen [11, S. 3]. Als endgültiger Wendepunkt im Sicherheitsbewusstsein der Bevölkerung ist der Brand im Wiener Ringtheater am 08. Dezember 1881 anzusehen. Bei diesem Brand, kurz vor einer Vorstellung, kamen mindestens 386 Menschen ums Leben [12]. Neben baulichen Mängeln, war organisatorisches Versagen auf verschiedenen Ebenen ursächlich für das Ausmaß dieses Brandes. So wurde zum Beispiel die Theaterleitung nicht darüber informiert, dass die Wasserzufuhr des Theaters (und damit der Löschanlage) aufgrund eines Defektes zwei Tage vor dem Brand abgestellt wurde. Weiterhin stellte ein unzureichend geschulter Bühnenarbeiter, aus Angst vor einer weiteren Explosion, die Gaszufuhr der Notbeleuchtungslampen im Zuschauerraum ab, wodurch die Zuschauer in völliger Dunkelheit die Ausgänge suchen mussten [12].

In der Folge des Ringtheaterbrandes und weiterer Brände in Vergnügungsstätten wurde an der Entwicklung strengerer Bau- und Betriebsvorschriften für Theater gear-

beitet. Als erster Vorläufer der heutigen MVStättVO kann die „Polizeiverordnung über die bauliche Anlage, die innere Einrichtung und den Betrieb von Theatern, öffentlichen Versammlungsräumen und Zirkusanlagen“ aus dem Jahr 1909 genannt werden [13, S. 46]. In dieser Verordnung werden Vorschriften für neugebaute Theater und Versammlungsstätten, als auch für bestehende Versammlungsstätten erlassen. Der Aufbau und der Inhalt erinnern an die Form der heutigen MVStättVO und sind teilweise bereits sehr konkret ausgeführt. So ist zum Beispiel bereits 1909 Bestandteil der Verordnung, dass Stühle unverrückbar im Zuschauerraum befestigt sein müssen [14]. Dies findet sich ebenso in aktuellen MVStättVO (§ 10 Abs. 1 MVStättVO). Die Polizeiverordnung wurde bis 1935 mehrfach aktualisiert. Parallel wurde im Jahr 1925 die „Lichtspielverordnung“ verabschiedet, welche der neu aufkommenden Kinokultur Rechnung trug und Lichtspielvorführungen in Lichtspielhäusern regelte [13, S. 46].

Obwohl die bestehende Polizeiverordnung 1935 noch einmal aktualisiert worden ist, wurde bereits ab 1934 an einer Anpassung der Verordnung gearbeitet. Hintergrund war das Polizeiverwaltungsgesetz aus dem Jahre 1931, wonach die Geltungsdauer der Theaterbauverordnung von 1909 auf 30 Jahre begrenzt wurde [15]. Da die Überarbeitung jedoch bis 1939 nicht abgeschlossen war, erließ der damalige preußische Finanzminister die Anordnung, dass die Polizeiverordnung im Einzelfall für besondere Arten von Gebäuden weiterhin heranzuziehen sei [16]. Durch den Kriegsausbruch verzögerte sich die Überarbeitung der Polizeiverordnung bis in das Jahr 1944. Das neue Muster enthielt 131 Paragraphen und sollte nach ursprünglichem Plan einheitlich eingeführt werden [16]. Aufgrund der Kriegsentwicklung wurde die Einführung ausgesetzt.

Ab 1945

Nach Ende des zweiten Weltkriegs wurde in einzelnen Bundesländern die bisherige Verordnung für Bauvorhaben herangezogen und umgesetzt. Erst im Jahr 1951 beschloss der Normenausschuss die Zusammenfassung der bisherigen Verordnungen über Veranstaltungsstätten und Lichtspielhäuser in der neu zu erstellenden DIN-Norm 18600 - Versammlungsstätten. Die Norm wurde im Jahr 1961 als sogenannter „Gelbdruck“ veröffentlicht. Der „Gelbdruck“ entspricht einem Normentwurf mit dem Ziel der Prüfung durch die Öffentlichkeit. Ab 1960 prüfte parallel zum Normungsverfahren, ein von der Fachkommission Bauaufsicht der ARGEBAU eingesetzter Arbeitskreis den Inhalt des Normentwurfs und die Möglichkeit diesen als Musterverordnung über die jeweiligen Landesbauordnungen einzuführen [16].

Aufgrund rechtlicher Bedenken wurde der Normentwurf nicht als Norm verabschiedet, aber nach eingehender Prüfung und Empfehlung der Fachkommission Bauaufsicht ab 1969 in den meisten Bundesländern als VStättVO eingeführt. Als erstes Bundesland

hat am 07. August 1969 Bayern die VStättVO erlassen. Die beiden Stadtstaaten Hamburg und Bremen verzichteten auf eine Einführung, zogen aber den Normentwurf als Arbeitsgrundlage im Baurecht heran [17, 16, 15].

Während die bisher gültige beziehungsweise herangezogene Polizeiverordnung keine allgemein gültigen Grundsätze für alle Versammlungsstätten definiert, findet dies in der VStättVO NRW 1969¹ erstmals statt. So werden zum Beispiel für alle Versammlungsräume gültige Bemessungsregeln für die maximale Besucheranzahl definiert, unabhängig davon, ob es sich um ein klassisches Theater oder eine Mehrzweckhalle handelt (vgl. § 19 Abs. 3 VStättVO NRW 1969). Bisher war dies nach Benutzungsart des Versammlungsraumes geregelt. Als logische Konsequenz der allgemeinen Betrachtung von Versammlungsstätten wurde die bisher angewendete „Lichtspielverordnung“ für Kinos in die VStättVO NRW 1969 integriert, sodass eine eigene „Lichtspielverordnung“ überflüssig wurde.

Die VStättVO NRW regelt die meisten Anforderungen an Versammlungsstätten selbstständig und ohne Verweis auf die jeweils gültige Landesbauordnung. Ausnahmen bilden die Anforderungen an Versammlungsräume im Keller (§ 4 VStättVO NRW 1969) und an Sicherheitsschleusen (§ 56 VStättVO NRW 1969). Es besteht keine bauliche Anpassungspflicht für bestehende Veranstaltungsstätten an die Anforderungen der VStättVO NRW 1969.

2.1.2 Versammlungsstättenverordnung 1978

Die von der ARGEBAU eingesetzte Projektgruppe „MVStättV“ überarbeitete die VStättVO 1969 ab 1975 und entwickelte darauf aufbauend die VStättVO 1978 mit insgesamt 131 Paragraphen. Diese Mustervorschrift wurde in allen alten Bundesländern als Richtlinie oder Verordnung eingeführt [11]. Hintergrund der Überarbeitung war eine Veränderung in der Kulturlandschaft. Neben dem klassischen Theater wurden immer mehr Konzerte und Veranstaltungen in Mehrzweckhallen und Stadien durchgeführt, welche in der bisherigen Verordnung nur unzureichend betrachtet wurden. Die VStättVO 1978 erfasste daher auch Regelung für solche Veranstaltungsstätten, wobei der Blick, neben dem klassischen Theatergebäude, vor allem auf kleinere Mehrzweckhallen und Konzertsäle gerichtet wurde [11, 13]. Im weiteren Verlauf wurden im Jahr 1982 Gaststätten mit mehr als 400 Besucherplätzen aus der VStättVO 1978 ausgegliedert und in die Muster-Gaststättenbauverordnung - Fassung Juni 1982 - integriert [19]. Ebenfalls im Jahr 1982 wurden „Fliegende Bauten“ aus der Musterverordnung aus-

¹Diese Abschnitt bezieht sich auf die Versammlungsstättenverordnung NRW vom 01.07.1969 [18], welche dem Entwurf der Fachkommission entspricht [17, S. 48]

gegliedert und in eine eigenständige Richtlinie (Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb Fliegender Bauten) überführt [11]. Neben der stärkeren Berücksichtigung der oben genannten Versammlungsstättenarten wurden Regelungen für mobilitätseingeschränkte Menschen eingeführt, so werden zum Beispiel erstmals Plätze für Rollstuhlnutzer gefordert (§§ 15a und 24 VStättVO 1978).

Die VStättVO 1978 ist gegliedert in „Allgemeine Vorschriften“, „Bauvorschriften“, „Betriebsvorschriften“ und „Prüfungen, weitere Anforderungen, Ordnungswidrigkeiten, Schlussvorschriften“. Nach wie vor ist eine Prägung der Vorschrift durch den Theaterbau zu erkennen. So werden zum Beispiel weiterhin Bühnen in „Klein-, Mittel- und Vollbühnen“ sowie Szenenflächen unterteilt. Aus dieser Unterteilung ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an Rettungswege (der Darsteller/Mitarbeiter) und die sicherheitstechnische Ausstattungen der Bühnenbereiche. Auch die VStättVO 1978 verlangt keine Anpassungen bestehender Versammlungsstätten im Bereich der baulichen Anforderungen, lediglich die Betriebsvorschriften müssen in bestehenden Versammlungsstätten Anwendung finden [20].

2.1.3 Muster-Versammlungsstättenverordnung 2002

Die Geschichte der ersten Fassung der MVStättVO beginnt bereits 1985 mit dem Einsatz der Projektgruppe „Versammlungsstätten“ seitens der Fachkommission Bauaufsicht der ARGEBAU . Diese legte bis 1989 einen ersten Entwurf einer neuen Musterverordnung zur Stellungnahme durch Branchenverbände vor. Die Auswertung der Stellungnahmen dauert bis zum September 1992. Auf Grundlage der eingereichten Stellungnahmen wird bis 1994 ein überarbeiteter Entwurf entwickelt. Der Entwurf wird zunächst zurückgestellt und nicht zur Überführung in Landesbaurecht durch die ARGEBAU empfohlen[16].

Im Jahr 1998 wird durch die Fachkommission Bauaufsicht erneut eine Projektgruppe eingesetzt. Die Projektgruppe „Muster-Versammlungsstätten-Verordnung“ soll den durch die Projektgruppe „Versammlungsstätten“ erarbeiteten Entwurf anpassen und dabei die politischen Ziele zur Reduzierung von Normen und Verordnungen berücksichtigen. Neben diesem Ziel soll die nun zu entwickelnde MVStättVO auf der Grundlage der 1997 zur Einführung seitens der ARGEBAU empfohlenen MBO beruhen. Im vierten Quartal 1999 lag ein entsprechender Vorschlag zur Stellungnahme durch Branchenverbände vor. Die Auswertung der eingereichten Stellungnahmen erfolgte in den folgenden beiden Quartalen [16]. Durch die ARGEBAU wurde der neue Musterentwurf im Jahr 2001 zur Umsetzung in Landesrecht empfohlen. Nach Notifizierung durch die

EU im Mai 2002, konnte die MVStättVO 2002² durch die Bundesländer in Landesbau-recht umgesetzt werden [11].

Inhaltlich wurde die MVStättVO 2002 im Vergleich zur vorher bestehenden MVStättVO 1978 stark gestrafft und die Anzahl der Paragraphen auf 48 reduziert, wobei das bis-her geltende Sicherheitsniveau nicht verringert wurde. Trotz der starken Reduzierung wurde auch die Ausgliederung der Gaststätten (vgl. 2.1.2) rückgängig gemacht, dabei aber auf besondere Regelungen für Gasstätten innerhalb der Verordnung verzichtet. Gaststätten werden demnach, wenn sie die Anforderungen nach § 1 MVStättVO 2002 erfüllen, als reguläre Versammlungsstätte behandelt. Auf Wiedereingliederung der Flie-genden Bauten wurde verzichtet.

Weiterhin entfernt sich die MVStättVO 2002 weiter von ihrem Ursprung als Theater-bauverordnung und verzichtet auf spezielle Anforderungen an „Klein- und Mittelbüh-nen“. Die Anforderungen an Versammlungsstätten werden nun unabhängig von ihrer Nutzung gestellt. Dies gilt auch für Räume die der Lichtspielvorführungen dienen, die-se mussten aufgrund erhöhter Gefährdungen durch die verwendeten Filme bisher be-sondere Anforderungen erfüllen (vgl. MVStättVO 1978). Mit der Neufassung der Ver-ordnung entfallen diese besonderen Anforderungen, bedingt durch den technischen Fortschritt und die Verwendung elektronischer Vorführtechniken. Besondere Bauvor-schriften gelten nun nur noch für „Großbühnen“ und Versammlungsstätten mit mehr als 5000 Besucherplätzen. Zusätzlich wurde die Definition der „Großbühne“(vormals: „Vollbühne“) angepasst.

Im ersten Teil der MVStättVO 2002 sind Allgemeine Vorschriften und Begriffsdefini-tionen zu finden. Festzustellen ist, dass die neue Verordnung eine neue Herangehens-weise zur Feststellung, ob die MVStättVO zur Anwendung zu bringen ist, verfolgt. Weniger der Zweck eines Veranstaltungsraumes ist maßgeblich für die Anwendung der Vor-schrift, sondern die Anzahl der möglichen Besucher. Daher wird erstmals verbindlich für die Einordnung einer Versammlungsstätte eine Bemessungsformel zur Errechnung der höchst zulässigen Besucherzahl definiert. Angelehnt ist die Bemessungsformel an die bisher bestehende Regelung zur Berechnung der größtmöglichen Besucherzahl zur Bestimmung der notwendigen Rettungswege (vgl. § 19 Abs. 3 MVStättVO 1978).

Teil 2 der MVStättVO 2002 fasst Anforderungen an Bauteile in Versammlungsstätten zusammen. Im Vergleich zur vorherigen Verordnung konnten einige Anforderungen an

²Korrekte Abkürzung für die Muster-Versammlungsstättenverordnung 2002 wäre MVStättV; erst mit Einführung der Muster-Versammlungsstättenverordnung 2014 wird diese mit MVStättVO abgekürzt; um Verwirrungen vorzubeugen hält sich diese Arbeit an die aktuelle Notation

die Beschaffenheit von Bauteilen reduziert werden, da der Fokus der MVStättVO 2002 auf der schnellen Evakuierung der Versammlungsräume liegt. Im Gegenzug wurden die Anforderungen an Rettungswege grundsätzlich überarbeitet. Ebenso wurden die Bestimmungen für technische Einrichtungen (unter anderem Rauchabzugsanlagen und Brandmeldeanlagen) auf den Stand der Technik aktualisiert. Neben der Aktualisierung wurden die Regelungen um spezielle Anforderungen für Mehrzweckhallen ergänzt.

Der dritte Teil der MVStättVO 2002 beschreibt besondere Bauvorschriften für „Großbühnen“ und Versammlungsstätten mit mehr als 5000 Besuchern. Es sind darin Anforderungen enthalten, die über die sonst an Versammlungsstätten gestellten Anforderungen hinaus gehen. Anders als in den bisherigen Verordnungen, sind diese speziellen Anforderungen aufbauend auf bzw. ergänzend zu den Anforderungen aus den ersten beiden Teilen zu sehen. Die MVStättVO 2002 reagiert mit diesen Bestimmungen auf die größer werdende Anzahl an Multifunktionshallen und Sportstadien.

Die in Teil vier der MVStättVO 2002 beschriebenen Betriebsvorschriften wurden umfangreich reduziert und an den aktuellen Stand angepasst. So wurden bestehende Betriebs- und Schutzvorschriften, die bereits durch die bestehenden Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaften geregelt wurden, nicht mehr aufgenommen. Es wurden so nur Vorschriften in der neuen Verordnung erfasst, die dem direkten Schutz der Versammlungsstättenbesucher dienen.

Zusätzliche Bauvorlagen, die für eine Versammlungsstätte erforderlich werden, sind in Teil fünf der MVStättVO 2002 geregelt. Da in vielen Fällen keine erhöhten Anforderungen an Versammlungsstätten nach der neuen MVStättVO 2002 bestehen, kann auf eine in Teil sechs beschriebene Anpassungspflicht verzichtet werden. Dies gilt jedoch nicht für Versammlungsstätten mit mehr als 5000 Besuchern, da diese im Vorfeld nicht hinreichend differenziert betrachtet wurden. Daher besteht hier, im Gegensatz zu den bisher eingeführten Verordnungen, eine Anpassungspflicht. Teil sieben der MVStättVO 2002 enthält die Schlussvorschriften [19].

2.1.4 Muster-Versammlungsstättenverordnung 2005

Bereits kurz nach Einführung der MVStättVO 2002 wurde die MBO aktualisiert. Dies hatte zur Folge, dass die ARGEBAU im Jahr 2004 die Überarbeitung der bestehenden MVStättVO 2002 beauftragte. In diesem Verfahren sollte vor allem die Anpassung an die MBO 2002 durchgeführt werden. Weiterhin sollten Anregungen und Bedenken der Länder, welche die MVStättVO 2002 bereits in Landesrecht überführt hatten, geprüft und gegebenenfalls aufgenommen werden. Zudem sollte hinsichtlich der im Jahr 2006

in Deutschland stattfindenden Weltmeisterschaft im Fußball geprüft werden, ob Anpassungen an der bestehenden Vorschrift notwendig sind. Fertiggestellt wurde der Entwurf der MVStättVO 2005³ im Januar 2005 und wurde daraufhin zur Notifizierung an die Europäische Union weitergeleitet. Das Notifizierungsverfahren war im Mai 2005 abgeschlossen, sodass der Entwurf der MVStättVO im Juni 2005 zur Überführung in Landesrecht durch die Fachkommission Bauaufsicht der ARGEBAU empfohlen werden konnte [21, 13].

Die Grundlegende Struktur der MVStättVO 2002 wurde in der Aktualisierung 2005 nicht verändert. Die Änderungen sind hauptsächlich definierender Art und konkretisieren bestimmte Sachverhalte. Dies reduziert Missverständnisse und verbessert die Anwendbarkeit der Verordnung.

Zum Beispiel definiert die MVStättVO 2005 nun, dass die Anforderungen an Bauteile in Versammlungsstätten analog zu Gebäuden der Gebäudeklasse fünf zu stellen sind (sofern die MVStättVO 2005 nichts Abweichendes festlegt) und schließt Erleichterungsmöglichkeiten der MBO aus [22]. Damit soll verhindert werden, dass durch die Einstufung einer Versammlungsstätte in eine niedrigere Gebäudeklasse geringere Bauteilanforderungen zum Tragen kommen und so das Sicherheitsniveau gesenkt wird [21].

Ein weiteres Beispiel für die Konkretisierung ist § 3 Abs. 3. In der MVStättVO 2002 fehlt die Aussage, dass in der Trennwand zwischen Bühne und Versammlungsraum eine Bühnenöffnung zulässig ist. Somit wären Theater mit abgesetztem Bühnenhaus nicht mehr genehmigungsfähig. Dieser Auslegung kommt man mit der Ergänzung in der MVStättVO 2005 zuvor und lässt eine Bühnenöffnung in der Trennwand zwischen Bühne und Versammlungsraum explizit zu [22].

Beispielhaft für die Berücksichtigung der bisherigen Erfahrungen mit der MVStättVO 2002 ist § 3 Abs. 6 zu nennen, der um eine Erleichterung ergänzt wurde, so dass Podien von nicht mehr als 20 m² Fläche keine (im Gegensatz zu größeren Flächen) nicht brennbare Unterkonstruktion benötigen. Zurückzuführen ist diese Erleichterung auf den Kulissenbau im Theater, der in der Regel auf Holz als Konstruktionsmaterial zurückgreift. Holz zählt zu den brennbaren Baustoffen und wäre somit nicht für die Errichtung kleiner Podien innerhalb des Bühnenbildes zulässig gewesen. Die hätte zur Folge, dass Podien im Bühnenbild aufwändig mit Stahl oder ähnlichen, nicht brennbaren, Baustoffen konstruiert werden müssten, obwohl eine Evakuierung der auf dem Podium befindlichen Personen aufgrund der geringen Anzahl (durch die begrenzte Fläche) sicher möglich ist, bevor die Konstruktion durch Brandbeaufschlagung nachgibt

³Korrekte Abkürzung für die Muster-Versammlungsstättenverordnung 2005 wäre MVStättV; erst mit Einführung der Muster-Versammlungsstättenverordnung 2014 wird diese mit MVStättVO abgekürzt; um Verwirrungen vorzubeugen hält sich diese Arbeit an die aktuelle Notation

[22].

Die MVStättVO 2005 wurde im Jahr 2010 nochmals durch die ARGEBAU aktualisiert, hierbei wurden lediglich Anpassungen an die aktuellen Ausbildungsverordnungen im Bereich der Verantwortlichen Personen vorgenommen.

2.1.5 Muster-Versammlungsstättenverordnung 2014

Auch die MVStättVO 2014 wurde nicht grundlegend neu aufgebaut, sondern behält den Aufbau der bisherigen Verordnung bei, wurde aber inhaltlich an vielen Stellen überarbeitet. Die MVStättVO 2014 wurde im Juli 2014 durch die „Fachkommission Bauaufsicht“ der ARGEBAU beschlossen und zur Einführung empfohlen. Neben der erforderlichen Anpassungen an die Terminologie der MBO 2012, wurden Definitionen in der Verordnung verschärft und konkretisiert. Weiterhin wurde der aktuelle Stand der Technik bei der Aktualisierung berücksichtigt und entsprechende Anpassungen durchgeführt. Die Anpassungen fallen deutlich zahlreicher und gravierender als 2005 aus.

Beispielhaft ist die Berechnungsformel für die maximale Anzahl der Besucher bei vorhandenen Stehplätzen zu nennen. Anstelle der Festlegung auf zwei Besucher pro Quadratmeter ist nun von mindestens zwei Besuchern pro Quadratmeter für die Berechnung der maximalen Besucheranzahl (und damit u.a. der erforderlichen Rettungswegbreiten) auszugehen (§1.. Abs 2 MVStättVO 2014). Es obliegt nun der genehmigenden Behörde, ob diese einer erhöhten Zuschaueranzahl zustimmt. Diese muss jedoch mit mindestens zwei Personen pro Quadratmeter berechnet werden. Bisher war eine Reduzierung der Besucheranzahl und die damit verbundenen Erleichterungen durch eine entsprechende Angaben in den Bauvorlagen möglich, dies soll im Hinblick auf die für alle Besucher geltenden Sicherheitsstandards ausgeschlossen werden [23].

Ein Beispiel für die Anpassung an die Terminologie der MBO ist in § 16 MVStättVO 2014 zu finden. Die Fachkommission Bauaufsicht hat im Oktober 2008 Grundsätze zur Auslegung des § 14 MBO festgelegt, nach denen die Rauchableitung nicht für die Menschenrettung benötigt wird, „wenn die grundlegenden bauordnungsrechtlichen Anforderungen insbesondere hinsichtlich der Standsicherheit im Brandfall, der brandschutztechnischen Raumtrennung und Abschnittsbildung und der ausreichenden Bemessung, Anordnung und Ausbildung der Rettungswege erfüllt und die erforderlichen betrieblich/organisatorischen Vorkehrungen und ggf. anlagentechnischen Maßnahmen einschließlich Alarmierung vorgesehen sind“ [23, S. 3]. Da in einer Versammlungsstätte die Rettung von Menschen nicht durch die Feuerwehr durchgeführt wird und davon ausgegangen wird, dass eine selbständige Evakuierung stattfindet, ist der Rauchabzug ausschließlich auf das Schutzziel der Brandbekämpfung ausgelegt [23].

2.1.6 Einführung Rettungswegbreiten

Die verschiedenen Verordnungen geben für unterschiedliche Räumlichkeiten verschiedene Ansätze zur Rettungswegbreitenermittlung vor. Dieses Kapitel beschäftigt sich ausschließlich mit Rettungswegbreiten in Versammlungsräumen⁴ und Räumlichkeiten, die für Zuschauer zu erreichen sind.

Bereits in der „Polzeiverordnung über die bauliche Anlage, die innere Einrichtung und den Betrieb von Theatern, öffentlichen Versammlungsräumen und Zirkusanlagen“ von 1909 sind Rettungswegbreiten definiert. Interessant ist hier die Staffelung der erlaubten Personen pro Breite. Innerhalb eines Theaterraumes sind pro 70 (in Rauchtheatern: 60) Besucher 1,00 m Gangbreite vorzusehen. Die Mindestbreite der Gänge und Türen innerhalb des Zuschauerraumes beträgt 0,90 m (in Rauchtheatern 1,20 m für Mittel- und 1,00 m für Quergänge). Die Vorplätze der Türen sind mit einer Mindestbreite von 1 m vorzusehen. Für den Zuschauerraum umgebende Flure gelten abweichende Ansätze. Die Mindestbreite eines Flures beträgt 3,00 m beziehungsweise 2,00 m, wenn sich dieser Flur gegenüber der Bühne befindet und die Einengung durch Rangerweiterungen verursacht wird. Für die Ermittlung der insgesamt notwendigen Flurbreite werden 80 Personen pro Meter herangezogen. Für Ausgänge ins Freie sieht die Polizeiverordnung als Berechnungsgrundlage 90 Personen pro Meter vor. Die Mindestbreite für einen Ausgang beträgt, wie im Zuschauerraum, 0,90 m [14].

Mit Einführung der VStättVO 1969 wurde die Mindestbreiten für Rettungswege überarbeitet. Die Berechnung der erforderlichen Breiten wurde vereinheitlicht, sodass für 150 Besucher jeweils 1,00 m Rettungsweg zur Verfügung stehen müssen. Die Mindestbreiten der jeweiligen wurden ebenfalls angepasst. In Versammlungsräumen müssen die Gänge 0,90 m breit sein. Flure benötigen eine Mindestbreite von 2,00 m und dürfen nicht weiter eingeengt werden. Die Mindestbreite aller übrigen Rettungswege (also auch der Ausgänge ins Freie) beträgt 1,00 m [18].

Die Maße der geforderten Rettungswegbreiten als auch die Bemessungsformel der notwendigen Breiten änderte sich mit Einführung der VStättVO 1978 nicht. Neu war allerdings die modulare Betrachtung der erforderlichen Rettungswegbreiten. Waren in der VStättVO 1969 noch alle Zwischenwerte erlaubt, durften nun nur noch Module von mindestens 0,50 m Breite eine Berücksichtigung bei der Anrechnung auf die erforderliche Rettungswegbreite finden [20].

⁴größer als 200 m²

Tabelle 1: Rettungswegbreiten der Verordnungen im Vergleich

	Polizei- verordnung 1909	VStättVO 1969 ^a	VStättVO 1978	MVStättVO 2002/2005	MVStättVO 2014
Rettungswegbreite	90 Pers. / 1,00 m	150 Pers. / 1,00 m	150 Pers. / 1,00 m	200 Pers. / 1,20 m	200 Pers. / 1,20 m
Rettungswegbreite pro Person	1,111 cm	0,667 cm	0,667 cm	0,6 cm	0,6 cm
Rettungswegbreite pro 100 Pers.	1,111 m	0,667 m	0,667 m	0,6 m m	0,6 m
Mindestrettungs- wegbreite	0,90 m	1 m ^b	1 m ^c	1,20 m	1,20 m
Modulbreite	nicht vor- handen	nicht vor- handen	0,50 m	0,60 m	nicht vor- handen

^aVStättVO NRW 1969

^bMindestbreite der Ausgänge und Türen

^cs. o.

Die MVStättVO 2002 vereinheitlicht nun alle Rettungsweganforderungen im überdachten Zuschauerbereich und gibt als Mindestbreite 1,20 m für einen Rettungsweg vor. Dies gilt gleichermaßen für Gänge, Türen und Ausgänge. Je 200 Besucher (im Freien: 600 Besucher) sind 1,20 m Rettungsweg erforderlich, gleichzeitig ist eine Staffelung der Rettungswegbreite in 0,60 m Schritten erlaubt. Zurückzuführen sind diese Werte auf den Entwurf der DIN-EN 13200-1:2001-08. Der Entwurf unterstellt einer Person eine benötigte Durchgangsbreite von 0,60 m. Ein Rettungsweg soll von mindestens zwei Personen gleichzeitig ohne Einschränkungen benutzt werden können, daher ist eine Mindestbreite von 1,20 m erforderlich. Der Entwurf DIN-EN 13200-1:2001-08 geht weiterhin davon aus, dass durch diese Mindestbreite 100 Personen in einer Minute evakuiert werden können. Die Fachkommission legt somit das Ziel für das Verlassen eines Raumes in einer Versammlungsstätte auf ca. zwei Minuten fest. Durch die Änderung der erforderlichen Rettungswegbreiten tritt gegenüber der bisherigen Verordnung eine leichte Reduzierung der erforderlichen Breite pro Person ein (vgl. Tabelle 1) [19]. Die MVStättVO 2005 beinhaltet gegenüber der MVStättVO 2002 keine Änderungen im Bereich der Rettungswegbreiten.

Mit Einführung der MVStättVO 2014 entfällt die im Jahr 1978 eingeführte diskrete Steigerung der Rettungswegbreiten. Ab einem Mindestmaß von 1,20 m je 200 Personen kann eine Interpolation der notwendigen Rettungswegbreite stattfinden. Der Entfall der modularen Staffelung der Rettungswegbreiten ist unter anderem auf die Neufassung der DIN-EN 13200-1 aus dem November 2012 zurückzuführen, die keine Modulbreiten für Rettungswege enthält. Außerdem ist bisher nicht nachgewiesen, dass

ausschließlich eine modulweise Steigerung der Ausgangsbreiten zu einer kürzeren Evakuierungszeit führt [23, 24].

Es ist zu erkennen, dass im Laufe der Entwicklung der Versammlungsstättenverordnung verschiedene Ansätze zur Ermittlung der Rettungswegbreiten verfolgt wurden. Mit fortwährender Entwicklung der Verordnung und neuen Erkenntnissen, war es möglich die Anforderungen für Rettungswegbreiten genauer zu definieren. Deutlich wird dies insbesondere im Umbruch zwischen der VStättVO 1978 und der MVStättVO 2002. Durch die Anwendung der modularen Rettungswegbreite auf Grundlage der Schulterbreite (vgl. [25]) und der Mindestbreite von 1,20 m konnte eine effektivere Nutzung der Rettungswegfläche erreicht werden. Zudem kann durch die Mindestbreite von 1,20 m eine Bogenbildung und eine damit verbundene Verstopfung vor den Ausgangstüren reduziert werden[26]. Die Weiterentwicklung des Ansatzes der effektiveren Nutzung führte dann in der MVStättVO 2014 zur Auflösung der modularen Aufbauweise von Rettungswegen.

2.2 Grundlagen

Dieser Abschnitt erläutert die Grundlagen der Entfluchtung und der Evakuierungsrechnung. In diesem Zusammenhang werden auch verschiedene Modelle zur Berechnung von Evakuierungszeiten vorgestellt und ein kurzer Einblick in den aktuellen Stand der Forschung gegeben.

2.2.1 Grundlagen der Entfluchtung

Als Entfluchtung wird die

„Fortführung von Menschenmengen aus einer Gefahrenzone“ [27]

bei Großereignissen oder Notfällen beschrieben. Der Entfluchtung geht demzufolge ein auslösendes Ereignis voraus. Bezogenen auf eine Versammlungsstätte könnte dies eine technische Fehlfunktion einer Sicherheitseinrichtung, ein Brandereignis oder eine terroristische Handlung sein. In allen Fällen ist eine möglichst geordnete Evakuierung der Versammlungsstätte anzustreben, um eine Panik zu vermeiden und die Gefährdung der anwesenden Personen möglichst gering zu halten. Um diese Minimierung zu erreichen, ist es notwendig, eine möglichst kurze Räumungszeit der Versammlungsstätte anzustreben [28].

Die individuell benötigte Zeit zur Flucht wird als $t_{i,Flucht}$ bezeichnet und setzt sich laut [29, 1] aus verschiedenen, zum Teil individuellen, Zeiten zusammen:

$$t_{i,Flucht} = t_{detekt} + t_{Alarm} + t_{i,Reaktion} + t_{i,Lauf}$$

Während t_{detekt} und t_{Alarm} für alle anwesenden Besucher gleich sind, hängen $t_{i,Reaktion}$ und $t_{i,Lauf}$ von den individuellen Eigenschaften des Flüchtenden ab (vgl. Abbildung 1). t_{detekt} beschreibt die Zeit bis ein Schadensereignis, welches zur Räumung führt, entdeckt wird. Diese Dauer kann durch technische Ausrüstung (z.B. Brandmeldeanlage mit automatischen Rauchmeldern) verkürzt werden. Unmittelbar mit der Detektionszeit ist t_{Alarm} verknüpft. Diese Zeit beschreibt, wie lange es nach der Detektion dauert, bis ein Alarm ausgegeben wird, der zur Entfluchtung führt.

Als $t_{i,Reaktion}$ wird die individuelle Reaktionszeit eines Besuchers nach Wahrnehmung des Alarmsignals bis dieser mit der Räumung beginnt beschrieben. Zur Bestimmung der individuellen Reaktionszeit sieht die Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen (RIMEA) auf Grundlage der Untersuchungen von Purser [30] ein Tabellensystem vor, aus dem je nach Zusammensetzung der anwesenden Besucher, eine Spanne von Reaktionszeiten ausgegeben wird [1, S. 55 - 57].

$t_{i,Lauf}$ benötigt der Besucher, um von seiner individuellen Position bis zu einem Ausgang

in einen sicheren Bereich zu gelangen. $t_{i,Lauf}$ ist darüber hinaus von weiteren Faktoren (z.B. mögliche Laufgeschwindigkeit, Stauungen, körperliche Konstitution) abhängig [29].

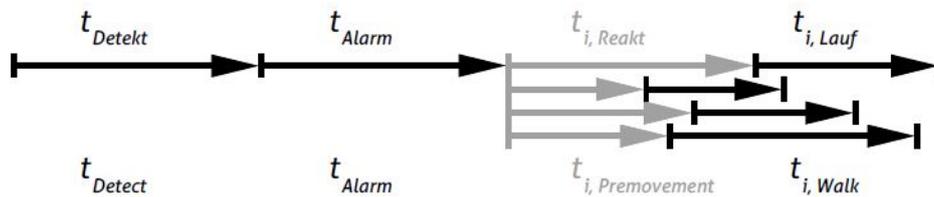


Abbildung 1: Individuelle Zusammensetzung von t_{Flucht} [1]

Die Entfluchtungszeit (t_{Flucht}) richtet sich nach dem langsamsten Individuum, welches das Gebäude verlassen soll:

$$t_{Flucht} = \max(t_{i,Flucht})$$

Für eine belastbare Aussage zur Dauer einer Entfluchtung ist das Durchführen mehrerer Entfluchtungsvorgänge notwendig, aus denen sich dann eine Gesamtentfluchtungszeit (T_{Flucht}), eine minimale bzw. maximale Gesamtentfluchtungszeit ($t_{Flucht,min}$ und $t_{Flucht,max}$), die mittlere Entfluchtungsdauer ($t_{Flucht,mittel}$) und die signifikante Gesamtentfluchtungsdauer ($t_{Flucht,signifikant}$) berechnen lassen:

$$T_{Flucht} = \max(t_{i,Flucht})$$

$$t_{Flucht,min} = \min(t_{Flucht})$$

$$t_{Flucht,max} = \max(t_{Flucht})$$

$$t_{Flucht,mittel} = \bar{x}(t_{Flucht})$$

$t_{Flucht,signifikant}$ entspricht der Dauer, die einen festgelegten Anteil (meist 95 Prozent) aller Gesamtentfluchtungsdauern umfasst.

2.2.2 Grundlagen der Entfluchtungsberechnung

Für die Berechnung der Evakuierungszeit eines Gebäudes gibt es verschiedene Ansätze, die in diesem Kapitel kurz erläutert werden sollen. Grundsätzlich kann man die Entfluchtungsberechnung in zwei Bereiche aufteilen:

- Makroskopische Modelle
- Mikroskopische Modelle

Makroskopische Modelle

Makroskopische Modelle bieten eine leicht nachvollziehbare Möglichkeit Entfluchtungszeiten zu berechnen und werden auch als hydraulische Modelle oder Strömungsmodelle bezeichnet. Die Modelle basieren dabei ausschließlich auf den für einen Personenstrom relevanten Teilen eines Rettungsweges. Für alle Makroskopischen Modelle gelten folgende Annahmen [31]:

- keine individuelle Reaktionszeit innerhalb des Personenstroms
- fortwährender Personenstrom (keine Lücken innerhalb der Personengruppe)
- gleiche Mobilitätsvoraussetzungen aller Personen innerhalb der Gruppe

Die einfachste Form der Entfluchtungsberechnung und der makroskopischen Betrachtung sind sogenannte Kapazitätsberechnungen. Für eine Kapazitätsberechnung muss die engste Stelle auf einem Fluchtweg betrachtet werden. Anhand der dort maximal möglichen Kapazität errechnet sich die Räumungszeit des zu evakuierenden Gebäudes. Es findet keine Berücksichtigung von Einflussgrößen außerhalb oder innerhalb der flüchtenden Gruppe statt, so können zum Beispiel Stauungen oder dichteabhängige Geschwindigkeitsverluste nicht berücksichtigt werden [32, 31].

Soll die Dichte eines Personenstroms mitberücksichtigt werden, so kann man auf dynamische Strömungsmodelle zurückgreifen. Dynamische Strömungsmodelle beziehen Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit und Dichte der Personenströme mit in die Berechnungen ein und greifen hierbei auf empirisch erhobene Daten zurück. Bekanntestes Beispiel für ein dynamisches Strömungsmodell ist das Modell von *Predtetschenski* und *Milinski*. Es basiert im Wesentlichen auf einer empirisch entwickelten Sammlung an Korrelationsfunktionen, welche die Geschwindigkeit eines Personenstrom unter Berücksichtigung der Bewegungsart und der Dichte auf dem zu durchschreitenden Wegabschnitt angibt (vgl. Kapitel 2.2.3). Zusätzlich ist es möglich Stauungen auf dem Rettungsweg mit in die Zeitberechnung einfließen zu lassen. Dies geschieht auf Basis der Durchlässigkeit eines Wegabschnittes. Ist die Durchlässigkeit eines Abschnitts

größer als die des dahinterliegenden Abschnitts, muss dies bei der Berechnung der benötigten Abschnittszeit berücksichtigt werden. Die Gesamtentfluchtungszeit ergibt sich bei diesem Modell aus der Summe der errechneten Zeiten für jeden Teilabschnitt des Rettungsweges [31, 32].

Weitere Form der makroskopischen Modelle sind sogenannte Netzwerkmodelle. In Netzwerkmodellen werden entscheidende Abschnitte der Räumungswege als verbundene Knoten in einem System dargestellt. Die Passierbarkeit der Netzwerkknoten wird ebenfalls durch empirisch ermittelte Dichteabhängigkeit des spezifischen Personenstroms bestimmt. Es können durch die Netzwerkstruktur individuelle Bewegungen in einer Gruppe (z.B. Fluchtwegalternativen, Mobilitätseinschränkungen) bis zu einem bestimmten Grad berücksichtigt werden [31].

Die meisten Makroskopischen Modelle lassen sich durch die Reduzierung auf wesentliche Elemente der Rettungswege oftmals gut nachvollziehen und bieten eine Alternative zur deskriptiven Vorgehensweise der verschiedenen baurechtlichen Verordnungen. Allerdings muss man aufgrund der stark vereinfachten Annahmen über eine Personengruppe davon ausgehen, dass die ermittelten Evakuierungszeiten als eher zu gering einzuordnen sind und entsprechende Sicherheitsreserven berücksichtigt werden müssen [31].

