

Simulation der RIMEA-Testfälle mit Pathfinder

Version 1

Pathfinder-Version 2018.4.1210 vom 10.12.2018

Software-Hersteller:	Thunderhead Engineering 403 Poyntz Ave. Manhattan, KS 66502-6081 USA
Vertrieb:	SIMTEGO GmbH Einsteinstr. 55, 89077 Ulm Deutschland
Autoren des Testberichts:	Dr. Kathrin Grewolls Öffentlich bestellte und vereidigte Sachverständige für vorbeugenden Brandschutz (IHK Ulm) Dr.-Ing. Gerald Grewolls Geschäftsführer der SIMTEGO GmbH
Seiten:	63

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung und Programmbeschreibung	3
1.1	RIMEA-Testreihe	3
1.2	Grundlagen: Pathfinder	3
1.3	Dokumentation: Pathfinder	6
2	Komponenten-Tests: 1 bis 7	7
2.1	Geschwindigkeit in einem Gang (Test 1)	7
2.2	Geschwindigkeit eine Treppe hinauf (Test 2)	9
2.3	Geschwindigkeit eine Treppe hinunter (Test 3)	11
2.4	Messung des Fundamentaldiagramms (Test 4)	13
2.5	Reaktionsdauer (Test 5)	16
2.6	Bewegung um eine Ecke (Test 6)	19
2.7	Zuordnung der demographischen Parameter (Test 7)	21
3	Funktionelle Verifizierung - Test 8 bis 15	23
3.1	Ziel der funktionellen Tests (A3)	23
3.2	Parameteranalyse (Test 8)	23
3.2.1	Modellgeometrie und untersuchte Eingangsparameter	23
3.2.2	Gehgeschwindigkeit/Speed	27
3.2.3	Gehgeschwindigkeit auf Treppen/Speed Factor on Stairs	28
3.2.4	Schulterbreite/Diameter	29
3.2.5	Reduktionsfaktor/Reduction Factor	31
3.2.6	Laufzeit durch den aktuellen Raum/Current Room Travel Time	32
3.2.7	Stauzeit im aktuellen Raum/Current Room Travel Time	33
3.2.8	Faktor für verbleibende Evakuierungszeit/Global Travel Time	34
3.2.9	Präferenz für die aktuelle Tür/Current Door Preference	35
3.2.10	Abstandsfaktor im aktuellen Raum/Current Room Distance Penalty	36
3.2.11	Beschleunigungszeit/Acceleration Time	37
3.2.12	Dauer des Beibehaltens der Priorität/Persist Time	38
3.2.13	Reaktionszeit bei Kollisionen/Collision Response Time	39
3.2.14	Langsamkeitsfaktor/Slow Factor	40
3.2.15	Wandabstand/Wall Boundary Layer	41
3.2.16	Komfortabstand/Comfort Distance	42
3.2.17	Staugeschwindigkeit/Jam Velocity	43
3.3	Menschenmenge in einem großen Raum (Test 9)	44
3.4	Zuweisung von Rettungswegen (Test 10)	48
3.5	Wahl des Rettungsweges (Test 11)	50
3.6	Auswirkung von Engstellen (Test 12)	53
3.7	Stau vor einer Treppe (Test 13)	55
3.8	Routenwahl (Test 14)	57
3.9	Bewegung einer großen Menge Fußgänger um eine Ecke (Test 15)	60

1 Aufgabenstellung und Programmbeschreibung

1.1 RIMEA-Testreihe

Im vorliegenden Dokument ist die Evakuierungssimulation mit dem Programm Pathfinder für die Testbeispiele aus der RIMEA-Richtlinie in der Version 3.0.0 vom 10. März 2016 dokumentiert.

1.2 Grundlagen: Pathfinder

Simulationssoftware. Pathfinder ist ein agentenbasiertes kontinuierliches Modell. Diese Software wird von Thunderhead Engineering Consultants, USA, entwickelt. Pathfinder basiert auf einer Berechnungsmethode, die nach den „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ aufgestellt und veröffentlicht wurde und in der Fachwelt als ausreichend verifiziert eingestuft wird. Jede Pathfinder-Version wird durch den Hersteller anhand von mehr als 300 Testfällen verifiziert (u.a. IMO, RIMEA, NIST Technical Note 1822, SFPE Handbook). Die SIMTEGO GmbH mit Sitz in Ulm liefert die ins Deutsche übersetzte Benutzeroberfläche, übernimmt als Vertragspartner des Herstellers den Vertrieb in Deutschland, Österreich, der Schweiz und Liechtenstein und bietet Kundenbetreuung, Schulungen und Support in diesen Ländern an.

Die Simulationen wurden mit der Programmversion 2018.4.1210 x64 vom 10.12.2018 durchgeführt.

Wegfindung. Jede Person wird in Pathfinder durch einen Agenten mit eigenen Eigenschaften dargestellt. In Pathfinder wird für jeden Agenten ein Pfad nach der Methode „schnellster Weg im Raum“ (Locally-Quickest-Methode) berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, daß jeder Agent alle Türen und Staus im aktuellen Raum kennt. Außerdem kennt jeder Agent die Entfernung zu diesen Türen. Bei der Methode des „schnellsten Weges im Raum“ werden diese Informationen anhand von Kostenfaktoren gewichtet, um eine Ausgangstür aus dem aktuellen Raum als Wegziel für jeden Agenten zu wählen. Zu dieser ausgewählten Tür wird für den entsprechenden Agenten dann ein Pfad generiert, welchem dieser folgen kann. Diese Schritte werden für jeden Agenten mit jedem Zeitschritt periodisch wiederholt:

- Alle für einen Agenten lokal erreichbaren Ausgänge aus dem Raum, welche zu einem Notausgang aus dem Gebäude führen, werden aufgelistet.
- Ein Zielausgang wird anhand von Kostenfaktoren ausgewählt.
- Der Agent folgt dem Pfad.

Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis der Agent das Ziel erreicht hat.

Kostenfaktoren. Aus den folgenden drei Zeiten werden für jeden Agenten in jedem Zeitschritt Kostenfaktoren für die Auswahl eines Pfades berechnet:

- t_{crt} current room travel time: Zeit, die ein Agent mit maximaler Gehgeschwindigkeit benötigt, um den Ausgang zu erreichen, ohne dabei auf andere Agenten Rücksicht nehmen zu müssen.
- t_{crc} current room queue time: Ist das Ziel eine Tür, dann ist t_{crc} die Zeit, die ein Agent abhängig von seiner Position in einer Schlange an einer Tür warten muß. Die Abschätzung wird anhand der Anzahl der auf die Tür angewiesenen Agenten und der Durchflußrate der Tür gemacht.
- t_{gt} global travel time: Zeit, die ein Agent mit maximaler Gehgeschwindigkeit benötigt, um vom lokalen Ausgang den globalen Notausgang zu erreichen, ohne dabei auf andere Agenten Rücksicht nehmen zu müssen.

Alle drei Faktoren wurden in den vorliegenden Varianten gleichwertig gewichtet (Faktor 1). Außerdem wird die Entfernung, die der Agent bereits im aktuellen Raum zurückgelegt hat (d_{room} = distance traveled in room), als Handikap (Penalty-Faktor k_{dd}) einberechnet.

Bewegungsgeschwindigkeit. Jeder Agent bewegt sich entlang des berechneten Pfades mit einer modifizierten maximalen Geschwindigkeit (modified maximum velocity), welche vom Terrain (Raum, Treppe, Rampe), der darauf spezifizierten Maximalgeschwindigkeit und dem Abstand zu weiteren Agenten abhängt.

Platzbedarf und Darstellung der Agenten. Der Platzbedarf eines Agenten wird in Pathfinder durch einen Kreiszyylinder dargestellt. Die Agenten dürfen ihre Grundfläche an Engstellen um einen vorher definierten Anteil innerhalb von maximal einer Minute verringern, um z.B. den Durchgang durch Türen realistischer darzustellen.

Um die Evakuierung von Personen mit Gehhilfen, im Rollstuhl oder auch im Krankenbett zu modellieren, kann die Geometrie der Agenten in Pathfinder frei gewählt werden. Ein Standard-Rollstuhl und ein Standard-Bett sind vordefiniert. Auch können diesen Personen eine oder mehrere Personen als Helfer zugeordnet werden, die den Rollstuhl oder das Bett schieben oder auch eine blinde Person begleiten.

Die Agenten können als:

- Scheiben, Zylinder oder Kugeln unterschiedlicher Farbe,
- Mannequin oder
- Personen

dargestellt werden. Die Darstellung hat keinen Einfluß auf die Simulation oder das Ergebnis.

Der Weg jedes Agenten wird so gewählt, daß er Wände nicht berührt oder mit ihnen zusammenstößt. Die RIMEA-Testfälle wurden mit dem Standardwert von 0,1 m für den

Wandabstand durchgeführt. Demzufolge halten alle Agenten einen Abstand von mindestens 0,1 m zu allen Bauteilen (z.B. Wände und Türrahmen) ein. Der Abstand, den die Agenten untereinander einhalten, kann in Pathfinder durch einen Komfortabstand (freier Abstand zwischen zwei Zylindern) oder über eine maximale Komfordichte (z.B. maximal 4 Agenten pro $m^2 = 4 \text{ Personen}/m^2$) definiert werden. In Türdurchgängen oder an anderen Engstellen wird der Komfortabstand für jeden Agenten automatisch verringert, wenn das zur Lösung von Bewegungskonflikten erforderlich ist. Bei der Definition einer maximalen Komfordichte wird diese jedoch auch in solchen Situationen beibehalten. Um Bewegungskonflikte aufzulösen, können die Agenten in Pathfinder zusätzlich noch ihren Durchmesser kurzfristig reduzieren. Dadurch kann die elliptische Grundfläche von Personen auch mit einem Zylindermodell realistisch abgebildet werden. In den folgenden Varianten wurde für Personen diese Reduktion um maximal 30 % des Durchmessers des Agenten festgelegt.

Evakuierungszeit. Die Evakuierungszeiten einer jeden virtuellen Person setzen sich zusammen aus den gesamten Lauf- und Stauzeiten summiert über die Simulationsdauer. Die maßgebende Evakuierungszeit insgesamt ist die Zeitspanne zwischen dem Beginn der Evakuierung und dem Zeitpunkt, an welchem die letzte Person das Gebäude bzw. den Brandabschnitt verlassen hat. Diese Zeit wird in der RIMEA-Richtlinie auch als Gesamtentfluchtungszeit bezeichnet. Bei der brandschutztechnischen Bewertung der Ergebnisse müssen zusätzlich zur berechneten Evakuierungszeit auch die Zeit bis zur Brandentdeckung (t_1) und der Brandmeldung (t_2) sowie die Reaktionszeit (t_3) betrachtet werden.

Stauzeit. Für jeden Agenten werden von Pathfinder Stauzeiten (Einzelstauzeit und Gesamtstauzeit) berechnet. Diejenige Geschwindigkeit, ab welcher ein Agent sich im Stau bewegt, kann vom Nutzer frei gewählt werden. In der vorliegenden Auswertung wurde eine Staugeschwindigkeit von 0,25 m/s (langsamer Trippelschritt) festgelegt. Als Einzelstauzeit wird die Stauzeit bezeichnet, in der ein Agent fortlaufend seine Staugeschwindigkeit erreicht oder sogar unterschreitet. Die maximale Einzelstauzeit eines Agenten ist die längste Zeitspanne, die er sich fortlaufend in einem Bereich im Stau befindet. Werden alle Einzelstauzeiten eines Agenten über die Simulationsdauer aufsummiert, so ergibt sich daraus die Gesamtstauzeit.

1.3 Dokumentation: Pathfinder

Die Bedienung von Pathfinder und die technischen Hintergründe sind im:

- Pathfinder User Manual [3],
- Pathfinder Results User Manual [1] und
- Pathfinder Technical Reference Guide [2]

dokumentiert. Diese Dokumente können zusammen mit der Pathfinder-Online-Hilfe und dem Pathfinder-Forum direkt über das Hilfe-Menü erreicht werden.

Zusätzlich werden über den YouTube-Kanal von Thunderhead Engineering:

- Kurzanleitungsvideos und
- wissenschaftliche Vorträge von internationalen Konferenzen zum Thema Evakuierungssimulation mit Pathfinder

bereitgestellt.

2 Komponenten-Tests: 1 bis 7

2.1 Geschwindigkeit in einem Gang (Test 1)

Mit dem Test 1 soll nachgewiesen werden, daß eine Person in einem 2 m breiten und 40 m langen Gang mit einer definierten Gehgeschwindigkeit die Entfernung in der entsprechenden Dauer zurücklegt.

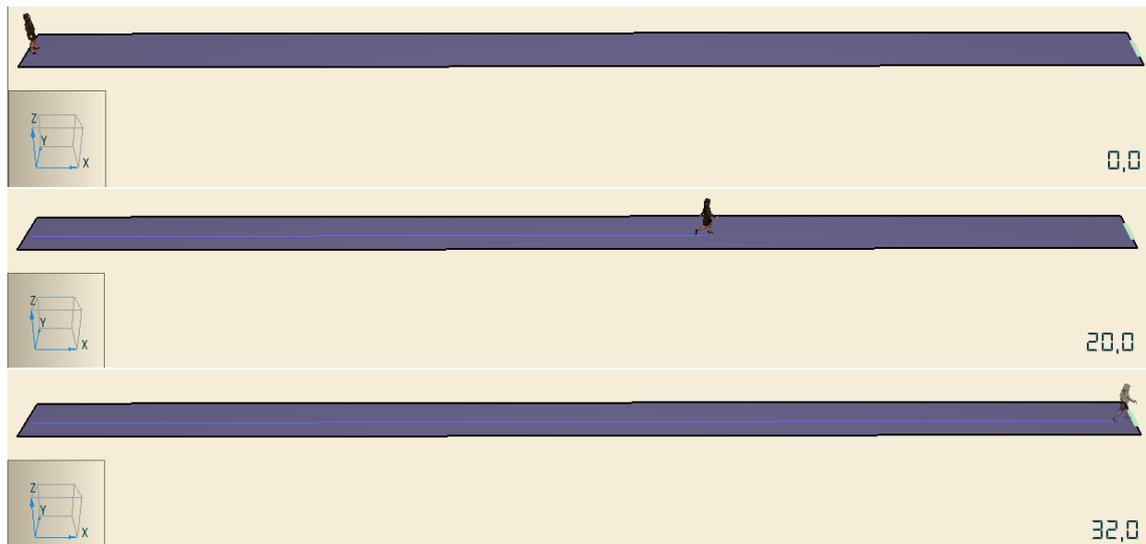


Bild 1: Test 1, Darstellung des Pathfinder-Modells zum Startzeitpunkt ($t = 0$ s), während der Evakuierung ($t = 20$ s) und zum Ende der Simulation ($t = 32$ s)

Auswertung. Die Geschwindigkeit der Person wurde für 20 Varianten mit einer Monte-Carlo-Simulation bestimmt. Der Geschwindigkeitsbereich der unbehinderten maximalen Laufgeschwindigkeit der Person wurde als abgeschnittene Normalverteilung mit einem Minimum von 1,25 m/s (60-jährige Person) und Maximum bei 1,6 m/s (20-jährige Person) und einem Mittelwert μ von 1,5 m/s vorgegeben.

Die Evakuierungszeiten der 20 verschiedenen Durchläufe lagen im Durchschnitt bei 27,2 s, einem Minimum von 25,7 s und einem Maximalwert von 31,5 s (siehe Bild 2).

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

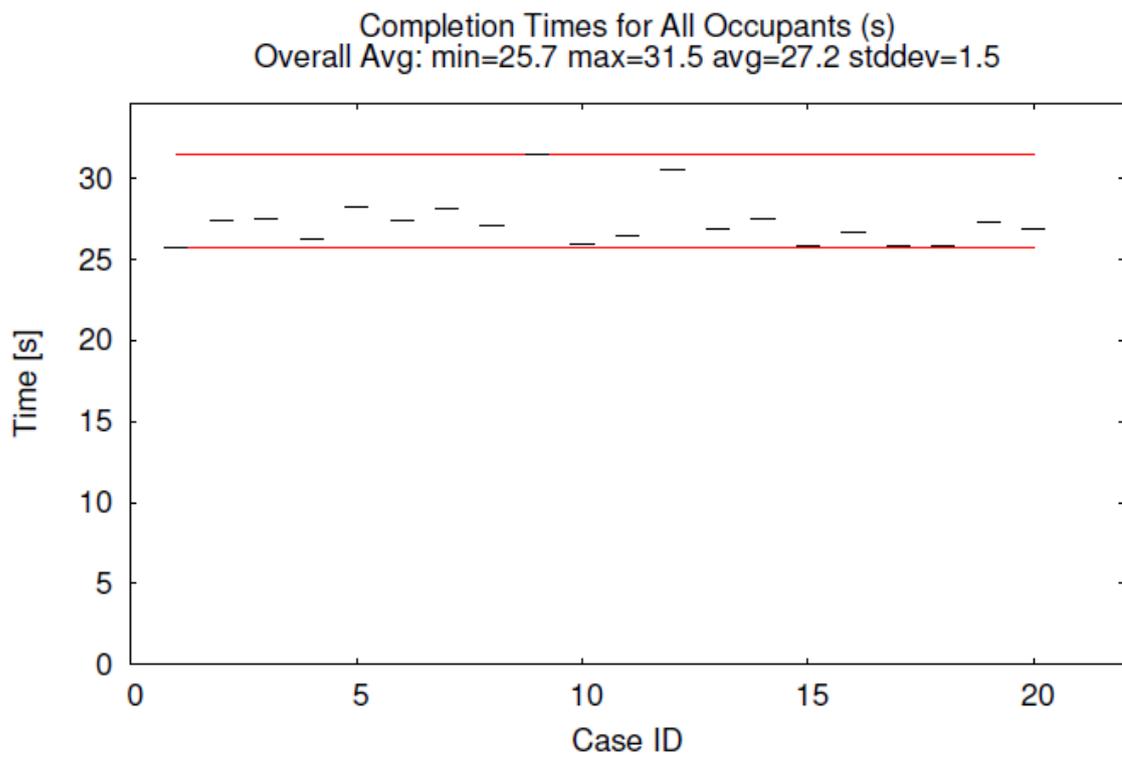


Bild 2: Test 1, Diagramm über die Evakuierungszeit von 20 verschiedenen Varianten

2.2 Geschwindigkeit eine Treppe hinauf (Test 2)

Mit dem Test 2 soll nachgewiesen werden, daß eine Person auf einer 2 m breiten und 10 m langen Treppe mit einer definierten Gehgeschwindigkeit diese Entfernung in der entsprechenden Dauer zurücklegt.

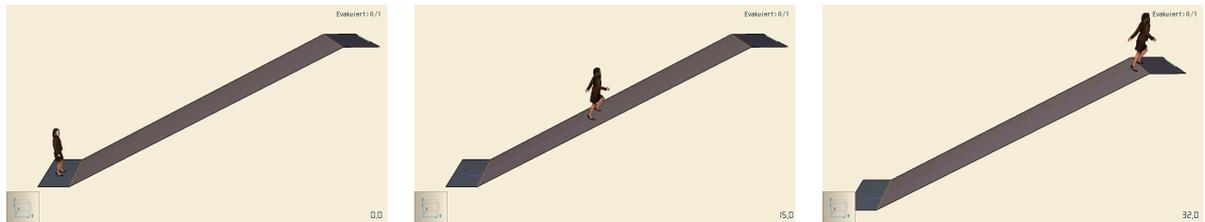


Bild 3: Test 2, Darstellung des Pathfinder-Modells einer Treppe zum Startzeitpunkt ($t = 0$ s), während der Evakuierung ($t = 15$ s) und zum Ende der Simulation ($t = 32$ s)

Auswertung. Die Geschwindigkeit der Person wurde für 50 Varianten mit einer Monte-Carlo-Simulation bestimmt. Der Geschwindigkeitsbereich der unbehinderten maximalen Laufgeschwindigkeit der Person wurde mit dem Faktor 0,5 zur unbehinderten Geschwindigkeit auf der Ebene angegeben und diese wurde als abgeschnittene Normalverteilung mit einem Minimum von 1,25 m/s (60-jährige Person) und Maximum bei 1,6 m/s (20-jährige Person) und einem Mittelwert μ von 1,5 m/s vorgegeben.

Die Evakuierungszeiten der 50 verschiedenen Durchläufe lagen im Durchschnitt bei 36,8 s, einem Minimum von 33,7 s und einem Maximalwert von 42,3 s (siehe Bild 4).

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

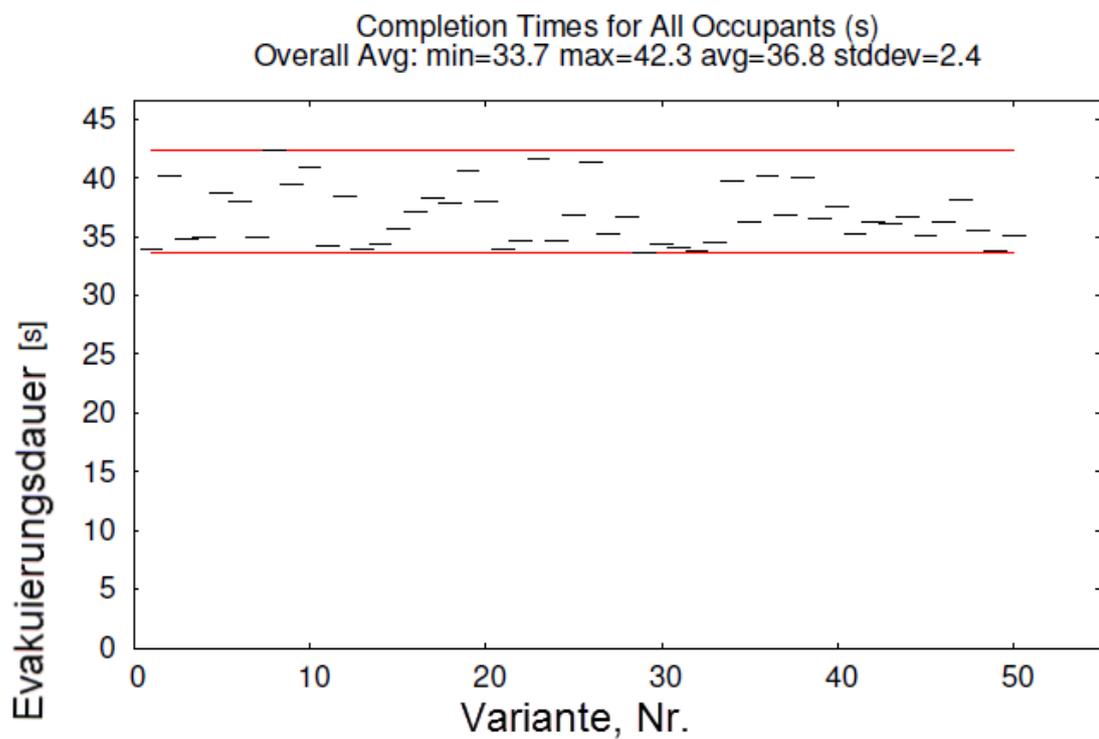


Bild 4: Test 2, Diagramm über die Evakuierungszeit von 50 verschiedenen Varianten

2.3 Geschwindigkeit eine Treppe hinunter (Test 3)

Mit dem Test 3 soll nachgewiesen werden, daß eine Person auf einer 2 m breiten und 10 m langen Treppe mit einer definierten Gehgeschwindigkeit diese Entfernung in der entsprechenden Dauer zurücklegt.

