



Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

Untersuchung des Einflusses von Menschenmengen als Widerstandsfaktor auf die Standortplanung von Rettungskräften bei Veranstaltungen

vorgelegt von

Tom Barnig

104205, UNIGIS MSc Jahrgang 2015

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter: Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Luxemburg, den 6. November 2016

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig verfasst habe, dass ich sie zuvor an keiner anderen Hochschule und in keinem anderen Studiengang als Prüfungsleistung eingereicht habe und dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderweitigen fremden Äußerungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Luxemburg, den 6. November 2016

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Barnig', is written over two horizontal lines.

Tom Barnig

Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit untersucht den Einfluss von Menschenmengen als Widerstandsfaktor auf die Einsatz- und Standortplanung von Rettungskräften bei Veranstaltungen. Insbesondere wird untersucht, welchen Einfluss eine durch eine Menschenmasse eingeschränkte Fortbewegung auf die zeitliche und räumliche Abdeckung eines Veranstaltungsgeländes durch die Rettungstrupps hat. Von den Ergebnissen werden einsatztaktische Hinweise abgeleitet, wie die Einsatzplanung bei Veranstaltungen unter Berücksichtigung der Menschenmengen verbessert werden kann.

Zahlreiche Autoren haben in ihren Arbeiten einen einschränkenden Effekt von Menschenmengen auf die Fortbewegung von Individualpersonen und Gruppen nachgewiesen. Dabei wirkt sich insbesondere die Personendichte auf die Fortbewegungsgeschwindigkeit aus, da die jeweiligen anderen Personen als Hindernisse bei der Bewegung durch eine Menge angesehen werden können. Je höher dabei die Dichte, umso größer ist der bremsende Einfluss auf die Geschwindigkeit, bis hin zu einer maximalen Dichte von ca. 6 Personen pro Quadratmeter, ab wo keine Fortbewegung mehr möglich ist. Auch für die Bewegung von Rettungskräften wurde der gleiche Einfluss der Personendichten nachgewiesen.

Zur Bestimmung des genauen Einflusses wurde eine praktische Untersuchung an vier Fallbeispielen unter Zuhilfenahme eines geographischen Informationssystems durchgeführt. Für vier reale Fallbeispiele wurden die Personendichten erhoben und mittels geoinformatischen Werkzeugen als Kostenfaktor für eine Netzwerkanalyse verarbeitet. Anschließend wurden die Einflüsse zwischen einer widerstandsfreien und einer widerstandsbehafteten Fortbewegung durch Berechnung von Einzugsgebieten und Location-Allocation-Analysen verglichen.

Das Ergebnis der Arbeit zeigt, dass Menschenmengen durchaus einen Einfluss auf die Fortbewegung von Rettungskräften haben können und somit auch im Rahmen der Einsatzplanung berücksichtigt werden sollten. Je höher die Personendichte, umso signifikanter ist dabei der Widerstandseinfluss der Menschenmenge. Die zeitliche und räumliche Abdeckung eines Veranstaltungsgeländes durch Rettungskräfte von vorgegebenen Standorten ist deshalb bei hohen Dichten schlechter als bei geringeren Dichten. Der Widerstandseffekt ist bei kleinen Personendichten ($\leq 0,6 \text{ P/m}^2$) für die Einsatzplanung jedoch in allen Hinsichten vernachlässigbar gering. Erst bei hohen durchschnittlichen Dichten ($\geq 1,9 \text{ P/m}^2$) innerhalb einer vorgegebenen Fläche sollte die Einsatzplanung die Verteilung der Menschenmengen auf dem Veranstaltungsgelände zwingend mit berücksichtigen.

Abstract

The objective of the thesis is to analyse the influence of large crowds on the safety and position planning for rescue services during events. The thesis investigates the effect of crowd-densities on the movement of rescue units and the resulting impact on their responding times in case of emergency. Based on the results are elaborated procedures to improve the safety planning of the rescue services for events.

Several researches have shown that the density in a crowd has a negative impact on the velocity of moving persons. This resistance is due to the other persons which act as obstacles while crossing the crowd. The limiting factor is a density of about 6 persons per square meter, where locomotion will no longer be possible. For small densities, the movement can be considered as nearly resistance free. It is also demonstrated, that the same negative effect concerns the moving of rescue units in crowds.

To analyse the impact of this density related resistance on the position planning of rescue units, a practical research has been done on four real case studies with the aid of a network analysis in a geographic information system. The costs in the networks are based on the collection of real density data for the four case studies and the analysis is conducted on a comparison of a resisting and a resistance-free movement while calculating service areas and solving location-allocation-problems.

The results of the analyse shows, that density related resistance moving has in principal an impact on the responding times of rescue units during events. The effect is negligible for small densities ($\leq 0,6 \text{ p/m}^2$), but will get significant for high densities ($\geq 1,9 \text{ p/m}^2$). In presence of high densities, it is possible that the responding times will exceed the determinate helping time frames only due to the reduction of the velocity while crossing the crowds. Secondary it was demonstrated that for high densities, the positioning of the rescue units should be adapted while focussing on the density hot spots to guarantee a given responding time for the whole area. It was demonstrated indeed, that the resistance effect of the densities is too small to request an increase of the number of rescue units as compensation, considering that a risk based dimensioning of the necessary number of rescue units has been done.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	1
Zusammenfassung	2
Abstract	3
Tabellenverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	6
Formelverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
Einleitung	10
I. Kapitel	12
1 Allgemeine Grundlagen	13
1.1 Rechtlicher Rahmen.....	13
1.2 Planungsgrundsätze für Sanitätsdienste.....	13
1.3 Methoden der Standortplanung von Sanitätseinheiten bei Großveranstaltungen	15
2 Menschenmengen als Widerstandsfaktor	16
2.1 Statische und dynamische Personendichten	16
2.2 Fortbewegung von und in Menschenmengen	17
2.3 Einfluss der Personendichten auf die Fortbewegung von fußläufigen Rettungskräften	20
3 Prinzipien der Modellierung und Simulation	24
II. Kapitel	26
4 Prinzipien der Modellierung im GIS	27
4.1 Rahmenbedingungen.....	27
4.2 Methodenwahl: Netzwerkanalyse vs. Kostenoberfläche-Analyse	28
4.3 Georeferenzierung eines Veranstaltungsgeländes	30
4.4 Erstellung eines allgemeinen Bewegungsnetzwerkes	33
4.5 Erhebung der Personendichten als Widerstandsfaktor	40
4.6 Anwendung der Widerstandsfaktoren auf das Bewegungsnetzwerk	44
4.7 Praktische Analyse mittels Network Analyst	46

5	Praktische Analyse anhand von Fallbeispielen.....	49
5.1	Straßenfest mit Feuerwerk.....	49
5.2	Open-Air-Festival	62
5.3	Straßenkünstler-Festival	74
5.4	Open-Air Musikveranstaltung.....	90
III.	Kapitel	102
6	Ergebnisse.....	103
7	Abschlussdiskussion	109
7.1	Einsatztaktische Betrachtung.....	109
7.2	Übertragung auf dynamische Verhältnisse	110
7.3	Simulation und technische Verfeinerung.....	110
IV.	Kapitel	112
8	Literaturverzeichnis	113
9	Anhänge.....	116
9.1	Datensätze	116
9.2	Erhebung der Personendichten - Aufnahmeorte.....	117
9.3	Erhebung der Personendichten - Fotos	122
9.4	Berechnung der Netzwerke.....	131

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Planungsansätze für Sanitätsdienste.....	15
Tabelle 2: Einschränkung der persönlichen Bewegungsfreiheit mit steigender Dichte.....	17
Tabelle 3: Rettungstrupp-Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Personendichte [30].....	22
Tabelle 4: Klassifizierung des interpolierten Dichterasters	44
Tabelle 5: Fallbeispiel 1 - Prozentuale Abdeckung der Einsatzorte.....	58
Tabelle 6: Fallbeispiel 1 - Ergebnisse der Buffer-Untersuchung.....	61
Tabelle 7: Fallbeispiel 1 - Ergebnisse der Standort-Bemessung	62
Tabelle 8: Fallbeispiel 2 - Prozentuale Abdeckung der Einsatzorte.....	69
Tabelle 9: Fallbeispiel 2 - Ergebnisse der Buffer-Untersuchung.....	73
Tabelle 10: Fallbeispiel 1 - Ergebnisse der Standort-Bemessung	73
Tabelle 11: Fallbeispiel 3 - Prozentuale Abdeckung der Einsatzorte.....	83
Tabelle 12: Fallbeispiel 3 - Ergebnisse der Buffer-Untersuchung.....	88
Tabelle 13: Fallbeispiel 3 - Ergebnisse der Standort-Bemessung	89
Tabelle 14: Fallbeispiel 4 - Prozentuale Abdeckung der Einsatzorte.....	97
Tabelle 15: Fallbeispiel 4 - Ergebnisse der Buffer-Untersuchung.....	100
Tabelle 16: Fallbeispiel 4 - Ergebnisse der Standort-Bemessung	101
Tabelle 17: Vergleich der Fallbeispiele.....	103
Tabelle 18: Zusammenfassung der prozentuellen Abdeckung aller potentiellen Einsatzorte.....	104
Tabelle 19: Vergleich der durchschnittlichen Eintreffzeiten nach Abdeckung	105
Tabelle 20: Zusammenfassung der Ergebnisse der Standortoptimierung gegenüber den tatsächlichen Standorten	106
Tabelle 21: Vergleich der Ergebnisse der Standortoptimierung gegenüber den tatsächlichen Standorten.....	106
Tabelle 22: Zusammenfassung der Ergebnisse der widerstandsbehafteten Standortoptimierung gegenüber den widerstandsfrei optimierten Standortpositionen.....	106
Tabelle 23: Zusammenfassung der Ergebnisse der Bemessung der notwendigen Standorte	107

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geschwindigkeit im Zusammenhang mit der Hangneigung nach Tobler.....	19
Abbildung 2: Bewegung von Individuen in Menschenmengen	20
Abbildung 3: Fortbewegungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Personen-Zwischenräume	20
Abbildung 4: Verhältnis zwischen Gehgeschwindigkeit und Personendichte	21
Abbildung 5: Geschwindigkeit eines Rettungstrupps im Vergleich zu einem Fußgänger	22
Abbildung 6: Regressionsfunktion zwischen Geschwindigkeit und Personendichte	23
Abbildung 7: Beispielhafte theoretische Einschränkung der Bewegungsrichtungen	33
Abbildung 8: Durchlaufen einer Menschenmenge.....	34
Abbildung 9: Wegverlängerung beim Überholen einer Person.....	35
Abbildung 10: Prinzip der Wegverlängerung als Skizze	35
Abbildung 11: Beispieldarstellung der Manhattan-Metrik bei zu umlaufenden Hindernissen	36
Abbildung 12: Fortbewegung in der Wabenstruktur	37
Abbildung 13: "Repeating Shapes"-Tool - Select the Region to Cover	38
Abbildung 14: "Repeating Shapes"-Tool - Select Layer Extent	38

Abbildung 15: "Repeating Shapes"-Tool - Select the Shape Type to Create	39
Abbildung 16: "Repeating Shapes"-Tool - Triangle Parameters.....	39
Abbildung 17: Methode zur Abschätzung von Personendichten auf Fotos	42
Abbildung 18: Fallbeispiel 1 - Erfassung der Umrisse des Veranstaltungsgebietes.....	50
Abbildung 19: Fallbeispiel 1 - Vorbereitung der verschiedenen Hindernisse-Datensätze	51
Abbildung 20: Fallbeispiel 1 - Fertiges Untersuchungsgebiet.....	52
Abbildung 21: Fallbeispiel 1 - Verteilung der Aufnahmeorte innerhalb des Untersuchungsgebietes.....	53
Abbildung 22: Fallbeispiel 1 - Manuelle Korrektur zweier falscher GPS-Positionierungen.....	53
Abbildung 23: Fallbeispiel 1 - Parameter der IDW-Interpolation.....	54
Abbildung 24: Fallbeispiel 1 - Ergebnis der IDW-Interpolation	54
Abbildung 25: Fallbeispiel 1 - Auszug aus der Attributtabelle.....	55
Abbildung 26: Fallbeispiel 1 - Verteilung der Rettungstrupps im Untersuchungsgebiet	56
Abbildung 27: Fallbeispiel 1 - Widerstandsfreie Einzugsgebiete	57
Abbildung 28: Fallbeispiel 1 - Widerstandsbehafete Einzugsgebiete	57
Abbildung 29: Fallbeispiel 1 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten	59
Abbildung 30: Fallbeispiel 1 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten (wider.)	59
Abbildung 31: Fallbeispiel 1 - Darstellung der verschiedenen Standorte nach Optimierung	60
Abbildung 32: Fallbeispiel 1 - Buffer-Analyse.....	60
Abbildung 33: Fallbeispiel 1 - Buffer-Analyse der optimierten Standorte.....	61
Abbildung 34: Fallbeispiel 1 - Räumliche Verteilung der bemessenen Standorte	62
Abbildung 35: Fallbeispiel 2 - Georeferenzierung des Geländeplans über Referenzpunkte	63
Abbildung 36: Fallbeispiel 2 – Untersuchungsgebiet.....	64
Abbildung 37: Fallbeispiel 2 - Manuelle Korrektur falscher GPS-Positionierungen	65
Abbildung 38: Fallbeispiel 2 - Verteilung der Messpunkte innerhalb des Untersuchungsgebietes.....	65
Abbildung 39: Fallbeispiel 2 - Parameter der IDW-Interpolation.....	66
Abbildung 40: Fallbeispiel 2 - Ergebnis der IDW-Interpolation	66
Abbildung 41: Fallbeispiel 2 - Beispielauszug aus der Attributtabelle.....	67
Abbildung 42: Fallbeispiel 2 - Verteilung der Rettungstrupps im Untersuchungsgebiet	68
Abbildung 43: Fallbeispiel 2 - Widerstandsfreie Einzugsgebiete	68
Abbildung 44: Fallbeispiel 2 - Widerstandsbehafete Einzugsgebiete	69
Abbildung 45: Fallbeispiel 2 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten	70
Abbildung 46: Fallbeispiel 2 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten (wider.)	71
Abbildung 47: Fallbeispiel 2 - Darstellung der verschiedenen Standorte nach Optimierung	71
Abbildung 48: Fallbeispiel 2 - Buffer-Analyse.....	72
Abbildung 49: Fallbeispiel 2 - Buffer-Analyse der optimierten Standorte.....	72
Abbildung 50: Fallbeispiel 2 - Räumliche Verteilung der bemessenen Standorte	74
Abbildung 51: Fallbeispiel 3 - Erfassung der Umrisse des Veranstaltungsgebietes.....	75
Abbildung 52: Fallbeispiel 3 - Vorbereitung der verschiedenen Hindernisse-Datensätze	76
Abbildung 53: Fallbeispiel 3 - Fertiges Untersuchungsgebiet.....	77
Abbildung 54: Fallbeispiel 3 - Verteilung der Messpunkte innerhalb des Untersuchungsgebietes.....	78
Abbildung 55: Fallbeispiel 3 - Parameter der IDW-Interpolation.....	79
Abbildung 56: Fallbeispiel 3 - Ergebnis der IDW-Interpolation	79
Abbildung 57: Fallbeispiel 2 - Beispielauszug aus der Attributtabelle.....	80
Abbildung 58: Fallbeispiel 3 - Verteilung der Rettungstrupps im Untersuchungsgebiet	81
Abbildung 59: Fallbeispiel 3 - Widerstandsfreie Einzugsgebiete	82

Abbildung 60: Fallbeispiel 3 - Widerstandsbehaftete Einzugsgebiete	83
Abbildung 61: Fallbeispiel 3 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten	84
Abbildung 62: Fallbeispiel 3 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten (wider.)	85
Abbildung 63: Fallbeispiel 3 - Darstellung der verschiedenen Standorte nach Optimierung	86
Abbildung 64: Fallbeispiel 3 - Buffer-Analyse	87
Abbildung 65: Fallbeispiel 3 - Buffer-Analyse der optimierten Standorte.....	88
Abbildung 66: Fallbeispiel 3 - Räumliche Verteilung der bemessenen Standorte	89
Abbildung 67: Fallbeispiel 4 - Erfassung der Umriss des Veranstaltungsgebietes.....	90
Abbildung 68: Fallbeispiel 4 - Vorbereitung der verschiedenen Hindernisse-Datensätze	91
Abbildung 69: Fallbeispiel 4 - Fertiges Untersuchungsgebiet.....	92
Abbildung 70: Fallbeispiel 4 - Manuelle Korrektur falscher GPS-Positionierungen	92
Abbildung 71: Fallbeispiel 4 - Parameter der IDW-Interpolation.....	93
Abbildung 72: Fallbeispiel 4 - Ergebnis der IDW-Interpolation	93
Abbildung 73: Fallbeispiel 4 - Beispielauszug aus der Attributtabelle.....	94
Abbildung 74: Fallbeispiel 4 - Verteilung der Rettungstrupps im Untersuchungsgebiet	95
Abbildung 75: Fallbeispiel 4 - Widerstandsfreie Einzugsgebiete	96
Abbildung 76: Fallbeispiel 4 - Widerstandsbehaftete Einzugsgebiete	96
Abbildung 77: Fallbeispiel 4 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten	98
Abbildung 78: Fallbeispiel 4 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten (wider.)	98
Abbildung 79: Fallbeispiel 4 - Darstellung der verschiedenen Standorte nach Optimierung	99
Abbildung 80: Fallbeispiel 4 - Buffer-Analyse	99
Abbildung 81: Fallbeispiel 4 - Buffer-Analyse der optimierten Standorte.....	100
Abbildung 82: Fallbeispiel 4 - Räumliche Verteilung der bemessenen Standorte	101
Abbildung 83: Vergleich der Abdeckung zwischen widerstandsfreier und widerstandsbehafteter Fortbewegung	104

Formelverzeichnis

Formel 1: Geschwindigkeitsformel nach Nelson	18
Formel 2: Hiking-Funktion nach Tobler.....	19
Formel 3: Regressionsfunktion zwischen Geschwindigkeit und Personendichte	23
Formel 4: Geschwindigkeitsdifferential	28
Formel 5: Berechnung der durchschnittlichen Personendichte	40
Formel 6: Rettungstruppgeschwindigkeit.....	44
Formel 7: Angepasste Rettungstruppgeschwindigkeit.....	45
Formel 8: Ermittlung der Durchlaufzeit der Kante.....	45

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
BHP	Behandlungsplatz
EL	Einsatzleitung
GIS	Geographische(s) Informationssystem(e)
KTW	Krankentransportwagen
OSM	OpenStreetMap
RTW	Rettungswagen
UHS	Unfallhilfsstelle

Einleitung

Veranstaltungen aller Art gehören heutzutage zum sozialen, kulturellen und sportlichen Gesellschaftsalltag. Vom Public Viewing über Stadtläufe bis hin zu Rockfestivals ist die angebotene Bandbreite dabei so vielfältig wie das Interesse der Besucher. Auch der Umfang solcher Veranstaltungen reicht vom kleinen Dorffest mit wenigen hundert Besuchern bis hin zum Großevent mit Besucherzahlen im Millionenbereich. Die Schwelle zur Großveranstaltung ist dabei fließend abhängig von der lokal verfügbaren Infrastruktur der gastgebenden Kommune im Verhältnis zur erwarteten Besucheranzahl, wie die Feuerwehr München in einer Handreichung zur sicherheitsrechtlichen Beurteilung solcher Events feststellt [32]. Allen Veranstaltungen gemeinsam ist jedoch immer das Ziel eines höchstmöglichen Sicherheitsniveaus. Neben den Aufgaben der Ordnungsbehörden und der polizeilichen Gefahrenabwehr sind deshalb vor allem die nicht-polizeilichen Gefahrenabwehrorganisationen in den Bereichen Sanitätsdienst und Brandschutz gefordert.

Trotz umfassender verfügbarer Fachliteratur, aktuellem Forschungsstand und vorhandenen Bemessungsmethoden bleibt die Einsatzplanung von Sanitätsdiensten für Großveranstaltungen aufgrund der Vielfältigkeit der Veranstaltungsarten und -orte immer noch eine Herausforderung. Während eine quantitative Bemessung der notwendigen Ausrüstungsstärke durch etablierte Bemessungsverfahren nachvollziehbar und begründbar anhand von Parametern (Anzahl an Besuchern, Veranstaltungsart, etc.) durchzuführen ist, fehlen für die räumliche Einsatzplanung, insbesondere die flächendeckende Verteilung der Einsatzkräfte auf dem Veranstaltungsgelände, oftmals objektive Anhaltspunkte und Erfahrungswerte. Es besteht somit die Gefahr einer ressourcenintensiven und ineffizienten Verteilung der Einheiten auf dem Veranstaltungsgelände. Gleichzeitig kann nicht zwingend garantiert werden, dass, wie für Rettungsdienste eigentlich üblich, für alle Bereiche des Veranstaltungsgeländes eine maximale Hilfsfrist eingehalten werden kann. Aus diesem Grund wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Ansätze entwickelt, um die Standortplanung von Einsatzkräften bei Großveranstaltungen zu optimieren.

Zusätzlich besteht international eine intensive Forschungsaktivität im Bereich Crowd Analysis und Crowd Management. Ziel dieses Forschungsgebietes ist vor allem das Verständnis vom physikalischen, physiologischen und psychologischen Verhalten von Individuen und Gruppen in Menschenmengen [24]. Die Modellierung dieses Verhaltens durch verschiedene Ansätze findet breite Anwendung insbesondere im Simulationsbereich. Vor allem im Feld der Evakuierungssimulation von Gebäuden und Flächen werden diese Methoden vielseitig eingesetzt.

Aus den obigen Aussagen lässt sich deshalb die Vermutung ableiten, dass die Verteilung einer Menschenmenge auf einem Veranstaltungsgelände die zeitliche Erreichbarkeit durch Einsatzkräfte – welche sich ihren Weg durch die Menschentraube bahnen müssen - signifikant im Sinne eines Widerstandsfaktors beeinflussen kann. Ziel der vorliegenden Arbeit soll es deshalb sein, die oben genannten Prinzipien der qualitätsorientierten Standortplanung von Einsatzkräften bei Veranstaltungen unter Berücksichtigung des Einflusses der Menschenmengen auf dem Gelände zu untersuchen. Als Plattform hierfür soll ein Geographisches Informationssystem dienen, um insbesondere den entscheidenden räumlichen Aspekt bei der Standortplanung zu berücksichtigen.

Dabei sollen insbesondere folgende Fragestellungen untersucht und diskutiert werden:

- ❖ *Hat die Verteilung der Menschenmassen auf einem Veranstaltungsgelände einen signifikanten Einfluss auf die zeitliche Erreichbarkeit verschiedener Bereiche durch die Einsatzkräfte?*
- ❖ *Welchen Einfluss hat die Verteilung der Menschenmengen auf einem Veranstaltungsgelände auf die Standortplanung von Einsatzkräften und sollte dies zukünftig bei der Einsatzplanung für Großveranstaltungen berücksichtigt werden?*

- ❖ *Ist bei Veranstaltungen mit großen zu erwartenden Menschenmengen eine Erhöhung der bemessenen Einheiten aufgrund des widerstandsbehafteten Vorankommens notwendig, um eine vorgegebene Eintreffzeit einhalten zu können?*
- ❖ *Können allgemeine Empfehlungen abgeleitet werden, wie ein Einsatzplaner auch ohne geoinformatische Werkzeuge die Standortplanung seiner Einheiten unter Einschätzung der zu erwartenden Besucherzahlen und Verteilung optimieren kann?*

I. **Kapitel**
Grundlagen und Forschungsstand

1 Allgemeine Grundlagen

1.1 Rechtlicher Rahmen

Die Charakteristika von Menschenmengen aus physikalischer, psychologischer und ingenieurwissenschaftlicher Sicht waren und sind das Untersuchungsthema zahlreicher Forschungsprojekte. Allgemeines Ziel ist ein besseres Verständnis der statischen und dynamischen Verhaltens- und Bewegungsprozesse in großen Menschenmengen.

Viele Anwendungsgebiete ziehen aus diesen Forschungsthemen ihren Nutzen. Typische Beispiele sind sicherheitsbezogene Themengebiete wie das Crowd Management bei Großveranstaltungen oder die Evakuierungsplanung bei Gebäuden, aber auch zum Beispiel die aus gewerblicher Sicht bewusste Lenkung von Personenströmen in Einkaufszentren oder Vergnügungsparks [24].

Für Objekte und Veranstaltungen mit großen Personenzahlen sind aus baurechtlicher Sicht höhere sicherheitstechnische Anforderungen vorgesehen. Dies ermöglicht, aus den Geltungsbereichen der jeweiligen nationalen Bau- und Brandschutzvorschriften die Mindestanzahl an Personen abzuleiten, ab wann man von einer Menschenmenge aus rechtlicher Sicht sprechen kann:

- **Luxemburg:** 100 Personen [21]
- **Österreich:** 100 Personen [20]
- **Deutschland:** 200 Personen [14]
- **Schweiz:** 100 Personen [45]

Allgemein kann somit eine Personenanzahl ab 100 Personen als Menschenmenge angesehen werden. Entscheidend ist dabei jedoch auch der räumliche Faktor, auf welche Fläche sich diese Personen verteilen. Hierbei sprechen die oben genannten Vorschriften übereinstimmend von Veranstaltungsräumen, das heißt klar abzugrenzende (zusammenhängende) Räume mit definierten Ein- und Ausgängen, in denen sich diese Personenanzahl aufhält.

1.2 Planungsgrundsätze für Sanitätsdienste

Die Notwendigkeit eines Sanitätsdienstes bei Veranstaltungen wird in der Regel rechtlich gefordert. In Deutschland wird die Notwendigkeit eines Sanitätsdienstes zum Beispiel nach §41 der Versammlungsstättenverordnung gefordert [14], in Luxemburg wird die Vorhaltung von Einsatzkräften analog in den Brandschutzvorschriften der Gewerbeinspektion und der Berufsfeuerwehr Luxemburg beschrieben [25, 26].

Die Hauptaufgabe eines Sanitätsdienstes liegt in der schnellstmöglichen qualifizierten Patientenversorgung vor Ort. Sanitätsdienste werden gleichzeitig aber auch zur Entlastung des öffentlichen Rettungsdienstes eingesetzt [46].

Ein Sanitätsdienst setzt sich in der Regel aus folgenden Strukturen zusammen:

- Die **Einsatzleitung** (EL) führt und koordiniert alle eingesetzten Rettungseinheiten vor Ort.
- Eine **Unfallhilfsstelle** (UHS) oder **Behandlungsplatz** (BHP) ist eine ortsfeste Struktur verschiedenster Ausmaße und Art. UHS und BHP können in Form eines Rettungsfahrzeuges, eines Containers, eines Zeltes oder auch in Gebäuden vorkommen. Sie ermöglichen die geschützte Versorgung von Patienten vor Ort, um dadurch unnötige Transporte ins Krankenhaus zu vermeiden.
- Ein **Rettungstrupp** ist eine mobil eingesetzte Einheit auf dem Veranstaltungsgelände. Rettungstrupps bestehen in der Regel aus 2-3 Einsatzkräften und sind mit Material zur Ersten Hilfe ausgerüstet. Je nach Ausmaße des Veranstaltungsgeländes können Rettungstrupps zu Fuß, per Fahrrad, zu Pferd oder mittels motorisierten Fahrzeugen (Motorrad, Quad, PKW, Rettungswagen...) unterwegs sein.

- Ein **Rettungsmittel** dient dem Transport von Patienten auf dem Gelände oder vom Gelände ins Krankenhaus. Je nach Gelände und Dringlichkeit können unterschiedliche Rettungsmittel, von einer einfachen Rolltrage bis hin zum Rettungshubschrauber, eingesetzt werden. Grundsätzlich versteht man unter Rettungsmitteln jedoch motorisierte Kraftfahrzeuge wie Krankentransportwagen (KTW) oder Rettungswagen (RTW).

1.2.1 Planungsansätze

Die Planung von Sanitätsdiensten erfolgt nach verschiedenen Ansätzen:

Erfahrungsbasierter Ansatz

Der erfahrungsbasierte Ansatz ist die einfachste, aber subjektivste Methode zur Planung von Sanitätsdiensten bei Veranstaltungen. Der Planer entscheidet aufgrund seiner Erfahrungswerte über die Anzahl und Einteilung der vorzuhaltenden Kräfte. Die Qualität und das Ergebnis dieser Methode hängen allerdings stark von der Erfahrung und der Kompetenz des Planers ab. Dieser Ansatz wird vor allem für wiederholende Veranstaltungen mit vielen Erfahrungswerten oder für Veranstaltungen kleiner Größe gewählt.

Qualitativer Ansatz

Der qualitative Planungsansatz im Bereich des Rettungswesens wurde insbesondere durch die Einführung 1998 von Qualitätskriterien zur Bedarfsplanung durch die Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in Deutschland bekannt [1]. Ziel dieser Methode ist die Implementierung von Qualitätskriterien, das heißt die Vorgabe eines Schutzzieles, welches mindestens erreicht werden soll. Im Bereich der Sanitätsdienstplanung ist dieser Ansatz bislang jedoch nur wenig verbreitet.

Quantitativer Ansatz

Der quantitative Ansatz ist eine empirische Methodik. Dabei wird insbesondere die vorzuhaltende Einheitsstärke durch eine objektive Berechnungsmethode ermittelt. Als etablierte Methode ist das sogenannte Maurer-Schema zu nennen [23]. Anhand von empirischen Daten einer Vielzahl an Veranstaltungen haben Maurer und Hanno 2005 eine Berechnungsmethode entwickelt, welche aufgrund verschiedener Kriterien (z.B. der Besucherzahl) einen Punktwert aggregiert. Aus diesem Punktwert lässt sich wiederum die vorzuhaltende Anzahl an verschiedenen Sanitätsstrukturen ableiten.

Semi-qualitativer Ansatz

Der semi-qualitative Ansatz verbindet die Vorteile der qualitativen und quantitativen Methoden. Der sogenannte Kölner Algorithmus von Schmidt ist ein Beispiel für einen solchen Ansatz. Nach der Festlegung eines Schutzzieles (qualitativer Aspekt) erfolgt mittels ingenieurwissenschaftlicher Methoden der Bedarfsplanung (quantitativer Aspekt) die Ermittlung der vorzuhaltenden Kräfte aufgrund des zu erwartenden Einsatzaufkommens [31, 39].

1.2.2 Methodenvergleich

Tabelle 1: Planungsansätze für Sanitätsdienste

Ansatz / Methode	Empirische Bedarfsermittlung	Schutzzielorientiert
Erfahrungsbasiert	-	-
Qualitativ	-	X
Quantitativ	X	-
Semi-qualitativ	X	X

Tabelle 1 fasst die verschiedenen oben beschriebenen Planungsansätze nochmal zusammen. Der semi-qualitative Ansatz ist dabei die komplexeste aber dafür weitreichendste Methode, da sie sowohl empirische als auch schutzzielorientierte Kriterien berücksichtigt.

1.3 Methoden der Standortplanung von Sanitätseinheiten bei Großveranstaltungen

Für die Bedarfs- und somit auch die daran gebundene Standortplanung von Rettungseinheiten können in Deutschland die Qualitätskriterien der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren als Leitprinzip angesehen werden [1]. Die AGBF nennt als Kriterien für eine qualitative Planung die Berücksichtigung der Eintreffzeit („Hilfsfrist“), der Funktionsstärke (Anzahl eintreffender Einheiten und Einsatzmittel) sowie des Erreichungsgrades (prozentualer Anteil von Einsätzen mit Einhaltung der beiden anderen Kriterien). Während diese Kriterien eigentlich den Rahmen für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten setzen, können die dort aufgestellten Prinzipien aber auch auf andere Bereiche, wie zum Beispiel die Stärke- und Standortplanung von Einheiten bei Veranstaltungen, übertragen werden. In diesem Fall müssen die Kriterien an den jeweiligen Anwendungszweck angepasst werden.

Im deutschsprachigen Raum sind zwei bekannte Arbeiten zur Standortplanung von Sanitätseinheiten bei Veranstaltungen veröffentlicht worden, welche die oben genannten Qualitätskriterien aufgreifen und methodisch umsetzen. Die beiden Arbeiten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer methodischen Ansätze, verfolgen beide jedoch das gemeinsame Ziel einer zeit- und ressourcenoptimierten Standortplanung.

1.3.1 Kölner Algorithmus

Der unter Ziffer 1.2.1 bereits beschriebene Kölner Algorithmus ist eine Weiterentwicklung des in Deutschland etablierten Maurer Schemas um eine Komponente der Raumplanung [39].

Die Anwendung des Algorithmus erfolgt in 3 Schritten:

1. Gefahrenbeurteilung nach statistischen Erfahrungen
2. Raumplanung anhand eines Hilfsfristmodells
3. Stärkeplanung anhand eines Häufigkeitsmodells

Für die Raumplanung als zweiter Schritt wird zuerst ein zeitliches Schutzziel hinsichtlich der maximal zu akzeptierenden Eintreffzeit auf dem gesamten Veranstaltungsgelände durch den Einsatzplaner festgelegt. Schmidt gibt dafür die Empfehlung von 5 Minuten an.