Mikroskopische Modelle

Neben den Makroskopischen Modellen, die meist in Handrechenverfahren durchgeführt werden können, haben mit zunehmender Nutzung von Computern mikroskopische Modelle zur Entfluchtung an Bedeutung gewonnen. Mikroskopische Modelle erfordern je nach Detaillierungsgrad und Umfang der Simulationsumgebung entsprechende Rechenleistung der eingesetzten Computer, da jede zu evakuierende Person individuell dargestellt wird und separat simuliert werden muss. Dieser entscheidende Unterschied zu Makroskopischen Modellen führt dazu, dass ein mikroskopisches Modell auf die Eingabe einer vorgegebenen dichteabhängigen Gehgeschwindigkeit verzichtet. Die mögliche Gehgeschwindigkeit innerhalb der Masse ist das Ergebnis der Simulation, basierend auf den Eingaben durch den Nutzer. Zusätzlich zu den geometrischen Voraussetzungen ist es in mikroskopischen Modellen möglich, individuelle Parameter der zu simulierenden Agenten⁵ anzugeben. Hierzu gehören neben Mobilitätseinschränkungen (und damit verbundene Maximalgeschwindigkeiten etc.) auch Charakteristika der Agenten, die Auswirkungen zum Beispiel auf die Fluchtroutenwahl haben. Diese Eigenschaften lassen sich in den meisten Computerprogrammen vor jedem

⁵Zu simulierende Personen werden zur Unterscheidung von realen Personen auch Agenten genannt

Simulationsdurchlauf zufällig auf die Agenten verteilen, sodass nach jedem Durchlauf verschiedene Ergebnisse erzielt werden. Durch die so erzielten Ergebnisse können ungünstige Resultate direkt berücksichtigt werden, ohne das Idealergebnisse mit Sicherheitszuschlägen versehen werden müssen. Mikroskopische Modelle werden aufgrund ihrer individuell zuweisbaren Eigenschaften auch Individualmodelle genannt [33, 31]. Durch die Auflösung der zu simulierenden Geometrie werden weiterhin zwei Typen von Mikroskopischen Modellen unterschieden:

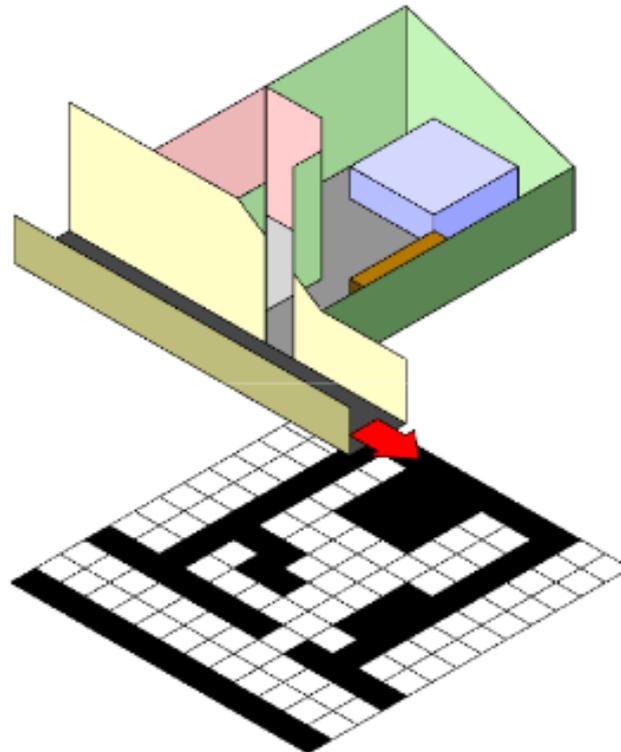


Abbildung 2: Diskretisierung des Grundrisses am Beispiel eines Raums [2, S. 14]

Als räumlich **diskrete Modelle** werden Computersimulationsprogramme bezeichnet, die einen zu simulierenden Raum in ein Zellraster unterteilen. Programme, die diese diskreten Modelle verwenden, werden auch Zellularautomaten genannt. Übliche Rastergröße in Zellularautomaten ist zumeist 0,40 m x 0,40 m (zum Beispiel Computerprogramm *PedGo*). Das so entstehende Gitter wird über die Geometrie der Simulationsmodelle gelegt (vgl. Abbildung 2) und in für Agenten zugängliche Rechtecke und nicht zugängliche Rechtecke eingeteilt. Durch die Reduzierung auf die verwendete Gittergröße nimmt der Detaillierungsgrad der Umgebung ab. Ein Agent belegt in der Simulation eine Zelle und bewegt sich von Zelle zu Zelle auf sein Ziel zu. Dabei berücksichtigt er neben seinen eigenen Eigenschaften (z.B. Zielort) auch andere Agenten (als blockierte Zelle) und Umgebungsbedingungen. Der Agent passt seine Verhaltensweise

hinsichtlich dieser Eingaben an. Durch die rasterbedingten Einschränkungen können individuelle Mobilitätsparameter (z.B. Gehgeschwindigkeit) der Agenten nicht hinreichend berücksichtigt werden. Hierin begründet sind auch Defizite bei der Simulation der individuellen Bewegungsrichtung der Agenten (meist nur rechtwinkliger Übergang von Zelle zu Zelle möglich) [33, 31].

In räumlich **kontinuierlichen Modellen** werden Grundrisse der Simulationsmodelle detailgetreu nachgebildet. Begrenzt werden diese Modelle nur durch tatsächliche Wände und/oder Hindernisse im Weg der Agenten. Der mögliche Detailgrad der Modelle ist dadurch erheblich höher, als bei räumlich diskreten Modellen. Durch die fehlende Rastereinteilung können die Agenten mit beliebigen Körpermaßen simuliert werden. Den Agenten ist es möglich jede, mit ihren Körpermaßen erreichbare Stelle im Modell zu benutzen und diese durch individuelle Bewegungen zu erreichen. Durch die freie Raumeinteilung und individuell anpassbare Körpereigenschaften eignen sich räumlich kontinuierliche Modelle besonders, um Auswirkungen von geänderten Simulationseingaben zu ermitteln. Dies gilt insbesondere, wenn es sich um geringe Modellanpassungen oder Einschränkungen der Mobilitätsparameter handelt. Die Verhaltensweisen der Agenten werden entweder durch starre Grenzwertregeln oder aufgrund von aus der Physik entnommenen und auf die Personendynamik angepassten Kraftbeziehungen bestimmt. Durch die Vielzahl der Eingabemöglichkeiten und Reaktionsmöglichkeiten benötigen kontinuierliche Modelle normalerweise mehr Rechenleistung als diskrete Modelle [33, 31].

2.2.3 Stand der Forschung

Diese Kapitel soll einen kurzen Einblick in Entwicklung und den Stand der Forschung über Personenstromanalyse ermöglichen. Dabei wurde bei der Auswahl der Forschungsarbeiten auf einen Bezug zur hier bearbeiteten Fragestellung geachtet. Die Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Predtečenskij/Milinski (1969)

Als erste umfangreiche Datensammlung zum Verhalten und zur Berechnung von Personenströmen ist das Praxishandbuch von Predtečenskij und Milinski aus dem Jahr 1969 zu nennen. Die deutsche Übersetzung [34] erschien 1971. Es handelt sich um eine makroskopische Methode, welche die Umgebungsbedingung in der die Bewegungen stattfinden, in komfortable Bedingungen, normale Bedingungen und Gefahrenbedingungen klassifiziert. Predtečenskij und Milinski bauten ihre Berechnungsansätze auf Ergebnissen aus ca. 800 Beobachtungen auf und entwickelten daraus die Personendichte, welche nicht als Personen pro Fläche sondern als Belegungsgrad einer Fläche

$$D = \frac{\sum f}{b * l_{\text{Strom}}}$$

angegeben wird. $\sum f$ steht dabei für die summierte Fläche der Einzelpersonen, während $b * l_{\text{Strom}}$ die Fläche des gesamten Personenstroms angibt. In den Beobachtungen wird ein maximaler Belegungsgrad von 0,92 beobachtet, was einer belegten Fläche von 92 Prozent entspricht. Eine entsprechende Umrechnung diesen Wertes mit der von Predtečenskij und Milinski angenommen mittleren Projektionsfläche eines Menschen ($0,113 \text{ m}^2$) ergibt eine Personendichte von 8,14 Personen pro Quadratmeter. Dieser Wert kann weiter gesteigert werden, wenn die verbleibende Freifläche durch Formveränderung der Personen ausgenutzt wird oder die Fläche der Personen durch zusammendrücken abnimmt[4].

In Abhängigkeit der Belegungsichte kann die Geschwindigkeit einer Person im Personenstrom ermittelt werden. Für Normale Bedingungen auf einem horizontalen Weg mit $D \leq 0,92$ gilt:

$$v = (112 * D^4 - 380 * D^3 + 434D^2 - 217 * D + 57) * m/min$$

Diese Formel kann mittels Koeffizienten an andere Umgebungsbedingungen angepasst werden [34, 4].

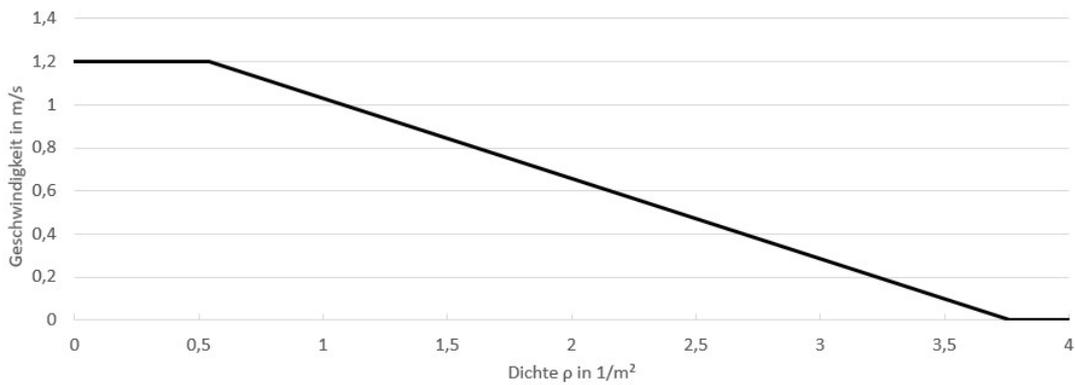


Abbildung 3: Darstellung des Verhältnisses von Geschwindigkeit und Dichte der Personenströme nach Nelson und Mowerer. Eigene Darstellung nach [3, 4]

Nelson/Mowrer 2002

Eine weitere wichtige Arbeit im Bereich der Personenstromberechnung sind die Empfehlungen zur Berechnung von Evakuierungsvorgängen [3] von Nelson und Mowerer im *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* 2002 [35]. Die Berechnungen dieser Arbeit sind zum Teil auch in die hier verwendete Simulationssoftware *Pathfinder* eingeflossen und stehen dort als Simulationseinstellung für die Agenten zur Verfügung (vgl. Kapitel 2.3.1) [4].

Mit Verweis auf die Arbeit von Predtečenskij/Milinski [34], sowie unter Bezugnahme auf Veröffentlichungen von Fruin [36] und Pauls [37] nehmen Nelson und Mowerer an, dass Personen innerhalb von Türöffnungen, Rampen und Gängen bis zu einer Dichte von $\rho = 0,54 \text{ m}^{-2}$ eine freie Gehgeschwindigkeit von 1,2 m/s erreichen können. Die maximale Dichte, bis zu der Bewegung möglich ist, wird mit $\rho = 3,76 \text{ m}^{-2}$ angenommen. Zwischen diesen Dichten wird eine lineare Verringerung der Geschwindigkeit beschrieben (vgl. Abbildung 3) [4, 3].

Seyfried et al. (2007)

Seyfried et al. untersuchten im Jahr 2007 die Veränderung eines Personenflusses durch Engstellen verschiedener Breite und veröffentlichten die Ergebnisse im Artikel *New insights into pedestrian flow through bottlenecks* [5]. In den Experimenten sollte neben dem Einfluss der Engstellenbreite auch der Einfluss eines möglichen Reißverschluss-effektes auf den Personenfluss betrachtet werden.

Für die Untersuchung wurde eine Personengruppe von 20, 40 oder 60 Personen angewiesen eine Engstelle energisch, aber nicht hektisch zu passieren. Die Breite der Engstelle war variabel, sodass Breiten zwischen 0,80 m und 1,20 m (Staffelung 0,10 m) untersucht werden konnten. Die Versuchsteilnehmer hielten sich zu Beginn des Experiments in 3,00 m Entfernung zur Engstelle auf. In diesem Wartebereich betrug die Dichte

Tabelle 2: Spezifischer Fluss pro Engstellenbreite und Teilnehmerzahl [5]

b [m]	$J_s [ms]^{-1}$		
	$\Delta N=60$	$\Delta N=40$	$\Delta N=20$
0,8	1,61	1,77	1,86
0,9	1,86	1,91	2,06
1,0	1,90	2,08	2,19
1,1	1,93	1,93	1,78
1,2	1,97	1,81	2,31

$\rho = 3,30 \text{ m}^{-2}$. Zur Auswertung der Experimente wurden Filmaufnahmen durchgeführt [5].

In einer ersten Auswertung wurden die Durchläufe mit den verschiedenen Engstellenbreiten hinsichtlich des spezifischen Flusses

$$J_s = \frac{\Delta N}{\Delta t * b} [ms]^{-1}$$

untersucht. Δt beschreibt das Zeitintervall zwischen der ersten und letzten Person an der Mitte der Engstelle. In Tabelle 2 sind die spezifischen Flüsse der unterschiedlichen Durchläufe dargestellt [5].

Seyfried et al. vermuten, dass der für $N = 60$ erkennbare, leichte Anstieg des spezifischen Flusses auf den beginnenden Einfluss des Reißverschlusseffektes zurückzuführen ist. Um dieser Vermutung nachzugehen werden anhand der Videoauswertungen für jeden Probanden Trajektorien der Laufbahn erstellt. An den erstellten Trajektoriediagrammen ist zu erkennen, dass sich ab einer Engstellenbreite von 0,90 cm zwei Lauflinien abbilden, welche sich bis zu einer Breite von 1,20 m deutlich abzeichnen (vgl. Abbildung 4). Neben der beobachteten Ausbildung der zwei Lauflinien, verkürzen sich die Abstände zwischen hintereinander laufenden Personen [5].

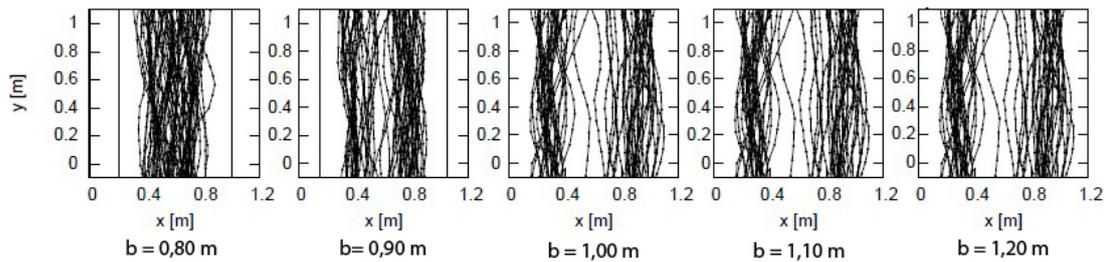


Abbildung 4: Darstellung der Trajektorien bei verschiedenen Breiten der Engstelle, bearbeitet nach [5]

Aus diesen Erkenntnissen leiten Seyfried et al. einen linearen Zusammenhang von spezifischem Fluss und Engstellenbreite aufgrund des einsetzenden Reißverschluss-effektes ab. Weiterhin wird beim Vergleich der Ergebnisse mit weiteren experimentellen Arbeiten herausgestellt, dass der Reißverschluss-effekt ab einer ungefähren Engstellenbreite von 0,70 m beobachtet werden kann und Einfluss auf den spezifischen Fluss ausübt [5].

Forschungsprojekt „HERMES“ (2008 - 2011)

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Forschungsprojekt „HERMES“ entwickelte zwischen 2008 und 2011 einen Evakuierungsassistenten für Großveranstaltungen in Stadien. Der Evakuierungsassistent sollte präzise Aussagen über die Bewegungen aller anwesenden Besucher einer Veranstaltung innerhalb der nächsten 15 Minuten ermöglichen und diese an die Sicherheitsbehörden zur Unterstützung weitergeben können. Dies machte es nötig, die Simulation schneller als in Echtzeit durchzuführen [38].

Zu diesem Zweck wurden im Rahmen eines Teilvorhabens des Projektes zunächst Laborexperimente zur Ermittlung von Basisgrößen der Fußgängerdynamik durchgeführt. Die ermittelten Kennwerte sollten zur Kalibrierung und Überprüfung der zu entwickelnden Modelle dienen. Um die experimentellen Daten mit mikroskopischen Modellen vergleichen zu können, wurde ein Messverfahren auf Grundlage einer Voronoi-Zerlegung entwickelt. Im weiteren Projektverlauf wurde zur mikroskopischen Simulation das für einfache Geometrien in einem anderen Projekt entwickelte „Generalized Centrifugal Force Model“ grundlegend überarbeitet und zur Verknüpfung mit weiteren Simulationsmodellen vorbereitet. Darüber hinaus wurde eine dynamische Routenwahl der Agenten in das Modell implementiert. Grundlage der Daten über die Routenwahl bildete eine empirische Studie normaler Entleerungen der ESPRIT-Arena Düsseldorf mithilfe einer Personenzählanlage [6].

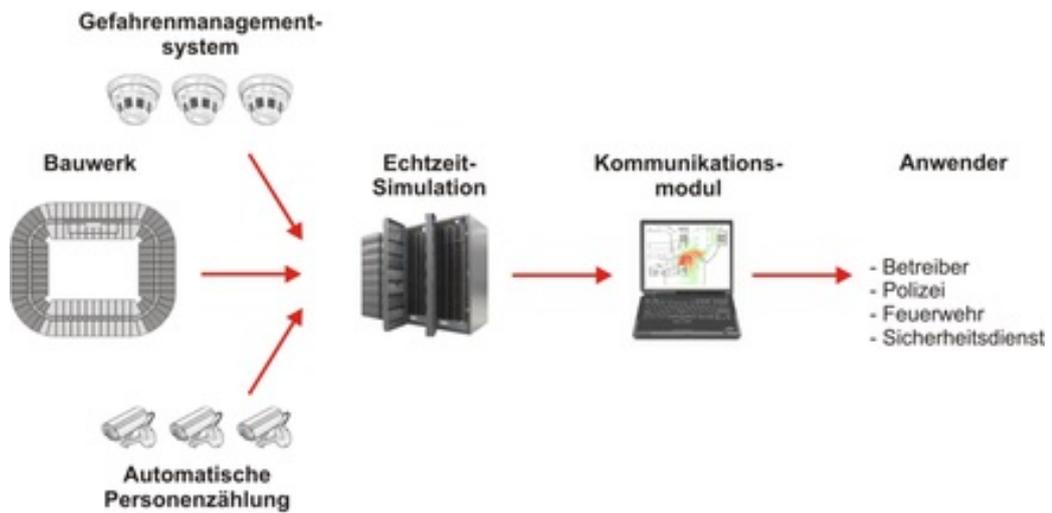


Abbildung 5: Darstellung des schematischen Aufbaus des Evakuierungsassistenten [6]

Zur Berechnung des Evakuierungsverlaufs für den Evakuierungsassistenten wurden neben dem mikroskopischen Modell zwei Zellularautomaten auf einem Parallelcomputer eingesetzt. Der Computersimulation standen Informationen aus dem Gefahrenmanagementsystems, sowie Daten der Besucherverteilung auf den Tribünen durch eine, mithilfe automatisierter Bildauswertung durchgeführten, Personenzählung zur Verfügung (vgl. Abbildung 5). Die Testphase zeigte gute Ergebnisse der Modellberechnungen in uni- und bidirektionalen Strömungen, jedoch konnten multidirektionale Personenströme nur unzureichend modelliert werden [6, 38].

2.3 Methode

Grundlage der Fragestellung dieser Arbeit sind die deskriptiven Vorschriften der Bauordnung beziehungsweise der MVStättVO. Es ist allerdings möglich von den vorliegenden deskriptiven Vorschriften abzuweichen, wenn der Nachweis erbracht werden kann, dass trotz eingebrachter Abweichung die Erfüllung der Schutzziele gewährleistet ist. Der Nachweis über die Erfüllung kann durch die Anwendung von Ingenieursmethoden geführt werden. Im Bereich des baulichen Brandschutzes sind viele verschiedene Methoden anerkannt und erprobt. Die Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb) hat anerkannte Methoden mit Anwendungshinweisen im „Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [31] veröffentlicht.

Auf Grundlage der Möglichkeit der Anwendung von Ingenieursmethoden im Bereich des Bauordnungsrechts greift diese Arbeit auf die Personenstromanalyse zur Beurteilung der deskriptiven Vorschriften der MVStättVO 2014 zurück. Zur Anwendung kommt ein computergestütztes Simulationsprogramm (vgl. Kapitel 2.3.1) unter der Berücksichtigung der Hinweise im „Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [31] und der RIMEA [1]. Die aus der Simulation gewonnenen Erkenntnisse können einen ersten Anhaltspunkt für eine zukünftige Regelung in der VStättVO Hamburg liefern.

In diesem Kapitel wird kurz das für diese Arbeit verwendete Simulationsprogramm, sowie die darin getätigten Eingaben vorgestellt. Ziel ist es die Eingaben so darzustellen, dass die Ergebnisse reproduzierbar sind.

2.3.1 Simulationsprogramm Pathfinder

Das Simulationsprogramm *Pathfinder* teilt sich in zwei eigenständige Programmmodule auf. Die Simulationserstellung und die eigentliche Simulation finden im Programm *Pathfinder* in der zum Erstellungszeitpunkt dieser Arbeit aktuellsten Version 2019.3.1217 x64 statt. Die Ergebnisse der Simulation werden im Programmteil *Pathfinder Results* mit gleicher Versionsnummer dargestellt. Beide Module sind mit grafischer Benutzeroberfläche ausgestattet und ermöglichen in verschiedenen Menüs die Einstellungen für den Simulationsablauf zu tätigen. Der Menüweg zu den, im Text erwähnten, Einstellungsfenstern wird bei Bedarf in Klammern dargestellt.

Das hier verwendete Programm *Pathfinder* wird von der amerikanischen Firma *Thunderhead Engineering* entwickelt und kommerziell vertrieben. Die Software ist für die professionelle Anwendung gedacht. Kombiniert werden kann die Personenstromsimulation mit *PyroSim*, einer Feuer- und Rauchsimulation vom gleichen Hersteller. Für diese Arbeit wurde seitens *Thunderhead Engineering* eine kostenlose Programmvollversion für Bildungs- und nicht kommerzielle Zwecke zur Verfügung gestellt. Diese Programmver-

sion ist auf eine Laufzeit von sechs Monaten beschränkt.

Pathfinder ist eine Simulationssoftware für mikroskopische Evakuierungssimulationen mit räumlich kontinuierlicher Darstellungsweise und bietet die Möglichkeit, neben einer tabellarischen Auswertung der Entfluchtungszeiten, die Entfluchtung in einem dreidimensionalen Modell darzustellen. Die Software bietet die Möglichkeit, Modelle anhand einer CAD-Zeichnung zu importieren oder die Modelle im Programm selbst zu zeichnen. Bei der Erstellung komplexer Modelle sollte allerdings auf eine CAD-Software zurückgegriffen werden, da die Erstellungsmöglichkeiten in *Pathfinder* begrenzt sind. Die Agenten können durch *Pathfinder* in vom Nutzer festgelegten Flächen verteilt werden und können in unterschiedlicher Weise dargestellt werden, wobei die Darstellungsweise keinen Einfluss auf die spätere Simulation hat. Als *occupant*-Modelle voreingestellt sind Zylinder mit Pfeil für die angenommene Blickrichtung. Jeder der hinzugefügten Agenten wird einzeln simuliert und verfügt über individuelle Eigenschaften. Der tatsächliche Flächenbedarf der Agenten im Laufe der Simulation ergibt sich aus den Parametern, welche den einzelnen Agentengruppen zugeteilt werden. Die Parameter können über Verteilungsfunktionen zufällig verteilt werden oder einem konstanten Wert entsprechen [39, 40, 41].

In *Pathfinder* können für die Simulation zwei verschiedene Modi für das Verhalten der Agenten untereinander ausgewählt werden (Simulation → Simulation Parameters → Behavior).

Im Modus „SFPE“ basiert *Pathfinder* auf den Annahmen des *SFPE Engineering Guide: Human Behavior in Fire* [42]. Es handelt sich dabei um die Annahme eines Flussmodells, welches Räume als freie Flächen interpretiert, in denen die Agenten ihre maximale Laufgeschwindigkeit erreichen können. Die tatsächlich erreichbaren Laufgeschwindigkeiten werden durch einen dichteabhängigen Faktor bestimmt und reduzieren sich linear (vgl. Kapitel 2.2.3). Treppen werden mit einer geringeren Maximalgeschwindigkeit simuliert, haben ansonsten aber keinen Einfluss auf die Simulation. Entscheidend für die Evakuierungszeit im Modus „SFPE“ sind, neben der möglichen Gehgeschwindigkeit, die Durchlassgeschwindigkeiten der Türen in Verbindung mit den dadurch resultierenden Wartezeiten. In diesem Modus können zwei Agenten an der selben Stelle im Modell stehen, da sie nicht aufeinander reagieren [43, 44].

Der zweite, standardmäßig ausgewählte, Modus ist der von *Thunderhead Engineering* entwickelte „Steering“-Modus. Der „Steering“-Modus versucht das menschliche Verhalten nachzustellen. Zu diesem Zweck wird das Bestreben der Agenten simuliert, nicht mit anderen Agenten und/oder Hindernissen der Umgebung zusammenzustoßen und dennoch schnellstmöglich den angepeilten sicheren Bereich zu erreichen. Um sich dem

menschlichen Verhalten anzunähern, setzt der Hersteller auf ein Absinken des Wohlfühlabstands zwischen zwei Agenten innerhalb einer Engstelle. In Abhängigkeit des Abstands zu anderen Agenten und der daraus resultierenden Dichte der Agenten reduziert sich die Gehgeschwindigkeit der Agenten. Die Agenten werden dabei als Zylinder mit einer Schulterbreite von 45,58 cm simuliert. Im „Steering“-Modus ist es den Agenten möglich ihren ursprünglichen Pfad zu verlassen, wenn sie einen besseren (schnelleren) Weg zu ihrem gewünschten Ziel finden. In dieser Arbeit wird der „Steering“-Modus als Simulationsmodus verwendet [43, 44].

Pathfinder erfüllt die Vorgaben der RIMEA und hat mit der Version 2018.4.1210 alle in der Richtlinie aufgeführten Testfälle erfolgreich simulieren können. [41]. Weitere Validierungen der Software werden durch den Hersteller selbst durchgeführt und im Dokument „Pathfinder - Verification and Validation“ [43] auf der Internetseite des Herstellers veröffentlicht.

2.3.2 Simulationseingaben

Dieser Abschnitt beschreibt die zur Reproduktion der Ergebnisse notwendigen Eingaben in *Pathfinder*, stellt jedoch keine abschließende Anleitung zur Nutzung des Simulationsprogramms dar. Weitergehende Informationen zur Benutzung von *Pathfinder* können dem Benutzerhandbuch [39] entnommen werden. Die in dieser Arbeit verwendeten Simulationsparameter entsprechen den Standardeinstellungen von *Pathfinder*. Screenshots dieser Einstellung sind im Anhang hinterlegt. Sind Abweichungen von diesen Voreinstellungen nötig (z.B. bei der Reaktionszeit), so sind diese separat beschrieben.

Simulationsmodelle

Für die Simulation der Evakuierung einer Versammlungsstätte mit *Pathfinder* wird ein Modell einer Versammlungsstätte benötigt. Da die Grundrisse realer Veranstaltungsstätten im Bereich der Rettungswege oftmals auf die erforderlichen Breiten abgestimmt sind und sich diese an den maximal zulässigen Besuchern orientieren, war es notwendig im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Evakuierungszeiten eigene Modelle zu entwickeln. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Aspekte (Rettungsweg ohne Treppen, Treppen im Rettungsweg, interpoliert berechnete Treppen), die bei der Evakuierung über interpolierte Rettungswegbreiten betrachtet werden müssen, wurden insgesamt drei Modelle einer Versammlungsstätte entwickelt. Die Modelle sind rein fiktiv, entsprechen aber in ihrer Gestaltung einer real möglichen Versammlungsstätte und berücksichtigen typische Gestaltungskriterien einer Versammlungsstätte (z.B. rechteckige Gestaltung des Veranstaltungsraumes, Bühne auf der schmalen Seite des Raumes

Modell 1
Erdgeschoss

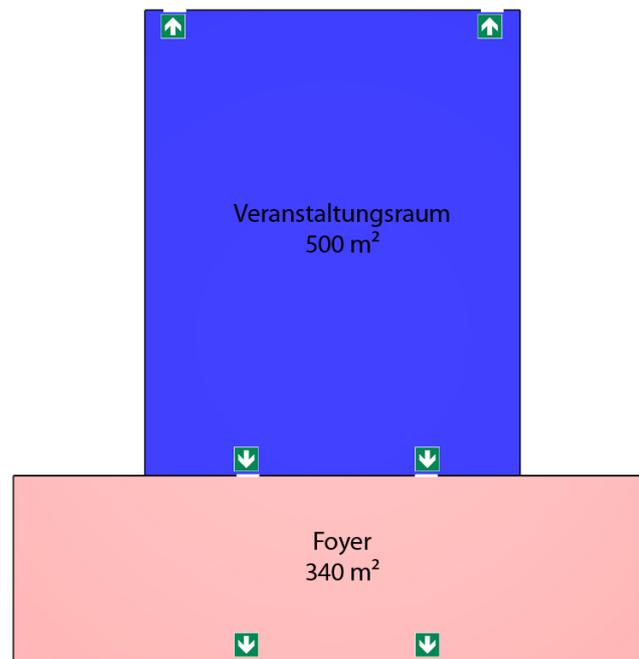


Abbildung 6: Grundriss Modell 1

etc.). Um die Übersichtlichkeit der Modelle zu erhöhen, wurde auf Bereiche verzichtet, welche nicht für den Besucher zugänglich sind (z.B. Bühnenhaus, Garderoben, etc.). Sichere Bereiche erreichen die Agenten, indem sie durch die Ausgänge ins Freie gehen. Mit Verlassen des Gebäudes endet die Simulation.

Die Modelle wurden mit dem in *Pathfinder* integrierten Editor erstellt. Auf eine Erstellung einer CAD-Zeichnung im Vorfeld wurde aufgrund der einfach geplanten Geometrie verzichtet. Der Editor arbeitet mit Innenmaßen der zu simulierenden Räume. Die Wände der Räume werden ohne Breite simuliert, blockieren aber für die Agenten den Zugang zum angrenzenden Raum. Auf eine dreidimensionale Darstellung der Wände wird zu Gunsten der Übersichtlichkeit verzichtet. Benötigte Treppen werden mit den in *Pathfinder* voreingestellten Werten (Auftritt: 27,94 cm, Stufenhöhe: 17,78 cm) angelegt. Diese Werte liegen im Rahmen der DIN 18065:2015-03 (Gebäudetreppen) [45].

Modell 1

Die Versammlungsstätte in Modell 1 (vgl. Abbildung 6) ist eine rein erdgeschossige Versammlungsstätte mit einer Raumhöhe von 6 m. Das Gebäude besteht aus einem Versammlungsraum und einem, als Foyer genutzten, Vorraum. Der Versammlungsraum besitzt eine Grundfläche von 500 m². Die Grundfläche des Foyers beträgt 340 m². Als Position der Bühne wird die Wand gegenüber des Foyers angenommen. Im Versammlungsraum sind vier Ausgänge vorhanden. Zwei (Not-)Ausgänge befinden sich jeweils links und rechts neben der angenommenen Bühne und führen direkt ins Freie. In der

Wand zum Foyer sind zwei weitere Ausgänge vorhanden. Die beiden foyerseitigen Ausgänge führen in das Foyer und von dort aus ohne Versatz des Laufweges ins Freie. Die jeweiligen Breiten der Ausgänge beziehungsweise Rettungswege sind vom gewählten Szenario abhängig (vgl. Kapitel 2.3.2). Eine Einengung des Laufweges innerhalb der Rettungswege findet nicht statt. Begrenzender Faktor sind die Türbreiten. Im Modell sind keine Ausstattungsgegenstände (z.B. Garderoben, Tische, Stühle) vorgesehen.

Modell 2

Modell 2 (vgl. Abbildung 7) stellt eine zweigeschossige Versammlungsstätte dar. Der Aufbau des Versammlungsraumes im Erdgeschoss entspricht dem des Modell 1. Die Höhe des Erdgeschosses wird mit 6 m angenommen. Das Foyer im Erdgeschoss wird gegenüber dem des ersten Modells in drei Teile unterteilt. Während der mittlere Raum des ehemaligen Foyers weiterhin ein Foyer für den Versammlungsraum im EG bildet, dienen die beiden neu entstehenden Räume der getrennten Führung der Rettungswege aus dem Obergeschoss gemäß § 6 Abs. 4 MVStättVO 2014. Die Fläche des Foyers im Erdgeschoss reduziert sich daher auf 200 m². Die neu entstanden Treppenvorräume erhalten separate Ausgänge ins Freie. Die Aufgänge in das Foyer des ersten Obergeschosses schließen links und rechts an die Treppenvorräume an und führen über jeweils eine Zwischenplattform in ca. 3m Höhe. Beide Treppenbereiche im Foyer haben eine für alle Szenarien ausreichende Treppenbreite (2,40 m), sodass keine Veränderung der Bemessungsbreite und Einengung des Fluchtweges eintritt.

Im Obergeschoss schließt an die Treppenaufgänge ein eigenes, 340 m² großes Foyer an. Vom Foyer im Obergeschoss führen zwei Türen in den Versammlungsraum des gleichen Geschosses. Der Versammlungsraum im Obergeschoss besitzt die gleichen Abmessung wie der Versammlungsraum im Erdgeschoss. Die Bühne ist ebenfalls gegenüber der Türen zum Foyer vorgesehen. Zwei weitere Ausgänge aus dem Versammlungsraum befinden sich rechts und links in den Wänden der längeren Seite des Versammlungsraums. Diese Ausgänge führen jeweils in einen gespiegelten Treppenraum. Im Treppenraum befindet sich jeweils eine Treppe mit zwei Zwischenplattformen. Die Treppen zwischen diesen Plattformen überbrücken jeweils einen Höhenunterschied von 2,00 m. Gegenüber der untersten Treppe befindet sich der Ausgang ins Freie. Die Treppen sind jeweils 1,80 m breit, sodass diese mindestens der Breite der vorgeschalteten Türen des Rettungsweges entsprechen und keine Einengung stattfindet.

Modell 3

Modell Nummer 3 (vgl. Abbildung 8) soll eine mehrgeschossige Versammlungsstätte darstellen und die Möglichkeit bieten, die Interpolation von Rettungswegen über verschiedene Geschosse zu simulieren. Da eine solche Interpolation nur möglich ist, wenn

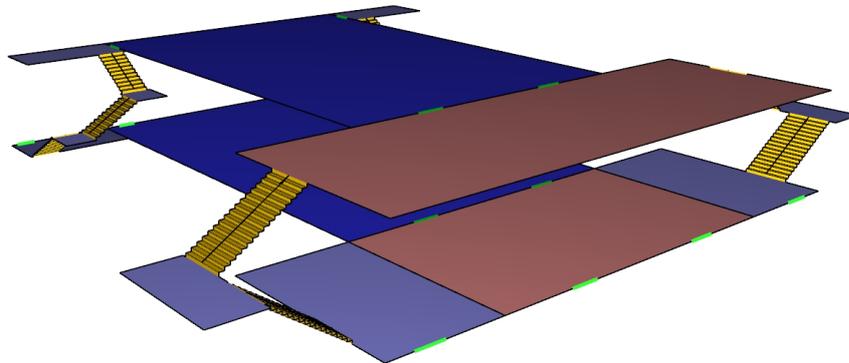


Abbildung 7: Perspektivischer Blick auf Modell 2

Rettungswege aufgeteilt und mit anderen Rettungswegen zusammengelegt werden, dürfen die Geschosse für nicht mehr als 800 Personen zugelassen sein (vgl. § 6 Abs. 4 MVStättVO 2005 und 2014), daher wird nur das Erdgeschoss aus Modell 2 übernommen. Für das erste Obergeschoss ist ein Versammlungsraum von 250 m² mit einem mittigen Zugang (1,80 m Breite) zum Foyer des selben Geschosses vorgesehen. Ein zweiter Rettungsweg (1,20 m Breite) befindet sich mit größtmöglicher Entfernung vom Zugang des Foyers auf der rechten Seite des Versammlungsraumes. Dieser Rettungsweg führt über einen Treppenraum bis ins Erdgeschoss und dort ins Freie. Das Foyer im ersten Obergeschoss besitzt eine Grundfläche von 314,26 m².

Im Foyer des ersten Obergeschosses ermöglichen zwei Treppen mit Zwischenebene den Zugang in das Foyer des zweiten Obergeschosses. Beide Treppen vereinen sich auf der Zwischenebene zu einer Treppe. Alle Treppen vom ersten ins zweite Obergeschoss, welche sich innerhalb des Foyers befinden, haben eine Breite von 1,20 m. An das Foyer im zweiten Obergeschoss schließt ein Versammlungsraum mit 200 m² Grundfläche an. Dieser Versammlungsraum ist mit einer mittigen Tür (Breite: 1,20 m) mit dem davor liegenden Foyer verbunden. Ein weiterer 1,20 m breiter Notausgang führt auf der linken Seite des Raumes in einen Treppenraum. Der Treppenraum führt in verschachtelter Bauweise bis ins Erdgeschoss, wo er einen Ausgang ins Freie besitzt. Die Breite der Treppe in beiden Treppentürmen beträgt jeweils 1,80 m, sodass keine Einengung des Rettungsweges stattfindet. Die Treppen im Bereich des Foyers zwischen Erdgeschoss und erstem Obergeschoss sind so modifiziert, dass je Seite nur eine Treppenbreite von 1,50 m für den Rettungsweg zur Verfügung steht. Für Szenario 19 wird diese Treppenbreite erneut angepasst (vgl. Kapitel 2.3.2).

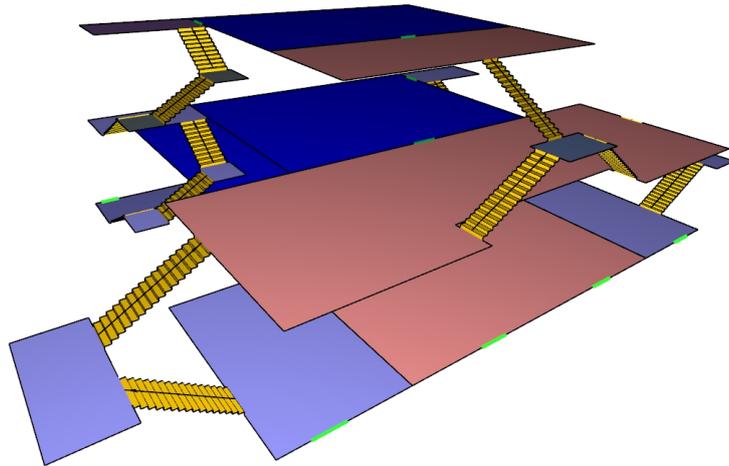


Abbildung 8: Perspektivischer Blick auf Modell 3

Simulationspopulation

Die Simulationspopulation besteht je Versammlungsraum aus einer Gruppe Agenten. Die Größe der Gruppen wird durch die jeweiligen Simulationsszenarien festgelegt (vgl. Kapitel 2.3.2). Den Gruppen können in *Pathfinder* unterschiedliche Eigenschaftsprofile und Verhaltensweisen über Gruppeneinteilungen zugeteilt werden. Pro Veranstaltungsraum wird der jeweiligen Gruppe ein Profil zugewiesen, welches auf dem Standardprofil von *Pathfinder* basiert. Die Profile unterscheiden sich lediglich in der Raumzuordnung, sodass nach der zufallsbedingten Verteilung (s.u.) die jeweilige Gruppe „ihrem“ Raum zugeteilt bleibt. Mit den hier zugrunde liegenden Profileinstellungen wurden die Testfälle der RIMEA erfolgreich durchgeführt [41]. Die Einstellungen des Standardprofils sind beispielhaft für eine Simulationsgruppe per Screenshot im Anhang dokumentiert. In der Simulationspopulation befinden sich keine Rollstuhlfahrer beziehungsweise Assistenz bedürftige Personen.

Werden den Agenten Verhaltensweisen zugeordnet, so wird der Agent zunächst diese Vorgaben abarbeiten, bevor er das Modell in den sicheren Bereich verlässt. Beispielhaft sind hier Reaktionszeiten, Zwischenziele, bestimmte Ausgänge und Wartezeiten an bestimmten Stellen zu nennen. Es werden den hier eingesetzten Agenten keine speziellen Routenziele zugeordnet, somit kann jeder Agent jeden Ausgang benutzen. Den Agentengruppen (pro Raum) im Modell 1 wird eine Reaktionszeit zwischen 30 Sekunden und 150 Sekunden zugeteilt (vgl. Abbildung 9). Für das Modell 2 und Modell 3 werden den Agenten Reaktionszeiten zwischen 60 Sekunden und 180 Sekunden zugewiesen. Die Zuteilung der Reaktionszeiten erfolgt gemäß der RIMEA gleichverteilt auf die vor-

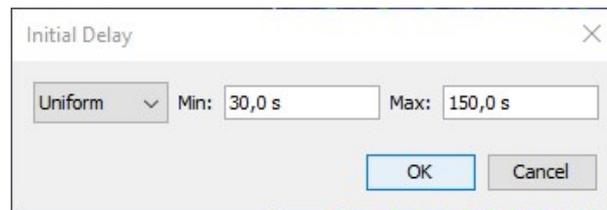


Abbildung 9: Einstellung der Reaktionszeiten am Beispiel des Modell 1

handenen Agenten. Die Werte der Reaktionszeit wurden anhand der in Anhang 2 der RIMEA [1, S. 53 - 57] vorgestellten Kriterien ermittelt und entsprechen der Reaktionszeiten für eine Gruppe von Personen mit hoher Dichte, die sich in wachem Zustand, aber in unvertrauter Umgebung befindet (Kategorie B gemäß Tabelle 4 Anhang 2 RIMEA [1, S. 53]). Zudem wird angenommen, dass die hier simulierten Gebäudegrundrisse einfacher (Modell 1) bis mittlerer Komplexität (Modell 2 und 3) entsprechen (Kategorie B1 bzw. B2 gemäß Tabelle 6 Anhang 2 RIMEA [1, S. 54]) und ein gutes, geprüftes Sicherheitssystem mit ausreichender Anzahl an Brandschutz Helfern vorhanden ist (Kategorie M1 gemäß Tabelle 7 Anhang 2 RIMEA [1, S. 55]). Zur Detektion der Gefahr wird eine Brandmeldeanlage mit sofortiger Alarmierung der betroffenen Bereiche angenommen (Kategorie A1 gemäß Tabelle 5 Anhang 2 RIMEA [1, S. 54]), wie sie gemäß §20 Abs. 1 MVStättVO 2014⁶ für die vorhandenen Grundrisse vorgeschrieben ist. Darüber hinaus werden keine Wartezeiten und Zwischenziele für die Agentengruppen definiert.

