

Wann ist ein Stau ein Stau? Methoden zur Identifizierung von Staus in mikroskopischen Räumungssimulationen

Dr. Angelika Kneidl, Sophia Simon, accu:rate GmbH

1 Einleitung - Warum befassen wir uns mit dem Thema Stau

An Orten, die von vielen Menschen zur selben Zeit genutzt werden, erhöht sich das Risiko von kritischen Situationen. Ereignisse in der Vergangenheit zeigen auf, wie schnell sich kritische Situationen in Katastrophen verwandeln können. 1989 kam es im Stadion von Hillsborough in Sheffield durch eine Fehlentscheidung des Sicherheitspersonals zu einer Katastrophe, bei der 96 Besucher starben (The New York Times 2017)[1]. 2010 verunglückten bei der Loveparade in Duisburg durch Planungsfehler 21 Menschen (Wikipedia 2019)[2]. In Mekka kam es 2015 beim Haddsch zu einer Katastrophe, bei der nach Schätzungen sogar 2.411 zu Tode kamen (The New York Times 2015)[3].

Warum kommt es immer wieder zu solchen Katastrophen? Die Dynamik innerhalb großer Menschenmengen ist hochkomplex und die Konsequenzen von Planungsfehlern sowie von Fehlentscheidungen vor Ort lassen sich nur schwer vorhersehen.

Doch egal, ob unzureichendes Design, eine Fehlentscheidung oder ein stressauslösendes Ereignis, erst bei Entstehung hoher Dichten werden solche Situationen gefährlich. Kommt es zu hohen Dichten, die sich nicht schnell wieder auflösen, steigt die Verletzungsgefahr, da es zu Angst, Unruhe und Drängeln kommen kann. Tritt ein solcher Fall auf, kommt es schnell zu Druckwellen und Dominoeffekten, die in eingangs genannten Katastrophen enden können.

Zwei Faktoren spielen hierbei eine entscheidende Rolle: die Geometrie vor Ort und das menschliche Verhalten. Das Layout der Veranstaltung oder des Gebäudes hat großen Einfluss auf die Sicherheit vor Ort. Gibt es Hindernisse wie beispielsweise Säulen in Hauptlaufwegen, Flaschenhalse, die Stauungen hervorrufen, oder kommt es zu Gegenströmen? Diese baulichen Aspekte müssen verknüpft werden mit sozialpsychologischen Aspekten. In der Risikopsychologie wird erforscht, nach welchen Kriterien Menschen Notfälle bewerten und wie sie sich im Ernstfall verhalten. Ein Ansatz hierfür sind die Human Factors, bei dem verschiedene Einflussfaktoren bei der Analyse der Veranstaltungssicherheit gemeinsam betrachtet werden. Das Zusammenspiel von der Umwelt und Infrastruktur sowie der Anlass der Veranstaltung werden zusammen mit dem Gefährdungspotential und dem spezifischen menschlichen Verhalten betrachtet [4].

Um diese Faktoren besser in den Griff zu bekommen, können Simulationen in der Planungsphase von Veranstaltungen und Gebäuden unterstützen. Personenstromsimulationen betrachten die Laufwege der Menschen in einer vorgegebenen Geometrie über die Zeit hinweg und untersuchen das Zusammenwirken der beiden Einflussfaktoren Mensch und Raum. Damit können Katastrophen zwar nicht komplett verhindert, aber das Restrisiko vermindert werden: Gerade bei Planungsfehlern

oder beim Einschätzen von Konsequenzen kritischer Entscheidungen können Simulationen dabei unterstützen, diese vorab aufzudecken bzw. besser zu verstehen. Bevor das Werkzeug der Simulation aber sinnvoll eingesetzt werden kann, muss erst definiert werden, was ein Stau ist und wie man ihn als solchen identifizieren und kategorisieren kann.

2 Was ist ein Stau – Definition

Schlägt man im Duden den Begriff Stau nach, findet man die folgenden Definitionen [5]:

- (a) durch Behinderung des Fließens, Strömens o. Ä. bewirkte Ansammlung
- (b) Ansammlung von Fahrzeugen in einer langen Reihe durch Behinderung, Stillstand des Verkehrs

Aus verkehrswissenschaftlicher Sicht beschreibt der „Leitfaden zur Verwendung der multimodalen Bewertungsverfahren von FLOW für Planer“ Stau wie folgt [6]:

„Stau ist ein Zustand, in dem alle Modi eines multimodalen Verkehrsnetzes (z. B. Straßen, Radwege, Bürgersteige, Busspuren) durch eine hohe Verkehrsdichte und eine übermäßige Nutzung geprägt sind, sodass ein akzeptabler Zustand aller Modi gemäß vorab definierten Zielvorgaben nicht gegeben ist und (subjektive oder objektive) Zeitverluste eintreten. [...] Diese Definition weist auch auf die beiden konkreten Indikatoren hin, die wir zur Bewertung der Qualität eines Verkehrssystems empfehlen: Verkehrsdichte und Zeitverlust.“

Anhand dieser Definitionen lässt sich festhalten, dass bei einem Stau folgende Faktoren eine Rolle spielen:

- › Kapazitätsüberlastung: der Zufluss zum Gelände ist höher als der Abfluss.
- › Hohe Dichten: die Dichten überschreiten einen Wert, in dem man sich angenehm fortbewegen kann.
- › Geschwindigkeitsreduktion: ich kann mich nicht in meiner Wunschgeschwindigkeit bewegen.
- › Zeitverlust: durch das Warten oder Anstehen benötige ich für den zurückgelegten Weg länger als es üblich wäre.

Doch das Entstehen eines Staus muss noch nicht zu einer kritischen Situation führen. Wer schon einmal die Mona Lisa im Louvre besichtigen wollte, weiß, dass es sich in diesem speziellen Raum sehr stauen kann. Diese Situation ist aber per se nicht als gefährlich einzustufen. Auch auf Veranstaltungen kann ein Stau z.B. vor besonderen Attraktionen gewollt sein. Solange dieser von den Personen akzeptiert wird, muss er noch nicht als kritisch eingestuft werden. Dr. Oberhagemann beschreibt in dem Technischen Bericht „Statische und dynamische Personendichten bei Großveranstaltungen“ des vfdB [7], wovon eine solche Akzeptanz abhängen kann. Laut [7] hängt die Akzeptanz eines Staus von der Dauer des Staus ab, aber auch von anderen Faktoren, bspw. ob

die Anstehenden in Sichtbeziehung zur Stauursache stehen, ob noch eine geringe Fortbewegung möglich ist oder ob andere Besucher noch entgegen kommen [7].

Es stellt sich die Frage, wie die oben genannten Einflussfaktoren auf Stau in Kennzahlen übertragen werden können. Denn nur so kann bewertet werden, wann ein akzeptierter Stau zu einem kritischen Stau wird.