Anschließend kann die maximale Wachbezirksgröße pro Rettungstrupp anhand der möglichen zurückzulegenden Strecke pro Minute Laufzeit berechnet werden. Schmidt unterscheidet dabei zwischen:

- Sitzendes Publikum: Fortbewegung von 100 m pro Minute
- Stehendes Publikum: Fortbewegung von 50 m pro Minute
- Gedrängt stehendes Publikum: Fortbewegung von 25 m pro Minute

Bei einer Hilfsfristvorgabe von 5 Minuten ergeben sich somit je nach Publikumstyp Einzugsbereiche pro Trupp von 125 m bis 500 m. Diese Einzugsgebiete können durch einen frei wählbaren Faktor vergrößert werden, wenn dem Rettungstrupp schnellere Fortbewegungsmöglichkeiten (z.B. Fahrrad) zur Verfügung stehen.

Der Kölner Algorithmus ist somit ein semi-qualitativer Ansatz zur Standortplanung, welcher jedoch auch eine große Erfahrung des Einsatzplaners voraussetzt. Die Standorte müssen weiterhin durch den Planer festgelegt werden und können lediglich durch die Berechnung der Wachbezirksgrößen orientierend überprüft werden. Der Algorithmus berücksichtigt die unterschiedliche Widerstände durch die Menschenmenge zwar, lässt dafür aber alle anderen räumlichen Aspekte (z.B. Hindernisse, Topographie, etc.) außer Acht.

Hinsichtlich des Kölner Algorithmus muss hinzugefügt werden, dass diese 5 Minuten nur für räumlich eng zusammenhängende Veranstaltungsgelände realistisch anwendbar sind, welche durch fußläufige Rettungseinheiten abgedeckt werden. Insbesondere bei großflächigen Veranstaltungsbereichen (zum Beispiel Marathonlauf durchs Stadtgebiet), ist die Fläche fußläufig nur noch mit einem nicht angemessenen Kräfteansatz abzudecken, sodass andere Rettungsmittel (zum Beispiel Fahrräder, Motorräder, etc.) eingesetzt werden müssen. Hierfür gelten jedoch andere Fortbewegungsmuster als für Fußgänger, was bei einem parallelen Einsatz beider Fortbewegungsarten berücksichtigt werden muss.

1.3.2 Graphentheoretischer Ansatz

Im Rahmen einer Abschlussarbeit hat Julia Drechsel einen auf der Graphentheorie basierenden mathematischen Ansatz zur Standortplanung von Rettungskräften bei Veranstaltungen entwickelt [11]. Die Veranstaltungsfläche modelliert Drechsel als Graphen, wobei die Knoten als mögliche Einsatzorte angesehen werden und die Längen der Kanten zwischen den Knoten die Hilfsfrist (Laufzeit) darstellen. Drechsel versucht durch ihre Modellierung die Anzahl an benötigten Kräften sowie die Hilfsfrist zu minimieren und gleichzeitig die Abdeckung pro Rettungstrupp zu maximieren. Das Modell wird abschließend nach einem mathematischen Optimierungsprinzip gelöst. Diese Methode ist rein quantitativ, da sie die Qualitätskriterien auf deterministischem Weg festlegt und ermittelt.

2 Menschenmengen als Widerstandsfaktor

2.1 Statische und dynamische Personendichten

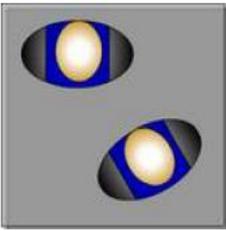
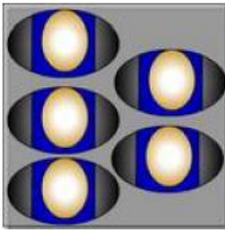
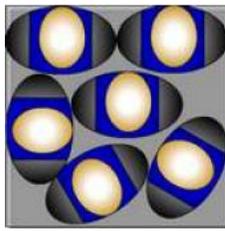
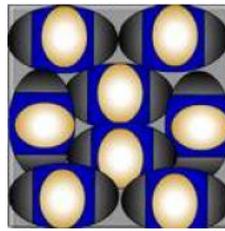
Der technische Bericht „Statische und dynamische Personendichten bei Großveranstaltungen“ ist mittlerweile als eines der Standardwerke zur Bewertung der Charakteristika von Menschenmengen und -dichten aus wissenschaftlicher Sicht anerkannt [35].

Die Bewegungsfreiheit und die möglichen Bewegungsströme in Menschenmengen werden nicht durch die absolute Personenzahl, sondern vor allem durch die lokalen Personendichten bestimmt. Je höher die Dichte, umso eingeschränkter werden die Einzelpersonen in ihrer Bewegungsfreiheit.

Die Personendichte auf definierten Flächen ist somit einer der wichtigsten Aspekte zur Einschätzung von Menschenmengen und wird daher auch im Bereich des Vorbeugenden Brandschutzes oftmals als Planungsgrundlage für die Evakuierung – zum Beispiel laut deutscher Versammlungsstättenverordnung 2 P/m^2 – angenommen [14].

Durch die Körperausmaße von Personen gibt es physikalische Grenzen hinsichtlich möglicher Personendichten. Diese Grenzen sind je nach Publikumszusammensetzung sehr verschieden, da zum Beispiel ein Kind weniger Platzbedarf hat als ein Erwachsener.

Tabelle 2: Einschränkung der persönlichen Bewegungsfreiheit mit steigender Dichte¹

			
2 Pers./m ²	5 Pers./m ²	6 Pers./m ²	8 Pers./m ²

Die in Tabelle 2 dargestellten Abbildungen zeigen die zunehmende Einschränkung der persönlichen Bewegungsfreiheiten von Personen bei steigender Dichte. Grundsätzlich können im europäischen Raum Dichten ab 6 Personen pro Quadratmeter als kritisch angesehen werden. Bei höheren Dichten entstehen durch Menschen verursachte Drücke sowie unkontrollierbare Instabilitäten, welche sich in Wellenform in der Menschenmenge ausbreiten können. Es besteht somit eine hohe Verletzungsgefahr für die betroffenen Personen bis hin zur Gefahr eines Massenphänomens, welches umgangssprachlich als „Massenpanik“ verstanden wird [49].

2.2 Fortbewegung von und in Menschenmengen

Bei der Fortbewegung muss man zwischen der Bewegung von zusammenhängenden Menschengruppen in Strömen und der Bewegung von Individualobjekten innerhalb der Menschenmengen unterscheiden.

Die Fortbewegung von zusammenhängenden Menschengruppen wird als Personenstrom bezeichnet. Das Verhalten von Personenströmen wird dabei extrem von äußeren Einflüssen beeinflusst. Gerichtete Ströme, zum Beispiel im Bereich von Einlasskontrollen, können konstant und gleichmäßig sein. Ungerichtete Ströme, zum Beispiel das Verlassen einer Halle nach Veranstaltungsende durch mehrere Ausgänge, sind dagegen sehr komplex und dynamisch. Durch Gegenströme und Gruppenverhalten kommt es zu unterschiedlichsten Bewegungsmustern [35, 49].

Die Fortbewegung von Einzelpersonen in Menschengruppen ist laut Marchant sowohl von psychologischen (Stress, Zeitdruck, Angst, etc.), physischen (Alter, gesundheitliche Einschränkung, etc.) als auch von physikalischen (Menschenichten, Sicht, Gelände, etc.) Faktoren gesteuert [42].

2.2.1 Psychologische Faktoren

Die psychologischen Faktoren betreffen laut Thompson vor allem das instinktive Fluchtverhalten in Paniksituationen [42]. Das soziale Verhalten von Menschen in Menschenmassen wurde von zahlreichen Psychologen und Sozialforschern untersucht, allen voran Gustave Le Bon mit seiner Definition der „Massenseele“ [33]. Die psychologischen Faktoren können zu unvorhersehbaren Reaktionen und Bewegungsmustern führen.

¹ Abbildungen entnommen aus [35]

2.2.2 Physiologische Faktoren

Blanco nennt in seiner Arbeit als physiologische Faktoren das Gewicht, die körperliche Fitness sowie das Alter einer Person [6]. Je älter oder unsportlicher eine Person zum Beispiel ist, umso langsamer ist ihr Vorankommen.

2.2.3 Physikalische Faktoren

Die physikalischen Faktoren sind unabhängige, externe Einflüsse und somit durch die Einsatzkräfte nicht beeinflussbar. Im Folgenden werden verschiedene physikalische Faktoren beschreiben, welche das Fortbewegungsverhalten von Individuen beeinflussen können.

Eine der bekanntesten Formeln zur Bestimmung der Fortbewegungsgeschwindigkeit von Personen in Menschenmengen wurde durch Nelson aufgestellt [34]:

Formel 1: Geschwindigkeitsformel nach Nelson

$$S = k(1 - a\rho)$$

mit

- S : Fortbewegungsgeschwindigkeit in m/s
- k : geländeabhängiger Geschwindigkeitsfaktor in m/s
- a : Konstante (= $0.266 \text{ m}^2/P$)
- ρ : Personendichte in P/m^2

Als Einflussfaktoren nennt er die lokale Personendichte ρ sowie die Geländebeschaffenheit, ausgedrückt durch einen geländeabhängigen Geschwindigkeitsfaktor.

2.2.3.1 Einfluss der Geländebeschaffenheit

Der Einfluss der Geländebeschaffenheit wird durch verschiedene Autoren sowohl durch die Geländeart, sowie die Geländeneigung beschrieben [6, 27].

Die Geländeart hat dahingehend einen Einfluss, dass die maximale Fortbewegungsgeschwindigkeit im Zusammenhang mit der Unwegsamkeit sinkt. Doherty et al. verarbeiten diesen Einfluss als Widerstandsfaktor, Blanco als prozentualen Anteil der möglichen Maximalgeschwindigkeit [6, 10]. Je nach Begehbarkeit eines Terrains kann die Fortbewegungsgeschwindigkeit so um bis zu 25 % reduziert werden.

2.2.3.2 Einfluss der Hangneigung

Bei größerer Steigung wächst die aufzubringende Energie zur Überwindung, sodass die Hangneigung ein Widerstandsfaktor bei der Fortbewegung ist. Eine der bekanntesten Modelle zur Beschreibung dieses Zusammenhangs ist die sogenannte „Hiking-Funktion“ nach Tobler [44], welcher sich auf empirische Untersuchungen von Imhof beruft. Die Hiking-Funktion gibt einen exponentiell symmetrischen Zusammenhang der Gehgeschwindigkeit und der Hangneigung an.

Tobler schlussfolgert auf eine maximale Geschwindigkeit von 6 km/h (1,67 m/s) bei leichtem Gefälle (-3°) sowie eine Geschwindigkeit von 5 km/h (1,39 m/s) bei absolut flachem Terrain. Ab Steigungen von $\pm 50^\circ$ tendiert die Geschwindigkeit zu Null, eine gehende Fortbewegung ist in derart steilem Gelände somit nicht mehr möglich.

Formel 2: Hiking-Funktion nach Tobler

$$S = 6 \cdot e^{-3,5 \cdot \left| \tan\left(\frac{d \cdot \pi}{180}\right) + 0,05 \right|}$$

mit

- S : Fortbewegungsgeschwindigkeit in km/h
- d : Neigungswinkel in Grad

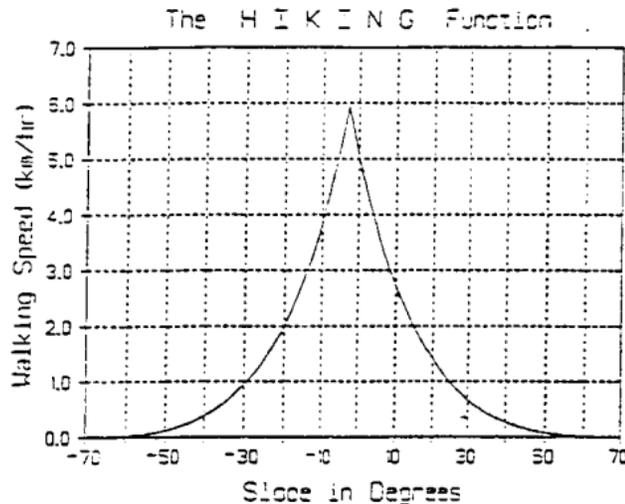


Abbildung 1: Geschwindigkeit im Zusammenhang mit der Hangneigung nach Tobler²

2.2.3.3 Einfluss der Sichtverhältnisse

Ein weiterer physikalischer Einflussfaktor ist die Sicht. Insbesondere bei der Evakuierungssimulation im Bereich des Vorbeugenden Brandschutzes wird die Einschränkung der Sichtverhältnisse durch Brandrauch auf die Fluchtgeschwindigkeit berücksichtigt [27].

2.2.4 Auswahl zu berücksichtigender Widerstandsfaktoren

Wie oben dargestellt, wird die Fortbewegung einer Person durch psychologische, physiologische und physikalische Faktoren beeinflusst. Jeder Faktor beeinflusst die Bewegung dabei unterschiedlich stark. Für eine korrekte Untersuchung der Fragestellung müssen deshalb störende Faktoren ausgeschlossen werden und nur für die Analyse relevante Faktoren berücksichtigt werden.

Rettungskräfte sind allgemein für den Einsatz in Stresssituationen geschult und vorbereitet. Ihre Tätigkeit bei Veranstaltungen ist geplant und koordiniert, sodass der psychologische Faktor für die weitere Betrachtung außer Acht gelassen werden kann.

Für Einsatzkräfte im aktiven Dienst besteht nach geltendem Recht – wie zum Beispiel nach § 3 Absatz 1 der Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge in Deutschland [8] – die Pflicht zur regelmäßigen medizinischen Untersuchung. Es kann somit vorausgesetzt werden, dass einsatztaugliche Einsatzkräfte hinsichtlich ihrer physischen Mobilität über keine signifikanten Einschränkungen oder Unterschiede verfügen. Die physiologischen Einflüsse auf die individuelle Fortbewegung können somit ebenfalls vernachlässigt werden.

² Abbildung entnommen aus [44]

Die physikalischen Faktoren wie die Bodenbeschaffenheit, die Hangneigung, die Sichtverhältnisse und die Personendichten beeinflussen die Fortbewegung einer Person immer, also auch die einer Rettungskraft. In Anbetracht der Fragestellung soll jedoch nur der Einfluss der Menschenmengen, also der Personendichten, auf die Fortbewegung der Rettungskräfte untersucht und bewertet werden. Da die anderen physikalischen Faktoren unabhängig von einer vorhandenen Menschenmenge immer wirken, können sie für die Untersuchung vernachlässigt werden.

2.3 Einfluss der Personendichten auf die Fortbewegung von fußläufigen Rettungskräften

Wie bereits in der Formel von Nelson dargestellt, identifizieren ebenfalls Thompson, Fang et al. und Knopp übereinstimmend die Dichte als einen entscheidenden Einflussfaktor hinsichtlich der Fortbewegungsmöglichkeiten von Individuen in Personenmengen [15, 16, 30, 42].

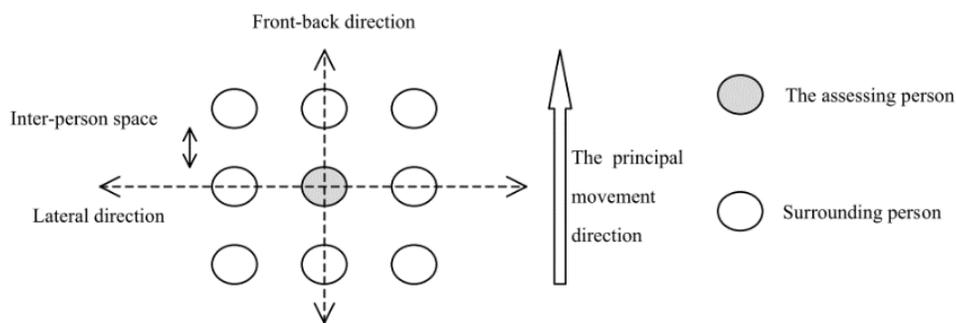


Abbildung 2: Bewegung von Individuen in Menschenmengen³

Abbildung 2 zeigt die möglichen Bewegungsrichtungen einer Person in einer Menschentraube. Je höher die Dichte wird, umso kleiner werden wie in Tabelle 2 dargestellt die Zwischenräume zwischen den Personen. Dies führt zu Interaktionen wie Berührungen oder Stößen zwischen den Personen, was wiederum die Fortbewegungsgeschwindigkeit verringert [15]. Abbildung 3 verdeutlicht diesen Zusammenhang:

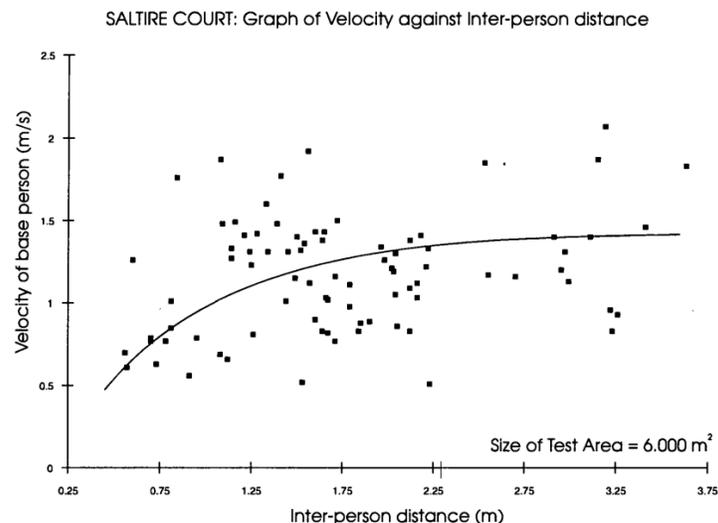


Abbildung 3: Fortbewegungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Personen-Zwischenräume⁴

³ Abbildung entnommen aus [15]

Die Ermittlung der tatsächlichen Fortbewegungsgeschwindigkeit von Einzelpersonen oder Kleingruppen in Abhängigkeit der Personendichte wurde in zahlreichen Versuchen ermittelt. Die Ergebnisse variieren leicht je nach Autor, zeigen jedoch alle einen negativ exponentiellen Zusammenhang [15, 16, 30, 43].

Abbildung 4 von Thompson und Marchant verdeutlicht diesen Zusammenhang:

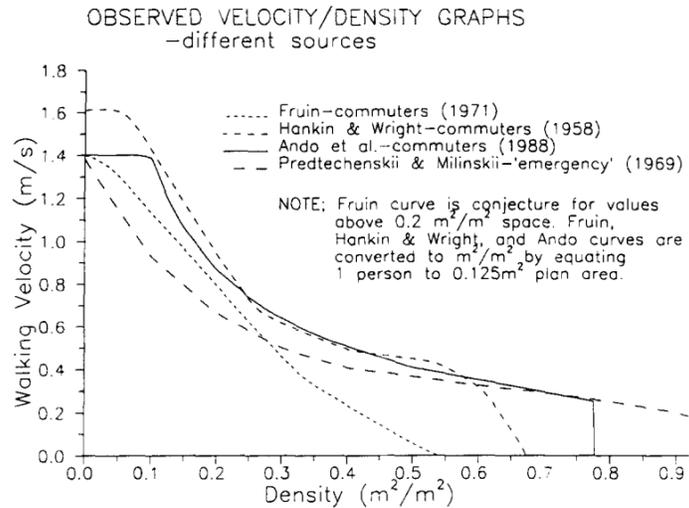


Abbildung 4: Verhältnis zwischen Gehgeschwindigkeit und Personendichte⁵

Philipp Knopp hat im Rahmen einer Bachelorarbeit aufgrund der oben genannten Zusammenhänge gezielt die Fortbewegungsgeschwindigkeiten von Rettungstrupps in Menschenmengen untersucht [30]. Als Grund hierfür gibt er das Fortbewegungsverhalten eines Rettungstrupps an, welches sich grundlegend von dem eines normalen Fußgängers unterscheidet:

„Fußgänger sind geneigt, möglichst lange den physischen Kontakt mit anderen Personen zu vermeiden. Ein Rettungstrupp hingegen wird sich im Bedarfsfall Platz schaffen, er hat aufgrund des mitgeführten Materials (Notfallrucksack, evtl. eine Trage) einen größeren Platzbedarf.“ [30]

Knopp hat nachgewiesen, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit von Rettungstrupps leicht höher ist als die von normalen Fußgängern. Seine Ergebnisse werden in Abbildung 5 und Tabelle 3 aufgezeigt:

⁴ Abbildung entnommen aus [42]

⁵ Abbildung entnommen aus [43]

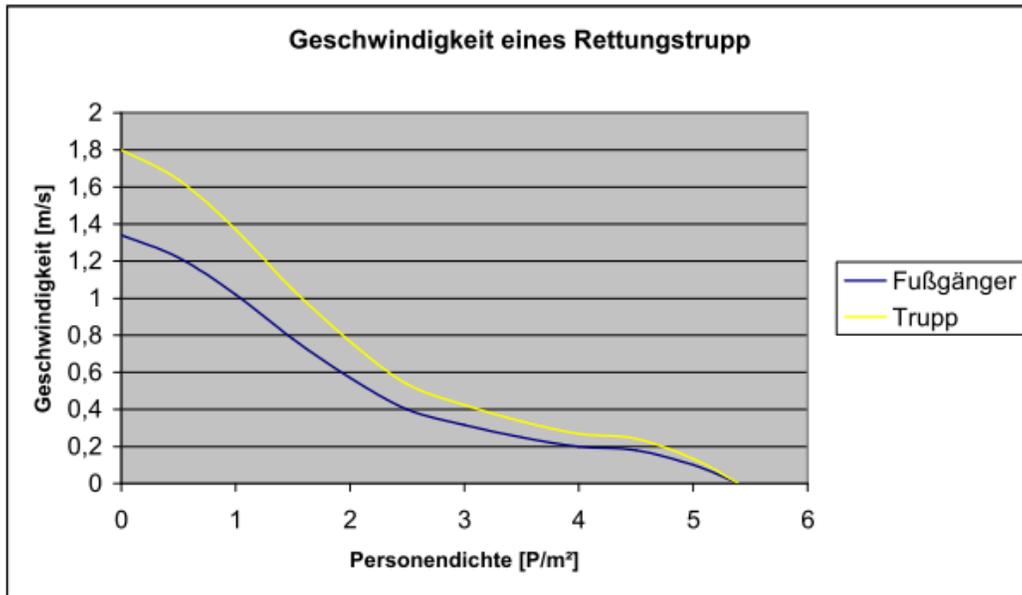


Abbildung 5: Geschwindigkeit eines Rettungstrupps im Vergleich zu einem Fußgänger⁶

Die maximale Fortbewegungsgeschwindigkeit für Rettungstrupps in Metern pro Sekunde in Abhängigkeit der Dichte ist Tabelle 3 zu entnehmen:

Tabelle 3: Rettungstrupp-Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Personendichte [30]

Personendichte [P/m²]	max. Geschwindigkeit [m/s]
0	1,80
1	1,40
2	0,77
3	0,42
4	0,27
5	0,10
6	0

In Anlehnung an die Geschwindigkeitsformel nach Nelson wird in Excel über einen XY-Plot die Regressionsfunktion für die in Tabelle 3 dargestellten Werte berechnet:

⁶ Abbildung entnommen aus [30]

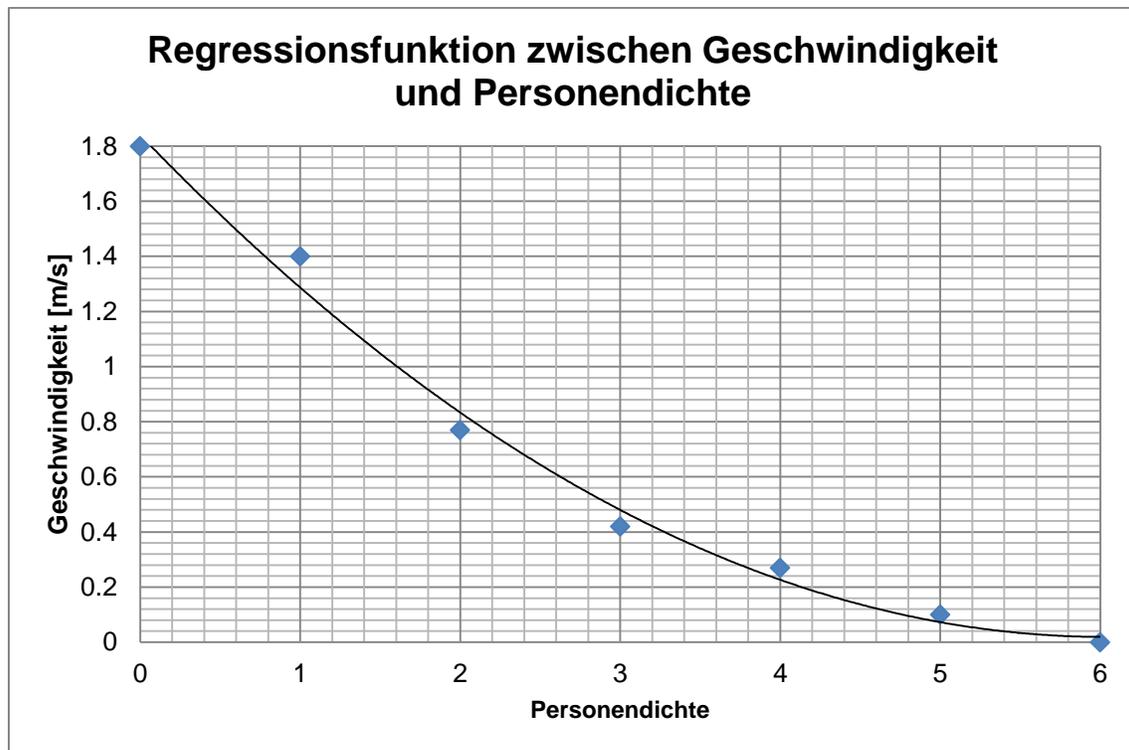


Abbildung 6: Regressionsfunktion zwischen Geschwindigkeit und Personendichte

Die Werte können durch ein Polynom zweiten Grades angenähert werden:

Formel 3: Regressionsfunktion zwischen Geschwindigkeit und Personendichte

$$y = 0.05x^2 - 0.6036 \cdot x + 1.8407$$

wobei y die Geschwindigkeit in m/s und x die Personendichte in Personen pro m² ist. Mit einem Bestimmtheitsmaß von R² = 0,9911 gibt diese Regressionsfunktion mit einer akzeptablen Genauigkeit den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit eines Rettungstrupps und der Personendichte wieder.

2.3.1 Fortbewegung von Rettungsfahrzeugen in Menschenmengen

Knopp hat im Rahmen seiner Arbeit ebenfalls die Fortbewegungsgeschwindigkeiten von Rettungsfahrzeugen (Rettungswagen) in Menschenmengen untersucht. Bei Personendichten von 1-1,5 P/m² ermittelte Knopp durchschnittliche Fahrgeschwindigkeiten von 1-1,2 m/s. Bereits ab Personendichten von mehr als 1 Person pro Quadratmeter ist das Vorankommen mit einem Fahrzeug somit signifikant langsamer als fußläufig. Knopp begründet dies mit dem deutlich erhöhten Platzbedarf eines Fahrzeuges und der fehlenden Ausweichflächen der Personen bei höheren Dichten zur Schaffung freier Räume.

3 Prinzipien der Modellierung und Simulation

„Modell: Objekt, Gebilde, das die inneren Beziehungen und Funktionen von etwas abbildet bzw. [schematisch] veranschaulicht [und vereinfacht, idealisiert]“⁷

Die Fortbewegungscharakteristik von Rettungskräften in Menschenmengen muss im Geographischen Informationssystem möglichst realitätsnah modelliert werden, um eine objektive Standortanalyse durchführen zu können. Nachdem unter Ziffer 2 die grundlegenden Charakteristiken der Fortbewegung von Individuen und Gruppen in Menschenmengen dargestellt wurden, müssen diese nachfolgend mittels geoinformatischen Werkzeugen nachgebildet werden. Hierfür werden zuerst existierende Modellierungsansätze verglichen, um die Grundprinzipien der Fortbewegungsmodellierung darzustellen.

Modelle werden grundsätzlich als diskrete oder kontinuierliche Systeme dargestellt. Bei kontinuierlichen Systemen wird der Zustand eines Systems über die Zeit mittels Differentialgleichungen ($t_0 + dt$) beschrieben. Bei diskreten Systemen erfolgt die Zustandsbeschreibung zu definierten Zeitschritten ($t_0 + \Delta t$), ohne jedoch den Zustand zwischen diesen Schritten zu berücksichtigen.

Im Bereich der Fortbewegungsmodellierung sind laut Klüpfel beide Ansätze je nach Anwendungsgebiet und Komplexität des Modells möglich [29].

Als bekannteste Form eines diskreten Modells sind zelluläre Automaten zu verstehen, welche um 1940 von Stanislaw Ulam erstmalig vorgestellt wurden. Dabei wird der Raum durch eine festzulegende Menge an Zellen repräsentiert, welche jeweils über einen individuellen Zustand zu diskreten Zeitschritten beschrieben werden können. Eine der bekanntesten Anwendungen des Prinzips der zellulären Automaten ist das sogenannten Nagel-Schreckenberg-Modell, welches simulierte Aussagen zum Straßenverkehr ermöglicht [38].

Ein Beispiel für kontinuierliche Modellierung sind die aus den geographischen Informationssystemen bekannten Netzwerkanalysen. Netzwerke sind vereinfacht gesehen eine Menge von Knoten und Kanten und kommen aus dem Bereich der Graphentheorie [9]. Die Fortbewegung entlang von Kanten kann dabei mit Widerstandfaktoren versehen werden. Im Sinne einer kontinuierlichen Modellierung wird die Fortbewegung über Differenziale beschrieben, sodass die Geschwindigkeit und Position im Raum jederzeit bekannt ist.

Die computergestützte Modellierung der Fortbewegung von Individuen und Gruppen findet insbesondere im Bereich der Evakuierungssimulation ein breites Anwenderfeld. Dabei werden die Evakuierungsprozesse wie Laufzeiten, gewählte Routen, Stauungen und Drücke untersucht und hinsichtlich ihrer Akzeptanz bewertet.

Thompson und Marchant zeigen, wie im Laufe der Jahrzehnte die Modelle (z.B. EXIT 89, EGRESS, EXODUS...) mit immer weiteren Variablen verbessert wurden [43]. Dabei wird insbesondere versucht, die Individualität der Agenten immer mehr an die Realität anzupassen (Gehgeschwindigkeiten, Reaktionszeiten, Routenwahl...). Moderne Evakuierungsprogramme berücksichtigen teilweise sogar psychologische Aspekte, wie das Umkehren bei zu langen Wartezeiten.

⁷ Definition nach deutschem Duden [3]

Determinismus: Lehre, Auffassung von der kausalen [Vor]bestimmtheit allen Geschehens bzw. Handelns⁸

Probabilismus: Auffassung, dass es in Wissenschaft und Philosophie keine absoluten Wahrheiten, sondern nur Wahrscheinlichkeiten gibt⁹

Eine weitere Unterteilung bei Modellen sind deterministische und probabilistische Systeme. Bei deterministischen Modellen sind alle Variablen (empirisch) definiert oder können abgeleitet und somit vorhergesagt werden. Bei deterministischen Modellen ist das Handeln der Agenten somit nicht zufällig. Bei probabilistischen Modellen hingegen „wird versucht, zufällige Schwankungen im menschlichen Verhalten zu modellieren“ [48]. Die Agenten in probabilistischen Modellen haben somit verschiedene zufällige Charakterzüge, wie zum Beispiel ihre Reaktionszeiten oder die bevorzugte Routenwahl. Probabilistische Modelle können somit neben vorgegebenen Parametern auch Zufallskomponenten berücksichtigen.

Probabilistische Modelle sind somit realitätstreuer als deterministische Modelle, da insbesondere das psychologische Verhalten, wie unter Ziffer 2.2.1 beschrieben, in der Realität zu nicht vorhersagbaren Reaktionen führen kann. Dadurch wird die Handhabung dieser Modelle jedoch viel komplexer.

⁸ Definition nach deutschem Duden [3]

⁹ Definition nach deutschem Duden [3]

II. Kapitel

Modellierung und Umsetzung im GIS
Fallbeispiele und praktische Analyse

4 Prinzipien der Modellierung im GIS

Die Nutzung eines Geographischen Informationssystems als Modellierungsplattform wird mit dem räumlichen Aspekt der Standortplanung begründet. Geographische Informationssysteme eignen sich definitionsgemäß um diese räumlichen Faktoren zu verarbeiten und bewerten. Sie verfügen über die notwendigen Werkzeuge und technischen Spezifitäten (z.B. Topologie) um eine entsprechende räumliche Untersuchung durchzuführen.

Im Folgenden werden die technischen und methodischen Prinzipien der Modellierung im Geographischen Informationssystem beschrieben. Es wird dargestellt, wie die Daten erhoben und für die Untersuchung vorbereitet werden können, sowie nach welchen Prinzipien die praktische Untersuchung durchgeführt werden soll.