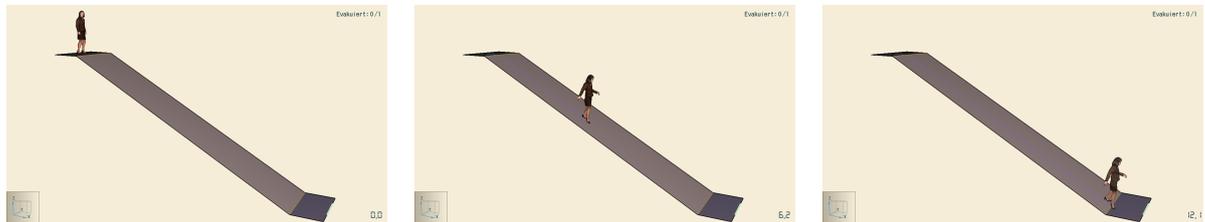


Bild 5: Test 3, Darstellung des Pathfinder-Modells einer Treppe zum Startzeitpunkt ($t = 0$ s), während der Evakuierung ($t = 6$ s) und zum Ende der Treppe ($t = 12$ s)

Auswertung. Die Geschwindigkeit der Person wurde für 50 Varianten mit einer Monte-Carlo-Simulation bestimmt. Der Geschwindigkeitsbereich der unbehinderten maximalen Laufgeschwindigkeit der Person wurde mit dem Faktor 0,5 zur unbehinderten Geschwindigkeit auf der Ebene angegeben und diese wurde als abgeschnittene Normalverteilung mit einem Minimum von 1,25 m/s (60-jährige Person) und Maximum bei 1,6 m/s (20-jährige Person) und einem Mittelwert μ von 1,5 m/s vorgegeben.

Die Evakuierungszeiten der 50 verschiedenen Durchläufe lagen im Durchschnitt bei 14,1 s, einem Minimum von 13,0 s und einem Maximalwert von 15,6 s (siehe Bild 6).

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

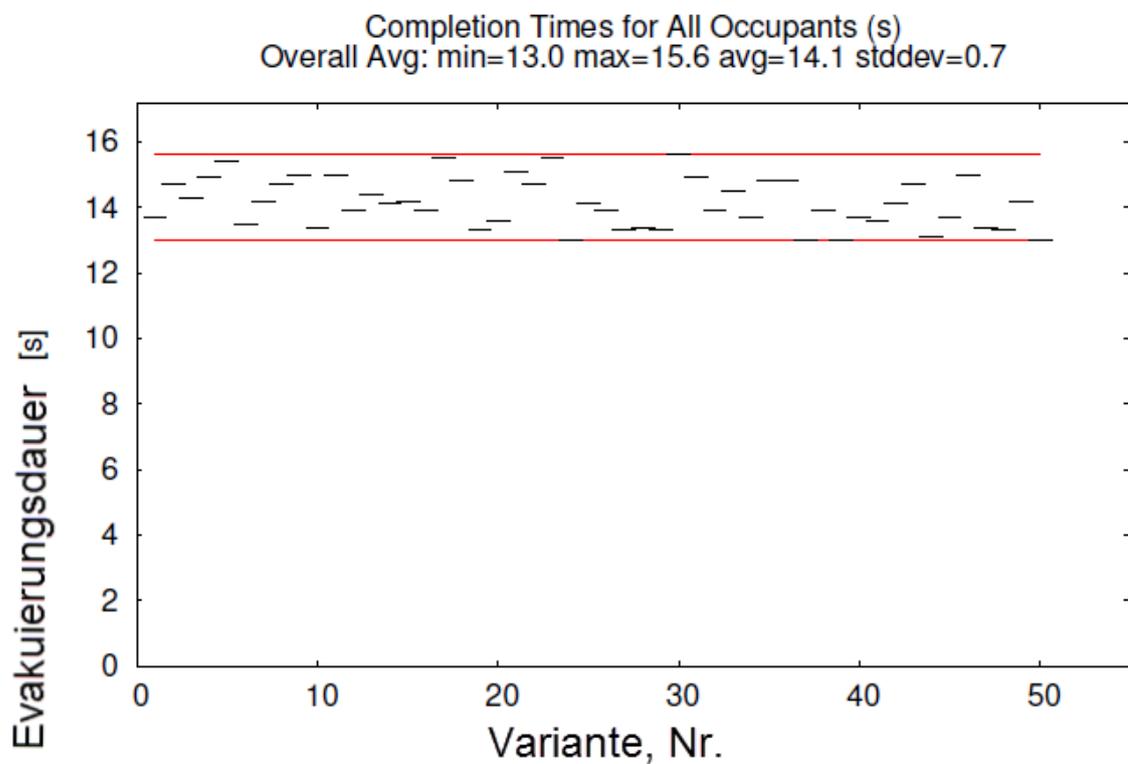


Bild 6: Test 3, Diagramm über die Evakuierungszeit von 50 verschiedenen Varianten

2.4 Messung des Fundamentaldiagramms (Test 4)

Mit dem Test 4 soll das Fundamentaldiagramm der dichteabhängigen Geschwindigkeiten des Personenstroms untersucht werden.

In Pathfinder kann die Gehgeschwindigkeit abhängig von der Personendichte definiert werden. Die korrekte Berücksichtigung der hinterlegten Geschwindigkeits-Dichte-Kurve wird auch im Pathfinder Validation and Verification Manual nachgewiesen, wo die Experimente von Zhang und Seyfried (2013) und Zhang, Klingsch, Schadschneider und Seyfried (2012) simuliert werden. Dabei können die experimentellen Ergebnisse für Personenstrom in einer Richtung, für Gegenstrom, Vereinigung von Personenströmen, Treppen und Rampen in der Pathfinder-Simulation sehr gut reproduziert werden, vgl. Bild 7 [4].

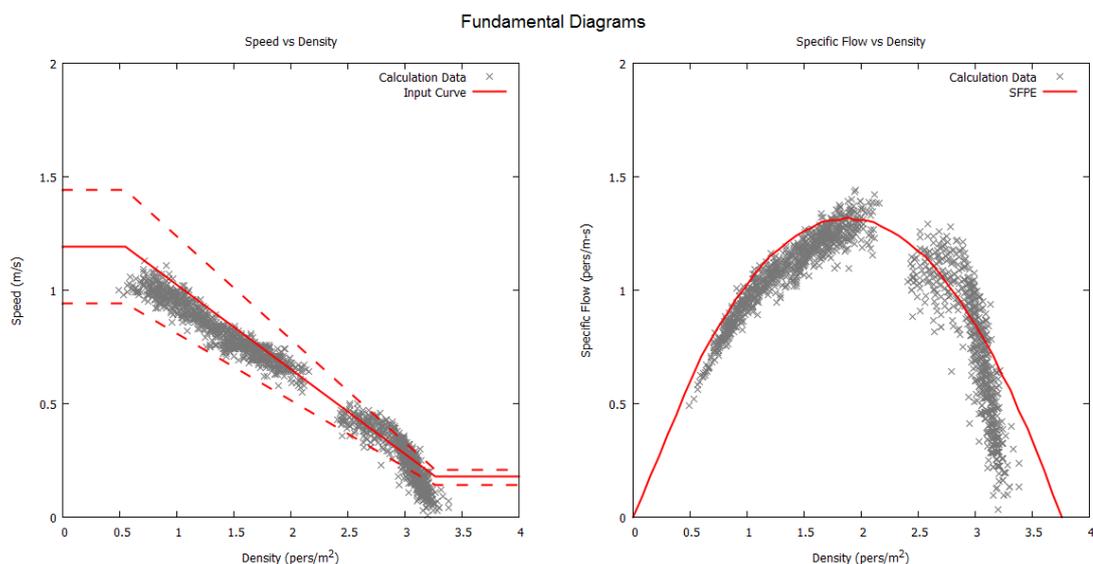


Bild 7: Test 4, Fundamentaldiagramm für die Experimente nach Zhang und Seyfried (2013) aus dem Pathfinder Verification and Validation Manual [4]

Simulation für den Test 4. Beim Test 4 soll gezeigt werden, daß die Simulation eines Personenstroms in einem 1.000 m langen und 10 m breiten Korridor mit drei Meßstellen (2 x 2 m) das Fundamentaldiagramm nach Weidmann möglichst gut wiedergibt. Für den Test 4 wurde die auf dem Fundamentaldiagramm nach Weidmann basierende dichteabhängige Geschwindigkeit hinterlegt. Dafür wurde die in [5] angegebene Gleichung

$$v = 1,34 \frac{m}{s} \cdot \left[1 - e^{-1,913 \left(\frac{1}{\rho \cdot m^2} - \frac{1}{5,4} \right)} \right]$$

verwendet, nach welcher die Geschwindigkeit gleich Null wird, wenn die Dichte auf 5,4 Personen/m² angestiegen ist. Der spezifische Fluß als Produkt von Geschwindigkeit und Dichte wird deshalb ebenfalls gleich Null, wenn die Dichte 5,4 Personen/m² erreicht. Das Fundamentaldiagramm ist zusammen mit dem Simulationsergebnis im Bild 8 dargestellt. Die in der Simulation festgestellte Streuung der Dichte und des spezifischen Flusses innerhalb von 50 Sekunden Simulationszeit ist plausibel, weil auch die experimentellen Ergebnisse, die Weidmann als Basis für sein gemitteltes Fundamentaldiagramm ausgewertet hat, deutliche Streuungen aufweisen.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

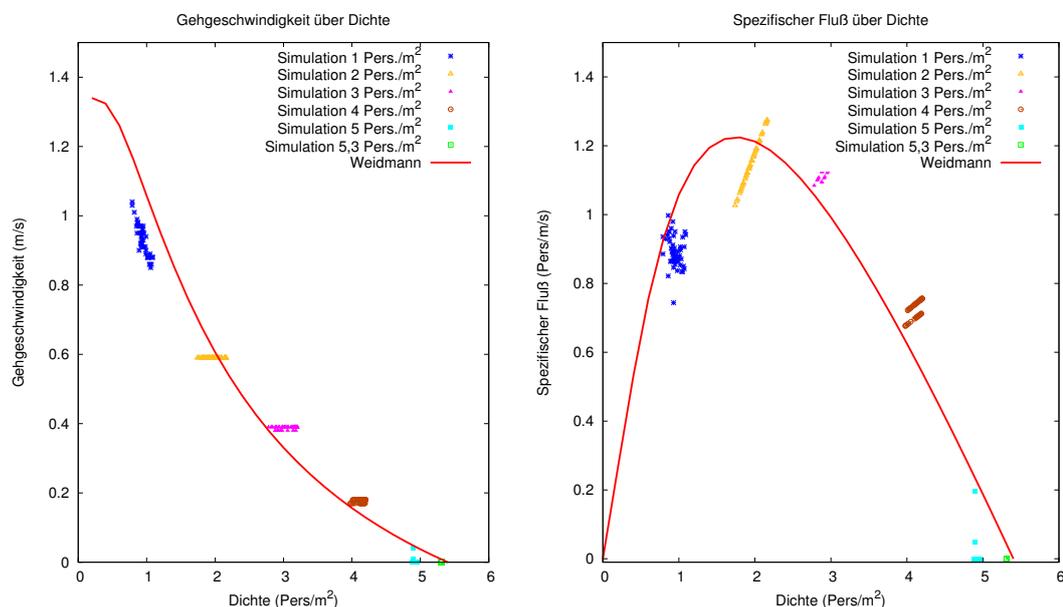


Bild 8: Test 4, Fundamentaldiagramm

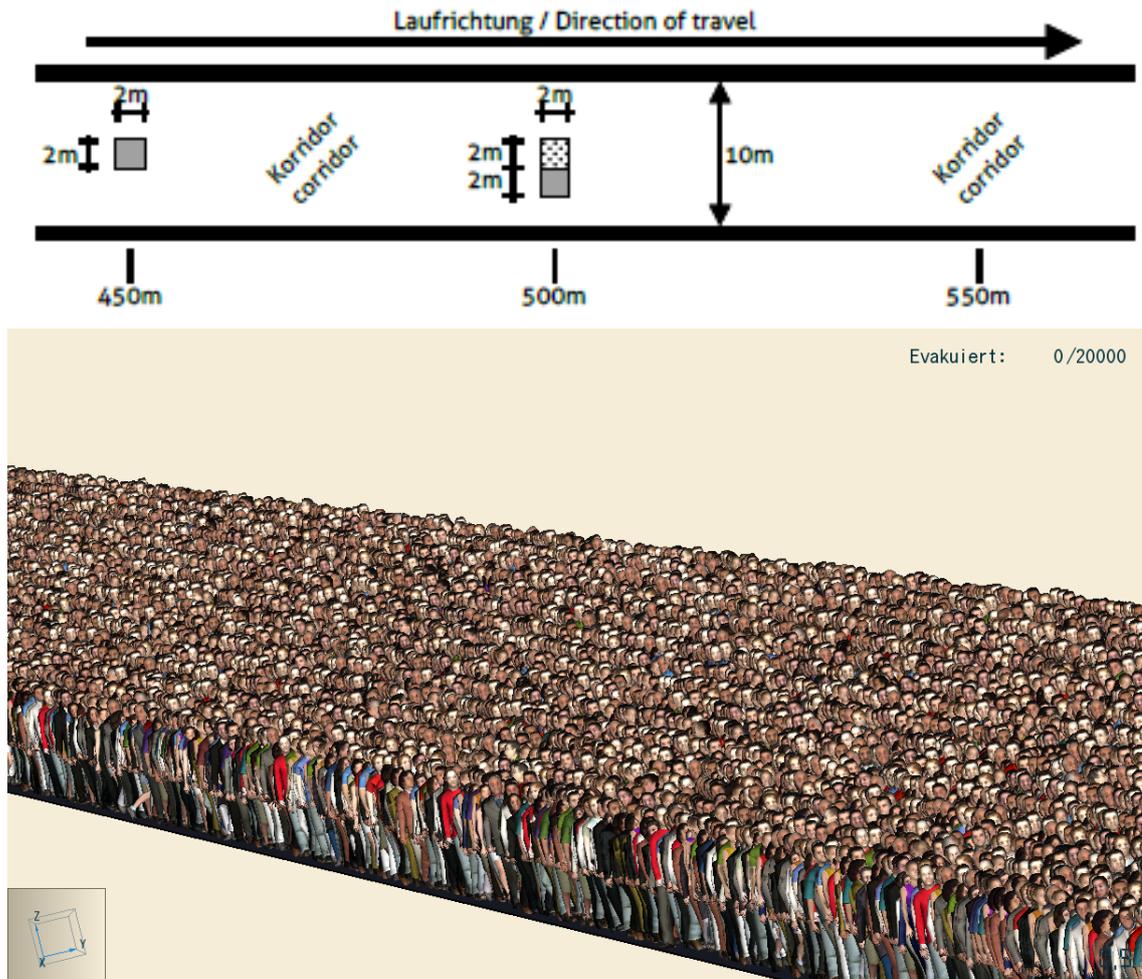


Bild 9: Test 4, Darstellung der Aufgabenstellung und des Pathfinder-Modells mit einem 1.000 m langen Gang

2.5 Reaktionsdauer (Test 5)

Mit dem Test 5 soll nachgewiesen werden, daß die Agenten ihre zugewiesene Reaktionsdauer exakt einhalten. Dafür wird über zehn Personen in einem Raum der Größe 8 m x 5 m eine Reaktionsdauer zwischen 10 s und 100 s gleichverteilt.

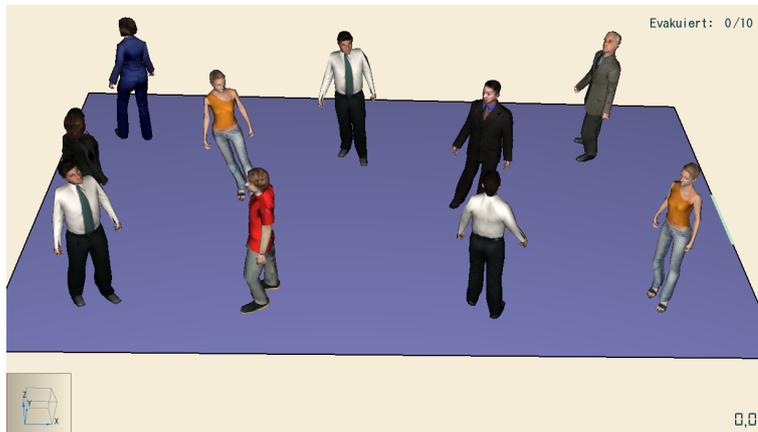


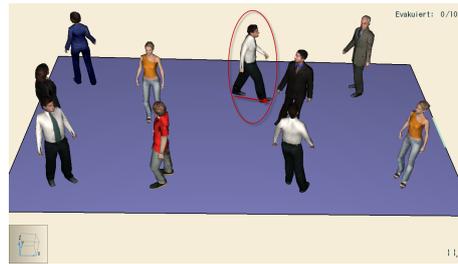
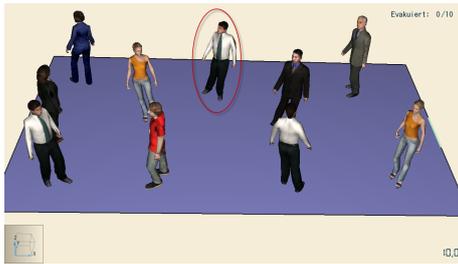
Bild 10: Test 5, Darstellung des Pathfinder-Modells mit einem Raum und 10 Agenten

Die Agenten haben Reaktionszeiten von jeweils dem zehnfachen ihrer Nummer zugeordnet bekommen:

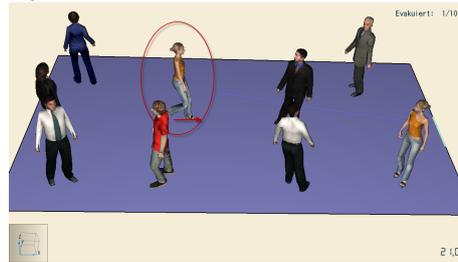
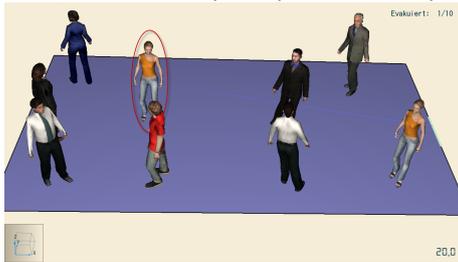
- Agent 1: Reaktionszeit 10 s,
- Agent 2: Reaktionszeit 20 s,
- ... ,
- Agent 10: Reaktionszeit 100 s.

Auswertung. Die Personen warten an ihrer Position die vorgegebenen Reaktionszeiten ab und begeben sich danach zum Ausgang (siehe Bilder [11](#) und [12](#)).

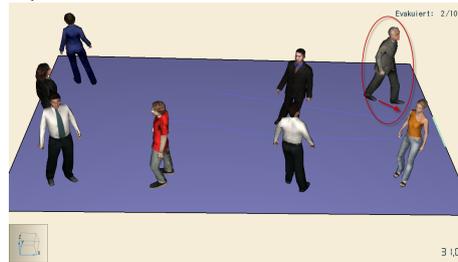
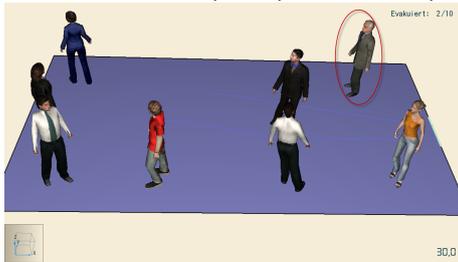
Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.



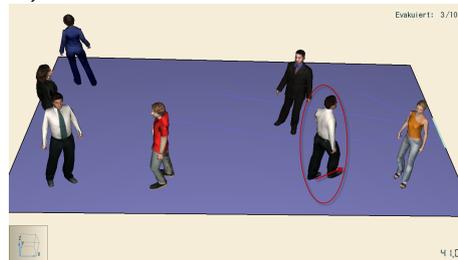
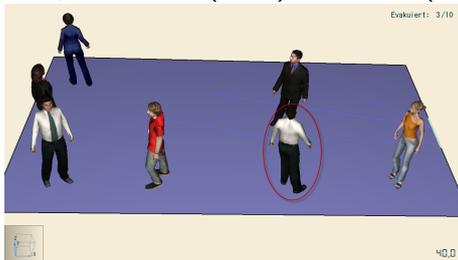
Zeitpunkt 10 s (links) und 11 s (rechts)



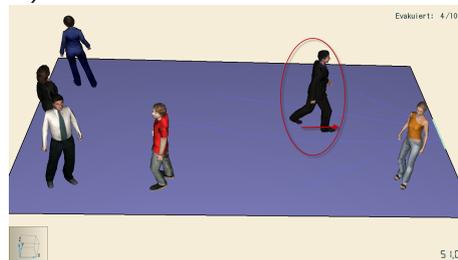
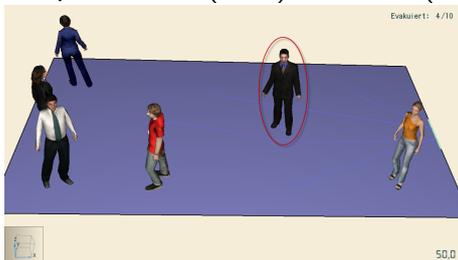
Zeitpunkt 20 s (links) und 21 s (rechts)



Zeitpunkt 30 s (links) und 31 s (rechts)

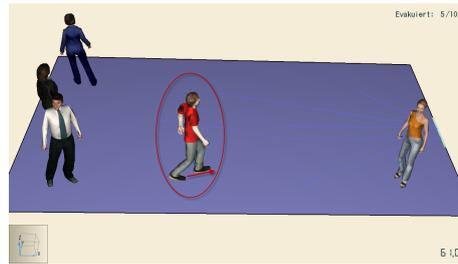
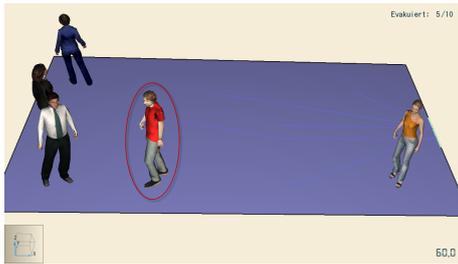


Zeitpunkt 40 s (links) und 41 s (rechts)

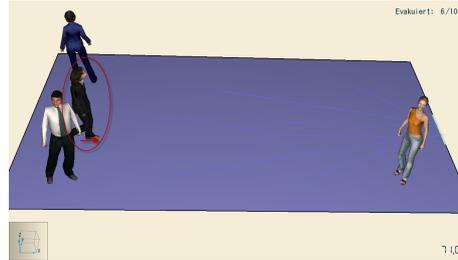
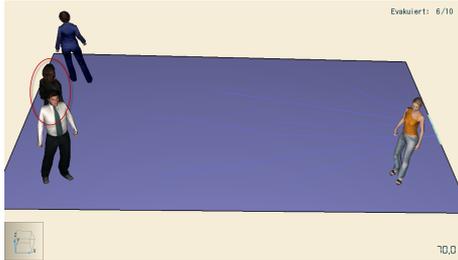


Zeitpunkt 50 s (links) und 51 s (rechts)

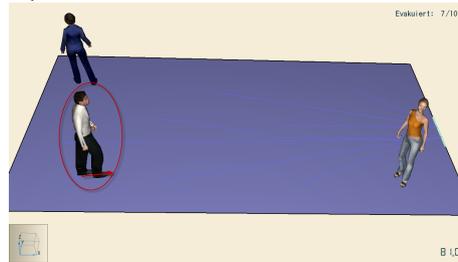
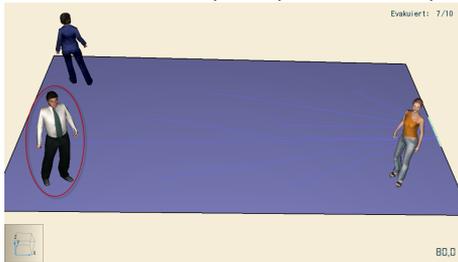
Bild 11: Test 5, Darstellung des Pathfinder-Modells eines Raumes mit 10 Personen und unterschiedlichen Reaktionszeiten von 10 bis 50 s



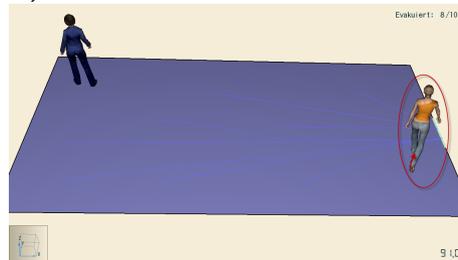
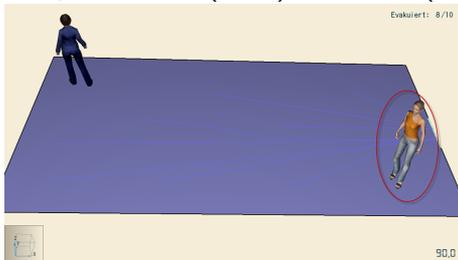
Zeitpunkt 60 s (links) und 61 s (rechts)



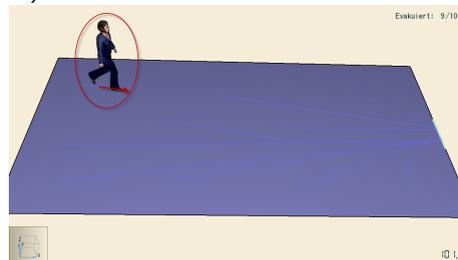
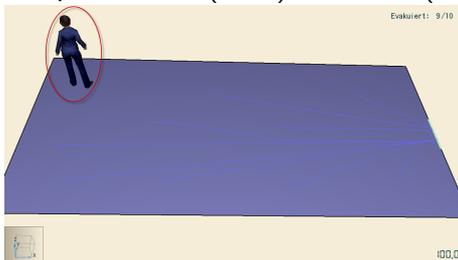
Zeitpunkt 70 s (links) und 71 s (rechts)



Zeitpunkt 80 s (links) und 81 s (rechts)



Zeitpunkt 90 s (links) und 91 s (rechts)



Zeitpunkt 100 s (links) und 101 s (rechts)

Bild 12: Test 5, Darstellung des Pathfinder-Modells eines Raumes mit 10 Personen und unterschiedlichen Reaktionszeiten von 60 s bis 100 s

2.6 Bewegung um eine Ecke (Test 6)

Mit dem Test 6 soll nachgewiesen werden, daß 20 Personen eine links abbiegende Ecke erfolgreich umrunden können, ohne die Wände zu durchqueren (siehe Bild 13).