3 Von der Realität zur Simulation: Mit welchen Kriterien können Staus detektiert werden

Stauphänomene, wie sie in der Realität auftreten, müssen in den Methoden und Modellen zur Analyse bestmöglich abgebildet und erkannt werden. Dazu kommen eine Vielzahl von Kriterien mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen infrage.

Eine der wesentlichsten Herausforderungen dabei ist es, dass es sich bei Staus um ein makroskopisches Phänomen handelt, das nun über mikroskopische Modelle detektiert und analysiert werden soll.

Makroskopische Modelle bilden aggregierte Werte wie Flüsse und Dichten ab, um so Räumungszeiten zu ermitteln. Da Stau über den Fluss definiert werden kann, kann direkt aus den anliegenden Flüssen und den zur Verfügung stehenden Kapazitäten auf Fluchtwegen ermittelt werden, ob ein Stau vorliegt.

In mikroskopischen Modellen werden Personen mit ihren individuellen Eigenschaften wie Platzbedarf, Wunschgeschwindigkeit etc. abgebildet. Um daraus aggregierte Werte für die Stauererkennung zu ermitteln, würden die individuellen Eigenschaften ausgemittelt und der Mehrwert der mikroskopischen Betrachtungsweise eliminiert. Es muss daher bei den Kriterien innerhalb von mikroskopischen Modellen darauf geachtet werden, dass die mikroskopischen Eigenschaften mit einfließen.

Im Folgenden wird der Blick zunächst auf bereits vorhandene Kriterien und Vorschriften gelegt, um in Anschluss die Lücken zu identifizieren und daraus geeignete Kriterien abzuleiten.

3.1 Bisherige Literatur, Arbeiten, rechtliche Einordnung zum Thema Stau

Folgende Quellen mit Aussagen zum Thema Stau sind momentan Stand der Technik:

MVStättVO (2014) §7 [8]:

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

Im Kommentar zur MVStättVO 06/2005 wird erklärt, dass 100 Personen in 1 Minute einen 1,20 m breiten Ausgang passieren können.

Damit könnte zurückgefolgert werden, dass ein Stau zulässig ist, solange diese Zahlen und Verhältnisse eingehalten werden.

Nach Mehl (2006) [9]:

Mehl empfiehlt, dass die Staudauer von einer Minute nicht überschritten werden soll. Zudem soll die Verzögerungszeit nicht mehr als 2 Minuten betragen.

Dabei wird die Anstehgeschwindigkeit auf < 0.3 m/s gesetzt.

Summe von Staudauer + Verzögerungszeit $< 50\%$ der gesamten Laufzeit.

Auch Mehl orientiert sich also in einem ähnlichen Bereich der MVStättVO. Zusätzlich bringt er zwei weitere Größen ins Spiel, die Anstehgeschwindigkeit sowie eine Dauer.

Nach Oberhagemann (2012) [7]:

Oberhagemann kritisiert in dem Technischen Bericht TB 13-01 vom vfdb [7], dass eine statische Analyse der Personendichten bei Veranstaltungen wie in der MVStättVO nicht ausreicht, sondern dynamisch betrachtet werden muss. Statische Personendichten beziehen sich auf den reinen Verteilerschlüssel Personen pro m^2 . Dieser lässt zwar erste Aussagen z.B. zur maximalen Besucherzahl auf Veranstaltungsgeländen, aber noch keine Rückschlüsse auf die tatsächliche Verteilung vor Ort zu. Deshalb ist eine dynamische Betrachtung wie die der Personenstromanalyse von Nöten und erst damit können Aussagen über Stauentwicklungen getroffen werden. Hierbei ist insbesondere der Einbezug von Zufluss vs. Abfluss vom Veranstaltungsgelände wichtig, da dies maßgeblich Auswirkungen auf den Verlauf hat.

Oberhagemann teilt Stau in vier Stufen ein basierend auf der Dichte: Bis $1,5$ Personen/ m^2 können sich Menschen noch frei bewegen. Die erste Staustufe beginnt ab $1,5$ Personen/ m^2 , denn hier können sich einzelne Gruppen nicht mehr in unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegen, sondern nur noch in einheitlicher Gehgeschwindigkeit und die Einzelperson besitzt keine Freiheitsgrade mehr.

Die zweite Stufe liegt bei $2-3$ P/ m^2 , da es hier zu Störungen kommen kann, also alle Ereignisse, die ein kurzfristiges Abstoppen des Personenstroms zur Folge haben (z.B. das Stoppen einer Person bei einer Gruppe, was den gesamten Personenfluss beeinträchtigt).

Die dritte Stufe ist der teilweise Stillstand des Personenstroms, der bei einer Dichte von $3-5$ P/ m^2 entsteht. Dies muss nicht zwingend eine Gefahrensituation sein, denn es ist oftmals vom Veranstalter gewollt, dass beispielsweise die Besucher vor Attraktionen anstehen.

Wenn der Akzeptanzbereich jedoch überschritten wird, befindet sich der Stau in der vierten Stufe und gilt als kritischer Stau, bei der es zu Druckwellen kommen kann und zu einer erhöhten Gefahr, wenn eine Person stürzt.

Oberhagemann betrachtet also Personendichte, Geschwindigkeit und das Verhältnis von Zufluss und Abfluss, legt aber nur für den Faktor Dichte Werte fest.

Aus RiMEA v2.2.1 (2009): Identifizierung von Stauungen [10]

„Im Rahmen der Entfluchtungsanalyse müssen auftretende Staus identifiziert, beschrieben und bewertet werden. Ein signifikanter Stau liegt vor, wenn eine lokale Dichte von 4 Personen pro Quadratmeter länger als 10 % der Gesamträumdauer überschritten wird.“ [10]

In der RiMEA Richtlinie wird die Definition eines signifikanten Staus gegeben. Dabei wird die Definition von signifikant auf die Staudauer bezogen und die Überschreitung dieser ggü. einer Gesamtdauer. Diese Definition wurde aus der neuesten Fassung entfernt, da sie sehr ungenau ist und zu vielen Unstimmigkeiten geführt hat.

Aus RiMEA v3.0.0 (2016): Definition signifikante Stauung: [11]

„Stocken eines Personenstroms oberhalb eines Schwellenwertes bis hin zum zeitweisen Stillstand. ANMERKUNG: Das Signifikanzkriterium ist dabei die Wartezeit, d. h. die Zeitdifferenz zwischen einer Entfluchtung, bei der sich alle Personen mit ihrer freien Laufgeschwindigkeit bewegen, und der benötigten Zeit bei einer Entfluchtung mit auftretenden Stauungen.“ [11]

Die neueste Definition ist allgemeiner gehalten und bezieht sich auf das Abbremsen eines Personenstroms. Zu beachten ist, dass sich die Definition in zwei Teile gliedert; zunächst generell die Definition und dann im Weiteren die Definition eines Signifikanzkriteriums.