Im Rahmen der Arbeit wird als Geographisches Informationssystem die Software ArcGIS in der Version 10.3 mit verschiedenen Erweiterungen und Add-Ins verwendet.

4.1 Rahmenbedingungen

Vor der praktischen Umsetzung im GIS müssen die Rahmenbedingungen der Standortplanung festgelegt werden. Grundlage hierfür bieten die im ersten Kapitel vorgestellten Prinzipien und Standards. Die Analyse folgt nach einem semi-qualitativen Ansatz: Es werden als Grundlage qualitative Bewertungskriterien festgelegt (z.B. akzeptierte durchschnittliche Eintreffzeit) und anschließend mit geoinformatischen Methoden empirisch untersucht.

Als Untersuchungsobjekt werden nur fußläufige Rettungstrupps berücksichtigt, um eine vergleichbare Bewertung des Einflusses des Widerstandsfaktors der Menschenmengen unter verschiedenen Szenarien durchführen zu können. Die Vermischung unterschiedlicher Fortbewegungsvektoren würde unterschiedliche Einflüsse der Menschendichten auf die Fortbewegung mit sich bringen.

Nach dem Prinzip der schutzzielorientierten Qualitätskriterien muss jeder (öffentliche) Bereich eines Veranstaltungsgeländes innerhalb einer festzulegenden Eintreffzeit von einer Rettungseinheit erreicht werden können. In Anlehnung an den Kölner Algorithmus sollte die optimale Eintreffzeit bei 5 Minuten liegen. Insbesondere bei großräumigen Veranstaltungsgebieten ist diese Zeit erfahrungsgemäß jedoch kaum einzuhalten, sondern liegt eher im Bereich der landesüblichen Hilfsfristen für Rettungsmittel (ca. 10-15 Minuten). Die maßgebende Hilfsfrist für eine Veranstaltung muss somit durch den Einsatzplaner unter Berücksichtigung aller Faktoren abgewogen werden. Im Rahmen der Analyse wird sich jedoch orientierend an die Vorgaben des Kölner Algorithmus gehalten. Als Erreichungsgrad hinsichtlich der theoretischen Planung wird ein Erreichungsgrad von 100 % gewählt, da bereits planerisch nicht abgedeckte Bereiche in der Realität zwingend unterversorgt sind. Der zu untersuchende Faktor ist demnach die zeitliche Erreichbarkeit des Geländes.

Zur Vereinfachung werden für die weitere Umsetzung alle Rettungseinheiten unabhängig von ihrer Qualifikation und Ausrüstung gleichgesetzt, da das allgemeine Ziel ein schnellstmögliches Eintreffen beim Patienten ist. Die notwendige Qualifikation und Ausrüstung der Einheiten muss durch den Einsatzplaner abgeschätzt werden.

Unter Ziffer 2.2 und 2.3 wurden die Widerstandsfaktoren dargestellt, welche die Fortbewegung der Rettungskräfte beeinflussen. Die Personendichte wird dabei als zu untersuchender Widerstandsfaktor gesetzt. Es müssen somit eine allgemeine, widerstandsfreie Fortbewegung sowie eine spezifische Fortbewegung unter Berücksichtigung der Menschenmengen als Widerstandsfaktor modelliert und verglichen werden.

Ziffer 2.3 zeigt, dass die Menschenmenge als Widerstandsfaktor insbesondere einen Einfluss auf die Fortbewegungsgeschwindigkeit der Rettungskräfte hat. Die Geschwindigkeit ist ein kontinuierliches Phänomen, welches mittels Differentialen wie folgt beschrieben werden kann:

Formel 4: Geschwindigkeitsdifferential

$$\vec{v}_i(t) = \frac{d\vec{x}_i(t)}{dt}$$

Somit sollte die Fortbewegung der Rettungskräfte als kontinuierliches Modell entwickelt werden und die gewählte Methode muss die Geschwindigkeit als Parameter ermöglichen.

Bei Veranstaltungen haben Sanitätseinheiten einen definierten Auftrag. Werden sie an festen Standorten eingesetzt, so sind die Start- und Zielpunkte (Ort eines gemeldeten Notfalls) zwingend vorgegeben und unterliegen nicht der Entscheidung der eingesetzten Einheiten. Auch bei patrouillierenden Einheiten sind die Räume, in denen sich die Einsatzkräfte aufhalten müssen, immer durch die Einsatzleitung vorgegeben. Als Route zwischen Start und Ziel wählen die Rettungskräfte immer die schnellstmögliche, um den Patienten schnellstmöglich zu erreichen. Dabei versuchen die Einheiten intuitiv immer die kürzeste beziehungsweise widerstandsärmste Route zu wählen. Das Verhalten der Einheiten ist somit nicht zufällig sondern kann bis zu einem bestimmten Grad vorhergesagt und sogar bestimmt und beeinflusst werden. Für die Modellierung dieses Verhaltens eignet somit ein deterministischer Ansatz.

4.2 Methodenwahl: Netzwerkanalyse vs. Kostenoberfläche-Analyse

Der Einfluss des dichte-basierten Widerstandsfaktors zeigt sich direkt durch die Reduzierung der Fortbewegungsgeschwindigkeit $\vec{v}_i(t)$ und führt somit gemäß Formel 4 zu einem Anstieg der benötigten Zeit t für das Zurücklegen einer definierten Distanz \vec{x}_i .

In geographischen Informationssystemen werden die Einflüsse von Widerstandsfaktoren als „Kosten“ beschrieben, da die Person diese „Kosten“, sprich diesen Aufwand, zur Fortbewegung entlang eines Pfades aufbringen muss. Durch Aufsummierung aller Kosten entlang eines Weges können die Gesamtkosten des Pfades ermittelt werden und so verschiedene Routen untereinander hinsichtlich des jeweils aufzubringenden Aufwandes zur Bewältigung verglichen werden. Je höher die Gesamtkosten, umso größer sind die Widerstandsfaktoren entlang dieser Route und umso mehr Aufwand muss zur Bewältigung erbracht werden [4].

Neben der Zeit, welche unter Ziffer 4.1 als wichtigster Kostenfaktor für die nachfolgende Analyse identifiziert wurde, ist bei einer Bewegung auch immer die zurückgelegte Distanz als Kostenfaktor anzusehen.

In geographischen Informationssystemen können Fortbewegungskosten auf verschiedene Arten modelliert werden. Die wohl bekannteste Methode hierfür ist die sogenannte Kostenoberfläche:

„Die Modellierung von Kostenoberflächen ist eine Funktionalität, die mittlerweile in einigen, speziell rasterorientierten GIS, unterstützt wird. Die Kosten sind dabei sowohl Ausdruck der Mindestkosten bei der Bewegung durch den Raum als auch Kosten durch den Widerstand bzw. die Kraft, die die Bewegung behindern oder fördern.“ [4]

Kostenoberflächen sind mit Widerstandswerten hinterlegte Rasterdaten, jeder Rasterzelle wird demnach ein numerischer Widerstandswert zugewiesen. Diese können isotrop (richtungsunabhängig) oder anisotrop (richtungsabhängig) sein, das heißt je nach Durchlaufrichtung der Zelle wird ein anderer Widerstand angewendet. Die Widerstandskosten werden dabei während der diskreten (zellgebundenen) Fortbewegung aufsummiert. Die zu hinterlegenden Widerstandswerte können durch den Anwender beliebig festgelegt werden und können unterschiedliche Bedeutungen (z.B. Kalorien, Benzinverbrauch...) haben. Über die Größe der Zelle sowie die aus der lokalen Personendichte abgeleiteten Fortbewegungsgeschwindigkeit kann somit auch die Durchlaufzeit pro Zelle als

Widerstandswert ermittelt werden, sodass die Anforderungen einer zeitgestützten Analyse nach Ziffer 4.1 grundsätzlich möglich sind.

Die Kostenoberfläche ist in ArcGIS über die Erweiterung „Spatial Analyst“ integriert. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen der Kostenentfernungsanalyse (Aufsummierung der Gesamtkosten entlang des zurückgelegten Weges) und der Kostenpfadanalyse (Ermittlung der kostengünstigsten Route zwischen zwei Punkten in einer Kostenoberfläche). Weiterhin können die euklidische Zuordnung, Richtung und Entfernung über die Kostenoberfläche ermittelt werden. Über das Werkzeug der Kostenallokation können die kostengebundenen Erreichbarkeiten von definierten Standorten aus überprüft werden.

Neben Kostenoberflächen, eignen sich jedoch auch Netzwerkanalysen zur Modellierung von kostenbehafteten Fortbewegungen:

„Die Analyse von Netzwerken gehört zu den zentralen Anwendungen von Geoinformationssystemen“ [9].

Netzwerke sind angelehnt an die Graphentheorie Mengen aus Knoten und Kanten. Die Kanten dienen dabei als Verbindungen zwischen den Knoten und können mit Widerstandswerten versehen werden. Sie können sowohl geradlinig als auch gekrümmt sein und verfügen jeweils über eine geometrisch ermittelte Länge, definiert als die zurückzulegende Strecke entlang der Kante zwischen dem Anfangs- und dem Endknoten. Die Bewegung zwischen den Knoten erfolgt also entlang der Kanten, die Richtung kann dabei eingeschränkt werden.

Kanten haben immer eine geometrische bestimmte Länge hinterlegt, sodass die entlang der Kanten zurückgelegte Distanz zwischen zwei Punkten bestimmt werden kann. Da jedoch wie unter Ziffer 4.1 beschrieben, die zeitliche Erreichbarkeit überprüft werden soll, muss zusätzlich zur Länge auch die Durchlaufzeit pro Kante hinterlegt werden, um - ähnlich wie die Widerstandswerte beim Kostenpfad - zur Gesamtzeit aufsummiert werden zu können. Allgemein wird jedoch nicht direkt die Durchlaufzeit pro Kante definiert, sondern sie muss über die hinterlegte Geschwindigkeit gemäß Formel 4 ermittelt werden. Indem jeder Kante die jeweilige aus der lokalen Personendichte abgeleitete Fortbewegungsgeschwindigkeit zugewiesen wird, kann somit die Fortbewegungszeit gemäß den gestellten Rahmenbedingungen als Kostenfaktor ermittelt werden.

Die Netzwerkanalyse ist in ArcGIS in der Erweiterung „Network Analyst“ hinterlegt. Mit dem Network Analyst kann aus einem vektorbasierten Liniennetzwerk ein routingfähiges Bewegungsnetzwerk berechnet werden. Als Analysemöglichkeiten sind Routing, Tourenprobleme, Erreichbarkeitsanalysen und Allokationsanalysen möglich. Der Network Analyst ist somit ein leistungsfähiges Analysewerkzeug.

Sowohl die Netzwerkanalyse als auch die Kostenoberfläche eignen sich somit technisch und methodisch zur Modellierung und Analyse der angestrebten Fortbewegungsstruktur. Da beide Methoden sich aus geoinformatischer Sicht jedoch teilweise unterscheiden - die Kostenoberfläche als Rastermodell gegenüber der Netzwerkanalyse als Vektormodell - differieren sie auch hinsichtlich ihrer technischen Anwendung. Je nach durchzuführendem Arbeitsschritt haben beide Methoden unter Berücksichtigung vorhandener Software und Rechnerleistung aber auch persönlicher Erfahrung und Kompetenz jeweils verschiedene Vor- und Nachteile.

Drechsel hat in ihrer Arbeit, wie unter Ziffer 1.3.2 bereits dargestellt, einen Graphen-basierten Ansatz zur Standortplanung von Einsatzkräften bei Großereignissen entwickelt [11]. Die dort vorgestellten Prinzipien, wie zum Beispiel die Maximierung der Abdeckung pro Rettungstrupp oder auch die Minimierung der notwendigen Anzahl an Einsatzkräften, lassen sich auf die hier vorliegenden Rahmenbedingungen und Fragestellungen übertragen. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit die Netzwerkanalyse als geeignetere Methode für die nachfolgende Analyse gegenüber der Kostenoberflächenanalyse bevorzugt. Es muss jedoch erwähnt werden, dass bei der

Anwendung der Kostenoberflächenanalyse lediglich der methodische Ansatz unterschiedlich wäre, die Ergebnisse jedoch aufgrund der gleichen Rahmenbedingungen identisch wären.

4.2.1 Netzwerk-Eigenschaften

Zur Anwendung der Netzwerkanalyse muss als erster Schritt ein routingfähiges Netzwerk erstellt werden. Hierfür soll eine Methodik entwickelt werden, welche sich für verschiedene Veranstaltungsgeländekonstellationen gleichermaßen eignet. Da Veranstaltungsgelände alle möglichen Formen und Ausmaße annehmen können, eignet sich ein gleichmäßiges geometrisches Muster, welches wie ein Netz über die Fläche gelegt wird, am besten. Nachfolgend müssen jedoch noch die Eigenschaften dieser Netzstruktur unter Anbetracht der Bewegungsmuster von Rettungstrupps in Menschenmengen festgelegt werden.

“For example, in pedestrian simulation, it is common to create a graph from a regular grid, where graph edges connect centres of empty (not occupied/blocked) grid cells. This approach is straightforward to reproduce in a GIS environment by generating a line grid and removing all lines which are not completely within the open-space polygon.” [22]

Ein weiterer Vorteil einer dichten Netzstruktur ist, dass es durch das regelmäßige Netzwerk zu einer gleichmäßigen Verteilung der Kreuzungspunkte der Kanten über die gesamte Untersuchungsfläche kommt. Gemäß der Graphentheorie stellen die Knoten bei der Netzwerkanalyse die Anfangs- und Endpunkte der Kanten dar [2].

Ausgehend davon, dass Notfälle im Allgemeinen und unter Vernachlässigung möglicher räumlicher Autokorrelation durch externe Faktoren zufällig und voneinander unabhängig verteilt sind, kann somit jeder Knoten als potentieller Notfallort angesehen werden [40]. Auch Drechsel identifiziert in ihrer Arbeit die Knoten als mögliche Einsatzorte (Zielorte) [11]. Im Rahmen der späteren (Standort-)Analyse kann folglich ebenfalls die Erreichbarkeit der räumlich gleichmäßig verteilten potentiellen Notfallorte untersucht und quantitativ bewertet werden. Geht man weiterhin davon aus, dass – ggf. unter Berücksichtigung zu definierender Einschränkungen - jeder Punkt auch grundsätzlich ein möglicher Standort eines Rettungstrupps ist, stehen durch die regelmäßig verteilten Knotenpunkte sowohl die möglichen Start- als auch Zielorte für die Netzwerkanalyse bereits zur Verfügung.

4.3 Georeferenzierung eines Veranstaltungsgeländes

Veranstaltungen können an den verschiedensten Orten stattfinden. Grundsätzlich kann man zwischen überdeckten Veranstaltungen und solchen unter freiem Himmel unterscheiden. Die Art der Überdeckung kann dabei von Gebäuden bis hin zu Zelten, Tunneln, Unterführungen oder sogar Höhlen reichen. Gleiches gilt für Veranstaltungen unter freiem Himmel, welche zum Beispiel auf Parkplätzen, Parks, Wäldern, Wiesen, Stränden oder auf der Straße stattfinden können.

Gleiches gilt auch für den Veranstaltungsraum, welcher sich entweder auf eine eindeutig festgelegte und durch Absperrungen abgegrenzte Fläche oder innerhalb des öffentlichen Raumes strecken kann. Besonders im öffentlichen Raum ist die Abgrenzung einer Veranstaltungsfläche nur schwer möglich und wird somit zum Beispiel auf Straßenzüge oder Stadtviertel bezogen angegeben.

Da Sanitätseinheiten grundsätzlich nur zur Absicherung der Veranstaltung eingesetzt werden – Einsätze im öffentlichen Raum unterliegen weiterhin dem öffentlich zuständigen Rettungsdienst – ist ihre Bewegungsfläche mit der Veranstaltungsfläche übereinstimmend. Die Erfassung des Veranstaltungsgeländes ist somit als erster Schritt entscheidend zur Festlegung und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes.

Die Georeferenzierung des Veranstaltungsgeländes hat, neben der Abgrenzung des Untersuchungsgebietes, auch den Zweck der Identifikation von für die Rettungskräfte unüberwindbaren Hindernissen auf dem Gelände für die spätere Erstellung der Bewegungsräume. Dazu zählen zum Beispiel Verkaufsstände, Bühnen oder auch Absperrlemente.

Ziel soll es deshalb sein, die öffentlich zugänglichen Veranstaltungsbereiche im GIS als Polygon zu erfassen. Nicht-öffentliche Bereiche (wie zum Beispiel die Bühnenfläche) können für die Analyse ausgeschlossen werden, da diese die Flächenmaße hinsichtlich der Berechnung der Personendichten verfälschen würden und diese nicht von großen Personenmengen belegt werden und somit keine hohen Personendichten dort zu erwarten sind. Der Ausschluss dieser Flächen ermöglicht somit die genaue Abgrenzung des Untersuchungsgebietes und der möglichen Bewegungsräume der Sanitätseinheiten. Etwaige Ausnahmen, welche sich durch besondere Gegebenheiten einer Veranstaltung ergeben, dürfen jedoch nicht vernachlässigt werden.

Durch die Komplexität und Varietät von Veranstaltungsflächen können diese im GIS jedoch nicht automatisiert erfasst werden. Im Rahmen der Veranstaltungsplanung werden nur selten geographische Informationssysteme eingesetzt, sodass die Strukturen in der Regel nicht digitalisiert als Geodaten vorliegen.

4.3.1 Georeferenzierung von CAD-Plansätzen

Der Standard zur Planzeichnung sind oftmals aus dem Architektur- oder Ingenieurbereich bekannte CAD¹⁰-Softwares. Diese erlauben eine räumlich korrekte Erfassung der Dimensionen durch Verwendung geeigneter Grundpläne, verfügen jedoch in der Regel über keine Topologie.

„Aufgrund der beliebig tiefen Hinterlegung mit thematischen Daten unterscheiden sie [Anmerkung des Autors: die Geographischen Informationssysteme] sich grundsätzlich von Kartiersystemen oder Computer-Aided-Design (CAD)-Systemen“ [4].

„Das Besondere an Geoinformationssystemen ist, dass Geoobjekte darüber hinaus Geometrie und Topologie als implizite und untrennbare Bestandteile ausweisen!“ [9]

„Another difference between CAD and GIS is that GIS has topology while CAD does not“ [5].

Topologie ist jedoch eine der Grundvoraussetzungen für eine räumliche Untersuchung, wie zum Beispiel die Netzwerkanalyse. Die Planstände – wenn vorhanden – müssen somit ins GIS zur weiteren Nutzung importiert werden. Dabei muss insbesondere die notwendige Topologie zwischen den übernommenen Daten hinzugefügt werden.

Die verwendete Software ArcGIS verfügt in der Toolbox „Conversion“ über das Werkzeug „CAD to Geodatabase“, welche Datensätze in den gängigen CAD-Datenformaten (DWG, DXF und DGN) als Feature Dataset in eine bestehende Geodatabase konvertieren kann. Dabei kann den Daten zur Georeferenzierung auch ein Koordinatensystem zugewiesen werden. Ist dies nicht möglich oder das verwendete Koordinatensystem nicht bekannt, können die nicht referenzierten Daten anschließend über die bekannten ArcGIS-Werkzeuge verortet werden.

¹⁰ Computer-aided-drafting

4.3.2 Georeferenzierung von PDF- oder Bild-Dateien

In vielen Fällen stehen dem Einsatzplaner die Veranstaltungspläne nur als PDF- oder Bild-Datei zur Verfügung.

In ArcGIS ist in der Toolbox „Conversion“ das Werkzeug „PDF To TIFF“ verfügbar, welches eine PDF-Datei in ein (TIFF-)Rasterformat umwandeln kann. Ähnlich wie bei vielen CAD-Dateien, verfügen PDF- oder Bild-Dateien über keine Georeferenzierung, sodass die Rasterdateien anschließend verortet werden müssen.

Über das Werkzeug „Raster to Polygon“ können die Rasterdateien sogar sofort ins benötigte Polygon-Format als Feature Class konvertiert werden. Hierbei besteht jedoch die Gefahr der Bildung sogenannter Sliver Polygons, also sogenannter Splitterpolygone, welche als fehlerhafte Flächen bei der Konvertierung durch die Software interpretiert werden. Diese Sliver Polygons müssen vor der Analyse beseitigt werden, da sie den Datensatz und somit die Flächen verfälschen. Störfaktoren und Fehlerquellen bilden dabei unter anderem auch Muster, Zeichen oder Schriftsymbole in den PDF- oder Bild-Dateien. Die Georeferenzierung von PDF- oder Bilddateien muss folglich in jedem Fall manuell kontrolliert und nachbearbeitet werden.

4.3.3 Manuelle Georeferenzierung und Hindernisidentifikation

Stehen dem Einsatzplaner keine verwertbaren Plansätze zur Verfügung – wie dies zum Beispiel bei Straßenfesten der Fall sein kann – muss die Veranstaltungsfläche für die Analyse komplett manuell erfasst werden. Als Orientierungshilfen zur Flächenerfassung können dabei thematisch ausgewählte Grundkarten verwendet werden, bei Veranstaltungen unter freiem Himmel eignen sich aktuelle Orthophotos ebenfalls sehr gut. Voraussetzung ist jedoch eine sehr gute Ortskenntnis des Planers sowie Kenntnisse über die Veranstaltungsstruktur und die technischen Aufbauten.

4.3.4 Methodische Umsetzung in ArcGIS

Wie oben dargestellt, gibt es verschiedene Ansätze um die zur Verfügung stehenden Plansätze als Grundlage in ArcGIS zu importieren, um daraus die Besucherfläche abzuleiten.

Diese Methoden erfordern jedoch je nach Planqualität einen erheblichen Zeitaufwand durch den Einsatzplaner und stehen nur selten in Relation zu dem tatsächlich notwendigen Ergebnis. Ziel der Georeferenzierung der Veranstaltungsfläche soll, wie bereits erwähnt, die ungefähre Abgrenzung des Untersuchungsgebietes sowie die Festlegung der Bewegungsflächen für die Besucher zur späteren Ableitung des Bewegungsnetzwerkes sein. Die erforderliche Datenqualität und –präzision muss für diesen Zweck somit nicht sehr hoch sein, sondern kann auch teilweise fehlerbehaftet (zum Beispiel durch Vernachlässigen der Sliver Polygone) sein.

Für die Umsetzung in ArcGIS werden zwei Polygon-Datensätze erstellt und anschließend unter Nutzung der bekannten Ausschneidwerkzeuge (z.B. „Erase“-Tool aus der „Analysis“-Toolbox) verschnitten. Im ersten Schritt werden die äußeren Ausdehnungen der Veranstaltungsfläche als Polygon modelliert. Der zweite Polygondatensatz enthält die aus den oben genannten Datenquellen abgeleiteten Hindernisse. Werden beide Polygondatensätze anschließend verschnitten, ist das Ergebnis ein an der Veranstaltungsausdehnung angepasstes Polygon mit darin enthaltenen Löchern („Insel-Polygone“) für die entfernten Hindernisse.

Die verbleibende Polygonfläche ist somit die Fläche, in der sich die Besucher aufhalten und in der die Rettungskräfte sich bewegen können. Sie bietet die Grundlage zur Ableitung eines Bewegungsnetzwerkes.

4.4 Erstellung eines allgemeinen Bewegungsnetzwerkes

Nachdem, wie unter Ziffer 4.3 beschrieben, die möglichen Bewegungsflächen der Besucher – und somit auch die durch die Rettungskräfte abzudeckende Fläche – zur Verfügung stehen, muss auf Grundlage dieser ein allgemeines Bewegungsnetzwerk modelliert werden.

Im GIS setzen sich Netzwerke als miteinander verbundenen Linien- bzw. Polylinien zusammen, wobei die Netzwerkknoten die Kreuzungspunkte zweier Linienenden sind. Als Knoten gelten dabei wie erwähnt nur Kreuzungen an Linienenden, bei denen von einer Linie zu einer anderen Linie gewechselt werden kann. Linien können sich auch knotenlos kreuzen – sprich übereinanderliegen – wie dies zum Beispiel zur Modellierung von Brücken oder Tunnels von Nöten ist. Knoten können ebenfalls Übergänge zwischen verschiedenen Netzwerken darstellen, wie dies zum Beispiel bei einer Bushaltestelle der Fall sein kann, wo die Person vom Fußgängernetzwerk ins Straßennetzwerk wechselt [9].

Die Richtung, in welche eine Kante durchlaufen werden kann, kann vorgegeben bzw. eingeschränkt werden. In diesem Fall spricht man von einem „gerichteten“ Graphen. Dies ist zum Beispiel der Fall bei Einbahnstraßen in Straßennetzwerken oder wenn den verschiedenen Richtungen unterschiedliche Widerstandsfaktoren zum Durchlaufen zugewiesen werden sollen. Da der untersuchte Widerstandsfaktor jedoch in alle Richtungen gleichermaßen wirkt, kann das Netzwerk ungerichtet erstellt werden.

Es kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass bei einer Veranstaltungsplanung keine entsprechenden Netzwerkstrukturen verwendet werden und somit auch nicht als Datengrundlage zur Verfügung stehen. Die Netzwerke müssen somit für die Analyse dem Veranstaltungsgelände und den unter Ziffer 4.2.1 vorgestellten Kriterien entsprechend erstellt werden.

4.4.1 Fehlerberücksichtigung bei der Netzstruktur

4.4.1.1 Einschränkung der Freiheitsgrade

Da bei der Analyse von fußläufigen Einheiten ausgegangen wird, muss das Netzwerk auch die großen Bewegungsfreiheitsgrade dieser berücksichtigen. Personen sind grundsätzlich nicht an vorgegebene Wege gebunden, sondern können sich viel freier, als zum Beispiel Fahrzeuge, in der Fläche bewegen. Personen können ihre Fortbewegungsrichtung durch eine freie 360°-Drehung beliebig wählen, Fahrzeuge hingegen sind durch technische Einschränkungen (zum Beispiel maximaler Lenkwinkel) in ihrer Richtungswahl eingegrenzt.

In Menschenmengen werden die Bewegungsrichtungen von Individuen jedoch von außen durch die anderen Personen eingeschränkt. Befindet sich die Rettungskraft zum Beispiel umgeben von 4 Personen, wie in der nachfolgenden Abbildung dargestellt, werden die möglichen Bewegungsrichtungswinkel bereits erheblich eingeschränkt:

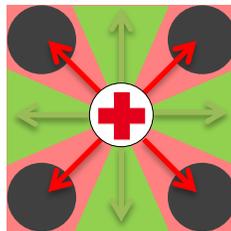


Abbildung 7: Beispielhafte theoretische Einschränkung der Bewegungsrichtungen

Mit steigender Personendichte werden die Bewegungsrichtungswinkel somit immer begrenzter, bis hin zur völligen Bewegungseinschränkung bei $\rho \geq 6 \text{ Pers./m}^2$.

In Netzwerken werden die Bewegungsrichtungen immer durch die modellierten Linien beschrieben. Linien verfügen definitionsgemäß nur über eine Richtung und berücksichtigen somit nicht alle möglichen Bewegungsrichtungswinkel einer Person, da diese sozusagen an der Linie entlanglaufen muss. Zur realitätsgetreuen Modellierung müssten somit an jedem Punkt im Raum unendlich viele Linien im 360° Bereich zur Verfügung stehen, damit die freie Richtungswahl der Person erhalten bleibt. Dieses Prinzip ist jedoch weder zweckdienlich, noch entspricht es der Definition eines Modells, welches grundsätzlich eine Vereinfachung der Wirklichkeit wiedergeben soll.

Eine Gitterstruktur begrenzt die möglichen Bewegungsrichtungen zwingend in die vorgegebene Anzahl an Verzweigungen, in der Regel also auf

- 3 pro Knotenpunkt bei einer sechseckigen Wabenstruktur,
- 4 pro Knotenpunkt bei einem rechtwinkligen Gitter ,
- und 6 pro Knotenpunkt bei einem gleichseitigen dreieckigen Gitter.

Die geringste Einschränkung der Freiheitsgrade besteht also bei einem Gitter aus gleichseitigen Dreiecken.

“These methods restrict individual movement to a few specific paths of direction. [...]” [42]

Thomson bestätigt die Einschränkung der Freiheitsgrade im Rahmen der Netzwerkmodellierung. Durch die Gitterstruktur liegt somit ein systematischer Fehler bei der möglichen Richtungswahl an jedem Knotenpunkt vor. Dieser Fehler kann jedoch sowohl durch eine angepasste Zellgröße als auch durch die Wahl einer geeigneten Gitterstruktur minimiert werden. Die Einschränkung der Freiheitsgrade eines Fußgängers bei der Netzwerkanalyse ist somit eine Folge der Vereinfachung der Realität und damit fehlerbehaftet, hat jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Validität des Modells.

4.4.1.2 Überholmanöver

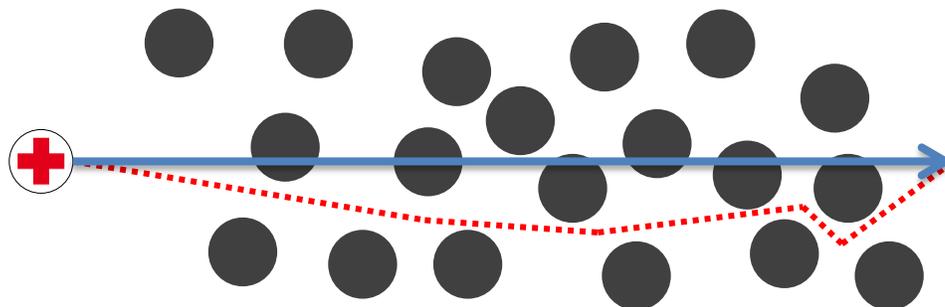


Abbildung 8: Durchlaufen einer Menschenmenge

Abbildung 8 zeigt skizzenhaft das Durchlaufen einer Menschenmenge durch einen Rettungstrupp. Während die blaue Linie den kürzesten Weg darstellt, zeigt die gestrichelte rote Linie eine von vielen potentiell in der Realität gewählten Routen des Trupps.

Die Modellierung im GIS würde der blauen Linie entsprechen (geradlinig), da im Modell nicht alle (zu umlaufenden) Personen abgebildet werden können. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Positionen von Personen in Menschenmengen sehr dynamisch und wechselhaft sind. Die geradlinige Modellierung ist somit eine zu

akzeptierende Vereinfachung der Realität, führt jedoch zu einer Fehlerbehaftung der Länge aufgrund der Vernachlässigung der Überholmanöver und – wie bereits beschrieben – ebenfalls zu einer Einschränkung der Freiheitsgrade.

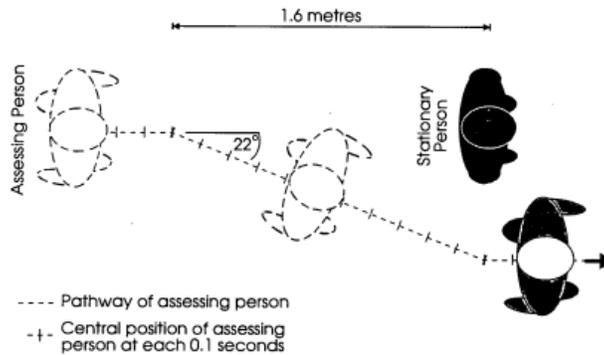


Abbildung 9: Wegverlängerung beim Überholen einer Person¹¹

Abbildung 9 von Thompson zeigt am Beispiel des Überholens einer Person die Wegverlängerung, welche nachfolgend mathematisch dargestellt wird:

Sei x_0 die geradlinige Distanz und $x_{\ddot{u}}$ die zurückgelegte Distanz durch das Überholen, so folgt für Δx :

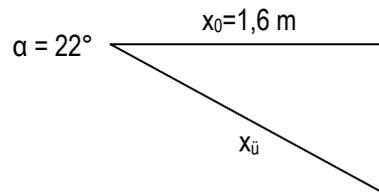


Abbildung 10: Prinzip der Wegverlängerung als Skizze

$$x_{\ddot{u}} = \frac{1,6 \text{ m}}{\cos 22^\circ} = 1,726 \text{ m}$$

$$\Delta x = x_{\ddot{u}} - x_0 = 1,726 \text{ m} - 1,6 \text{ m} = 0,126 \text{ m}$$

Durch das Überholen einer Person erfolgt nach Thompsons Modell somit eine Wegverlängerung von rund 7,8 %. Das Modell von Thompson eignet sich jedoch nicht für große Menschengruppen, da die Überholmanöver hier auf viel kürzeren Strecken (< 1,6 m) bei größeren Richtungswechseln (> 22°) erfolgen müssen. Die Strecke wird pro Person in der Realität somit um deutlich mehr als 7,8 % verlängert.