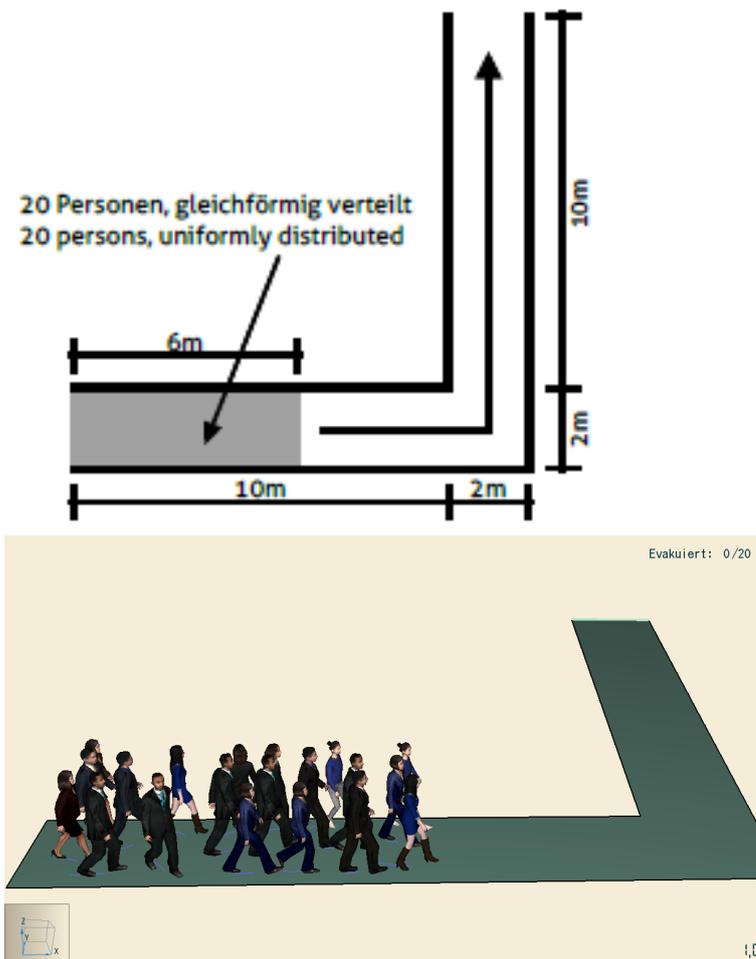


Bild 13: Test 6, Darstellung der Aufgabenstellung und des Pathfinder-Modells mit einem abgewinkelten Flur und 20 Agenten

Auswertung. Die Personen laufen über den Flur, ohne Wände zu berühren oder zu durchqueren (siehe Bild 14). Der voreingestellte Wandabstand der Personen beträgt 0,1 m.

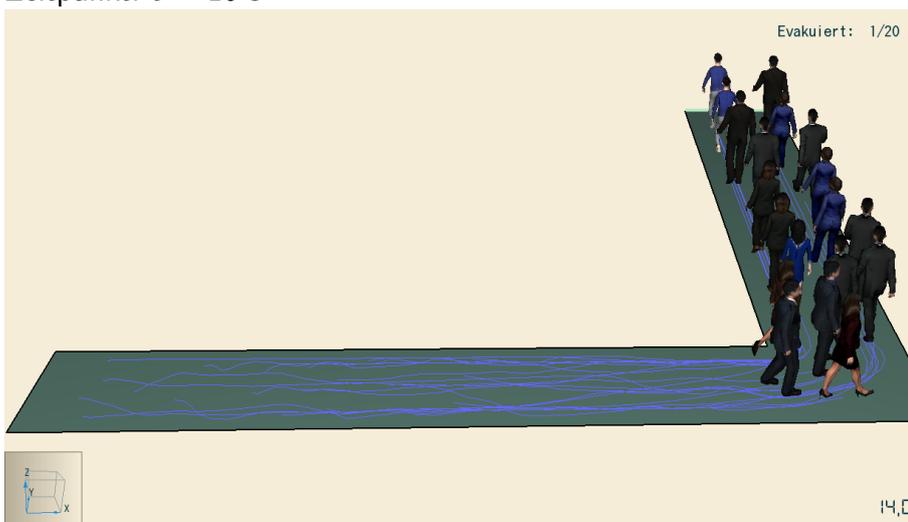
Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.



Zeitpunkt: $t = 5$ s



Zeitpunkt: $t = 10$ s



Zeitpunkt: $t = 14$ s

Bild 14: Test 6, Darstellung des Pathfinder-Modells eines abgewinkelten Korridors mit 20 Personen zu unterschiedlichen Zeitpunkten

2.7 Zuordnung der demographischen Parameter (Test 7)

Mit dem Test 7 soll nachgewiesen werden, daß einer Personengruppe aus 50 erwachsenen Personen verschiedene Gehgeschwindigkeiten entsprechend der Abbildung 2 in der RIMEA-Richtlinie zugeordnet werden können. Für diesen Nachweis wurde eine Raumgeometrie definiert, bei der die Personen von einer Seite des Raumes zur anderen Seite gehen, ohne sich dabei zu behindern, Bild 16.

50 Personen stehen am Beginn der Simulation nebeneinander entlang einer Kante des Raumes. Der Ausgang wird von der gegenüberliegenden Raumkante gebildet. Die Gehgeschwindigkeit der Personen ist statistisch verteilt. Dafür wurde eine abgeschnittene Normalverteilung mit den folgenden Parametern definiert:

- Mittelwert $\mu=1,2$ m/s
- Standardabweichung $\sigma=0,25$ m/s
- Minimum: 0,6 m/s, Maximum: 1,9 m/s

In der Simulation wechseln die Personen die Seite des Raumes und laufen dabei mit ihren statistisch verteilten Geschwindigkeiten. In der Auswertung wurde die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für die in der Simulation ermittelten Laufgeschwindigkeiten in den Graphen der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der abgeschnittenen Normalverteilung eingetragen, siehe Bild 15. Die Verteilung der in der Simulation verwendeten Geschwindigkeiten entspricht genau der vorgegebenen Verteilung.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

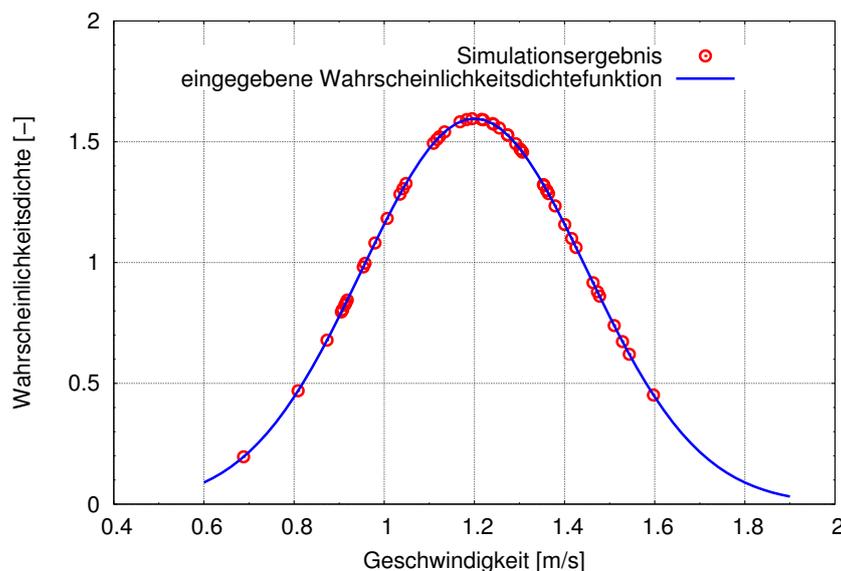


Bild 15: Test 7, Vorgegebene Normalverteilung der Geschwindigkeit und Simulationsergebnis für 50 Personen

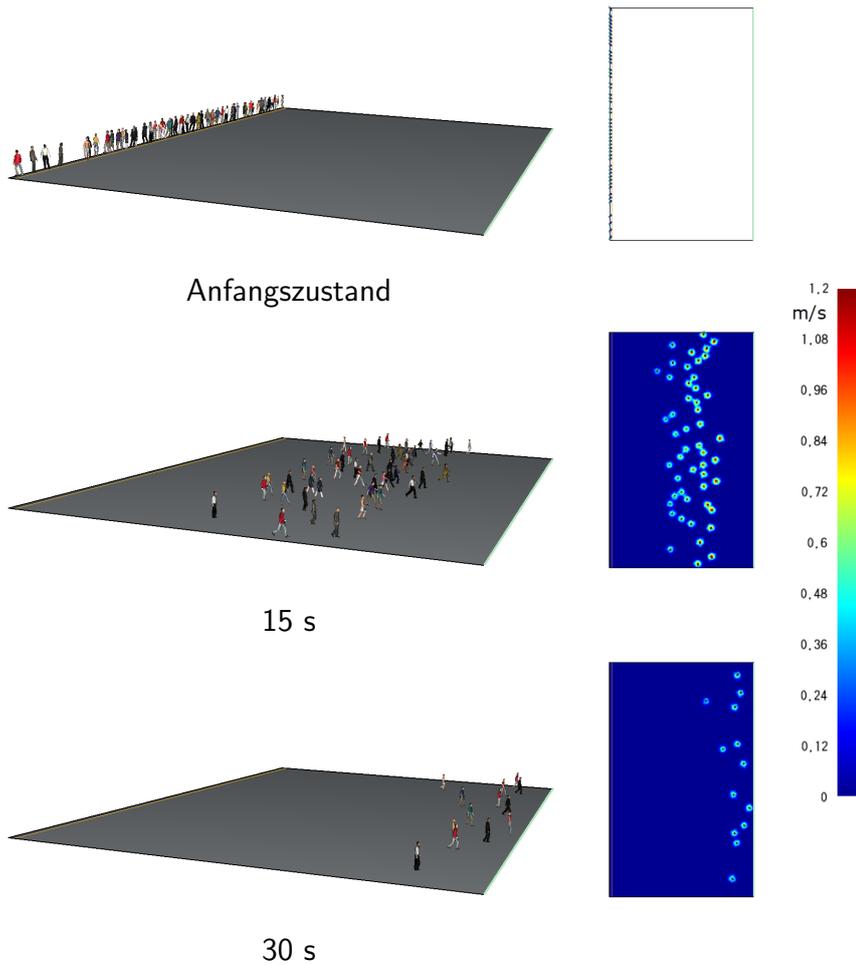


Bild 16: Test 7, Darstellung der Simulation mit normalverteilter Geschwindigkeit zu unterschiedlichen Zeitpunkten (0; 15 und 30 s). Links: Ansicht, rechts: Draufsicht mit Geschwindigkeitskontur.

3 Funktionelle Verifizierung - Test 8 bis 15

3.1 Ziel der funktionellen Tests (A3)

Die Überprüfung der Komponenten soll zeigen, daß die verschiedenen Komponenten der Software wie vorgesehen funktionieren. Das schließt die Durchführung einer Reihe elementarer Testfälle ein, um sicherzustellen, daß die wichtigsten Bestandteile des Modells wie beabsichtigt funktionieren. Die folgende Liste ist eine nicht erschöpfende Aufzählung vorgeschlagener Tests, die in den Verifizierungsprozeß eingeschlossen werden sollen.

3.2 Parameteranalyse (Test 8)

3.2.1 Modellgeometrie und untersuchte Eingangsparameter

Die Parameteranalyse im Test 8 dient dazu, die Auswirkungen der in der Simulation verwendeten Parameter darzustellen. Für den vorgegebenen dreistöckigen Testgrundriß (Bild 17) soll aufgezeigt werden, wie sich die Gesamtentfluchtungsdauer verändert, wenn die einzelnen Personenparameter variiert werden.

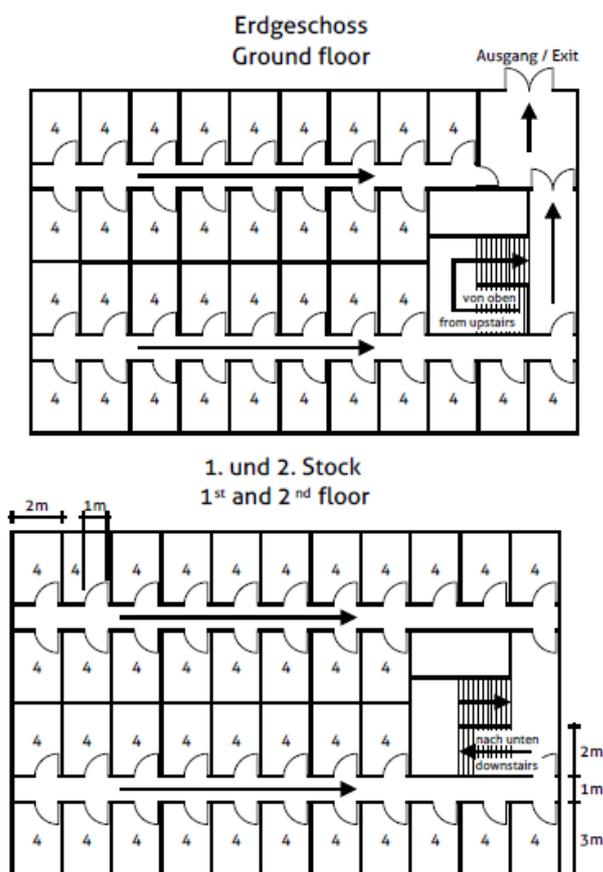


Bild 17: Test 8, Darstellung der Aufgabenstellung eines dreigeschossigen Gebäudes



Bild 18: Test 8, Darstellung des Pathfinder-Modells mit 448 Personen zum Startzeitpunkt ($t = 0$ s)

In Pathfinder können die folgenden personenbezogenen Parameter verändert werden [3]:

- Gehgeschwindigkeit: die maximale Geschwindigkeit, die eine Person in einem freien Raum erreichen kann,
- Geschwindigkeitsfaktor auf Treppen: der Bruchteil der eingestellten Gehgeschwindigkeit, den eine Person auf einer Treppe maximal erreichen kann,
- Schulterbreite: Durchmesser der Grundfläche einer Person. Personen werden in Pathfinder als Zylinder abgebildet.
- Reduktionsfaktor: Bruchteil, auf den die Schulterbreite einer Person kurzzeitig in Engstellen (z.B. Durchgängen) reduziert werden kann,
- Laufzeit durch den aktuellen Raum: Kostenfaktor zur Gewichtung der Länge des Weges zu einer Tür im aktuellen Raum,
- Stauzeit im aktuellen Raum: Kostenfaktor zur Gewichtung von Staus vor einer Tür im aktuellen Raum,
- Faktor für verbleibende Evakuierungszeit: Kostenfaktor zur Gewichtung der Länge des Weges bis zum Ausgang aus dem Gebäude oder bis zum nächsten definierten Ziel,
- Präferenz für die aktuelle Tür: Faktor zur Beeinflussung des Wechsels der gewählten Tür im aktuellen Raum, welcher verhindern soll, daß die Türen übermäßig oft

gewechselt werden (0 % = freier unbeschränkter Türwechsel; 100 % = die einmal gewählte Tür wird immer beibehalten),

- Abstandsfaktor im aktuellen Raum: Faktor zur Berücksichtigung der Ermüdung; ist die gewählte Länge des Abstandsfaktors bereits von einer Person im aktuellen Raum zurückgelegt worden, so bevorzugt diese Person bei allen weiteren Wegentscheidungen im aktuellen Raum kürzere Entfernungen gegenüber kürzeren Wartezeiten,
- Beschleunigungszeit: Zeit, die eine Person benötigt, um aus dem Stand ihre maximale Gehgeschwindigkeit zu erreichen,
- Dauer des Beibehaltens der Priorität: Zeitdauer, während der eine Person eine höhere Priorität erhält, um einen Bewegungskonflikt zu lösen,
- Reaktionszeit bei Kollisionen: Multipliziert mit der aktuellen Geschwindigkeit einer Person, wird mit diesem Parameter derjenige Abstand bestimmt, ab welchem eine Person auf andere Personen reagiert, wenn sich diese auf Kollisionskurs befinden,
- Langsamkeitsfaktor: Bruchteil der Gehgeschwindigkeit, ab der eine Person als langsam gilt. Langsame Personen prüfen in jedem Rechenschritt neue Wegoptionen,
- Wandabstand: minimaler Abstand, den Personen zu Bauteilen oder Hindernissen (z.B. Wänden, Stützen, Tischen) einzuhalten versuchen,
- Komfortabstand: minimaler Abstand, den Personen zu anderen Personen einzuhalten versuchen,
- Stau-Geschwindigkeit: Personen, die sich so oder langsamer bewegen, stehen im Stau. Die individuellen Einzel- und Gesamtstauzeiten werden von Pathfinder quantitativ zur Auswertung erfaßt.

In Tabelle 1 wird die Variation der einzelnen Parameter dargestellt.

Auswertung. Der Test 8 wurde mit 16 verschiedenen Personenparametern durchgeführt (siehe Tabelle 1). In jedem Testdurchgang wurden zuerst Simulationen mit den Parameterwerten in der Spalte 4 (Einzelwerte) durchgeführt. Danach wurde der gleiche Parameter allen Personen im Gebäude als gleichverteilte Variable mit einem minimalen und einem maximalen Wert entsprechend dem Wertebereich in Spalte 5 zugewiesen. In diesen Simulationen wurden die anderen Parameter auf dem in Spalte 3 angegebenen Standardwert belassen. Für die Parameter Reduktionsfaktor und Staugeschwindigkeit wurde keine Simulation mit gleichverteilten Werten durchgeführt.

Tabelle 1: Test 8, Parametervariation

Nr.	Eingabeparameter	Standardwert	Einzelwerte	Werte bei Gleichverteilung
01	Gehgeschwindigkeit/ Speed	1,19 m/s	0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,00 m/s	0,5 ... 2,0 m/s
02	Faktor für Gehgeschwindigkeit auf Treppen/ Speed Factor on Stairs	0,5	0,5; 0,75; 1,0	0,5 ... 1,0
03	Schulterbreite/ Diameter	44,75 cm	45; 50; 55 cm	40 ... 55 cm
04	Reduktionsfaktor/ Reduction Factor	0,7	0,6; 0,7; 0,8	–
05	Faktor für Laufzeit durch den aktuellen Raum/ Current Room Travel Time	1	0,5; 0,7; 0,8	0,5 ... 0,8
06	Faktor für Stauzeit im aktuellen Raum/ Current Room Queue Time	1	0,5; 0,7; 0,8	0,5 ... 0,8
07	Faktor für verbleibende Evakuierungszeit/ Global Travel Time	1	0,5; 0,7; 0,8	0,5 ... 0,8
08	Präferenz für die aktuelle Tür/ Current Door Preference	35 %	20, 35, 50 %	20 ... 50 %
09	Abstandsfaktor im aktuellen Raum/ Current Room Distance Penalty	35 m	0; 35; 70 m	0 ... 70 m
10	Beschleunigungszeit/ Acceleration Time	1,1 s	0,5; 1,1; 2,0 s	1,1 ... 2,0 s
11	Dauer des Beibehaltens der Priorität/ Persist Time	1,0 s	0,5; 1,0; 2,0 s	1,0 ... 2,0 s
12	Reaktionszeit bei Kollisionen/ Collision Response Time	1,5 s	1,0; 1,5; 2,0 s	1,5 ... 2,0 s
13	Langsamkeitsfaktor/ Slow Factor	0,1	0,05; 0,1; 0,25	0,1 ... 0,25
14	Wandabstand/ Wall Boundary Layer	0,15	0,1; 0,15; 0,2 m	0,1 ... 0,2 m
15	Komfortabstand/ Comfort Distance	0,08 m	0,05; 0,08; 0,1 m	0,05 ... 0,1 m
16	Stau-Geschwindigkeit/ Jam Velocity	0,25 m/s	0,1; 0,25; 0,4 m/s	–

3.2.2 Gehgeschwindigkeit/Speed

Die Entfluchtungszeit und die maximale Einzelstauzeit für die Varianten 1 bis 7 sind im Bild 19 grafisch dargestellt. Eine Erhöhung der maximalen ungehinderten Gehgeschwindigkeit führt zu einer Verkürzung der Evakuierungsdauer und zu kürzeren Stauzeiten. Dieses Ergebnis ist plausibel.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

Test 8, Vergleich der Varianten mit verschiedenen Geschwindigkeiten

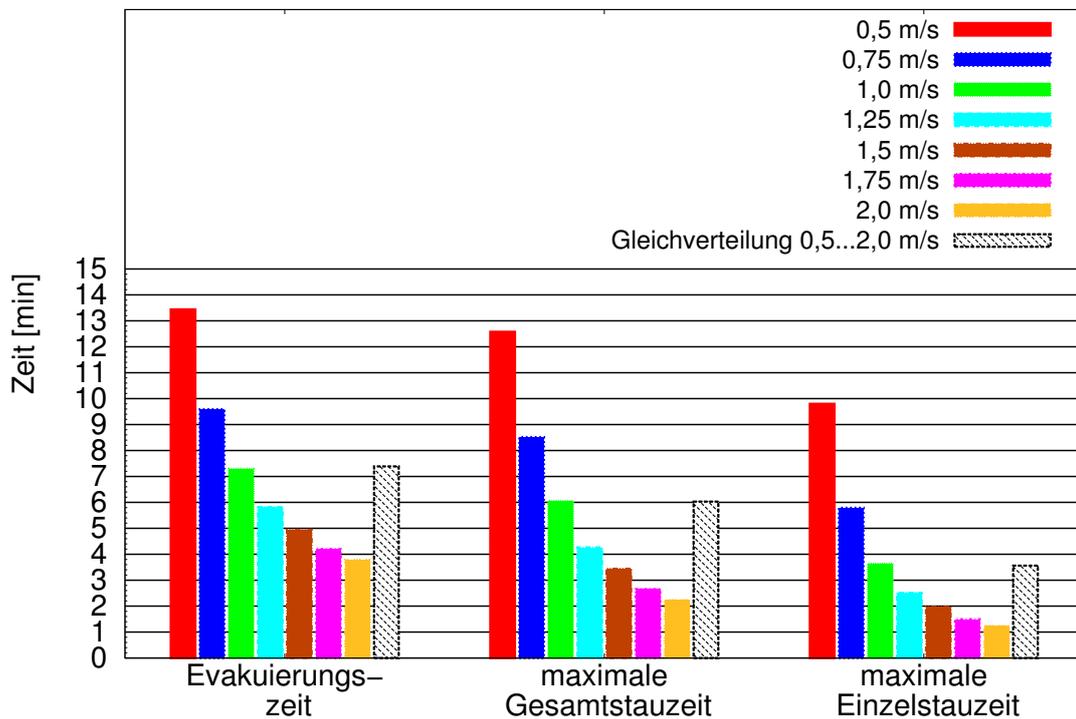


Bild 19: Test 8, Vergleich der Varianten mit verschiedenen Geschwindigkeiten: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.2.3 Faktor der Gehgeschwindigkeit auf Treppen/Speed Factor on Stairs

Die Entfluchtungszeit und die maximale Einzelstauzeit für die Varianten 1 bis 3 sind im Diagramm 20 grafisch dargestellt.