Die Agentengruppen werden in den Versammlungsräumen über eine Zufallsfunktion („Randomize Occupants“) von *Pathfinder* vor jedem Simulationsdurchgang innerhalb des jeweiligen Versammlungsraums zufällig verteilt. Gleiches gilt für die Reaktionszeit, die den Agenten vor jedem Simulationsdurchgang neu zugeteilt wird (Funktion: „Randomize“). Die Blickrichtung der simulierten Personen wird durch die zufällige Verteilung der Agenten jedes Mal verändert, sodass der Zeitpunkt der Evakuierung eher dem Zeitpunkt während einer Pause oder kurz vor der Veranstaltung entspricht, als einem Zeitpunkt während der laufenden Veranstaltung. Der Beginn der Simulation ist gleichzusetzen mit Beginn des Aufforderung zur Evakuierung durch die Brandmeldeanlage. Somit werden t_{detekt} und t_{Alarm} nicht in den Simulationsergebnissen erfasst.

Simulationsszenarien

Die hier erstellten Simulationsszenarien sollen unterschiedliche Möglichkeiten zur Anwendung der Interpolation der Rettungswegbreiten aufzeigen. Alle Szenarien sind so angelegt, dass Vergleichsmöglichkeiten zwischen Anwendung der MVStättVO 2005 und der MVStättVO 2014 geschaffen werden. Die Szenarien 1 bis 16 sollen an den Modellen

⁶Der entsprechende Paragraph findet sich auch in der MVStättVO 2005 bzw. der VStättVO Hamburg

eins und zwei zum Einsatz kommen, während die Szenarien 17, 18 und 19 für das dritte Modell Anwendung finden sollen.

In allen Szenarien sind die Versammlungsräume nicht bestuhlt, daher wird die Personendichte mit bis zu zwei Personen pro Quadratmeter angenommen. Die maximal mögliche Besucheranzahl der Veranstaltungsräume variiert je nach Fluchtwegsituation und wird für jedes Szenario separat angegeben. Die Besucher halten sich in allen Szenarien innerhalb der Versammlungsräume auf.

Szenario 1

Im ersten Szenario wird die Bemessung nach der aktuell in Hamburg gültigen VStättVO Hamburg⁷ durchgeführt, um einen Vergleichswert zu ermitteln. Die Veranstaltungsräume besitzen jeweils 500 m² Grundfläche, dürften somit mit bis zu 1000 Personen belegt werden (§ 1 Abs. 2 MVStättVO 2005). Da die jeweils vier Rettungswege in diesem Szenario Ausgangsbreiten von 1,20 m aufweisen, reduziert sich die maximale Besucheranzahl auf 800 Personen pro Raum.

Szenario 2

Die Ausgangsbreiten aller vier Notausgänge werden in Szenario 2 auf 1,25 m erhöht. Die maximale Besucherzahl beträgt auf Grundlage der in der MVStättVO 2005 vorgesehenen anrechenbaren Ausgangsbreite von 4,80 m 800 Personen:

$$\frac{4,80m}{0,006m/Besucher} = 800 \text{ Besucher}$$

Szenario 3

Wie in Szenario 2 werden die Ausgangsbreiten der Notausgänge mit 1,25 m Breite angenommen. Zur Bemessung der maximal zulässigen Personenanzahl liegt nun die MVStättVO 2014 zugrunde, mit der die Ausgangsbreiten interpoliert betrachtet werden dürfen:

$$\frac{1,25m * 4}{0,006m/Besucher} \approx 833 \text{ Besucher}$$

Szenario 4

In Szenario 4 sollen pro Versammlungsraum 833 Personen Platz finden. Zugrunde gelegt wird in diesem Szenario die Bemessung der Ausgangsbreite nach MVStättVO 2005, sodass 5,40 m Notausgangsbreite zu jeweils mind. 1,20 m Breite zur Verfügung stehen

⁷Die VStättVO Hamburg basiert auf der MVStättVO 2005

müssen. Aus diesem Grund wird die Breite der linken Tür zwischen Veranstaltungsraum und Foyer, sowie der dazugehörigen Ausgänge ins Freie auf 1,80 m angehoben. Die übrigen Türen behalten die ursprüngliche Breite von 1,20 m.

Szenario 5

Es gelten in Szenario 5 die selben Bedingungen, wie in Szenario 2, allerdings werden die Ausgangsbreiten aller Rettungswege auf 1,30 m erhöht. Es ergeben sich durch die Anwendung der MVStättVO 2005 keine Änderungen in der maximalen Besucheranzahl gegenüber Szenario 2. Die Gesamtausgangsbreite beträgt 5,20 m (anrechenbar: 4,80 m).

Szenario 6

Als Szenario 6 ist die Anwendung der MVStättVO 2014 auf die Vorgaben von Szenario 5 vorgesehen. Die maximale Besucheranzahl beträgt laut § 7 Abs. 4 MVStättVO 2014:

$$\frac{1,30m * 4}{0,006m/Besucher} \approx 866 \text{ Besucher}$$

Szenario 7

Das siebte Szenario wird nach MVStättVO 2005 bemessen. Die beiden Rettungswege über das Foyer weisen nun eine Breite von 1,40 m auf, die nicht in das Foyer führenden Notausgänge weisen 1,20 m Breite auf. Die maximale Besucheranzahl ist weiterhin auf 800 Personen beschränkt, da die Rettungswege zum Teil zwar 1,40 m Breite aufweisen, von dieser Breite aber nur 1,20 m Breite angerechnet werden können (§§ 1 Abs. 2, 7 Abs. 2 MVStättVO 2005).

Szenario 8

Szenario 8 basiert auf dem vorhergehenden Szenario. Die Ausgangsbreiten bleiben identisch. In Szenario 8 wird die MVStättVO 2014 zugrunde gelegt, somit ist die Interpolation von Rettungswegbreiten möglich. Dementsprechend beträgt die maximale Besucheranzahl (nach § 7 Abs. 4 MVStättVO 2014):

$$\frac{1,40m * 2 + 1,20m * 2}{0,006m/Besucher} \approx 866 \text{ Besucher}$$

Szenario 9

Szenario 9 basiert auf Szenario 1 und der Anwendung der MVStättVO 2005, jedoch sollen die Veranstaltungsräume durch 866 Personen genutzt werden können (vgl. Szenario 5 und 8). Die notwendige Breite der Rettungswege nach der Modulbemessung in

der MVStättVO 2005 ergibt identische Werte wie in Szenario 4. Die Aufteilung der Türen erfolgt daher identisch zu Szenario 4.

Szenario 10

Für das zehnte Szenario werden alle Ausgangsbreiten im Veranstaltungsraum und dem Foyer auf 1,40 m erhöht. Zur Anwendung kommt die aktuelle MVStättVO 2005, sodass jeder Ausgang nur mit 1,20 m Breite angerechnet werden darf. Die maximale Besucherzahl liegt daher bei 800 Personen in der Veranstaltungsräumen.

Szenario 11

Szenario 11 legt das zehnte Szenario zugrunde, bezieht sich aber bei der Berechnung der zulässigen Besucheranzahl auf die MVStättVO 2014. Demzufolge sind

$$\frac{1,40m * 4}{0,006m/Besucher} \approx 933 \text{ Besucher}$$

zulässig (§ 7 Abs. 4 MVStättVO 2014).

Szenario 12

Szenario 12 basiert wieder auf Szenario 1, jedoch sollen die Veranstaltungsräume in diesem Fall durch 933 Personen (vgl. Szenario 11) genutzt werden. Nach der MVStättVO 2005 muss somit eine Notausgangsbreite von 6,00 m nutzbar sein. Um die notwendige Breite zu erhalten, werden beide Ausgänge über das Foyer auf 1,80 m Breite verbreitert. Die hinteren Notausgänge erhalten die ursprüngliche Breite von 1,20 m.

Szenario 13

Die Ausgänge in Szenario 13 weisen eine Breite von 1,50 m auf. Auf Grundlage der MVStättVO 2005 beträgt die maximale Besucheranzahl in diesem Szenario daher ebenfalls 800 Personen (§ 7 Abs. 4 MVStättVO 2005), da jeweils nur 1,20 m Rettungswegbreite je Ausgang angerechnet werden können.

Szenario 14

Wie in den vorhergegangenen zusammengehörigen Szenarien, wird in Szenario 14 auf die MVStättVO 2014 zurückgegriffen, um die maximale Besucheranzahl festzulegen. Die vorhandene Ausgangsbreite bleibt identisch zu Szenario 13 (6,00 m). Dies ermöglicht

durch die anwendbare Interpolation

$$\frac{1,50m * 4}{0,006m/Besucher} \approx 1000 \text{ Besucher.}$$

Gleichzeitig entspricht dieser Wert der maximal möglichen Besucherzahl aufgrund der Grundfläche des Veranstaltungsraumes.

Szenario 15

Für den Vergleich nach MVStättVO 2005 mit Szenario 14 werden in Szenario 15 die Versammlungsräume auch durch 1000 Besucher belegt. Notwendig ist hierfür gemäß MVStättVO 2005 ebenfalls eine Gesamtausgangsbreite von 6,00 m. Die Aufteilung der Türbreiten verändert sich im Vergleich zu Szenario 14 und entspricht der Verteilung aus Szenario 12.

Szenario 16

Da die MVStättVO 2005 die modulare Ausgangsbreitensteigerung vorsieht, gilt ein gleiches Sicherheitsniveau für eine Besucherzunahme um bis zu 100 Personen. Erst bei der 101. Person erhöht sich wiederum die Ausgangsbreite. Um einen Vergleichswert zu Szenario 6 und Szenario 8 zum vermutlich schlechtesten Schutzniveau (maximale Raumbelegung) zu erhalten, wird die Ausgangsverteilung von Szenario 9 herangezogen. Jedoch wird in Szenario 16 nun die maximale Raumbelegung bei einer Ausgangsbreite von 5,40 m simuliert. Dies entspricht pro Veranstaltungsraum einer maximalen Belegung von 900 Personen.

Übersicht Szenarien 1 - 16

Tabelle 3: Überblick Rahmenbedingungen Szenario 1 bis 8

Szenario	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6	Nr. 7	Nr. 8
MVStättVO	2005	2005	2014	2005	2005	2014	2005	2014
Besucheranzahl (maximal) pro Raum	800	800	833	833	800	866	800	866
Rettungswegbreite Foyer [m]	1,20	1,25	1,25	1,80 1,20	1,30	1,30	1,40	1,40
Rettungswegbreite Bühne [m]	1,20	1,25	1,25	1,20	1,40	1,30	1,20	1,20
Rettungswegbreite anrechenbar [m]	4,80	5,00	5,20	5,40	4,80	5,20	4,80	5,20

Tabelle 4: Überblick Rahmenbedingungen Szenario 9 bis 16

Szenario	Nr. 9	Nr. 10	Nr. 11	Nr. 12	Nr. 13	Nr. 14	Nr. 15	Nr. 16
MVStättVO	2005	2005	2014	2005	2005	2014	2005	2005
Besucheranzahl (maximal) pro Raum	866	800	933	933	800	1000	1000	900
Rettungswegbreite Foyer [m]	1,80 1,20	1,40	1,40	1,80	1,50	1,50	1,80	1,80 1,20
Rettungswegbreite Bühne [m]	1,20	1,40	1,40	1,20	1,50	1,50	1,20	1,20
Rettungswegbreite anrechenbar [m]	5,40	4,80	5,60	6,00	4,80	6,00	6,00	5,40

Szenario 17

Szenario 17 wird nur für Modell 3 erstellt und soll gemeinsam mit Szenario 18 und 19 eine Möglichkeit bieten, die Interpolation im Zuge der Zusammenführung von Rettungswegen zu simulieren und zu bewerten. Dieses Szenario beruht auf den Bemessungsgrundsätzen der MVStättVO 2005. Die Veränderung durch Anwendung der Interpolation wird in Szenario 18 überprüft. Der Versammlungsraum im Erdgeschoss ist identisch wie in Szenario 1 aufgebaut und wird dementsprechend mit 800 Personen belegt.

Im ersten Obergeschoss bietet der Versammlungsraum mit einer Grundfläche von 250 m² Platz für bis zu 500 Personen (§ 1 Abs. 2 MVStättVO 2005). Obwohl die Türbreiten der Rettungswege dieses Raumes (1,80 m + 1,20 m) ausreichend wären, sind im Versammlungsraum des ersten Obergeschosses nur 400 Personen zulässig. Dies ist in der Belegung des Veranstaltungsraumes im zweiten Obergeschoss mit 400 Personen und den anrechenbaren Fluchtwegsbreiten (je 1,20 m) der Treppen zwischen dem Erdgeschoss und ersten Obergeschoss begründet.

Die Treppenbreite im Foyer zwischen dem ersten und zweiten Obergeschoss beträgt durchgehend 1,20 m, sodass diese für den Veranstaltungsraum des zweiten Obergeschosses in Kombination mit dem zweiten Rettungsweg (1,20 m Breite) ausreichend bemessen ist.

Szenario 18

Die Ausgangsannahme von Szenario 18 basiert auf den Annahmen von Szenario 17, jedoch wird nun die MVStättVO 2014 als Bemessungsgrundlage eingesetzt. Dies führt zu einer geänderten Bewertung in der Anrechenbarkeit der Treppenbreiten zwischen dem Erdgeschoss und dem ersten Obergeschoss durch Interpolation. Zur Verfügung stehen hier jeweils 1,50 m Breite. Gemäß § 7 Abs. 4 MVStättVO 2014 können diese vollständig als Fluchtwegsbreite angerechnet werden, sodass im Foyer insgesamt 3,00 m Fluchtwegsbreite zur Verfügung stehen. Unter Berücksichtigung des jeweils zweiten Fluchtweges der Veranstaltungsräume (1. und 2. OG), ist es nun möglich, die Besucherzahl des Versammlungsraumes im ersten Obergeschoss auf 500 Personen anzuheben.

Durch die Anhebung der Besucherzahl bei nicht veränderter Ausgangsbreite des zweiten Rettungsweges (Treppenturm) sind nun auf den Rettungsweg vom Foyer des ersten Obergeschosses ins Erdgeschoss insgesamt 500 Personen angewiesen. Dies erfordert eine Breite von insgesamt 3,00 m (1.OG: 1,80 m + 2. OG: 1,20 m). Durch die Anwendung der Interpolation kann die erforderliche Breite auf die beiden verfügbaren Treppen (Breite jeweils 1,50 m) aufgeteilt werden.

Szenario 19

Um ein Szenario mit gleicher Personenzahl wie Szenario 18 auf der Bemessungsgrundlage nach MVStättVO 2005 zu schaffen, wird die Ausgangslage von Szenario 18 herangezogen. Um den Bestimmungen nach §7 Abs. 4 MVStättVO 2005 zu entsprechen, werden die Treppen zwischen dem Erdgeschoss und 1. Obergeschoss in ihrer Breite verändert. Die linke Treppenanlage besitzt in diesem Szenario eine Breite von 1,80 m, während die rechte Treppenanlage auf 1,20 m Breite verkleinert wird.

2.3.3 Ergebnisauswertung

Die Ergebnisauswertung orientiert sich an den Vorgaben der RIMEA. Es werden daher pro Szenario zehn Durchläufe simuliert. Für die Durchführung der Simulationsläufe wird jeweils eine eigene Eingabedatei (mit randomisierter Verteilung der Agenten und der Reaktionszeit) benötigt. Die Erstellung dieser Dateien und die anschließenden Simulationsläufe werden per Skript automatisch durchgeführt [46]. *Pathfinder* erstellt für jeden Simulationsdurchlauf eine eigene CSV-Datei mit dem Namen „occupants.csv“. In dieser Datei werden für jeden simulierten Agenten separat verschiedene Angaben erfasst. Neben Identifikationsnummer („ID“) und Name („name“) werden die Zeiten bis zum Erreichen eines Ausgangs („exit time“), die Zeit in Stauungen („jam time total“) insgesamt und die längste Zeit in einer kontinuierlichen Stauung („jam time max continuous“) erfasst (vgl. Abbildung 5). Stauungen werden als solche ab einer Unterschreitung der Gehgeschwindigkeit von 0,25 m/s gezählt. Die weiteren in der CSV-Datei erfassten Daten sind für die Ergebnisse dieser Arbeit nicht ausschlaggebend.

Tabelle 5: Beispiel einer CSV-Datei erzeugt von *Pathfinder* ⁸

id	name	exit time(s)	active time(s)	jam time total(s)	jam time max continuous(s)	level jam time	finish time(s)	distance (m)
0	1	53,425	53,425	38,55	4,525	38,55	53,425	8,822
1	2	27,625	27,625	12,05	4,9	12,05	27,625	13,878
2	3	140,025	140,025	103,85	7,125	103,85	140,025	28,582
3	4	51,075	51,075	32,175	4,15	32,175	51,075	10,293
4	5	98,825	98,825	70,4	9,85	70,4	98,825	16,185
5	6	104,525	104,525	93,925	12,3	93,925	104,525	8,426

Für die Auswertung werden die Daten der CSV-Dateien in eine vorbereitete Arbeitsmappe in der Tabellenkalkulation „Excel“ übertragen. Hierbei wird für jeden Simulationsdurchlauf eine eigenes Arbeitsblatt erzeugt. Ein weiteres Arbeitsblatt der selben Mappe dient der Auswertung der relevanten Daten aus den Datensätzen und erfasst für jeden Durchlauf das Minimum, das Maximum und den arithmetischen Mittelwert der Evakuierungszeiten, der Gesamtstauungszeit und der längsten kontinuierlichen Stauungszeit. Neben der Darstellung nach Durchläufen sortiert, werden diese Werte auch über alle Durchläufe erfasst. Diese Auswertung der Datensätze erfolgt durch die Excel-Funktionen *MIN*, *MAX* und *MITTELWERT* in den entsprechenden Spalten der Arbeitsblätter (vgl. Tabelle 6).

Eine grafische Auswertung der ermittelten Fluchtzeiten findet für jedes Szenario durch ein Boxplotdiagramm statt. Dieses wird ebenfalls automatisiert aus den Datensätzen

⁸Die gezeigte Tabelle wurde bereits in Spalten aufgeteilt und auf das deutsche Dezimaltrennzeichen umgestellt. Für eine bessere Darstellung wurden die Spalten „stair jam time“, „ramp jam time“, „start time (s)“ und „last_goal_started time (s)“ ausgeblendet

Tabelle 6: Beispiel der Darstellung der Simulationsergebnisse am Beispiel von Modell 1 Szenario 1

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	36,550	213,950	132,967	0,800	153,850	43,097	0,025	30,900	4,825
2	34,700	213,150	134,300	1,300	146,150	43,839	0,000	35,300	4,974
3	33,275	206,025	132,839	1,025	132,525	41,345	0,050	38,450	4,600
4	32,350	210,175	129,347	1,000	121,300	39,316	0,025	24,725	4,275
5	36,200	195,050	122,293	0,850	93,225	32,992	0,100	18,175	2,857
6	34,900	211,050	134,230	0,750	121,250	45,660	0,000	31,225	5,194
7	34,275	203,825	129,807	0,775	96,350	38,254	0,000	21,250	3,982
8	36,450	211,000	132,767	1,100	121,900	40,834	0,000	24,600	4,514
9	38,125	208,150	131,868	0,875	114,875	40,377	0,000	37,100	4,244
10	35,950	198,400	124,565	0,825	103,950	34,394	0,025	22,500	3,141
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	32,350	213,950	130,482	0,750	153,850	40,006	0,000	38,450	4,260

der einzelnen Durchläufe erstellt. Die erstellten Auswertungstabellen und Boxplotdiagramme sind vollumfänglich im Anhang abgedruckt. Auf einen Abdruck der vollständigen Datensätze der einzelnen Durchläufe wird aufgrund der Datenmenge verzichtet. Die Datensätze werden in digitaler Form zur Verfügung gestellt.

Zusätzlich zur statistischen Auswertung der Durchläufe wird im Rahmen dieser Arbeit auf die grafische Auswertung einzelner Durchläufe durch das Programmmodul *Pathfinder Results* zurückgegriffen, um mögliche Unterschiede in den Stauungs- und Evakuierungszeiten zusammengehöriger Szenarien auf die Veränderung der Fluchtwegsbreiten zurückführen zu können und mögliche zufällige Veränderungen (aufgrund der zufällig geänderten Eingangsparameter) der Zeiten auszuschließen. *Pathfinder Results* bietet die Möglichkeit, die Evakuierung des Modells zu visualisieren und über diese Visualisierung unterschiedliche Filter (z.B aktuelle Laufgeschwindigkeit der Agenten oder Dichte der Agenten) zu legen, so dass Stauungen örtlich identifiziert werden können. Wird auf diese Möglichkeit zurückgegriffen, sind Screenshots der betrachteten Szenarien im Text abgedruckt. Um die Beeinflussung durch statistische Ausreißer in den maximalen Evakuierungszeiten möglichst auszuschließen, werden weiterhin auch die Durchflussraten der Türen mit geänderter Breite anhand durch *Pathfinder* erstellter Graphen verglichen.

2.4 Ergebnisse der Simulation

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulationen der Szenarien aus den Modellen erläutert und miteinander verglichen. Für jedes Modell wird zunächst die grundsätzliche Verwendbarkeit anhand der Szenarien mit angewendeter Bemessungsgrundlage nach MVStättVO 2005 überprüft, bevor der Einfluss der Interpolation von Rettungswegbreiten auf die ermittelten Evakuierungszeiten überprüft wird.

2.4.1 Ergebnisse Modell 1

Die Ergebnisse aus den einzelnen Szenarien werden in Tabelle 7 gegenübergestellt. Für diesen Vergleich werden, aus einem konservativen Ansatz heraus, die jeweils langsamste Evakuierungszeit, die jeweils längste Verweilzeit eines Agenten in einer kontinuierlichen Stauung und die höchste Gesamtstauungszeit eines Agenten herangezogen. Die Werte können von unterschiedlichen Agenten erzielt worden sein. Daneben wird der jeweilige Mittelwert über alle Durchläufe eines Szenarios ausgegeben. Die Ergebnisse der einzelnen Simulationsdurchläufe in den verschiedenen Szenarien können dem Anhang entnommen werden. Da aufgrund der Datenmenge eine visuelle Auswertung der einzelnen Durchläufe nicht sinnvoll durchzuführen ist, wurden die maximalen Evakuierungszeiten einzelnen Durchläufe mithilfe von Boxplotdiagrammen innerhalb eines Szenarios verglichen, um im Vergleich zu den anderen Durchläufen ungewöhnlich hohe oder niedrige Evakuierungszeiten herauszufiltern und anschließend die Ursache anhand der visuellen Darstellung von *Pathfinder Results* zu überprüfen. Es konnten dabei keine erwähnenswerten Ausreißer innerhalb der einzelnen Szenarien gefunden werden. Die bei dieser Überprüfung benutzten Boxplotdiagramme sind ebenfalls im Anhang aufgeführt.

2.4.2 Auswertung der Ergebnisse für Modell 1

Um die Relevanz der ermittelten Daten zu überprüfen, ist es zunächst notwendig zu ermitteln, ob das verwendete Simulationsprogramm die zum Teil geringen Unterschiede in den Ausgangsbreiten des Veranstaltungsraumes erfassen kann und ob dies zu einer signifikanten Veränderung des Simulationsergebnis führt. Zu diesem Zweck wurde jedes Szenario auch mit der Bemessungsgrundlage der MVStättVO 2005 durchgeführt und entsprechend dieser Grundlage mit der gleichen Personenzahl (800 Personen je Raum) durchgeführt. Betrachtet man zunächst Szenario 2 mit der geringsten Vergrößerung der Ausgangsbreite pro Ausgang (5 cm / \cong +4,17 Prozent) ist festzustellen, dass sich die Evakuierungszeit gegenüber dem Ausgangsszenario (Szenario 1) um 2,500 Sekunden reduziert. Dies entspricht einer Verringerung um ca. 1,17 Prozent. Parallel dazu

Tabelle 7: Vergleich der Maxima und Mittelwerte der Evakuierungszeit, kontinuierlichen und gesamten Stauungszeit aller Szenarien in Modell 1

Szenario Nr.	Evakuierungsdauer [s]		Stauungszeit gesamt [s]		Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]	
	Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
1	213,950	130,482	153,850	40,006	38,450	4,260
2	211,450	127,654	146,375	38,039	37,225	3,838
3	213,000	130,106	135,475	40,180	28,925	4,110
4	202,750	126,307	145,050	37,030	35,125	3,490
5	206,775	127,918	148,275	37,628	35,000	3,807
6	214,525	131,457	140,825	41,250	32,900	4,272
7	208,875	127,472	131,975	37,067	30,075	3,705
8	222,000	134,646	152,050	44,396	39,050	4,780
9	214,875	128,577	144,775	39,205	43,400	3,868
10	199,800	124,881	112,900	35,174	42,925	3,377
11	221,325	135,095	160,275	44,914	38,950	4,771
12	211,250	133,680	157,675	43,969	36,400	4,551
13	195,300	122,119	129,950	31,511	31,600	2,802
14	221,150	140,032	159,650	50,294	46,550	5,516
15	222,550	135,987	155,975	45,775	46,400	4,693
16	217,750	131,327	141,675	41,368	40,225	4,198

nimmt auch die Verweilzeit in Stauungen um ca. 4,86 Prozent beziehungsweise 7,475 Sekunden und der Mittelwert der Evakuierungsdauern um 2,17 Prozent ab. Zwar entspricht die relative Verringerung der Fluchtzeit nicht der Vergrößerung der Ausgangsbreite, liefert jedoch ein Indiz dafür, dass auch geringe Änderungen der Ausgangsbreite bereits Auswirkungen auf das Ergebnis der Simulation haben und dadurch eine schnellere Entfluchtung ermöglichen.

Deutlicher wird diese Tendenz in Szenario 5. Die Entfluchtungszeit dort liegt mit 206,775 Sekunden rund 3,35 Prozent niedriger als in Szenario 1. Die Steigerung der Ausgangsbreite beträgt ca. 8,33 Prozent. Diese Tendenz ist auch in Szenario 7 zu erkennen, in dem die Gesamtausgangsbreite zwar gleich der Ausgangsbreite in Szenario 5 ist, diese aber anders verteilt wird (vgl. Kapitel 2.3.2). Die Evakuierungsdauer reduziert sich zwar in diesem nur um 2,37 Prozent gegenüber Szenario 1, aber die Mittelwerte der Evakuierungsdauern zwischen den beiden Szenarien unterscheiden sich um lediglich ca. 0,5 Sekunden.

Auch Szenario 10 weist eine Reduzierung der Evakuierungsdauer gegenüber dem Referenzszenario auf. Die Reduzierung beträgt rund 6,61 Prozent bei einer Steigerung der Ausgangsbreite um ca. 16,67 Prozent auf 5,60 m, welche gleichmäßig verteilt ist. Eine weitere Reduzierung der Entfluchtungszeit ist auch beim letzten Szenario des Modell 1, welches mit einer Personenzahl von 800 Personen simuliert wurde, zu verzeichnen. Die Verringerung der Evakuierungszeit beträgt hier ca. 15,70 Prozent bei einer

gleichzeitigen Verbreiterung der Rettungswege auf 6,40 m (\cong +33,33 Prozent).

Die bereits in Szenario 2 beobachtete, nicht im selben Verhältnis gegenüber der Steigerung der Notausgangsbreiten stattfindende Reduzierung der Entfluchtungsauern, setzt sich fort. Dabei ist festzustellen, dass auch geringfügige Änderungen der Notausgangsbreite bereits einen Effekt auf die Simulation der Evakuierungsauern haben und mehr verfügbare Ausgangsbreite zu einer schnelleren Entfluchtung des Modells führt. Es kann somit festgehalten werden, dass *Pathfinder* zur Simulation und Auswertung der hier vorgestellten Modelle und Szenarien geeignet ist. Diesen Rückschluss lässt zusätzlich zur hier gewählten konservativen Betrachtungsweise der langsamsten Simulationsdurchläufe der Szenarien auch der Vergleich des über alle Simulationsdurchläufe eines Szenarios ermittelte arithmetische Mittelwert zu.

Nachdem grundsätzlich die Verwendbarkeit von *Pathfinder* zur Klärung der Eingangsproblematik festgestellt werden konnte, soll nun überprüft werden, ob das nach Bemessungsgrundlage der MVStättVO 2005 ermittelte Sicherheitsniveau im Sinne der maximalen Evakuierungszeit auch bei Anwendung der Bemessungsgrundlage nach MVStättVO 2014 erhalten bleibt. Betrachtet man zunächst die Szenarien, die auf Grundlage der Rettungswegbreiten nach MVStättVO 2005 die ermittelten Personenzahlen nach MVStättVO 2014 (vgl. Abbildung 10) entfluchten, ist zu erkennen, dass durch die modulare Aufbauweise der Notausgangsbreiten verschiedene Sicherheitsniveaus (gemessen an der Dauer der Evakuierung) innerhalb einer Personenzahlerhöhung von 100 Personen gegeben sind. So ist das Sicherheitsniveau mit Überschreiten der Bemessungsgrenze und damit verbundener Erhöhung der Gesamtausgangsbreite an einem Ausgang um 0,60m am höchsten. Mit weiterer kleinschrittiger Erhöhung der Personenzahl beginnt das Sicherheitsniveau zu sinken, bis es knapp unter dem Niveau vor Erhöhung der Ausgangsbreite liegt (vgl. Evakuierungszeiten Szenario 1 und 16 bzw. Szenario 16 und 15).

Betrachtet man nun Abbildung 11 ist ersichtlich, dass die Evakuierungszeiten der Szenarien nach MVStättVO 2014 weniger Schwankungen unterliegen, als die Evakuierungszeiten nach MVStättVO 2005. Weiterhin deutet sich, wie in den Szenarien nach Bemessungsgrundlage der MVStättVO 2005, ein leichter Anstieg der Entfluchtungszeiten mit Zunahme der Personenanzahl an. Unter der Annahme, dass das Sicherheitsniveau bei gleicher Personenzahl gleich sein müsste, sind deutliche Unterschiede in den Szenarien 8 und 11 gegenüber den Szenarien 9 und 12 zu identifizieren. Die Evakuierungszeiten der unterschiedlichen Bemessungsgrundlagen unterscheiden sich um bis zu 10,125 Sekunden, jedoch kann dieser direkte Vergleich nicht herangezogen werden,

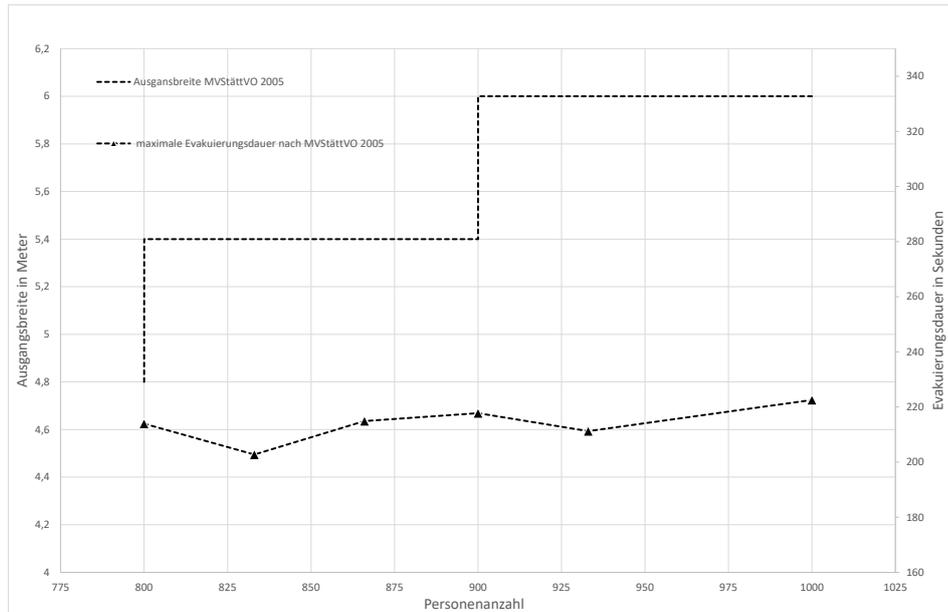


Abbildung 10: Gegenüberstellung maximaler Evakuierungszeiten (Modell 1, Szenario 1, 4, 9, 12 und 15) und Gesamtausgangsbreite nach MVStättVO 2005

da das Sicherheitsniveau in der MVStättVO 2005 beim Überschreiten der jeweiligen Bemessungsgrenze sprunghaft steigt und danach wieder bis zum Erreichen der nächsten Modulschwelle sinkt. Da die hier vorgestellten, auf der Bemessungsgrundlage der MVStättVO 2014 basierenden, Szenarien die jeweils maximale Auslastung der gewählten Ausgangsbreiten darstellen, sollten für Vergleiche des Sicherheitsniveaus ebenfalls die jeweilige volle Auslastung der nächst möglichen Ausgangsbreite nach MVStättVO 2005 herangezogen werden. Vergleicht man nun das Sicherheitsniveau der Szenarien nach MVStättVO 2014 mit dem Niveau der vollen Auslastung nach MVStättVO 2005 (vgl. Abbildung 12), sind nur geringe Unterschiede festzustellen. Die Abweichungen betragen maximal 4,750 Sekunden (Szenario 3 zu Szenario 16) und stellen bei Bemessung der Ausgänge nach MVStättVO 2014 eine, wenn auch nur geringe, Beschleunigung der Evakuierung und somit eine Verbesserung des Sicherheitsniveaus dar.

Ausnahme bildet hier Szenario 8, welches im Vergleich zu Szenario 16 4,250 Sekunden länger für die Entfluchtung benötigt. Auch im direkten Vergleich mit Szenario 6, welchem die gleiche Gesamtausgangsbreite in anderer Aufteilung zu Grunde liegt, benötigt die Evakuierung länger. In diesem Falle beträgt der Unterschied 7,475 Sekunden. Daraus lässt sich vermuten, dass die Verteilung der Ausgangsbreite und die Dauer der Evakuierung in direktem Zusammenhang stehen. Darauf deutet auch die im Vergleich

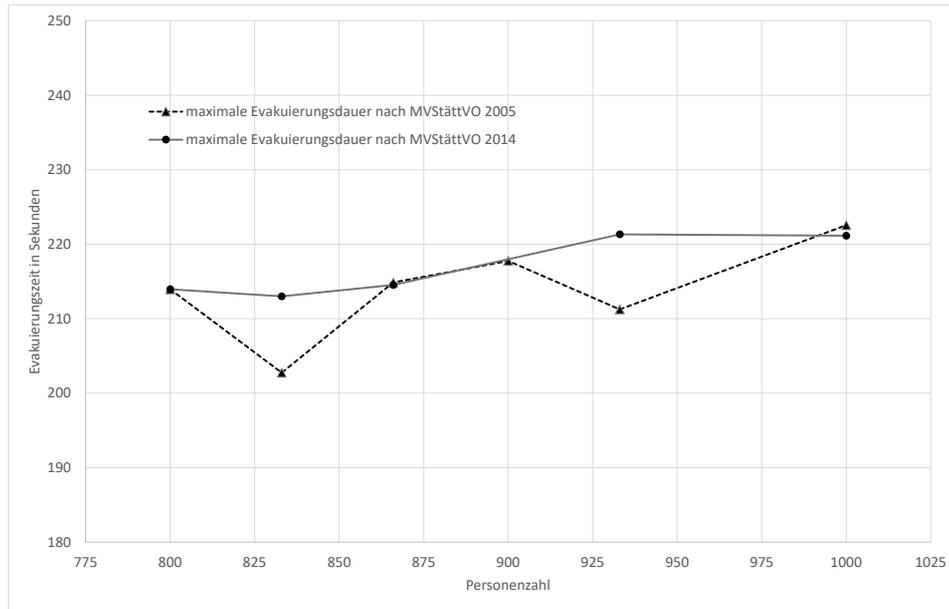


Abbildung 11: Gegenüberstellung maximaler Evakuierungszeiten (Modell 1) nach MVStättVO 2005 und MVStättVO 2014 (ohne Szenario 7 und 8)

zu Szenario 6 und zu Szenario 16 deutlich längere Gesamtstauungszeit eines Agenten hin. Eine pauschale Aussage, in wie weit die gleichmäßige Verteilung der Ausgangsbreiten auf die Ausgänge relevant für die benötigte Evakuierungszeit ist, lässt sich anhand dieser Beobachtung nicht treffen, da entsprechende Vergleichsszenarien zur Überprüfung fehlen.

Zusammenfassend lässt sich nach Betrachtung der Simulationsergebnisse der Szenarien in Modell 1 sagen, dass die Anwendung der MVStättVO 2014 zur Bemessung der Fluchtwegbreiten innerhalb einer erdgeschossigen Versammlungsstätte zu keiner relevanten Änderung des, anhand der maximalen Entfluchtungszeiten ermittelten, Sicherheitsniveaus führt. Die maximale Gesamtstauungszeit eines Agenten, die in den relevanten Szenarien ermittelt wurde, variiert in einem Bereich zwischen 135,475 und 160,275 Sekunden (vgl. Tabelle 7 und Abbildung 13). Es lässt sich hieraus keine Tendenz einer niedrigeren oder höheren Gesamtstauungszeit bei Anwendung einer bestimmten Bemessungsgrundlage der Fluchtwegbreiten erkennen, vielmehr scheint die Stauungszeit abhängig von der randomisierten Verteilung der Agenten innerhalb eines Durchlaufs zu sein. Weiteren Grund zu dieser Annahme bieten die stark variierenden Gesamtstauungszeiten in den einzelnen Durchläufen eines Szenarios, da die Durchläufe sich nur in der Verteilung der Agenten im Raum und der Verteilung der Reaktions-

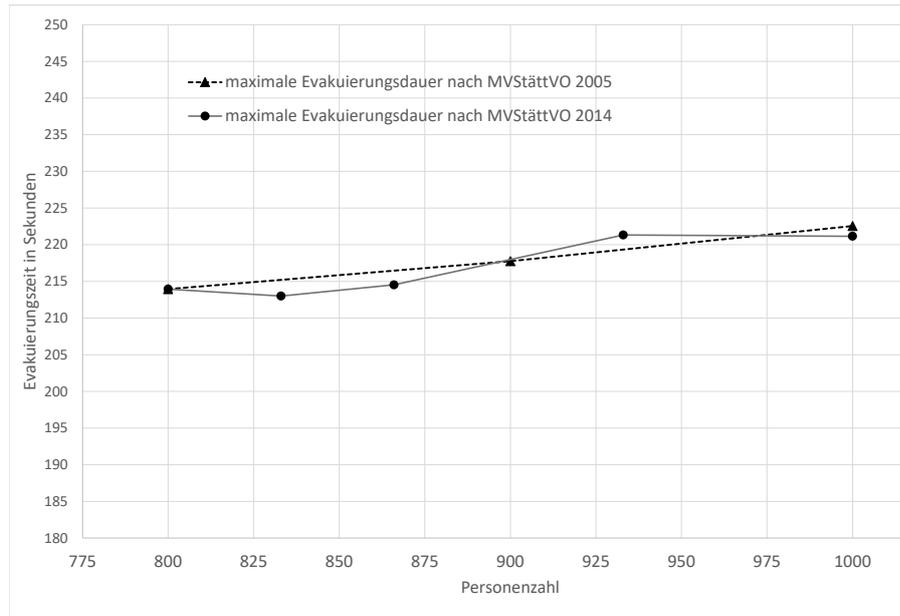


Abbildung 12: Vergleich der Evakuierungszeiten (Modell 1) nach MVStättVO 2014 (ohne Szenario 8) mit den Evakuierungszeiten nach MVStättVO 2005 bei voller Auslastung

zeiten unterscheiden.

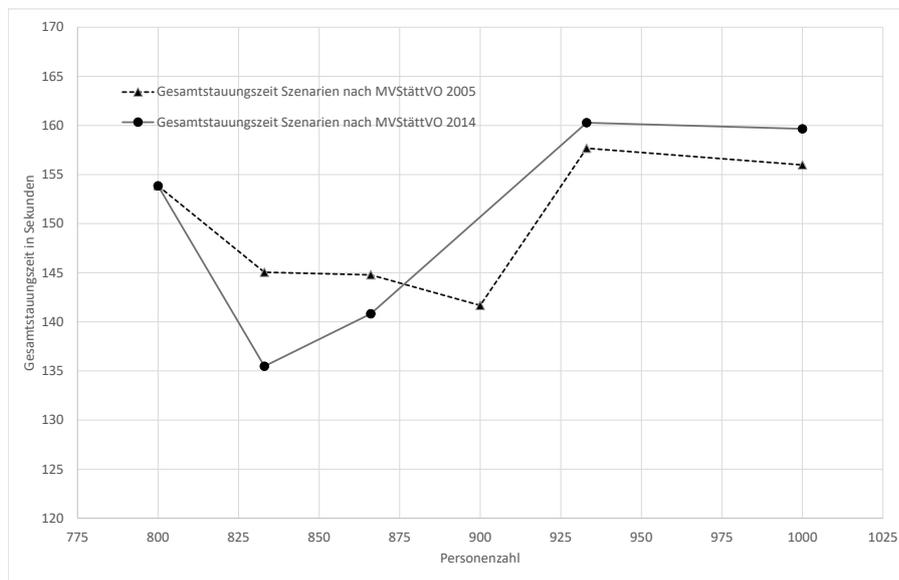


Abbildung 13: Maximale Gesamtstauungszeiten Modell 1 im Vergleich (ohne Szenario 7 und 8)

2.4.3 Ergebnisse Modell 2

Die Ergebnisse der Szenarien aus Modell 2 werden in Tabelle 8 in gleicher Weise wie die Ergebnisse aus Modell 1 dargestellt. Die Aufschlüsselung der einzelnen Ergebnisse sind im Anhang aufgeführt. Dort sind auch die, zum Vergleich der Simulationsdurchläufe eines Szenarios herangezogenen, Boxplotdiagramme angehängt. Die Auswertung ergab für Modell 2 keine erwähnenswerten Ausreißer in der maximalen Evakuierungszeit der Szenarien, so dass davon ausgegangen werden kann, dass alle Durchläufe für die Auswertung herangezogen werden können.