Dieses Prinzip der Wegverlängerung ist vergleichbar mit der sogenannten Manhattan-Metrik. Diese gibt die Distanz zweier Punkte $A(a_x; a_y)$ und $B(b_x; b_y)$ als Summe der absoluten Differenzen zwischen ihren Koordinaten in der Form

$$\overline{AB} = |a_x - b_x| + |a_y - b_y|$$

¹¹ Abbildung entnommen aus [42]

wieder. Bei viereckigen Gittern wird die Strecke gemäß des Satzes des Pythagoras so zum Beispiel gegenüber dem direkten Weg um einen Faktor von $\sqrt{2}$ verlängert. Richard und Ghazala haben 1983 in einer Arbeit die Funktionsweise der Manhattan-Metrik mit rechtwinkligen Laufwegen bei zu umlaufenden Hindernissen zur Standortplanung angewendet [36]:

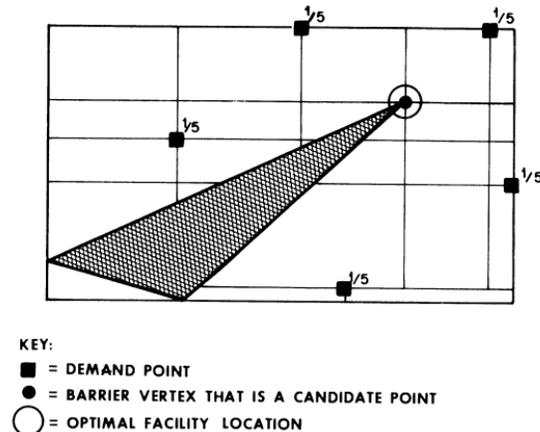


Abbildung 11: Beispieldarstellung der Manhattan-Metrik bei zu umlaufenden Hindernissen¹²

Im Fall von Menschenmengen sind die Hindernisse die Personen, welche gemäß den Körperproportionen nach Weidmann eine Fläche von ca. 30 cm auf 50 cm, sprich 0,15 m², einnehmen [47]. Gemäß der Methode nach Richard und Ghazala, könnte man somit ein Gitter mit Zellengrößen von 0,3 m auf 0,5 m modellieren, wo sich die Personen im Zelleninnern theoretisch aufhalten könnten. Dadurch könnte die Wegverlängerung durch das Überholen berücksichtigt werden. Diese Gitterauflösung würde jedoch – bei einem rechteckigen Gitter - zu einer Anzahl von bis zu 12 Knoten und 17 Kanten pro zu modellierenden Quadratmeter führen. Bei großen Flächen würde die Knoten- und Kantenzahl somit schnell ins (zehn-)tausendfache steigen und hätte einen extrem hohen Rechenaufwand zur Folge. Weiterhin wäre dies nur begrenzt realistisch, da demnach direkter Körperkontakt ohne Abstand zwischen den Personen während dem Überholmanöver bestehen würde. Trotzdem zeigt die Arbeit von Richard und Ghazala, dass sich die Gitterstruktur prinzipiell zur Modellierung der Überholmanöver eignet.

Eine genaue Festlegung der (theoretisch) durchzuführenden Überholmanöver ist aufgrund der dynamischen Verhältnisse innerhalb der Menschenmengen allerdings kaum möglich und somit ist auch eine Anpassung des Gitters an die Überholmanöver praktisch nicht durchzuführen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die von Knopp ermittelten Werte für die Widerstandsfaktoren den Faktor des Überholens bereits mitberücksichtigen, da diese unter realen Bedingungen ermittelt wurden und somit zahlreiche Überholmanöver durch die untersuchten Trupps durchgeführt werden mussten. Aus diesem Grund kann berechtigt angenommen werden, dass kein systematischer Fehler durch die Überholmanöver vorliegt, da diese durch die zu hinterlegenden Widerstandswerte berücksichtigt werden, und diese für die Erstellung der Gitterstruktur somit vernachlässigt werden können.

4.4.1.3 Form der Gitterstruktur

Oftmals bestehen Gitter aus viereckigen Polygonen oder Linienzügen mit definierter Größe. Die Richtungswechsel würden demnach in 90°-Winkeln stattfinden.

¹² Abbildung entnommen aus [36]

“[...] the movement of individuals from one node to the next is typically limited to steps of ninety degrees. If this form of route definition is used, the travel distances incurred may be up to 41% greater than those encountered by direct travel to the exit at the correct angle.” [42]

Thompson hat nachgewiesen, dass ein rechtwinkliges Gitter durch die spitzen Richtungswechsel und den damit verbundenen „Umwegen“ im Sinne der Manhattan-Metrik zu einer Streckenverlängerung von bis 41 % gegenüber dem direkten Weg und somit bei vielen Richtungswechseln zu einem erheblichen Fehler hinsichtlich der zurückzulegenden Strecken führen kann.

Als möglicher Lösungsansatz bezieht er sich auf das Programm EGRESS, welches durch eine sechseckige Wabenstruktur als Bewegungsgitter den Streckenfehler auf bis zu 15% reduziert hat. Anstelle von Vierecken werden dabei gleichseitige Hexagone mit einem Innenwinkel von 120° eingesetzt, die Richtungswechsel können somit von 90° auf 60° verringert werden, wodurch sich der geringere Streckenfehler gegenüber einem rechtwinkligen Netz erklärt.

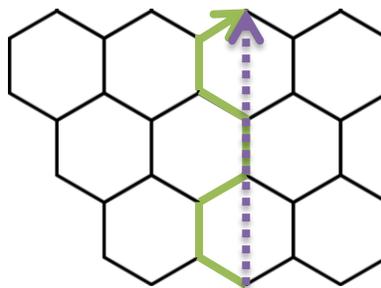


Abbildung 12: Fortbewegung in der Wabenstruktur

Eine Wabenstruktur ist somit besser geeignet als ein rechtwinkliges Gitter, führt jedoch noch immer zu einem systematischen Längenfehler von mindestens 15% pro Wabe gegenüber dem direkten Weg. Weiterhin hat die Wabenstruktur den Nachteil, dass keine geradlinige Fortbewegung möglich ist, sondern immer eine gezackte Fortbewegungslinie resultiert. Dadurch werden die Längenfehler pro Wabe zusätzlich aufsummiert und der Folgefehler vergrößert sich. Im Beispiel in Abbildung 12, ausgehend von einer Hexagonseitenlänge von 1 Meter, ist der gezeigte Weg demnach entlang der Wabenstruktur mit 7 Metern um fast 30 % länger als der direkte Weg mit 5 Metern.

Unterteilt man die Hexagone jedoch jeweils in 6 gleichseitige Dreiecke durch jeweilige Verbindung der Ecken mit dem Zentrum, bleibt immer ein theoretisch direkter Weg bestehen, auf dem das Hexagon durchquert werden kann. Ohne Richtungswechsel kann somit eine geradlinige Fortbewegung modelliert werden, nur bei einem Richtungswechsel bleibt der Längenfehler gleich wie beim hexagonförmigen Gitter. Die Methode ist somit geeignet, um auch große Flächen zu überspannen, ohne dass sich bei der Querung signifikante Längenfehler ergeben. Die gewählte dreieckige Struktur ist somit vergleichbar mit der von Graser entwickelten Methodik zur Integration von offenen Flächen in OpenStreetMap in das Fußgängerouting über direkte Sichtlinien [22].

Durch die dreieckige Gitterstruktur kann die Fortbewegung einerseits wie bei einem rechtwinkligen Gitter geradlinig modelliert werden, gleichzeitig wird der Längenfehler bei Richtungswechsel wie in der Wabenstruktur gegenüber dem rechtwinkligen Gitter reduziert. Die dreieckige Gitterstruktur weist somit gegenüber den anderen Gitterformen (Rechtecke und Hexagone) den deutlich geringsten systematischen Längenfehler auf. Berücksichtigt man weiterhin, dass die Fortbewegung über große Distanzen geradlinig erfolgt und Richtungswechsel nur bei Verzweigungen oder

Engstellen die Regel sind, so kann der systematische Längenfehler auf einen vernachlässigbaren Wert reduziert werden.

Die dreieckige Gitterstruktur ist folglich die zu wählende Form mit dem geringsten systematischen Längenfehler.

4.4.2 Festlegung der Seitenlängen der Dreiecke im Gitternetz

Ausgehend davon, dass die Zellgröße gemäß Ziffer 4.4.1.2 unabhängig von theoretischen Überholmanövern gewählt werden kann und dass gemäß Ziffer 4.4.1.3 der systematische Längenfehler bei Richtungswechsel durch die gewählte Gitterform ein zu vernachlässigender Fehler ist, kann die Gittergröße grundsätzlich ohne signifikanten Einfluss auf die Berechnung frei gewählt werden. Einzig limitierende Faktoren sind die Rechnerleistung sowie die korrekte Abdeckung von Engstellen innerhalb der Veranstaltungsflächen.

Um vergleichbare Daten zwischen den verschiedenen Analyseszenarien zu erhalten, wird im Rahmen der Arbeit eine Seitenlänge von 2 Meter festgelegt.

4.4.3 Methodische Umsetzung in ArcGIS

ArcGIS verfügt über kein standardisiert integriertes Werkzeug zur Erstellung einer frei parametrierbaren dreieckförmigen Liniengitterstruktur nach dem Prinzip des „Create Fishnet“-Werkzeugs. Jeff Jenness stellt auf seiner Webseite jedoch ein Tool zur Verfügung, bei dem eine Gitterstruktur anhand von wiederholenden Polygonen („Repeating Shapes“) erstellt werden kann [28]. Aufgrund der Kompatibilität mit ArcGIS, der einfachen Programmgestaltung sowie der freien Parametrierung eignet sich dieses Werkzeug somit zur Erstellung des Dreiecknetzes.

Im ersten Schritt wird die Ausdehnung der Veranstaltungsfläche anhand des Veranstaltungsgeländepolygons ausgewählt:

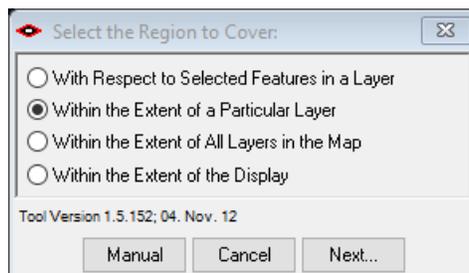


Abbildung 13: "Repeating Shapes"-Tool - Select the Region to Cover

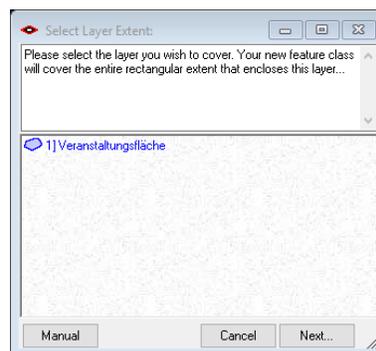


Abbildung 14: "Repeating Shapes"-Tool - Select Layer Extent

Als wiederholende Form werden Dreiecke ausgewählt:

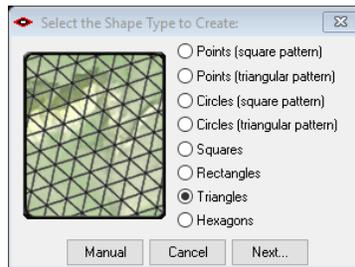


Abbildung 15: "Repeating Shapes"-Tool - Select the Shape Type to Create

Die Größe der Dreiecke wird wie unter Ziffer 4.4.2 festgelegt:

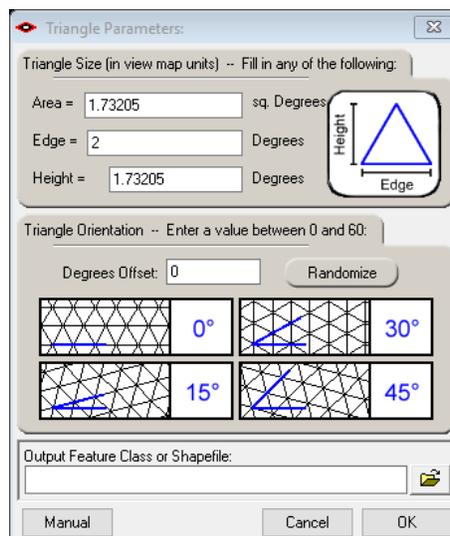


Abbildung 16: "Repeating Shapes"-Tool - Triangle Parameters

Das Ergebnis des Tools ist ein dreieckiges Polygonnetz mit den maximalen Ausmaßen des Eingabe-Polygons. Im nächsten Schritt werden die Kanten der Dreieck-Polygone dann über das Data Management Werkzeug „Polygon to Line“ in Polylinien umgewandelt und anschließend über den Befehl „Linien an Schnittpunkten teilen (Planarize Lines)“ aus der „Erweiterten Bearbeitung“-Werkzeugleiste in einzelne Linien zerteilt, damit die Kanten als einzelne Linien für die spätere Netzwerkerstellung zur Verfügung stehen und an den Schnittpunkten bei der späteren Netzwerkberechnung die Verbindungsknotenpunkte vorliegen. Im letzten Schritt werden über die „Clip“-Funktion nur die innerhalb der Veranstaltungsfläche liegenden Kanten ausgeschnitten. Das Ergebnis ist somit ein dreieckförmiges Liniennetz, welches anschließend nach Zuweisung der Widerstandsfaktoren und Impedanzen als Netzwerk entwickelt werden kann.

4.5 Erhebung der Personendichten als Widerstandsfaktor

4.5.1 Erhebung

Grundsätzlich können realitätsgetreue Personendichten nur durch direkte Beobachtung einer Menschenmenge erhoben werden. Insbesondere sind dabei die dynamischen Aspekte zu berücksichtigen, da durch die Bewegungen der Menschenmenge sich die Dichten kontinuierlich verändern und auch im Raum bewegen. Jede Erhebung stellt also lediglich eine Momentaufnahme der Situation dar und zeigt eine statische Lage. Zur Erfassung der Dynamik ist also eine Beobachtung eines Ortes über einen längeren Zeitraum notwendig. Die flächendeckende, dynamische Erhebung ist somit mit einem erheblichen Personal- und Materialaufwand verbunden.

Für die vorliegende Fragestellung reicht ein statischer Ansatz jedoch aus, da an diesem bereits der Einfluss der Menschenmenge auf die Fortbewegung der Rettungskräfte untersucht werden kann. Wählt man dabei den Zeitpunkt der höchsten zu erwartenden Dichten, das heißt den Zeitpunkt mit der höchsten gleichzeitigen Anwesenheit von Besuchern, so kann die Analyse für die Situation des höchsten Widerstandes erfolgen, da hier mit dem größten Einfluss zu rechnen ist. Folgt die anschließende Einsatzplanung anhand dieser höchsten Widerstandssituation, so kann berechtigt davon ausgegangen werden, dass die räumliche Abdeckung der Einsatzkräfte bei geringeren Widerständen, also weniger anwesenden Personen, sogar noch besser ist. Dieses Prinzip der „Worst-Case“-Betrachtung kann für die Einsatzplanung als gängige Praxis angesehen werden.

Weiterhin muss zwischen einmalig stattfindenden und wiederkehrenden Veranstaltungen unterschieden werden. Während bei wiederkehrenden Veranstaltungen zumindest orientierende Daten erhoben und auf die nachfolgende Veranstaltung übertragen werden können, können bei einmalig stattfindenden Veranstaltungen die Daten lediglich abgeschätzt werden, da eine Erhebung im Vorfeld nicht möglich ist.

Als einfachste Methode kann für ein Veranstaltungsgelände mit bekannter Fläche über die zu erwartende gleichzeitige Anzahl anwesender Besucher die durchschnittliche Dichte wie folgt berechnet werden:

Formel 5: Berechnung der durchschnittlichen Personendichte

$$D_{\text{Schätz}} = \frac{\text{Anzahl gleichzeitig anwesender Besucher [Pers.]}}{\text{Fläche [m}^2\text{]}}$$

Während die Fläche über das modellierte Veranstaltungsgelände bestimmt werden kann, muss die Anzahl gleichzeitig anwesender Besucher vom Veranstalter mitgeteilt werden oder abgeschätzt werden. Diese Methode ist ein vereinfachtes Verfahren, um zumindest allgemein den möglichen Einfluss der Personendichten abschätzen zu können, vernachlässigt jedoch vollständig die räumliche Verteilung der Besucher innerhalb der Veranstaltungsfläche.

Um diesen Aspekt zu berücksichtigen, ist eine tatsächliche Menschenmengenbeobachtung durchzuführen. Die tatsächliche Verteilung einer Menschenmenge auf einer Fläche hängt dabei von zahlreichen Faktoren ab, insbesondere sind die Besucher anziehende Objekte (z.B. Bühne oder Getränkestand) maßgebend. Die Beobachtung einer Menschenmenge kann manuell oder automatisch erfolgen.

Automatische Verfahren basieren immer auf der Auswertung von Bilddateien wie Fotos oder Videos. Voraussetzung für eine flächendeckende Erhebung, wie es für die Fragestellung notwendig ist, ist somit immer das Vorhandensein einer adaptierten Technikstruktur [7]. Diese steht jedoch nur selten zur Verfügung und ist immer mit einem erheblichen materiellen und somit finanziellen Aufwand verbunden. Automatische Verfahren werden daher in der Praxis eher zur lokalen Überwachung von kritischen Bereichen eingesetzt. Sie basieren auf verschiedenen Verfahren der automatisierten Bildauswertung, wie zum Beispiel statistischen Verfahren [41], Regressionsverfahren [18] oder

binären Mustern [19], um nur einige wenige hervorzuheben. Die technischen Verfahren sind dabei sehr fortgeschritten und verlässlich, erfordern – wie bereits erwähnt – jedoch immer die notwendige Aufnahmetechnik.

Da es nicht Ziel der Arbeit sein soll, eine automatisierte Methode zur Erhebung von Personendichten zu entwickeln bzw. anzuwenden, wurde bewusst auf ein automatisiertes Verfahren verzichtet. Dies hat weiterhin den Vorteil, dass die im weiteren Verlauf angewendete manuelle Methode ohne großen finanziellen und technischen Aufwand bei jeder Veranstaltung, auch bei fehlenden technischen Einrichtungen, wiederholt werden kann und die Ergebnisse somit bei anderen Veranstaltungen validiert werden können.

Der Nachteil einer manuellen Erhebung gegenüber einem automatisierten Verfahren liegt im personellen Aufwand und in der Fehleranfälligkeit bei der Auszählung und Bewertung des Bildmaterials durch eine Person. Die Ergebnisse einer manuellen Erhebung müssen somit immer als fehlerbehafteter Schätzfaktor angesehen werden. Unter Anbetracht der dynamischen Veränderungen der Menschenmengen kann dies für die vorliegende Fragestellung – insbesondere auch durch die nur statische Betrachtung – jedoch akzeptiert werden. Dies kann insofern begründet werden, dass vornehmlich der allgemeine und flächendeckende und nicht ein spezifisch lokaler Einfluss der Menschendichten auf die Standortplanung der Rettungskräfte untersucht werden soll. Die manuelle Erhebung bleibt trotzdem immer nur eine abschätzende Erhebungsmethode für Personendichten.

Im Rahmen des EVA-Forschungsprojektes wurden bei der Fußballweltmeisterschaft 2006 verschiedene manuelle Dichteerhebungen vorgenommen und auf deren Ergebnissen ein Forschungsbericht seitens der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. erstellt [35]. Hierfür wurden Fotos von erhöhten Positionen aufgenommen und die Personen anschließend innerhalb einer bestimmten Fläche ausgezählt. Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass zur Bildaufnahme ein erhöhter Standort sowie ein Referenzobjekt zur Maßstabsbestimmung zur Verfügung stehen müssen. Diese beiden Voraussetzungen sind in der Praxis jedoch flächendeckend kaum vorhanden, sodass sich diese Methode nur für vorbereitete Bereiche eignet und somit die Notwendigkeit einer flächendeckenden Anwendbarkeit nicht erfüllt.

Es besteht also die Problematik, dass die bekannten Methoden eine flächendeckende Erhebung kaum zulassen. Aus diesem Grund soll ein vereinfachtes Verfahren vorgestellt werden, wie anhand der Bewertung der Bewegungs- und Verteilungsformen der auf aufgenommenen Fotos zu erkennenden Menschenmengen die lokale Personendichte abgeschätzt werden kann. Die in Abbildung 17 dargestellten Entscheidungskriterien basieren auf den Erkenntnissen von Predtetschenski, Milinski und Fruin, welche die Bewegungscharakteristiken von Menschenmengen in Bezug auf die lokale Personendichte untersucht und beschrieben haben [17, 37]:

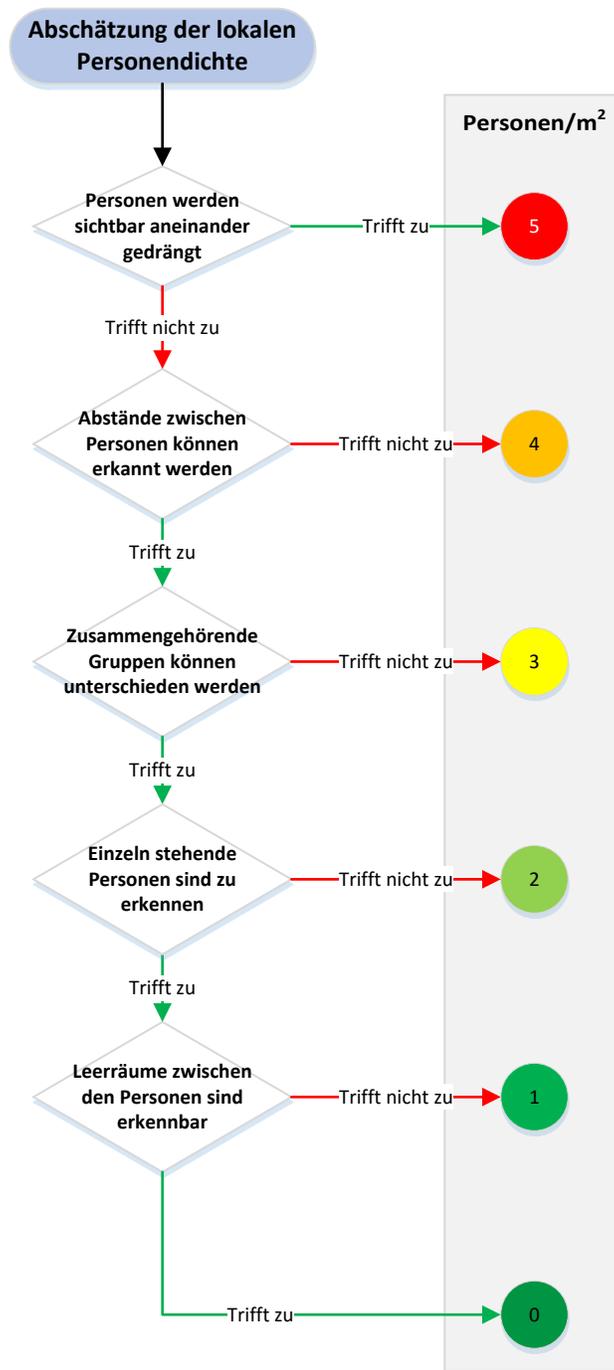


Abbildung 17: Methode zur Abschätzung von Personendichten auf Fotos

Es handelt sich um einfach auf Fotos zu identifizierende Merkmale, welche einen direkten Rückschluss auf die lokale Personendichte ermöglichen. Diese Methode erfordert keine maßstabsgetreuen Bildaufnahmen, sondern lediglich Aufnahmen der Menschenmengen in einem definierten Bereich. Sie erfordert somit keine technischen Voraussetzungen und ist daher flächendeckend einsetzbar, hat jedoch den Nachteil, dass es sich um ein sehr vereinfachtes Verfahren handelt und der Schätzfehler somit sehr hoch ist. Wie oben bereits erwähnt, ist dies für die vorliegende Fragestellung jedoch eine zu akzeptierende Vereinfachung, da die Einfachheit der Datenerhebung, die Wiederholbarkeit und ihre flächendeckende Anwendbarkeit überwiegen.

Für die Erhebung der Menshendichten reicht aus technischer Sicht somit ein Aufnahmegerät mit GPS-Funktion (z.B. Smartphone mit aktivierter Ortungsfunktion) aus. Dadurch können während einer Veranstaltung die Menschenmengen durch eine oder mehrere Personen fotografiert und anschließend am Rechner ausgewertet und ins GIS übernommen werden. Durch das GPS können die Aufnahmen im Raum georeferenziert werden und so die Übertragbarkeit auf das Bewegungsnetzwerk realisiert werden.

4.5.2 Modellierung im GIS

Eine Dichte wird immer auf eine Fläche bezogen, ist also ein flächiges Kriterium. Die Modellierung der Personendichten im GIS muss demnach als Flächenobjekt erfolgen.

Durch die unter Ziffer 4.5.1 beschriebene Erhebungsmethode, liegen nach der praktischen Erhebung die Personendichten an GPS-referenzierten Orten vor. Durch das vereinfachte Erhebungsverfahren stehen die Personendichten somit nur in Punktform und nicht in Flächenform zur Verfügung und stehen somit eigentlich im Widerspruch zur oben beschriebenen flächigen Eigenschaft der Dichte. Die Werte der an den Messorten ermittelten Dichten müssen somit für die weitere Nutzung in die Fläche übertragen werden.

„Interpolation weist gegebenen diskreten Daten (z.B. Messwerten) eine kontinuierliche Funktion zu, die diese Daten abbildet.“ [4]

In der Geoinformatik kann diese Übertragung der Punktwerte in die Fläche mittels Interpolation erfolgen. Dieses aus der Mathematik stammende Verfahren approximiert eine Fläche anhand von einer vorgegebenen Anzahl an Messpunkten. Die Flächenwerte zwischen den Punkten werden je nach gewählter Interpolationsmethode unterschiedlich ermittelt.

In ArcGIS stehen über die Spatial Analyst Erweiterung sechs Interpolationsmethoden zur Verfügung: Inverse Distance Weighted, Kriging, Natürlicher Nachbar, Spline, Topo zu Raster und Trend [13].

Für die Auswahl der geeigneten Interpolationsmethode sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

- Personendichten ändern sich nur selten sprunghaft, sondern nehmen eher kontinuierlich zu bzw. ab. Dies ist am Beispiel einer Bühne erkennbar, wo in direkter Nähe die meisten Personen stehen und die Dichten nach hinten und zu den Seiten aufgrund der immer schlechter werdenden Sicht- und Tonverhältnisse kontinuierlich abnehmen.
- Ein Messpunkt beeinflusst seine direkte Umgebung am stärksten, da hier immer ein Gruppenzusammenhalt aufgrund einer lokalen Gegebenheit angenommen werden kann. Wird zum Beispiel vor einem Getränkestand eine hohe Personendichte erfasst, so ist diese auch in der direkten Umgebung wahrnehmbar, da sich hier viele Menschen mit dem gleichen Ziel (Getränke kaufen) aufhalten.
- Weiter entfernte Messpunkte beeinflussen die lokale Personendichte nur geringfügig. Je größer dabei die Entfernung ist, umso geringer ist der Einfluss des Messpunktes auf die lokale Dichte. Ist eine Bühne zum Beispiel mehrere Hundert Meter von einem Erfassungspunkt entfernt, so wird sie durch die Besucher kaum noch wahrgenommen und beeinflusst nur geringfügig ihr Verhalten.
- Bei Personendichten sind selten globale Trends innerhalb einer gesamten Veranstaltungsfläche zu beobachten. Trends werden eher lokal durch für die Besucher attraktive Anziehungspunkte (z.B. die Personen drängen in Richtung einer Bühne) erzeugt.
- Personendichten werden durch die in der Realität bestehenden Barrieren (z.B. Absperrung oder Wellenbrecher) begrenzt. Eine Interpolation zwischen mehreren Messpunkten durch ein Hindernis hindurch ist somit falsch und muss vermieden werden.

Von den oben genannten Interpolationsverfahren eignet sich die Inverse Distance Weighted [IDW] Methode am besten, da sie die aufgelisteten Kriterien allesamt erfüllt. Für eine möglichst realitätsgetreue Interpolation spielen insbesondere die festgelegte Potenz sowie die Anzahl der verwendeten Punkte im Suchradius eine wichtige Rolle. Die Potenz sollte aufgrund des großen Einflusses eines Punktes auf seine direkte Umgebung möglichst hoch sein. Die optimalen Werte für diese Parameter müssen fallbezogen unter Zuhilfenahme des Geostatistical Analyst ermittelt werden.

Wie hier dargestellt, ermöglicht die Interpolation die Übertragung der an definierten Orten erhobenen Personendichten auf die gesamte Fläche des Veranstaltungsgeländes. Durch eine geeignete Parameterwahl bei der IDW können die als Punktdaten vorliegenden Daten somit realitätsgetreu in die Fläche übersetzt werden.

4.6 Anwendung der Widerstandsfaktoren auf das Bewegungsnetzwerk

4.6.1 Geschwindigkeitsfunktion

Formel 3 beschreibt den Zusammenhang zwischen der für die Kante ermittelten Personendichte und der möglichen Fortbewegungsgeschwindigkeit entlang der Kante als Funktion zweiten Grades. Die Rettungstruppgeschwindigkeit für jede Kante kann demnach durch Ersetzen von x und y in Formel 3 durch die Dichte ρ und die Geschwindigkeit S_{RT} wie folgt ausgedrückt werden:

Formel 6: Rettungstruppgeschwindigkeit

$$S_{RT} = 0.05\rho^2 - 0.6036 \cdot \rho + 1.8407$$

mit

- S_{RT} : Geschwindigkeit des Rettungstrupps in m/s
- ρ : lokale Personendichte in P/m^2

4.6.2 Anwendung der Personendichten

Damit die Personendichten zur Berechnung der Fortbewegungsgeschwindigkeit entlang einer Kante verwendet werden können, muss jeder Kante ein passender Dichtewert zugeordnet werden. Der Dichtewert muss dabei aus dem vorliegenden Dichteraster mit räumlichem Bezug übernommen werden.

Hierfür wird im ersten Schritt das interpolierte Dichteraster gemäß folgender Tabelle neu klassifiziert:

Tabelle 4: Klassifizierung des interpolierten Dichterasters

Alter Rasterwert		Neuer Rasterwert
Von	Bis	
-	NoData	0
-	0	0
> 0	≤ 0,5	1
> 0,5	≤ 1	2
> 1	≤ 1,5	3
> 1,5	≤ 2	4
> 2	≤ 2,5	5
> 2,5	≤ 3	6
> 3	≤ 3,5	7
> 3,5	≤ 4	8
> 4	≤ 4,5	9
> 4,5	≤ 5	10

Die neue Wertzuweisung entspricht dabei immer dem Doppelten der oberen Klassengrenze, da das Reclassify-Werkzeug als neue Rasterwerte nur Integer (Ganzzahlen) erlaubt. Zellen ohne Daten (NoData) wird der Wert 0 zugewiesen, also das Nicht-Vorhandensein eines Widerstandes. Dadurch wird sichergestellt, dass auch Kanten im Bereich dieser Zellen ein korrekter Dichtefaktor zugewiesen wird.

Durch die Verdopplung der Dichtewerte muss die Geschwindigkeitsfunktion wie folgt angepasst werden:

Formel 7: Angepasste Rettungstruppgeschwindigkeit

$$S_{RT} = 0.05 \frac{\rho^2}{4} - 0.6036 \cdot \frac{\rho}{2} + 1.8407$$

Durch die Reklassifizierung kann das Dichteraster nun über das Werkzeug „Raster to Polygon“ in ein Polygon-Vektorformat umgewandelt werden. Hierdurch kann jeder Kante der lokal vorliegende Dichtewert über einen Spatial Join zugewiesen werden. Als topologische Relation wird „have their center in“ gewählt, das heißt die Kanten erhalten den Dichtewert des Polygons welches das Kantenzentrum enthält. Aufgrund der geringen Länge (≤ 2 m) der Kanten eignet sich diese Zuweisungsrelation, um für alle Kanten geeignete Dichtewerte zu bestimmen.

Das Ergebnis dieser Übertragung der Personendichten vom Raster auf das Wegenetzwerk ist, wie unter Ziffer 4.2 beschrieben, die Zuweisung eines numerischen Dichtewertes für jede Kante.

4.6.3 Ermittlung der Durchlaufzeit pro Kante

Nach Durchführung der oben beschriebenen Schritte stehen für jede Kante die geometrische Länge sowie die zugewiesene Personendichte als Attribute zur Verfügung.

Zur Berechnung der widerstandsbehafteten Fortbewegungsgeschwindigkeit entlang der Kante wird der Attributtabelle ein Feld hinzugefügt und die Geschwindigkeit gemäß Formel 7 mittels Feldberechner ermittelt, wobei der Parameter ρ durch den Wert des Feldes, welche die Personendichte enthält, ersetzt wird. Für die widerstandsfreie Fortbewegungsgeschwindigkeit wird ein weiteres Feld hinzugefügt und als Wert allen Kanten die Konstante 1,8407 hinzugefügt. Dies ist die maximal mögliche Fortbewegungsgeschwindigkeit in Metern pro Sekunde bei widerstandsfreier Bewegung ($\rho = 0 \text{ P/m}^2$).

In Anlehnung an Formel 4 lässt sich nun anhand der Geschwindigkeit sowie der Kantenlänge die Durchlaufzeit pro Kante wie folgt ermitteln:

Formel 8: Ermittlung der Durchlaufzeit der Kante

$$\text{Durchlaufzeit} = \frac{\text{Geometrische Kantenlänge}}{\text{Durchlaufgeschwindigkeit der Kante}}$$

Je nach Berücksichtigung der widerstandsfreien bzw. der widerstandsbehafteten Geschwindigkeit lässt sich somit auch die widerstandsfreie und widerstandsbehaftete Durchlaufzeit berechnen.