Aus den bisherigen Quellen lassen sich keine eindeutigen Kriterien zur Definition und dem Erkennen eines Staus ableiten; vielmehr sind die Aussagen teilweise sehr vage und lassen viel Spielraum für Auslegungen. Zudem sind gewisse Zahlen und Werte nicht klar belegt oder eine Dokumentation über die Herleitung der Werte ist nicht gegeben.

Daher bedarf es einer engeren Definition von Kriterien, die bei der Stauererkennung und -bewertung helfen sollen.

3.2 Kriterien zur Stauererkennung

Es gibt eine Reihe von Kriterien, die zur Stauererkennung herangezogen werden können. Sie können sich zum einen auf den Stau als Ganzes beziehen (makroskopisch) als auch auf die Individuen innerhalb des Staus (mikroskopisch).

Ziel ist es, charakteristische Eigenschaften zu definieren, mithilfe derer Stauungen identifiziert und bewertet werden können. Bei der Auswahl der Kriterien wird dabei auf folgende drei Merkmale geachtet:

- › Nachvollziehbar: Ein Kriterium muss nachvollziehbar und verständlich sein – nicht nur für Experten.
- › Eindeutig zu bestimmen: Wichtig ist, dass die Kriterien keinen großen Spielraum für Auslegungen und Mehrdeutigkeit bieten, um so vergleichbar zu bleiben.
- › Einfach auszuwerten: Die Kriterien sollen praktikabel sein, um im besten Fall keine aufwändige und fehleranfällige Mehrarbeit verursachen.

Im Folgenden betrachten wir unterschiedliche Kenngrößen und bewerten sie anhand der hier vorgestellten Kriterien.

3.2.1 Kenngrößen, die den Stau als Ganzes charakterisieren

Parameter	Beschreibung	Nachvollziehbar	Charakteristisch	Praktisch	Begründung / Kommentar
Staudauer	Die Staudauer bezeichnet die Zeit (Δt), wie lange ein Stau besteht.	o	-	o	Die Staudauer per se ist nicht heranzuziehen, da die individuelle Anstehzeit ausschlaggebend ist. Zudem ist diese Zahl sehr abhängig von der Art der Personen. D.h. einen pauschalierten Wert zu nehmen, deckt die Vielfalt der Personen und die dazugehörige Situation nicht ab.
Staugröße	Die Staugröße bezeichnet die absolute Größe des Staus (Anzahl der Personen, die im Stau stehen).	+	-	o	Da die Personenanzahl sich über die Zeit hinweg ändert, ist diese Größe allein nicht besonders aussagekräftig. Sie müsste ins Verhältnis zur Dauer gesetzt werden.
Stauausdehnung	Die räumliche Ausdehnung eines Staus.	+	-	o	Die räumliche Ausdehnung eines Staus kann eine Aussage über die Signifikanz eines Staus geben (blockiert ein Stau einen weiteren Fluchtweg oder andere Fluchtende?). Allerdings ist das eine statische Momentaufnahme, bei der geklärt werden müsste, welche Größe herangezogen wird. Die maximale Ausbreitung? Dann wiederum spielt die Dauer der maximalen Ausdehnung eine Rolle; die mit der Ausdehnung allein nicht erfasst werden kann. Zudem ist die räumliche Ausdehnung stark modellabhängig. Je nach Modellierung der Personen (zellbasiert, kreisförmig, elliptisch) kann es hier bei gleichen Ausgangsbedingungen zu unterschiedlichen Ausprägungen kommen.

Parameter	Beschreibung	Nachvollziehbar	Charakteristisch	Praktikabel	Begründung / Kommentar
Stauzuwachs	Der räumliche Zuwachs eines Staus. (Zufluss >> Abfluss)	+	+	-	Der Stauzuwachs ist interessant, da hier eine Aussage über Kapazitäten getroffen werden kann. Wie lange wächst ein Stau an? Wie weit dehnt er sich aus und blockiert damit ggf. andere Fluchtwege? Allerdings ist das Messen der Ausdehnung aufwändig und kann nicht einfach automatisiert werden, sondern muss vielmehr qualitativ bewertet werden.

Von den vier beschriebenen Kriterien sehen wir vor allem den Stauzuwachs als eine interessante Größe zur Bewertung von Stauungen an, da er das Phänomen der Definition (Zufluss >> Abfluss) gut abbildet. Da aber die Ermittlung dieser Größe in der Praxis zu Schwierigkeiten führt, ist eine automatisierte Auswertung nicht möglich und kann eher als eine qualitative Unterstützung bei der Staubewertung herangezogen werden. Die übrigen Kriterien können angewendet werden, sollten aber mit anderen Kriterien kombiniert werden.

3.2.2 Kenngrößen, die auf Individuen basieren

Parameter	Beschreibung	Nachvollziehbar	Charakteristisch	Praktisch	Begründung / Kommentar
Geschwindigkeit	Die Geschwindigkeit jedes Individuums innerhalb eines Staus.	+	o	+	Zur Klassifizierung als Stau sinnvoll. Die Definition einer relevanten Geschwindigkeit ist allerdings nicht eindeutig; kann die Geschwindigkeit in Relation zur Wunschgeschwindigkeit gesetzt werden oder wird ein fester Wert bestimmt? Wie hoch sollte dieser feste Wert gesetzt werden?
Individuelle Anstehzeit	Wie lange befindet sich jede einzelne Person im Stau.	+	+	o	Sehr relevant, da hier die Psychologie des Menschen eine Rolle spielt. Allerdings ist hier zu definieren, wie hoch eine individuelle Anstehzeit sein darf. Es kann hier sowohl die individuelle Anstehzeit pro Stau als auch die gesamte Anstehzeit (bei sukzessiven Stauungen) angegeben werden.
Verzögerung	Die Verzögerung bezeichnet den Zeitverlust, den eine Person aufgrund des Staus hinnehmen muss.	+	+	-	Die Größe ist interessant, da hier eine Aussage dazu getroffen wird, um wieviel sich die Reisezeit aufgrund des Staus erhöht. In der Praxis ist dieser Wert aufwändig zu ermitteln, da für jedes Individuum die Reisezeit ohne Stauung berechnet werden muss, um eine Vergleichsbasis zu bekommen.

Von den oben dargestellten Kriterien bietet sich vor allem das Geschwindigkeitskriterium zur Definition eines Staus an. Die beiden anderen Kriterien können ebenfalls zur Bewertung herangezogen werden, wobei die Verzögerung eine aufwändige Messung mit sich bringt.