Um die Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien sicherzustellen und die Relevanz der Evakuierungszeiten von Modell 2 hinsichtlich der Fragestellung zu überprüfen, muss kontrolliert werden, ob die für den Vergleich herangezogenen maximalen Entfluchungsdauern von einem Agenten aus dem oberen Stockwerk erzielt worden sind. Zu diesem Zweck sind die ermittelten Durchläufe, welche die maximale Evakuierungsdauer pro Szenario aufweisen, visuell in *Pathfinder Results* überprüft worden. In allen Fällen war der langsamste Agent jeweils aus der Gruppe der Agenten im oberen Stockwerk. Weitere Stichproben in den weiteren Durchläufen ergeben das selbe Ergebnis, sodass die Vergleichbarkeit hinsichtlich der Fragestellung für dieses Modell sichergestellt ist.

Tabelle 8: Vergleich der Maxima und Mittelwerte der Evakuierungszeit, kontinuierlichen und gesamten Stauungszeit aller Szenarien in Modell 2

Szenario Nr.	Evakuierungsdauer [s]		Stauungszeit gesamt [s]		Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]	
	Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
1	312,125	182,265	227,650	62,816	56,975	6,107
2	301,850	180,312	204,425	60,181	57,050	5,663
3	315,975	183,871	223,175	63,925	74,325	6,320
4	297,125	180,072	219,300	60,172	62,325	5,485
5	303,275	178,424	221,375	58,189	74,125	5,326
6	313,925	185,470	223,625	65,271	78,725	6,362
7	295,225	177,487	215,350	57,907	56,975	5,313
8	310,825	184,240	228,625	64,126	69,800	6,189
9	309,300	182,279	227,325	62,123	74,375	5,734
10	298,175	175,028	205,325	55,116	66,375	4,776
11	314,075	189,269	235,950	68,985	73,950	6,979
12	298,025	184,098	225,625	64,187	62,775	5,789
13	287,050	172,212	188,450	52,068	42,225	4,158
14	319,000	189,564	232,825	69,312	71,475	6,887
15	317,200	191,776	236,900	71,389	86,825	6,960
16	317,225	187,116	242,500	66,835	76,725	6,576

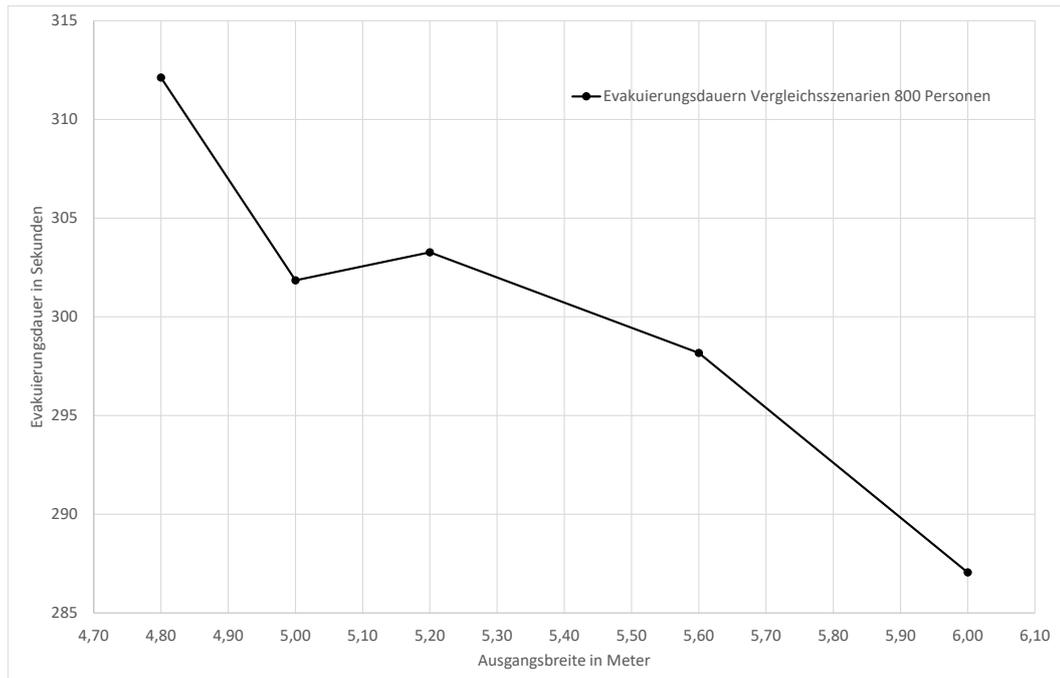


Abbildung 14: Evakuierungsdauern der Vergleichsszenarien mit 800 Personen (ohne Szenario 7)

2.4.4 Auswertung der Ergebnisse für Modell 2

Auch für Modell 2 soll die Verwendbarkeit von *Pathfinder* für die angedachten Simulationsfälle überprüft werden. Zwar ist anhand der Ergebnisse aus der Auswertung von Modell 1 bereits deutlich geworden, dass *Pathfinder* auch geringe Unterschiede der Ausgangsbreiten simulieren kann, jedoch weist Modell 2 im Verlauf der Rettungswege ein zusätzliches Modul in Form der Treppen und den darauf vorhandenen Geschwindigkeitseinbußen der Agenten auf. Daher soll anhand der Szenarien mit erweiterten Ausgangsbreiten unter Anwendung der Bemessungsgrundlage der MVStättVO 2005 (jeweils 800 Personen) überprüft werden, welche Auswirkungen die Einbringung von Treppen im Fluchtwegverlauf auf die Entfluchtungszeiten haben und ob die Auswertbarkeit der folgenden Szenarien hinsichtlich der Fragestellung beeinflusst wird.

Betrachtet man nun die Ergebnisse in Abbildung 14 stellt man fest, dass sich eine grundsätzliche Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus Modell 1 ergibt und mit steigender Ausgangsbreite eine schnellere Evakuierung der Personen möglich ist. Eine Abweichung von dieser Feststellung ist in Szenario 5 zu beobachten. In Szenario 5 ergibt sich eine Erhöhung der benötigten Entfluchtungszeit gegenüber Szenario 3 (mit der

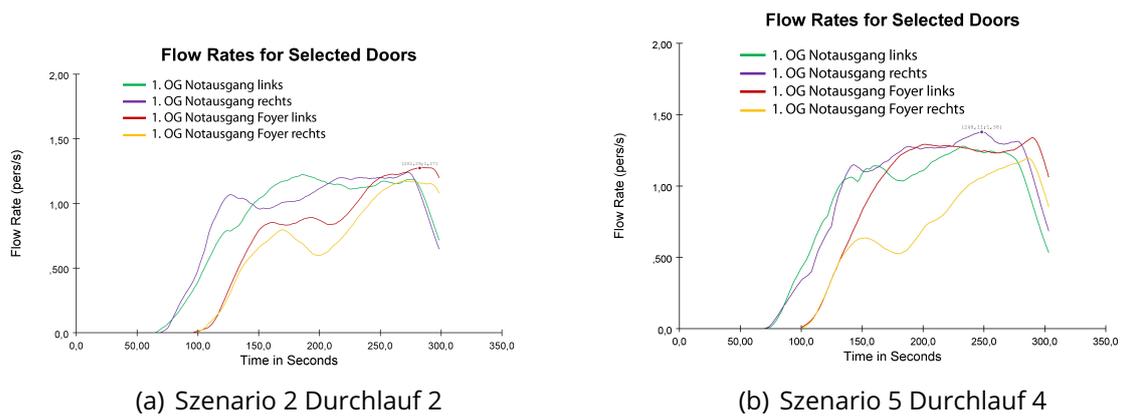


Abbildung 15: Vergleich der Türdurchflussraten im Modell 2⁹

nächst geringeren Ausgangsbreite) um 1,425 Sekunden und damit eine Unterbrechung der Tendenz zu schnelleren Entfluchtungszeiten. Bei Betrachtung der Türdurchflussraten der Durchläufe mit der höchsten Evakuierungszeit (vgl. Abbildung 15) lässt sich allerdings feststellen, dass die erhöhten Türbreiten auch zu einem, im Maximum gemessenem, höheren Fluss von Agenten durch die Türen führen. Auffällig ist dabei, dass in Durchlauf 4 von Szenario 5 die „Notausgangstür Foyer 1.OG rechts“ einen deutlichen Einbruch der Durchflussrate aufweist. Bei der Notausgangstür im Foyer für das erste Obergeschoss im Szenario 2 ist dieser Einbruch, trotz gleicher Türmaße, nicht in diesem Ausmaß zu beobachten. Bei Betrachtung der grafischen Aufbereitung durch *Pathfinder Results* (vgl. Abbildung 16) ist ein Agent im Ausgangsbereich der rechten unteren Tür des oberen Veranstaltungsraums zu erkennen, der entgegen der Fluchtrichtung (zu erkennen am Pfeil des Zylinders) in der Tür steht und diese einengt. Diese Blockade wird erst aufgelöst, nachdem die dem Agent zugeschriebene Reaktionszeit von 177,500 Sekunden erreicht ist und dieser sich in Richtung der Treppe beziehungsweise dem Ausgang im Erdgeschoss bewegt. Durch den Weg, den die Agenten bis zum in Abbildung 15 gemessenen Ausgang zurücklegen müssen, ist diese Entwicklung im Graphen erst mit einer Verzögerung zu erkennen.

Die grafische Auswertung der Szenarien zeigt außerdem, dass die im Fluchtweg angeordneten Treppen bei gleichbleibender Personenzahl und erhöhter Ausgangsbreiten keinen direkten Einfluss auf die Evakuierungszeit durch zusätzliche Stauungen im Bereich der Treppen nehmen (z.B. Abbildung 17). Die Treppen in diesem Modell sind für die auftretenden Personenströme, trotz verringerter Geschwindigkeit auf den Treppen, ausreichend bemessen.

⁹vergrößerte Darstellung im Anhang auf Seite 84

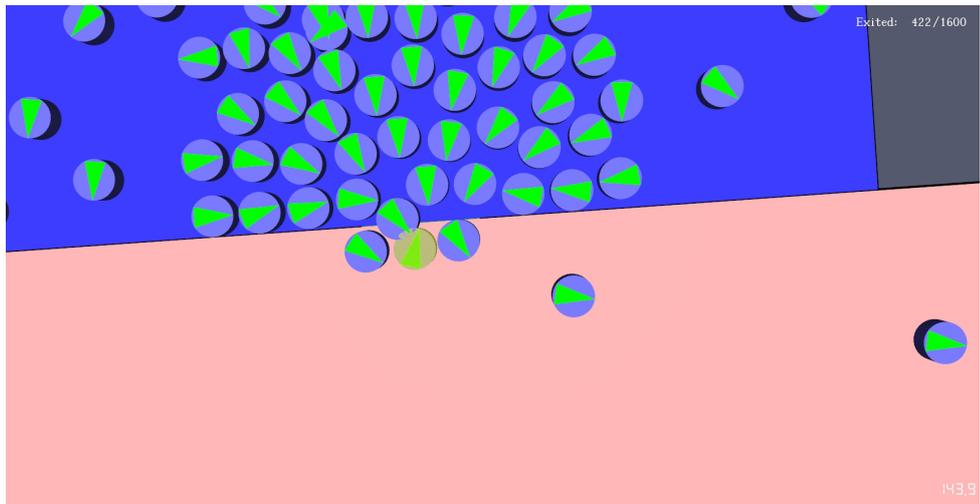


Abbildung 16: Modell 2 Szenario 5 Durchlauf 4: Agent 1486 (Markierung) blockiert die rechte Tür untere Tür des Veranstaltungsraums im ersten OG zum Zeitpunkt 143,9 Sekunden

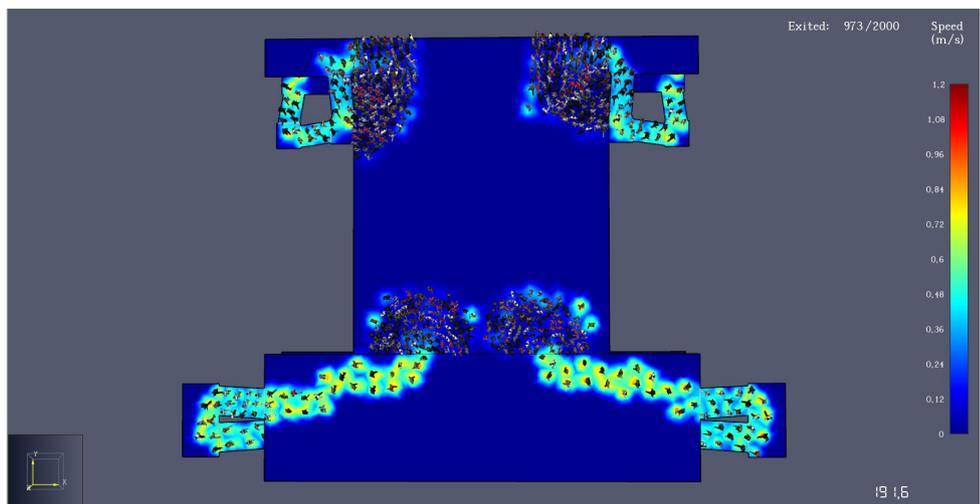


Abbildung 17: Modell 2 Szenario 14 Durchlauf 9 zum Zeitpunkt 191,6 Sekunden mit dargestellter Geschwindigkeit der Agenten

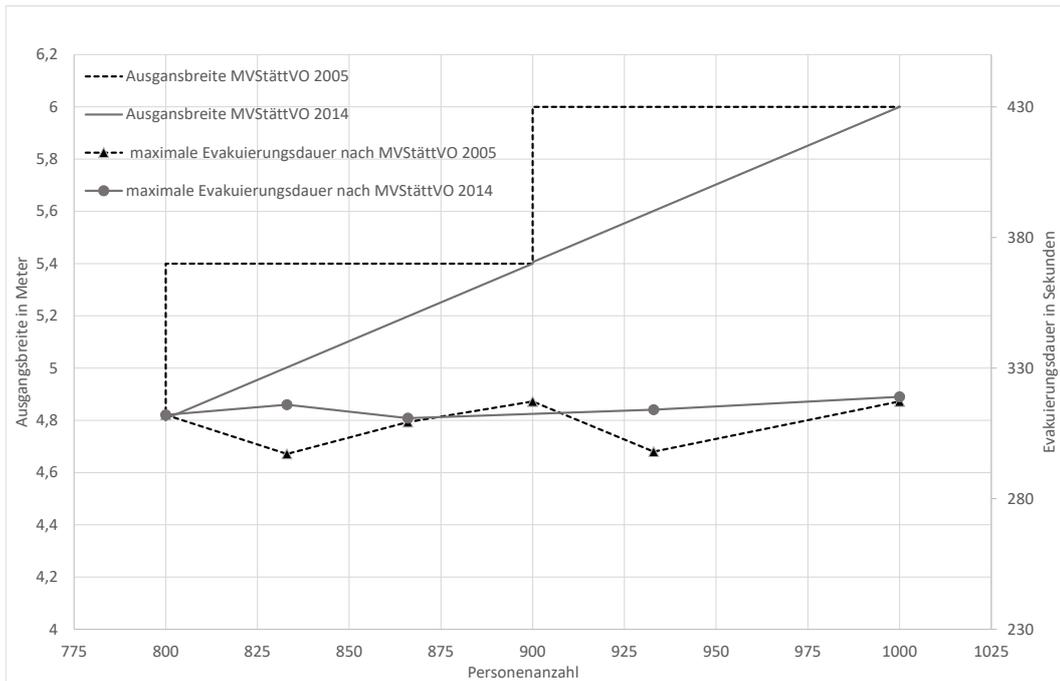


Abbildung 18: Gegenüberstellung maximaler Evakuierungszeiten (Modell 2) und Ausgangsbreite nach MVStättVO 2005 und MVStättVO 2014 (ohne Szenario 7 und 8)

Betrachtet man nun die Auswertung in Abbildung 18 ist eine Ähnlichkeit mit der Auswertung aus Modell 1 (vgl. Abbildung 11) festzustellen. Es wird deutlich, dass die modulare Erweiterung der Rettungswegbreiten nach MVStättVO 2005 wie im Modell 1 zu einer sprunghaften Reduzierung der jeweils benötigten Evakuierungszeit führt, welche bis zum Erreichen der nächsten Modulschwelle wieder ansteigt. Um die direkte Vergleichbarkeit herzustellen werden, wie in Modell 1, zum Sicherheitsniveauvergleich die Szenarien mit der maximalen Auslastung der Modulbreite herangezogen (Szenario 1, 15 und 16).

Abbildung 19 ist zu entnehmen, dass die Entwicklung des Sicherheitsniveaus sich sehr ähnlich zu der Entwicklung in Modell 1 verhält. Im Unterschied zu Modell 1 weist Szenario 14 allerdings eine leicht höhere Evakuierungszeit gegenüber Szenario 15 auf (+1,775 Sekunden), dennoch lässt sich feststellen, dass das Sicherheitsniveau der Szenarien mit Bemessungsgrundlage der MVStättVO 2014 insgesamt in etwa gleich bleibt.

Daraus lässt sich ableiten, dass Treppen im Verlauf eines Rettungsweges, auch bei Anwendung der Interpolation auf die Türbreite nicht zu einer signifikanten Verschlechterung der Sicherheit (gemessen an der Entfluchtungsdauer) führen. Dies gilt, sofern die Treppen keine Stauung der Flüchtenden durch die Reduzierung der Gehgeschwin-

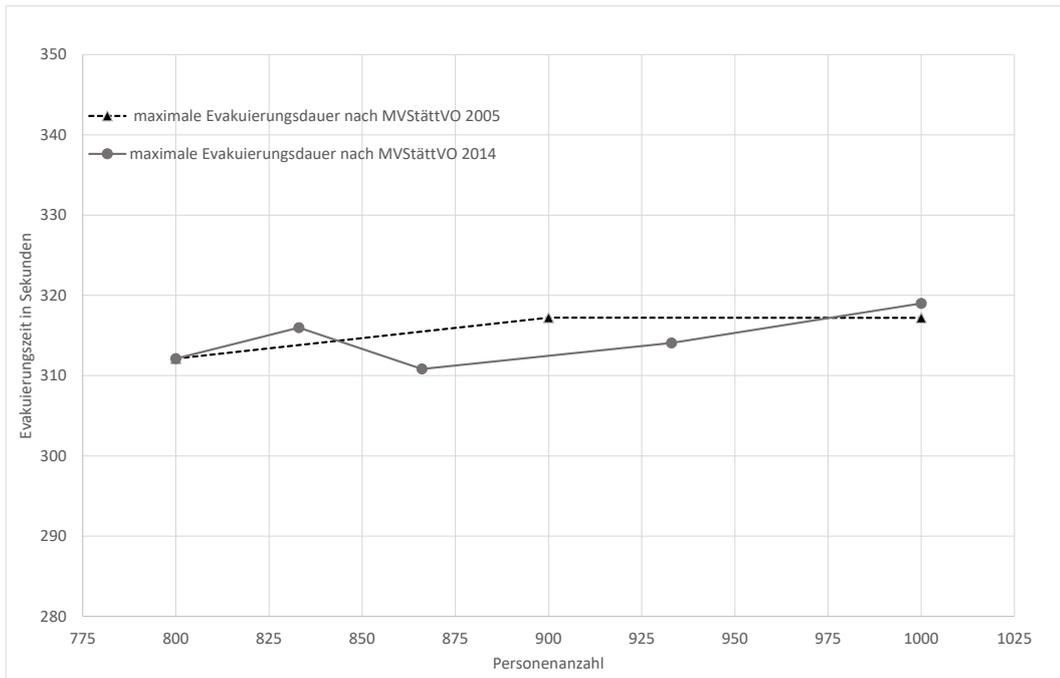


Abbildung 19: Vergleich der Evakuierungszeiten nach MVStättVO 2014 (ohne Szenario 8) mit den Evakuierungszeiten nach MVStättVO 2005 bei voller Auslastung der Rettungswegbreite

digkeit verursachen. In den hier gewählten Szenarien waren die Treppen jeweils breiter als die Türen der Rettungswege vor den Treppen und verursachten keine Stauungen.

2.4.5 Ergebnisse Modell 3

Die Darstellung der Ergebnisse wird auch in Modell 3 beibehalten und in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Vergleich der Maxima und Mittelwerte der Evakuierungszeit, kontinuierlichen und gesamten Stauungszeit aller Szenarien in Modell 3

Szenario Nr.	Evakuierungsdauer [s]		Stauungszeit gesamt [s]		Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]	
	Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert
17	343,775	186,610	233,550	66,533	58,575	5,365
18	352,600	195,339	253,850	75,322	81,825	6,939
19	380,550	198,819	298,075	78,930	80,825	7,282

Bei Auswertung der Ergebnisse ist die hohe Spannweite (34,625 Sekunden) der maximalen Evakuierungszeiten in Szenario 17 auffällig. In der visuellen Auswertung der beiden Simulationsläufe mit maximaler und minimaler Entfluchtungszeit konnte festgestellt werden, dass im Durchlauf mit der höheren Entfluchtungszeit (Durchlauf 1) jeweils ein Agent die Türen zum Foyer im ersten und zweiten Obergeschoss blockiert. Ersichtlich wird dies auch in den Türdurchflussraten der beiden Türen (Abbildung 20) durch jeweils einen Sattelpunkt in den Graphen bevor das Maximum erreicht wird.

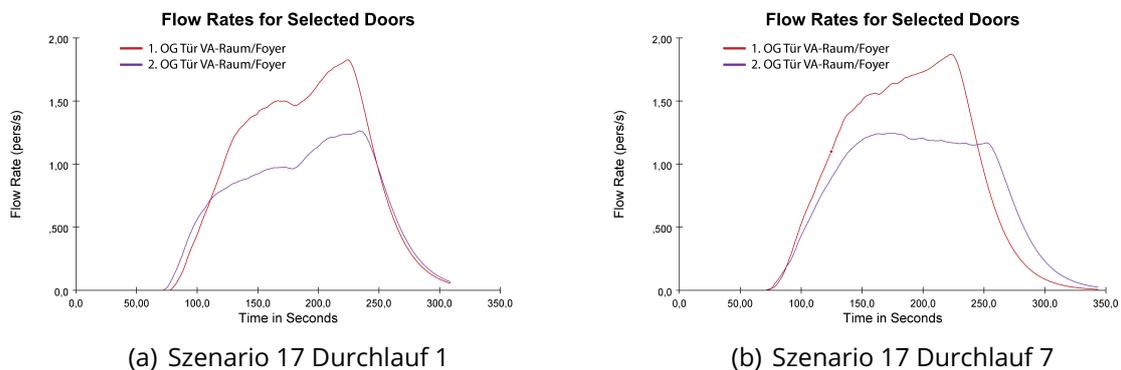


Abbildung 20: Vergleich der Personendurchflussraten der Türen zwischen Foyer und jeweiligem Veranstaltungsraum im ersten und zweiten Obergeschoss im Modell 3¹⁰

Auch in Szenario 19 ist die Spanne der maximalen Evakuierungszeiten zwischen den Durchläufen mit 31,975 Sekunden ungewöhnlich hoch. Hier ist in Durchlauf 6 (mit der maximalen Evakuierungszeit) festzustellen, dass einzelne Agenten die Ausgänge der Veranstaltungsräume blockieren. In Durchlauf 6 betrifft dies beide Ausgänge aus dem Veranstaltungsraum im zweiten Obergeschoss. Gleiches ist in Durchlauf 5, welcher nur 1,125 Sekunden weniger Entfluchtungszeit als Durchlauf 6 aufweist, zu beobachten. In Durchlauf 5 wird dieses auch in den Durchflussraten der Türen des Veranstaltungsraumes im zweiten OG deutlich. Abbildung 21 zeigt für Durchlauf 6 jedoch, dass die Blocka-

¹⁰vergrößerte Darstellung im Anhang auf Seite 85

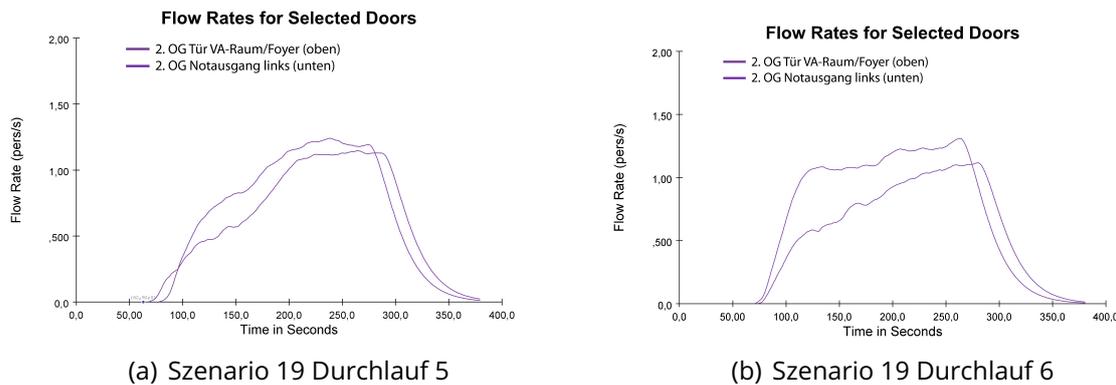


Abbildung 21: Personendurchflussraten an den Türen des Veranstaltungsraums des zweiten Obergeschosses im Modell 3¹¹

de der Tür zwischen Foyer und Veranstaltungsraum wenig Einfluss auf die Durchflussrate hat. Zu erklären ist dies damit, dass der blockierende Agent bereits nach 89,025 Sekunden ebenfalls mit der Entfluchtung beginnt und somit die Blockade aufhebt. Dies geschieht zu einem Zeitpunkt, an dem die Durchflussrate der Tür aufgrund des mangelnden Zulaufs noch nicht durch die Blockade beeinflusst wurde. Die dennoch im Vergleich zu den anderen Durchläufen hohe Evakuierungszeit beruht darauf, dass in diesem Durchlauf mehr Agenten in Folge der zweiten (blockierten) Tür den Fluchtweg über das Foyer nutzen und auf diesem dann weitere Stauungen produzieren.

Obwohl das hier beobachtete Phänomen bereits in Modell 2 aufgetreten ist, sind die Auswirkungen in Modell 3 gravierender. Begründbar ist dies durch die geringere Anzahl an Ausgängen aus den einzelnen Räumen und der damit fehlenden Ausweichmöglichkeit für blockierte Agenten.

Weiterhin wurde visuell überprüft, an welchem Ausgang die maximale Evakuierungszeit erreicht wird, um die Aussagekraft der erreichten Entfluchtungszeiten zu überprüfen. Dabei wurde festgestellt, dass die maximalen Zeiten zum Verlassen des Modells immer durch einen Agenten erreicht wurden, welcher das Modell über das Foyer verlassen hat und im Veranstaltungsraum des zweiten Obergeschoss gestartet ist. Alle Zeiten können dementsprechend hinsichtlich der Fragestellung Berücksichtigung finden.

¹¹vergrößerte Darstellung im Anhang auf Seite 86

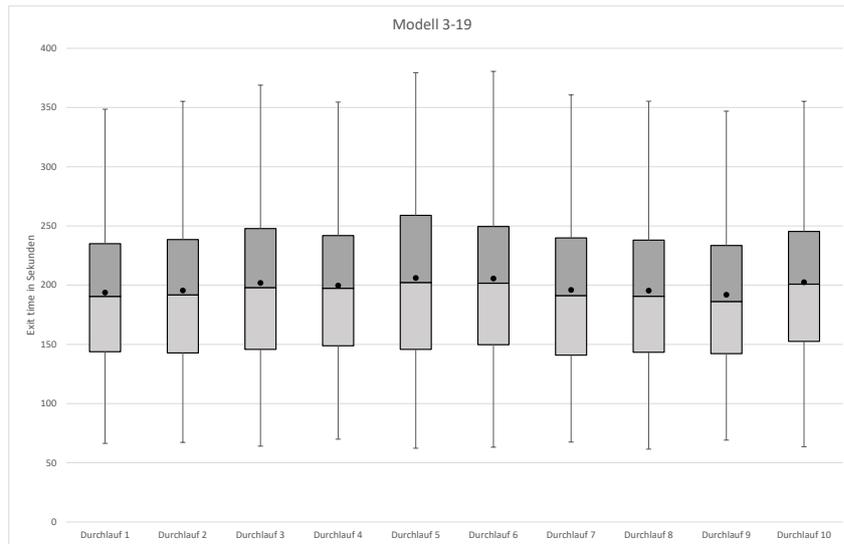


Abbildung 22: Boxplotauswertung Evakuierungszeiten Modell 3 Szenario 19

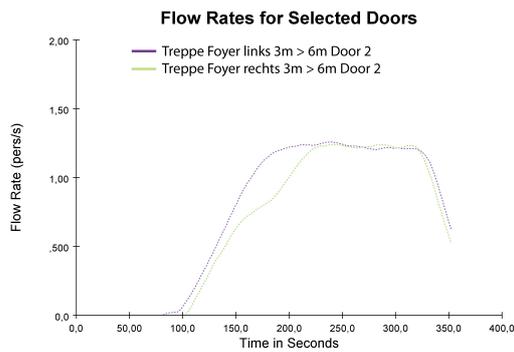
2.4.6 Auswertung der Ergebnisse für Modell 3

Auch in den Ergebnissen von Modell 3 bestätigen sich die Beobachtungen aus den Szenarien der beiden vorherigen Modelle, dass *Pathfinder* in der Lage ist, auch geringere Ausgangsbreitenunterschiede als die Modulbreite nach MVStättVO 2005 zu simulieren. So führt die Evakuierung von 100 Personen weniger in Szenario 17 zu einer um 8,825 Sekunden gegenüber Szenario 18 (mit gleicher Ausgangsbreite und -verteilung) geringeren maximalen Entfluchtungszeit (vgl. Tabelle 9).

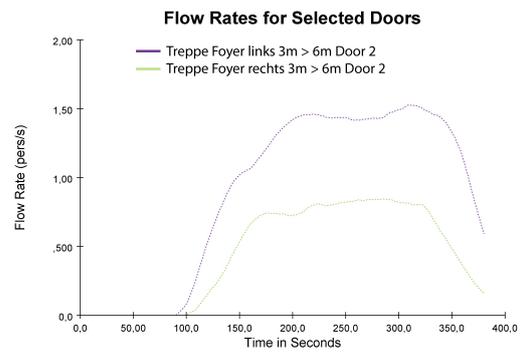
Im direkten Vergleich der beiden Szenarien mit jeweils 1700 Agenten im Modell zeigen sich hohe Unterschiede in den maximalen Evakuierungszeiten. So benötigen die Agenten im 19. Szenario 27,950 Sekunden länger als in Szenario 18, um das Modell zu verlassen. Der Boxplotvergleich (Abbildung 22) aller Durchläufe von Szenario 19 zeigt, dass es sich beim Durchlauf 5 (mit der maximalen Entfluchtungszeit) nicht um einen einzelnen Ausreißer handelt, sondern auch in anderen Durchläufen ähnliche Ergebnisse erzielt werden. Die Streuung der Ergebnisse ist dennoch höher als in den vorherigen Modellen.

Eine Begründung für diesen Unterschied in den Evakuierungszeiten zwischen den beiden Szenarien lässt sich bei Betrachtung der Personendurchflussraten auf den Treppen¹² im Foyer zwischen dem Erdgeschoss und dem ersten Obergeschoss erkennen. In Szenario 19 erreichen die Treppenanlagen in der Summe einen Durchfluss von max.

¹²Gemessen werden die Durchflussraten auf Treppen in *Pathfinder* mithilfe von imaginären Türen am Beginn und Ende der Treppen



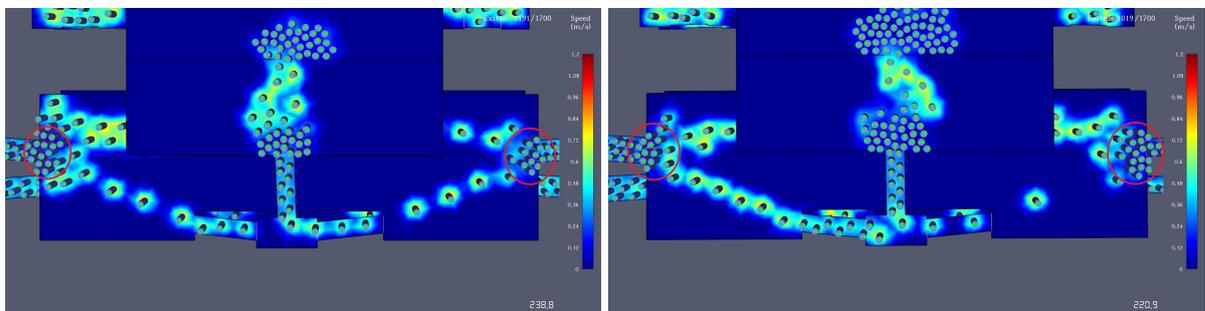
(a) Szenario 18 Durchlauf 5



(b) Szenario 19 Durchlauf 6

Abbildung 23: Vergleich der Personendurchflussraten am Beginn der Foyertreppen (1.OG → EG) im Modell 3 ¹³

ca. 2,35 Personen/Sekunde, während in Szenario 18 die selben Treppen bei gleichmäßig verteilter gleicher Gesamtbreite einen Personendurchfluss von insgesamt bis zu ca. 2,50 Personen/Sekunde aufweisen (vgl. Abbildung 23). Da der Personenfluss auch vom Zufluss der Treppen abhängt, wurde visuell überprüft, ob sich zum Zeitpunkt der Erhebung der Maxima Stauungen vor den gemessenen Treppen bilden. Wie in Abbildung 24 zu erkennen ist, sind Stauungen vorhanden. Daher entsprechen die erreichten Maxima in der Durchflussmenge der maximalen Durchflussrate der Treppen und sind nicht durch fehlenden Zulauf beeinflusst.



(a) Szenario 18 Durchlauf 5 Zeitpunkt: 238,8 Sekunden

(b) Szenario 19 Durchlauf 6 Zeitpunkt: 220,9 Sekunden

Abbildung 24: Vergleich der Stauungssituationen (rot eingekreist) vor den Foyertreppen im Modell 3

Bei der Anwendung des bisher eingesetzten Ansatz zum Vergleich der jeweils maximalen Entfluchtungszeiten zeigt sich, dass die Anwendung der Interpolation auf die Rettungswegbreite der Treppen in diesem Modell ein an der Entfluchtungszeit gemessenes, höheres Sicherheitsniveau bietet. Trotz der hohen Spannweite der Evakuierungszeiten in Szenario 19 lässt auch der Vergleich der mittleren Evakuierungszeiten den sel-

¹³vergrößerte Darstellung im Anhang auf Seite 87

ben Rückschluss zu. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass die Vergleichsannahmen für die Treppenbreiten im Foyer in Szenario 19 sehr konstruiert sind, da in der Realität selten auf gegenüberliegenden Seiten eines Foyers unterschiedliche Treppenbreiten verbaut werden. Entweder würden beide Treppen auf 1,80 m Breite verbreitert oder bei einer Treppenbreite von 1,20 m ein zusätzlicher Rettungsweg geschaffen werden. Beide Möglichkeiten würden zu einer Anhebung des Sicherheitsniveaus (bei sonst unveränderten Rahmenbedingungen) auf mindestens das hier in Szenario 18 beobachtete Sicherheitsniveau führen, wenn die Personenflüsse auf den Treppen den hier an der jeweiligen Breite gemessenen Werten entsprechen.

Dies lässt jedoch nicht den Rückschluss zu, dass eine mögliche Interpolation der Rettungswegbreiten in den aufgeführten Beispielen ein schlechteres Sicherheitsniveau erzeugt, da es sich bei den aufgezeigten Möglichkeiten nicht um rechtliche Vorgaben handelt, sondern diese über den gesetzlichen Anforderungen liegen und somit eine freiwillige Leistung des Veranstaltungsstättenbetreibers sind. Dennoch ergeben sich hier Möglichkeiten, die weiterer Untersuchung bedürfen. Bei Umsetzung der rechtlichen Minimalanforderungen ohne Berücksichtigung gestalterischer Belange konnte gezeigt werden, dass durch die Interpolation kein schlechteres Sicherheitsniveau erzeugt wird.

Die bei der visuellen Auswertung von Modell 3 entdeckten Stauungen im Bereich der Treppenanlagen im Foyer und die Auswertung der niedrigeren Durchflussraten auf den Treppen gegenüber einer Tür in der Ebene, deuten darauf hin, dass eine Verbesserung des Sicherheitsniveaus erreicht werden könnte, wenn die baurechtlichen Vorschriften eine unterschiedliche Bemessung für Rettungswege auf Treppen gegenüber der Bemessung in der Ebene vorsehen würden. Unterstützt wird dies durch die Beobachtungen aus dem zweiten Modell. Die dort im Foyer verwendeten Treppenanlagen weisen eine im Minimum 1,20 m höhere Gesamtbreite (Szenario 15) auf, als die ihr zugeordneten zuführenden Rettungswege. Während dieses Szenarios kommt es zu keiner Stauung im Bereich der Treppenanlage. Weiter unterstützt wird die Vermutung durch sehr kurzzeitig auftretende Stauungen an den hinteren beiden Notausgängen des Veranstaltungsraumes im ersten Obergeschoss in Szenario 14 (z.B. Durchlauf 9). In diesem Szenario beträgt die Differenz zwischen der Treppenbreite und der Breite der vorgelagerten Tür nur 0,30 m.

Diese Erkenntnisse reichen jedoch nicht für eine Abschätzung aus, in welchem Verhältnis Breiten von Rettungswegen in der Ebene und über Treppen geführte Rettungswege zueinander stehen sollten.

2.4.7 Diskussion der Ergebnisse

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden unter Berücksichtigung der Mindestvorgaben der RIMEA [1] und den Hinweisen aus dem „Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes“[31] erzielt. Jedes Szenario wurde gemäß dem Mindestwert der RIMEA für eine aussagefähige Interpretationsmöglichkeit zehn Mal simuliert und konservativ, durch die Heranziehung des jeweils langsamsten Evakuierungsdurchlaufs, ausgewertet. Eine Wiederholung der Simulation mit erneut randomisierter Verteilung der Agenten und der dazugehörigen Reaktionszeit sollte zu ähnlichen Ergebnissen führen.

Es handelt sich bei den Eingabemodellen um einfache Grundrisse einer Versammlungsstätte, welche exakt den (unterschiedlichen) rechtlichen Vorgaben entsprechen. So wird zum Beispiel in Szenario 16 nur einer der beiden vorderen Ausgänge in seiner Breite erhöht. In einer realen Versammlungsstätte wären, aus Gründen der Symmetrie und des Erscheinungsbildes, wahrscheinlich beide nach vorne gerichteten Ausgänge verbreitert worden. Ebenso wurde zur Vereinfachung der Modelle angenommen, dass es sich um stehendes, nicht zur Bühne hin ausgerichtetes Publikum handelt und keine weiteren Einbauten in den Versammlungsräumen (Tische, Stühle, Technik, etc.) vorhanden sind.

Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Versammlungsstätten ist daher nur bedingt gegeben, dennoch sind die Ergebnisse hinsichtlich der Fragestellung auswertbar.

Es muss erwähnt werden, dass die Agenten in der Simulation zwar auf andere Agenten reagieren und diesen aus dem Weg gehen, allerdings führen die Agenten keine reale soziale Interaktion untereinander aus. Dies führt dazu, dass Agenten einen Ausgang verstopfen, weil die ihnen zugewiesene Reaktionszeit noch nicht erreicht ist. In einem realen Evakuierungsfall würde die soziale Interaktion unter den Besuchern wahrscheinlich die Blockade auflösen und den noch nicht reagierenden Besucher ebenfalls zur Flucht animieren.

Darüber hinaus entwickeln sich im Verlauf der Simulation immer wieder Stauungen im Bereich von Türen. Die Agenten reagieren auf diese Stauungen ohne Emotionen und suchen ggf. einen alternativen Weg oder harren in der Stauung aus. In einer realen Bedrohungssituation könnten diese auftretenden Stauungen Panik bei den betroffenen Besuchern auslösen und zu nicht vorhersehbaren bzw. zu simulierenden Verhaltensweisen führen.

Kapitel 3

Fazit

Die Vorbehalte der Genehmigungsbehörden hinsichtlich der Auflösung der Modulregelung in der Rettungswegbreitenberechnung konnten in dieser Bachelorarbeit anhand einer Personenstromsimulation in verschiedenen Modellen einer (fiktiven) Versammlungsstätte untersucht werden. Für die Simulation wurden die Vorgaben der Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen herangezogen, um eine möglichst hohe Realitätsnähe der Ergebnisse zu erreichen.

Durch die Simulation verschiedener Ausgangsbreiten und dem Vergleich der, sich aus den geänderten Vorschriften ergebenden, Sicherheitsniveaus konnte gezeigt werden, dass die Bemessung der Rettungswege ohne Berücksichtigung der bisherigen Mindestmodulbreite zu keiner Verschlechterung des Sicherheitsniveaus gegenüber der Regelung der MVStättVO 2005 führt, sofern die maximale Auslastung der benötigten Rettungswegbreiten zu Grunde gelegt wird. Diese grundsätzliche Einschätzung verändert sich nicht, wenn sich im Verlauf eines Rettungsweges Treppen befinden. Jedoch konnte anhand der gesammelten Daten festgestellt werden, dass Treppen mit gleicher Breite wie die zuführenden Rettungswege zu einer Verschlechterung des maximal möglichen Sicherheitsniveaus führen.