4.7 Praktische Analyse mittels Network Analyst

Alle bisher beschriebenen Vorgänge sind als Vorbereitungsschritte für die praktische Untersuchung anzusehen. Die praktische Analyse wird mit der ArcGIS Erweiterung Network Analyst in mehreren Schritten durchgeführt, um die verschiedenen Fragestellungen zu untersuchen.

4.7.1 Untersuchung der räumlichen Abdeckung mittels Einzugsgebieten

Im ersten Untersuchungsschritt soll bewertet werden, wie groß der Unterschied zwischen der widerstandsfreien und der widerstandsbehafteten Fortbewegung hinsichtlich der Eintreffzeiten ist. Hierdurch soll folgende in der Einleitung aufgeworfene Fragestellung beantwortet werden können:

Hat die Verteilung der Menschenmassen auf einem Veranstaltungsgelände einen signifikanten Einfluss auf die zeitliche Erreichbarkeit verschiedener Bereiche durch die Einsatzkräfte?

Zur Beantwortung dieser Fragestellung muss verglichen werden, welcher Anteil der Veranstaltungsfläche bei widerstandsfreier und widerstandsbehafteter Fortbewegung innerhalb welcher Zeit von vorgegebenen Standorten abgedeckt werden kann. Als objektives Bewertungskriterium werden deshalb die Anzahl der innerhalb der verschiedenen Zeiten erreichten potentiellen Einsatzorte herangezogen. Wie unter Ziffer 4.2.1 beschrieben, werden die potentiellen Einsatzorte durch ein regelmäßig über das gesamte Untersuchungsgebiet verteiltes Punktemuster beschrieben.

Die Untersuchung erfolgt dabei durch Berechnung von Service Areas (Einzugsgebieten) bei widerstandsfreier und bei widerstandsbehafteter Fortbewegung anhand von vorgegebenen Standorten. Als Standorte der Rettungseinheiten werden die in der realen Einsatzplanung festgelegten Positionen gewählt.

Durch eine räumliche Abfrage kann die Anzahl der jeweils in den einzelnen Einzugsgebieten liegenden potentiellen Einsatzorte ermittelt und der prozentuale Anteil gegenüber allen möglichen Einsatzorten bestimmt werden. Hierdurch kann die prozentuale Erreichbarkeit im zeitlichen Zusammenhang aufgetragen und zwischen den beiden Fortbewegungsarten verglichen werden.

4.7.2 Standortoptimierung der Einheiten mittels Location-Allocation-Analyse

Im zweiten Untersuchungsschritt sollen die Standorte der Rettungseinheiten optimiert werden, um folgende in der Einleitung aufgeworfene Fragestellung beantworten zu können:

Welchen Einfluss hat die Verteilung der Menschenmengen auf einem Veranstaltungsgelände auf die Standortplanung von Einsatzkräften und sollte dies zukünftig bei der Einsatzplanung für Großveranstaltungen berücksichtigt werden?

Es soll somit untersucht werden, ob es Unterschiede hinsichtlich der effektivsten Verteilung einer vorgegebenen Anzahl an Rettungseinheiten auf dem Veranstaltungsgelände bei einer widerstandsfreien und einer widerstandsbehafteten Fortbewegung gibt. Die hierfür am besten geeignete Methode ist die Location-Allocation-Analyse, die in der ESRI-Hilfe wie folgt beschrieben wird:

„Wenn Einrichtungen, die Waren und Services bereitstellen, und verschiedene Bedarfspunkte, welche diese nutzen, gegeben sind, dann besteht das Ziel der Location-Allocation darin, diejenigen Einrichtungen zu suchen, die die Bedarfspunkte am effizientesten bedienen. Wie der Name bereits sagt, bezeichnet Location-

Allocation eine Problemstellung mit zwei Aspekten, wobei gleichzeitig Einrichtungen gesucht und Bedarfspunkte den Einrichtungen zugeordnet werden.“ [12]

Die Location-Allocation-Analyse verfügt über sieben verschiedene Untersuchungsmethoden (Problemtypen), welche je nach Fragestellung angewendet werden können. Zur Standortoptimierung eignet sich am besten der Problemtyp „Flächendeckung maximieren“. Hierbei wird eine vorgegebene Anzahl an Standorten aus einer Menge möglicher Standorte so ausgewählt, dass eine maximale Abdeckung der Bedarfspunkte erreicht wird. Es werden somit die effizientesten Standorte ausgewählt. Durch die Festlegung eines Impedanz-Grenzwertes wird das maximale Einzugsgebiet eines einzelnen Standortes definiert. Bedarfspunkte welche von keinem Standort innerhalb dieser Impedanz erreicht werden können, werden keinem Standort zugewiesen.

Ausgehend vom Prinzip, dass grundsätzlich alle Bereiche innerhalb eines Veranstaltungsgeländes als Standorte möglich sind, wird die Menge an möglichen Standorten identisch wie die potentiellen Einsatzorte durch ein gleichmäßiges Punktmuster, welches über die Veranstaltungsfläche gelegt wird, beschrieben.

Es werden jeweils die effizientesten Standorte für die widerstandsfreie und die widerstandsbehaftete Fortbewegung berechnet. Für einen bestmöglichen Vergleich zwischen allen Fallbeispielen wird als Standard-Impedanz-Grenzwert eine Zeit von 5 Minuten (300 Sekunden) in Anlehnung an den Kölner Algorithmus festgelegt. Die Anzahl an zu wählenden Standorten ist identisch mit der durch die Einsatzplanung bemessenen Anzahl an vorzuhaltenden Einheiten. Die Impedanz-Transformation wird linear gewählt.

Zur objektiven Bewertung hinsichtlich der Standortpositionen bei widerstandsfreier und widerstandsbehafteter Fortbewegung werden die Entfernungen zwischen den jeweils mittels Location-Allocation-Analyse bestimmten Standorten und den durch die Einsatzplanung vorgegebenen Standorten mit Hilfe von einer Buffer-Analyse untersucht. Als Buffer-Distanzen werden 25 m, 50 m, 75 m, 100 m und mehr als 100 m verwendet. Hierdurch kann bestimmt werden, welcher Anteil der neu berechneten Standorte in welcher Distanz zu den im Einsatzplan definierten Standorten sowie untereinander liegt. Diese Abweichung kann dann abschließend aus einsatztaktischer Sicht bewertet werden, um die oben genannte Fragestellung zu beantworten.

4.7.3 Bemessung der notwendigen Standorte mittels Location-Allocation-Analyse

Im letzten Untersuchungsschritt soll die Mindestanzahl an benötigten Rettungstrupps entsprechend folgender in der Einleitung aufgeworfenen Fragestellung untersucht werden:

Ist bei Veranstaltungen mit großen zu erwartenden Menschenmengen eine Erhöhung der bemessenen Einheiten aufgrund des widerstandsbehafteten Vorankommens notwendig, um eine vorgegebene Eintreffzeiten einhalten zu können?

Der Problemtyp „Einrichtungen minimieren“ arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie der Problemtyp „Flächendeckung maximieren“, die Anzahl an notwendigen Standorten wird jedoch nicht durch den Anwender vorgegeben, sondern durch die Location-Allocation-Analyse mittels Iteration ermittelt. Dabei wird versucht, die Anzahl an Einrichtungen auf Grundlage eines definierten Impedanz-Grenzwertes bei gleichzeitiger maximaler Abdeckung der potentiellen Bedarfsorte zu minimieren.

Der genannte Problemtyp eignet sich somit zur Ermittlung der notwendigen minimalen Anzahl an benötigten Standorten zur flächendeckenden Abdeckung des Veranstaltungsgeländes bei widerstandsfreier und widerstandsbehafteter Fortbewegung. Da jeder Standort gleichzusetzen mit einem einzusetzenden Rettungstrupp ist, kann somit untersucht werden, ob eine Erhöhung der vorzuhaltenden Einheiten durch die widerstandsbehaftete

Fortbewegung aufgrund der vorhandenen Menschenmengen notwendig ist. Dafür muss die mittels der Location-
Allocation-Analyse ermittelte Menge an notwendigen Einheiten bei widerstandsfreier und widerstandsbehafteter
Fortbewegung mit der durch die Einsatzplanung festgelegten Anzahl, welche aufgrund der Gefährdungsbeurteilung
und der Besucherzahl der Veranstaltung bemessen wurde, verglichen werden.

5 Praktische Analyse anhand von Fallbeispielen

Bei den nachfolgenden Fallbeispielen handelt es sich um reale Veranstaltungen, welche im Jahr 2016 in Luxemburg stattfanden. Es handelt sich um unterschiedliche Veranstaltungsarten und –orte verschiedenster Größen und Besucherzahlen, sodass ein mit diesen Faktoren zusammenhängender systematischer Fehler ausgeschlossen werden kann.

Es muss hervorgehoben werden, dass die Veranstaltungen lediglich als Fallbeispiele zur Nutzung realistischer Daten angesehen werden können und diese Arbeit die organisatorische und sicherheitstechnische Infrastruktur der Veranstaltungen weder untersuchen noch bewerten will. Aus diesem Grund werden alle verwendeten Daten – so weit wie methodisch möglich – anonymisiert und verallgemeinert und lediglich die für die Analyse notwendigen Informationen genutzt und dargestellt.

5.1 Straßenfest mit Feuerwerk

5.1.1 Beschreibung der Veranstaltung

Bei dem ersten Fallbeispiel handelt es sich um ein Straßenfest mit Umzug und abschließendem Feuerwerk. Das Veranstaltungsgebiet ist weitläufig auf mehrere öffentliche Plätze und Straßen, aber auch auf private Veranstaltungsorte (z.B. Cafés, Diskos...) verteilt. Erfahrungsgemäß kann insgesamt von 150.000-200.000 Besuchern ausgegangen werden, wovon sich rund 70.000 während des Feuerwerks in dem Gebiet mit der besten Aussicht aufhalten. Die Analyse wird deshalb auf dieses Gebiet beschränkt. Das Publikum ist sehr gemischt, tendiert gegen Mitternacht jedoch immer mehr zu einem jüngeren Publikum.

Der Sanitätsdienst wird durch die örtlich zuständige Rettungsorganisation mit einem Großaufgebot an Rettungstrupps sowie einem an einem öffentlichen Platz eingerichteten Behandlungsplatz sichergestellt. Aufgrund der Größe des Veranstaltungsgebietes werden neben Fußtrupps auch Motorräder und Rettungswagen eingesetzt. Im betrachteten Untersuchungsgebiet wurden während des Beobachtungszeitraumes 11 Rettungstrupps eingesetzt.

5.1.2 Georeferenzierung des Veranstaltungsgeländes

Da es sich bei der Veranstaltung um ein Straßenfest handelt, liegen keine allgemeinen Pläne vor, die Planung erfolgt vielmehr spezifisch für die einzelnen Plätze und Straßen. Aus diesem Grund können auch keine Pläne für die Abgrenzung des Veranstaltungsgeländes herangezogen werden, sondern es muss eine manuelle Erfassung erfolgen. Dies wird dadurch verstärkt, dass – wie bei Straßenfesten oftmals üblich – keine offizielle Abgrenzung des Veranstaltungsbereiches festgelegt wird.

Als erster Schritt wird deshalb das unter Ziffer 5.1 abgegrenzte Gebiet manuell durch ein Polygon erfasst:

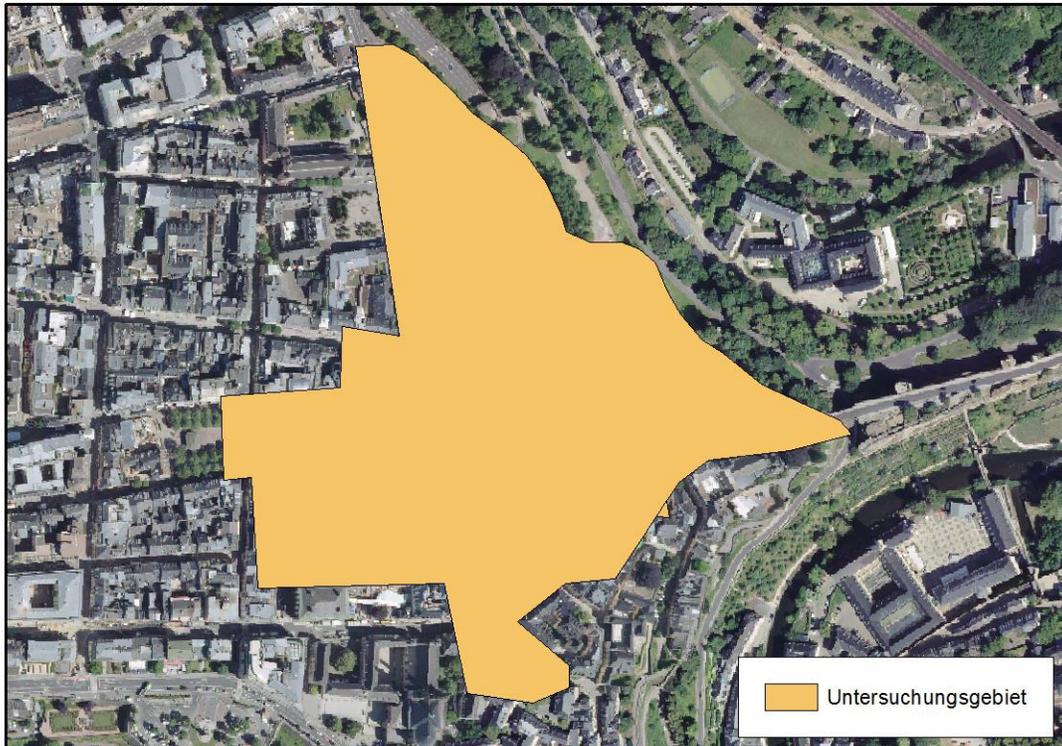


Abbildung 18: Fallbeispiel 1 - Erfassung der Umrise des Veranstaltungsgebietes

Im nächsten Schritt müssen die Hindernisse innerhalb dieser Fläche identifiziert werden. Da es sich um ein durchweg bebautes Gebiet handelt, sind die größten Hindernisse die Gebäude sowie größere Installationen (Parks, Bäume, Monumente) auf öffentlichen Plätzen. Kleinere Objekte (z.B. Laternen, Mülleimer, etc.) können für die vorliegende Fragestellung der Einfachheit halber vernachlässigt werden, da sie aufgrund ihrer geringen Ausmaße keinen maßgeblichen Einfluss auf die Analyse haben. Auch Aufbauten wie Bühnen oder Getränkestände können aufgrund der Größe des betrachteten Gebietes vernachlässigt werden, da diese in der Gesamtheit verhältnismäßig nur eine minimale Fläche einnehmen und das Gesamtergebnis somit nicht beeinflussen.

Diese oben genannten zu berücksichtigenden Hindernisse können in ausreichender Qualität über Openstreetmap im Shapefile-Format bezogen werden (Datensatz 1, Datensatz 2 und Datensatz 4). Über die Clip-Funktion werden die Daten auf die Fläche des Untersuchungsgebietes beschnitten und danach über das Merge-Werkzeug zu einem Datensatz verbunden.



Abbildung 19: Fallbeispiel 1 - Vorbereitung der verschiedenen Hindernisse-Datensätze

Anschließend werden über das Werkzeug Erase die Hindernisse aus der Veranstaltungsfläche entfernt. Manuell werden abschließend noch zwei wichtige Verbindungswege, welche als Unterführungen innerhalb von Gebäuden liegen, anhand des im Hintergrund liegenden Orthophotos der Veranstaltungsfläche hinzugefügt.

Das fertige Untersuchungsgebiet hat eine Fläche von 36.430 m². Ausgehend von einer geschätzten Besucherzahl von 70.000 Personen innerhalb dieser Fläche, kann eine durchschnittliche Dichte von 1,9 Personen pro Quadratmeter für das gesamte Veranstaltungsgelände ermittelt werden.

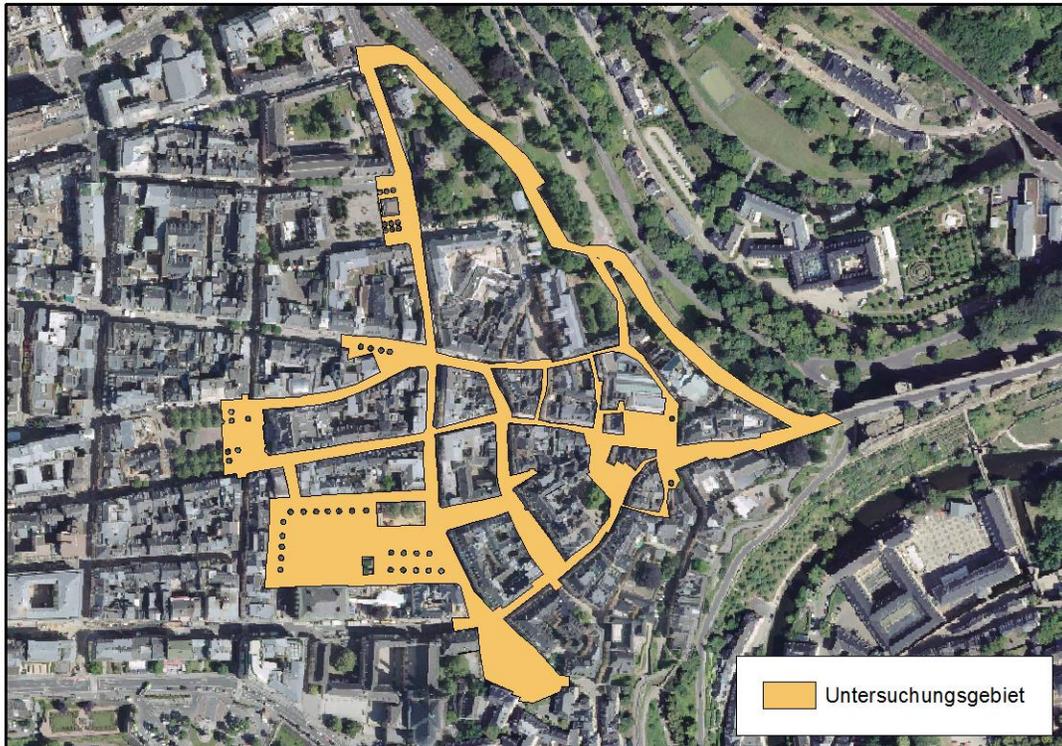


Abbildung 20: Fallbeispiel 1 - Fertiges Untersuchungsgebiet

5.1.3 Erstellung des allgemeinen Bewegungsnetzwerkes

Das allgemeine Bewegungsnetzwerk wird nach der unter Ziffer 4.4.3 beschriebenen Methode erstellt. Im ersten Schritt wird über das „Repeating-Shapes“-Werkzeug das gleichmäßige Dreiecksnetz erstellt und anschließend über „Polygon to Lines“ in Linien umgewandelt. Danach wird über die Clip-Funktion das Netz auf das Untersuchungsgebiet beschnitten und die Linien abschließend über die „Planarize Lines“-Funktion an den Knotenpunkten getrennt. Dadurch ist das Liniennetz aufbereitet, um als routingfähiges Netzwerk berechnet zu werden.

5.1.4 Erhebung der Personendichten

Zur Erhebung der Personendichten wurde am Tag der Veranstaltung während einem einstündigen Zeitraum das Untersuchungsgebiet begangen und von möglichst erhöhten Positionen GPS-referenzierte Fotos der Menschenmengen aufgenommen. Dabei wurde eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Aufnahmeorte angestrebt. Nach visueller Kontrolle der Qualität der Bilder konnten 57 Fotos zurückbehalten werden.

Über die Metadaten der Bilder wurden jeweils die GPS-Positionen ermittelt und anschließend nach der unter Ziffer 4.5 beschriebenen Methode die Personendichten abgeschätzt.

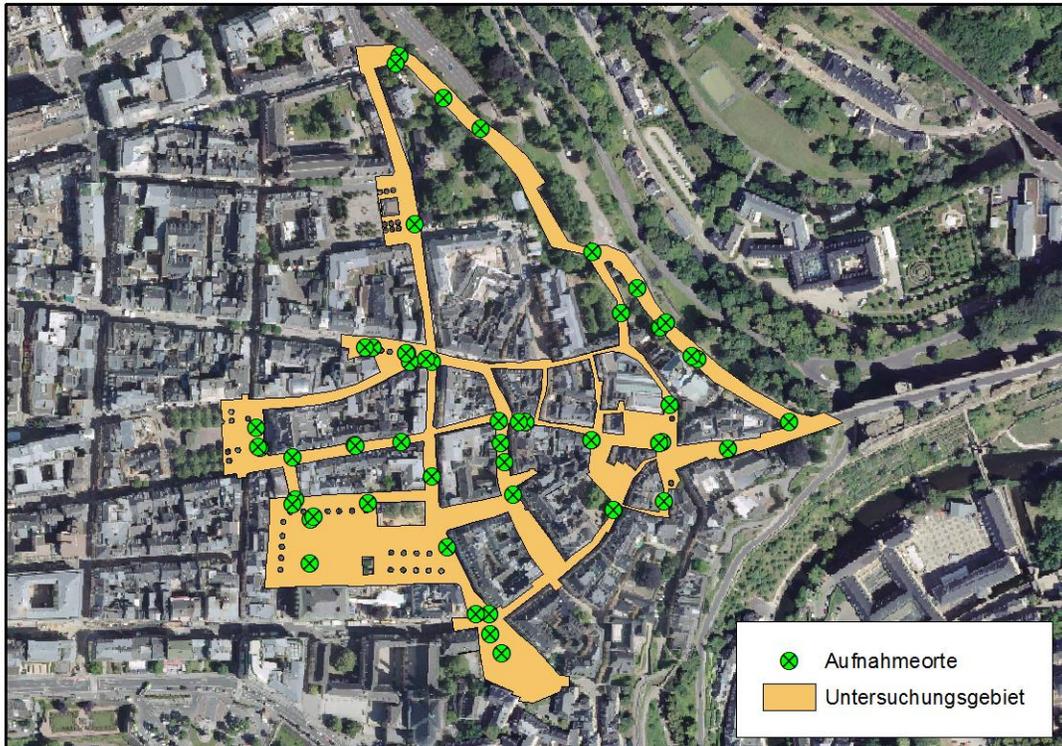


Abbildung 21: Fallbeispiel 1 - Verteilung der Aufnahmeorte innerhalb des Untersuchungsgebietes

Anschließend wurden die Aufnahmepunkte mittels räumlicher Abfrage identifiziert, deren Positionen außerhalb des Untersuchungsgebietes liegen. Die falsche Positionierung dieser Punkte ist auf die Ungenauigkeit des GPS zurückzuführen, welche eine Toleranz von ca. ± 10 m aufweisen kann. Zur Korrektur werden deshalb die außerhalb positionierten Messpunkte manuell in die Untersuchungsfläche verschoben, die neue Position wird visuell durch den Standort bei der Bildaufnahme anhand von Referenzpunkten auf den Fotos validiert.



Abbildung 22: Fallbeispiel 1 - Manuelle Korrektur zweier falscher GPS-Positionierungen

Nach Korrektur aller Aufnahmepunkte wird die IDW-Interpolation vorgenommen, um die Dichten auf die gesamte Veranstaltungsfläche zu übertragen. Nach Überprüfung des statistischen Fehlers der Interpolation mit dem Geostatistical Analyst werden eine Potenz von 6 sowie eine Anzahl von 12 zu verwendenden Messpunkten als Parameter festgelegt. Als Interpolations-Barrieren werden die Kanten des Untersuchungsgebietes festgelegt und die Interpolations-Ausdehnung wird durch das Untersuchungsgebiet-Polygon begrenzt:

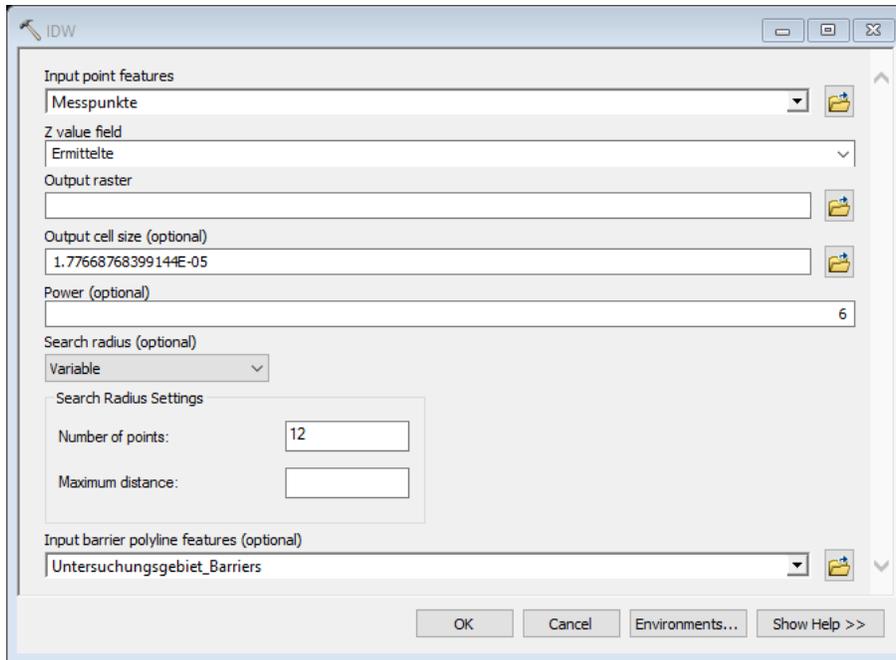


Abbildung 23: Fallbeispiel 1 - Parameter der IDW-Interpolation

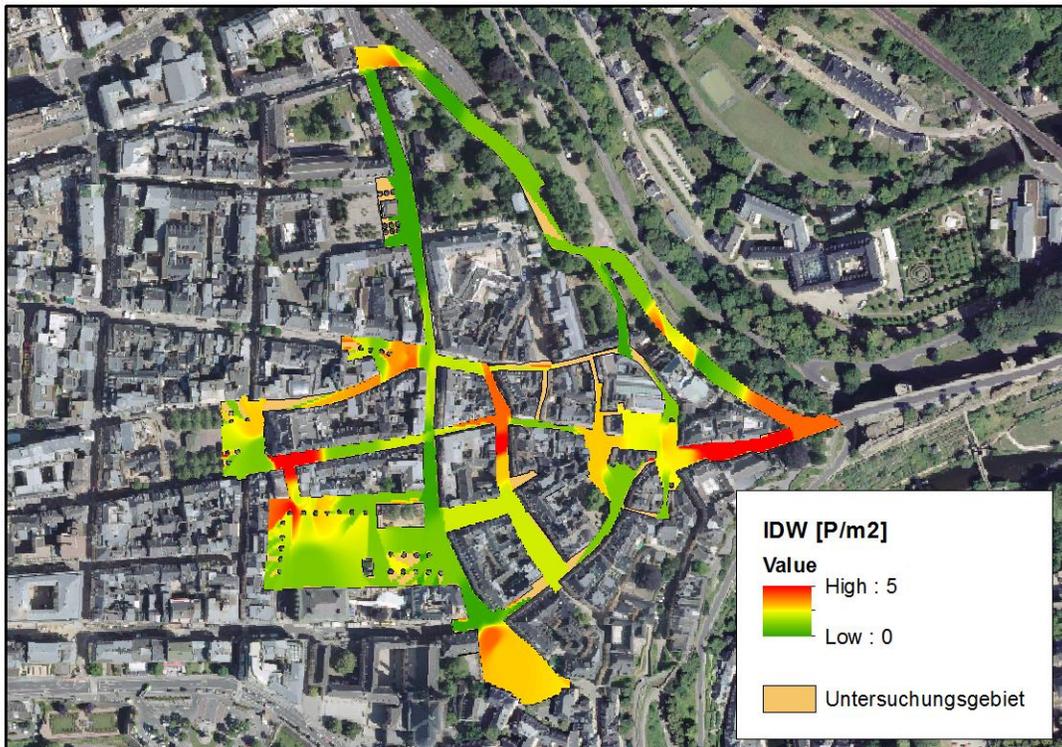


Abbildung 24: Fallbeispiel 1 - Ergebnis der IDW-Interpolation

Das Ergebnis der IDW-Interpolation zeigt an drei Orten besonders hohe Dichten. Hierbei handelt es sich jeweils um Engstellen mit einer hohen Angebotsdichte (Getränkstände, Open Air Bühne) bzw. um den Bereich mit der besten Sicht auf das Feuerwerk.

Für die Übertragung der Dichten auf das Netzwerk, wird das Netzwerk zuerst gemäß Ziffer 4.6.2 neu klassifiziert und anschließend als Vorbereitung für den Spatial Join in ein Polygonformat umgewandelt.

5.1.5 Anwendung der Geschwindigkeitsfunktion

Die Anwendung der Geschwindigkeitsfunktion erfolgt wie unter Ziffer 4.6 beschrieben. Über die Geschwindigkeitsfunktion wird jeweils pro Kante die widerstandsfreie (velocity_f) und die widerstandsbehaftete (velocity_w) Geschwindigkeit ermittelt und daraus die Durchlaufzeit in Sekunden (seconds_f und seconds_w) bestimmt.

p	Shape_Leng	velocity_w	velocity_f	seconds_w	seconds_f
6	1.999956	0.4799	1.8407	4.167443	1.086519
4	1.1517	0.8335	1.8407	1.381764	0.625686
8	1.3844	0.2263	1.8407	6.117543	0.752105

Abbildung 25: Fallbeispiel 1 - Auszug aus der Attributtabelle

Das Netzwerk wird anschließend nach den unter Ziffer 9.4.1 beschriebenen Parametern erstellt.

5.1.6 Netzwerkanalyse

5.1.6.1 Untersuchung der räumlichen Abdeckung mittels Einzugsgebieten

Für die Berechnung der widerstandsfreien und widerstandsbehafteten Einzugsgebiete mittels des eben erstellten Netzwerkes müssen zuerst die Standorte und die abzudeckenden potentiellen Einsatzorte definiert werden.

Wie unter Ziffer 4.7.1 beschrieben, werden als Standorte die in der Einsatzplanung festgelegten Positionen übernommen. Nach dem Einsatzplan waren während des Beobachtungszeitraumes 11 Rettungstrupps im Untersuchungsgebiet eingesetzt. Ihre Positionen sind im Einsatzplan festgelegt und werden als Punkteshapefile modelliert um als Facilities in den Network Analyst übernommen werden zu können.

Die potentiellen Einsatzorte können, wie unter Ziffer 4.2.1 dargestellt, durch die Netzwerk-Knotenpunkte dargestellt werden. Aufgrund der Größe des Einsatzgebietes handelt es sich dabei jedoch um 17.282 Punkte, sodass der Rechenaufwand unverhältnismäßig hoch wäre. Zur Verringerung des Rechenaufwandes bei gleichzeitiger Berücksichtigung der flächenmäßig gleichmäßigen Verteilung der potentiellen Einsatzorte, wird ein räumlich gleichmäßiges Punktemuster erstellt, bei dem die Abstände zwischen den Punkten auf 5 Meter erhöht werden. Hierdurch reduziert sich die Punktzahl zur Abdeckung der gesamten Veranstaltungsfläche auf 1.471, sodass der Rechenaufwand deutlich reduziert werden kann. Das Prinzip der Analyse wird hierdurch nicht beeinträchtigt.

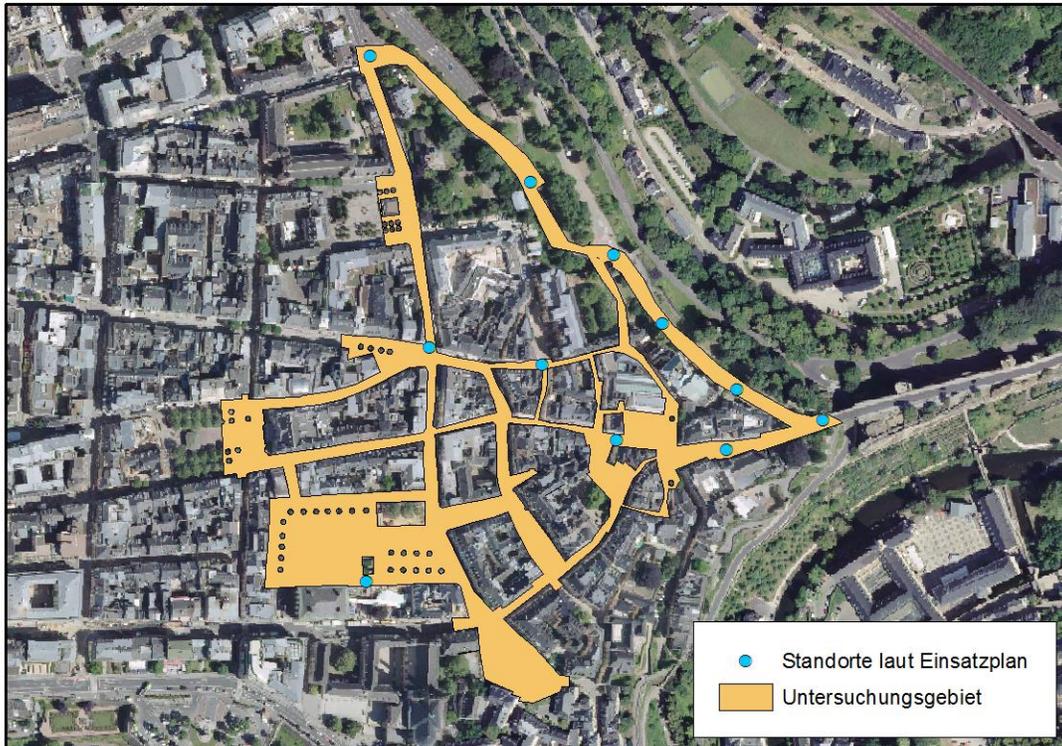


Abbildung 26: Fallbeispiel 1 - Verteilung der Rettungstrupps im Untersuchungsgebiet

Die Einzugsgebiete werden anschließend als detaillierte Disk-Polygone berechnet und bei einer Toleranz von 5 Metern abgeschnitten. Polygone gleicher Impedanzwerte werden zusammengefasst. Als Impedanzwerte für die Berechnung der Einzugsgebiete werden 60 Sekunden-Abstände mit einem maximalen Impedanzwert von 600 Sekunden (= 10 Minuten) gewählt.