Wie erwartet, verkleinert sich die Evakuierungszeit mit wachsender Treppengeschwindigkeit deutlich. Der Einfluß dieses Parameters sinkt mit zunehmender Personendichte auf der Treppe, wenn dadurch nur noch Geschwindigkeiten unterhalb der maximalen Treppengeschwindigkeit möglich sind. Für Personen, die infolge hoher Dichte ohnehin deutlich langsamer gehen als maximal möglich, bewirkt die Einschränkung der Treppengeschwindigkeit keine Änderung ihrer Geschwindigkeit. Im untersuchten Fall bewegen sich die Personen auf den unteren Treppen annähernd mit Maximalgeschwindigkeit, so daß durch die Änderung der maximalen Treppengeschwindigkeit eine signifikante Änderung der Evakuierungs- und Stauzeiten eintritt. Dieses Verhalten ist plausibel.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

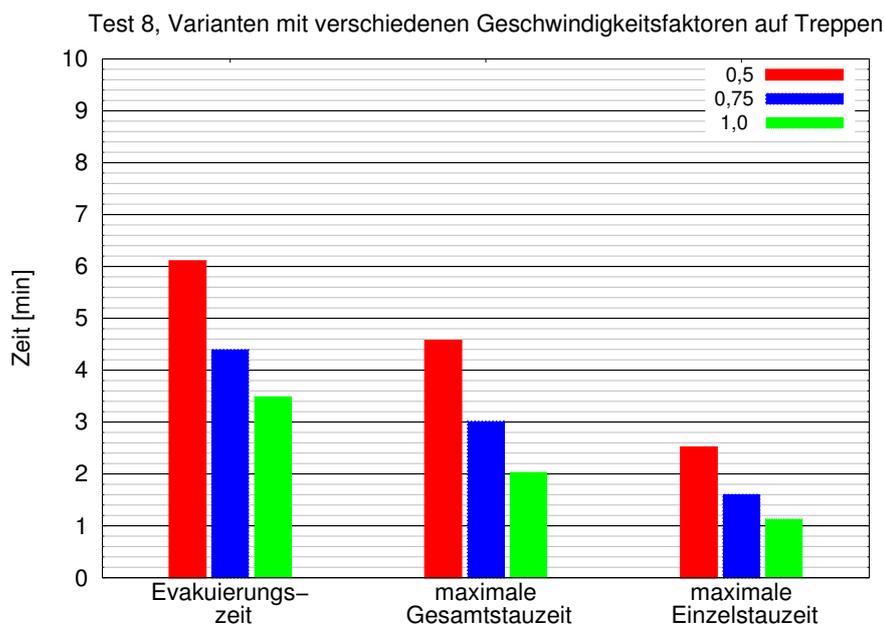


Bild 20: Test 8, Vergleich der Varianten mit verschiedenen Geschwindigkeitsfaktoren auf Treppen: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.2.4 Schulterbreite/Diameter

Personen werden in Pathfinder als Zylinder abgebildet. Der Durchmesser des Zylinders wird entsprechend der Schulterbreite eingestellt. Aufgrund der Stauereignisse beim Test 8 ist die Schulterbreite hier ein Parameter mit signifikantem Einfluß auf das Ergebnis. Die Schulterbreite beeinflusst die Personendichte im Modell, weil sich bei größerer Schulterbreite weniger Personen auf der gleichen Fläche bewegen können, die Dichte wird dann also kleiner. Die Geschwindigkeit der Personen wird entsprechend der Personendichte in ihrer Umgebung verändert: Bei kleinerer Personendichte ist die Geschwindigkeit größer. In der Simulation für den Test 8 war die Staugeschwindigkeit auf den Standardwert von 0,25 m/s eingestellt. Diese Geschwindigkeit wurde bei einer Schulterbreite von 45 cm von mehr Personen unterschritten als bei größeren Schulterbreiten. Das geht auch aus den Konturen der Personendichte im Bild 22 hervor. Deshalb werden in den Ergebnissen die maximalen Gesamt- und Einzelstauzeiten mit wachsender Schulterbreite kleiner. Diese Ergebnisse entsprechen somit den Erwartungen.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

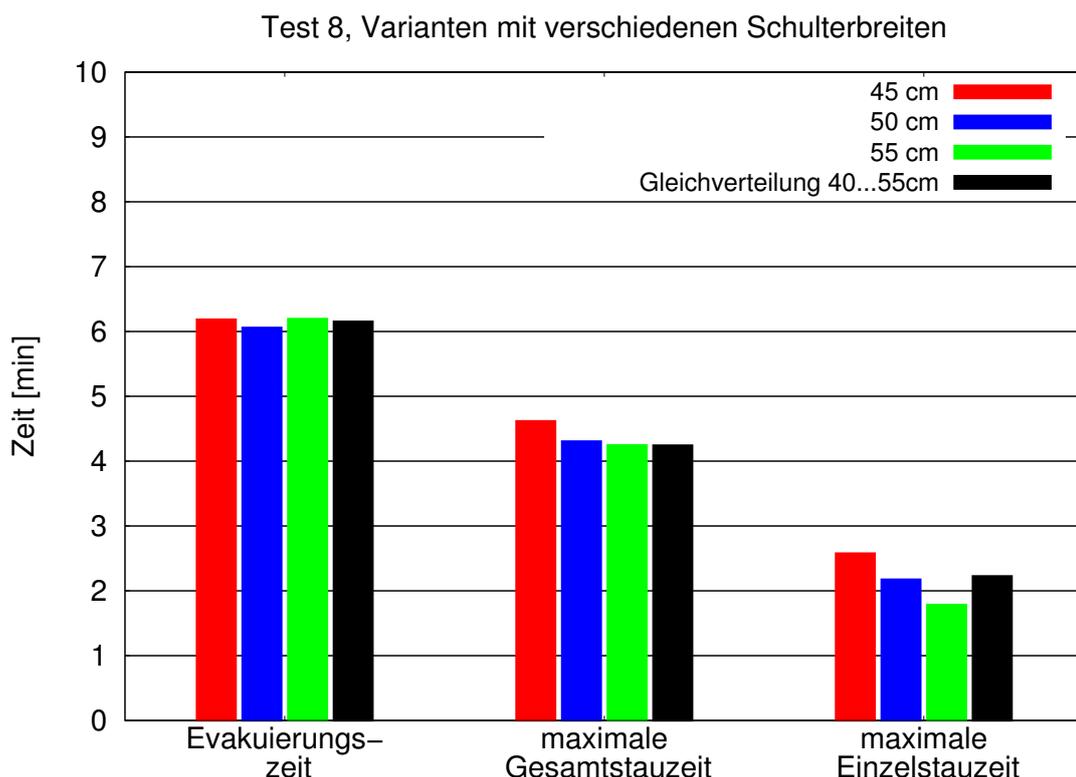


Bild 21: Test 8, Vergleich der Varianten mit verschiedenen Schulterbreiten: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

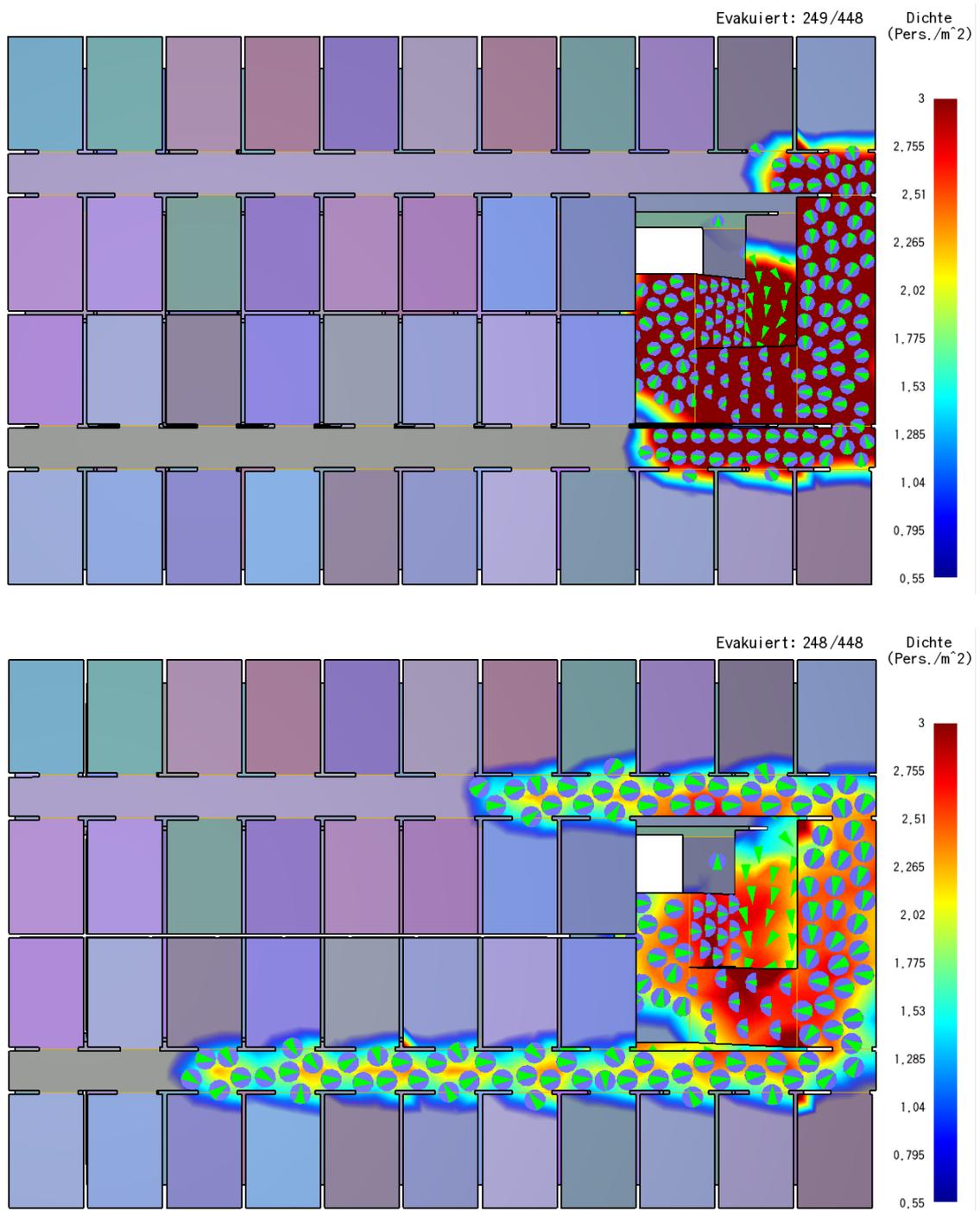


Bild 22: Test 8, Variation der Schulterbreite: Vergleich der Personendichte nach 150 Sekunden für die Variante mit 45 cm Schulterbreite (oben) und mit 55 cm Schulterbreite (unten)

3.2.5 Reduktionsfaktor/Reduction Factor

An Engstellen und im Stau kann eine Person ihren Durchmesser um diesen Faktor reduzieren, um an anderen vorbeizugehen und damit Bewegungskonflikte zu lösen, vgl. Bild 30, S. 38. Der Einfluß dieses Parameters hängt von der Art und Anzahl der auftretenden Bewegungskonflikte ab, die u.a. vom geometrischen Verhältnis von Standard-Schulterbreite und Fluchtwegbreite beeinflusst werden. Weil beim Test 8 aufgrund der Fluchtweg-Geometrie Bewegungskonflikte nur selten auftreten, hat dieser Parameter hier kaum einen Einfluß. Außerdem kann dieser Parameter wegen der biologischen Grenzen nur in einem relativ kleinen Bereich schwanken. Die Ergebnisse entsprechen somit den Erwartungen.

Zum Nachweis der korrekten Abbildung dieses Parameters im Modell ist der Test 8 nicht gut geeignet.

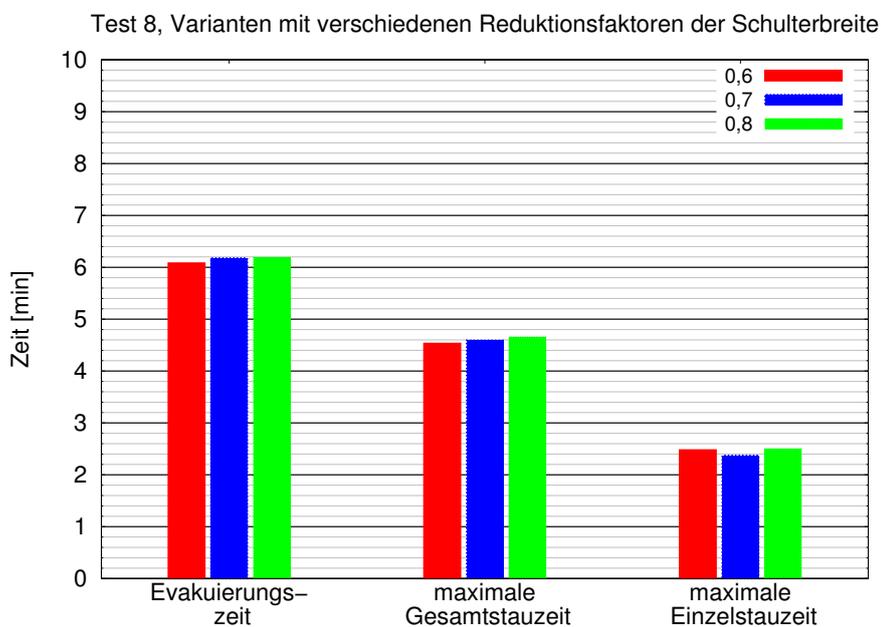


Bild 23: Test 8, Vergleich der Varianten mit verschiedenen Reduktionsfaktoren der Schulterbreite: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.2.6 Faktor für Laufzeit durch den aktuellen Raum/Current Room Travel Time

Die „Current Room Travel Time“ ist ein Kostenfaktor zur Gewichtung der Länge des Weges zu einer Tür im aktuellen Raum. Dieser Parameter ist von Bedeutung, wenn Personen sich an ihrer aktuellen Position für mehrere mögliche Ausgänge aus dem Raum entscheiden können. Höhere Werte bewirken, daß die Gewichtung der Entfernung zu einer Tür gegenüber den anderen Parametern zur Ermittlung des besten Fluchtweges (wie z.B. vorhandener Stau an der Tür), erhöht wird.

Weil beim Test 8 nur ein Ausgang und ein Treppenraum vorhanden sind, hat dieser Parameter hier keinen Einfluß. Die Ergebnisse entsprechen somit den Erwartungen.

Zum Nachweis der korrekten Abbildung dieses Parameters im Modell ist der Test 8 nicht geeignet.

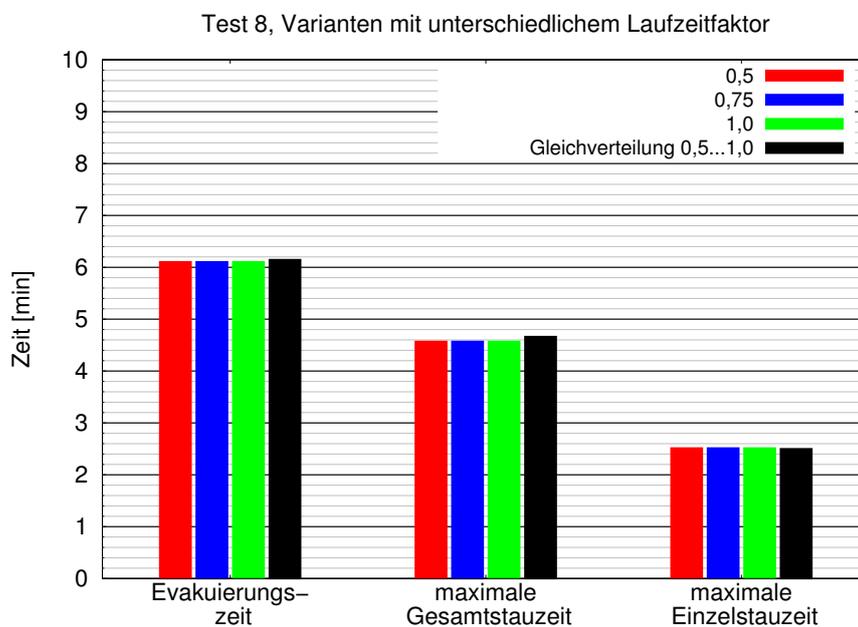


Bild 24: Test 8, Vergleich der Varianten mit unterschiedlichem Laufzeitfaktor: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.2.7 Faktor für Stauzeit im aktuellen Raum/Current Room Queue Time

Der Faktor für Stauzeit im aktuellen Raum ist ein Faktor zur Gewichtung von Staus vor einer Tür im aktuellen Raum. Dieser Parameter ist von Bedeutung, wenn Personen sich an ihrer aktuellen Position für mehrere mögliche Ausgänge aus dem Raum entscheiden können. Höhere Werte bewirken, daß die Gewichtung von Staus vor Türen des Raums gegenüber den anderen Parametern zur Ermittlung des besten Fluchtweges (wie z.B. der Entfernung zu einer Tür), erhöht wird.

Weil beim Test 8 nur ein Ausgang und ein Treppenraum vorhanden sind, hat dieser Parameter hier keinen Einfluß. Die Ergebnisse entsprechen somit den Erwartungen.

Zum Nachweis der korrekten Abbildung dieses Parameters im Modell ist der Test 8 nicht geeignet.

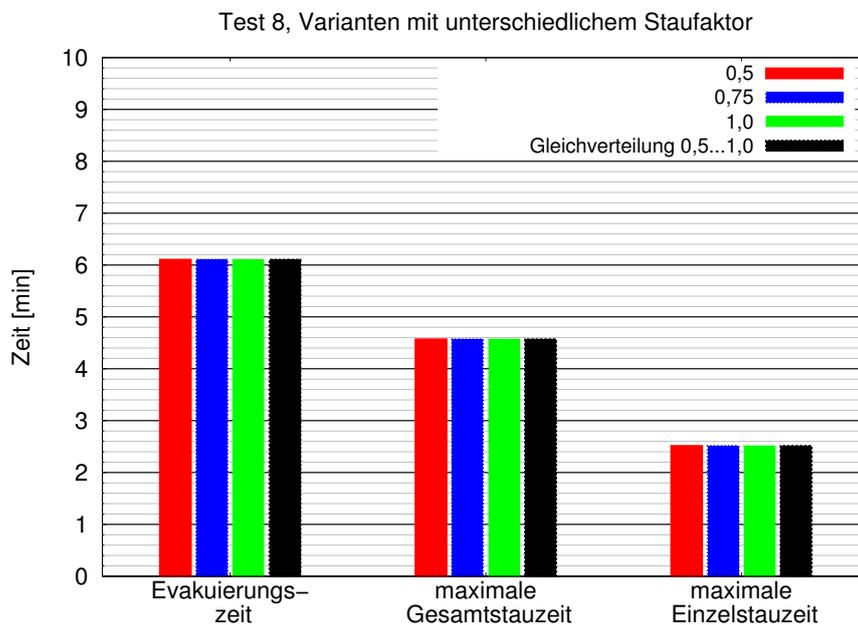


Bild 25: Test 8, Vergleich der Varianten mit unterschiedlichem Staufaktor: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.2.8 Faktor für verbleibende Evakuierungszeit/Global Travel Time

Der Faktor für verbleibende Evakuierungszeit ist ein Faktor zur Gewichtung der verbleibenden Evakuierungszeit für mehrere Türen des aktuellen Raums. Dieser Parameter ist von Bedeutung, wenn Personen sich an ihrer aktuellen Position für mehrere mögliche Ausgänge aus dem Raum entscheiden können. Höhere Werte bewirken, daß die Gewichtung der gesamten verbleibenden Evakuierungszeit, ermittelt für die verschiedenen Türen des Raums, gegenüber den anderen Parametern zur Ermittlung des besten Fluchtweges (wie z.B. der Entfernung zu einer Tür), erhöht wird.

Weil beim Test 8 nur ein Ausgang und ein Treppenraum vorhanden sind, hat dieser Parameter hier keinen Einfluß. Die Ergebnisse entsprechen somit den Erwartungen.

Zum Nachweis der korrekten Abbildung dieses Parameters im Modell ist der Test 8 nicht geeignet.