Hinsichtlich der Fragestellung dieser Arbeit, erweisen sich die Vorbehalte der Genehmigungsbehörden gegenüber der Interpolation in der Rettungswegbemessung nach MVStättVO 2014 als unbegründet. Neben den Ergebnissen der Simulationen in dieser Arbeit, sprechen auch entsprechende Experimente mit ähnlichem Ergebnis (vgl. Kapitel 2.2.3) gegen die im Vorfeld hervorgebrachten Einwände.

Für die weitere Entwicklung der Rettungswegbreiten in Versammlungsstätten sind weitere Forschungen auf dem Gebiet der Personenströme notwendig und insbesondere der Einfluss von Treppen im Verlauf von Rettungswegen muss genauer überprüft werden. Auch die Entwicklung immer besserer Simulationsmodelle zur Evakuierung

von Menschenmengen spielt hinsichtlich der zukünftigen Gestaltung von Rettungswegen in Versammlungsstätten durchaus eine wichtige Rolle. So können durch weiterentwickelte Simulationsmodelle Vorhersagen zu möglichen Stauungen auf Rettungswegen getroffen werden und Menschenströme durch digitale Wegweiser und Sicherheitspersonal entsprechend gelenkt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] RiMEA e V. RiMEA e V, editor. Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen. Duisburg; 2016. Available from: https://rimeaweb.files.wordpress.com/2016/06/rimea_richtlinie_3-0-0_-_d-e.pdf.
- [2] TraffGo HT GmbH. TraffGo HT GmbH, editor. PedGo: Benutzerhandbuch Version 2.6.1. Duisburg; 2013. Available from: <https://www.traffgo-ht.com/downloads/pedestrians/downloads/documents/Handbuch.pdf>.
- [3] Nelson H, Mowrer F. Emergency Movement. In: DiNenno PJ, editor. SFPE handbook of fire protection engineering. Quincy, Mass. and Bethesda, Md.: NFPA National Fire Protection Association and Society of Fire Protection Engineers; 2002. p. 3-367 – 3-380.
- [4] Holl S. Methoden für die Bemessung der Leistungsfähigkeit multidirektional genutzter Fußverkehrsanlagen [Dissertation]. Bergische Universität Wuppertal. Wuppertal; 2016. Available from: <http://elpub.bib.uni-wuppertal.de/edocs/dokumente/fbd/bauingenieurwesen/diss2016/holl/dd1604.pdf>.
- [5] Seyfried A, Rupperecht T, Passon O, Steffen B, Klingsch W, Boltes M. New insights into pedestrian flow through bottlenecks. Transportation Science. 2007; Available from: <https://arxiv.org/pdf/physics/0702004.pdf>.
- [6] Holl S. Hermes - Erforschung eines Evakuierungsassistenten für den Krisenfall bei Großveranstaltungen, Teilvorhaben: Grundlegende Untersuchungen zur Modellierung der Fußgängerdynamik und Echtzeitsimulation : Schlussbericht ; Teile I und II. Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek;
- [7] Schreiber MT, Kunze R, Dessi A. Europäisches Institut für TagungsWirtschaft GmbH an der Hochschule Harz, editor. Meeting-& EventBarometer Deutschland 2018/19: Die Deutschland-Studie des Kongress- und Veranstaltungsmarktes. Frankfurt am Main – Wernigerode; 2019. Available from: https://www.gcb.de/fileadmin/GCB/Discover_Germany/MEBA/190516_MEBA_ManagementInfo_2019.pdf.
- [8] Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren, editor. Musterbauordnung: Fassung November 2002:

zuletzt aktualisiert am 22.02.2019. Berlin; 2019. Available from: <https://www.bauministerkonferenz.de/Dokumente/42322694.pdf>.

- [9] Witt S. Praxissemesterbericht: Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz bei der Feuerwehr Hamburg. Hamburg; August 2019.
- [10] Buck E. Thalia in Flammen: Theaterbrände in Geschichte und Gegenwart. 1st ed. Erlensee: EFB-Verl.; 2000.
- [11] Klode K, DIN e V . Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättVO): Organisation und praktische Umsetzung. Beuth Verlag GmbH; 2015. Available from: <https://books.google.de/books?id=TCsCCwAAQBAJ>.
- [12] Mikoletzky J. Der Brand des Wiener Ringtheaters 1881 und die Folgen. Ferrum : Nachrichten aus der Eisenbibliothek,. 1997;69:59–68. Available from: <http://doi.org/10.5169/seals-378328>.
- [13] Wien A, Renner R. Veranstaltungsmanagement: Ein Leitfaden zur Konzeption und Durchführung von Kulturveranstaltungen. Tectum Wissenschaftsverlag; 2011. Available from: <https://books.google.de/books?id=YFJ4DwAAQBAJ>.
- [14] Polizeiverordnung über die bauliche Anlage, die innere Einrichtung und den Betrieb von Theatern, öffentlichen Versammlungsräumen und Zirkusanlagen. Garding: Lühr & Dircks; 1909. Available from: <http://resolver.staatsbibliothek-berlin.de/SBB00018CB600000000>.
- [15] Müller E. Entwicklung des baulichen Brandschutzes bei Versammlungsstätten. Schaden Prisma. 1977;6(4):53–56. Available from: https://www.schadenprisma.de/wp-content/uploads/pdf/1977/sp_1977_4_1.pdf.
- [16] Kwiecinski S, Buschoff CA. M-VStättV – Licht im Dschungel. VPLT Magazin. 2004;(31):18–19. Available from: <https://www.vplt.org/sites/default/files/vpltmagazin/anhaenge/vplt-magazin-31.pdf>.
- [17] Geburtig G, editor. Brandschutz im Bestand: Versammlungsstätten. 1st ed. Brandschutz im Bestand. Berlin and Stuttgart: Beuth and Fraunhofer IRB Verl.; 2011. Available from: <http://www.beuth.de/cmd?level=tpl-langanzeige&webservice=vlb&smoid=128457983>.
- [18] Innenministerium Nordrhein-Westfalen. Verordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten: VStättVO; 01.07.1969. Available from: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwjDxavT_armAhWqM-wKHfLwBBoQFjABegQIAhAC&url=https%3A%2F%

2Frecht.nrw.de%2F1mi%2Fowa%2Fbr_gv_show_pdf%3Fp_jahr%3D1969%26p_nr%3D47&usg=A0vVaw3kiq_pSqrYFG-M1wWDhfX.

- [19] Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren, editor. Muster-Versammlungsstättenverordnung - Begründung der Änderungen: Fassung 2002. Berlin; 2002. Available from: http://www.verordnungen-berlin.de/bundeslaender/downloads/MusterVstaettV2002/Begrueendung_MVStaettV_2002.pdf.
- [20] Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren, editor. Muster-Verordnung über Versammlungsstätten: Fassung 1978. Bonn; 1978. Available from: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjagL_8q3mAhWB-KQKHQj6D_MQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.is-argebau.de%2FDokumente%2F4237136.pdf&usg=A0vVaw0QjMsvNfhpHt4zltT5tho8.
- [21] Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren, editor. Muster-Versammlungsstättenverordnung - Begründung der Änderungen: Fassung 2005. Berlin; 2005. Available from: http://www.verordnungen-berlin.de/bundeslaender/downloads/MusterVstaettV2005/Begrueendung_MVStaettV_2005.pdf.
- [22] Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren, editor. Muster-Versammlungsstättenverordnung: Fassung 2005. Berlin; 2005. Available from: <https://www.bauministerkonferenz.de/Dokumente/4235648.pdf>.
- [23] Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren, editor. Muster-Versammlungsstättenverordnung - Begründung der Änderungen: Fassung 2014. Berlin; 2014. Available from: <https://www.is-argebau.de/Dokumente/42317621.pdf>.
- [24] Arbeitsgemeinschaft der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren, editor. Muster-Versammlungsstättenverordnung: Fassung 2014. Berlin; 2014. Available from: <https://www.is-argebau.de/Dokumente/4231724917250.pdf>.
- [25] Deutsches Institut für Normung e V . Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 01.12.2005.
- [26] Müller K. Zur Gestaltung und Bemessung von Fluchtwegen für die Evakuierung von Personen aus Bauwerken auf der Grundlage von Modellversuchen [Magdeburg, Techn. Hochsch., Diss., 1981]; 1981.

-
- [27] Bibliographisches Institut GmbH, editor. Entfluchtung, die: Bedeutung. Berlin; 2019. Available from: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Entfluchtung#bedeutung>.
- [28] Forell B. Internationaler Vergleich der Bemessung von Rettungswegen in Versammlungsstätten. In: Hosser D, editor. Tagungsband / Braunschweiger Brandschutz-Tage 2012. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig. Braunschweig: Techn. Univ. iBMB; 2012. p. 199–214.
- [29] Hebben S. Leitfaden für die Erstellung von Evakuierungsgutachten auf der Grundlage von Personenstromsimulationen und deren Bewertung durch die Genehmigungsbehörde [Diplomarbeit]. Universität Duisburg-Essen. Duisburg-Essen; 30.04.2008. Available from: <https://www.traffgo-ht.com/downloads/research/studies/Hebben2008.pdf>.
- [30] Purser DA. Behaviour and Travel Interactions in Emergency Situations and Data needs for Engineering Design. In: Galea ER, editor. Pedestrian and Evacuation Dynamics 2003. Greenwich, UK; August 2003. p. 355–370.
- [31] Hosser D, editor. Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes: Technischer Bericht TB 04-01 der vfdb. 3rd ed. Technischer Bericht. Köln: VdS-Verl.; 2013.
- [32] Gerhold P. Nachweises der sicheren Entfluchtung aus einem Versammlungsraum, vor dem Eintreten kritischer Zustände, anhand von Brandschutzingenieurmethoden: Entwicklung eines Musterbeispiels zur Anwendung im Baugenehmigungsverfahren unter dem Gesichtspunkt der Akzeptanzsteigerung [Masterthesis]. Fachhochschule Köln. Köln; 14.05.2015. Available from: http://www.brandschutzbuero.de/site/assets/files/1220/masterthesis_gerhold_final.pdf.
- [33] Rogsch C. Vergleichende Untersuchungen zur dynamischen Simulation von Personenströmen [Diplomarbeit]. Forschungszentrum Jülich. Jülich; Oktober 2005. Available from: <http://juser.fz-juelich.de/record/155066/files/FZJ-2014-04251.pdf>.
- [34] Predtečenskij VM, Milinski AI. Personenströme in Gebäuden: Berechnungsmethoden für die Projektierung. 1st ed. Berlin: Staatsverl. d. DDR; 1971.
- [35] DiNenno PJ, editor. SFPE handbook of fire protection engineering. 3rd ed. Quincy, Mass. and Bethesda, Md.: NFPA National Fire Protection Association and Society of Fire Protection Engineers; 2002.

-
- [36] Fruin J. Pedestrian planning and design. Elevator World; 1987.
- [37] Pauls J. Calculating evacuation times for tall buildings. Fire Safety Journal. 1987;12(3):213–236.
- [38] Burghardt S. Dynamik von Personenströmen in Sportstadien [Wuppertal, Univ., Diss., 2013]. Universitätsbibliothek Wuppertal. Wuppertal; 2013.
- [39] Thunderhead Engineering, editor. Pathfinder User Manual. Manhattan; 2019. Available from: https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2011/07/users_guide-9.pdf.
- [40] Thunderhead Engineering, editor. Pathfinder Results User Manual. Manhattan; 2019. Available from: https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/03/results_users_guide-5.pdf.
- [41] Grewolls K, Grewolls G. SIMTEGO GmbH, editor. Simulation der RIMEA-Testfälle mit Pathfinder: Version 1 - Pathfinder-Version 2018.4.1210 vom 10.12.2018. Ulm;. Available from: https://www.simtego.de/wp-content/uploads/2019/01/Pathfinder-RiMEA-Test_V1-18.01.2019.pdf.
- [42] SFPE Guide to Human Behavior in Fire. Maryland; 2003.
- [43] Thunderhead Engineering, editor. Pathfinder Verification and Validation. Manhattan; 2019. Available from: https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2019/10/verification_validation_2019_2.pdf.
- [44] Thunderhead Engineering, editor. Pathfinder Technical Reference. Manhattan; 2019. Available from: https://www.thunderheadeng.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2011/07/tech_ref-6.pdf.
- [45] Deutsches Institut für Normung e V . Gebäudetreppen - Begriffe, Messregeln, Hauptmaße. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 01.03.2015. Available from: <https://secure-1beuth-1de-10000017t194e.shan02.han.tib.eu/cmd%3Bjsessionid=B42XDMSQCPKGFDPYU0DJTAPK.2?workflowname=instantdownload&customerid=328165&docname=2281545&contextid=eeas&servicerefname=eeas&LoginName=bvollbrecht1>.
- [46] Thunderhead Engineering, editor. Monte Carlo Simulations in Pathfinder. Manhattan; 2019. Available from: <https://www.thunderheadeng.com/2018/06/monte-carlo-simulations-in-pathfinder/>.

Anhang

I. Inhalt des digitalen Anhangs auf CD

- Digitale Version der Arbeit (PDF)
- Simulationsdateien *Pathfinder* und *Pathfinder Results*
 - Modell 1
 - Modell 2
 - Modell 3
- Auswertung der Datei „Occupants.csv“ als Excel-Datei pro Szenario
 - Modell 1
 - Modell 2
 - Modell 3
- Ergebnisse der Simulation (PDF) pro Szenario
 - Tabellenauswertung
 - Modell 1
 - Modell 2
 - Modell 3
 - Boxplotauswertung
 - Modell 1
 - Modell 2
 - Modell 3
- Grundrisse und perspektivische Ansichten der Simulationsmodelle

II. Grundriss Modell 1

Modell 1
Erdgeschoss

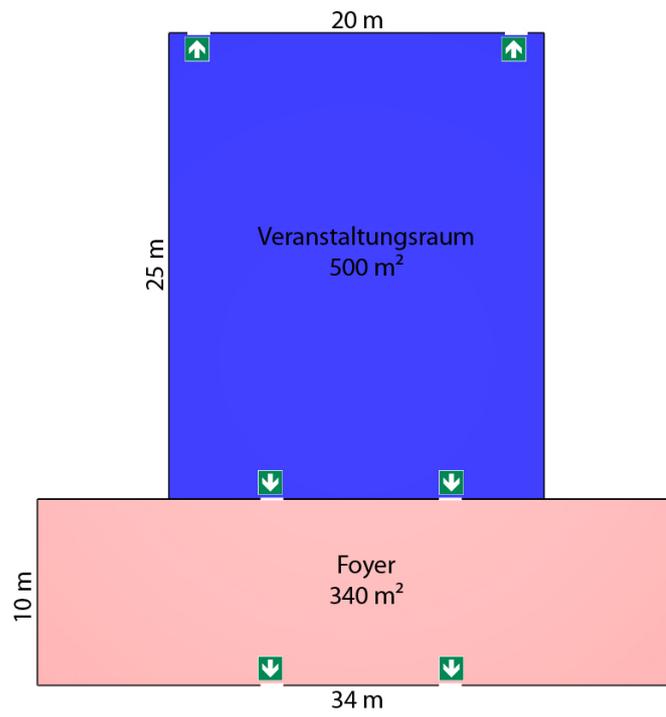


Abbildung Anhang 1: Grundriss Modell 1

III. Grundrisse Modell 2

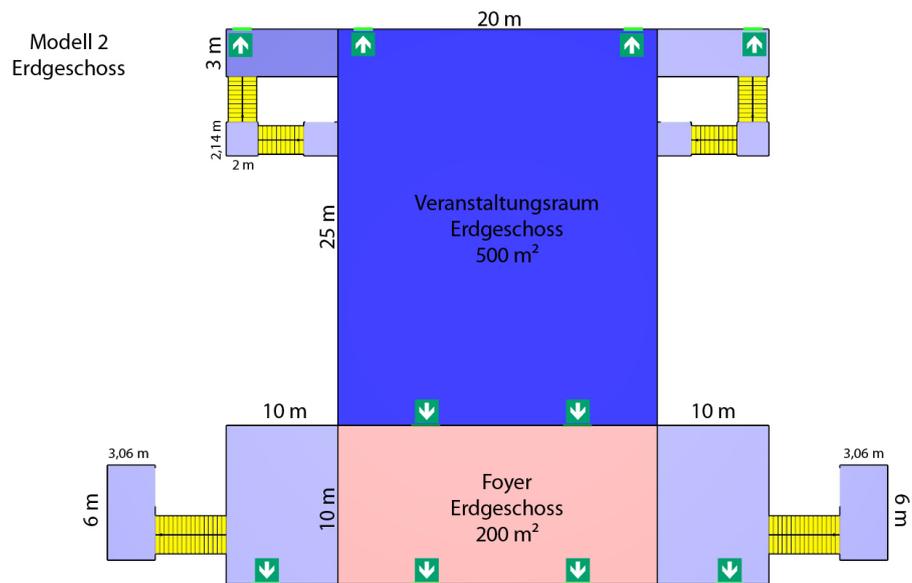


Abbildung Anhang 2: Grundriss Erdgeschoss Modell 2 mit Bemaßung

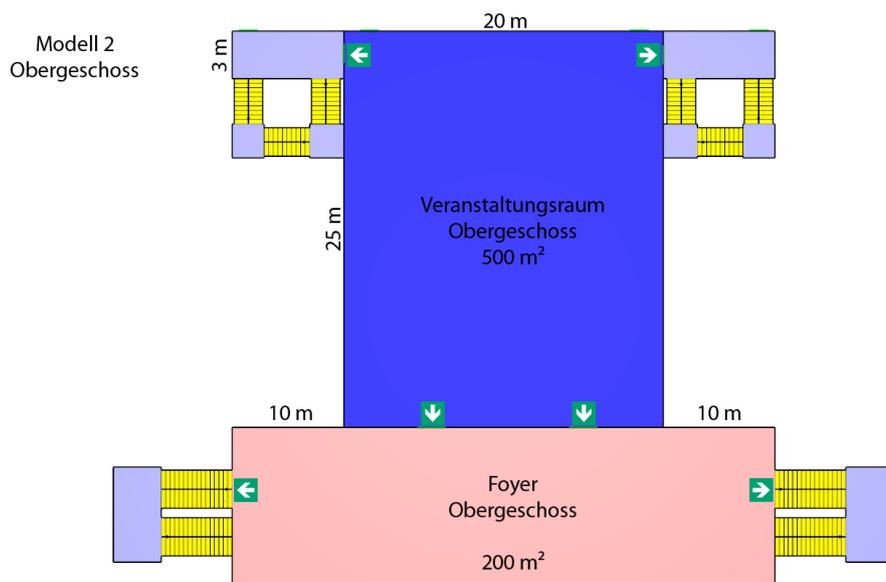


Abbildung Anhang 3: Grundriss 1. Obergeschoss Modell 2 mit Bemaßung

IV. Grundrisse Modell 3

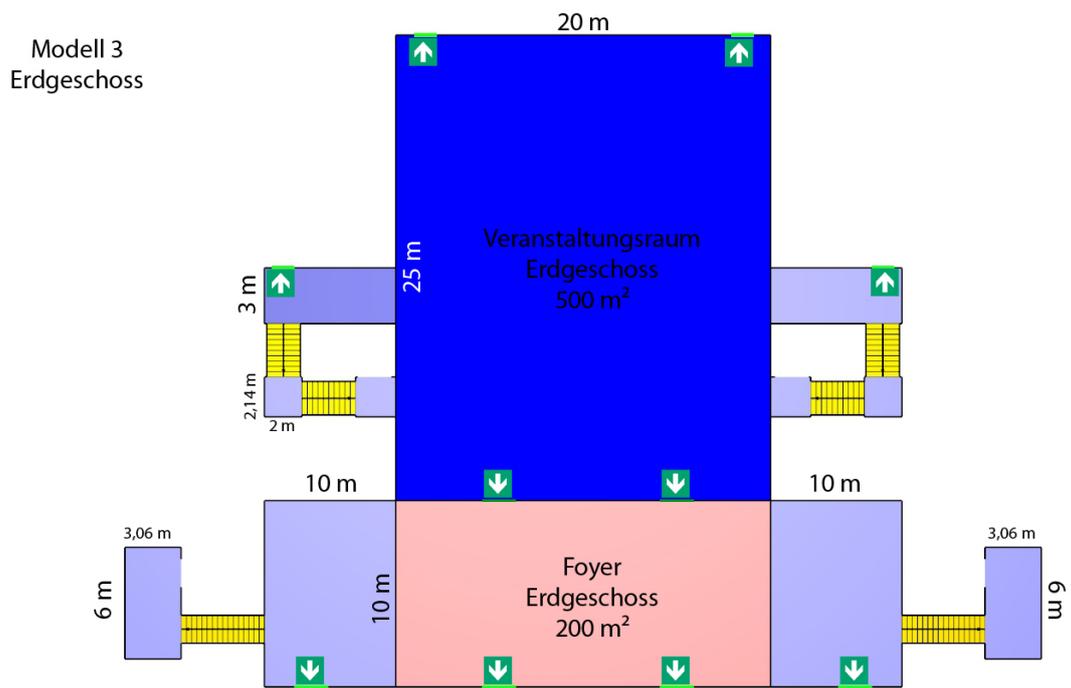


Abbildung Anhang 4: Grundriss Erdgeschoss Modell 3 mit Bemaßung

Modell 3
1. Obergeschoss

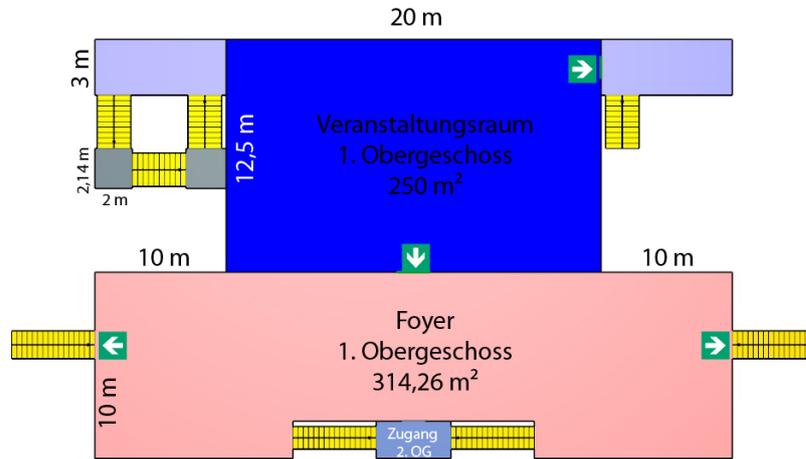


Abbildung Anhang 5: Grundriss 1. Obergeschoss Modell 3 mit Bemaßung

Modell 3
2. Obergeschoss

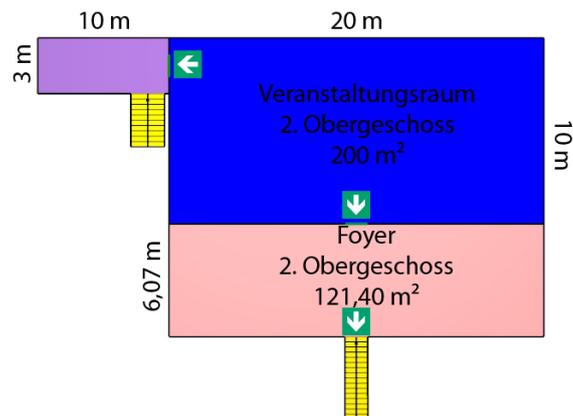


Abbildung Anhang 6: Grundriss 2. Obergeschoss Modell 3 mit Bemaßung

V. Einstellungen Simulationsparameter Pathfinder

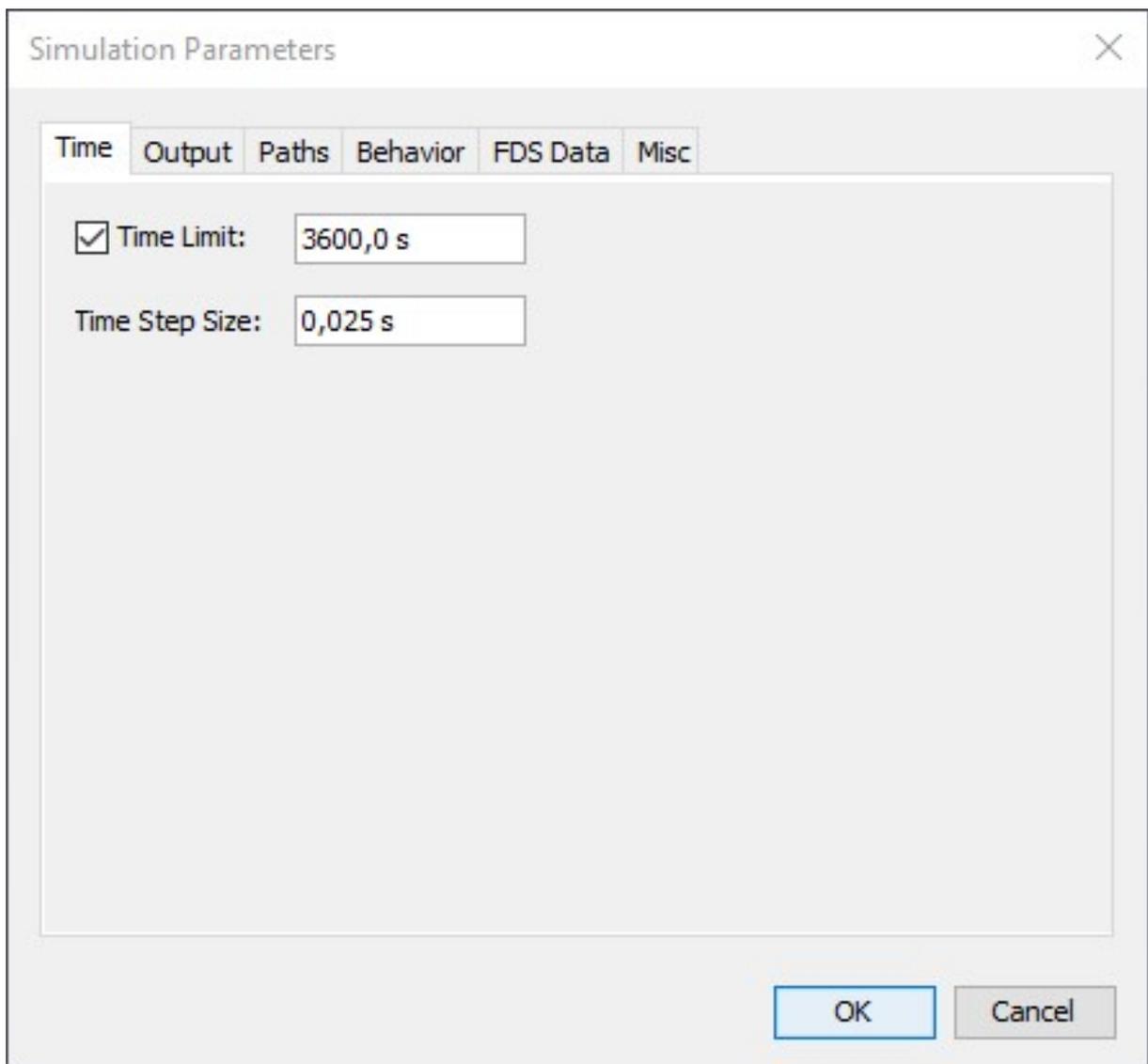


Abbildung Anhang 7: Standardeinstellungen der Simulationsparameter in *Pathfinder* (Version 2019.3.1217)

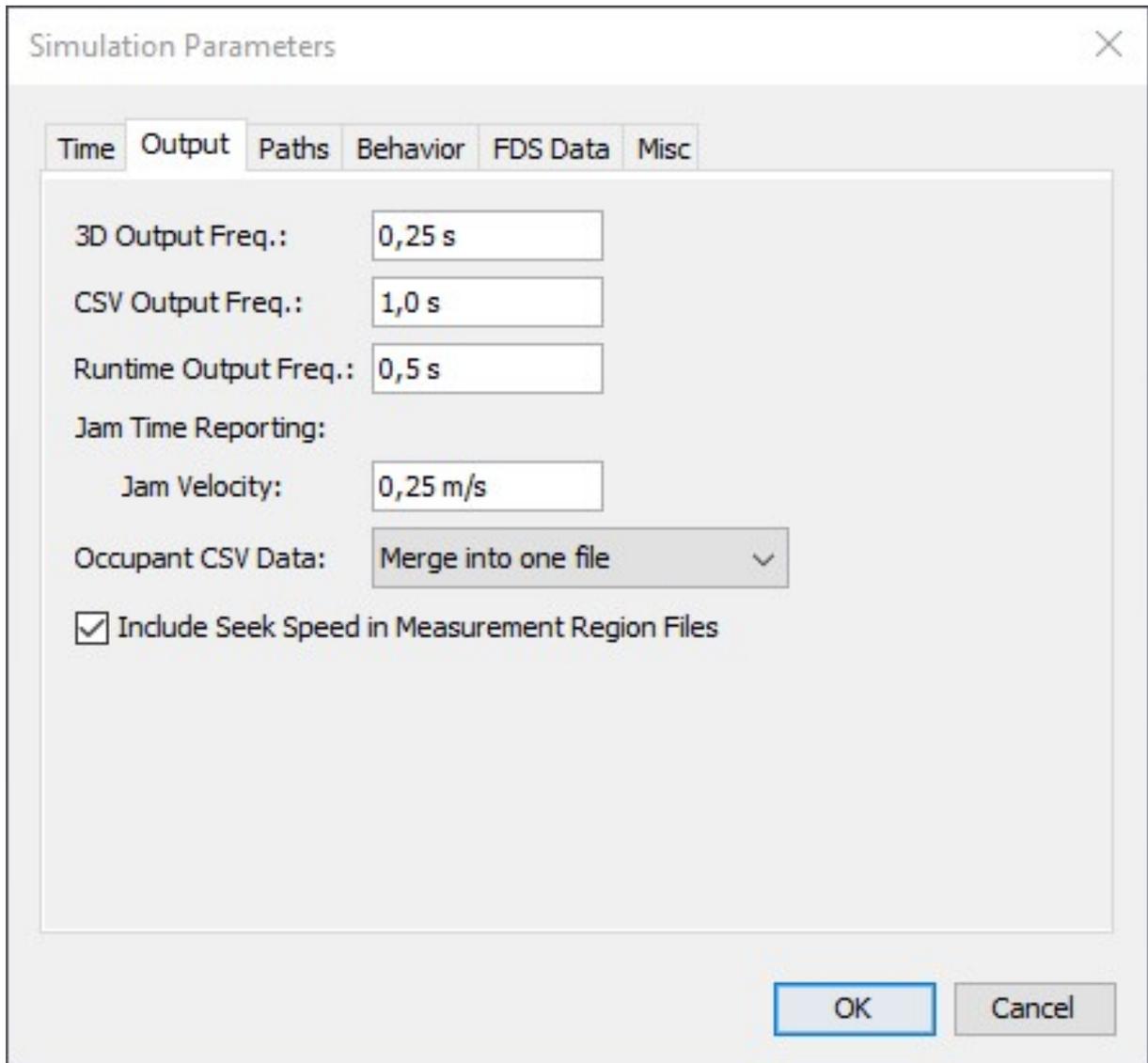


Abbildung Anhang 8: Standardeinstellungen der Simulationsparameter in *Pathfinder* (Version 2019.3.1217)

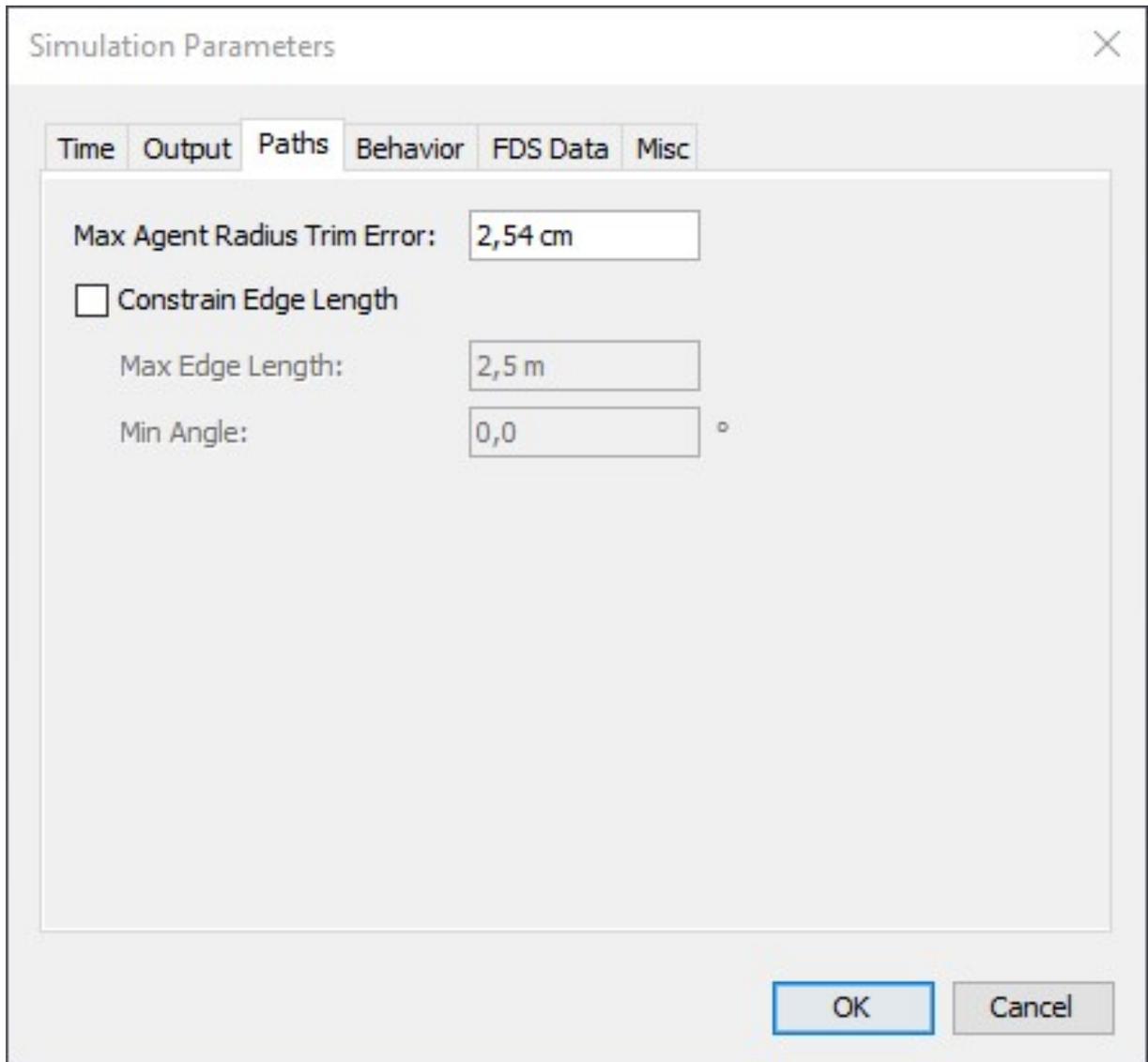


Abbildung Anhang 9: Standardeinstellungen der Simulationsparameter in *Pathfinder* (Version 2019.3.1217)

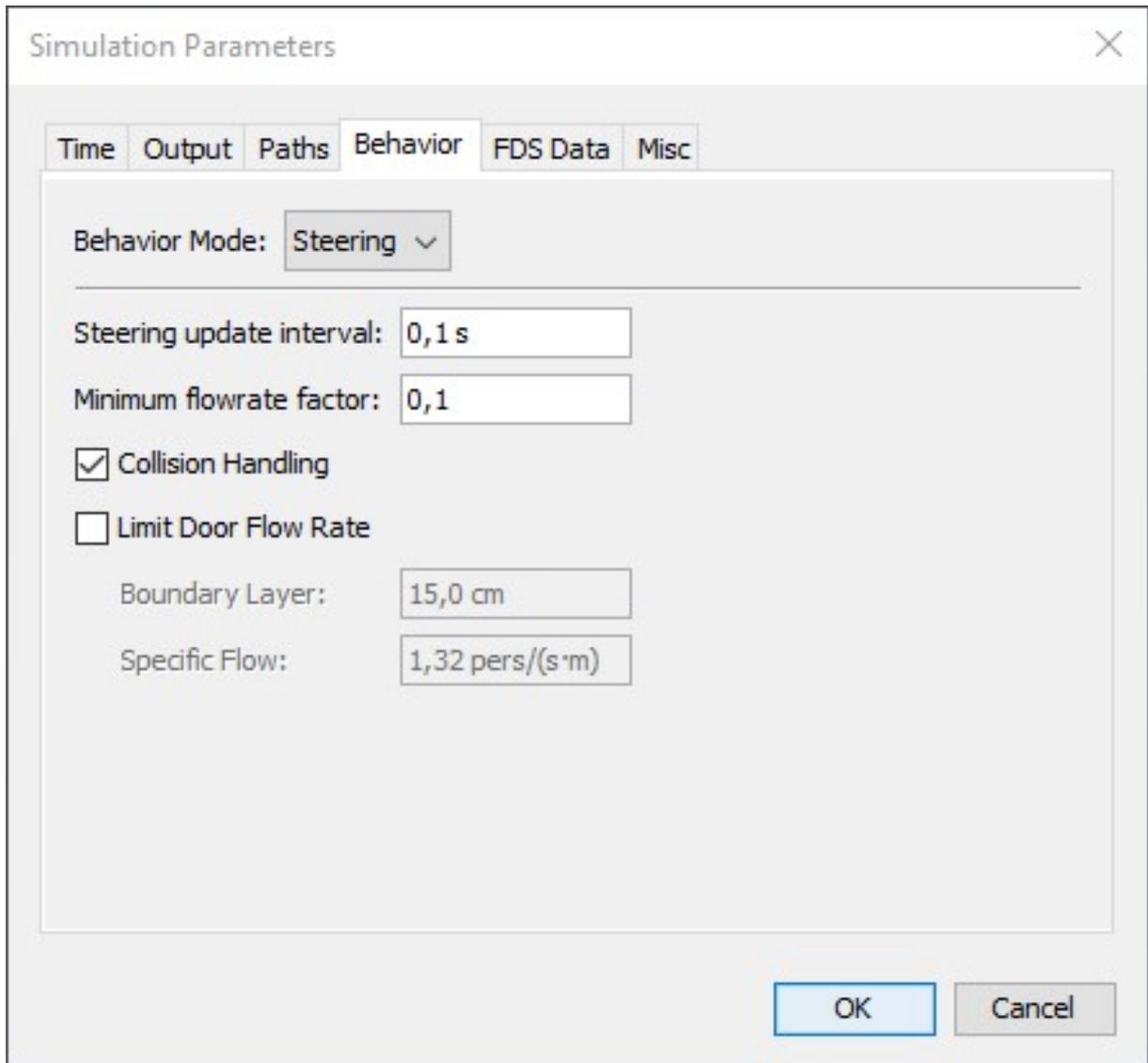


Abbildung Anhang 10: Standardeinstellungen der Simulationsparameter in *Pathfinder* (Version 2019.3.1217)

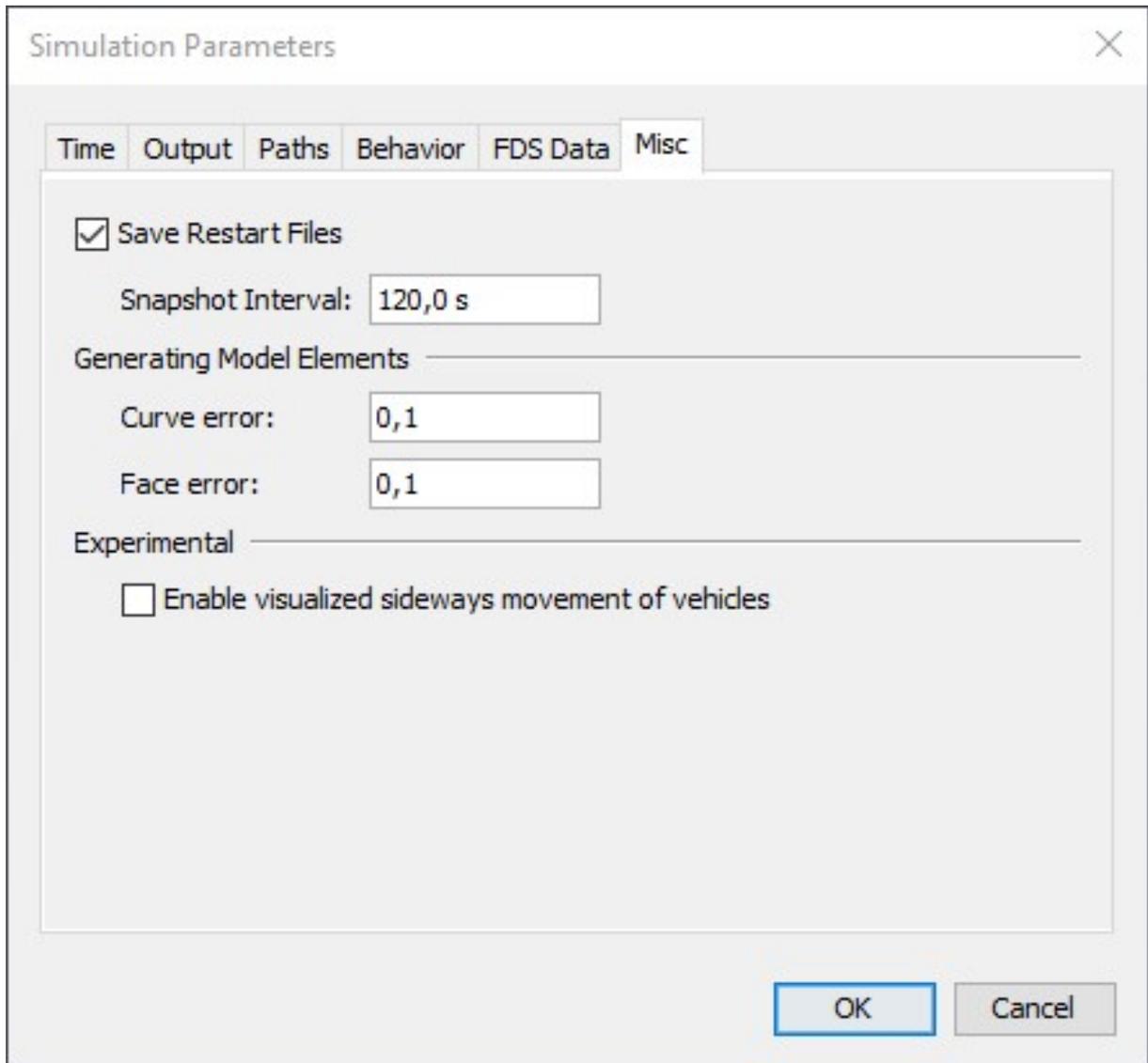


Abbildung Anhang 11: Standardeinstellungen der Simulationsparameter in *Pathfinder* (Version 2019.3.1217)