Anschließend werden über das Werkzeug „Tabulate Intersection“ die Anzahl an potentiellen Einsatzorten berechnet, welche von den verschiedenen Einzugsgebieten jeweils abgedeckt werden.



Abbildung 27: Fallbeispiel 1 - Widerstandsfreie Einzugsgebiete



Abbildung 28: Fallbeispiel 1 - Widerstandsbehaftete Einzugsgebiete

Tabelle 5: Fallbeispiel 1 - Prozentuale Abdeckung der Einsatzorte

Impedanzen der Einzugsgebiete		Widerstandsfreie Fortbewegung		Widerstandsbehaftete Fortbewegung		Differenz
		Abgedeckte Einsatzorte	Prozentualer Anteil	Abgedeckte Einsatzorte	Prozentualer Anteil	
Sekunden	Minuten					
0	0	0	0.00%	0	0.00%	0.00%
60	1	1119	76.07%	600	40.79%	35.28%
120	2	1470	99.93%	1114	75.73%	24.20%
180	3	1470	99.93%	1274	86.61%	13.32%
240	4	1470	99.93%	1352	91.91%	8.02%
300	5	1471	100.00%	1391	94.56%	5.44%
360	6	1471	100.00%	1456	98.98%	1.02%
420	7	1471	100.00%	1467	99.73%	0.27%
480	8	1471	100.00%	1470	99.93%	0.07%
540	9	1471	100.00%	1470	99.93%	0.07%
600	10	1471	100.00%	1471	100.00%	0.00%

5.1.6.2 Standortoptimierung der Einheiten mittels Location-Allocation-Analyse

Für die Standortoptimierung besteht gleich wie bei der Berechnung der Einzugsgebiete das Problem, dass die 17.282 Knotenpunkte des Netzwerkes den Rechenaufwand unverhältnismäßig erhöhen. Aus diesem Grund werden auch für diese Analyse das unter Ziffer 5.1.6.1 erstellte 5-Meter-Punktemuster als Grundlage für die potentiellen Standorte und potentiellen Einsatzorte verwendet.

Als Anzahl zu wählender Standorte werden, wie in der Einsatzplanung vorgegeben, 11 Stück angenommen. Der Impedanz-Grenzwert wird wie oben beschrieben auf 300 Sekunden (= 5 Minuten) festgelegt. Anschließend werden die effizientesten Standorte bei widerstandsfreier und widerstandsbehafteter Fortbewegung über die Location-Allocation-Analyse berechnet.

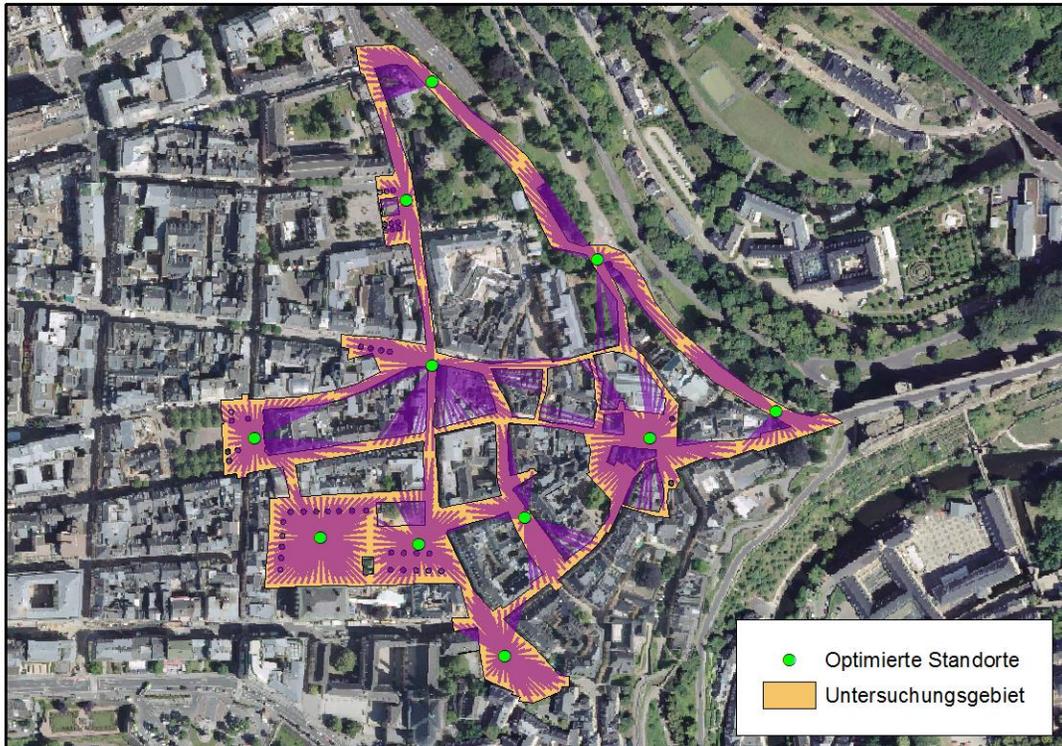


Abbildung 29: Fallbeispiel 1 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten

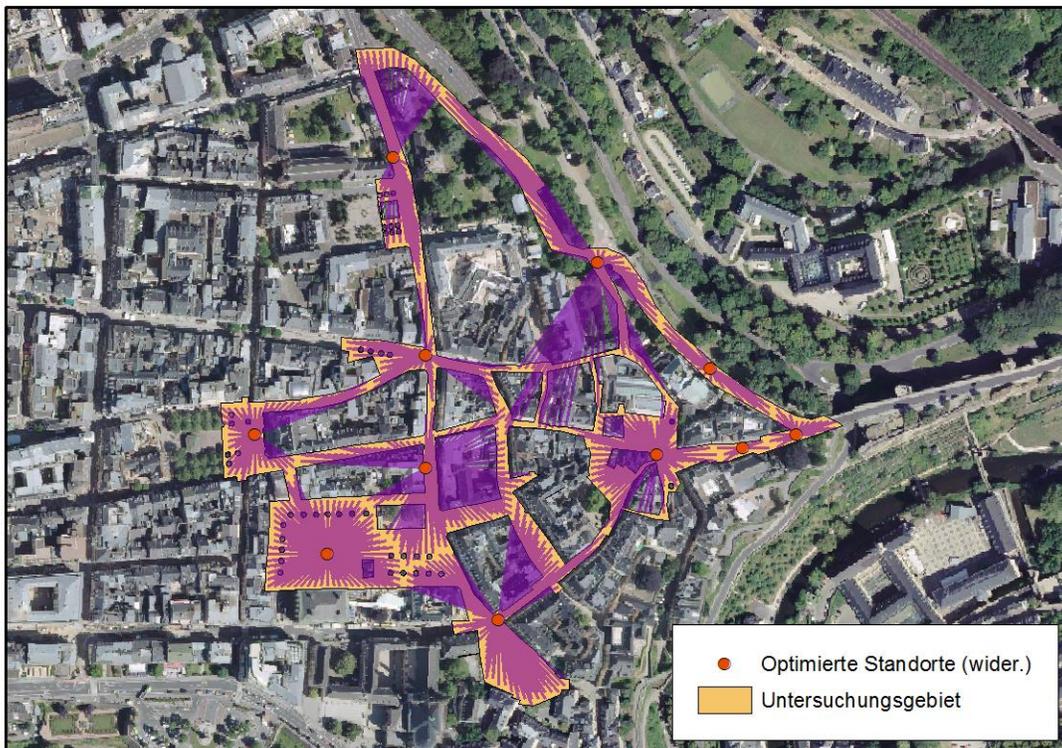


Abbildung 30: Fallbeispiel 1 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten (wider.)

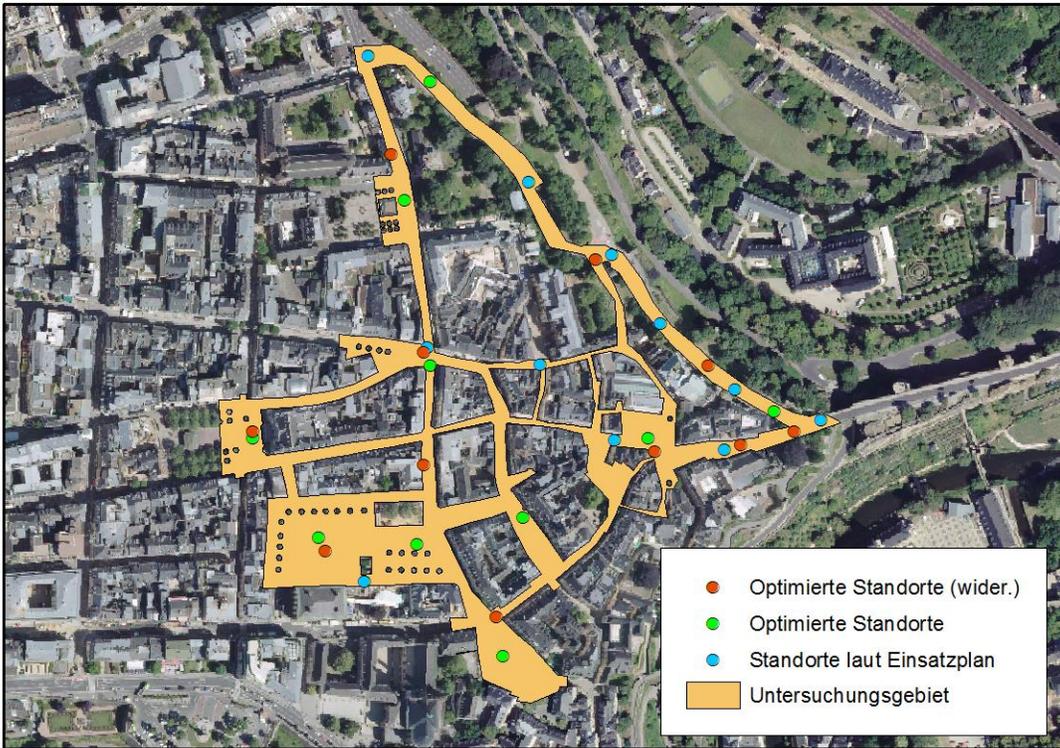


Abbildung 31: Fallbeispiel 1 - Darstellung der verschiedenen Standorte nach Optimierung

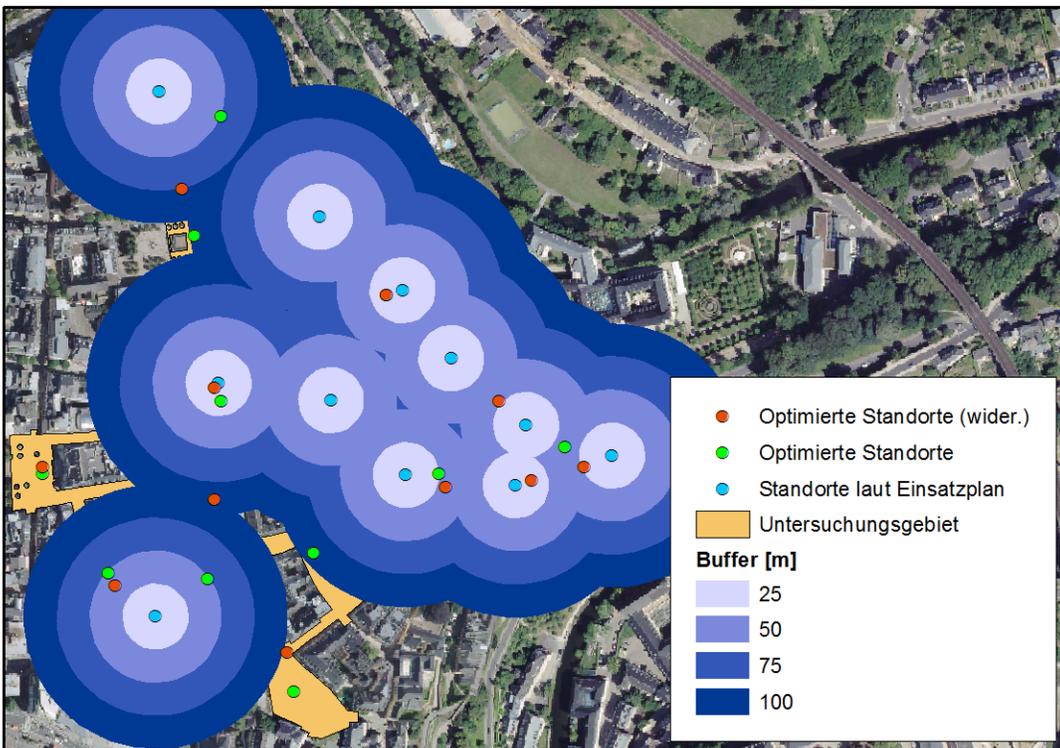


Abbildung 32: Fallbeispiel 1 - Buffer-Analyse

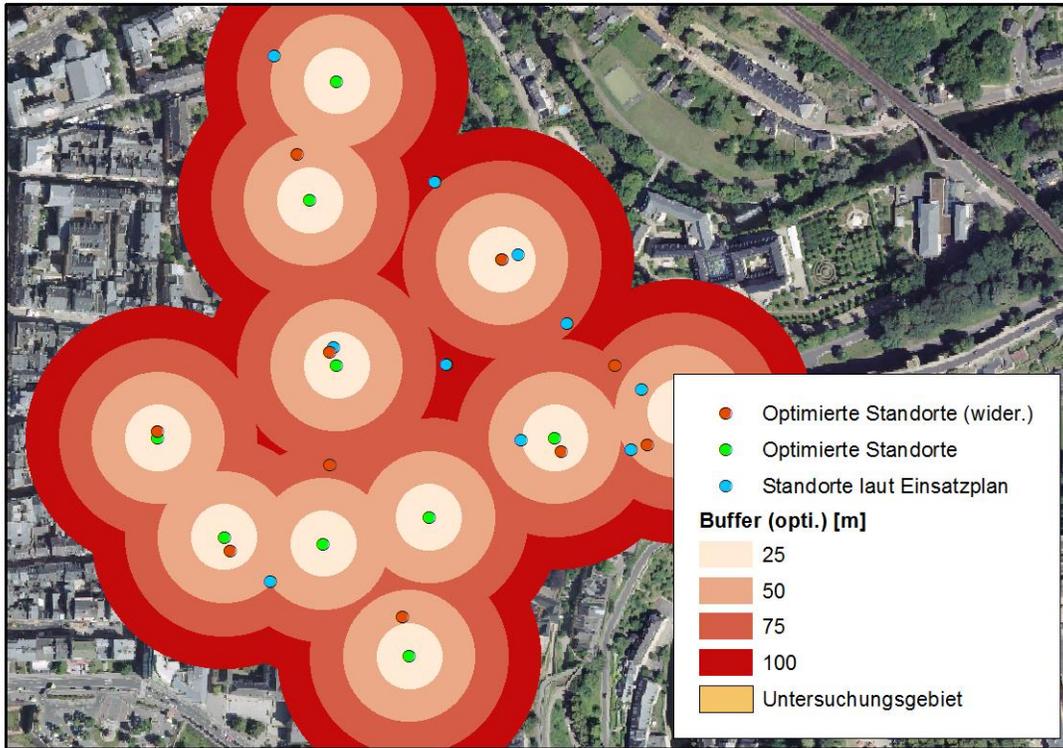


Abbildung 33: Fallbeispiel 1 - Buffer-Analyse der optimierten Standorte

Tabelle 6: Fallbeispiel 1 - Ergebnisse der Buffer-Untersuchung,

Buffer	Position gegenüber den Standorten laut Einsatzplan				Position gegenüber den widerstandsfrei optimierten Standorten	
	Widerstandsfreie Fortbewegung		Widerstandsbehaftete Fortbewegung		Standorte innerhalb der Buffer-distanz	Σ Anteil aller Standorte
	Standorte innerhalb der Buffer-distanz	Σ Anteil aller Standorte	Standorte innerhalb der Buffer-distanz	Σ Anteil aller Standorte		
25 m	2	18 %	4	36 %	6	55 %
50 m	4	55 %	3	64 %	3	82 %
75 m	1	64 %	2	82 %	2	100 %
100 m	2	82 %	0	82 %	0	100 %
> 100 m	2	100 %	2	100 %	0	100 %

5.1.6.3 Bemessung der notwendigen Standorte mittels Location-Allocation-Analyse

Für den dritten Untersuchungsschritt können die Vorbereitungen in den Location-Allocation-Analyse-Einstellungen aus Ziffer 5.1.6.2 übernommen werden. Anschließend kann nach dem unter Ziffer 4.7.3 beschriebenen Prinzip die Anzahl notwendiger Standorte ermittelt werden, um alle potentiellen Einsatzorte innerhalb des vorgegebenen Impedanz-Grenzwertes von 300 Sekunden (= 5 Minuten) abzudecken:

Tabelle 7: Fallbeispiel 1 - Ergebnisse der Standort-Bemessung

Szenario	Anzahl bemessener Standorte
Nach Einsatzplan	11
Widerstandsfreie Fortbewegung	1
Widerstandsbehafete Fortbewegung	5

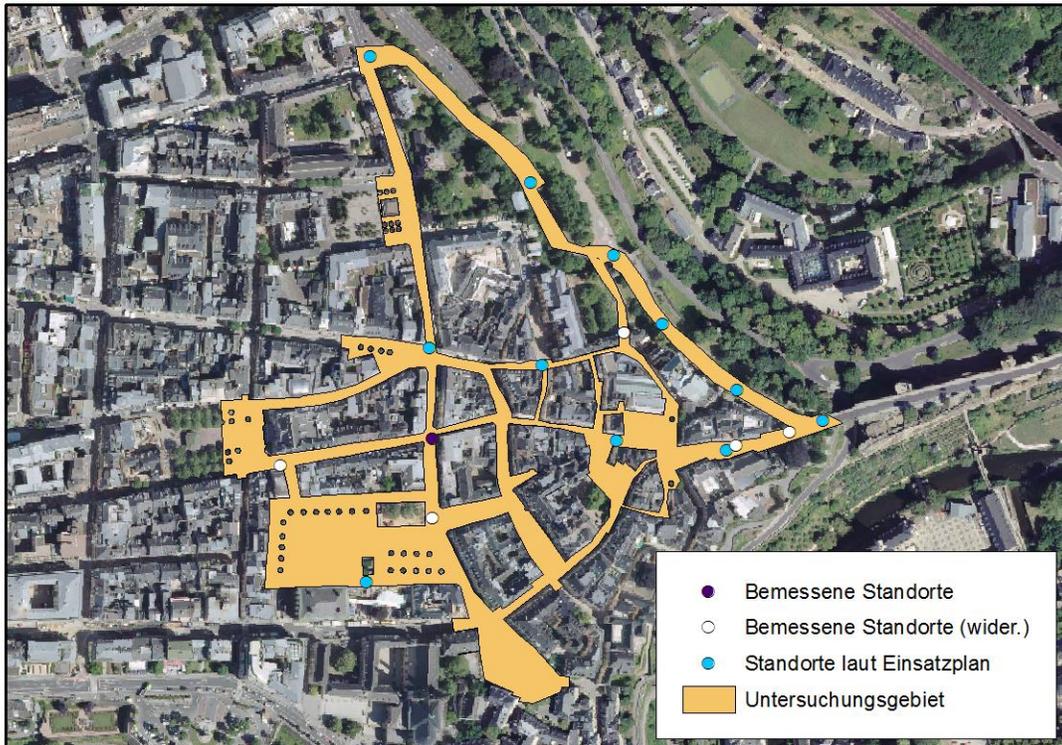


Abbildung 34: Fallbeispiel 1 - Räumliche Verteilung der bemessenen Standorte

5.2 Open-Air-Festival

5.2.1 Beschreibung der Veranstaltung

Bei dem zweiten Fallbeispiel handelt es sich um ein zweitägiges Open-Air-Festival mit – laut Informationen des Veranstalters - rund 7.000 gleichzeitig anwesenden Besuchern. Das Festivalgelände liegt auf einer von Wald umschlossenen Wiese rund 2 Kilometer vom nächsten Ort entfernt. Beim Publikum handelt es sich mehrheitlich um Jugendliche und junge Erwachsene. Das Untersuchungsgebiet beschränkt sich auf das Festivalgelände, das Campinggelände wird ausgeschlossen, da dieses mehrere Hundert Meter entfernt ist und durch die Zelte eine besondere Hindernisdichte herrscht, welche das Ergebnis verfälschen könnte.

Der Sanitätsdienst wird durch die örtliche zuständige Rettungsorganisation in Zusammenarbeit mit der lokalen Feuerwehr sichergestellt. Neben einem Behandlungszelt auf dem Festivalgelände sowie einer Unfallhilfsstelle auf dem Festivalcamping, wird das gesamte Gelände von vier Fußtrupps abgedeckt. Die Trupps sind an festen Orten eingeteilt und werden von einer lokalen Einsatzleitung koordiniert. Während des Beobachtungszeitraumes wurden 4 Rettungstrupps eingesetzt.

5.2.2 Georeferenzierung des Veranstaltungsgeländes

Für die Erstellung des Untersuchungsgebietes stehen die Pläne in PDF-Format zur Verfügung, sodass diese als Hilfestellung zur Georeferenzierung des Veranstaltungsgeländes herangezogen werden können. Nach Umwandlung des PDF-Plans in ein Rasterformat mittels „PDF to TIFF“, kann dieses über die Georeferenzierung-Toolbar unter Orientierung an Referenzpunkten in einem Orthophoto georeferenziert werden:



Abbildung 35: Fallbeispiel 2 - Georeferenzierung des Geländeplans über Referenzpunkte

Aufgrund der mangelhaften Qualität der Pläne nach der Konvertierung, verursacht durch Beschriftungen, unterschiedliche Muster, etc., wird eine manuelle Erfassung des Geländes als einfacher als die Aufbereitung des Datensatzes erachtet. Aus diesem Grund wird das Untersuchungsgebiet manuell als Polygon erfasst, wobei die Hindernisse und Barrieren anhand des georeferenzierten Plans im Hintergrund ausgeschlossen werden können.

Eine Besonderheit des Veranstaltungsgeländes ist, dass dieses in einen für die Besucher zugänglichen öffentlichen Bereich und in einen Backstage-Bereich, welcher jedoch auch von den Rettungstrupps begangen werden kann, unterteilt werden muss. Die Berücksichtigung des Backstage-Bereiches für das Untersuchungsgebiet ist notwendig, da den Einsatzkräften hier widerstandsfreie Abkürzungen zur Verfügung stehen. Diese Flächen werden als unterschiedliche Polygone erfasst, um nachher bei der Erstellung des Bewegungsnetzwerkes die unterschiedlichen Widerstände zuweisen zu können. Als Untersuchungsgebiet werden jedoch beide Flächen betrachtet, da auch die im Backstagebereich arbeitenden Personen (z.B. Bühnenarbeiter, Verkäufer, Presse, etc.) durch den Sanitätsdienst mit betreut werden müssen.

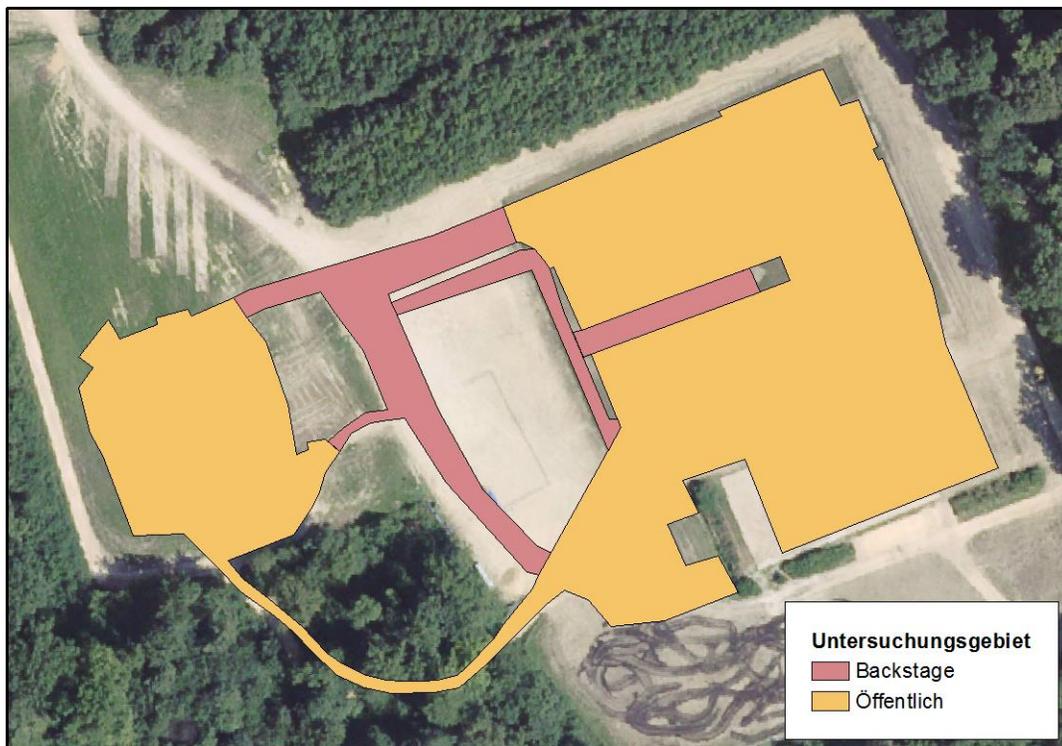


Abbildung 36: Fallbeispiel 2 – Untersuchungsgebiet

Der für Besucher zugängliche Bereich hat eine Fläche von 11.783 m². Ausgehend von einer geschätzten Besucherzahl von 7.000 Personen innerhalb dieser Fläche, kann eine durchschnittliche Dichte von 0,6 Personen pro Quadratmeter für das öffentliche Veranstaltungsgelände ermittelt werden.

5.2.3 Erstellung des allgemeinen Bewegungsnetzwerkes

Das allgemeine Wegenetzwerk wird nach der unter Ziffer 4.4 beschriebenen Methodik erstellt. Das Netzwerk umfasst dabei sowohl den öffentlichen als auch den Backstage-Bereich, da beide von den Einsatzkräften ohne Einschränkung begangen werden können.

5.2.4 Erhebung der Personendichten

Zur Erhebung der Personendichten wurde das Festivalgelände an den zwei Veranstaltungstagen jeweils in einem 3-stündigen Zeitraum von zwei Personen begangen, da die Bedingungen an beiden Tagen vergleichbar waren (gleiches Wetter, gleiche Besucheranzahl). Nach visueller Qualitätskontrolle der Fotos konnten insgesamt 38 Aufnahmen zurückbehalten werden.

Auch für das zweite Fallbeispiel müssen leicht abweichende Positionen der Aufnahmeorte manuell korrigiert werden:

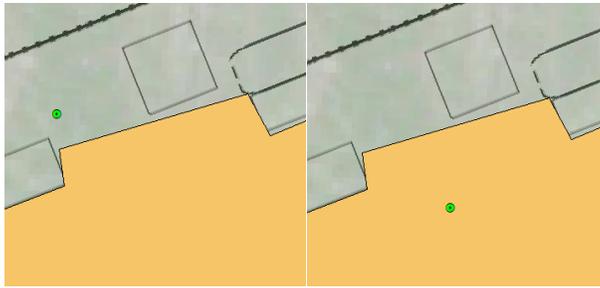


Abbildung 37: Fallbeispiel 2 - Manuelle Korrektur falscher GPS-Positionierungen

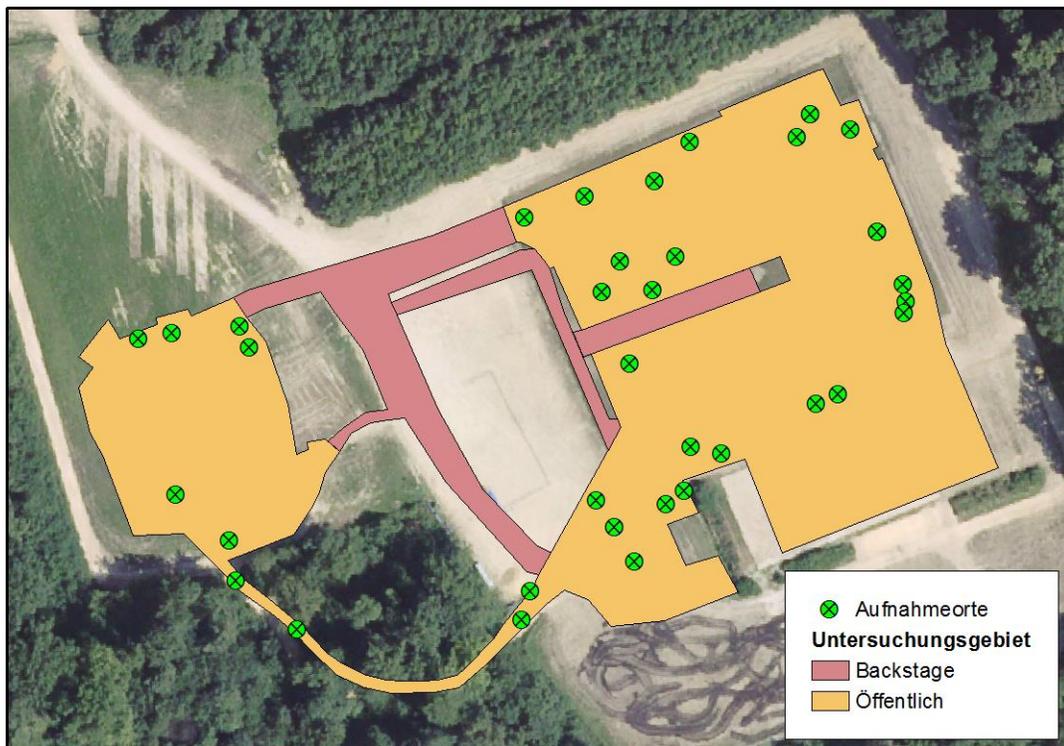


Abbildung 38: Fallbeispiel 2 - Verteilung der Messpunkte innerhalb des Untersuchungsgebietes

Nach Überprüfung des statistischen Fehlers der Interpolation der Messpunkte mit dem Geostatistical wizard werden eine Potenz von 2,5 sowie eine Anzahl von 12 zu verwendenden Messpunkten als Parameter festgelegt. Als Interpolations-Barrieren werden die Kanten des Untersuchungsgebietes festgelegt und die Interpolations-Ausdehnung wird durch das Untersuchungsgebiet-Polygon begrenzt:

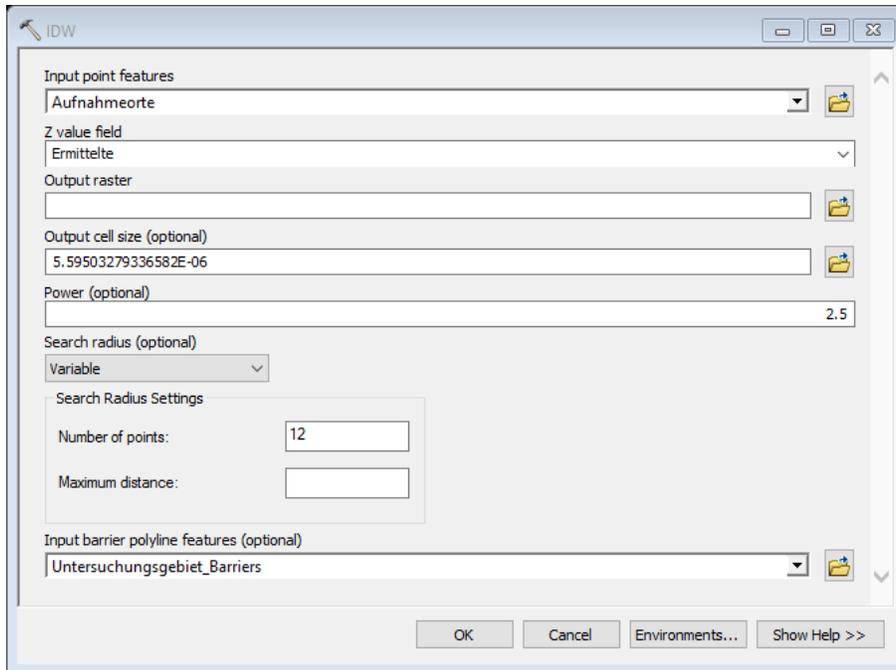


Abbildung 39: Fallbeispiel 2 - Parameter der IDW-Interpolation



Abbildung 40: Fallbeispiel 2 - Ergebnis der IDW-Interpolation

Das Ergebnis der IDW-Interpolation zeigt die höchste Dichte im Bereich der Hauptbühne und der Ess- und Getränkestände.