3.2.3 Weitere Kenngrößen

Parameter	Beschreibung	Nachvollziehbar	Charakteristisch	Praktikabel	Begründung / Kommentar
Fluss durch den Stau	Personen pro Minute pro Meter abhängig von der Geschwindigkeit und Anzahl Personen, also abgeleitete Größe.	+	-	o	Diese Größe ergibt sich durch die Geschwindigkeit und Anzahl Personen und macht nur dann Sinn auszuwerten, wenn bekannt ist, wie hoch der optimale Fluss ist. Bleibt konstant, egal wie lange der Stau besteht.
Dichte	Die (minimale, mittlere, maximale) Personendichte innerhalb eines Staus.	-	-	o	Die Stauerkennung anhand von Dichte ist nicht empfehlenswert: In einigen Modellen kann die Maximaldichte voreingestellt werden, dies führt zu Ergebnissen, die nicht miteinander verglichen werden können. Eine modellabhängige Größe zur Identifizierung eines Staus heranzuziehen, ist daher nicht sinnvoll. Zudem ist die Art der Dichtemessung nicht eindeutig – hier müsste ein Konsens zu Vereinheitlichung gefunden werden.
Verhältnis: Staudauer zu Gesamträumungszeit	Ins Verhältnis wird die maximale Staudauer zur Gesamträumungszeit einer Person gesetzt und pro Person ermittelt.	+	-	o	Da Szenarien sehr unterschiedlich aufgebaut sein können, ist dieses Verhältnis nicht geeignet, um einen signifikanten Stau zu klassifizieren. Beispiel: Eine Indoor/Outdoor-Kombination mit Stau im Gebäude, bei dem die Personen nach Verlassen des Gebäudes noch eine lange Zeit laufen müssen, bis sie im sicheren Bereich sind. Damit wäre der Prozentsatz gering, es könnte sich aber dennoch um einen kritischen Stau handeln.

Die übrigen Kriterien werden allesamt als nicht besonders gut geeignet eingestuft, da die Eindeutigkeit und Aussagekraft nicht gegeben ist.

4 Vorgehen bei der Identifizierung von Stauungen / Lösungsansätze

Um Stauungen zu identifizieren, sollte zweistufig vorgegangen werden:

1. Erkennen eines Staus: Wann ist ein Stau ein Stau? Anwenden von relevanten Kriterien zur schnellen und eindeutigen Erkennung eines Staus.
2. Klassifizierung eines Staus: Staus per se sind erst einmal nicht gefährlich und können immer auftreten, selbst bei Einhaltung der Normen (Beispiel: 1.20m für 200 Personen (MVStättVO) führt zu einem Rückstau). Die Herausforderung liegt also darin, aus einem erkannten Stau eine Bewertung durchzuführen und zu entscheiden, ob ein vorliegender Stau als kritisch einzustufen ist.

4.1 Identifikation von Stau

Zur Identifikation eines Staus sollte das Geschwindigkeitskriterium herangezogen werden. Es gibt allerdings einen Abstimmungsbedarf, wie hoch der Grenzwert angesetzt werden soll.

Ein möglicher Weg, diese Grenzgeschwindigkeit zu ermitteln, ist es, ein Fundamentaldiagramm heranzuziehen; ein Fundamentaldiagramm beschreibt die Zusammenhänge zwischen (Personen-) Fluss, Geschwindigkeit und Dichte und hat seinen Ursprung in der Verkehrsanalyse. Je höher die Dichte in einer Menschenmenge, desto langsamer bewegen sich die Personen; ab einer bestimmten Dichte ist die Flussrate im Maximum; oberhalb der Dichte beginnt sich die Flussrate zu verringern und ein Stau entsteht.

In Abbildung 1 sind zwei Fundamentaldiagramme nach Weidmann [12] dargestellt, einmal Geschwindigkeit im Verhältnis zur Personendichte, einmal der Fluss (Pers/m/s) im Verhältnis zur Personendichte (Pers/m²).

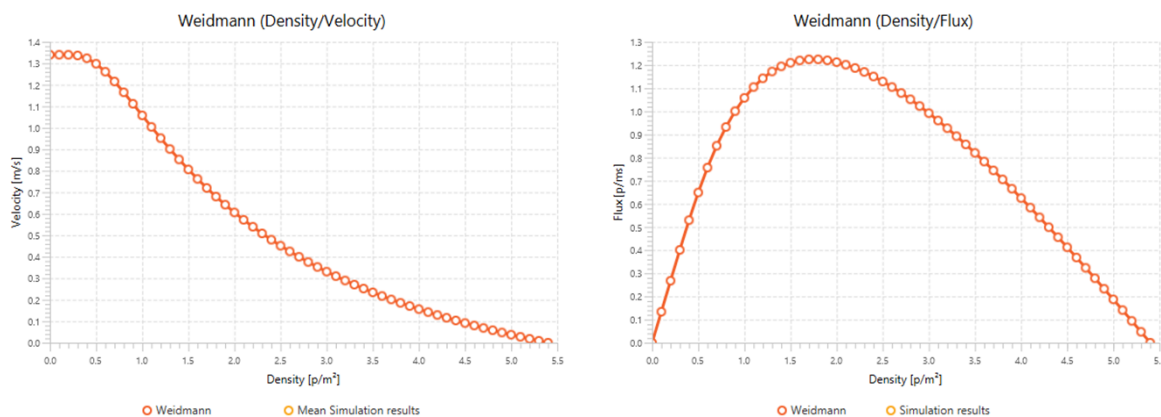


Abbildung 1 Fundamentaldiagramm nach [11]

Genau dort, wo der Gesamtfluss abnimmt, kann die korrespondierende Geschwindigkeit abgelesen werden. Dieser Wert bestimmt dann die Grenzgeschwindigkeit, ab der sich eine Person im Stau befindet. Da Fundamentaldiagramme sehr unterschiedlich ausgeprägt sein können, abhängig der Personeneigenschaften (im Realen) bzw. der Modelleigenschaften (in Modellen), müsste der Wert spezifisch mit den jeweiligen (mikroskopischen) Simulationsprogrammen und der entsprechenden Population ermittelt werden. Diese Neuermittlung ist jedoch nicht praktikabel. Eine Möglichkeit wäre es, die Hersteller von Simulationssoftware diesen Wert für eine Standardpopulation bestimmen zu lassen, um so abhängig des Modells Grenzgeschwindigkeiten zu ermitteln.

Bei der Ermittlung der Grenzgeschwindigkeit sollte zudem auch beachtet werden, dass Personen auf Treppen i.d.R. bereits auf eine Geschwindigkeit im Bereich von 0,4 m/s – 0,8 m/s abgebremst werden; setzt man einen Schwellwert in diesem Bereich, so werden Personen auf Treppen automatisch als Personen im Stau erkannt. Es bleibt also offen, ob eine Reduktion der Geschwindigkeit um einen gewissen Prozentsatz als Grenzwert herangezogen werden soll, oder ob eine Unterscheidung auf Treppen getroffen werden muss.