VI. Einstellungen Agenten-Standardprofil Pathfinder

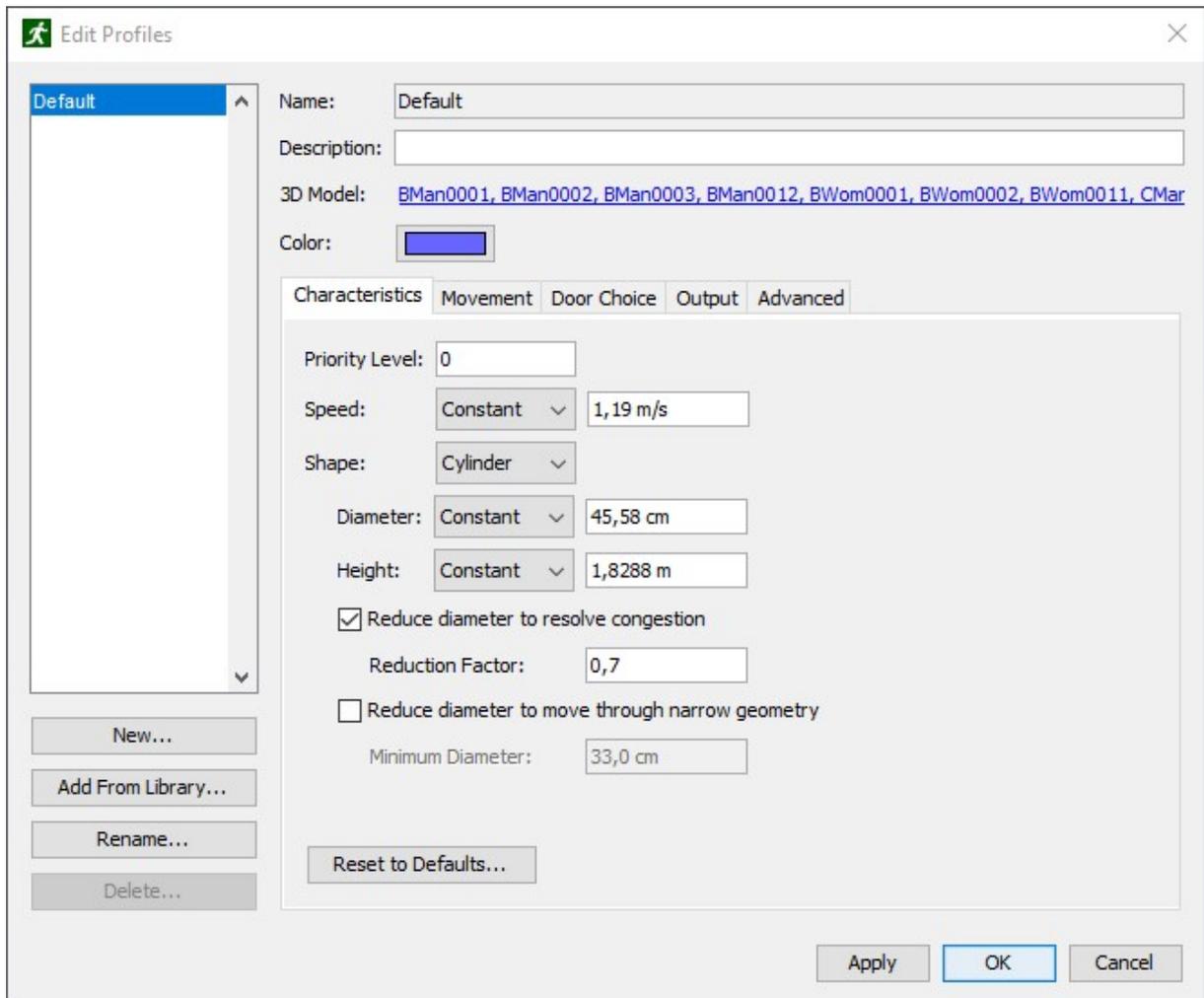


Abbildung Anhang 12: Standardeinstellungen des Agentenprofils in *Pathfinder* (Version 2019.3.1217)

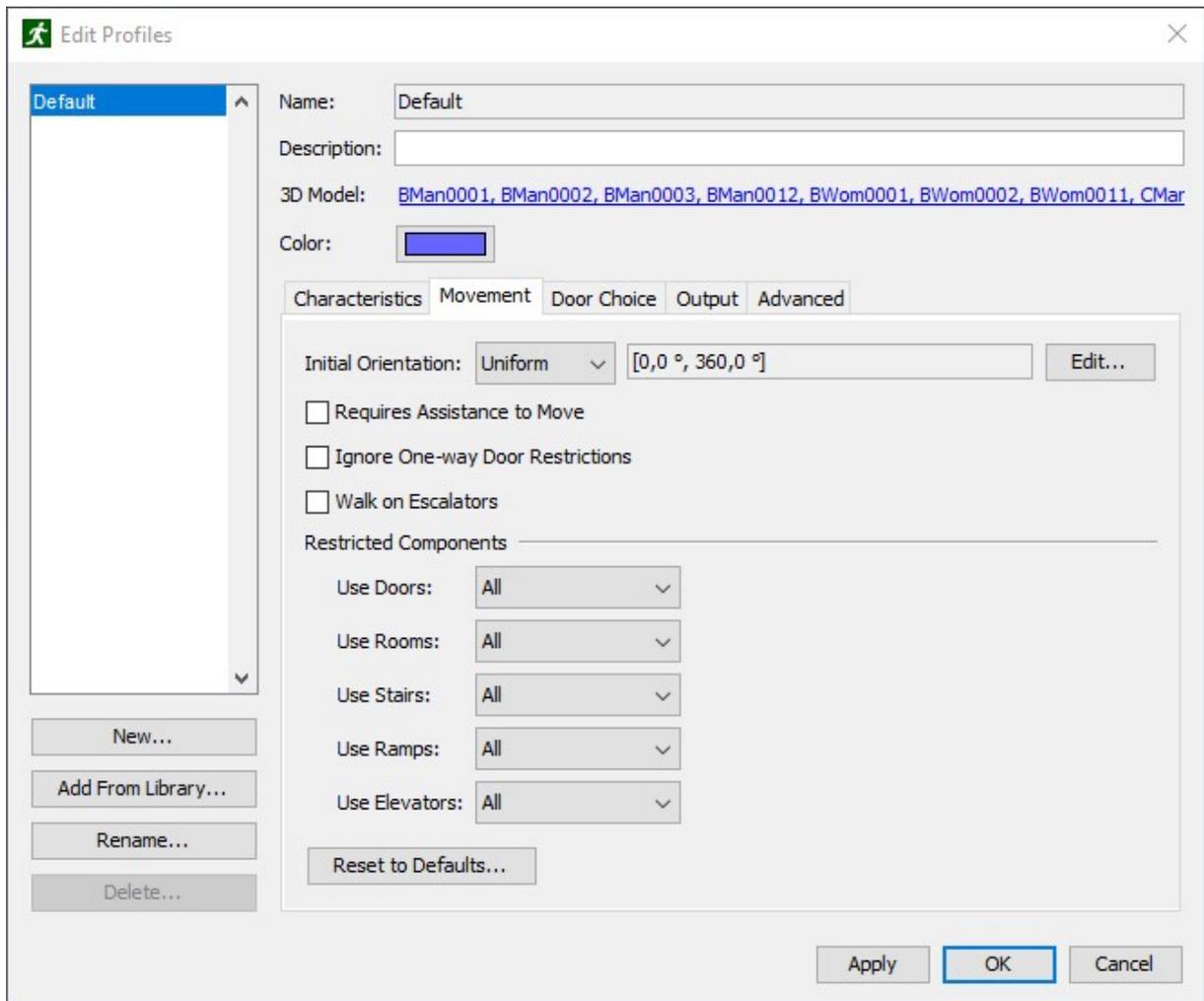


Abbildung Anhang 13: Standardeinstellungen des Agentenprofils in *Pathfinder* (Version 2019.3.1217)

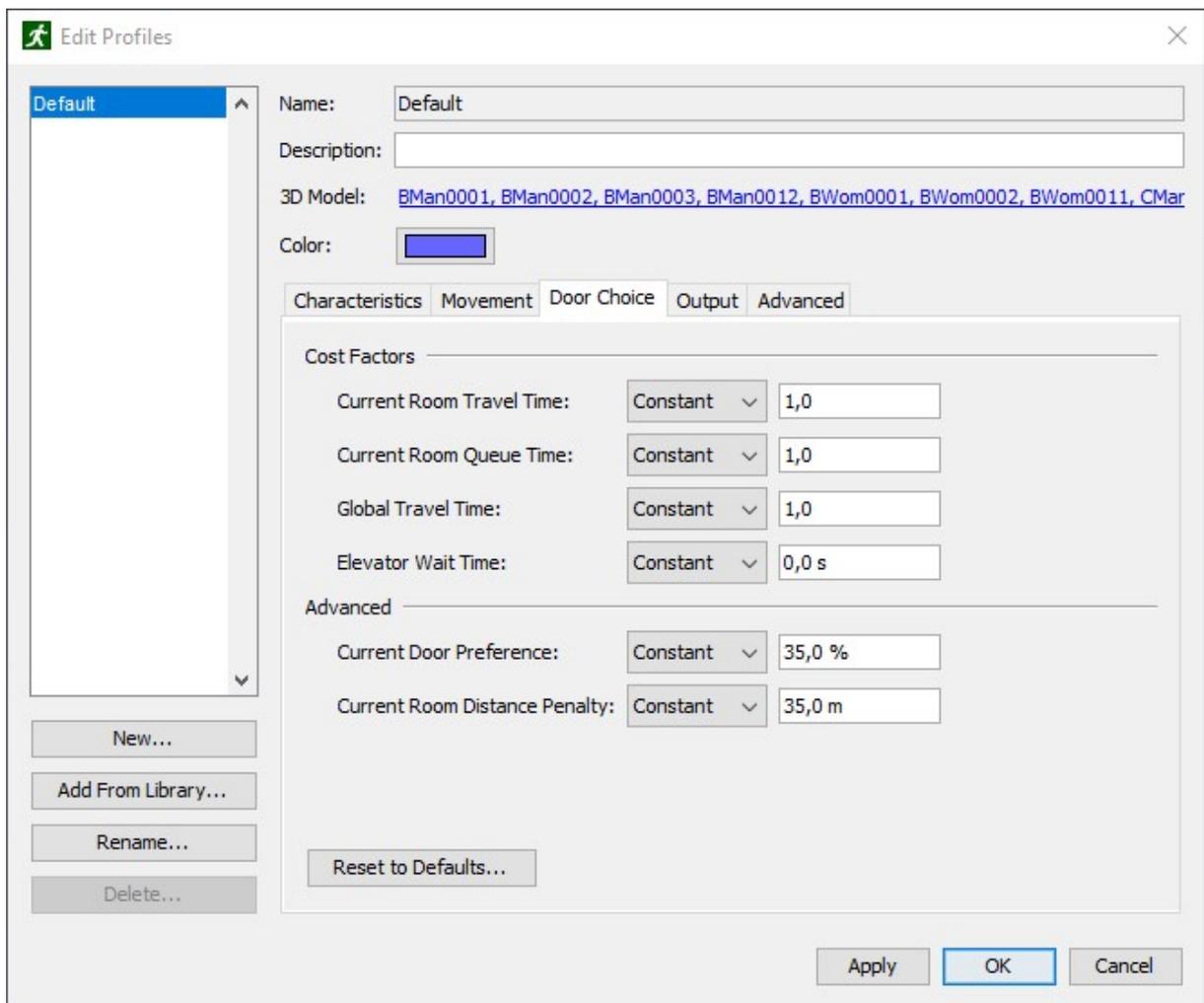


Abbildung Anhang 14: Standardeinstellungen des Agentenprofils in *Pathfinder* (Version 2019.3.1217)

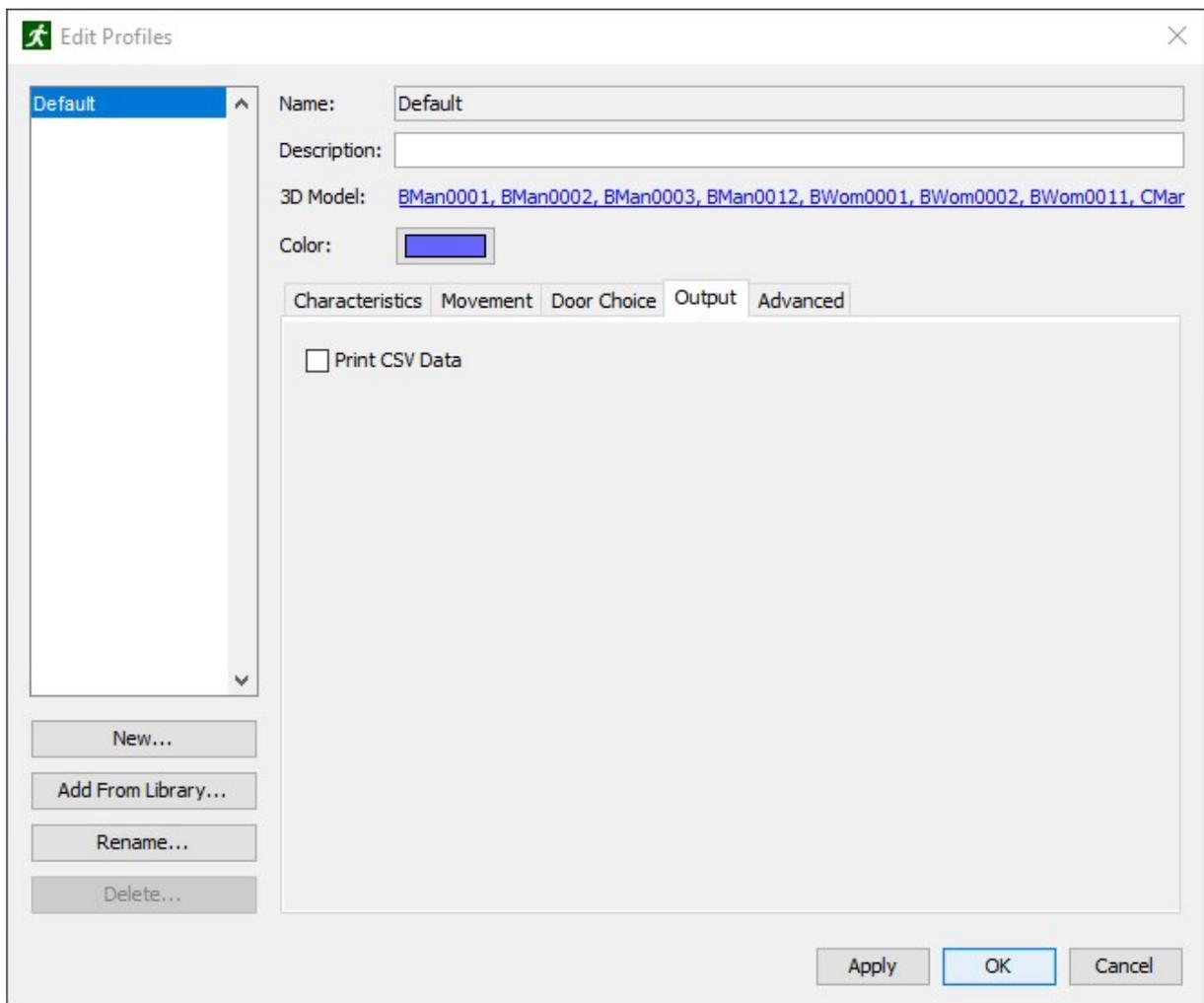


Abbildung Anhang 15: Standardeinstellungen des Agentenprofils in *Pathfinder* (Version 2019.3.1217)

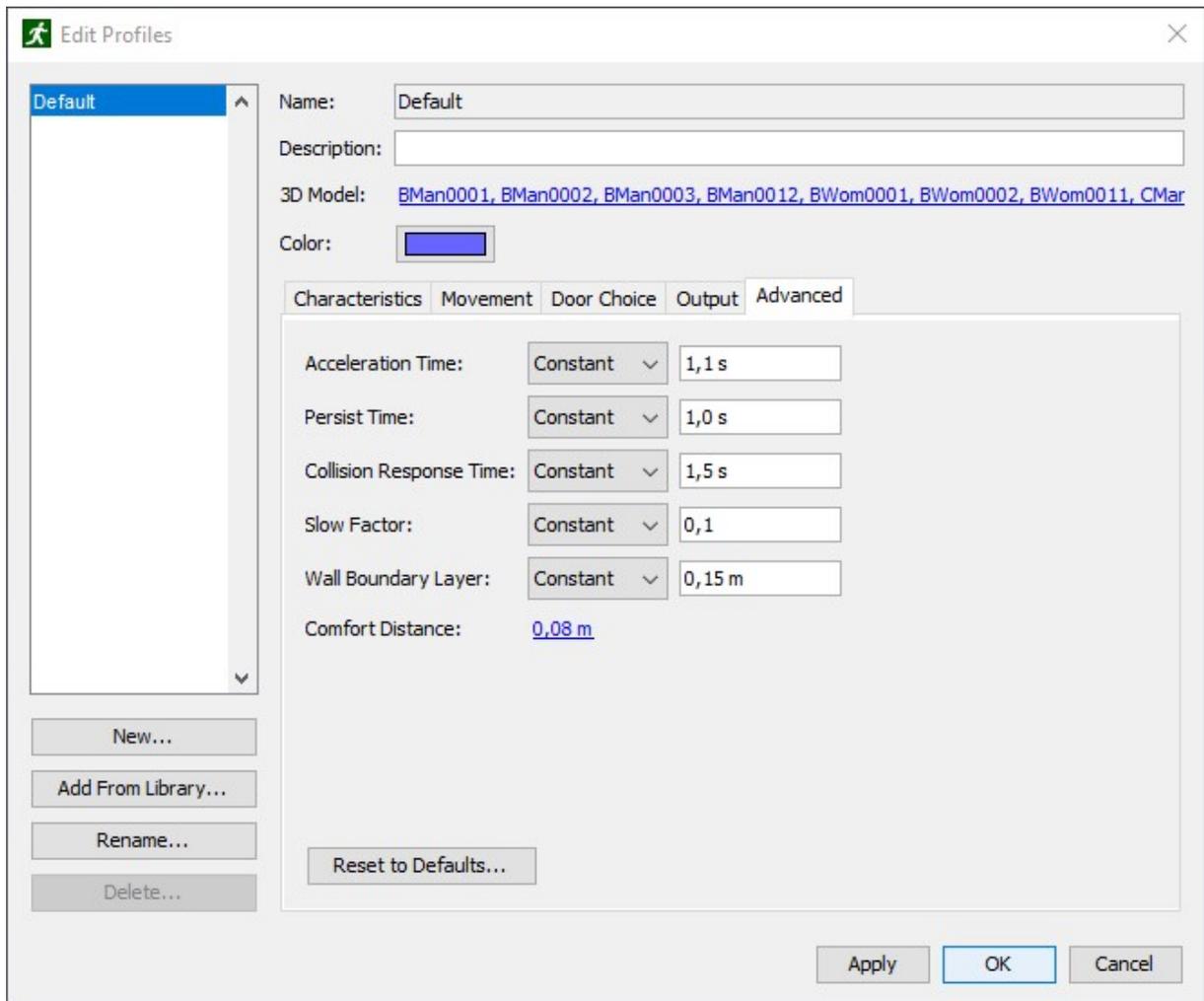


Abbildung Anhang 16: Standardeinstellungen des Agentenprofils in *Pathfinder* (Version 2019.3.1217)

VII. Vergrößerte Darstellung Durchflussraten

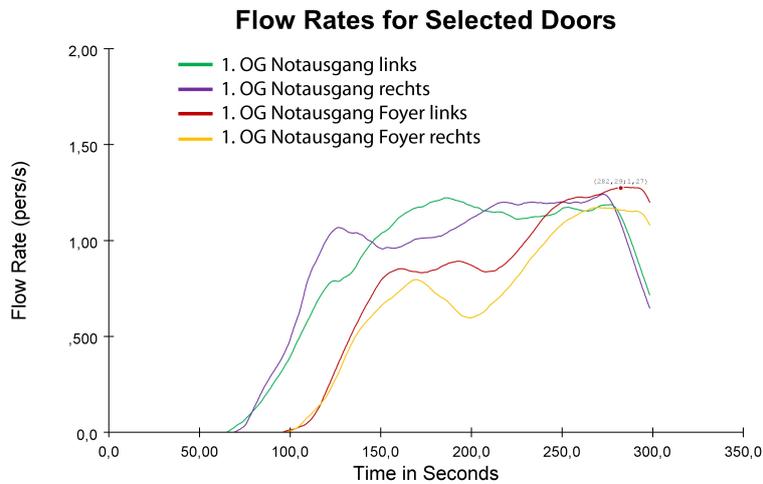


Abbildung Anhang 17: Türdurchflussraten im Modell 2 Szenario 2 Durchlauf 2 (Vergrößerung der Abbildung 15a)

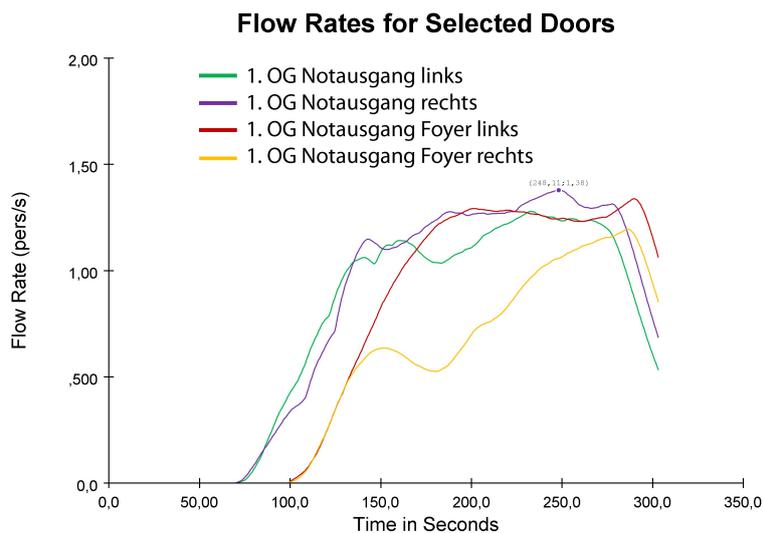


Abbildung Anhang 18: Türdurchflussraten im Modell 2 Szenario 5 Durchlauf 4 (Vergrößerung der Abbildung 15b)

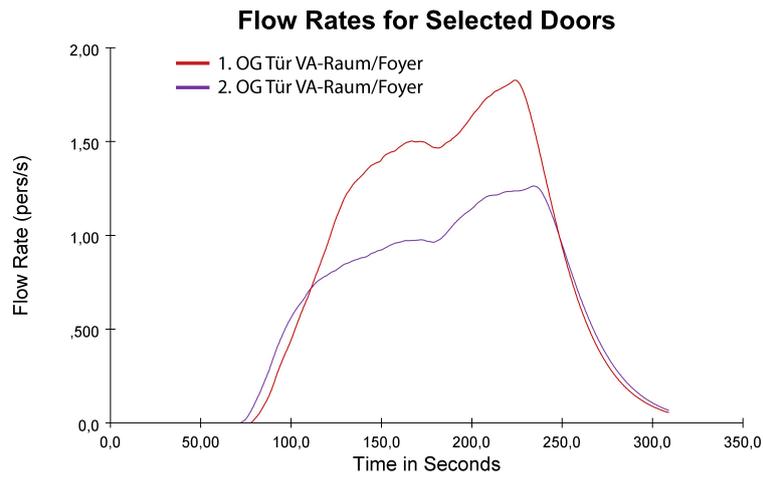


Abbildung Anhang 19: Türdurchflussraten im Modell 3 Szenario 17 Durchlauf 1 (Vergrößerung der Abbildung 20a)

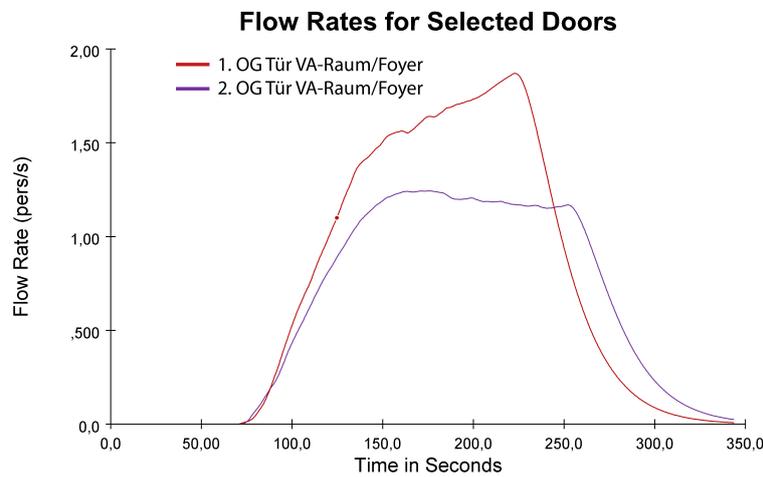


Abbildung Anhang 20: Türdurchflussraten im Modell 3 Szenario 17 Durchlauf 7 (Vergrößerung der Abbildung 20b)

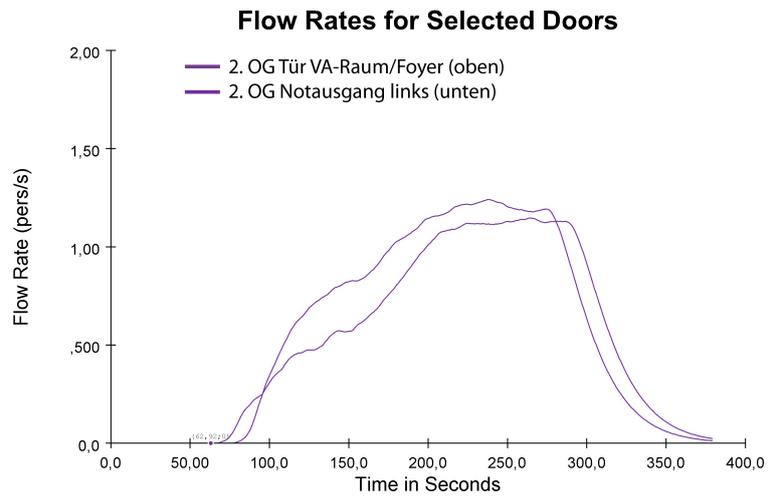


Abbildung Anhang 21: Türdurchflussraten im Modell 3 Szenario 19 Durchlauf 5 (Vergrößerung der Abbildung 21a)

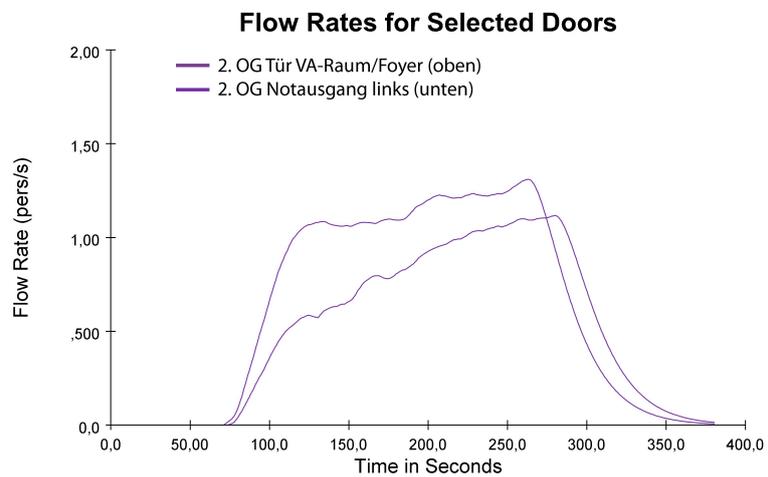


Abbildung Anhang 22: Türdurchflussraten im Modell 3 Szenario 19 Durchlauf 6 (Vergrößerung der Abbildung 21b)

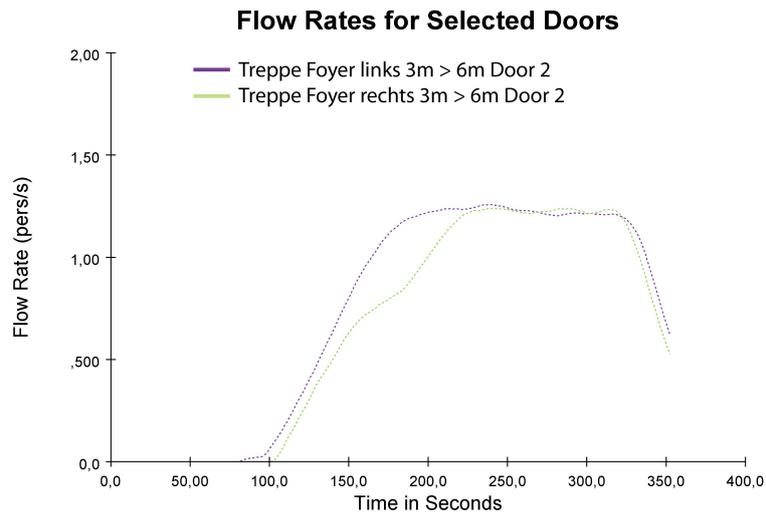


Abbildung Anhang 23: Personendurchflussraten am Beginn der Foyertreppen im Modell 3 Szenario 18 Durchlauf 5 (Vergrößerung der Abbildung 23a)

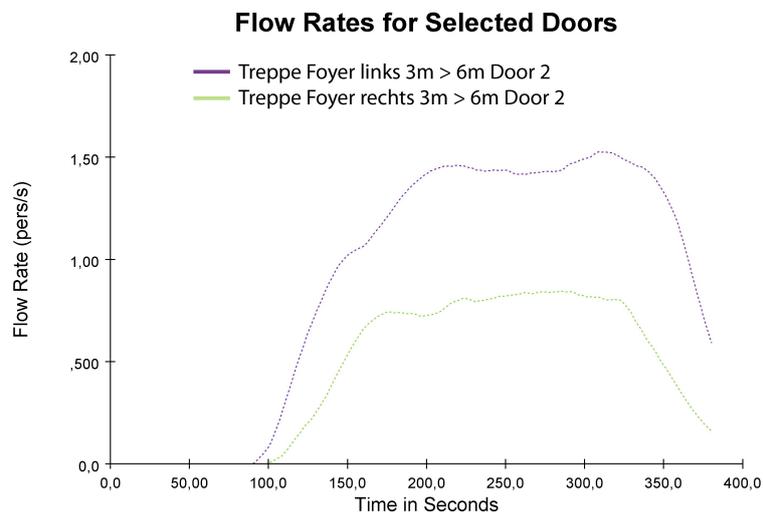


Abbildung Anhang 24: Personendurchflussraten am Beginn der Foyertreppen im Modell 3 Szenario 19 Durchlauf 6 (Vergrößerung der Abbildung 23b)

VIII. Simulationsergebnisse Modell 1

Tabelle Anhang 1: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 1

Modell 1-1

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	36,550	213,950	132,967	0,800	153,850	43,097	0,025	30,900	4,825
2	34,700	213,150	134,300	1,300	146,150	43,839	0,000	35,300	4,974
3	33,275	206,025	132,839	1,025	132,525	41,345	0,050	38,450	4,600
4	32,350	210,175	129,347	1,000	121,300	39,316	0,025	24,725	4,275
5	36,200	195,050	122,293	0,850	93,225	32,992	0,100	18,175	2,857
6	34,900	211,050	134,230	0,750	121,250	45,660	0,000	31,225	5,194
7	34,275	203,825	129,807	0,775	96,350	38,254	0,000	21,250	3,982
8	36,450	211,000	132,767	1,100	121,900	40,834	0,000	24,600	4,514
9	38,125	208,150	131,868	0,875	114,875	40,377	0,000	37,100	4,244
10	35,950	198,400	124,565	0,825	103,950	34,394	0,025	22,500	3,141
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	32,350	213,950	130,482	0,750	153,850	40,006	0,000	38,450	4,260

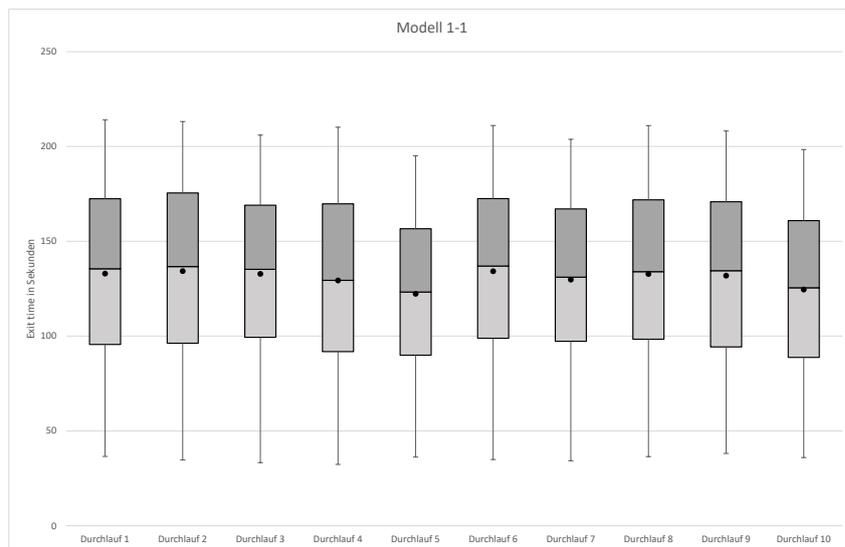


Abbildung Anhang 25: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 1

Tabelle Anhang 2: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 2

Modell 1-2

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	38,175	194,775	123,562	0,650	146,375	38,064	0,000	28,925	3,766
2	32,975	202,000	127,921	1,200	109,125	39,102	0,000	21,225	4,059
3	35,450	203,450	130,495	0,675	143,650	39,338	0,125	20,950	4,195
4	32,875	196,400	125,206	1,200	91,225	35,221	0,025	23,750	3,552
5	32,475	199,300	124,719	0,825	96,425	33,933	0,000	19,925	3,064
6	33,400	209,825	133,399	0,925	122,600	43,599	0,025	22,500	4,721
7	35,500	195,250	121,827	0,600	94,925	32,491	0,000	14,775	2,860
8	35,000	199,775	128,370	0,825	97,650	38,955	0,000	18,450	3,901
9	35,475	211,450	133,273	0,900	133,600	42,252	0,025	37,225	4,606
10	40,975	199,125	127,923	0,975	109,950	37,486	0,025	29,550	3,658
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	32,475	211,450	127,654	0,600	146,375	38,039	0,000	37,225	3,838

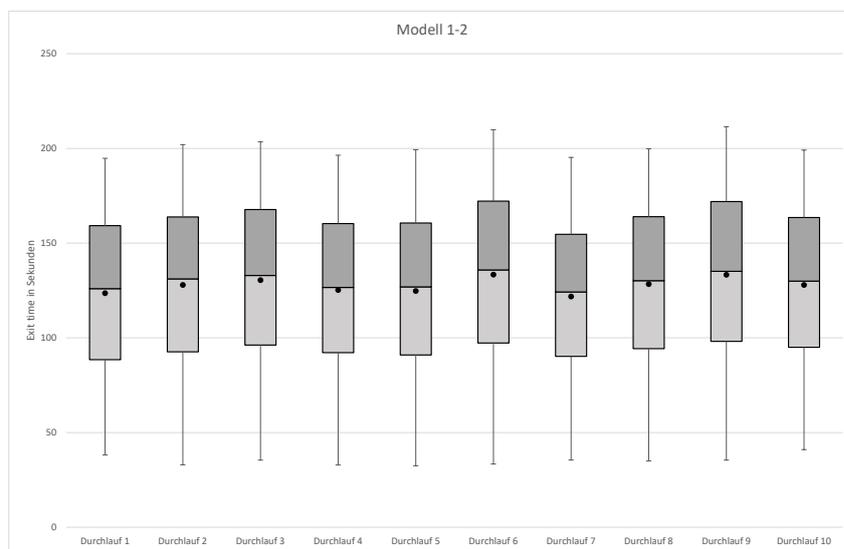


Abbildung Anhang 26: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 2

Tabelle Anhang 3: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 3

Modell 1-3

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	31,550	200,925	126,924	0,675	104,375	37,243	0,000	20,200	3,796
2	34,925	213,000	133,956	0,850	120,225	45,108	0,000	28,925	4,623
3	34,175	212,425	134,916	1,000	116,000	44,115	0,000	28,425	4,681
4	37,275	202,425	128,095	0,900	105,400	38,707	0,025	24,300	3,793
5	35,675	205,175	130,098	1,475	110,450	39,785	0,175	25,900	4,062
6	34,825	209,100	128,577	0,750	117,050	38,611	0,000	22,400	3,917
7	34,400	210,475	130,138	1,500	114,225	40,350	0,050	27,250	4,144
8	34,675	208,975	127,821	0,825	108,125	38,294	0,000	23,475	3,843
9	39,425	210,800	132,300	0,900	135,475	42,453	0,000	27,650	4,530
10	35,025	206,700	128,394	0,750	92,725	37,180	0,000	21,275	3,716
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	31,550	213,000	130,106	0,675	135,475	40,180	0,000	28,925	4,110

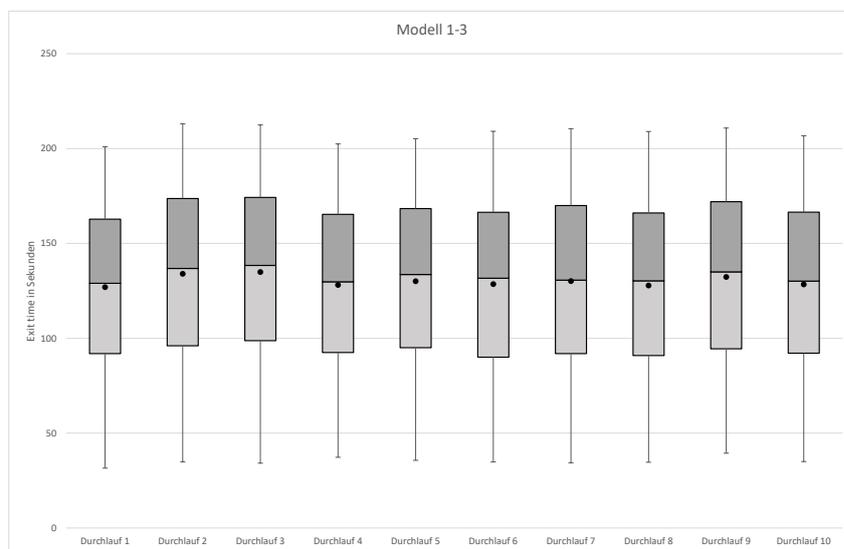


Abbildung Anhang 27: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 3

Tabelle Anhang 4: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 4

Modell 1-4

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	36,625	197,300	126,736	0,825	103,550	37,575	0,000	18,925	3,567
2	34,625	198,850	126,230	1,050	134,175	37,779	0,075	35,125	3,507
3	35,100	202,375	130,227	0,750	145,050	40,835	0,000	29,700	3,888
4	36,875	196,325	125,826	2,100	114,400	38,176	0,000	25,525	3,709
5	33,650	194,875	128,088	0,900	137,925	38,307	0,150	28,775	3,595
6	34,400	195,800	125,316	0,575	103,800	34,187	0,000	24,300	3,225
7	34,275	202,750	129,708	1,125	117,600	40,792	0,000	23,450	4,039
8	32,125	197,125	126,877	1,600	116,625	38,211	0,075	25,300	3,831
9	32,575	189,000	119,616	0,950	94,175	29,715	0,025	10,650	2,319
10	36,575	197,900	124,599	0,975	102,125	34,769	0,000	18,925	3,224
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	32,125	202,750	126,307	0,575	145,050	37,030	0,000	35,125	3,490