Für die Übertragung der Dichten auf das Netzwerk, wird das Netzwerk zuerst gemäß Ziffer 4.6.2 neu klassifiziert und anschließend als Vorbereitung für den Spatial Join in ein Polygonformat umgewandelt.

5.2.5 Anwendung der Geschwindigkeitsfunktion

Die Anwendung der Geschwindigkeitsfunktion erfolgt wie unter Ziffer 4.6 beschrieben. Über die Geschwindigkeitsfunktion wird jeweils pro Kante die widerstandsfreie (velocity_f) und die widerstandsbehaftete (velocity_w) Geschwindigkeit ermittelt und daraus die Durchlaufzeit in Sekunden (seconds_f und seconds_w) bestimmt.

p	Shape_Leng	velocity_w	velocity_f	seconds_w	seconds_f
3	2.000043	1.0478	1.8407	1.908802	1.086566
2	2.000043	1.2871	1.8407	1.553914	1.086566

Abbildung 41: Fallbeispiel 2 - Beispielauszug aus der Attributtabelle

Das Netzwerk wird anschließend nach den unter Ziffer 9.4.2 beschriebenen Parametern erstellt.

5.2.6 Netzwerkanalyse

5.2.6.1 Untersuchung der räumlichen Abdeckung mittels Einzugsgebieten

Die Standorte zur Berechnung der Einzugsgebiete werden dem Einsatzplan entnommen. Während des Zeitpunktes der Erhebung waren im betrachteten Gebiet vier Rettungstrupps an vorgebenden Positionen eingeteilt.

Als potentielle Einsatzorte können für das zweite Fallbeispiel die Knotenpunkte des Wegenetzwerkes (n=5.436) angenommen werden, da diese noch mit einem verhältnismäßigen Rechenaufwand verarbeitet werden können.

Die Einzugsgebiete werden anschließend als detaillierte Disk-Polygone berechnet und bei einer Toleranz von 5 Metern abgeschnitten. Polygone gleicher Impedanzwerte werden zusammengefasst. Als Impedanzwerte für die Berechnung der Einzugsgebiete werden 60 Sekunden-Abstände mit einem maximalen Impedanzwert von 600 Sekunden (= 10 Minuten) gewählt.

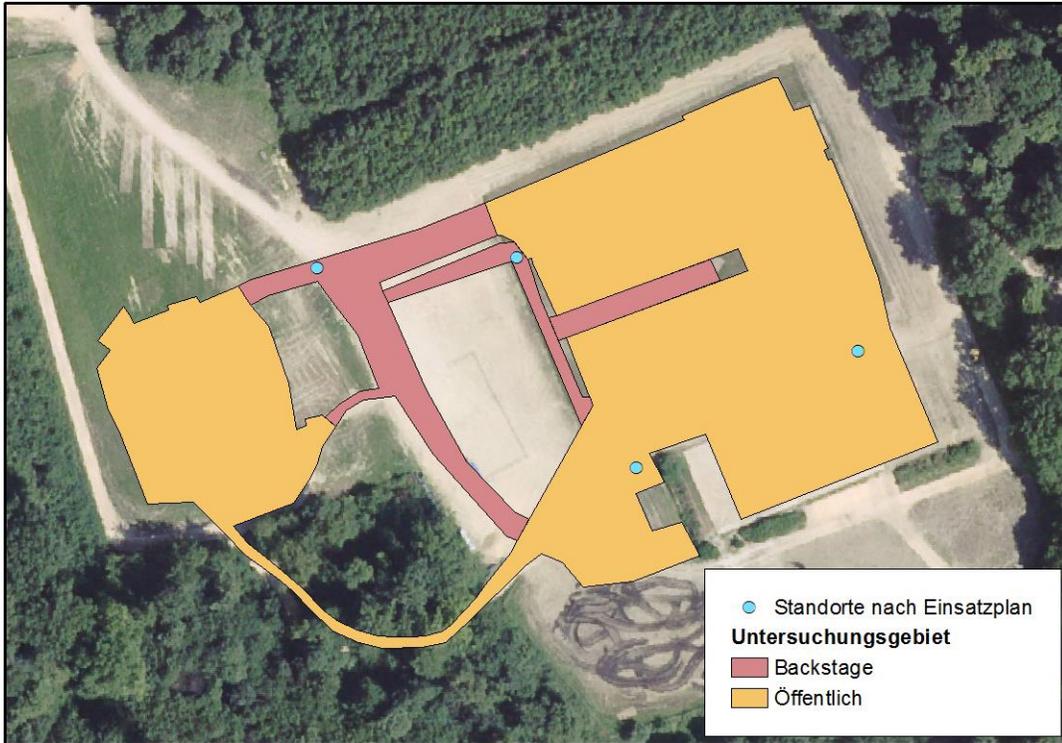


Abbildung 42: Fallbeispiel 2 - Verteilung der Rettungstrupps im Untersuchungsgebiet



Abbildung 43: Fallbeispiel 2 - Widerstandsfreie Einzugsgebiete



Abbildung 44: Fallbeispiel 2 - Widerstandsbehaftete Einzugsgebiete

Tabelle 8: Fallbeispiel 2 - Prozentuale Abdeckung der Einsatzorte

Impedanzen der Einzugsgebiete		Widerstandsfreie Fortbewegung		Widerstandsbehaftete Fortbewegung		Differenz
		Abgedeckte Einsatzorte	Prozentualer Anteil	Abgedeckte Einsatzorte	Prozentualer Anteil	
Sekunden	Minuten					
0	0	0	0 %	0	0 %	0 %
60	1	5362	98,67 %	4601	84,66 %	12,01%
120	2	5435	100 %	5435	100 %	0%
180	3	5435	100 %	5435	100 %	0%
240	4	5435	100 %	5435	100 %	0%
300	5	5435	100 %	5435	100 %	0%
360	6	5435	100 %	5435	100 %	0%
420	7	5435	100 %	5435	100 %	0%
480	8	5435	100 %	5435	100 %	0%
540	9	5435	100 %	5435	100 %	0%
600	10	5435	100 %	5435	100 %	0%

5.2.6.2 Standortoptimierung der Einheiten mittels Location-Allocation-Analyse

Die Anzahl an Knotenpunkten des Netzwerkes beträgt 5.436 Punkte, sodass diese als potentielle Standorte und potentielle Einsatzorte gemäß Ziffer 4.2.1 bei einem vertretbaren Rechenaufwand iterativ verarbeitet werden können.

Als Anzahl zu wählender Standorte werden wie in der Einsatzplanung vorgegeben 4 Stück angenommen. Der Impedanz-Grenzwert wird wie beschrieben auf 300 Sekunden (= 5 Minuten) festgelegt. Anschließend werden die

effizientesten Standorte bei widerstandsfreier und widerstandsbehafteter Fortbewegung über die Location-Allocation-Analyse berechnet.

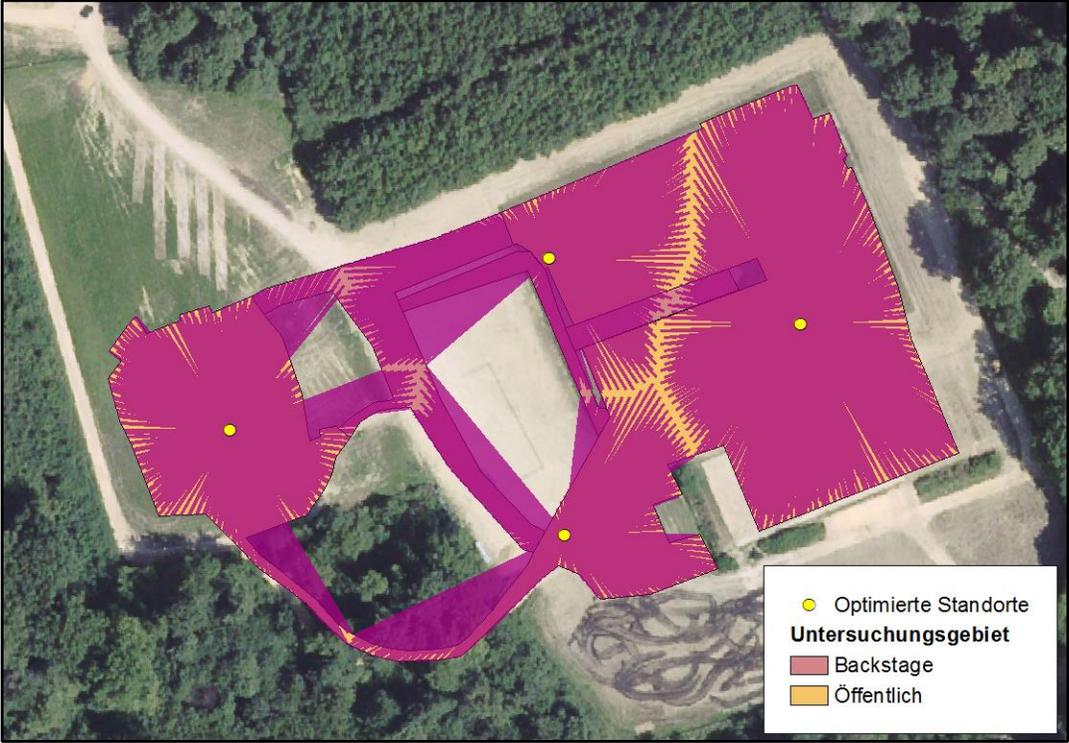


Abbildung 45: Fallbeispiel 2 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten

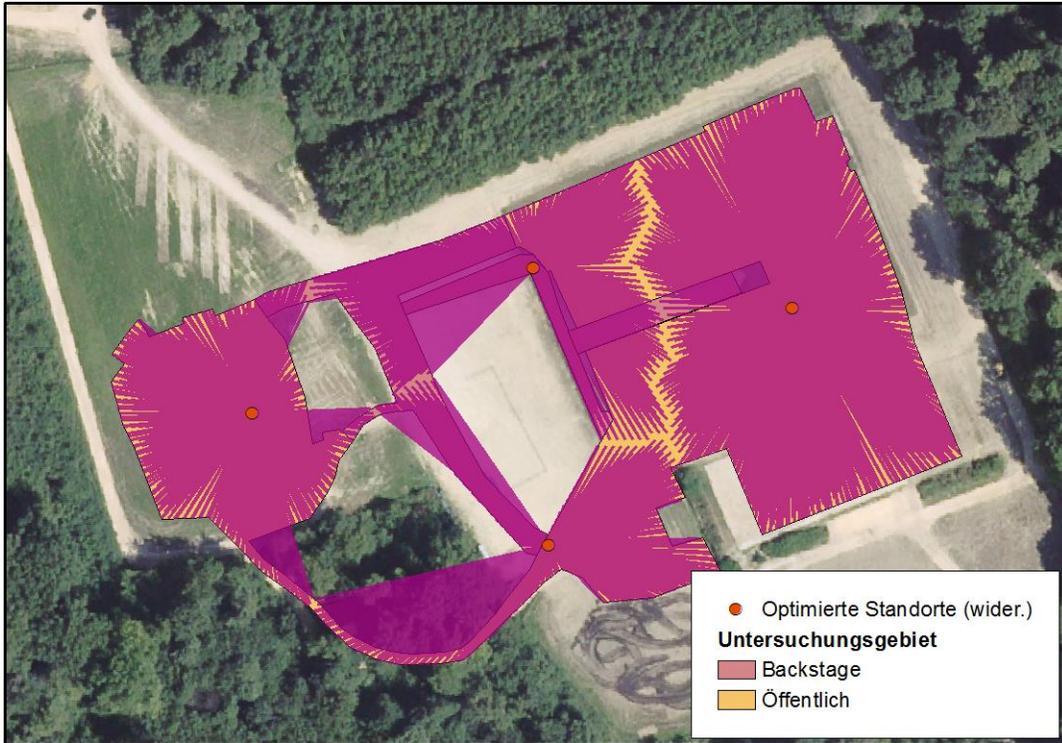


Abbildung 46: Fallbeispiel 2 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten (wider.)

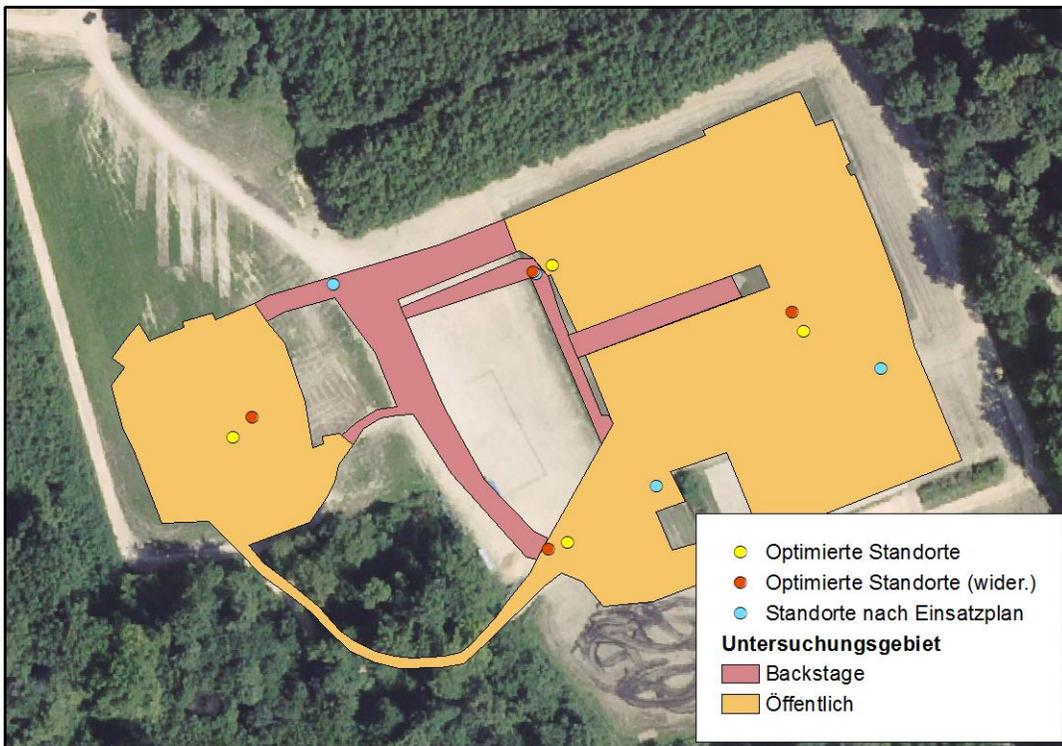


Abbildung 47: Fallbeispiel 2 - Darstellung der verschiedenen Standorte nach Optimierung

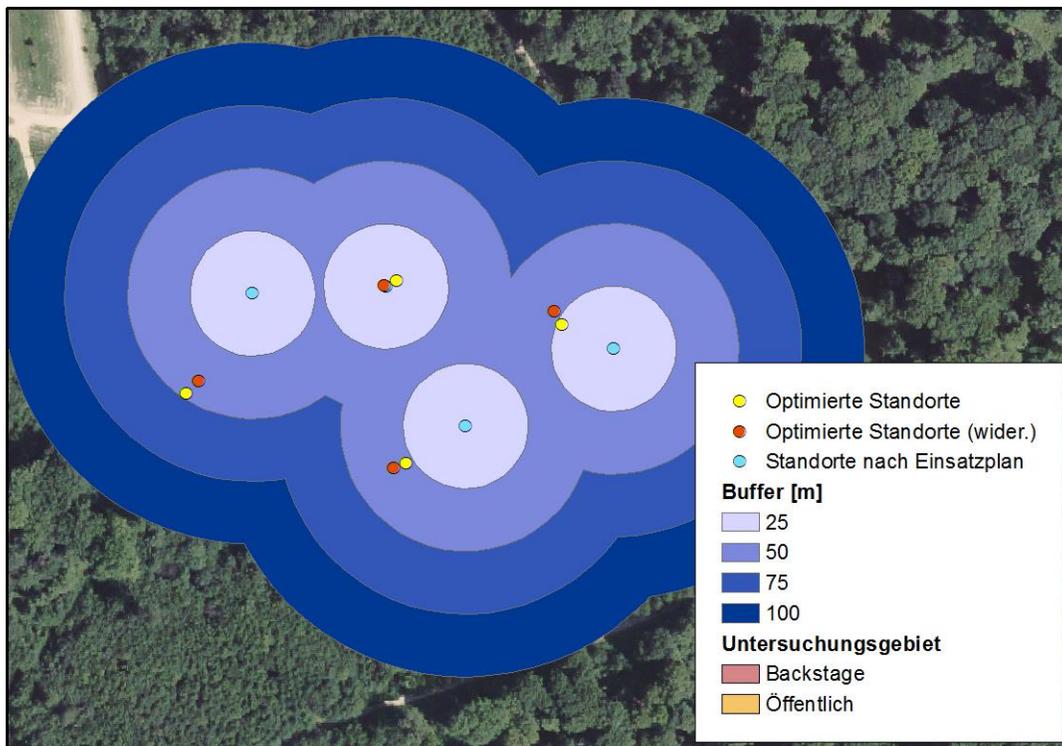


Abbildung 48: Fallbeispiel 2 - Buffer-Analyse

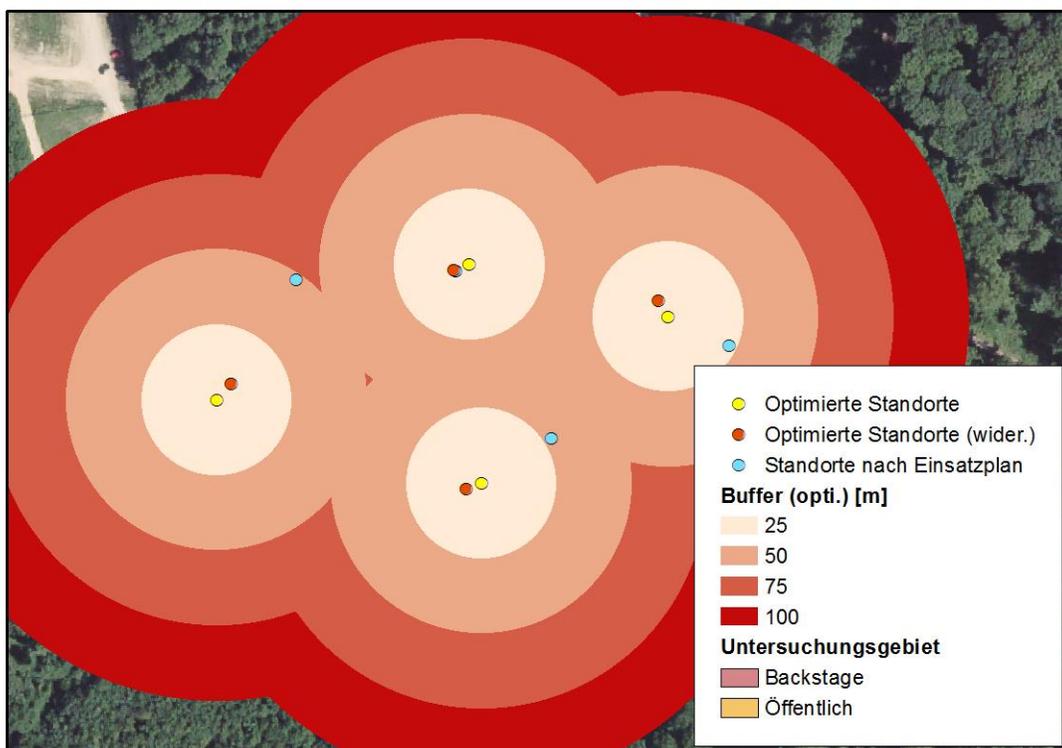


Abbildung 49: Fallbeispiel 2 - Buffer-Analyse der optimierten Standorte

Tabelle 9: Fallbeispiel 2 - Ergebnisse der Buffer-Untersuchung

Buffer	Position gegenüber den Standorten laut Einsatzplan				Position gegenüber den widerstandsfrei optimierten Standorten	
	Widerstandsfreie Fortbewegung		Widerstandsbehaftete Fortbewegung		Standorte innerhalb der Buffer-distanz	Σ Anteil aller Standorte
	Standorte innerhalb der Buffer-distanz	Σ Anteil aller Standorte	Standorte innerhalb der Buffer-distanz	Σ Anteil aller Standorte		
25 m	2	50 %	1	25 %	4	100 %
50 m	2	100 %	3	100 %	0	100 %
75 m	0	100 %	0	100 %	0	100 %
100 m	0	100 %	0	100 %	0	100 %
> 100 m	0	100 %	0	100 %	0	100 %

5.2.6.3 Bemessung der notwendigen Standorte mittels Location-Allocation-Analyse

Für den dritten Untersuchungsschritt können die Vorbereitungen in den Location-Allocation-Analyse-Einstellungen aus Ziffer 5.2.6.2 übernommen werden. Anschließend kann nach dem unter Ziffer 4.7.3 beschriebenen Prinzip die Anzahl notwendiger Standorte ermittelt werden, um alle potentiellen Einsatzorte innerhalb des vorgegebenen Impedanz-Grenzwertes von 300 Sekunden (= 5 Minuten) abzudecken:

Tabelle 10: Fallbeispiel 1 - Ergebnisse der Standort-Bemessung

Szenario	Anzahl bemessener Standorte
Nach Einsatzplan	4
Widerstandsfreie Fortbewegung	1
Widerstandsbehaftete Fortbewegung	1

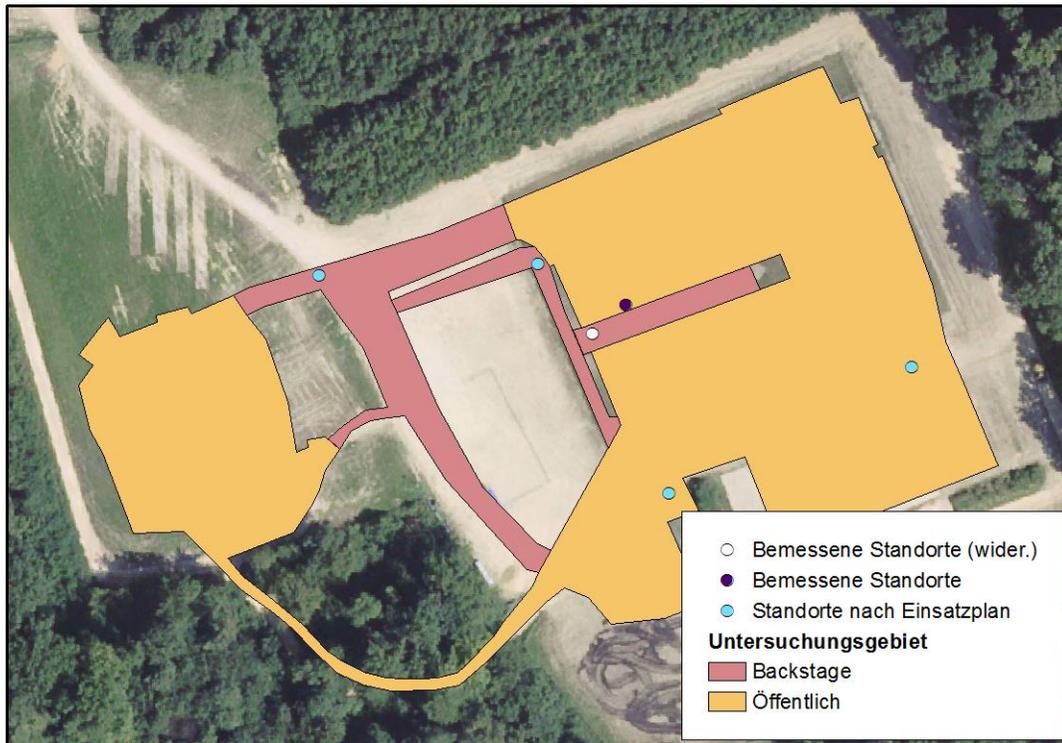


Abbildung 50: Fallbeispiel 2 - Räumliche Verteilung der bemessenen Standorte

5.3 Straßenkünstler-Festival

5.3.1 Beschreibung der Veranstaltung

Bei dem dritten Fallbeispiel handelt es sich um ein jährlich stattfindendes, eintägiges Straßenkünstler-Festival in einer Parkanlage und auf einem öffentlichen Platz mit rund 8.000 gleichzeitig anwesenden Besuchern. Beim Publikum handelt es sich mehrheitlich um Familien mit Kindern.

Der Sanitätsdienst wird durch die örtlich zuständige Rettungsdienstorganisation mit einer Unfallhilfsstelle sowie drei fußläufigen Rettungstrupps sichergestellt.

5.3.2 Georeferenzierung des Veranstaltungsgeländes

Ähnlich wie beim Fallbeispiel 1, handelt es sich um ein offenes Veranstaltungsgelände ohne definierte Absperrungen. Die Pläne des Veranstalters eignen sich nicht für eine automatische Übernahme, sodass die Erfassung des Veranstaltungsgebietes manuell erfolgen muss.

Im ersten Schritt werden deshalb die ungefähren Ausmessungen der Veranstaltungsfläche als Polygon erfasst:



Abbildung 51: Fallbeispiel 3 - Erfassung der Umrise des Veranstaltungsgebietes

Im nächsten Schritt müssen die Hindernisse innerhalb der Fläche erfasst werden. Die Hindernisse stehen ebenfalls nicht als Geodatensätze zur Verfügung und werden deshalb auch manuell erfasst. Als zu berücksichtigende Hindernisse können Gebäude, Bäume, Stände und Attraktionen sowie sonstige Hindernisse (Wände, Blumenbeete, etc.) angesehen werden. Während die Gebäude über OSM-Daten (Datensatz 1) bezogen werden können, müssen die anderen Hindernisse anhand von Orthophotos sowie den Veranstaltungsplänen manuell erfasst werden.



Abbildung 52: Fallbeispiel 3 - Vorbereitung der verschiedenen Hindernisse-Datensätze

Nach Erfassung aller Hindernisse werden diese über das Merge-Werkzeug zusammengefasst und anschließend aus dem Untersuchungsgebiet über das Erase-Tool entfernt.

Das fertige Untersuchungsgebiet hat eine Fläche von 23.886 m². Bei einer angenommen Besucherzahl von rund 8.000 Besuchern ergibt dies eine durchschnittliche Besucherdichte von 0,3 Personen pro Quadratmeter.



Abbildung 53: Fallbeispiel 3 - Fertiges Untersuchungsgebiet

5.3.3 Erstellung des allgemeinen Bewegungsnetzwerkes

Das allgemeine Wegenetzwerk wird nach der unter Ziffer 4.4 beschriebenen Methodik erstellt. Das Netzwerk umfasst dabei das gesamte Untersuchungsgebiet.

5.3.4 Erhebung der Personendichten

Zur Erhebung der Personendichten wurde das Veranstaltungsgelände während einem 3-stündigen Beobachtungszeitraum begangen. Nach visueller Qualitätskontrolle der Fotos konnten insgesamt 39 Aufnahmen für die Analyse zurückbehalten werden. Eine Positionskorrektur der georeferenzierten Aufnahmeorte war nicht notwendig.

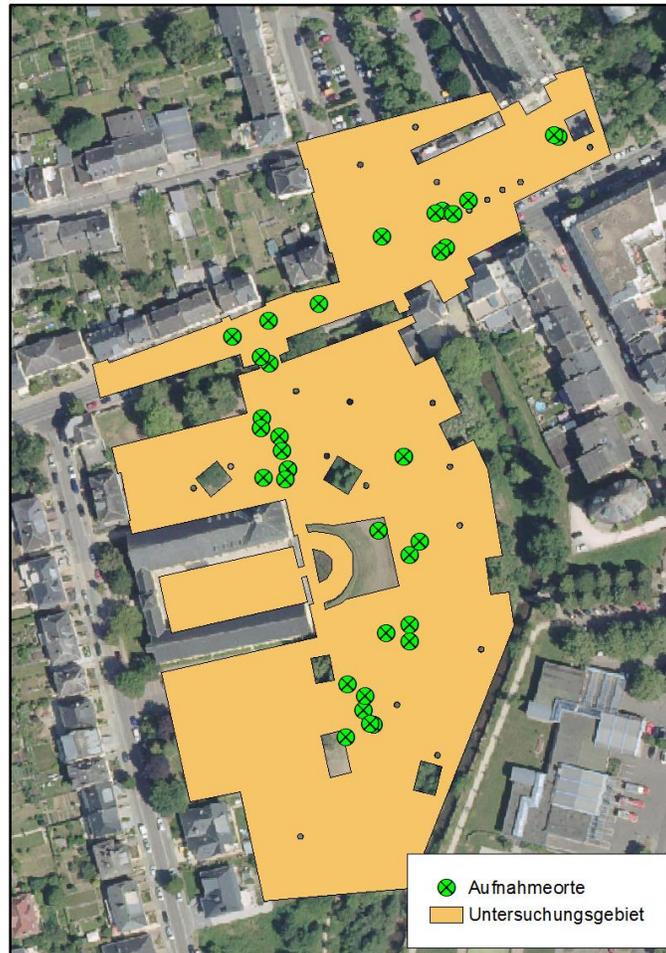


Abbildung 54: Fallbeispiel 3 - Verteilung der Messpunkte innerhalb des Untersuchungsgebietes

Nach Überprüfung des statistischen Fehlers bei der Interpolation mit dem Geostatistical wizard werden eine Potenz von 8 sowie eine Anzahl von 12 zu verwendenden Messpunkten als Parameter festgelegt. Als Interpolations-Barrieren werden die Kanten des Untersuchungsgebietes festgelegt und die Interpolations-Ausdehnung wird durch das Untersuchungsgebiet-Polygon begrenzt:

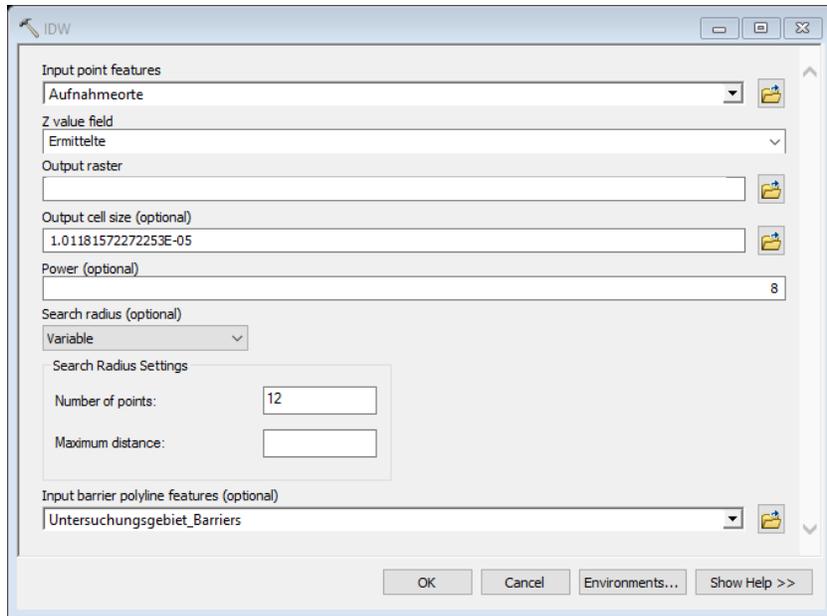


Abbildung 55: Fallbeispiel 3 - Parameter der IDW-Interpolation



Abbildung 56: Fallbeispiel 3 - Ergebnis der IDW-Interpolation

Das Ergebnis der Interpolation zeigt allgemein eine geringe Besucherichte. Die Dichten sind in den Bereichen der Hauptattraktionen sowie der Getränke- und Essstände leicht erhöht. Die höchsten Dichten sind am Eingang zum Park (Engstelle) sowie auf dem öffentlichen Platz zu finden, wo die meisten Vorführungen stattfinden.

Für die Übertragung der Dichten auf das Netzwerk, wird das Netzwerk zuerst gemäß Ziffer 4.6.2 neu klassifiziert und anschließend als Vorbereitung für den Spatial Join in ein Polygonformat umgewandelt.