In der Diskussion um Grenzgeschwindigkeiten werden Werte zwischen 0,8 m/s bis unter 0,3 m/s genannt.

Des Weiteren sollten einheitliche Messverfahren zur Bestimmung der Geschwindigkeit festgelegt werden, um die Unterschiede von unterschiedlichen Messverfahren zu minimieren. Wichtige Aspekte dabei sind:

- › Über wie viele Zeitschritte wird eine Geschwindigkeit ermittelt?
- › Wie lange muss eine Person eine Geschwindigkeit unterschreiten, dass sie als eine Person identifiziert wird, die im Stau steht?

Diese Fragen müssen mithilfe von Tests und Vergleichen mit Realversuchen z.B. Jülich [13] geklärt werden.

4.2 Bewertung und Beurteilung von Stau

Die über das Geschwindigkeitskriterium definierten Stausituationen müssen in der Analyse auf ihre Kritikalität überprüft werden. Die Einstufung eines Staus als kritisch oder nicht obliegt dem Ersteller des Simulationsgutachtens.

Folgende Kriterien der Stausituation können beispielsweise zur Bewertung herangezogen werden:

- › Dauer der Stausituation: Wie lange hält eine Stausituation an?
- › Ort der Stausituation: Wo befindet sich die Stausituation?
- › Ortsbezogene akkumulierte Staudauer: Innerhalb von Messkacheln die Zeitspannen aufsummieren, innerhalb derer das Staukriterium erfüllt war (bspw. anhand von Heatmaps o.ä.)
- › Individuelle Einzelstauzeiten: Wie lange befindet sich eine Person in einer Stausituation?
- › Individuelle Gesamtstauzeiten: Wie lange befindet sich eine Person während der gesamten Räumung in Stausituationen (Miteinbeziehen von konsekutiven Stausituationen)?
- › Staugröße: Anzahl der beteiligten Personen
- › Stauausdehnung: Wie weit breitet hat sich ein Stau räumlich aus?
- › Abweichung zu einem baurechtlich konformen Szenario

Folgende Randbedingungen sollten in die Beurteilung der Bewertungskriterien mit einbezogen werden:

- › Anlass der Räumung
- › Motivation der Personen
- › Nutzungsart
- › Weitere, für das Szenario relevante Faktoren

Die Festlegung von Grenzwerten dieser Kriterien sollte mit der genehmigenden Behörde vorab abgestimmt werden.

5 Beispiel: Räumung eines dreistöckigen Gebäudes (in Anlehnung an RiMEA Test 8)

Um die theoretischen Ausführungen mit Leben zu füllen, wird im Folgenden anhand des RiMEA Tests 8 eine Stauererkennung mit der Software crowd:it beispielhaft durchgeführt.

5.1 Szenarienbeschreibung

Das Gebäude besteht aus zwei identischen Stockwerken mit jeweils 160 Personen in OG1 und OG2 sowie 152 Personen im EG. Insgesamt befinden sich in dem Gebäude 472 Personen.

Es existiert ein Fluchtweg über eine 2m breite Treppe auf der rechten Seite des Gebäudes (siehe Abbildung 2).

Die Population wird standardmäßig gewählt, alle Personen laufen gleichzeitig los, um eine Maximalbelastung des Fluchtwegs zu erzeugen.

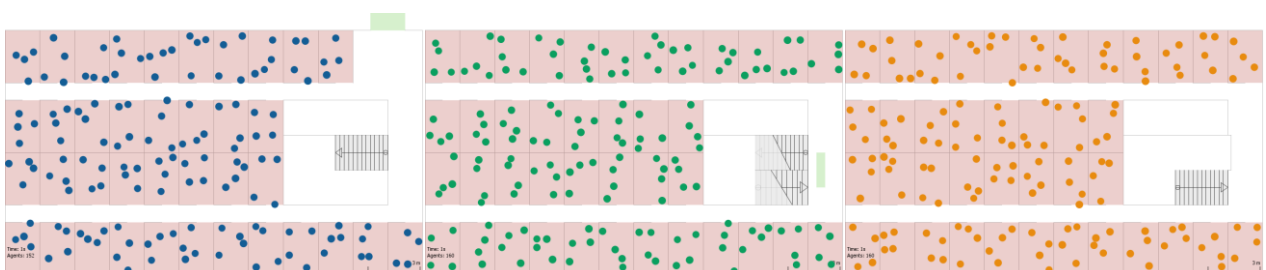


Abbildung 2 Die drei Stockwerke (EG, 1.OG, 2.OG - von links nach rechts) mit ihrer Anfangsbelegung

Um mit der Analyse zu beginnen, betrachten wir zunächst den Räumungsverlauf:

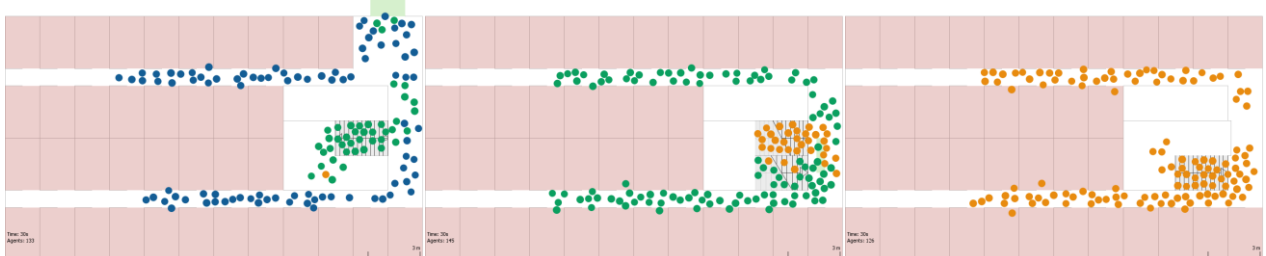


Abbildung 3 Räumungsverlauf nach 30 Sekunden

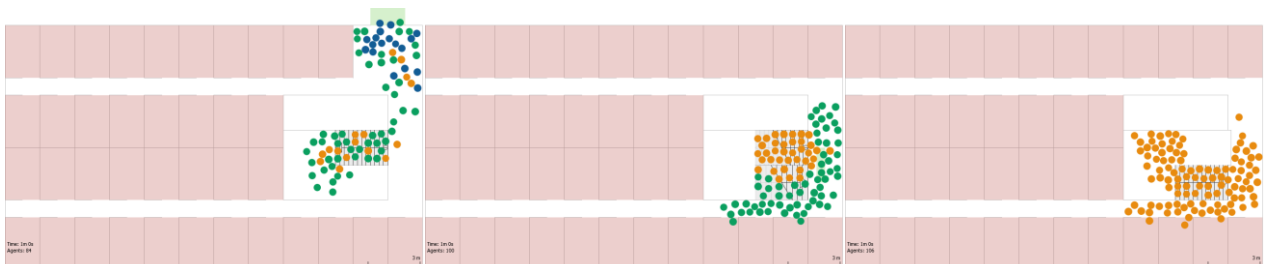


Abbildung 4 Räumungsverlauf nach 1 Minute

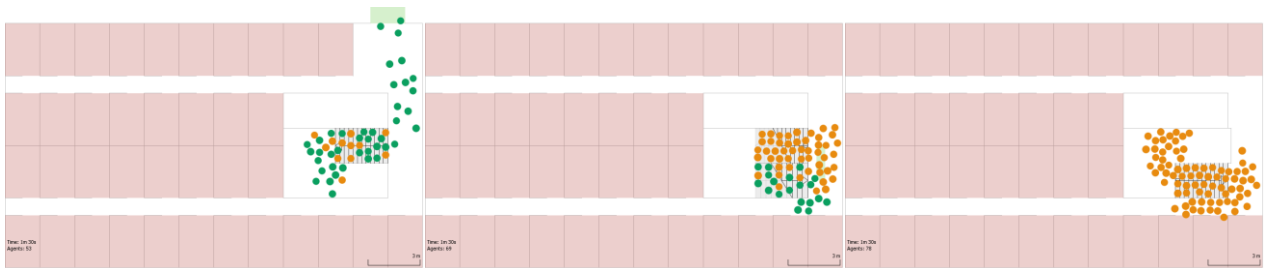


Abbildung 5 Räumungsverlauf nach 1,5 Minuten

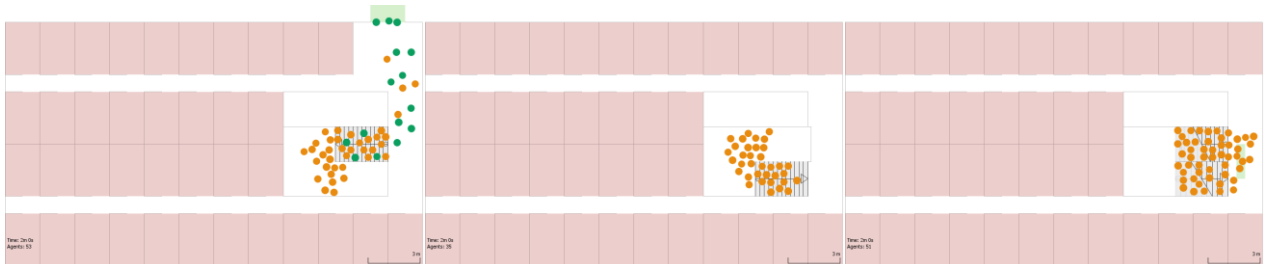


Abbildung 6 Räumungsverlauf nach 2 Minuten

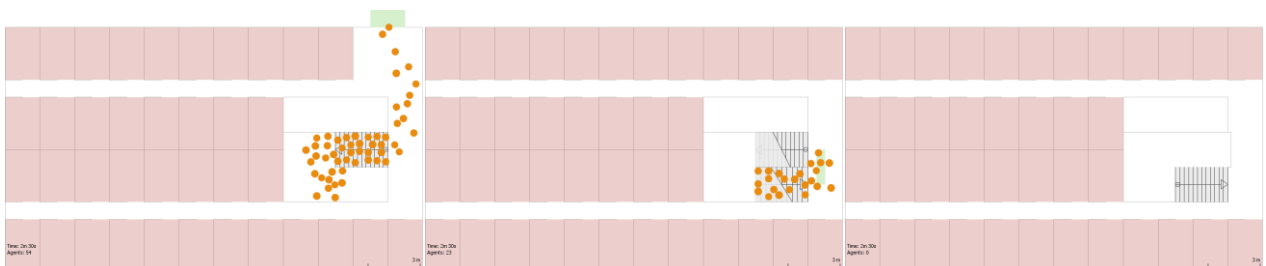


Abbildung 7 Räumungsverlauf nach 2,5 Minuten

Der Räumungsverlauf zeigt auf, dass sich die Personen auf dem 2.OG und auch auf dem 1.OG stauen. Der Stau im 2.OG hält erwartungsgemäß am längsten an, sobald sich die Personen unterhalb des 1.OGs befinden, treten keine weiteren Stauungen auf.

5.2 Auswertung der Simulation

In der weiteren Analyse fokussieren wir uns also auf die beiden Stockwerke 1.OG und 2.OG.

Um zu analysieren, ab wann welche Bereiche geräumt sind, benutzen wir sogenannte RSET (Required Safe Egress Time)-Karten: Hier wird jede Kachel nach dem Zeitpunkt eingefärbt, in dem die letzte Person diese Kachel betreten hat. So kann auf einen Blick erkannt werden, in welchen Bereichen sich besonders lange Personen aufhalten. Je höher die Zeit, desto dunkler werden die Kacheln eingefärbt.

Die Karten (siehe Abbildung 8) zeigen, dass das 2.OG nach 138 Sekunden, also ca. als zweieinviertel Minuten geräumt ist; das 1.OG nach 161 Sekunden (2:41 Minuten) und die letzten Personen haben das Gebäude über das EG nach gut drei Minuten verlassen.

Zudem ist zu erkennen, dass die Gänge auf allen drei Stockwerken relativ schnell und nach derselben Zeit geleert sind, es aber vor den Treppen zu höheren Werten RSET-Zeiten kommt.

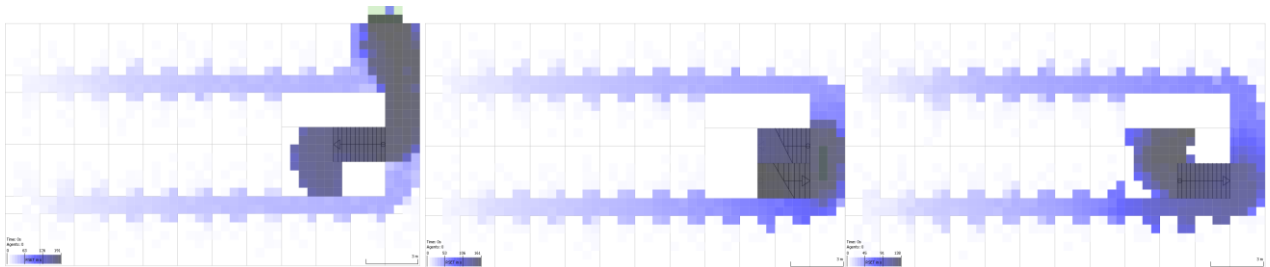


Abbildung 8 RSET-Karten für EG, 1.OG und 2.OG (von links nach rechts): Je dunkler der Bereich eingefärbt ist, desto höher die Zeit

5.2.1 Dauer der Stausituation und räumliche Ausdehnung

In diesem Schritt werden die Stauzeiten der Personen auf ihrem Weg ins Freie näher untersucht. Dazu definieren wir eine Grenzgeschwindigkeit von 0.4 m/s, da wir sonst auf den Treppen Personen als im Stau befindlich definieren würden, obwohl sie sich ggfs. frei bewegen können. (In dem hier verwendeten Modell werden Personen auf Treppen auf ca. 0.45 – 0.6 m/s horizontaler Geschwindigkeit abgebremst).