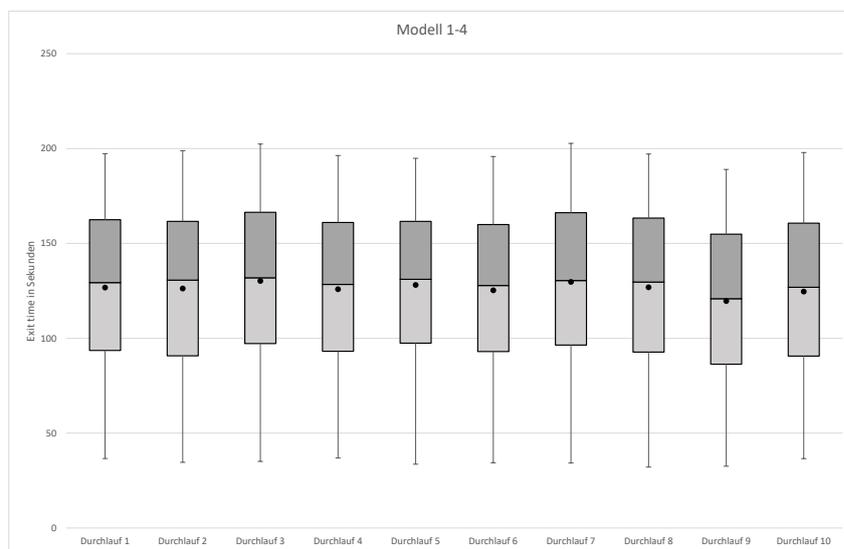


Abbildung Anhang 28: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 4

Tabelle Anhang 5: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 5

Modell 1-5

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	36,900	192,525	122,844	0,600	97,150	32,594	0,000	15,225	2,874
2	37,275	206,775	132,682	0,875	103,875	40,067	0,100	27,650	4,127
3	37,900	205,350	131,402	1,000	148,275	43,003	0,000	28,100	4,669
4	33,800	202,325	127,947	1,075	120,475	37,931	0,025	32,400	3,895
5	31,550	197,625	127,409	1,325	92,225	36,718	0,000	21,100	3,715
6	34,625	194,500	126,367	0,600	101,525	35,478	0,025	24,025	3,569
7	32,150	188,750	121,266	0,700	76,700	31,293	0,000	14,175	2,902
8	34,500	206,200	134,639	0,825	145,925	46,855	0,000	35,000	5,483
9	34,000	202,350	130,383	0,800	105,650	38,089	0,000	24,500	3,719
10	39,125	193,575	124,402	1,075	101,875	34,297	0,025	20,725	3,126
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	31,550	206,775	127,918	0,600	148,275	37,628	0,000	35,000	3,807

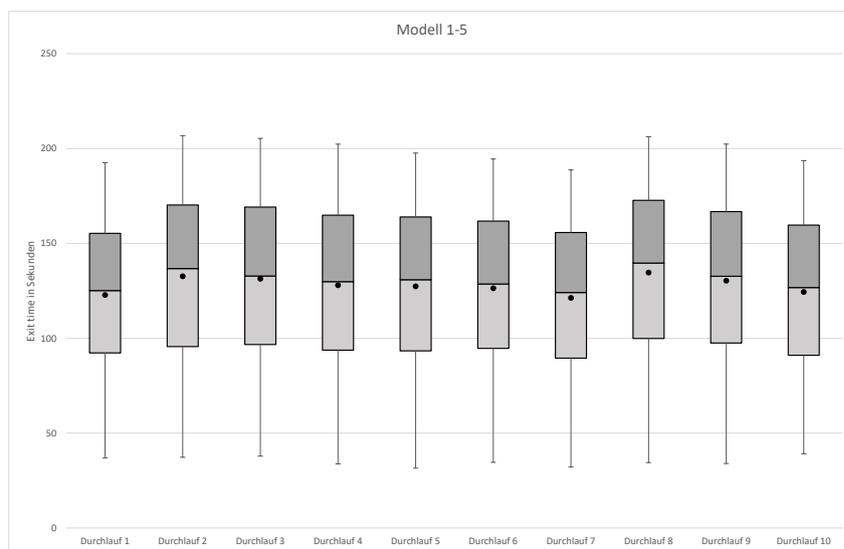


Abbildung Anhang 29: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 5

Tabelle Anhang 6: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 6

Modell 1-6

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	36,625	210,650	135,588	0,650	126,175	44,763	0,000	32,900	5,163
2	36,125	201,300	128,279	0,675	133,050	38,575	0,000	23,525	3,606
3	32,825	208,275	131,314	0,900	98,800	38,878	0,000	25,425	3,838
4	32,650	205,625	132,177	1,100	111,075	41,492	0,000	26,200	4,517
5	37,250	206,500	131,610	0,750	118,175	40,553	0,000	21,000	4,119
6	32,500	214,525	138,538	0,775	140,825	47,355	0,025	22,700	5,092
7	37,125	204,700	128,085	0,575	104,250	37,323	0,000	18,700	3,686
8	35,800	210,850	131,714	0,725	134,025	42,052	0,000	23,875	4,343
9	35,950	199,950	122,717	1,175	95,975	35,189	0,000	13,625	3,140
10	33,675	213,850	134,705	0,850	136,375	46,371	0,125	31,250	5,219
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	32,500	214,525	131,457	0,575	140,825	41,250	0,000	32,900	4,272

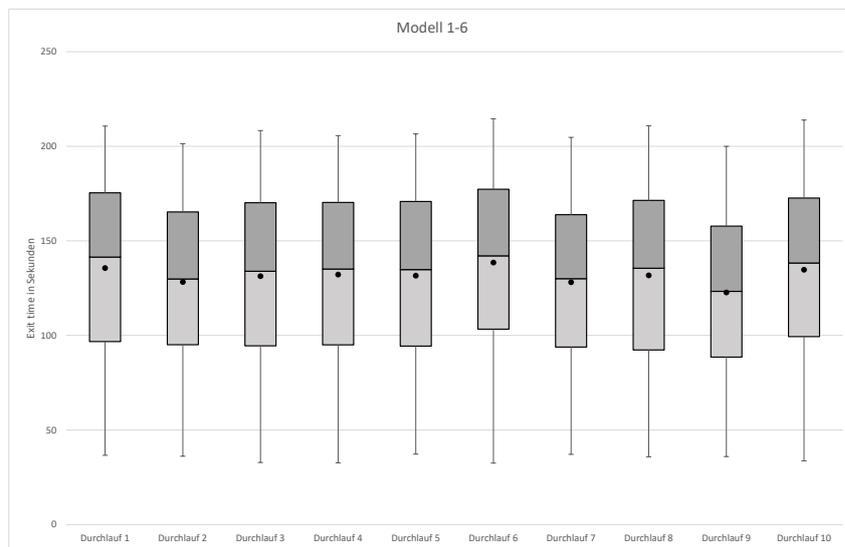


Abbildung Anhang 30: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 6

Tabelle Anhang 7: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 7

Modell 1-7

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	31,650	195,275	124,757	1,075	98,200	35,151	0,125	18,450	3,530
2	31,125	203,350	128,726	0,975	103,225	38,131	0,000	27,025	4,156
3	35,700	208,875	132,701	0,875	118,375	41,885	0,000	30,075	4,317
4	39,100	206,800	130,992	1,150	119,100	41,638	0,000	26,125	4,312
5	35,625	194,825	122,656	0,900	88,500	30,805	0,000	19,300	2,746
6	34,375	196,900	128,111	0,600	96,000	35,494	0,000	21,050	3,283
7	33,225	199,350	126,929	1,375	95,750	37,489	0,000	20,400	3,772
8	36,000	202,900	125,096	0,600	105,725	34,179	0,000	19,950	3,229
9	35,325	206,275	132,982	0,650	131,975	41,790	0,000	27,850	4,515
10	36,875	193,150	121,925	0,950	104,125	34,151	0,000	19,550	3,197
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	31,125	208,875	127,472	0,600	131,975	37,067	0,000	30,075	3,705

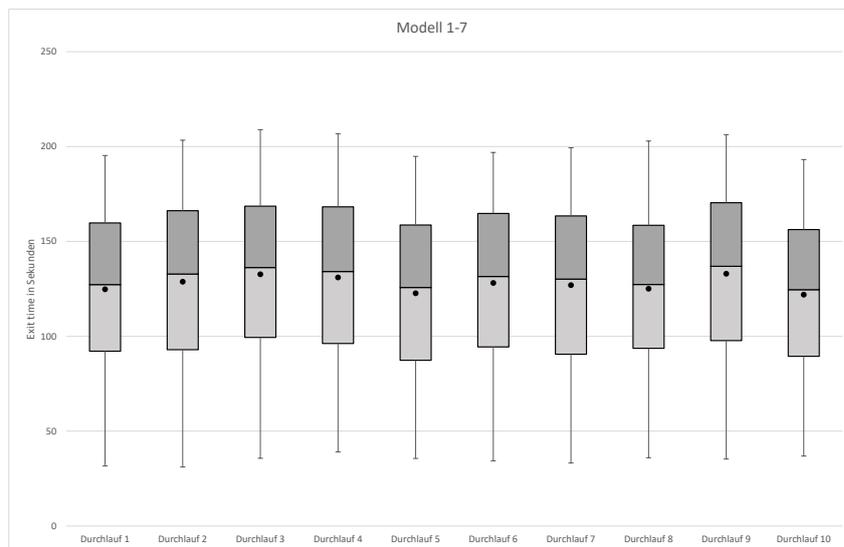


Abbildung Anhang 31: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 7

Tabelle Anhang 8: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 8

Modell 1-8

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	33,000	208,800	132,089	0,600	118,550	43,147	0,000	23,100	4,392
2	35,400	214,625	136,572	0,725	135,975	45,330	0,000	29,575	4,855
3	38,000	220,625	140,947	1,425	152,050	50,403	0,000	26,850	5,846
4	33,100	207,600	132,566	0,500	113,450	42,903	0,000	28,325	4,410
5	34,075	220,875	136,797	0,725	135,375	48,089	0,025	34,625	5,586
6	38,650	222,000	138,268	0,700	140,600	47,048	0,000	35,550	5,256
7	33,550	206,675	133,111	1,050	131,400	43,737	0,000	28,275	4,842
8	35,050	213,300	135,319	1,275	132,875	43,005	0,000	21,325	4,378
9	36,900	198,125	124,755	0,850	102,025	33,927	0,050	18,250	2,988
10	33,250	214,175	136,187	1,650	137,875	46,423	0,025	39,050	5,252
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	33,000	222,000	134,646	0,500	152,050	44,396	0,000	39,050	4,780

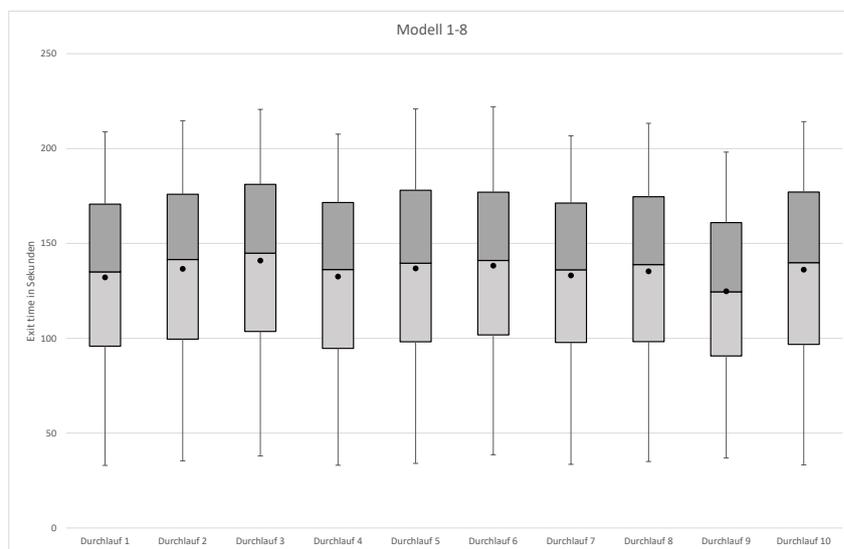


Abbildung Anhang 32: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 8

Tabelle Anhang 9: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 9

Modell 1-9

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	34,700	201,350	129,384	0,900	108,725	39,382	0,025	43,400	3,998
2	33,475	203,300	130,606	0,575	139,225	40,480	0,000	30,650	3,925
3	32,375	200,975	127,447	0,625	106,575	40,103	0,000	37,325	3,903
4	37,425	209,350	131,465	1,875	144,775	41,170	0,000	18,600	4,185
5	41,600	209,025	130,193	0,750	109,750	40,337	0,125	25,675	4,112
6	31,600	195,650	123,002	0,875	88,300	32,909	0,000	17,325	2,906
7	37,600	199,450	127,818	0,750	124,950	38,614	0,000	41,550	3,954
8	36,125	192,050	124,808	1,100	125,250	34,467	0,000	29,425	2,968
9	37,475	206,575	127,270	0,725	119,700	37,896	0,050	29,725	3,817
10	36,300	214,875	133,926	1,450	135,000	46,736	0,000	34,550	4,913
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	31,600	214,875	128,577	0,575	144,775	39,205	0,000	43,400	3,868

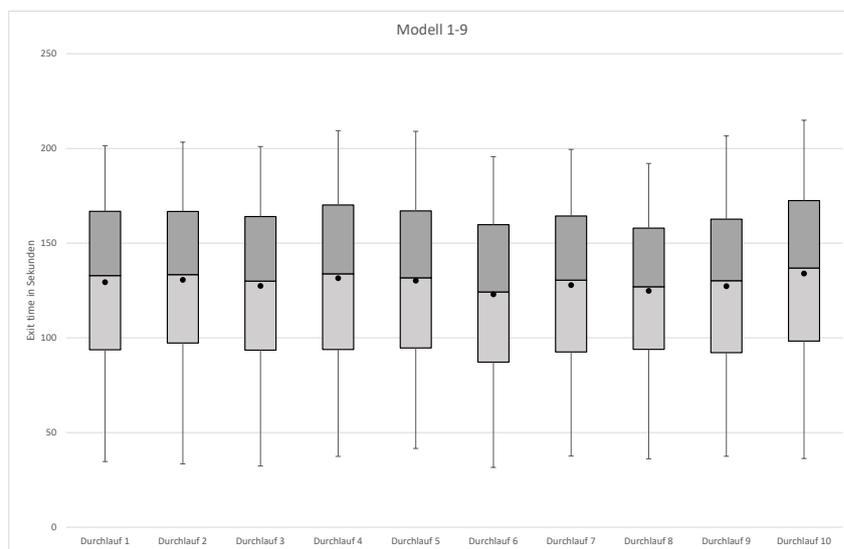


Abbildung Anhang 33: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 9

Tabelle Anhang 10: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 10

Modell 1-10

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	35,475	181,425	118,614	1,050	86,775	31,906	0,000	34,100	2,846
2	34,825	191,375	125,487	0,500	96,800	37,202	0,000	24,650	3,709
3	34,200	194,775	127,635	0,625	100,600	38,126	0,000	37,975	4,022
4	32,900	187,625	122,954	0,775	96,925	33,037	0,000	23,825	2,975
5	34,850	182,775	120,077	1,175	100,650	29,697	0,000	14,275	2,318
6	34,125	190,425	126,406	0,650	91,675	36,100	0,000	18,050	3,434
7	39,000	193,525	126,773	0,775	91,475	35,320	0,000	21,275	3,229
8	39,325	198,200	129,304	1,550	112,900	39,940	0,000	42,925	4,637
9	33,600	188,750	123,377	0,625	88,925	32,742	0,000	20,700	2,912
10	37,450	199,800	128,340	0,950	106,025	37,717	0,000	29,000	3,695
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	32,900	199,800	124,881	0,500	112,900	35,174	0,000	42,925	3,377

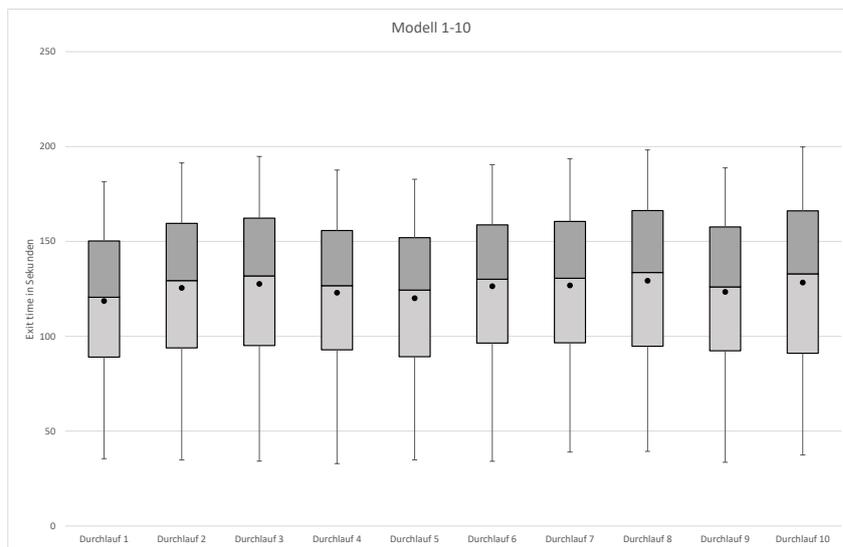


Abbildung Anhang 34: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 10

Tabelle Anhang 11: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 11

Modell 1-11

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	35,625	211,600	134,061	0,925	117,725	43,374	0,000	30,275	4,379
2	34,450	209,575	132,365	0,825	145,125	44,020	0,000	33,725	4,596
3	35,100	221,325	140,648	0,525	135,075	50,518	0,000	26,000	5,694
4	31,750	205,275	130,658	0,900	103,350	38,541	0,150	26,450	3,893
5	34,625	216,325	136,763	0,600	136,550	47,947	0,000	26,675	5,208
6	37,575	212,600	135,835	1,025	126,175	45,557	0,000	38,950	4,809
7	35,900	212,675	135,515	0,925	140,175	45,334	0,000	38,425	5,113
8	35,000	220,175	136,507	0,450	141,775	48,734	0,000	24,000	5,328
9	34,200	210,125	132,557	0,750	123,525	40,729	0,000	27,000	3,962
10	36,475	215,850	136,188	1,150	160,275	44,438	0,000	28,200	4,731
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	31,750	221,325	135,095	0,450	160,275	44,914	0,000	38,950	4,771

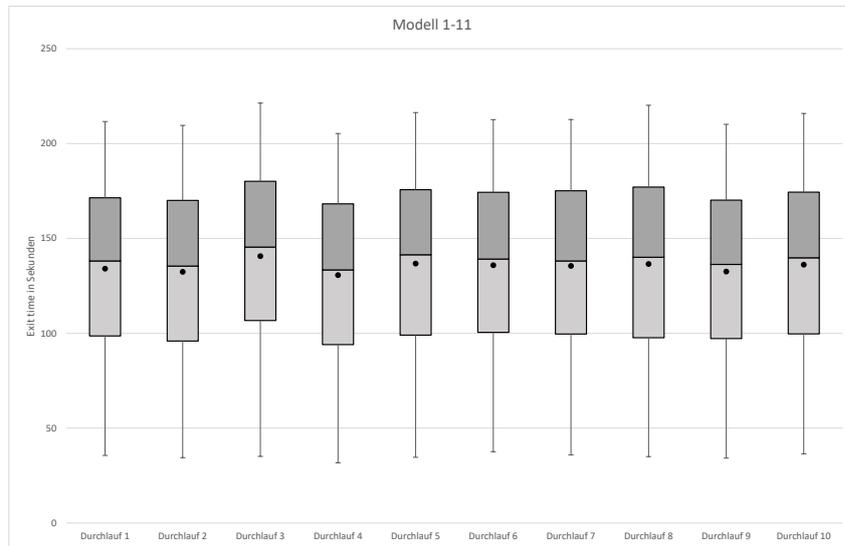


Abbildung Anhang 35: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 11

Tabelle Anhang 12: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 12

Modell 1-12

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	40,275	201,800	130,396	1,400	157,675	40,035	0,000	22,275	3,807
2	34,225	207,800	133,492	0,800	122,425	44,120	0,000	33,025	4,469
3	33,000	208,225	136,224	0,650	126,925	46,434	0,000	32,950	5,104
4	38,300	208,875	135,562	0,900	126,025	44,701	0,000	36,400	4,682
5	36,525	203,400	132,309	0,950	125,000	44,042	0,000	21,825	4,467
6	34,650	207,000	133,172	1,025	123,775	43,501	0,000	35,500	4,462
7	32,700	210,125	132,418	0,975	121,750	43,452	0,000	19,075	4,649
8	34,050	207,525	135,975	1,325	148,525	46,151	0,000	30,950	4,938
9	35,925	211,250	136,926	0,625	128,775	45,389	0,000	33,525	4,672
10	33,250	205,050	130,467	0,525	113,525	41,907	0,025	23,425	4,265
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	32,700	211,250	133,680	0,525	157,675	43,969	0,000	36,400	4,551

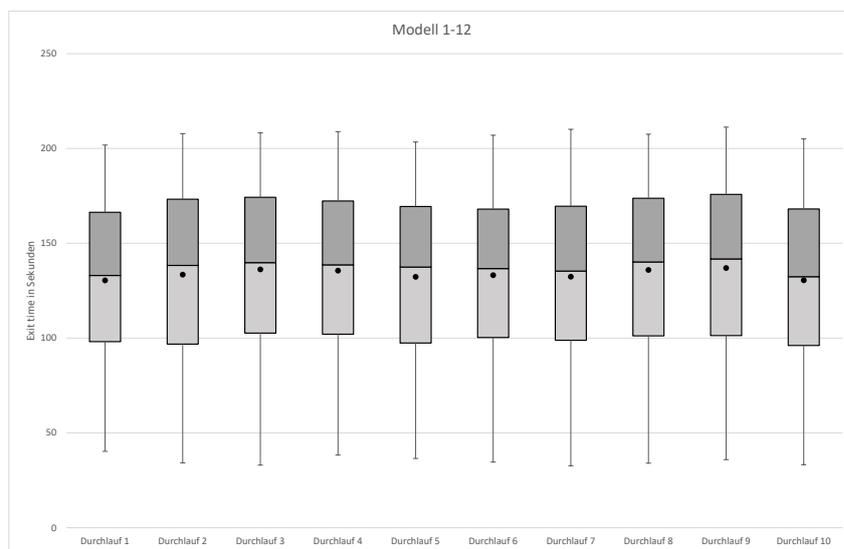


Abbildung Anhang 36: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 12

Tabelle Anhang 13: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 13

Modell 1-13

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	31,575	179,725	119,044	0,925	79,850	28,727	0,000	12,900	2,234
2	31,575	182,625	120,431	0,975	89,075	29,138	0,000	12,950	2,274
3	34,275	195,300	129,646	0,600	92,975	37,014	0,000	31,600	4,169
4	32,700	186,400	124,653	0,700	104,250	34,808	0,000	18,000	3,082
5	32,150	174,125	115,270	0,925	67,550	25,204	0,000	10,750	1,585
6	37,925	179,400	120,227	0,500	78,350	30,694	0,000	16,250	2,665
7	31,300	187,850	125,865	0,650	113,525	36,737	0,000	21,250	3,776
8	37,250	190,400	127,327	0,800	129,950	34,764	0,000	19,600	3,388
9	32,200	180,850	118,003	0,850	82,725	28,251	0,000	14,200	2,302
10	35,425	183,250	120,880	1,150	94,675	29,813	0,000	17,725	2,551
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	31,300	195,300	122,119	0,500	129,950	31,511	0,000	31,600	2,802

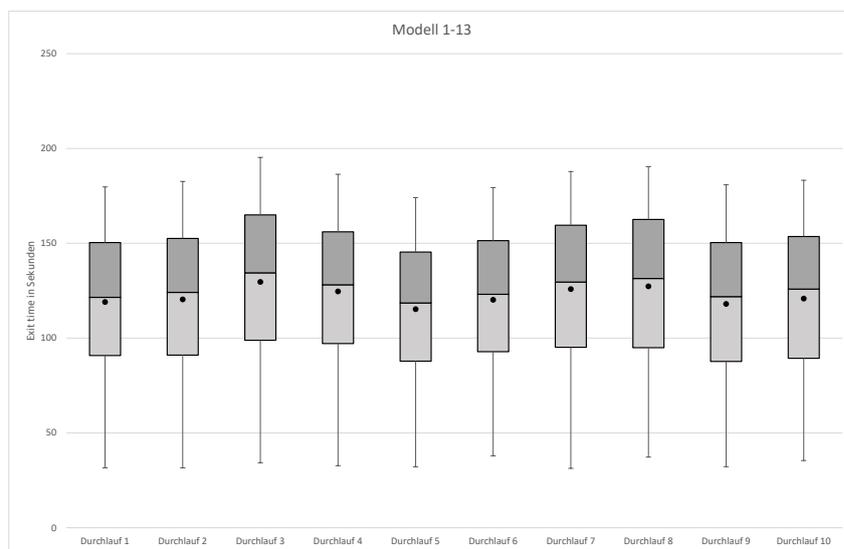


Abbildung Anhang 37: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 13

Tabelle Anhang 14: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 14

Modell 1-14

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	34,350	214,850	138,758	0,875	151,275	50,911	0,000	45,425	5,610
2	35,775	217,000	141,654	0,525	146,125	51,720	0,000	35,550	5,665
3	34,700	200,350	128,427	0,750	111,425	37,377	0,000	24,525	3,414
4	35,475	214,200	138,357	0,600	127,500	47,656	0,000	21,000	5,157
5	37,575	221,150	144,821	0,800	154,900	55,595	0,000	31,400	6,333
6	36,725	221,100	142,565	0,675	157,000	53,591	0,075	34,925	5,883
7	35,375	218,500	143,232	0,875	137,550	53,491	0,000	46,550	6,007
8	36,625	218,375	142,482	0,925	142,700	52,643	0,000	42,550	6,234
9	34,325	216,225	140,340	0,750	146,450	49,339	0,075	29,625	5,144
10	33,725	212,550	139,822	0,700	159,650	50,669	0,000	34,700	5,723
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	33,725	221,150	140,032	0,525	159,650	50,294	0,000	46,550	5,516

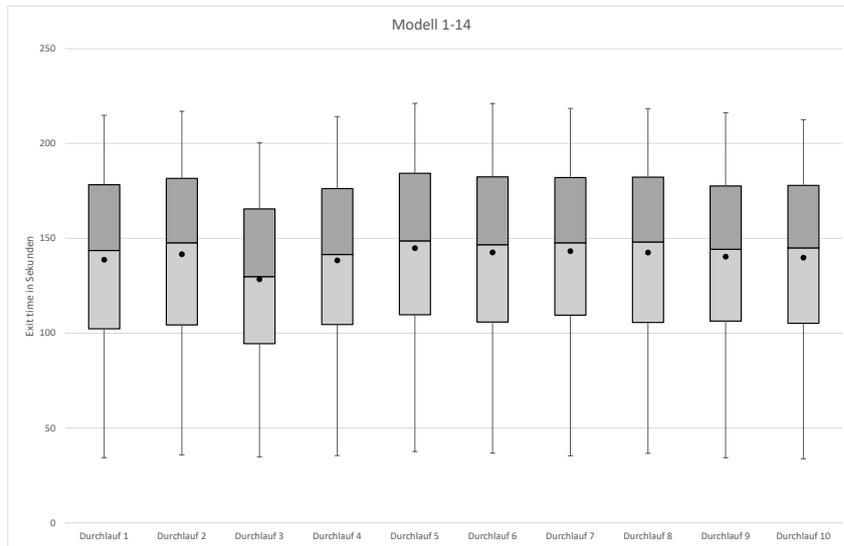


Abbildung Anhang 38: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 14

Tabelle Anhang 15: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 15

Modell 1-15

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	36,700	214,975	136,617	1,075	137,650	47,450	0,000	36,400	4,907
2	37,750	219,150	136,282	0,800	155,975	46,922	0,000	37,750	4,801
3	35,400	213,375	138,897	0,525	151,275	47,823	0,000	25,825	4,845
4	35,225	208,825	134,702	1,350	121,000	43,685	0,000	46,400	4,324
5	36,025	211,075	135,093	1,000	117,375	43,923	0,000	30,200	4,594
6	36,575	206,150	131,970	1,275	138,500	41,693	0,000	22,275	3,985
7	34,325	206,125	130,564	0,825	127,075	42,102	0,025	22,525	4,029
8	31,675	212,975	137,917	0,825	136,275	47,007	0,000	24,125	4,968
9	32,100	222,550	142,050	0,825	147,050	51,134	0,000	27,650	5,563
10	39,150	216,125	135,914	1,175	131,475	46,055	0,000	29,875	4,921
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	31,675	222,550	135,987	0,525	155,975	45,775	0,000	46,400	4,693

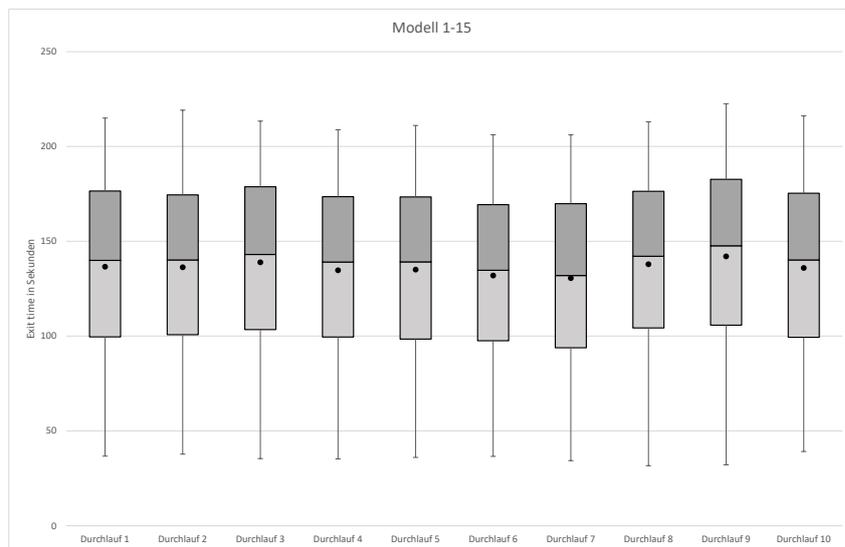


Abbildung Anhang 39: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 15

Tabelle Anhang 16: Simulationsergebnisse Modell 1 Szenario 16

Modell 1-16

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	33,925	194,900	124,839	0,925	96,950	34,613	0,000	21,750	2,968
2	32,575	209,400	133,180	1,025	124,550	41,907	0,000	24,950	4,036
3	35,225	200,050	125,072	1,175	102,975	36,762	0,000	25,025	3,561
4	36,300	216,675	134,564	0,825	141,675	43,670	0,100	28,375	4,568
5	32,975	203,425	130,323	0,575	106,000	41,125	0,000	28,200	4,086
6	38,400	205,700	129,883	1,575	128,425	40,394	0,000	31,900	4,040
7	31,475	217,750	136,945	0,600	136,400	45,600	0,000	25,125	5,201
8	38,275	207,525	132,284	0,875	133,450	42,355	0,000	21,925	4,356
9	36,000	202,025	129,071	1,075	123,100	38,951	0,000	35,425	3,783
10	37,725	212,225	137,261	0,650	135,150	48,353	0,000	40,225	5,390
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	31,475	217,750	131,327	0,575	141,675	41,368	0,000	40,225	4,198

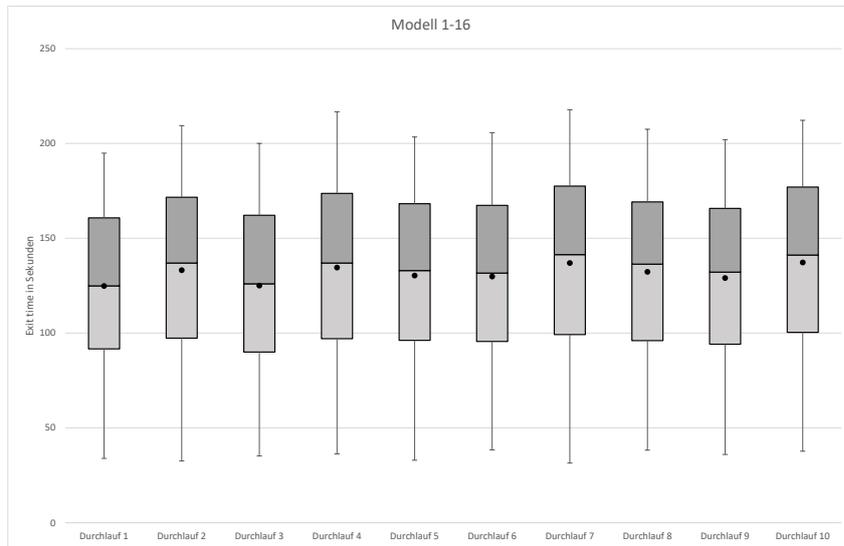


Abbildung Anhang 40: Boxplotauswertung Modell 1 Szenario 16

IX. Simulationsergebnisse Modell 2

Tabelle Anhang 17: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 1

Modell 2-1

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	69,450	289,775	182,534	1,200	178,950	62,052	0,000	36,500	5,782
2	61,875	302,625	180,132	1,200	182,425	60,534	0,000	42,325	5,599
3	66,025	310,275	186,765	1,275	201,750	67,303	0,000	54,750	6,948
4	63,925	305,050	184,527	0,675	227,650	65,694	0,000	56,975	6,712
5	64,325	290,125	180,574	0,725	185,075	62,957	0,000	49,675	6,115
6	65,900	292,400	181,647	1,075	183,975	63,216	0,000	44,200	6,116
7	65,425	287,925	175,613	0,725	168,725	54,966	0,000	29,650	4,931
8	68,700	285,000	182,258	1,150	188,175	62,976	0,025	35,650	5,876
9	64,675	312,125	188,087	1,150	207,500	67,573	0,000	51,325	7,115
10	65,575	302,800	180,623	1,175	185,150	60,931	0,000	52,300	5,880
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	61,875	312,125	182,265	0,675	227,650	62,816	0,000	56,975	6,107

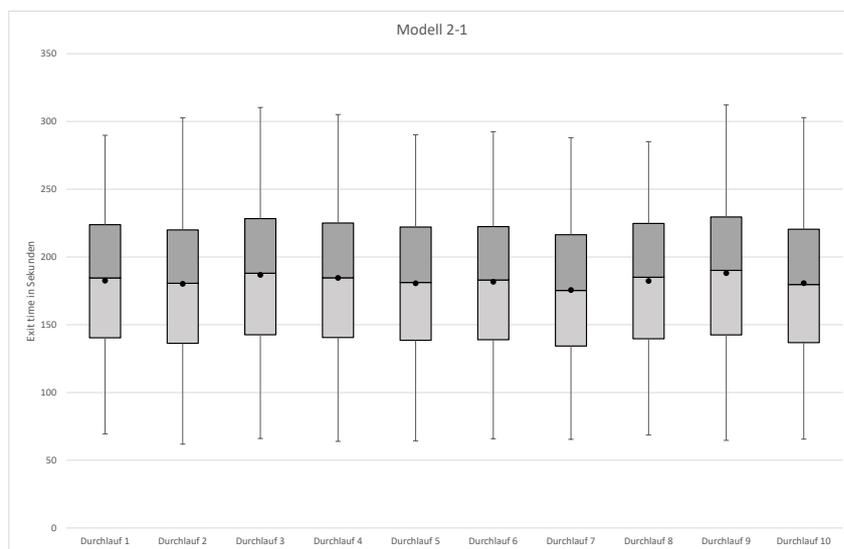


Abbildung Anhang 41: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 1

Tabelle Anhang 18: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 2

Modell 2-2

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	70,400	293,675	180,161	0,875	180,975	60,253	0,025	37,525	5,762
2	66,050	298,625	179,562	1,225	198,275	59,494	0,000	48,400	5,702
3	63,525	301,850	184,375	0,975	197,325	63,360	0,000	52,875	6,386
4	64,925	298,400	186,318	0,625	204,425	65,688	0,000	57,050	6,665
5	61,375	293,425	181,778	0,950	188,950	61,064	0,000	48,750	5,757
6	67,575	294,425	179,589	0,725	202,875	59,980	0,000	37,500	5,799
7	70,900	293,950	178,702	0,700	197,250	57,621	0,000	42,400	4,984
8	65,325	284,075	178,034	0,825	161,775	57,814	0,000	36,925	4,881
9	66,100	296,050	176,314	0,950	176,650	56,858	0,075	33,800	5,202
10	64,275	288,625	178,395	1,425	192,175	59,714	0,000	46,100	5,496
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	61,375	301,850	180,312	0,625	204,425	60,181	0,000	57,050	5,663

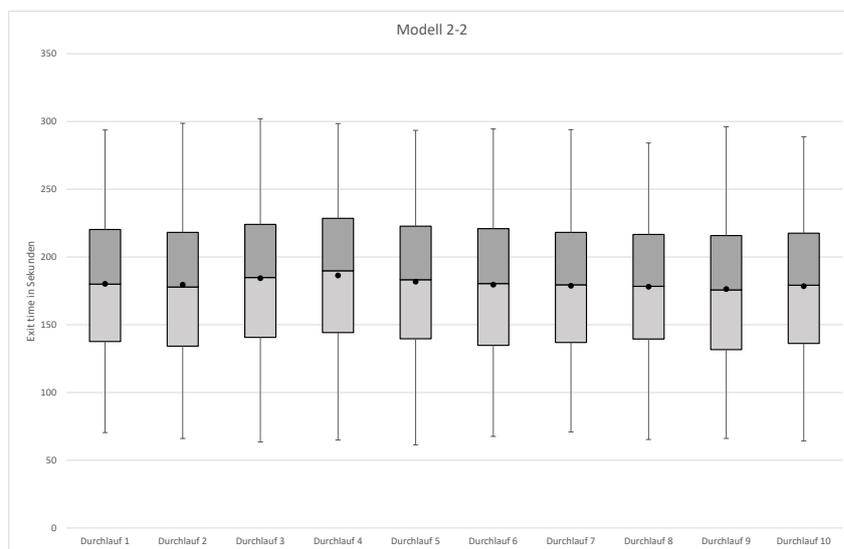


Abbildung Anhang 42: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 2

Tabelle Anhang 19: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 3

Modell 2-3

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	65,750	304,775	184,190	1,450	205,975	63,729	0,000	42,350	6,299
2	66,150	284,425	174,432	0,650	159,925	55,425	0,000	34,275	4,618
3	61,625	292,450	181,940	0,825	201,775	63,855	0,000	35,775	5,925
4	65,725	303,375	183,593	0,850	219,675	62,987	0,000	49,475	6,339
5	60,875	312,875	187,223	0,675	205,575	65,327	0,000	47,400	6,697
6	65,450	289,275	180,278	1,625	200,050	61,182	0,000	36,325	5,900
7	67,075	296,600	184,163	1,000	220,125	63,633	0,000	56,500	6,131
8	63,575	315,975	189,472	0,775	222,425	68,555	0,000	74,325	7,380
9	64,725	308,000	187,405	1,000	213,075	68,018	0,000	45,025	7,153
10	62,350	301,000	186,122	0,750	223,175	66,583	0,000	58,325	6,759
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	60,875	315,975	183,871	0,650	223,175	63,925	0,000	74,325	6,320

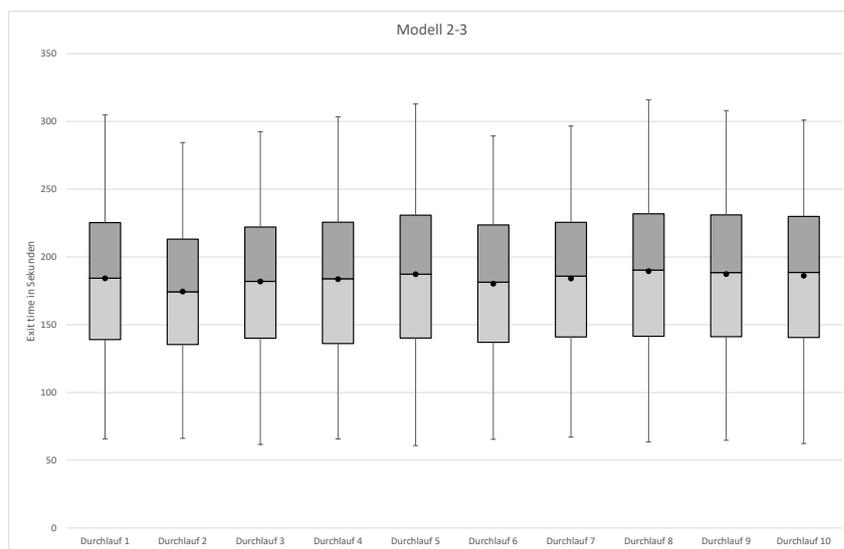


Abbildung Anhang 43: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 3

Tabelle Anhang 20: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 4

Modell 2-4

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	63,775	296,800	185,562	1,250	219,300	66,550	0,000	62,325	6,865
2	67,550	285,750	183,146	1,175	179,925	63,517	0,000	43,925	5,868
3	68,075	287,650	181,035	0,675	186,175	62,147	0,000	57,700	5,914
4	65,750	297,125	185,873	0,725	199,750	65,265	0,000	59,725	6,290
5	69,200	286,625	181,479	0,850	179,750	60,363	0,000	36,025	5,492
6	65,725	275,150	174,263	1,375	150,675	53,694	0,000	31,400	4,352
7	63,075	295,550	181,443	1,525	182,900	61,445	0,000	55,625	5,815
8	63,750	288,025	177,610	1,325	196,200	59,178	0,000	32,750	5,067
9	64,150	275,475	174,140	0,525	160,400	53,898	0,000	45,350	4,364
10	67,175	288,125	176,279	0,600	189,975	55,699	0,000	53,425	4,823
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	63,075	297,125	180,072	0,525	219,300	60,172	0,000	62,325	5,485