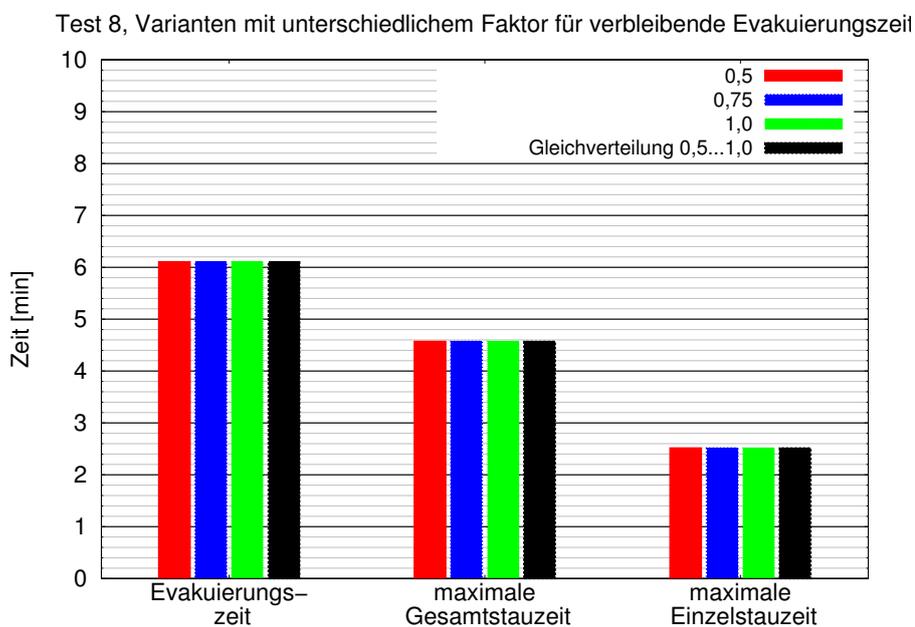


Bild 26: Test 8, Vergleich der Varianten mit unterschiedlichem Faktor für verbleibende Evakuierungszeit: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.2.9 Präferenz für die aktuelle Tür/Current Door Preference

Der Faktor „Präferenz für die aktuelle Tür“ ist ein Faktor zur Beeinflussung des Wechsels der gewählten Tür im aktuellen Raum, welcher verhindern soll, daß die Türen übermäßig oft gewechselt werden (0 % = freier unbeschränkter Türwechsel; 100 % = die einmal gewählte Tür wird immer beibehalten).

Dieser Parameter ist von Bedeutung, wenn Personen sich an ihrer aktuellen Position für mehrere mögliche Ausgänge aus dem Raum entscheiden können. Weil beim Test 8 nur ein Ausgang und ein Treppenraum vorhanden sind, hat dieser Parameter hier keinen Einfluß. Die Ergebnisse entsprechen somit den Erwartungen.

Zum Nachweis der korrekten Abbildung dieses Parameters im Modell ist der Test 8 nicht geeignet.

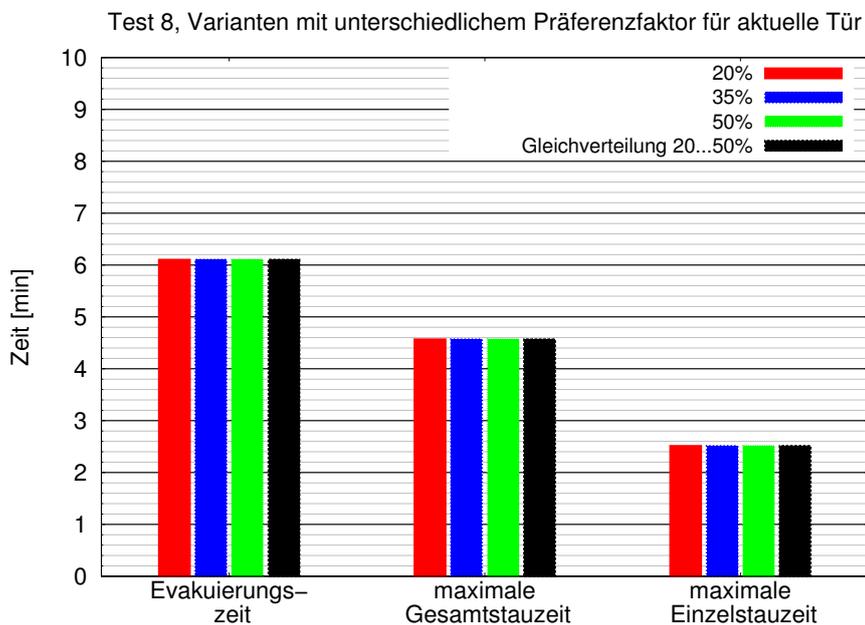


Bild 27: Test 8, Vergleich der Varianten mit unterschiedlichem Präferenzfaktor für aktuelle Tür: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.2.10 Abstandsfaktor im aktuellen Raum/Current Room Distance Penalty

Der Abstandsfaktor im aktuellen Raum ist ein Faktor zur Berücksichtigung der Ermüdung; ist die gewählte Länge des Abstandsfaktors bereits von einer Person im aktuellen Raum zurückgelegt worden, so bevorzugt diese Person bei allen weiteren Wegentscheidungen im aktuellen Raum kürzere Entfernungen gegenüber kürzeren Wartezeiten.

Dieser Parameter ist von Bedeutung, wenn Personen sich an ihrer aktuellen Position für mehrere mögliche Ausgänge aus dem Raum entscheiden können. Weil beim Test 8 nur ein Ausgang und ein Treppenraum vorhanden sind, hat dieser Parameter hier keinen Einfluß. Die Ergebnisse entsprechen somit den Erwartungen.

Zum Nachweis der korrekten Abbildung dieses Parameters im Modell ist der Test 8 nicht geeignet.

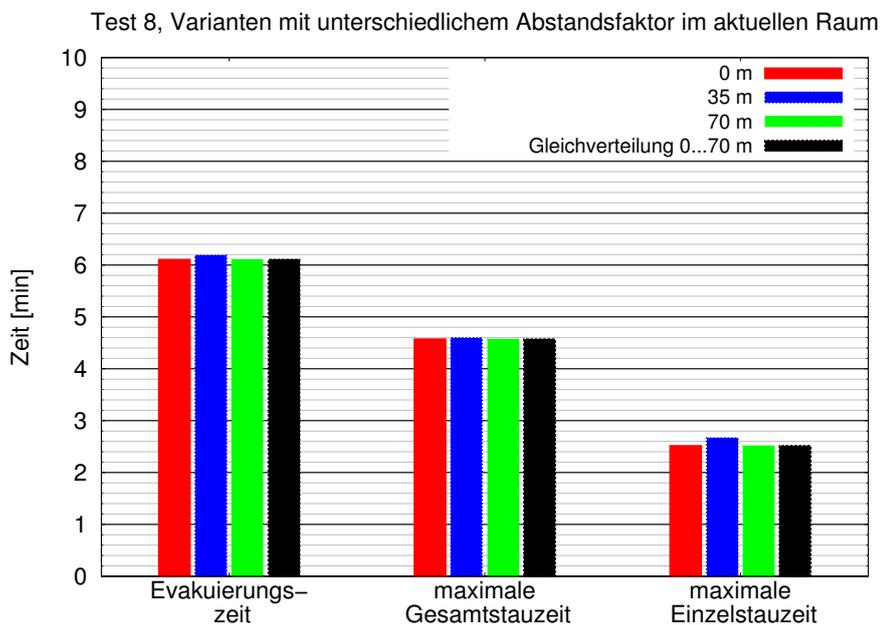


Bild 28: Test 8, Vergleich der Varianten mit unterschiedlichem Abstandsfaktor im aktuellen Raum: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.2.11 Beschleunigungszeit/Acceleration Time

Die Beschleunigungszeit ist die Zeitspanne, welche eine Person benötigt, um aus dem Stand ihre maximale Gehgeschwindigkeit zu erreichen oder von der maximalen Gehgeschwindigkeit zum Stehen zu kommen.

Dieser Parameter ist vor allem für solche Fälle von Bedeutung, in denen sich oft Staus bilden und wieder auflösen. Beim Test 8 ist das nicht der Fall: ein Stau bildet sich vor allem auf der Treppe vom 2. zum 1. Obergeschoß, und dieser Stau wird erst am Ende der Simulation aufgelöst.

Die Ergebnisse für die Einzelstauzeiten sind hier trotzdem abhängig von der Beschleunigungszeit. Das liegt daran, daß das Kriterium für einen Stau (Staugeschwindigkeit/Jam Velocity) bei schnellerer Beschleunigungszeit bei der Staubildung später erreicht und bei der Stau-Auflösung eher unterschritten wird als bei langsamen Beschleunigungszeiten. Die berechneten Ergebnisse sind plausibel.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

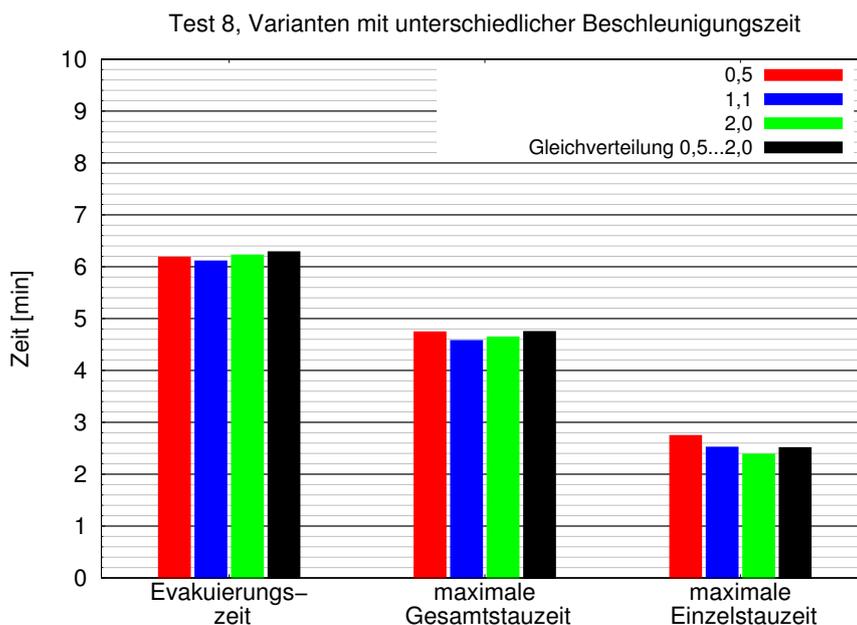
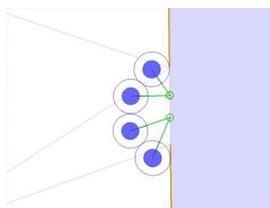


Bild 29: Test 8, Vergleich der Varianten mit unterschiedlicher Beschleunigungszeit: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

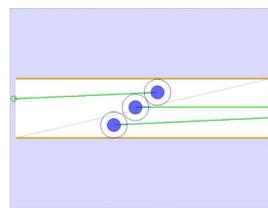
3.2.12 Dauer des Beibehaltens der Priorität/Persist Time

Die Dauer des Beibehaltens der Priorität ist die Zeit, während der eine Person eine höhere Priorität erhält, um einen Bewegungskonflikt zu lösen. Dieser Parameter ist von Bedeutung, wenn die Raumgeometrie Engstellen enthält, an denen zwei oder mehrere Personen in einen Bewegungskonflikt geraten können, z.B. Personen sich an ihrer aktuellen Position für mehrere mögliche Ausgänge aus dem Raum entscheiden können. Weil beim Test 8 aufgrund der Fluchtweg-Geometrie solche Konflikte nur selten auftreten, hat dieser Parameter hier kaum einen Einfluß. Die Ergebnisse entsprechen somit den Erwartungen.

Zum Nachweis der korrekten Abbildung dieses Parameters im Modell ist der Test 8 nicht gut geeignet.



Mehrere Personen versuchen einen ähnlichen Wegpunkt zu erreichen



Mehrere Personen versuchen, gegenüberliegende Wegpunkte zu erreichen

Bild 30: Beispiele für Bewegungskonflikte aus [2]

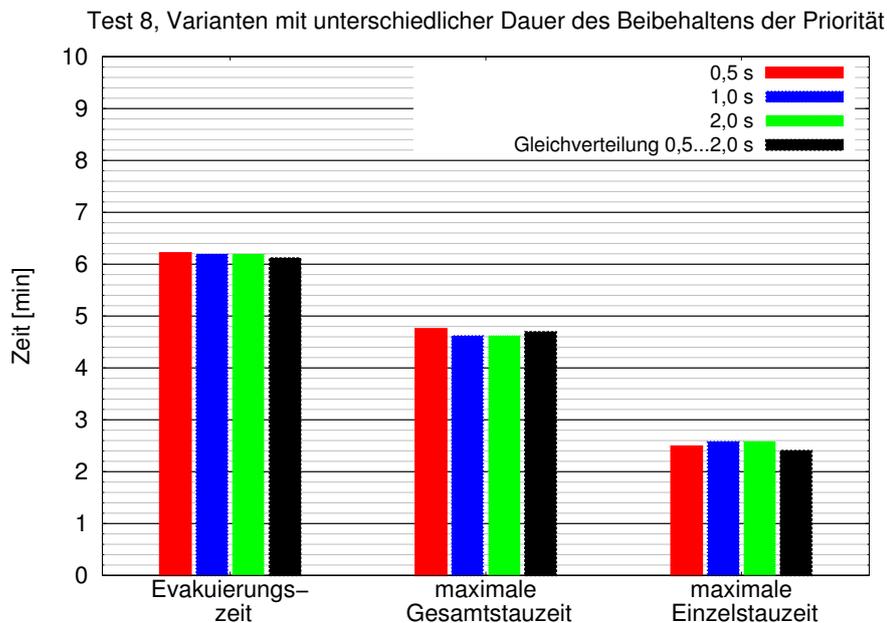


Bild 31: Test 8, Vergleich der Varianten mit unterschiedlicher Dauer des Beibehaltens der Priorität: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.2.13 Reaktionszeit bei Kollisionen/Collision Response Time

Dieser Parameter wird mit der aktuellen Geschwindigkeit einer Person multipliziert, um den Abstand zu bestimmen, ab welchem eine Person auf andere Personen reagiert, wenn sich diese auf Kollisionskurs befinden. Er hat demnach bei Situationen einen Einfluß, bei denen sich Personen in unterschiedlichen Richtungen oder mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in gleicher Richtung bewegen. Solche Situationen treten beim Test 8 kaum auf, weil es nur einen Fluchtweg gibt und weil im Testbeispiel allen Personen die gleiche maximale Gehgeschwindigkeit zugewiesen wurde. Die Ergebnisse entsprechen somit den Erwartungen.

Zum Nachweis der korrekten Abbildung dieses Parameters im Modell ist der Test 8 nicht gut geeignet.

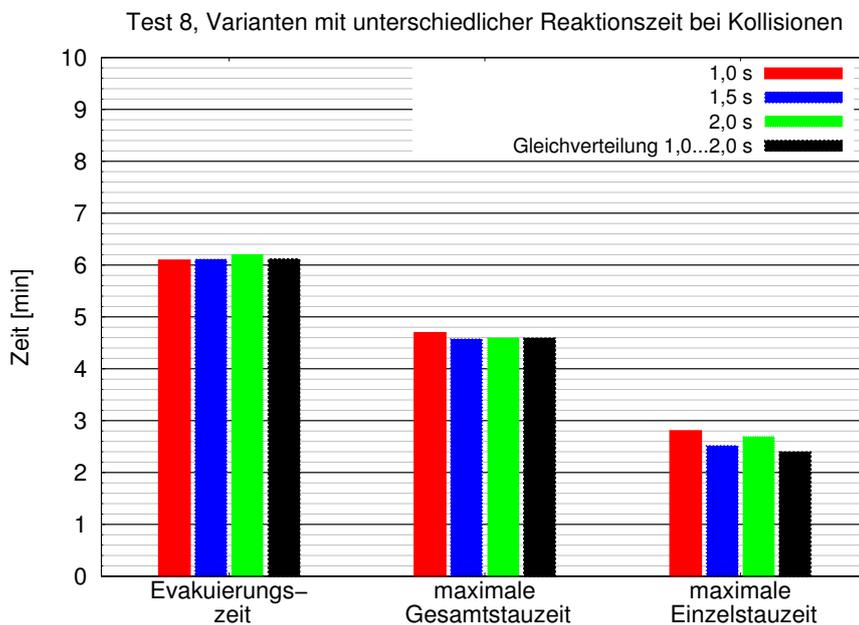


Bild 32: Test 8, Vergleich der Varianten mit unterschiedlicher Reaktionszeit bei Kollisionen: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.2.14 Langsamkeitsfaktor/Slow Factor

Der Langsamkeitsfaktor ist der Bruchteil der Gehgeschwindigkeit, ab dem eine Person als langsam gilt. Langsame Personen prüfen in jedem Rechenschritt neue Wegoptionen, auch Wege zurück, während schnellere Personen ihre Fluchtrichtung eher zielgerichtet beibehalten.

Dieser Parameter ist besonders von Bedeutung, wenn Personen sich an ihrer aktuellen Position für mehrere mögliche Ausgänge aus dem Raum entscheiden können. Weil beim Test 8 nur ein Ausgang und ein Treppenraum vorhanden sind, hat dieser Parameter hier kaum einen Einfluß. Die Ergebnisse entsprechen somit den Erwartungen.

Zum Nachweis der korrekten Abbildung dieses Parameters im Modell ist der Test 8 nicht geeignet.

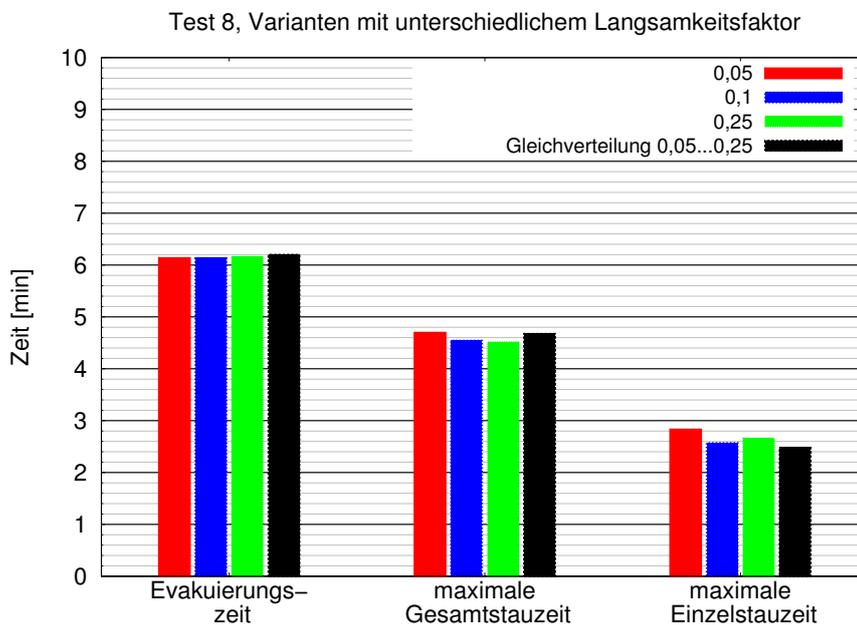


Bild 33: Test 8, Vergleich der Varianten mit unterschiedlichem Langsamkeitsfaktor: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.2.15 Wandabstand/Wall Boundary Layer

Der Wandabstand ist der minimale Abstand, den Personen zu Bauteilen oder Hindernissen (z.B. Wänden, Stützen, Tischen) einzuhalten versuchen. Beim Test 8 erhöhen sich die Evakuierungs- und Stauzeiten leicht mit wachsendem Wandabstand, der im Bereich zwischen 10 und 20 cm variiert wurde. Diese Ergebnisse entsprechen den Erwartungen, weil bei höherem Wandabstand die Fluchtwege eingengt werden.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

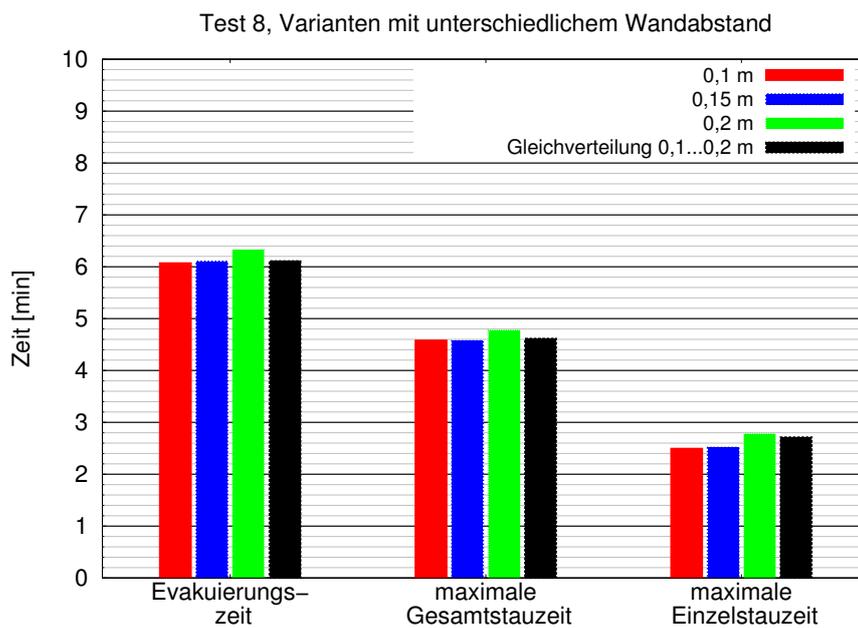


Bild 34: Test 8, Vergleich der Varianten mit unterschiedlichem Wandabstand: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.2.16 Komfortabstand/Comfort Distance

Der Komfortabstand ist der minimale Abstand, den Personen zu anderen Personen einzuhalten versuchen. Dieser Abstand beeinflusst die Personendichte im Modell, weil sich bei höherem Komfortabstand weniger Personen auf der gleichen Fläche bewegen, die Dichte wird dann also kleiner. Die Geschwindigkeit der Personen wird entsprechend der Personendichte in ihrer Umgebung verändert: Bei kleinerer Personendichte ist die Geschwindigkeit größer. Bei einem größeren Komfortabstand können sich Personen demnach schneller bewegen und erreichen seltener die Grenze zur Staugeschwindigkeit. Deshalb werden in den Ergebnissen die maximalen Gesamt- und Einzelstauzeiten mit wachsendem Komfortabstand kleiner. Diese Ergebnisse entsprechen somit den Erwartungen.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

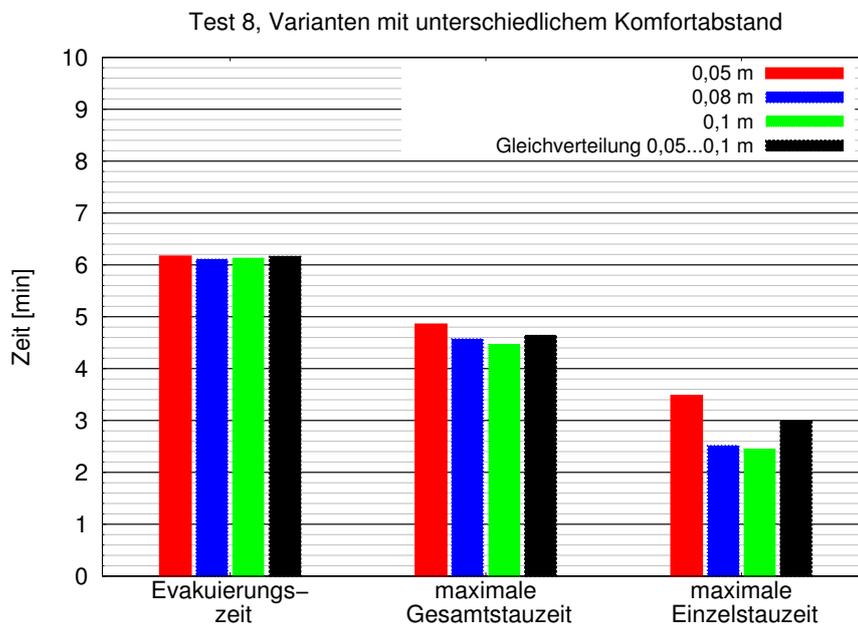


Bild 35: Test 8, Vergleich der Varianten mit unterschiedlichem Komfortabstand: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.2.17 Staugeschwindigkeit/Jam Velocity

Personen, die sich mit der Staugeschwindigkeit oder langsamer bewegen, stehen im Stau. Die individuellen Einzel- und Gesamtstauzeiten werden von Pathfinder quantitativ zur Auswertung erfaßt. Je nach Definition der Staugeschwindigkeit verändern sich die berechneten Einzel- und Gesamtstauzeiten: bei kleinerer Staugeschwindigkeit stehen weniger Personen im Stau, die Stauzeiten werden kürzer und umgekehrt. Dies ist bei der vorliegenden Testberechnung deutlich sichtbar. Die Evakuierungszeiten sind unabhängig von der Definition der Staugeschwindigkeit und verändern sich nicht.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

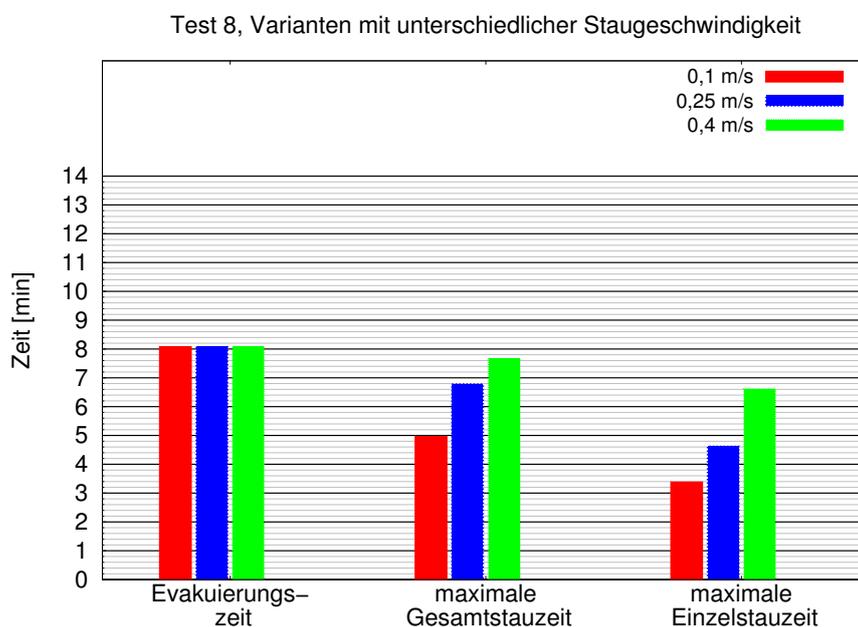


Bild 36: Test 8, Vergleich der Varianten mit unterschiedlicher Staugeschwindigkeit: Evakuierungszeit, maximale Gesamtstauzeit und maximale Einzelstauzeit

3.3 Menschenmenge in einem großen Raum (Test 9)

Der Test 9 dient dazu, die Auswirkungen von verringerten Ausgangsbreiten auf die Entfluchtungszeit darzustellen. Dafür sollen 1.000 Personen in einem öffentlichen Raum mit vier bzw. zwei Ausgängen verteilt werden.