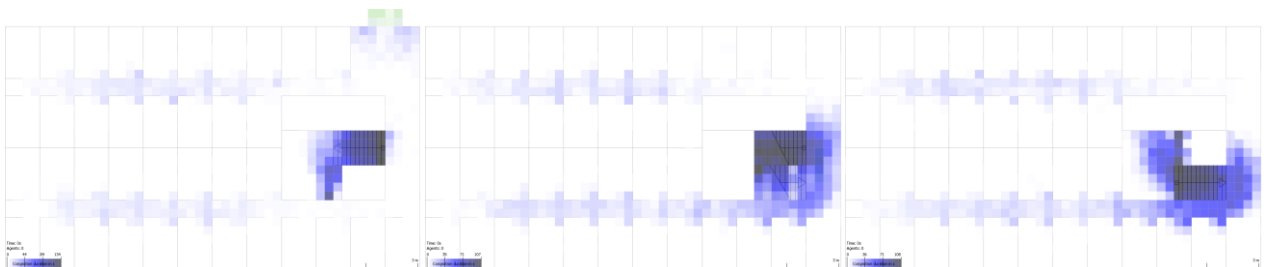


Abbildung 9 Staukarten für EG, 1.OG und 2.OG (von links nach rechts): Je dunkler der Bereich eingefärbt ist, desto länger besteht ein Stau

In Abbildung 9 werden Staukarten gezeigt, die die Dauer einer Stauung lokal visualisieren: Dazu wird überprüft, ob sich innerhalb einer Kachel eine Person mit einer Geschwindigkeit kleiner der Grenzgeschwindigkeit befindet. Die Gesamtdauer wird visualisiert; je länger sich Personen mit geringerer Geschwindigkeit in dem Bereich befinden, desto dunkler wird dieser Bereich eingefärbt. Die Analyse zeigt, dass sich die Stauungen vor allem vor den Treppen ausbilden und sich nur geringfügig in die Gänge ausbreiten.

5.2.2 Staugröße

Betrachten wir nun im nächsten Schritt die Gesamtzahl der Personen, die sich im Stau befinden: Es befinden sich gleichzeitig etwas weniger als die Hälfte der Personen im Stau. Die Anzahl der Personen nimmt nach einigen Sekunden ab auf etwas mehr als 100 Personen, bevor die Zahl wieder ansteigt und dann parallel zur Kurve der im Szenario gesamt befindlichen Personen verläuft. Dies

bedeutet, dass die Personen bis zum EG im Stau laufen. Der Knick zu Beginn beschreibt die Räumung des EGs. Hier bildet sich ein kurzer Stau aus, der sich dann aber schnell auflöst.

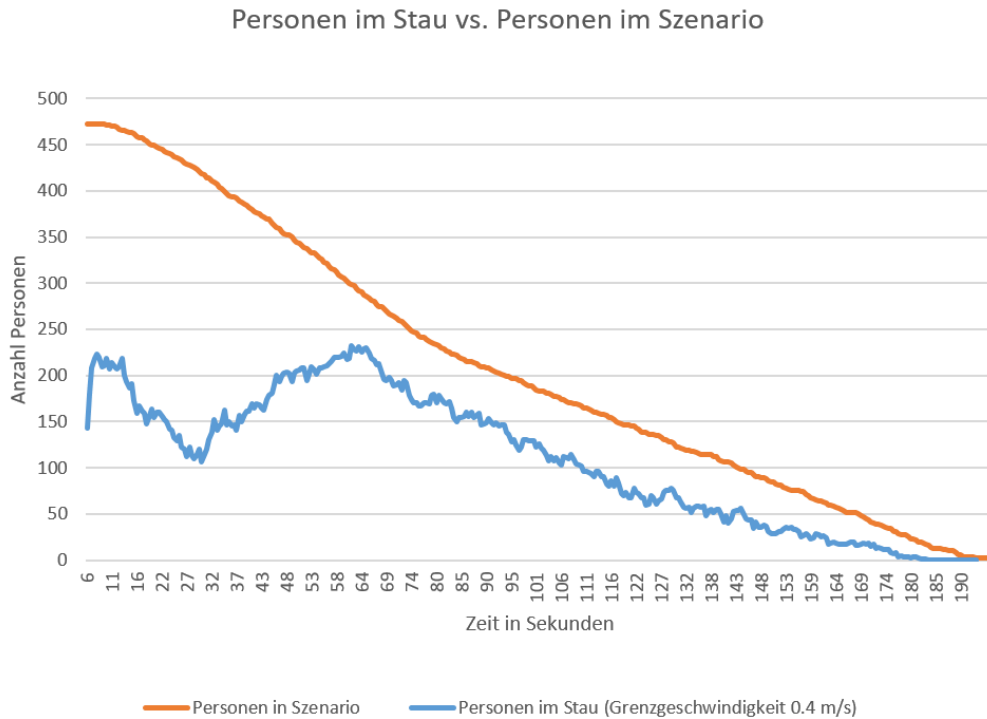


Abbildung 11 Personen im Stau vs. Personen im Szenario

5.2.3 Individuelle und akkumulierte Stauzeiten

Als nächstes betrachten wir die individuellen Stauzeiten, sowohl pro Stauung als auch kumuliert. Die Ergebnisse sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**2 abgebildet.

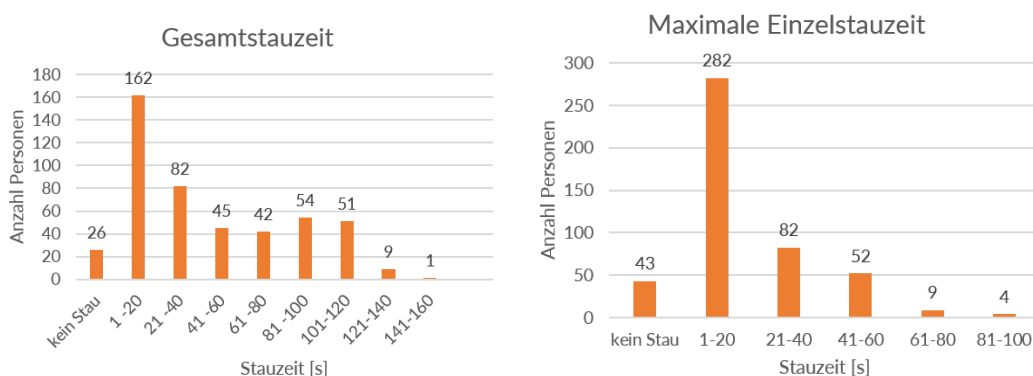


Abbildung 102 Stauzeiten

Zu erkennen ist, dass sich ein Großteil der Personen für weniger als 20 Sekunden in einem Stau befindet, bevor sie sich wieder schneller bewegen können.