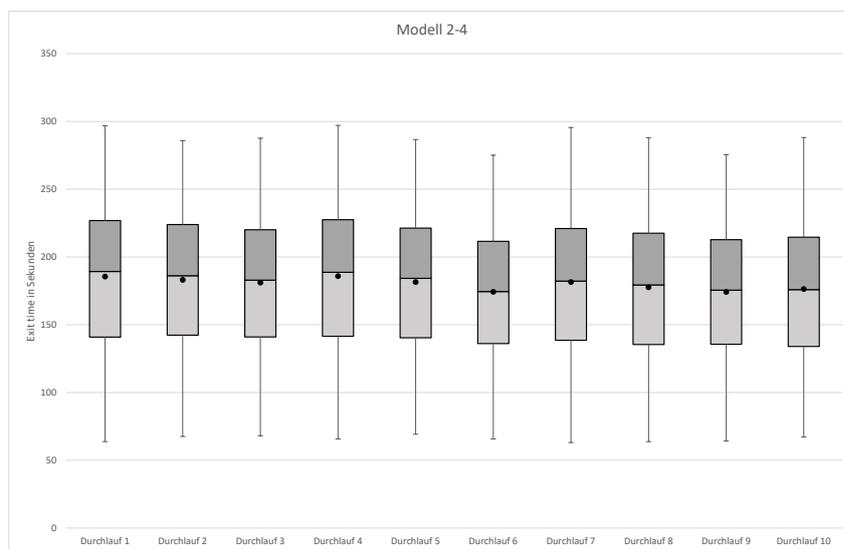


Abbildung Anhang 44: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 4

Tabelle Anhang 21: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 5

Modell 2-5

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	62,500	293,375	177,402	1,125	193,025	56,786	0,025	40,200	5,303
2	66,075	276,125	175,152	1,150	155,050	54,640	0,000	35,550	4,609
3	66,200	286,275	176,784	1,200	173,825	56,692	0,000	64,900	5,240
4	63,800	303,275	184,573	1,100	195,625	64,135	0,000	67,750	6,368
5	66,050	294,150	182,245	1,125	221,375	61,924	0,125	74,125	5,943
6	65,575	282,250	173,724	1,050	169,275	54,120	0,000	42,125	4,605
7	62,475	303,175	184,712	0,700	208,550	64,483	0,000	58,300	6,538
8	65,650	280,200	177,192	0,775	171,300	56,478	0,000	32,800	4,855
9	67,675	288,675	173,925	1,275	169,750	54,115	0,000	33,250	4,592
10	68,075	284,900	178,644	1,475	192,375	58,552	0,050	66,950	5,205
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	62,475	303,275	178,424	0,700	221,375	58,189	0,000	74,125	5,326

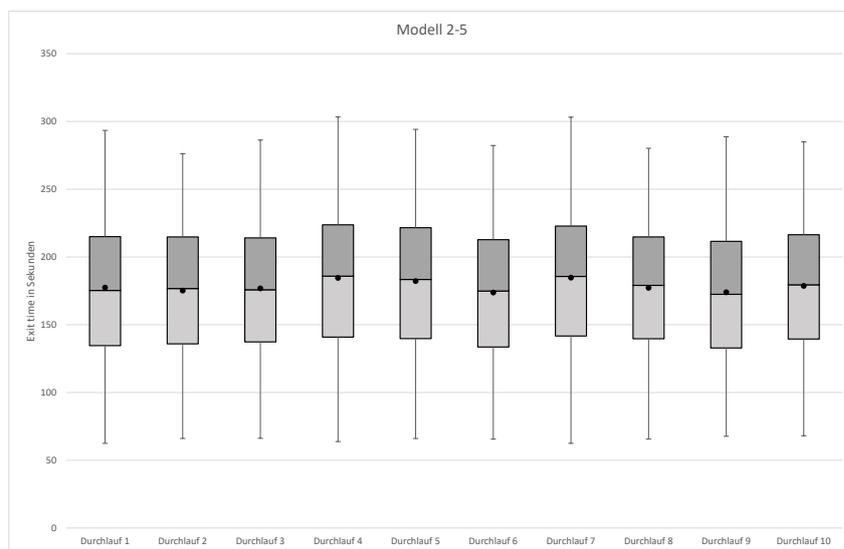


Abbildung Anhang 45: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 5

Tabelle Anhang 22: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 6

Modell 2-6

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	67,425	296,425	181,960	0,525	223,625	61,147	0,000	78,725	5,609
2	65,250	304,100	186,256	0,825	193,675	66,748	0,000	67,100	6,577
3	67,750	291,700	181,384	1,175	204,250	62,727	0,000	36,675	5,661
4	62,625	313,925	191,580	0,675	208,975	71,858	0,000	71,650	7,943
5	66,100	311,800	187,745	1,125	220,925	66,624	0,000	57,750	6,984
6	67,275	306,550	188,955	1,325	205,175	69,804	0,000	51,525	7,060
7	64,425	300,800	184,291	1,175	215,850	62,976	0,000	40,000	6,030
8	64,925	299,550	184,604	1,425	182,800	64,161	0,000	45,625	6,095
9	66,500	294,600	183,998	0,825	189,075	63,300	0,000	30,800	5,735
10	65,825	291,250	184,034	0,750	196,575	63,401	0,000	40,200	5,931
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	62,625	313,925	185,470	0,525	223,625	65,271	0,000	78,725	6,362

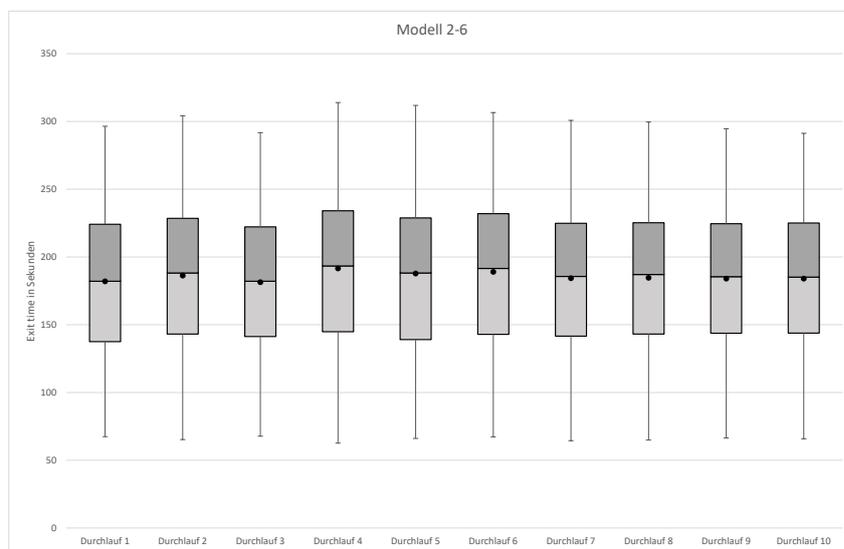


Abbildung Anhang 46: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 6

Tabelle Anhang 23: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 7

Modell 2-7

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	65,850	287,850	178,819	1,050	215,350	59,952	0,000	42,500	5,635
2	65,600	287,750	178,510	1,600	185,925	58,395	0,000	40,925	5,476
3	63,950	295,225	178,383	1,450	206,875	59,090	0,000	31,200	5,454
4	68,400	274,500	175,599	1,375	161,200	56,638	0,000	39,925	4,998
5	64,700	286,575	176,809	0,675	178,175	58,204	0,000	40,900	5,371
6	66,525	280,175	173,918	1,350	173,350	54,226	0,050	46,725	4,551
7	66,425	293,975	178,370	1,250	202,975	59,184	0,000	49,825	5,750
8	67,850	281,300	176,298	0,450	174,675	55,459	0,000	30,650	4,883
9	64,600	290,375	176,685	0,950	183,250	56,767	0,000	46,625	5,025
10	64,575	291,275	181,590	1,775	188,100	61,192	0,000	56,975	5,992
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	63,950	295,225	177,487	0,450	215,350	57,907	0,000	56,975	5,313

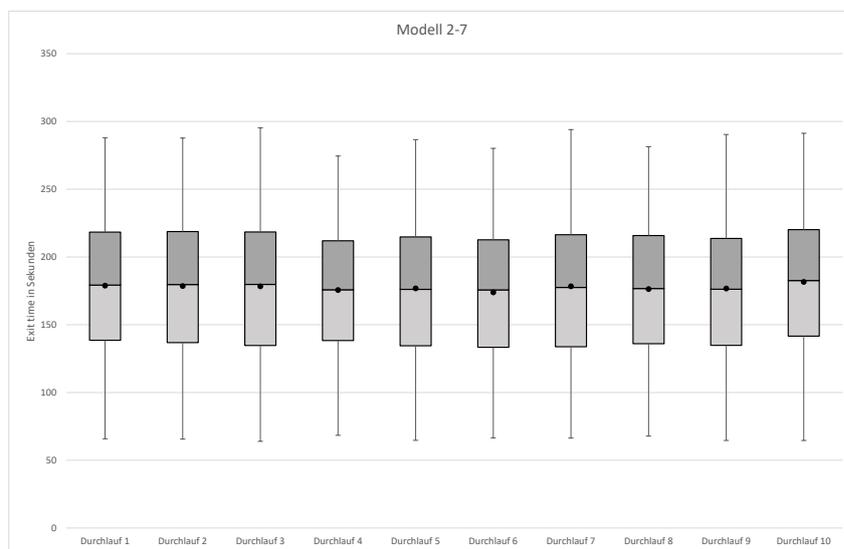


Abbildung Anhang 47: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 7

Tabelle Anhang 24: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 8

Modell 2-8

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	65,525	290,950	179,765	2,075	175,625	60,330	0,000	36,000	5,196
2	64,675	295,025	181,560	1,175	176,100	61,355	0,000	53,100	5,647
3	62,875	299,100	181,896	0,975	190,125	60,640	0,000	52,625	5,525
4	66,350	310,825	193,442	1,275	215,850	73,079	0,000	57,125	7,890
5	65,175	298,825	187,806	1,150	198,825	66,925	0,000	65,400	6,838
6	63,950	296,100	180,950	1,275	228,625	61,948	0,000	55,300	5,948
7	64,300	296,350	182,095	1,350	189,425	62,211	0,050	40,000	5,703
8	62,850	307,100	187,045	0,725	199,925	67,049	0,000	69,800	7,102
9	62,850	295,750	188,610	1,175	183,700	68,663	0,000	42,125	6,757
10	63,400	285,025	179,341	0,900	168,975	59,093	0,050	37,525	5,293
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	62,850	310,825	184,240	0,725	228,625	64,126	0,000	69,800	6,189

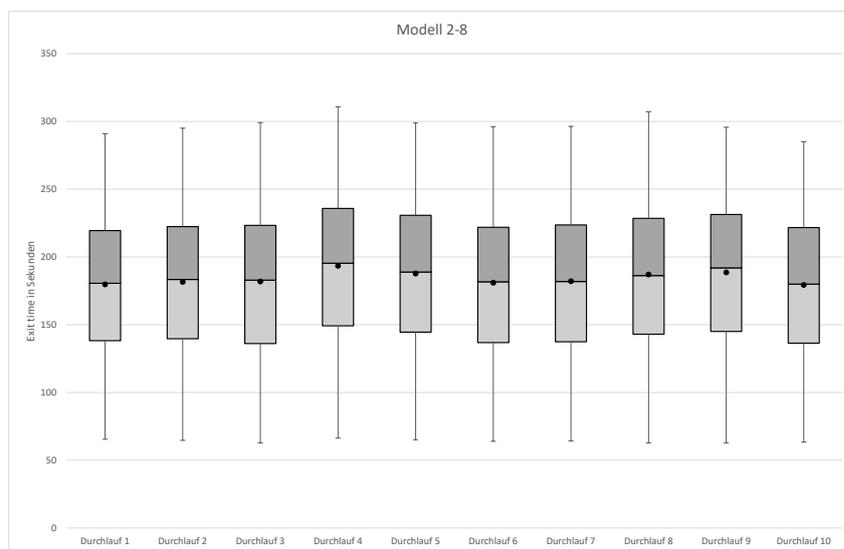


Abbildung Anhang 48: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 8

Tabelle Anhang 25: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 9

Modell 2-9

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	66,500	286,950	175,598	0,950	189,225	55,766	0,000	30,825	4,491
2	68,250	292,475	179,503	1,525	170,600	59,610	0,000	43,525	5,287
3	64,950	309,300	186,986	0,625	217,300	66,644	0,000	55,625	6,693
4	64,475	298,325	186,180	0,875	227,325	65,348	0,000	74,375	6,309
5	63,550	304,325	185,132	0,975	207,825	64,475	0,000	62,300	6,275
6	64,400	292,775	183,896	1,600	185,350	62,984	0,000	46,900	5,950
7	64,875	291,975	178,908	1,150	185,550	59,229	0,000	64,525	5,116
8	67,150	297,475	183,384	0,675	201,100	63,432	0,000	43,875	5,867
9	66,575	289,050	181,511	0,775	169,325	61,023	0,000	35,400	5,609
10	66,000	292,625	181,800	0,750	203,400	62,760	0,000	43,000	5,744
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	63,550	309,300	182,279	0,625	227,325	62,123	0,000	74,375	5,734

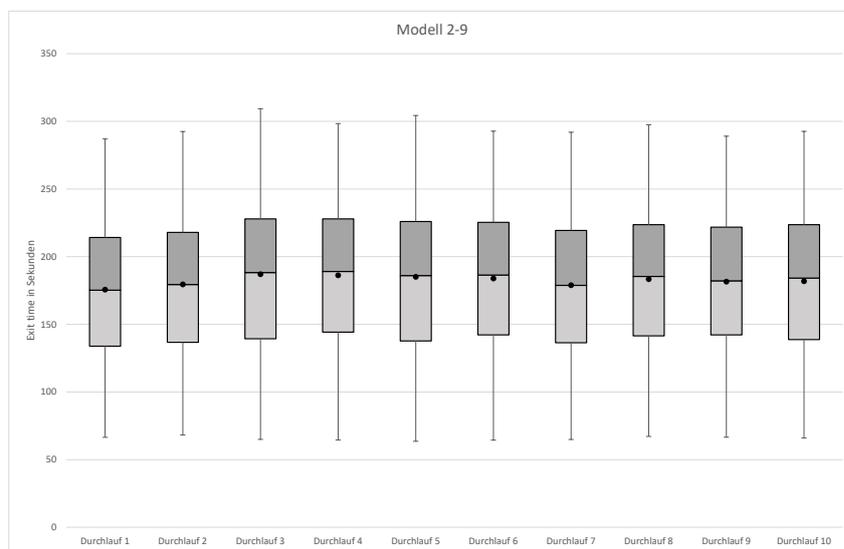


Abbildung Anhang 49: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 9

Tabelle Anhang 26: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 10

Modell 2-10

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	65,425	276,575	172,172	1,200	158,500	50,626	0,000	46,000	3,932
2	67,800	287,275	176,211	1,000	204,575	54,595	0,000	33,250	4,816
3	68,750	276,350	175,549	1,250	188,550	56,294	0,000	56,600	5,152
4	65,100	285,625	175,562	1,075	167,125	55,123	0,000	44,700	4,810
5	64,675	276,475	175,610	1,000	169,250	56,503	0,000	41,450	5,044
6	64,125	282,475	171,902	1,025	163,175	53,843	0,000	34,625	4,493
7	65,725	280,225	172,580	1,050	205,325	53,087	0,000	52,700	4,441
8	63,325	277,525	172,622	0,750	175,050	52,399	0,025	66,375	4,336
9	65,475	298,175	179,419	1,100	200,350	60,583	0,000	45,025	5,831
10	67,250	284,450	178,760	0,400	175,750	58,144	0,000	36,725	4,912
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	63,325	298,175	175,028	0,400	205,325	55,116	0,000	66,375	4,776

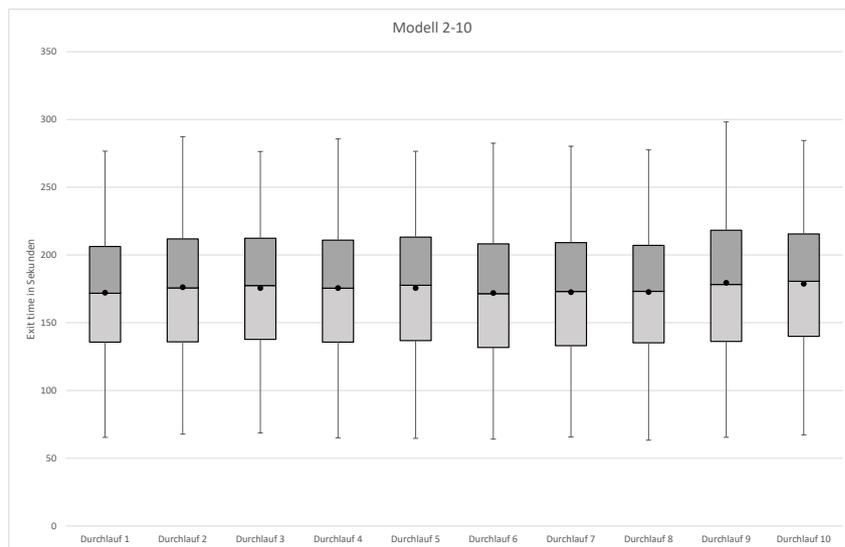


Abbildung Anhang 50: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 10

Tabelle Anhang 27: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 11

Modell 2-11

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	67,800	303,875	185,996	1,000	217,875	65,865	0,000	59,050	6,787
2	62,100	306,950	191,643	0,900	235,950	71,775	0,000	40,100	6,893
3	64,225	304,350	190,745	0,900	199,350	70,666	0,000	73,950	7,296
4	63,125	312,425	189,851	0,850	206,950	69,075	0,000	42,650	6,981
5	68,850	308,400	186,496	0,625	200,825	67,016	0,000	62,450	6,678
6	65,675	313,725	187,718	0,775	215,025	66,109	0,000	57,425	6,953
7	65,375	304,675	187,672	0,725	211,875	68,035	0,000	46,775	6,513
8	64,625	312,950	195,081	0,575	223,575	74,418	0,000	58,675	7,879
9	61,750	314,075	190,251	0,750	219,050	69,746	0,000	69,525	7,055
10	66,000	308,025	187,339	0,900	232,875	67,184	0,000	73,825	6,759
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	61,750	314,075	189,269	0,575	235,950	68,985	0,000	73,950	6,979

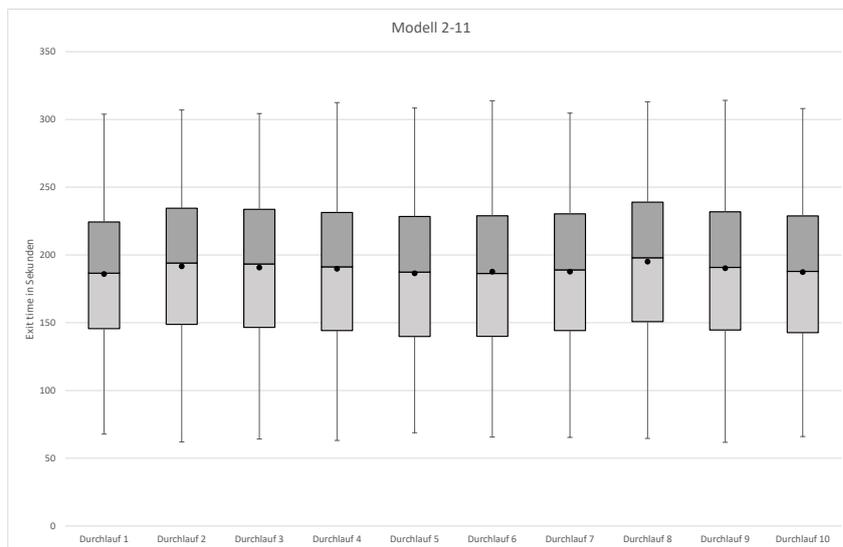


Abbildung Anhang 51: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 11

Tabelle Anhang 28: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 12

Modell 2-12

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	70,450	294,325	183,551	1,875	186,250	65,103	0,000	42,125	5,837
2	64,800	291,650	181,277	0,875	201,225	61,175	0,000	49,050	5,282
3	63,375	296,550	182,743	1,050	215,700	61,944	0,000	48,700	5,709
4	62,725	295,050	185,728	0,700	184,900	65,582	0,000	50,000	5,907
5	62,900	295,750	185,877	0,825	225,625	66,605	0,000	55,075	5,897
6	66,175	298,025	184,292	0,500	201,750	63,952	0,000	51,225	5,992
7	65,675	287,125	183,639	0,775	208,325	64,188	0,025	62,775	5,694
8	61,900	292,725	184,245	0,925	197,800	63,879	0,000	40,050	5,773
9	66,900	293,300	183,336	1,625	181,625	63,392	0,000	55,350	5,829
10	67,800	296,300	186,394	0,675	224,675	66,087	0,000	61,900	5,972
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	61,900	298,025	184,098	0,500	225,625	64,187	0,000	62,775	5,789

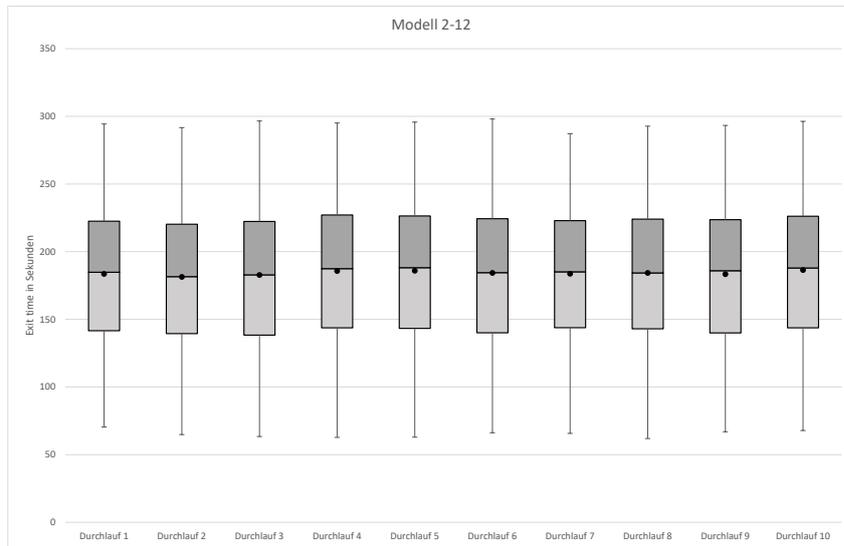


Abbildung Anhang 52: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 12

Tabelle Anhang 29: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 13

Modell 2-13

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	63,425	278,100	170,537	0,825	173,150	49,939	0,000	41,150	3,848
2	67,375	271,125	170,806	0,850	167,300	51,607	0,000	38,000	3,996
3	61,975	282,225	174,685	0,675	182,050	54,148	0,125	37,000	4,679
4	68,175	272,425	170,994	0,975	157,575	51,323	0,000	30,400	4,005
5	62,800	286,650	176,981	0,925	164,150	55,797	0,000	39,650	4,738
6	67,225	267,200	167,197	0,700	138,025	47,892	0,025	21,675	3,313
7	68,125	269,425	167,819	1,125	162,350	48,668	0,000	31,600	3,688
8	63,350	264,100	173,418	0,925	158,350	52,911	0,000	26,900	3,910
9	65,025	287,050	175,595	0,725	188,450	55,136	0,000	42,225	5,050
10	64,225	267,700	174,197	1,075	187,375	53,293	0,000	28,700	4,358
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	61,975	287,050	172,212	0,675	188,450	52,068	0,000	42,225	4,158

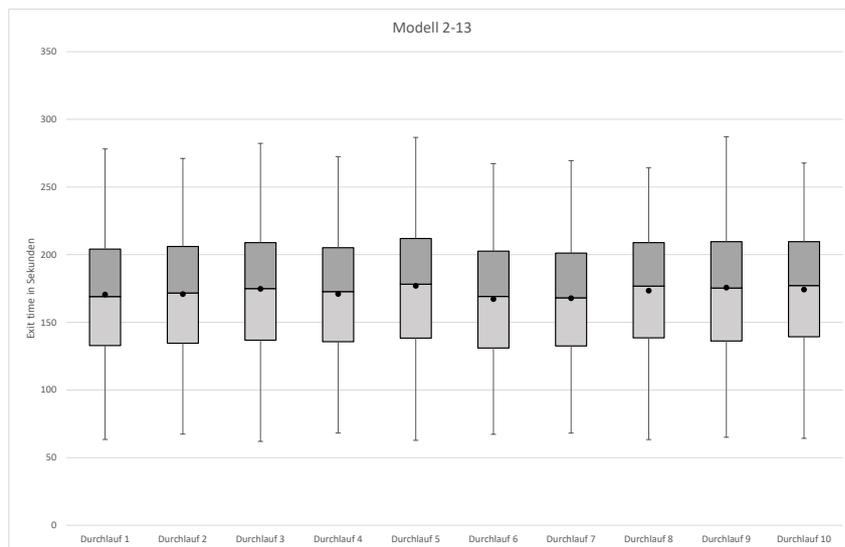


Abbildung Anhang 53: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 13

Tabelle Anhang 30: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 14

Modell 2-14

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	63,050	315,825	188,235	0,700	208,075	68,247	0,025	49,850	6,550
2	63,375	302,375	186,031	0,875	216,300	66,012	0,075	41,750	6,204
3	63,750	308,800	191,631	0,675	203,825	71,936	0,000	48,600	6,998
4	66,525	303,425	187,747	0,975	216,600	69,324	0,000	37,325	6,801
5	68,775	309,650	186,545	0,775	215,875	64,176	0,000	49,550	5,991
6	67,050	314,825	190,426	0,800	222,275	69,920	0,000	63,175	7,141
7	65,200	310,025	191,273	0,675	209,000	70,463	0,000	58,825	7,068
8	63,550	317,425	189,636	0,400	220,850	70,051	0,000	71,475	6,901
9	66,575	319,000	192,511	0,700	232,825	71,708	0,000	63,650	7,964
10	63,175	314,925	191,702	0,825	215,350	71,319	0,000	55,200	7,254
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	63,050	319,000	189,564	0,400	232,825	69,312	0,000	71,475	6,887

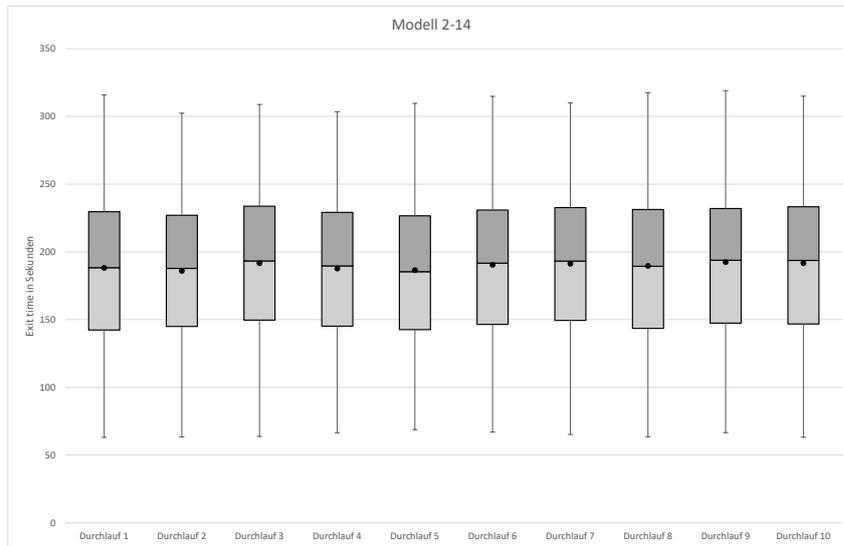


Abbildung Anhang 54: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 14

Tabelle Anhang 31: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 15

Modell 2-15

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	65,950	314,750	192,578	1,350	236,900	70,926	0,000	86,825	6,843
2	65,025	304,925	193,814	0,625	197,625	73,958	0,000	63,925	7,511
3	65,975	297,525	187,961	0,525	194,850	68,372	0,000	58,100	6,035
4	63,375	302,975	188,704	1,050	214,125	69,387	0,000	67,775	6,374
5	64,550	303,900	186,793	0,725	197,025	65,905	0,000	39,225	5,779
6	63,800	315,025	194,212	1,150	206,800	72,746	0,000	61,300	7,481
7	64,975	305,600	193,909	1,150	226,975	73,754	0,050	59,375	7,449
8	63,750	308,925	191,528	0,625	196,550	71,690	0,000	48,125	7,242
9	68,775	317,200	194,330	1,125	219,650	73,844	0,000	56,925	7,610
10	63,600	307,150	194,030	1,850	215,675	73,347	0,000	53,100	7,274
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	63,375	317,200	191,776	0,525	236,900	71,389	0,000	86,825	6,960

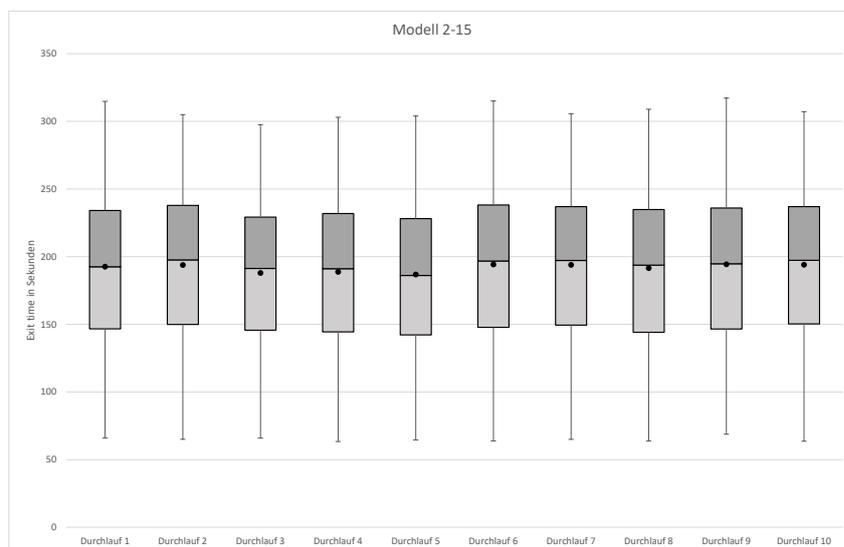


Abbildung Anhang 55: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 15

Tabelle Anhang 32: Simulationsergebnisse Modell 2 Szenario 16

Modell 2-16

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	64,400	305,275	185,071	0,600	212,025	64,498	0,000	48,750	6,423
2	65,875	302,700	189,341	0,825	216,550	68,661	0,000	60,275	6,881
3	65,600	299,075	188,634	1,650	195,700	68,406	0,000	44,100	6,672
4	61,650	297,700	182,186	0,975	198,675	61,948	0,000	40,425	5,757
5	65,900	302,575	187,550	0,950	185,500	66,233	0,000	33,725	5,975
6	61,175	295,500	183,510	0,625	204,450	63,522	0,000	60,275	5,875
7	63,875	317,225	194,899	1,800	222,975	74,318	0,000	76,725	8,353
8	62,525	303,250	186,380	0,725	201,750	66,232	0,000	42,125	6,272
9	63,500	303,450	187,982	1,175	242,500	69,265	0,000	75,550	7,380
10	66,125	305,425	185,708	1,425	198,175	65,305	0,000	61,450	6,172
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	61,175	317,225	187,116	0,600	242,500	66,835	0,000	76,725	6,576

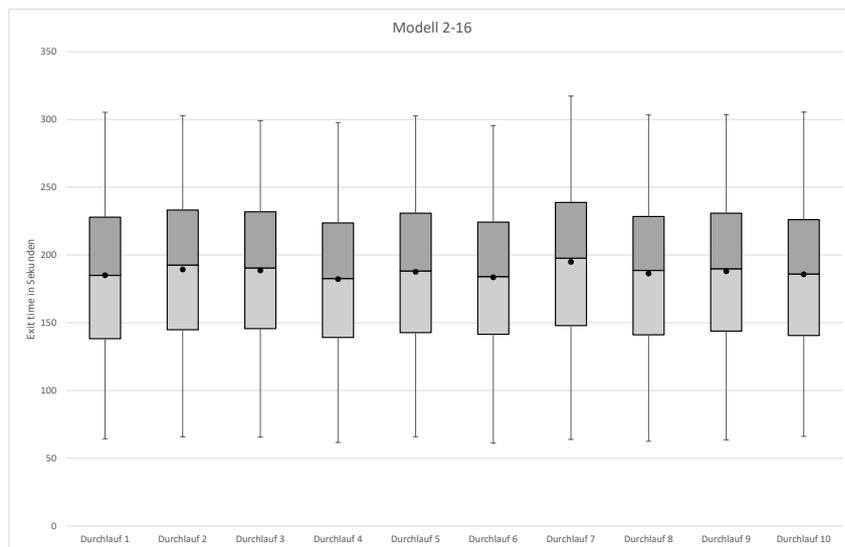


Abbildung Anhang 56: Boxplotauswertung Modell 2 Szenario 16

X. Simulationsergebnisse Modell 3

Tabelle Anhang 33: Simulationsergebnisse Modell 3 Szenario 17

Modell 3-17

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	63,350	309,150	188,292	0,675	188,925	68,647	0,075	36,775	5,812
2	63,550	329,175	186,752	1,000	194,950	66,029	0,000	43,000	5,267
3	69,600	332,675	189,588	1,000	189,175	68,212	0,100	53,125	5,493
4	64,400	335,875	183,047	1,200	194,050	63,343	0,000	37,225	4,761
5	66,975	323,875	188,462	0,850	187,050	67,646	0,000	34,525	5,473
6	62,950	316,600	184,648	0,800	192,000	65,934	0,025	42,800	5,281
7	62,600	343,775	186,651	1,200	232,325	66,434	0,000	29,725	5,318
8	65,050	335,275	187,216	0,800	225,050	68,236	0,000	58,575	5,757
9	65,325	338,525	184,892	1,600	210,350	64,652	0,000	34,450	5,242
10	71,225	338,075	186,674	0,850	233,550	66,238	0,000	48,600	5,249
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	62,600	343,775	186,610	0,675	233,550	66,533	0,000	58,575	5,365

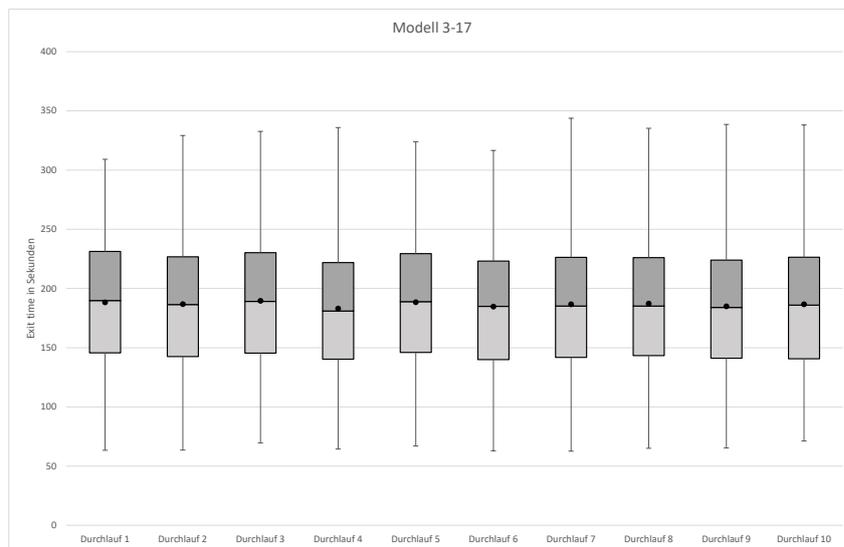


Abbildung Anhang 57: Boxplotauswertung Modell 3 Szenario 17

Tabelle Anhang 34: Simulationsergebnisse Modell 3 Szenario 18

Modell 3-18

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	66,950	342,775	195,551	0,650	253,850	76,121	0,000	55,325	6,831
2	66,200	336,400	191,146	0,675	222,625	71,014	0,000	57,500	6,356
3	66,125	341,400	194,686	1,425	228,525	73,524	0,000	56,975	6,244
4	66,475	335,275	191,393	0,725	232,025	70,581	0,000	52,550	5,655
5	66,975	352,600	204,088	0,700	248,525	83,471	0,000	70,625	8,880
6	67,875	334,625	197,316	0,800	251,050	77,893	0,000	81,825	7,185
7	64,825	345,625	198,816	2,175	240,700	77,987	0,000	76,500	7,632
8	66,375	334,225	191,560	1,050	232,350	73,614	0,000	44,225	6,353
9	65,575	345,975	192,745	0,875	238,125	73,135	0,000	71,125	7,021
10	66,875	340,975	196,209	0,700	222,850	75,923	0,000	52,900	7,236
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	64,825	352,600	195,339	0,650	253,850	75,322	0,000	81,825	6,939

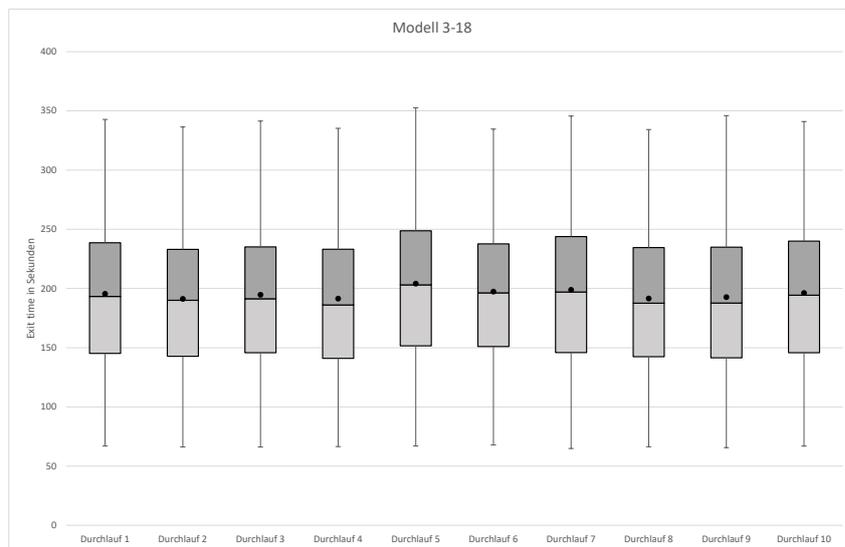


Abbildung Anhang 58: Boxplotauswertung Modell 3 Szenario 18

Tabelle Anhang 35: Simulationsergebnisse Modell 3 Szenario 19

Modell 3-19

Durchlauf Nr.	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
1	66,375	348,575	193,736	0,625	239,075	73,600	0,000	47,700	5,691
2	67,175	355,250	195,535	0,850	255,925	76,088	0,000	80,825	6,853
3	64,050	368,925	201,919	1,075	265,325	82,816	0,000	70,200	7,855
4	69,925	354,600	199,662	0,750	241,150	79,965	0,000	65,800	7,639
5	62,275	379,425	206,093	0,700	298,075	85,968	0,000	62,900	9,364
6	63,150	380,550	205,628	0,625	268,700	85,787	0,000	67,200	8,737
7	67,475	360,650	195,921	1,500	261,250	75,846	0,000	43,875	6,539
8	61,500	355,325	195,396	0,675	242,225	75,179	0,000	42,925	6,340
9	69,125	346,975	191,899	0,650	240,775	73,113	0,025	48,150	5,950
10	63,500	355,275	202,515	0,675	262,225	80,985	0,000	75,625	7,852
	Evakuierungszeit [s]			Stauungszeit (gesamt) [s]			Stauungszeit (Einzelpunkt) [s]		
	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert	Minimum	Maximum	Mittelwert
Gesamt	61,500	380,550	198,819	0,625	298,075	78,930	0,000	80,825	7,282

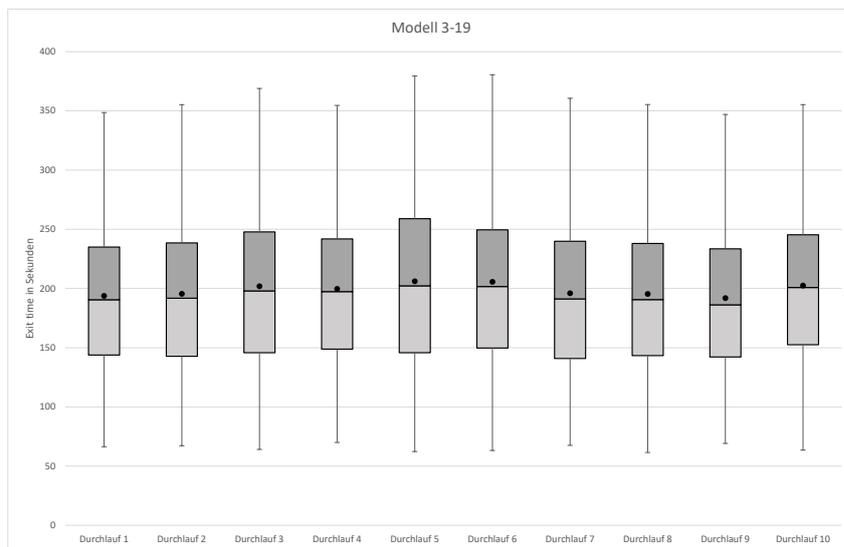


Abbildung Anhang 59: Boxplotauswertung Modell 3 Szenario 19

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, den 14.02.2020

Simon Fabian Witt