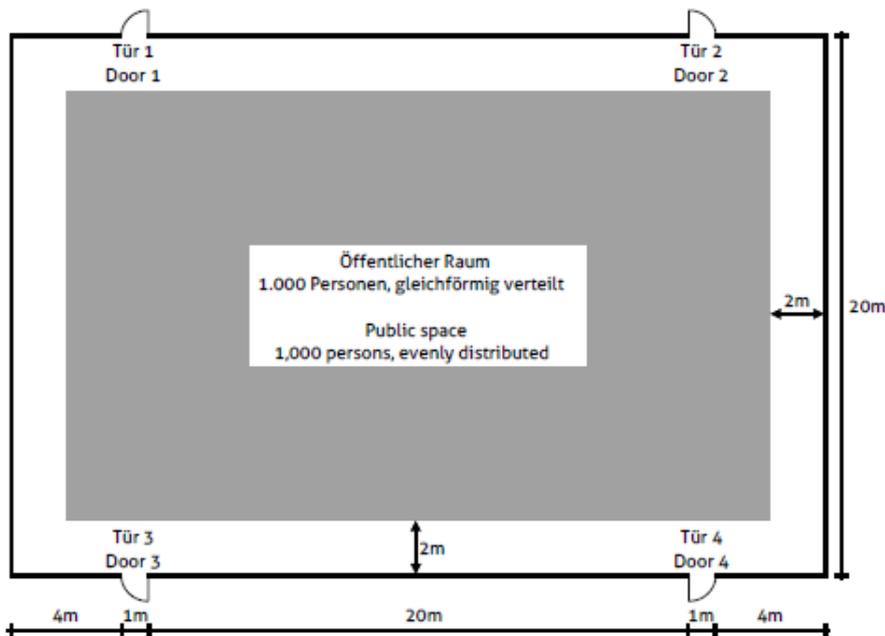


Bild 37: Test 9, Darstellung der Aufgabenstellung mit einem Raum, zwei bzw. vier Ausgängen und 1.000 Agenten

Auswertung. Die Zeit, bis der Raum mit nur zwei offenen Türen geräumt ist, erhöht sich um 186 s im Vergleich zur Simulation mit vier geöffneten Ausgängen. Die Entfluchtungszeit für die Variante 2 mit zwei statt vier geöffneten Ausgangstüren ist mit 378 s nahezu verdoppelt gegenüber der Variante 1 mit vier Ausgangstüren und einer Evakuierungszeit von 192 s. Das Ergebnis wurde im Bild 44 grafisch dargestellt.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

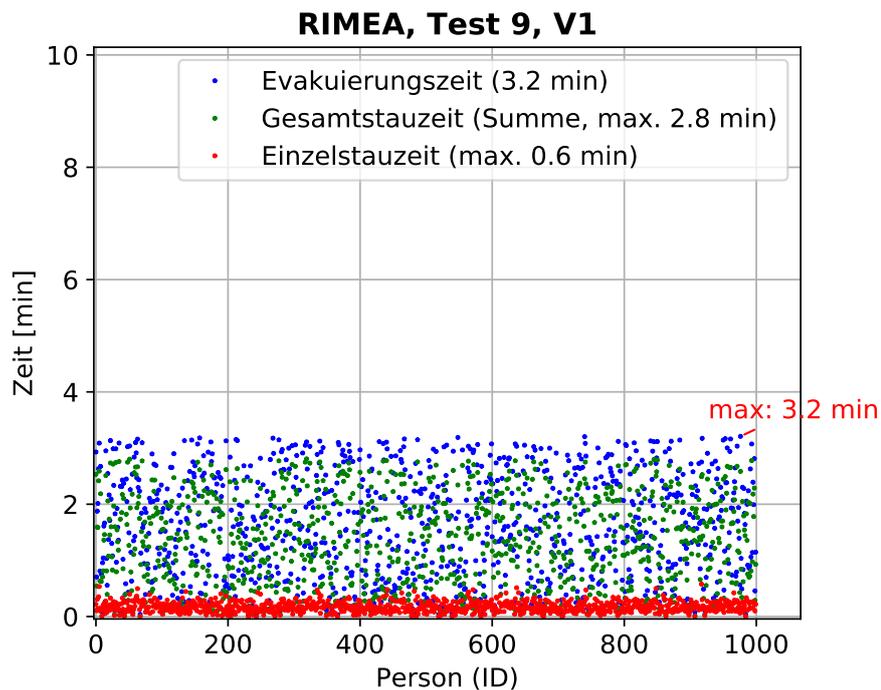


Bild 38: Test 9, Diagramm über die Evakuierungszeiten sowie die Stauzeiten, Variante 1 mit 4 geöffneten Türen

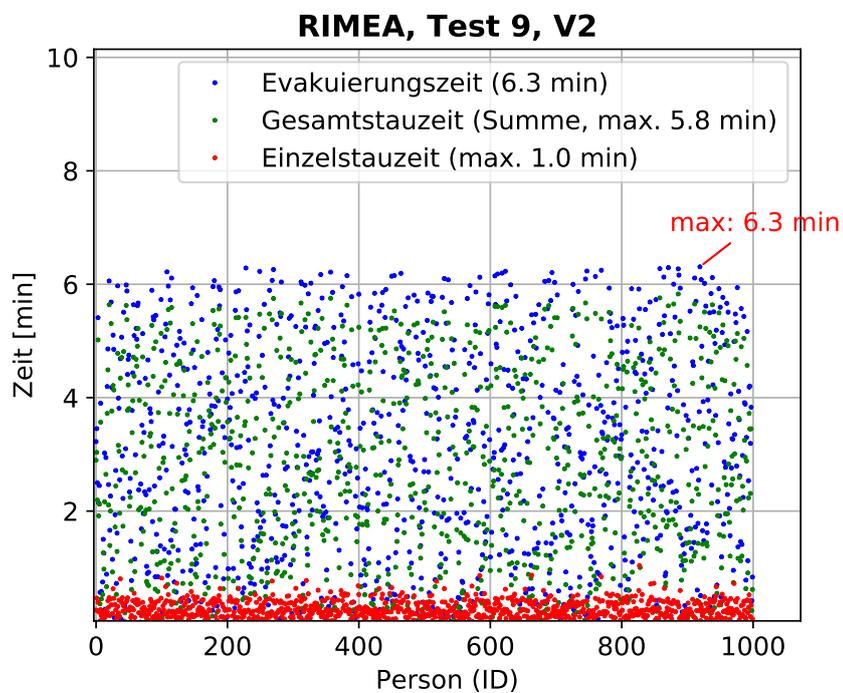


Bild 39: Test 9, Diagramm über die Evakuierungszeiten sowie die Stauzeiten, Variante 2 mit 2 geöffneten Türen

Klassierung der maximalen Einzelstauzeiten (ESZ)

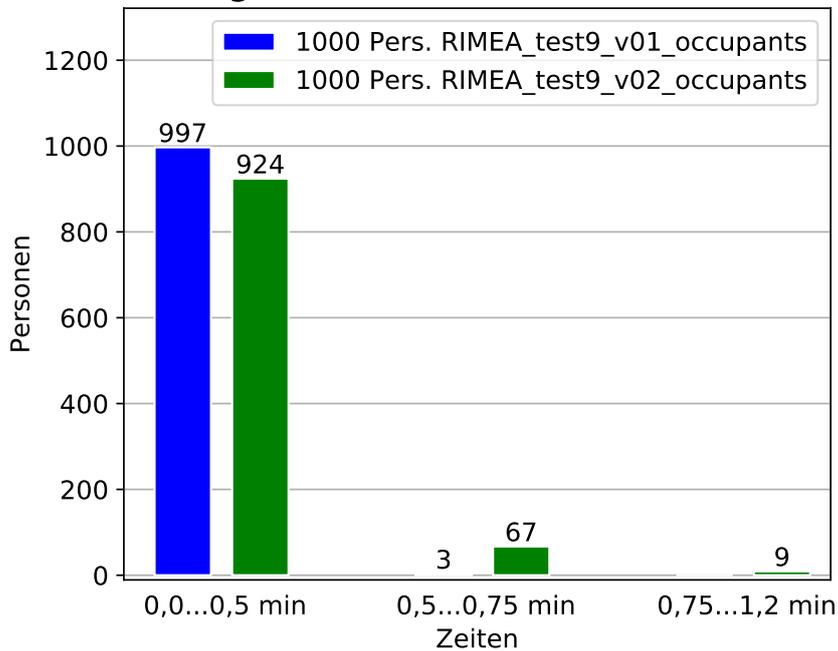


Bild 40: Test 9, Diagramm über die Klassierung der Stauzeiten, Vergleich der Varianten 1 und 2

RIMEA, Test 9, Vergleich

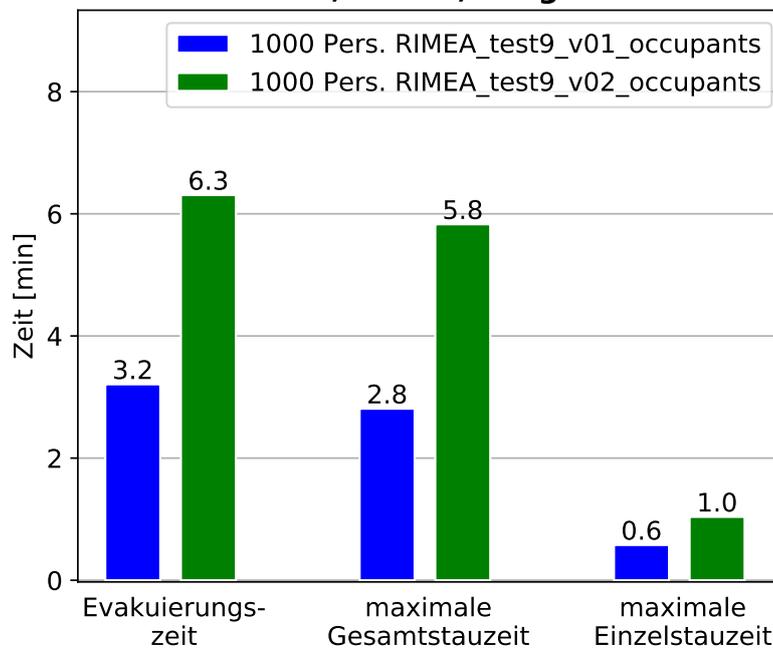
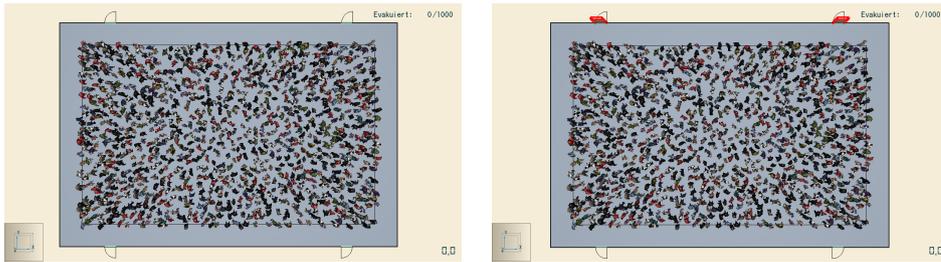
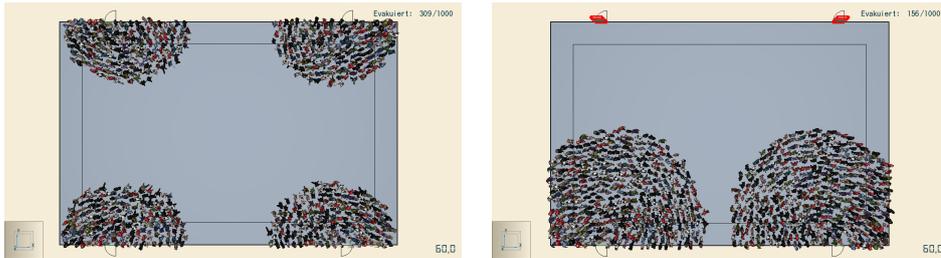


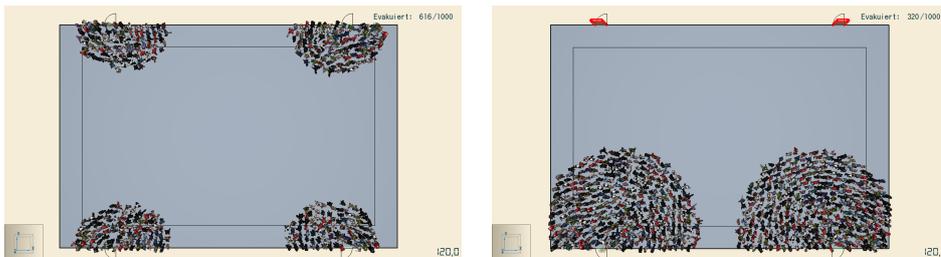
Bild 41: Test 9, Diagramm über den Vergleich der Stauzeiten zwischen den Varianten 1 und 2



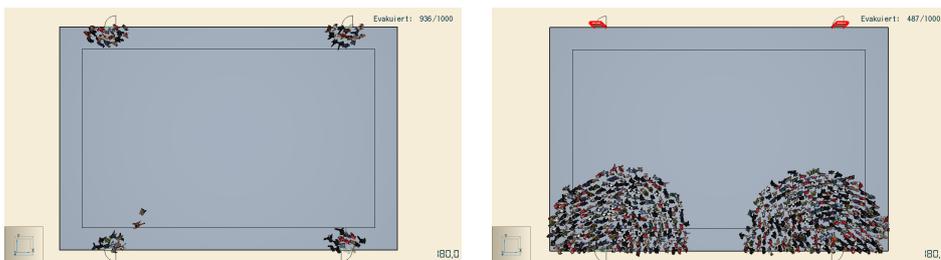
Zeitpunkt 0 s: vier Türen (links) und zwei Türen (rechts)



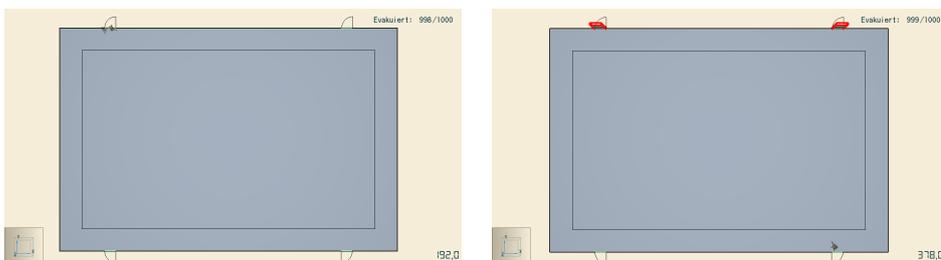
Zeitpunkt 60 s



Zeitpunkt 120 s



Zeitpunkt 180 s



Die letzte Person verläßt den Raum: 192 s (links) und 378 s (rechts)

Bild 42: Test 9, Darstellung des Pathfinder-Modells eines Raumes mit 1000 Personen und vier Notausgangstüren (links) und mit zwei Notausgangstüren (rechts) zu unterschiedlichen Zeitpunkten

3.4 Zuweisung von Rettungswegen (Test 10)

Der Test 10 soll überprüfen, ob die Agenten zu den ihnen explizit zugewiesenen Ausgängen laufen.

Dafür sollen 10 Räume über einen Gang verbunden werden, welcher zu zwei verschiedenen Ausgängen führt. Die Personen in den Räumen 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 und 10 sind dem Hauptausgang zugewiesen, alle übrigen Personen dem sekundären Ausgang an der Seite.

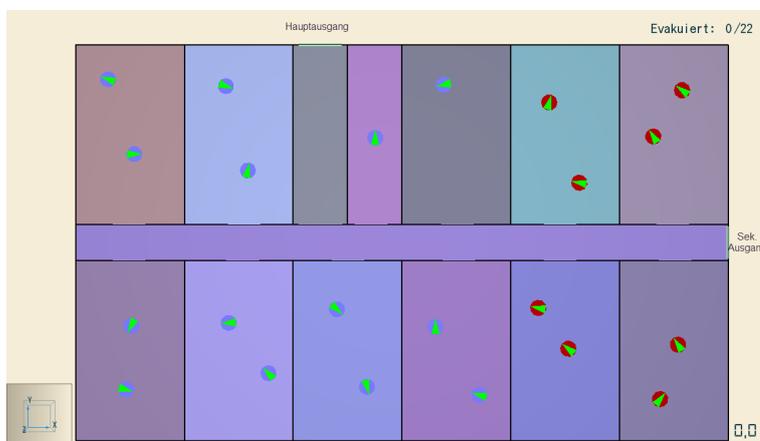
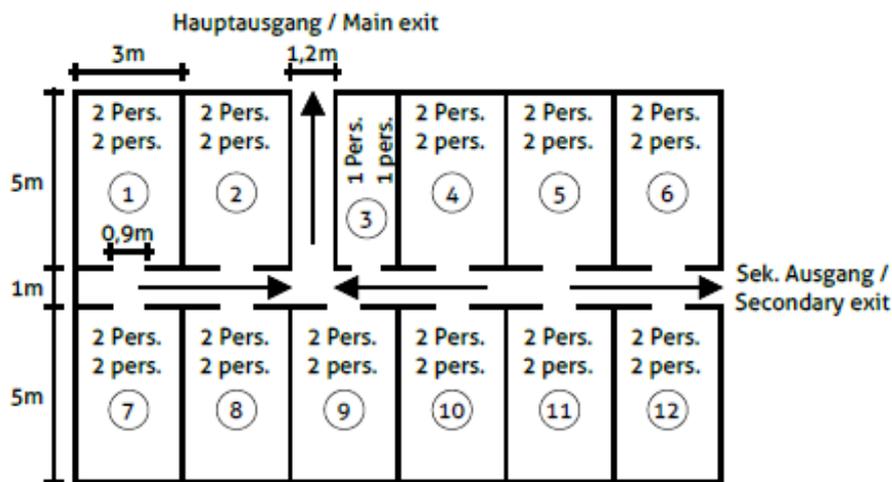


Bild 43: Test 10, Darstellung der Aufgabenstellung und des Pathfinder-Modells mit 10 Räumen, 22 Agenten und zwei Ausgängen. Die blauen Agenten sind dem Hauptausgang und die roten Agenten sind dem Nebenausgang zugeordnet.