Auch die kumulierten Stauzeiten bewegen sich hauptsächlich im Bereich unter 20 Sekunden, einige Personen bis 40 Sekunden.

Die maximale kumulierte Stauzeit liegt bei etwas über zwei Minuten, allerdings für weniger als 3% der Personen.

5.3 Bewertung der Ergebnisse

Diese beispielhafte Analyse liefert uns zusammenfassend folgende Werte:

- › Das Gebäude ist nach etwas über 3 Minuten geleert;
- › Der längste Stau befindet sich in OG2 und dauert auf der Treppe bis zu 109 Sekunden, also knapp 1:40 Minuten.
- › Betrachtet man die individuellen Stauzeiten der Personen, so liegen diese für mehr als 85% der Personen unterhalb von 40 Sekunden.
- › Aus der Staukarte ist zudem herauslesbar, dass sich die Stauungen nicht auf weite Bereiche ausdehnen, sondern sich vor allem im Bereich der Treppen befinden.

Aus dieser Analyse könnte nun geschlossen werden, dass die auftretenden Stauungen nicht kritisch sind, da

1. sie keine Fluchtwege behindern oder beeinflussen und sich lokal beschränken,
2. die individuelle Gesamtstauzeit unterhalb von einer Minute für knapp 70% der Personen, unterhalb von zwei Minuten für über 97% liegt.

Die durchgeführte beispielhafte Analyse zeigt, dass eine Staubewertung mit den hier festgelegten Kriterien und den Analysen belastbare Ergebnisse liefern kann und dem Ersteller von Gutachten ein hilfreiches Werkzeug bietet. Es können verschiedene Staukriterien untersucht, visualisiert und ausgewertet werden.

Im Einzelfall sollte jeweils überprüft werden, welche Analysen entsprechend der vorliegenden Situation zielführend sind und welche Kriterien anzuwenden sind.

Es ist zu sehen, dass die Analyse und Bewertung von Stauungen mithilfe von mikroskopischen Räumungssimulationen möglich ist – aber auch das Urteilsvermögen von Experten erfordert. Denn die Interpretation kann nicht pauschaliert sondern muss vielmehr von Fall zu Fall gemacht werden.

6 Zusammenfassung

Um zu identifizieren, was ein Stau ist und ab wann er kritisch werden könnte, eignen sich Räumungssimulationen sehr gut. Die Einflussfaktoren Kapazitätsüberlastung (Zufluss >> Abfluss), hohe Dichte, Geschwindigkeitsreduktion und Zeitverlust können in Kriterien umgewandelt werden, welche von mikroskopischen Simulationsprogrammen erfasst werden. Als besonders hilfreich für

solche Analysen haben sich die Kriterien Staudauer und Stauausbreitung, Geschwindigkeit, individuelle Anstehzeit sowie Gesamtstauzeit herauskristallisiert. Die verschiedenen Kriterien auszuwerten und in ein dem Szenario angemessenes Verhältnis zu setzen, obliegt jedoch nach wie vor dem Fachexperten. Denn er oder sie entscheidet, welche Kenngrößen im vorliegenden Szenario relevant sind, um eine aussagekräftige Bewertung der Situation durchzuführen. Räumungssimulationen unterstützen mit einem dynamischen, ganzheitlichen Blick auf eine Situation und können damit die Analyse und Vorbereitung deutlich erleichtern, damit Katastrophen in Zukunft hoffentlich vermieden werden können.

7 Literaturverzeichnis

- [1] The New York Times (2015): Death Toll From Hajj Stampede Reaches 2,411 in New Estimate (10.12.2015), <https://www.nytimes.com/2015/12/11/world/middleeast/death-toll-from-hajj-stampede.html>, zugegriffen: 14.02.2019
- [2] The New York Times (2017): Six Are Charged in 1989 Hillsborough Stadium Disaster in England (28.06.2017), https://www.nytimes.com/2017/06/28/world/europe/uk-hillsborough-soccer-stadium-charges.html?smid=fb-share&fbclid=IwAR1FcglxzlqjklhDD7n_N8022PmnJvebPEIW87tFmx5AhoVSb84y2mWzbg, zugegriffen: 20.02.2019
- [3] Wikipedia (2019): Unglück bei der Loveparade 2010, https://de.wikipedia.org/wiki/Ungl%C3%BCck_bei_der_Loveparade_2010, zugegriffen: 20.02.2019
- [4] Künzer, L., Hofinger, G. (2018): Psychologische Einflussfaktoren in Räumungen und Evakuierungen und Hinweise zu Flucht- und Rettungswegen. In: Battran, L., Mayr, J. (Hrsg.): Handbuch Brandschutzatlas. Grundlagen - Planung - Ausführung (4. aktualisierte Aufl.). FeuerTrutz, Köln
- [5] Duden (2019): Stau, <https://www.duden.de/rechtschreibung/Stau>, zugegriffen: 24.07.2019
- [6] „Leitfaden zur Verwendung der multimodalen Bewertungsverfahren von FLOW für Planer“, Flow H2020 Projekt No 635998; http://www.rupprecht-consult.eu/uploads/tx_rupprecht/FLOW_D3.5_Implementers_Guide_Multimodal_Approach_Fu%C3%9Fg%C3%A4nger_Radfahrer_und_Staus_DE_.pdf, zugegriffen: 30.07.2019
- [7] Dr. Oberhagemann, H. (2012): Statische und dynamische Personendichten bei Großveranstaltungen. Technischer Bericht TB 13-01, vfdb
- [8] ARGEBAU (2014): Muster-Verordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (MVStättVO), Fassung Juni 2014, www.is-argebau.de
- [9] Mehl, Friedrich: Bautechnische Nachweise zum Brandschutz nach Bauordnungsrecht der Länder, in: Fouad Nabil A. (Hrsg.): Bauphysik Kalender 2006, Verlag Ernst & Sohn 2006.
- [10] Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen (2009), Version 2.2.1
- [11] Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen (2016), Version 3.0.0, https://rimeaweb.files.wordpress.com/2016/06/rimea_richtlinie_3-0-0-_d-e.pdf, zugegriffen: 30.07.2019
- [12] Weidmann, U. (1993): Transporttechnik der Fussgänger: Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literaturauswertung)
- [13] BaSiGo Experimente: https://www.fz-juelich.de/ias/jsc/EN/Research/ModellingSimulation/CivilSecurityTraffic/Projects/BaSiGo/_node.html, zugegriffen: 30.07.2019