Auswertung. Die blauen Agenten laufen direkt zum Hauptausgang und die roten zum Nebenausgang. Sie benutzen also die ihnen vorgegebenen Ausgänge. Das Ergebnis wurde im Bild 44 grafisch dargestellt.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

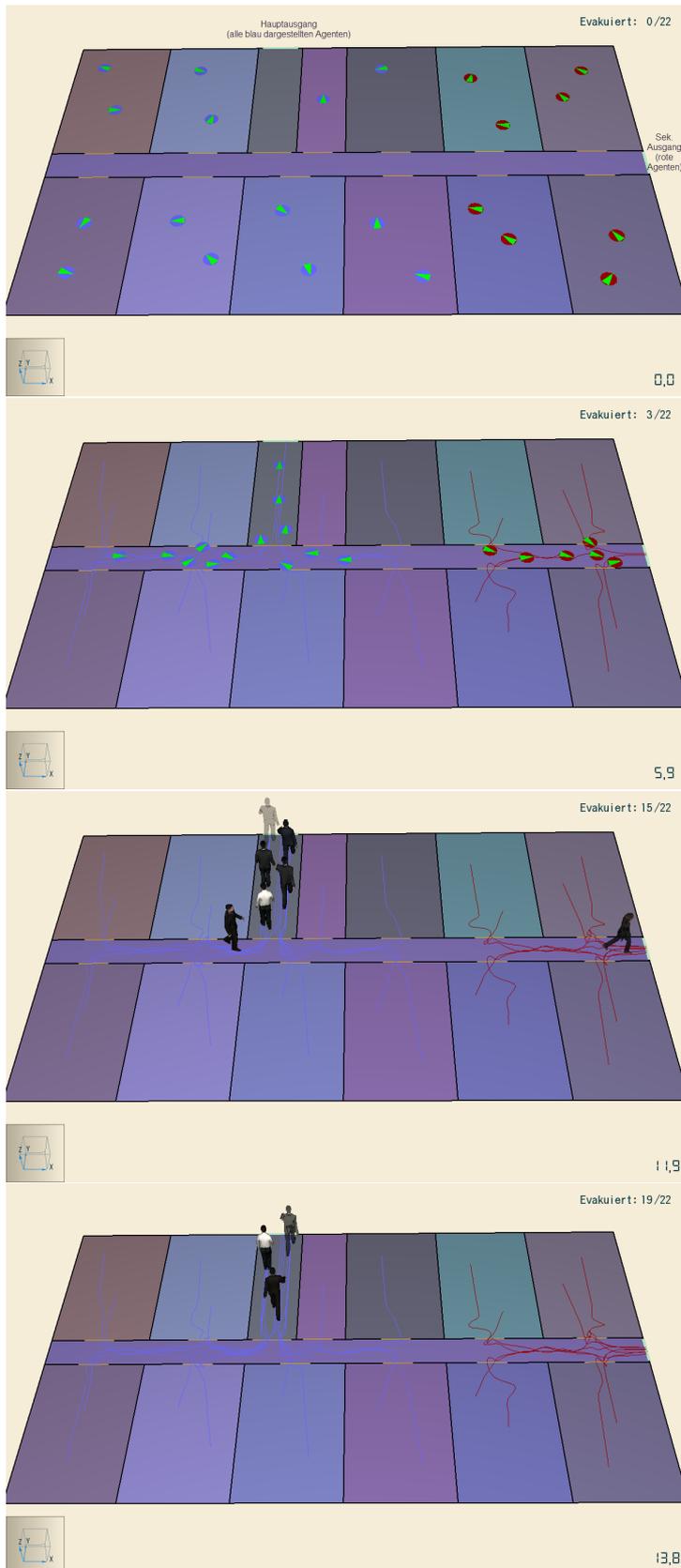


Bild 44: Test 10, Darstellung des Pathfinder-Modells mit den Laufwegen zu unterschiedlichen Zeitpunkten, die blauen Agenten sind dem Hauptausgang und die roten Agenten sind dem Nebenausgang zugeordnet

3.5 Wahl des Rettungsweges (Test 11)

Der Test 11 soll überprüfen, ob die Agenten nicht nur den näheren Ausgang 1, sondern aufgrund des Staus vor diesem Ausgang auch den weiter entfernten Ausgang 2 verwenden.

Dafür soll ein Raum mit 1.000 Agenten besetzt werden und dieser Raum soll über zwei benachbarte Ausgänge verfügen (siehe Bild 45).

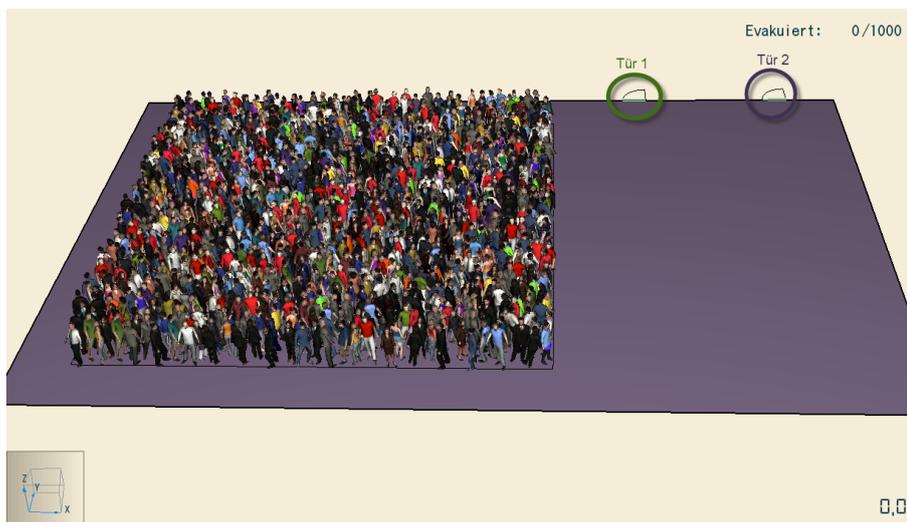
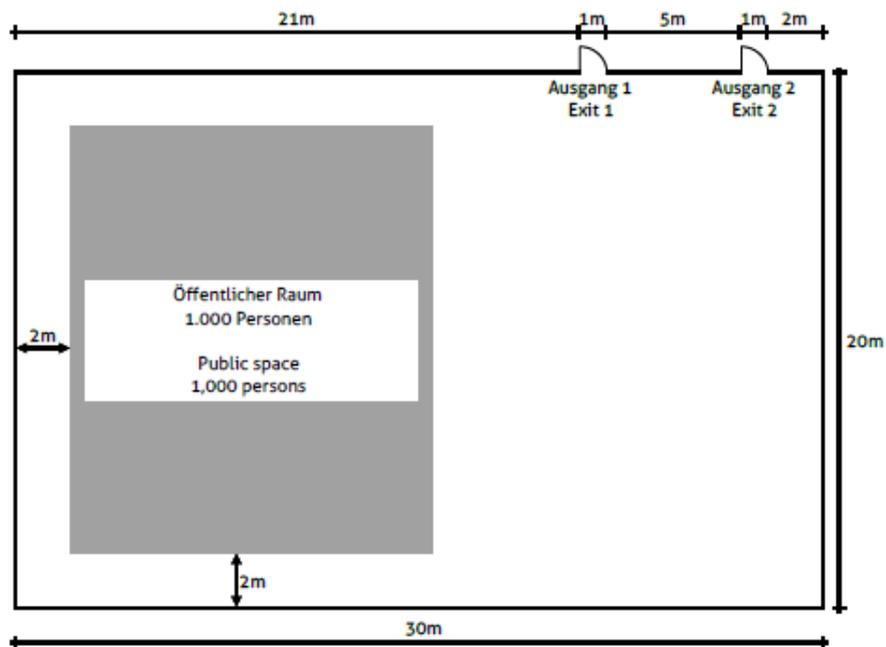


Bild 45: Test 11, Darstellung der Aufgabenstellung und des Pathfinder-Modells mit einem Raum und zwei benachbarten Ausgängen

Das erwartete Ergebnis ist, daß die Personen den näheren Ausgang 1 zwar bevorzugen und in diesem Bereich Stauungen auftreten, jedoch einzelne Personen auch den alternativen Ausgang 2 benutzen.

Auswertung. Die Agenten laufen direkt zu beiden Ausgängen, welche auch im Laufe der Simulation gleichmäßig benutzt werden. Im Diagramm 46 wird die Durchflußrate durch die beiden Ausgangstüren dargestellt. Die Räumung des Raums erfolgt gleichmäßig, sie ist auszugsweise grafisch im Bild 47 zu sehen.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

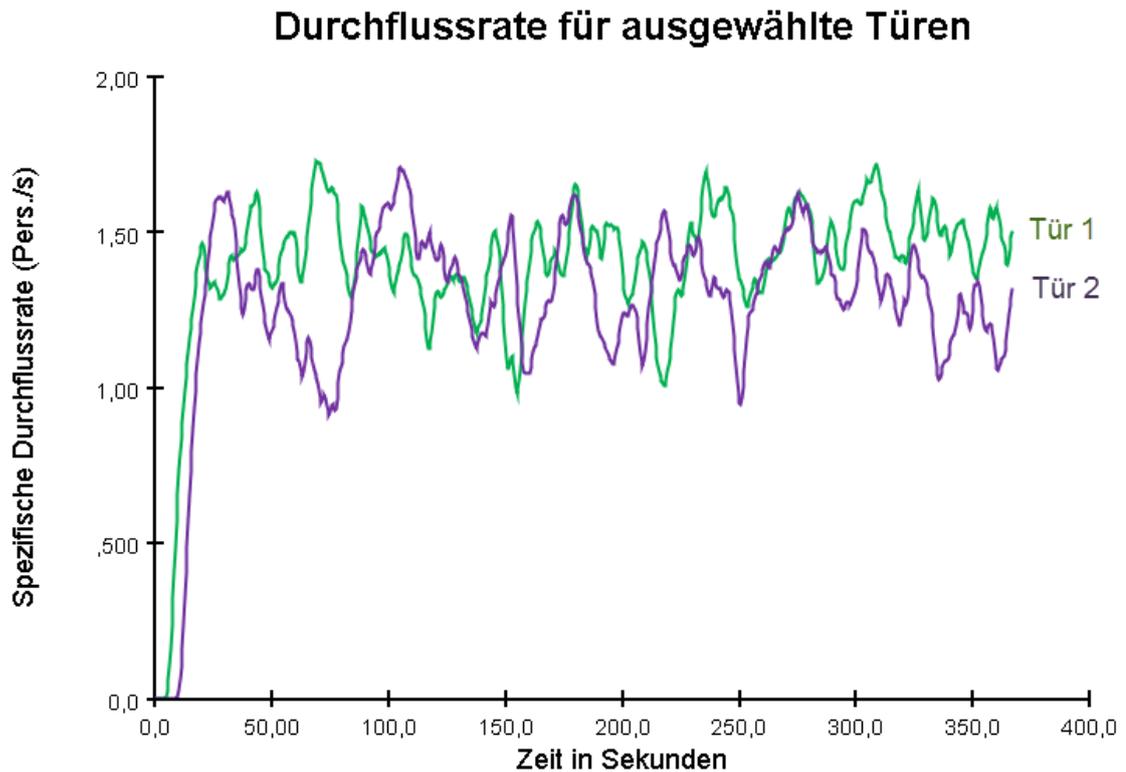
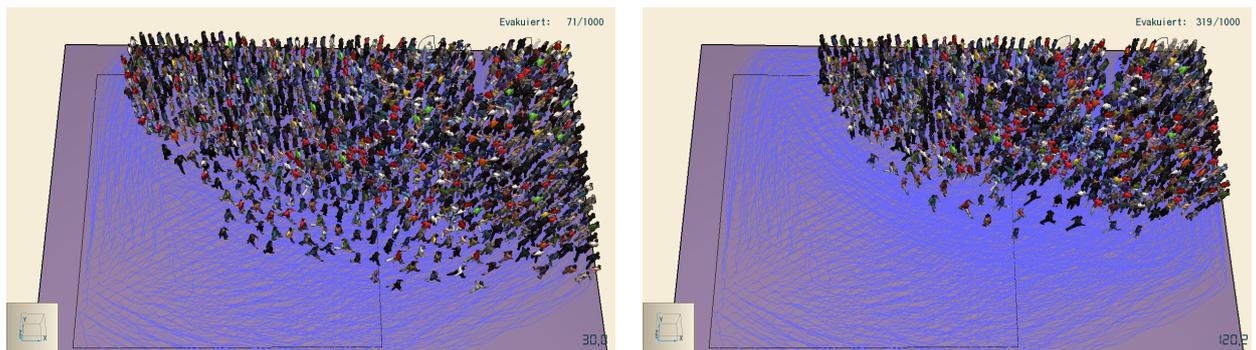
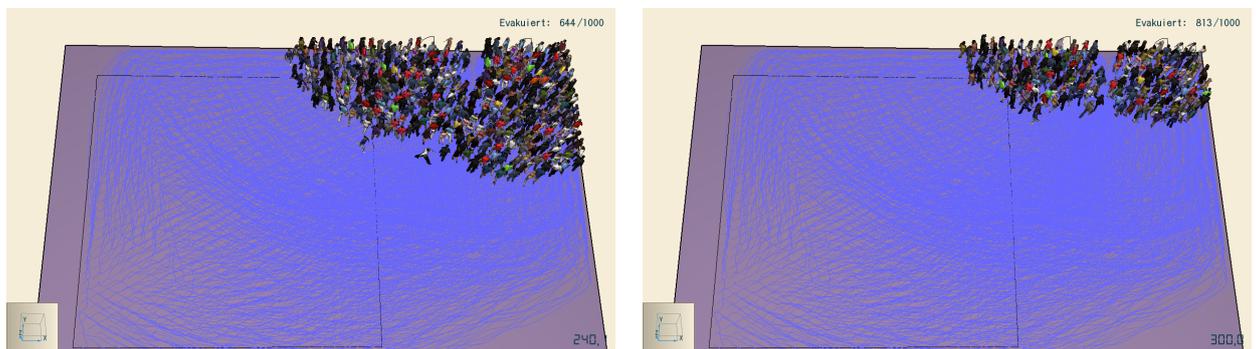


Bild 46: Test 11, Darstellung der Durchflußrate durch die beiden Türen



Zeitpunkt: $t = 30$ s (links) und $t = 120$ s (rechts)



Zeitpunkt: $t = 240$ s (links) und $t = 300$ s (rechts)

Bild 47: Test 11, Darstellung des Pathfinder-Modells mit den Agenten und ihren Laufwegen zu den Zeitpunkten 30, 120, 240 und 300 s

3.6 Auswirkung von Engstellen (Test 12)

Durch den Test 12 soll das Modellverhalten dokumentiert werden. Es soll ein Raum mit 150 Agenten über einen Gang mit einem weiteren Raum verbunden werden (siehe Bild 48). Da der Personenstrom durch den Gang begrenzt wird, darf es nur im Raum 1 zu einem Stau kommen und nicht im Raum 2.

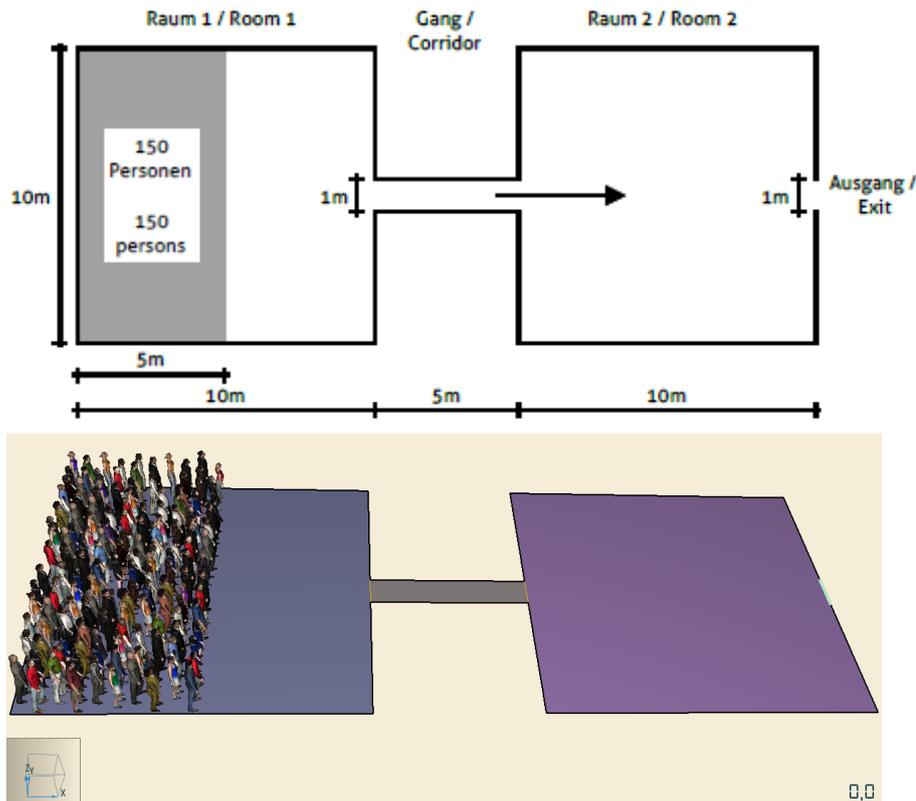


Bild 48: Test 12, Darstellung der Aufgabenstellung und des Pathfinder-Modells mit zwei Räumen und 150 Agenten

Auswertung. Im Bild 49 wird dargestellt, daß sich bereits 12 s nach Simulationsbeginn ein Stau im ersten Raum vor dem Ausgang bildet. Dieser Stau löst sich erst auf, wenn die letzte Person etwa 130 s nach Simulationsbeginn den Raum 1 verlassen hat. Die Bewegung der Agenten durch den Flur und den Raum 2 erfolgt frei ohne weitere Stauereignisse.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

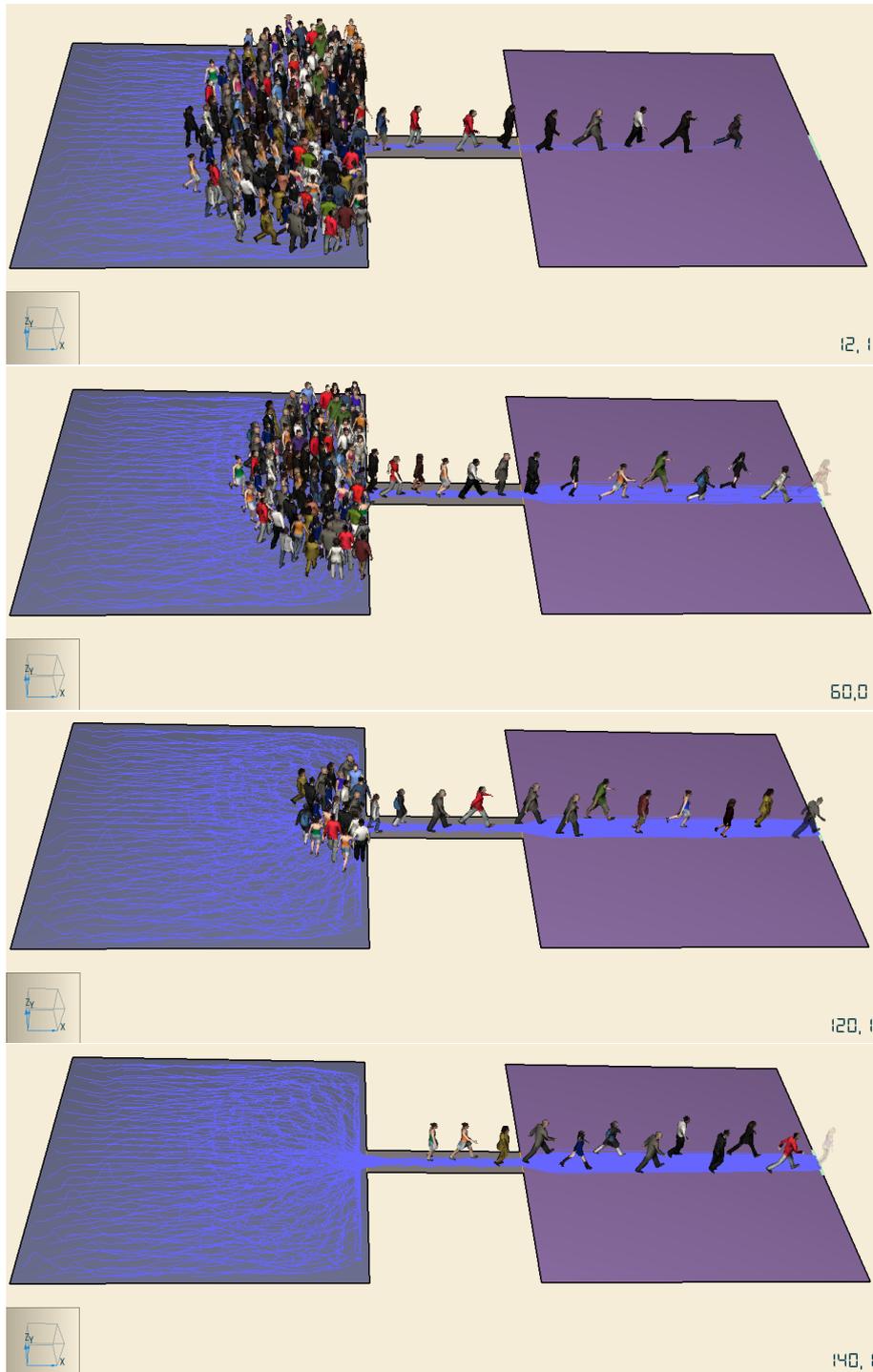


Bild 49: Test 12, Darstellung des Pathfinder-Modells mit den Laufwegen zu den Zeitpunkten 12, 60, 120 und 140 s

3.7 Stau vor einer Treppe (Test 13)

Der Test 13 soll überprüfen, ob der Einfluß des Ausgangs aus dem Raum und die verringerte Bewegungsgeschwindigkeit der Agenten auf der Treppe korrekt wiedergegeben werden können.

Dafür soll ein Raum mit 150 Agenten über einen schmalen Ausgang mit einem Gang und einer Treppe verbunden werden (siehe Bild 50).

Das erwartete Ergebnis ist, daß ein Stau am Ausgang des Raumes auftritt, der einen stetigen Fluß im Gang erzeugt. Zusätzlich wird ein Stau am Fuß der Treppe erwartet, der mit der Zeit wachsen sollte, da der Fluß über die Treppe kleiner ist als der durch den Gang.

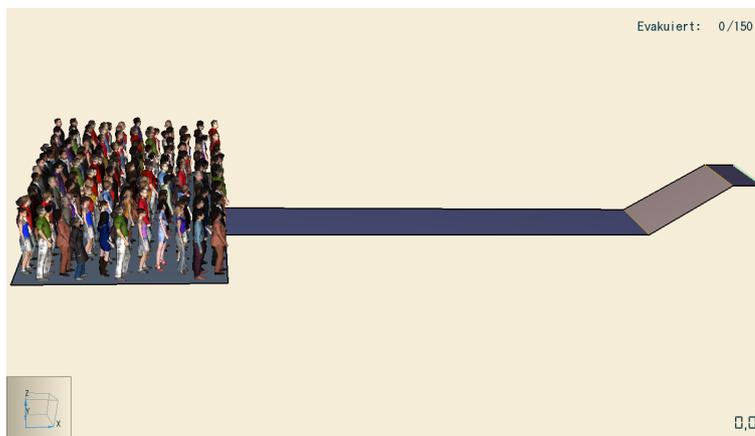
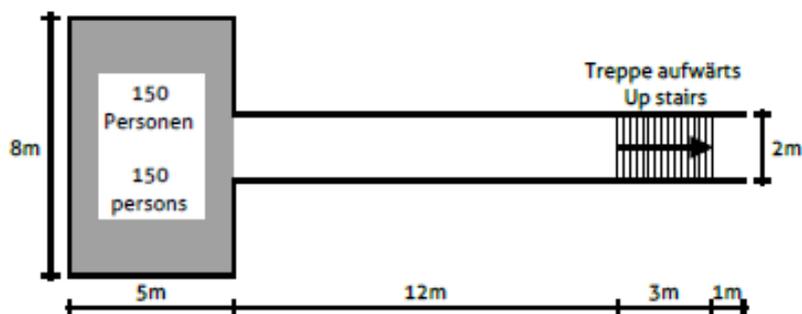
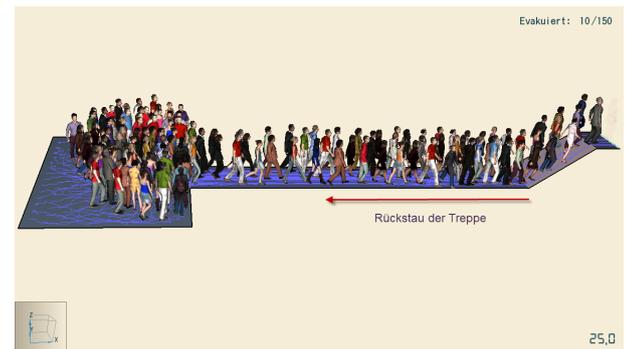


Bild 50: Test 13, Darstellung der Aufgabenstellung und des Pathfinder-Modells mit einem Raum, einem Flur, einer Treppe und 150 Agenten

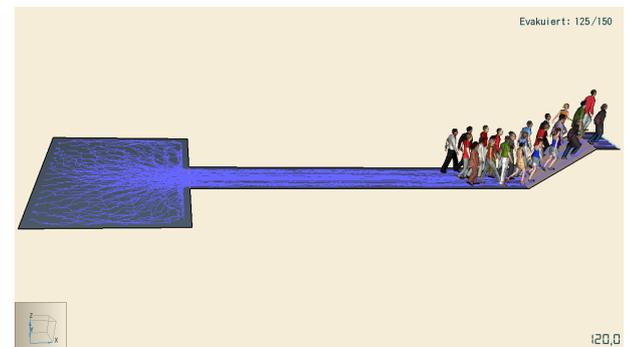
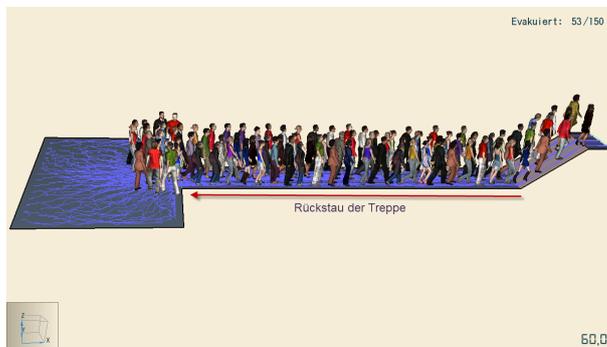
Auswertung. Bereits 10 s nach dem Start der Simulation bildet sich ein Stau vor dem Ausgang aus dem Raum. Die Personen können bis zum Zeitpunkt von rund 25 s ungehindert durch den Flur und entlang der Treppe laufen, danach wirkt sich die um 50 % geringere Gehgeschwindigkeit auf der Treppe als Rückstau auf den Flur aus. Dieser Stau wächst weiter an und erreicht innerhalb von 35 s das Ende des Flurs. Zum Zeitpunkt 120 s löst sich der Stau vor der Treppe auf. Die Simulationsergebnisse sind auszugsweise grafisch im Bild 51 dargestellt.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.



t = 10 s: Stau im Raum vor dem Ausgang, freie Bewegung im Bereich Flur und Treppe (links)

t = 25 s: Stau im Raum vor dem Ausgang, Rückstau von der Treppe im Flur (rechts)



t = 60 s: Rückstau von der Treppe bis zum Ausgang aus dem Raum (links)

t = 120 s: Raum entleert, Rückstau vor der Treppe löst sich auf (rechts)

Bild 51: Test 13, Darstellung des Pathfinder-Modells mit den Laufwegen zu unterschiedlichen Zeitpunkten

3.8 Routenwahl (Test 14)

Der Test 14 soll überprüfen, ob die Agenten eine Route wählen, die den angegebenen Parametern (kürzeste, schnellste, etc.) entspricht.

Dafür sollen Start und Ziel sowohl über einen langen ebenerdigen Gang als auch über eine kurze Verbindung mit zwei Treppen erreichbar sein (siehe Bild 52).

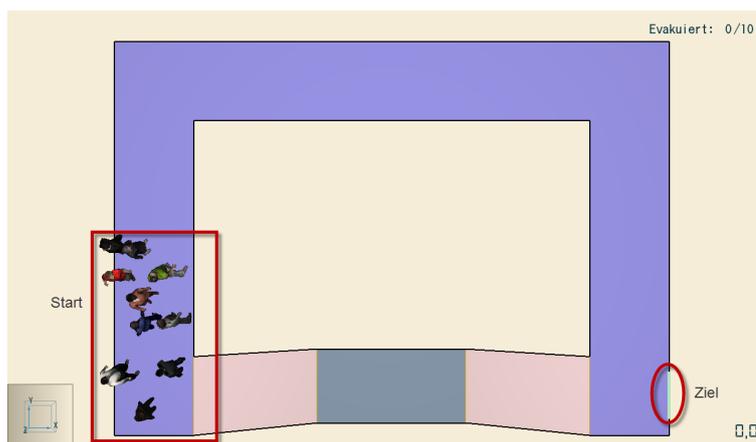
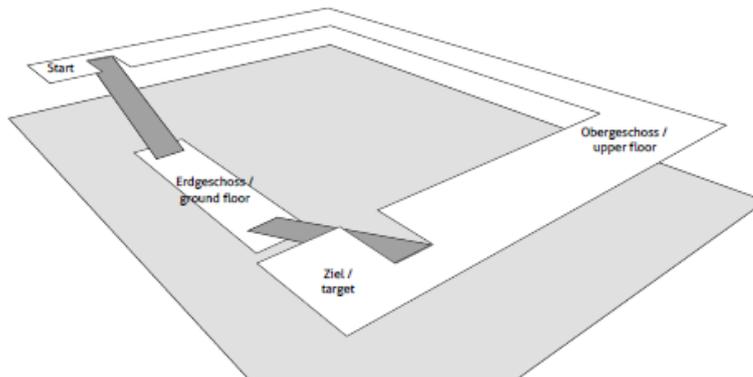


Bild 52: Test 14, Darstellung der Aufgabenstellung und des Pathfinder-Modells mit 10 Agenten

Auswertung. Die Beeinflussung der Agenten erfolgt für den Test 14 über die Profile der Personen durch Einstellung der Kostenfaktoren und durch das Setzen einer Restriktion, ob die Agenten Treppen benutzen dürfen oder nicht. In der Variante 1 wurde der „Kostenfaktor verbleibende Evakuierungszeit“ von 1,0 (Default-Einstellung) auf 0,5 gesetzt. Dadurch werden die Kosten zum Durchschreiten mehrerer Bereiche (Raum 1, Treppe, Raum 2, Treppe, Raum 1) gesenkt. Außerdem dürfen die Agenten die Treppen benutzen. Dadurch entscheiden sich in der Simulation der Variante 1 alle Personen für den kürzeren Weg über die Treppen (siehe Bild 53).

In der Variante 2 wurden die Default-Einstellungen der Kostenfaktoren (alle Kostenfaktoren gleich gewichtet mit dem Faktor 1) verwendet. Außerdem dürfen die Agenten Treppen benutzen. Dadurch entscheiden sich zwei Agenten für den kürzeren Weg über

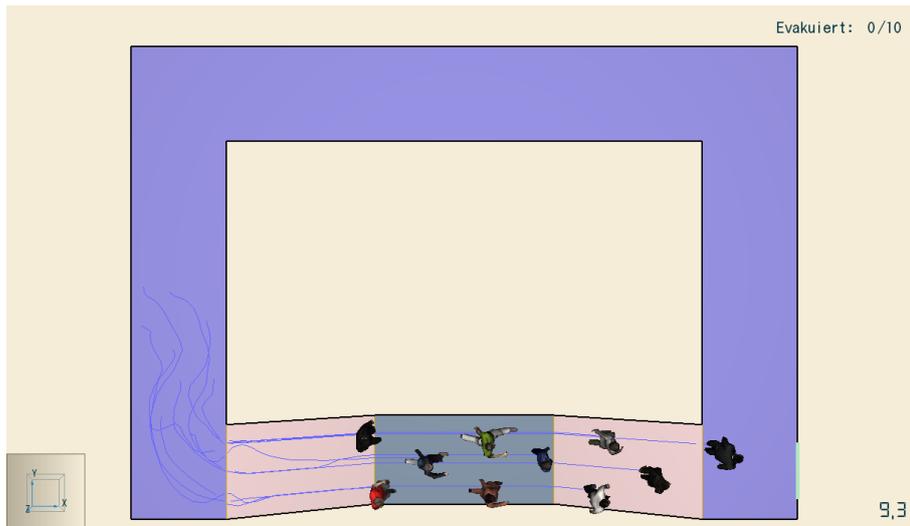


Bild 53: Test 14, Variante 1 (Treppen): Darstellung des Pathfinder-Modells mit den Laufwegen der Agenten, alle Agenten nehmen den kürzesten Weg über die Treppen

die Treppen und die acht restlichen Agenten über den längeren Weg ohne Treppen (siehe Bild 54).

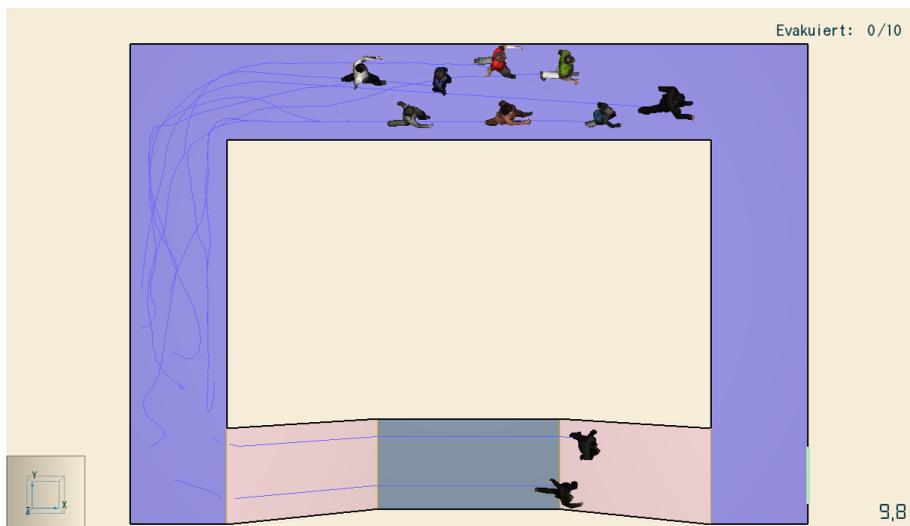


Bild 54: Test 14, Variante 2 (gemischt): Darstellung des Pathfinder-Modells mit den Laufwegen der Agenten, einige Agenten nehmen den kürzesten Weg über die Treppen, andere laufen über den Flur zum Ziel

In der Variante 3 wurden ebenfalls die Default-Einstellungen der Kostenfaktoren (alle Kostenfaktoren gleich gewichtet mit dem Faktor 1) verwendet, aber die Agenten dürfen keine Treppen benutzen. Dadurch entscheiden sich alle Agenten für den längeren Weg ohne Treppen (siehe Bild 55).

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

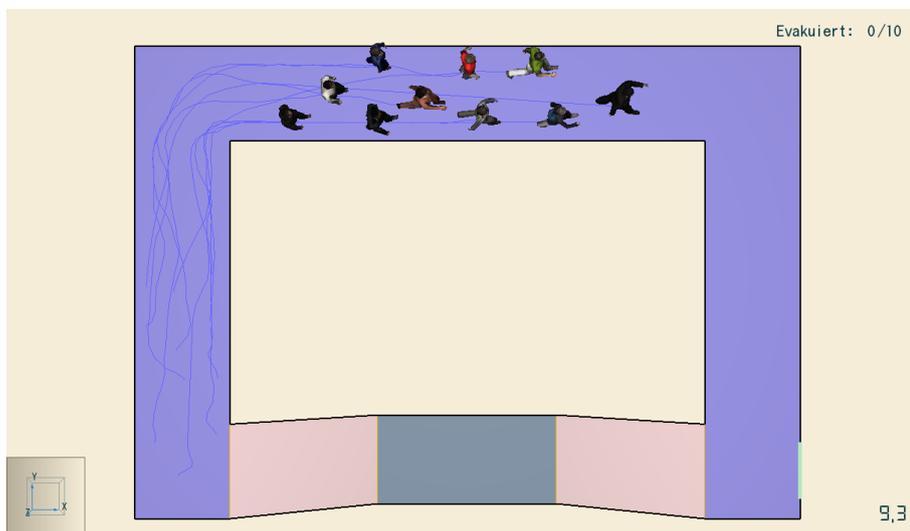


Bild 55: Test 14, Variante 3 (Flur): Darstellung des Pathfinder-Modells mit den Laufwegen der Agenten, alle Agenten nehmen den längeren Weg über den Flur

3.9 Bewegung einer großen Menge Fußgänger um eine Ecke (Test 15)

Mit dem Test 15 soll aufgezeigt werden, inwieweit die Bewegung von Personen um eine Ecke einen Einfluß auf die berechnete Evakuierungszeit hat.

Dafür sollen drei verschiedene Geometrien modelliert werden (siehe Bild 56).

Das erwartete Ergebnis ist, daß alle zugewiesenen Personen zu den entsprechenden Ausgängen gehen.

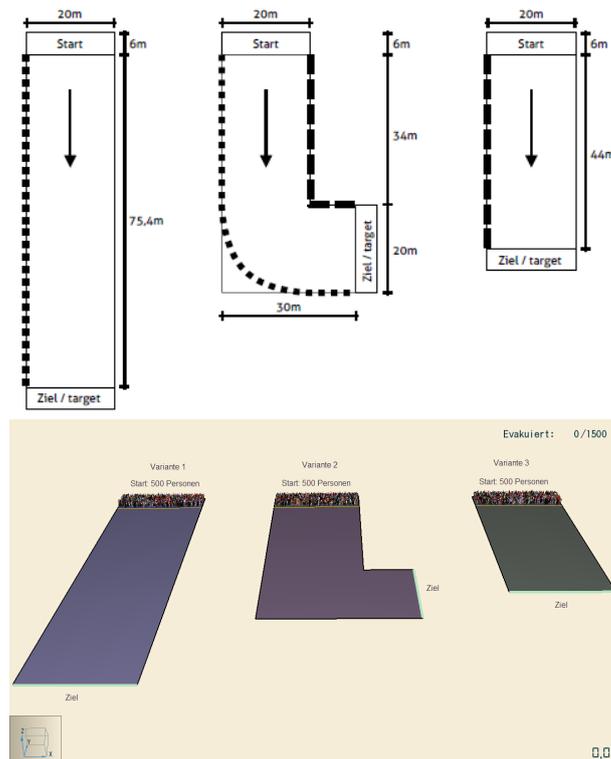
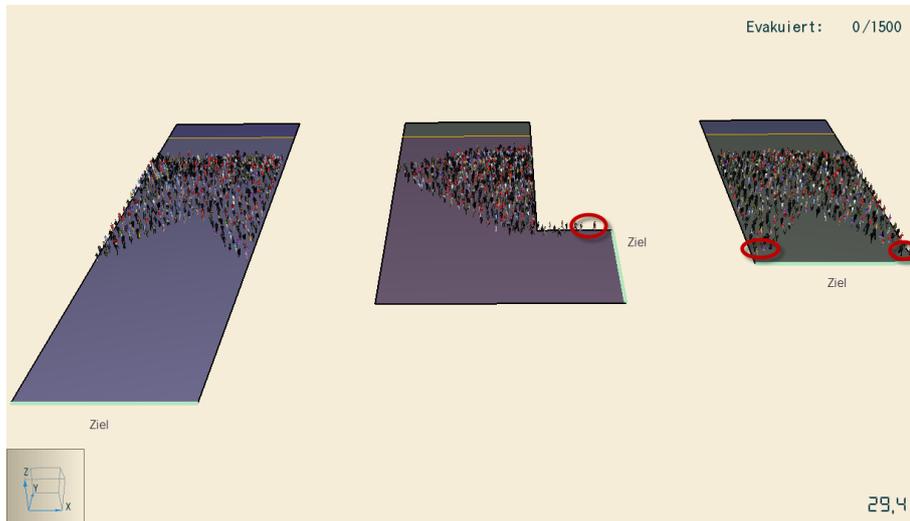


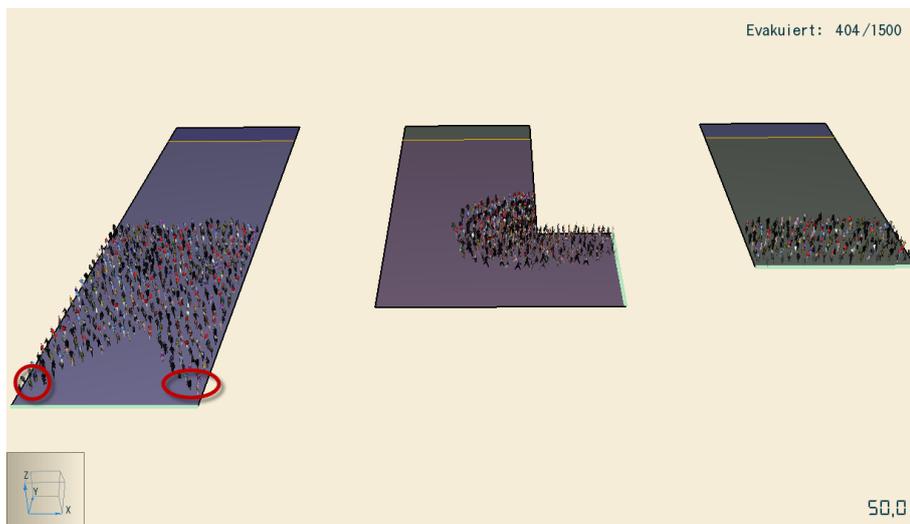
Bild 56: Test 15, Darstellung der Aufgabenstellung (oben) und des Pathfinder-Modells mit drei Varianten (unten) und jeweils 500 Agenten

Auswertung. In den Varianten 2 und 3 erreichen die ersten Agenten nach rund 30 s das Ziel, während die Agenten in Variante 1 dafür rund 20 s länger benötigen. Die Evakuierung in Variante 3 ist bereits nach 60 s und in Variante 2 nach rund 80 s abgeschlossen. Die letzten Agenten in Variante 3 erreichen nach rund 80 s das Ziel.

Der Nachweis wurde erfolgreich erbracht.

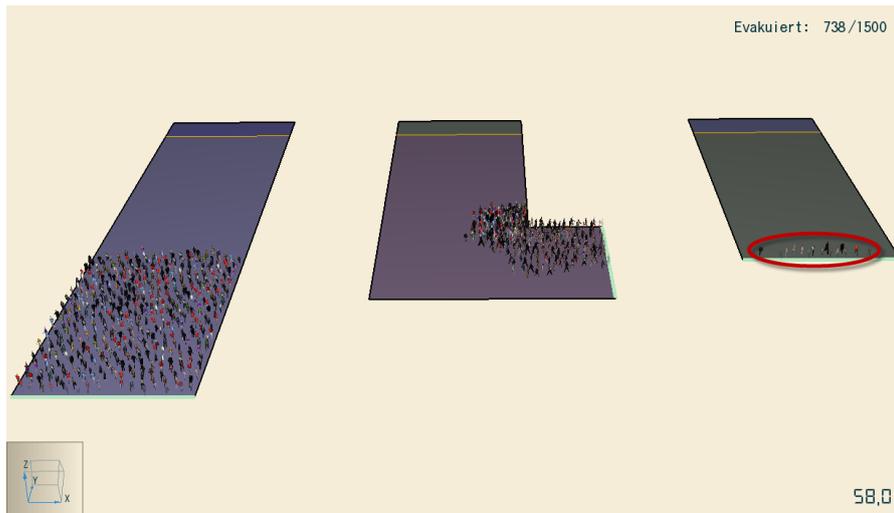


t = 29 s: erste Personen am Ziel in Variante 2 (Mitte) und Variante 3 (rechts)

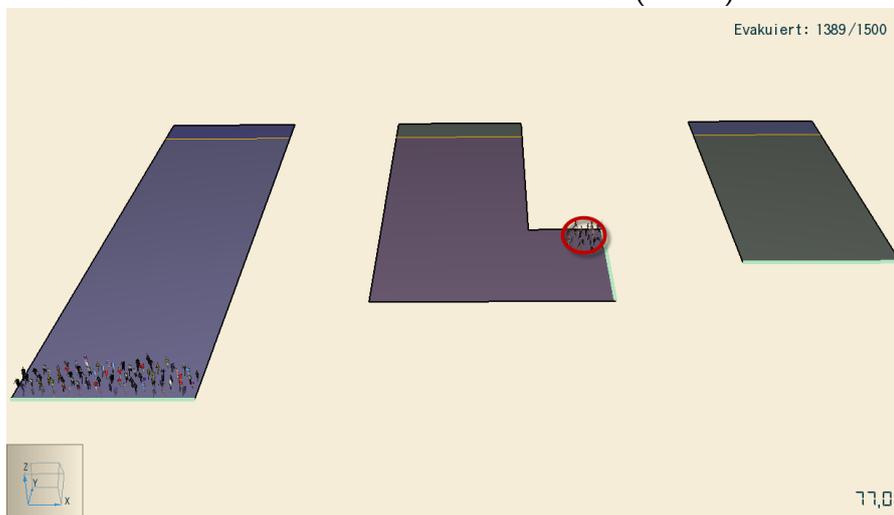


t = 50 s: erste Personen am Ziel in Variante 1 (links)

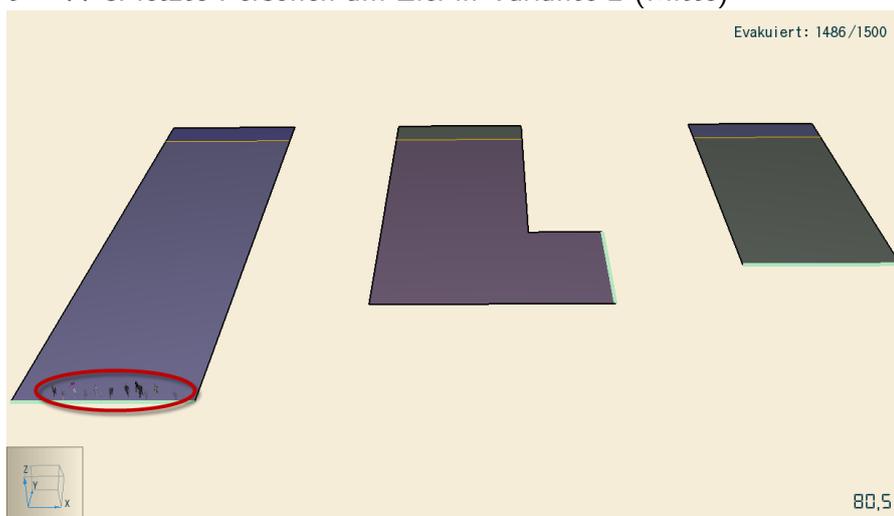
Bild 57: Test 15, Darstellung der drei verschiedenen Geometrien in einem Pathfinder-Modell zu den Zeitpunkten, wenn die ersten Agenten das Ziel erreichen



t = 58 s: letzte Personen am Ziel in Variante 3 (rechts)



t = 77 s: letzte Personen am Ziel in Variante 2 (Mitte)



t = 80 s: letzte Personen am Ziel in Variante 1 (links)

Bild 58: Test 15, Darstellung der drei verschiedenen Geometrien in einem Pathfinder-Modell zu den Zeitpunkten, wenn die letzten Agenten das Ziel erreichen

Literatur

- [1] THUNDERHEAD ENGINEERING: Pathfinder Results User Manual. *Manhattan, Kansas, USA, December 2018. (Pathfinder version 2018.4)*
- [2] THUNDERHEAD ENGINEERING: Pathfinder Technical Reference. *Manhattan, Kansas, USA, December 2018. (Pathfinder version 2018.4)*
- [3] THUNDERHEAD ENGINEERING: Pathfinder User Manual. *Manhattan, Kansas, USA, December 2018. (Pathfinder version 2018.4)*
- [4] THUNDERHEAD ENGINEERING: Pathfinder Verification and Validation. *Manhattan, Kansas, USA, December 2018. (Pathfinder version 2018.4)*
- [5] WEIDMANN, U. : Transporttechnik der Fußgänger: transporttechnische Eigenschaften des Fußgängerverkehrs ; (Literatúrauswertung). *IVT, 1993 (Schriftenreihe des IVT)*