5.3.5 Anwendung der Geschwindigkeitsfunktion

Die Anwendung der Geschwindigkeitsfunktion erfolgt wie unter Ziffer 4.6 beschrieben. Über die Geschwindigkeitsfunktion wird jeweils pro Kante die widerstandsfreie (velocity_f) und die widerstandsbehaftete (velocity_w) Geschwindigkeit ermittelt und daraus die Durchlaufzeit in Sekunden (seconds_f und seconds_w) bestimmt.

p	Shape_Leng	velocity_w	velocity_f	seconds_f	seconds_w
5	2	0.6442	1.8407	1.086543	3.104626
4	1.999956	0.8335	1.8407	1.086519	2.399467
3	1.999956	1.0478	1.8407	1.086519	1.908719

Abbildung 57: Fallbeispiel 2 - Beispielauszug aus der Attributtabelle

Das Netzwerk wird anschließend nach den unter Ziffer 9.4.3 beschriebenen Parametern erstellt.

5.3.6 Netzwerkanalyse

5.3.6.1 Untersuchung der räumlichen Abdeckung mittels Einzugsgebieten

Als potentielle Einsatz- und Standorte können die Netzwerk-Knotenpunkte aufgrund der Anzahl (n=9.047) nicht verwendet werden, sondern werden wie im ersten Fallbeispiel dargestellt, durch ein räumlich gleichmäßiges Punktemuster mit größerer Zwischendistanz ersetzt (n=951).

Laut Einsatzplan waren während des Beobachtungszeitraumes 3 Rettungstrupps an folgenden Standorten eingesetzt:



Abbildung 58: Fallbeispiel 3 - Verteilung der Rettungstrupps im Untersuchungsgebiet

Die Einzugsgebiete werden anschließend als detaillierte Disk-Polygone berechnet und bei einer Toleranz von 5 Metern abgeschnitten. Polygone gleicher Impedanzwerte werden zusammengefasst. Als Impedanzwerte für die Berechnung der Einzugsgebiete werden 60 Sekunden-Abstände mit einem maximalen Impedanzwert von 600 Sekunden (= 10 Minuten) gewählt.



Abbildung 59: Fallbeispiel 3 - Widerstandsfreie Einzugsgebiete

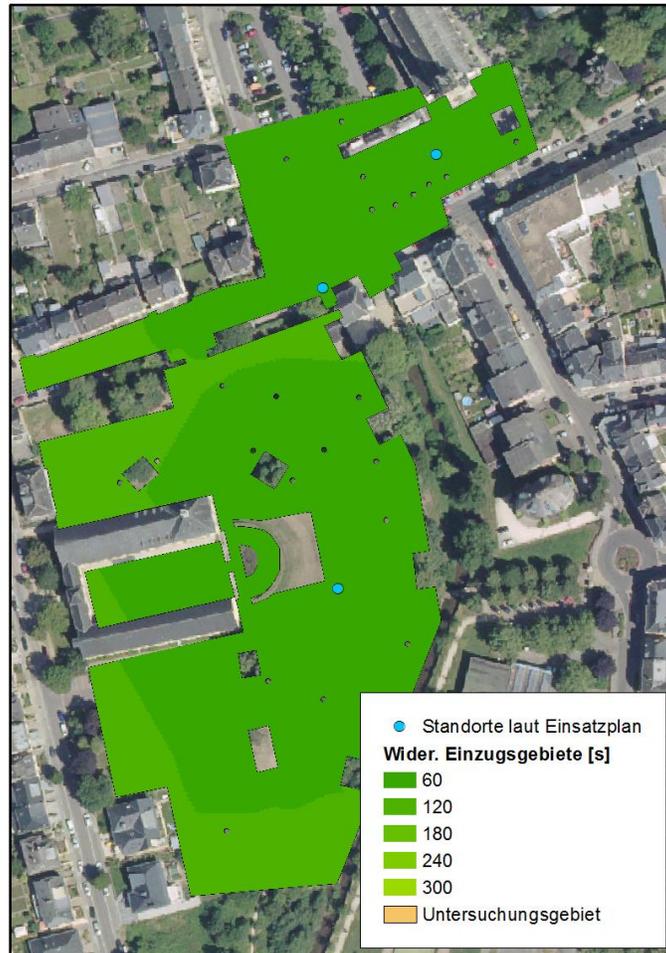


Abbildung 60: Fallbeispiel 3 - Widerstandsbehafete Einzugsgebiete

Tabelle 11: Fallbeispiel 3 - Prozentuale Abdeckung der Einsatzorte

Impedanzen der Einzugsgebiete		Widerstandsfreie Fortbewegung		Widerstandsbehafete Fortbewegung		Differenz
		Abgedeckte Einsatzorte	Prozentualer Anteil	Abgedeckte Einsatzorte	Prozentualer Anteil	
Sekunden	Minuten					
0	0	0	0 %	0	0 %	0 %
60	1	867	91,16 %	723	76,03 %	15,13%
120	2	951	100 %	951	100 %	0 %
180	3	951	100 %	951	100 %	0 %
240	4	951	100 %	951	100 %	0 %
300	5	951	100 %	951	100 %	0 %
360	6	951	100 %	951	100 %	0 %
420	7	951	100 %	951	100 %	0 %
480	8	951	100 %	951	100 %	0 %
540	9	951	100 %	951	100 %	0 %
600	10	951	100 %	951	100 %	0 %

5.3.6.2 Standortoptimierung der Einheiten mittels Location-Allocation-Analyse

Ähnlich wie beim ersten Fallbeispiel ist die Anzahl an Knotenpunkten zu groß ($n=9.047$), sodass ein zu hoher Rechenaufwand zur iterativen Lösung der Location-Allocation-Analyse notwendig wäre. Aus diesem Grund wird wie im ersten Fallbeispiel ein räumlich gleichmäßiges Punktemuster erstellt, welches als potentielle Standorte und potentielle Einsatzorte verwendet werden kann. Dadurch wird die Anzahl auf 951 Punkte reduziert.



Abbildung 61: Fallbeispiel 3 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten



Abbildung 62: Fallbeispiel 3 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten (wider.)



Abbildung 63: Fallbeispiel 3 - Darstellung der verschiedenen Standorte nach Optimierung

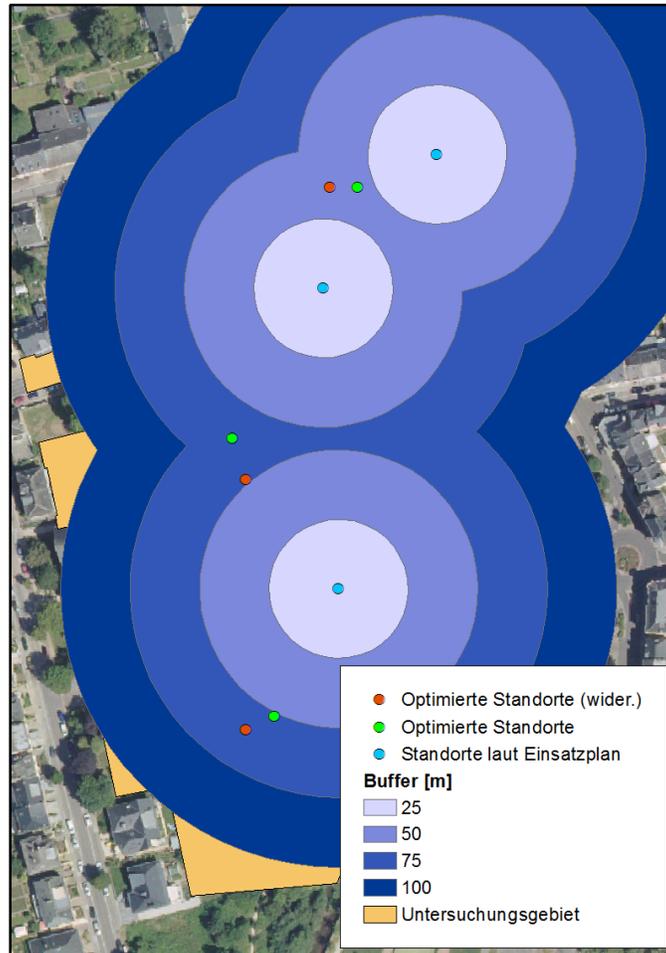


Abbildung 64: Fallbeispiel 3 - Buffer-Analyse

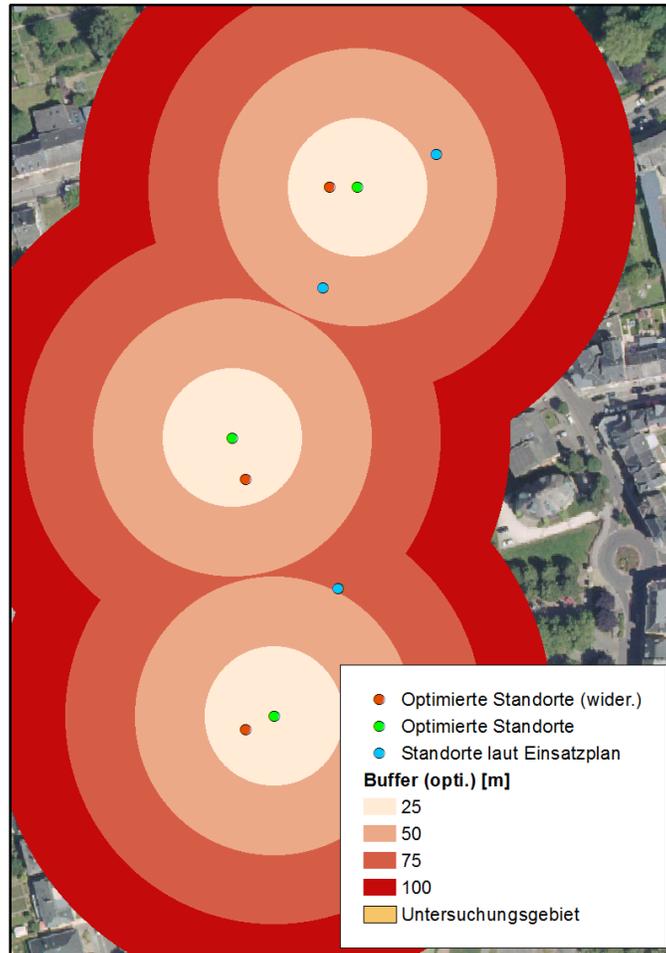


Abbildung 65: Fallbeispiel 3 - Buffer-Analyse der optimierten Standorte

Tabelle 12: Fallbeispiel 3 - Ergebnisse der Buffer-Untersuchung

Buffer	Position gegenüber den Standorten laut Einsatzplan				Position gegenüber den widerstandsfrei optimierten Standorten	
	Widerstandsfreie Fortbewegung		Widerstandsbehaftete Fortbewegung		Standorte innerhalb der Buffer-distanz	Σ Anteil aller Standorte
	Standorte innerhalb der Buffer-distanz	Σ Anteil aller Standorte	Standorte innerhalb der Buffer-distanz	Σ Anteil aller Standorte		
25 m	0	0	0	0	3	100 %
50 m	1	33 %	1	33 %	0	100 %
75 m	2	100 %	2	100 %	0	100 %
100 m	0	100 %	0	100 %	0	100 %
> 100 m	0	100 %	0	100 %	0	100 %

5.3.6.3 Bemessung der notwendigen Standorte mittels Location-Allocation-Analyse

Für den dritten Untersuchungsschritt können die Vorbereitungen in den Location-Allocation-Analyse-Einstellungen aus Ziffer 5.3.6.2 übernommen werden. Anschließend kann nach dem unter Ziffer 4.7.3 beschriebenen Prinzip die Anzahl notwendiger Standorte ermittelt werden, um alle potentiellen Einsatzorte innerhalb des vorgegebenen Impedanz-Grenzwertes von 300 Sekunden (= 5 Minuten) abzudecken:

Tabelle 13: Fallbeispiel 3 - Ergebnisse der Standort-Bemessung

Szenario	Anzahl bemessener Standorte
Nach Einsatzplan	3
Widerstandsfreie Fortbewegung	1
Widerstandsbehaftete Fortbewegung	1



Abbildung 66: Fallbeispiel 3 - Räumliche Verteilung der bemessenen Standorte

5.4 Open-Air Musikveranstaltung

5.4.1 Beschreibung der Veranstaltung

Bei dem vierten Fallbeispiel handelt es sich um ein gleichzeitig in mehreren Stadtteilen stattfindendes Musikfestival mit Auftritten auf mehreren in den Straßen verteilten Open Air Bühnen. Laut Zählungen des Veranstalters aus dem Jahr 2015 kann von 15.000 gleichzeitig anwesenden Besuchern ausgegangen werden. Das Publikum setzt sich mehrheitlich aus Erwachsenen und älteren Personen zusammen. Aufgrund der Größe des Veranstaltungsgeländes beschränkt sich die Analyse auf das Gebiet mit der höchsten Angebotsdichte. In diesem Gebiet können erfahrungsgemäß 12.000 gleichzeitig anwesende Besucher angenommen werden.

Der Sanitätsdienst wird durch die örtliche Rettungsdienstorganisation mit mehreren Einheiten sichergestellt. Aufgrund der Größe des Veranstaltungsortes werden neben Fußtrups auch Motorräder und Rettungswagen eingesetzt. Während des Beobachtungszeitraumes waren acht Rettungstrups im Untersuchungsgebiet eingesetzt.

5.4.2 Georeferenzierung des Veranstaltungsgeländes

Da sich die Veranstaltung auf mehrere Stadtviertel verteilt, wird das Veranstaltungsgebiet zuerst durch ein Polygon auf einen definierten Untersuchungsbereich begrenzt:



Abbildung 67: Fallbeispiel 4 - Erfassung der Umriss des Veranstaltungsgebietes

Es stehen keine Pläne seitens des Veranstalters zur Verfügung, sodass die Hindernisse manuell erfasst werden müssen. Da es sich um eine Veranstaltung innerhalb einer Siedlung befindet, können als Hindernisse insbesondere Gebäude sowie nicht-begehbare Flächen (z.B. Gärten) angenommen werden. Die Gebäudepolygone werden über OSM bezogen (Datensatz 1), die nicht begehbaren Flächen verwenden ebenfalls OSM-Daten als Grundlage

(Datensatz 3), werden jedoch manuell anhand des Orthophotos erweitert. Die Bühnen und Stände werden anhand vom Veranstalter zur Verfügung gestellten Informationen manuell erfasst.



Abbildung 68: Fallbeispiel 4 - Vorbereitung der verschiedenen Hindernisse-Datensätze

Nachdem alle Hindernisse erfasst wurden, werden diese über das Merge-Werkzeug zu einem Datensatz zusammengefügt und anschließend über das Erase-Tool aus dem Untersuchungsgebiet entfernt. Das fertige Untersuchungsgebiet hat eine längliche Ausdehnung, verfügt aufgrund der schmalen Straßen in denen die Veranstaltung stattfindet jedoch nur über eine Gesamtfläche von 23.712 m². Bei einer angenommenen Besucherzahl von rund 12.000 Besuchern ergibt sich somit eine durchschnittliche Personendichte von 0,5 Personen pro Quadratmeter.

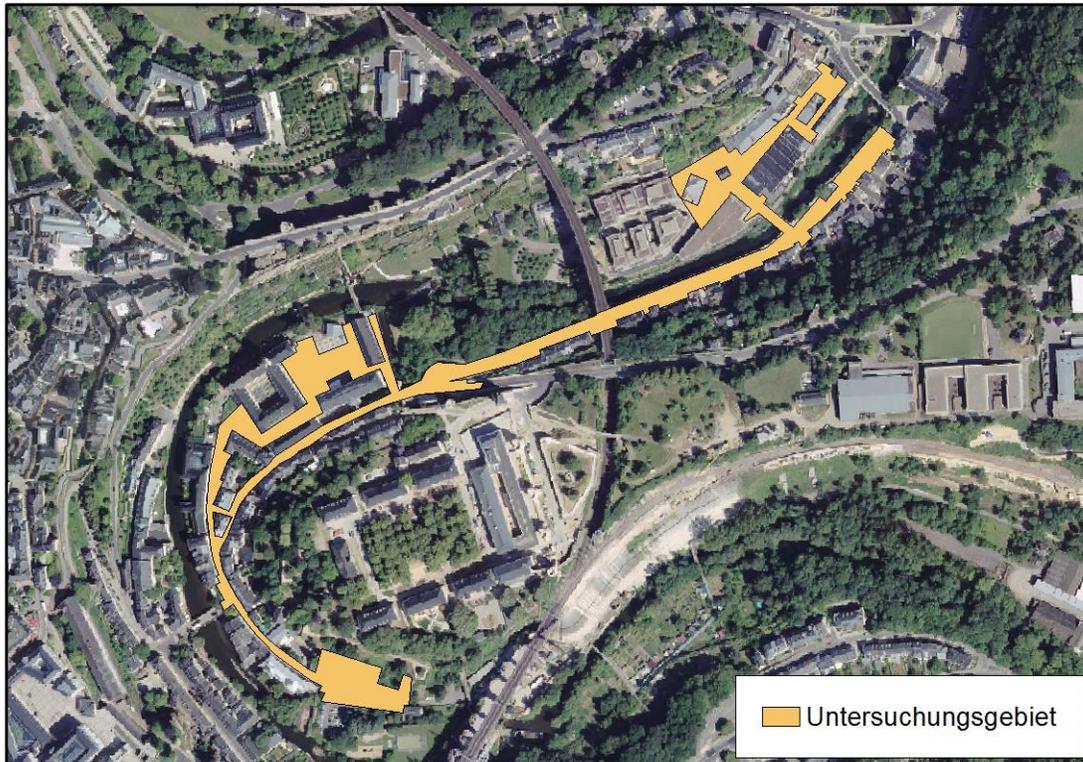


Abbildung 69: Fallbeispiel 4 - Fertiges Untersuchungsgebiet

5.4.3 Erstellung des allgemeinen Bewegernetzwerkes

Das allgemeine Wegenetzwerk wird nach der unter Ziffer 4.4 beschriebenen Methodik erstellt. Das Netzwerk umfasst dabei das gesamte Untersuchungsgebiet.

5.4.4 Erhebung der Personendichten

Zur Erhebung der Personendichten wurde das Untersuchungsgebiet am Tag der Veranstaltung während einem 1,5-stündigen Beobachtungszeitraum begangen. Nach visueller Qualitätskontrolle der Fotos konnten insgesamt 35 Aufnahmen für die Analyse zurückbehalten werden.



Abbildung 70: Fallbeispiel 4 - Manuelle Korrektur falscher GPS-Positionierungen

Nach Überprüfung des statistischen Fehlers bei der Interpolation der Aufnahmeorte mit dem Geostatistical Analyst werden eine Potenz von 1,6 sowie eine Anzahl von 6 zu verwendenden Messpunkten als Parameter festgelegt. Als

Interpolations-Barrieren werden die Kanten des Untersuchungsgebietes festgelegt und die Interpolations-Ausdehnung wird durch das Untersuchungsgebiet-Polygon begrenzt:

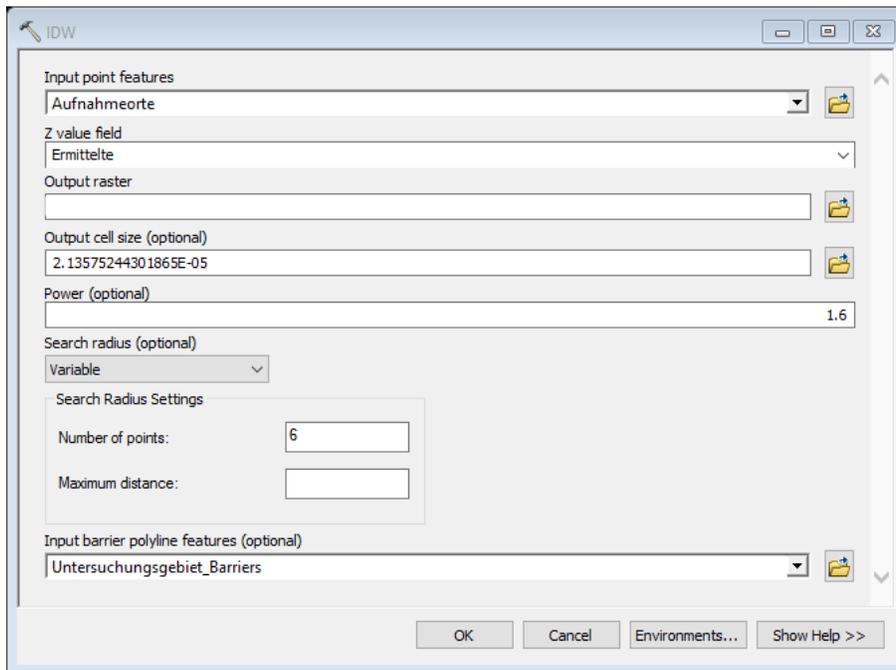


Abbildung 71: Fallbeispiel 4 - Parameter der IDW-Interpolation



Abbildung 72: Fallbeispiel 4 - Ergebnis der IDW-Interpolation

Das Ergebnis der IDW-Interpolation zeigt die höchsten Dichten in den Bereichen mit der attraktivsten Angebotsdichte (größte Open-Air-Bühnen), welche die Besucher mehrheitlich anziehen. Die Dichten im mittleren Bereich sind am geringsten, da es sich nur um den Verbindungsweg zwischen den verschiedenen Veranstaltungsorten handelt und hier keine Vorführungen stattfinden.

Für die Übertragung der Dichten auf das Netzwerk, wird das Netzwerk zuerst gemäß Ziffer 4.6.2 neu klassifiziert und anschließend als Vorbereitung für den Spatial Join in ein Polygonformat umgewandelt.

5.4.5 Anwendung der Geschwindigkeitsfunktion

Die Anwendung der Geschwindigkeitsfunktion erfolgt wie unter Ziffer 4.6 beschrieben. Über die Geschwindigkeitsfunktion wird jeweils pro Kante die widerstandsfreie (velocity_f) und die widerstandsbehaftete (velocity_w) Geschwindigkeit ermittelt und daraus die Durchlaufzeit in Sekunden (seconds_f und seconds_w) bestimmt.

p	Shape_Leng	velocity_w	velocity_f	seconds_w	seconds_f
0	2.000043	1.8407	1.8407	1.086566	1.086566
5	2.000043	0.6442	1.8407	3.104692	1.086566
5	2	0.6442	1.8407	3.104626	1.086543
6	2.000043	0.4799	1.8407	4.167624	1.086566

Abbildung 73: Fallbeispiel 4 - Beispielauszug aus der Attributtabelle

Das Netzwerk wird anschließend nach den unter Ziffer 9.4.4 beschriebenen Parametern erstellt.

5.4.6 Netzwerkanalyse

5.4.6.1 Untersuchung der räumlichen Abdeckung mittels Einzugsgebieten

Auch für das vierte Fallbeispiel ist die Anzahl an Knotenpunkten (n=10.973) zu hoch, sodass auch für dieses Fallbeispiel wieder ein räumlich gleichmäßiges Punktemuster (n=949) zur Darstellung der potentiellen Stand- und Einsatzorte verwendet wird.

Laut Einsatzplan waren während des Beobachtungszeitraumes 8 Rettungstrupps an folgenden Standorten eingesetzt:

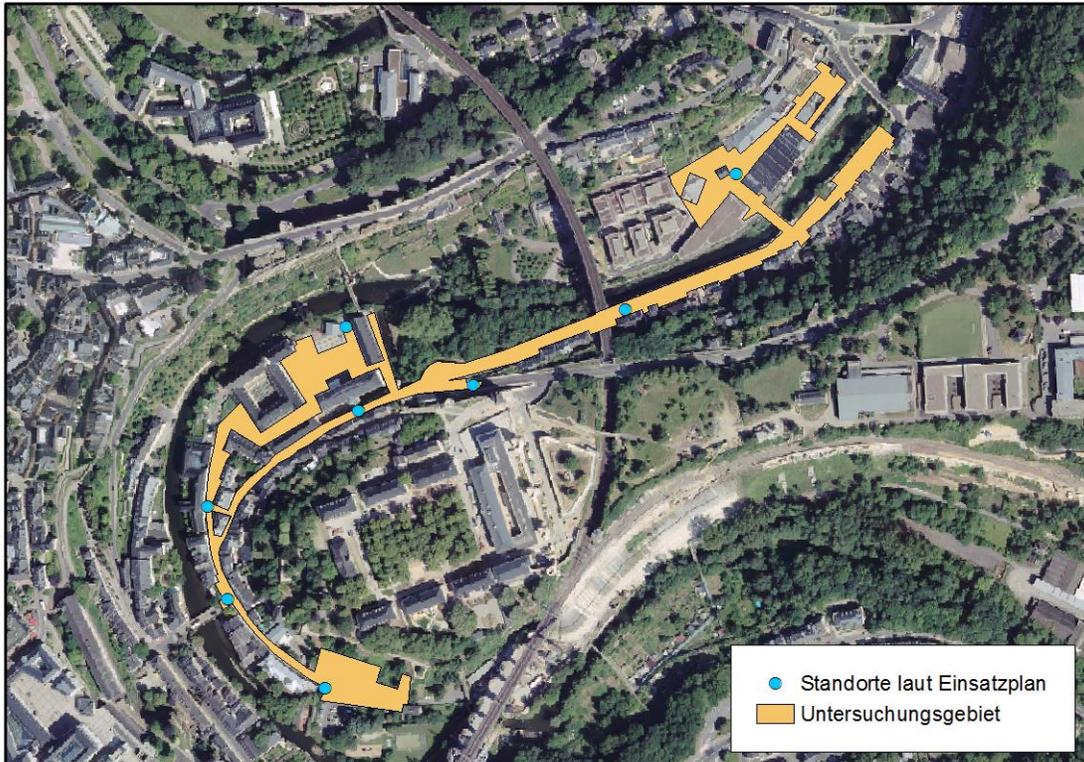


Abbildung 74: Fallbeispiel 4 - Verteilung der Rettungstrupps im Untersuchungsgebiet

Die Einzugsgebiete werden anschließend als detaillierte Disk-Polygone berechnet und bei einer Toleranz von 5 Metern abgeschnitten. Polygone gleicher Impedanzwerte werden zusammengefasst. Als Impedanzwerte für die Berechnung der Einzugsgebiete werden 60 Sekunden-Abstände mit einem maximalen Impedanzwert von 600 Sekunden (= 10 Minuten) gewählt.

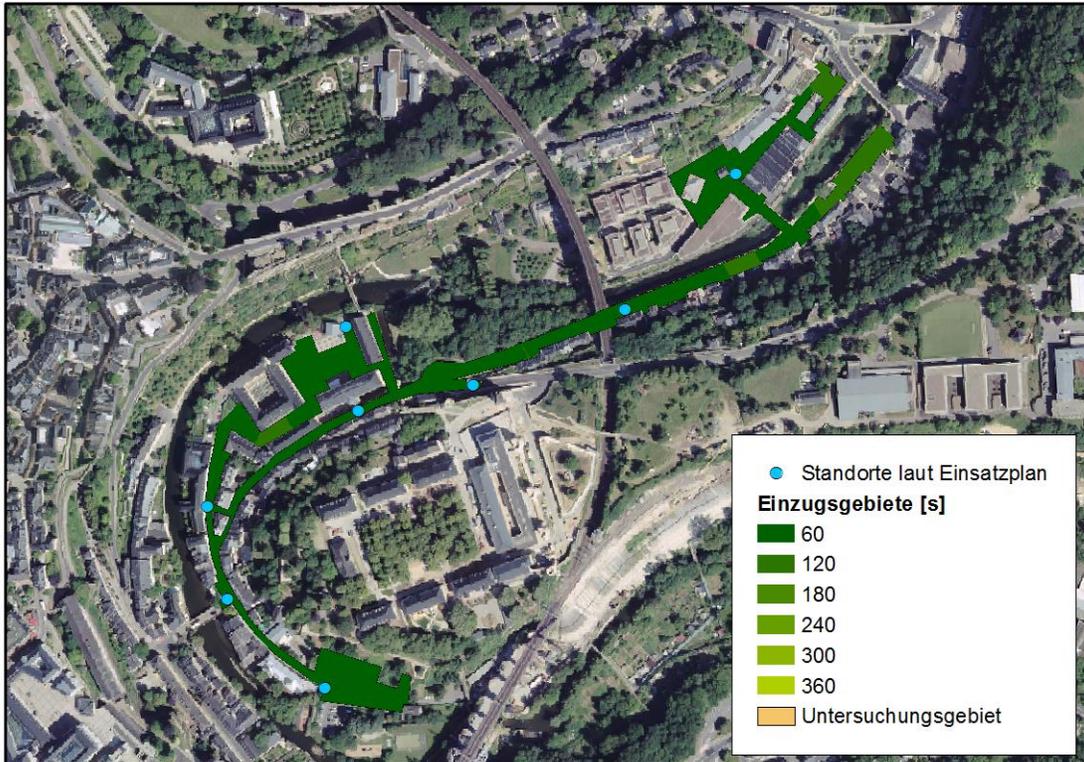


Abbildung 75: Fallbeispiel 4 - Widerstandsfreie Einzugsgebiete



Abbildung 76: Fallbeispiel 4 - Widerstandsbehaftete Einzugsgebiete

Tabelle 14: Fallbeispiel 4 - Prozentuale Abdeckung der Einsatzorte

Impedanzen der Einzugsgebiete		Widerstandsfreie Fortbewegung		Widerstandsbehaftete Fortbewegung		Differenz
		Abgedeckte Einsatzorte	Prozentualer Anteil	Abgedeckte Einsatzorte	Prozentualer Anteil	
Sekunden	Minuten					
0	0	0	0 %	0	0 %	0 %
60	1	823	86,72 %	524	55,52 %	31,2 %
120	2	949	100 %	877	92,41 %	7,59 %
180	3	949	100 %	948	99,89 %	0,11 %
240	4	949	100 %	949	100 %	0 %
300	5	949	100 %	949	100 %	0 %
360	6	949	100 %	949	100 %	0 %
420	7	949	100 %	949	100 %	0 %
480	8	949	100 %	949	100 %	0 %
540	9	949	100 %	949	100 %	0 %
600	10	949	100 %	949	100 %	0 %

5.4.6.2 Standortoptimierung der Einheiten mittels Location-Allocation-Analyse

Als Anzahl zu wählender Standorte werden wie in der Einsatzplanung vorgegeben 8 Stück angenommen. Der Impedanz-Grenzwert wird wie beschrieben auf 300 Sekunden (= 5 Minuten) festgelegt. Anschließend werden die effizientesten Standorte bei widerstandsfreier und widerstandsbehafteter Fortbewegung über die Location-Allocation-Analyse berechnet.

Als potentielle Einsatz- und Standorte werden die über das räumliche gleichmäßige Punktmuster gegebenen Positionen angenommen.

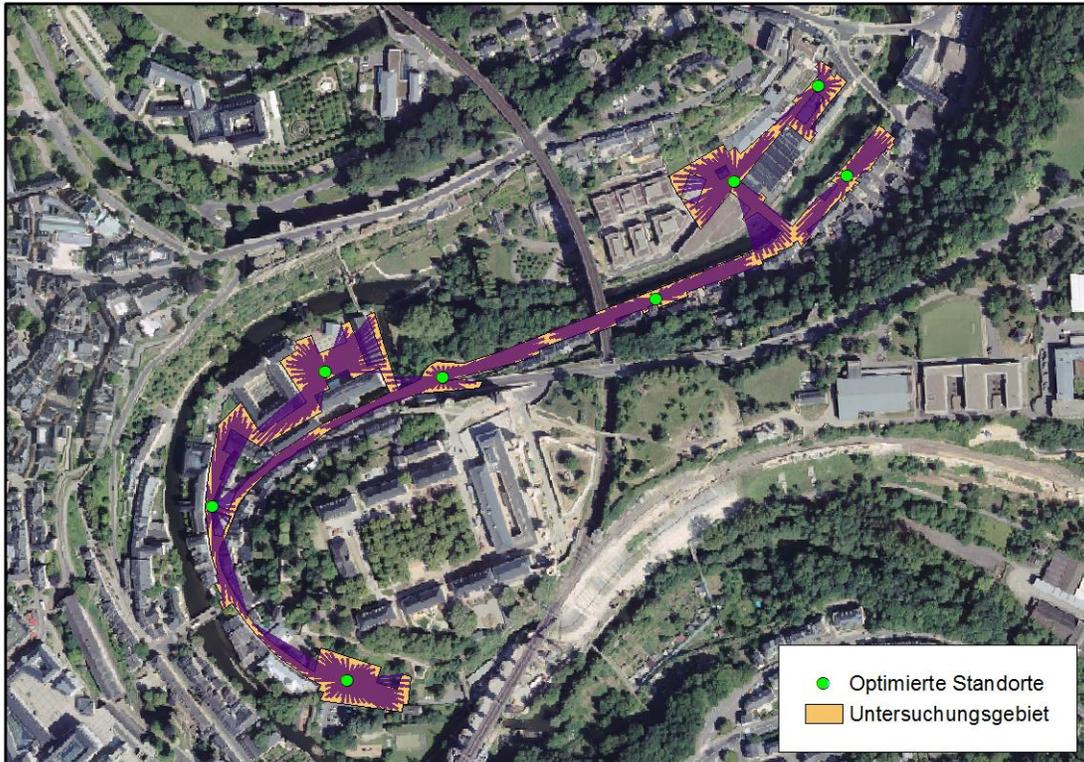


Abbildung 77: Fallbeispiel 4 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten

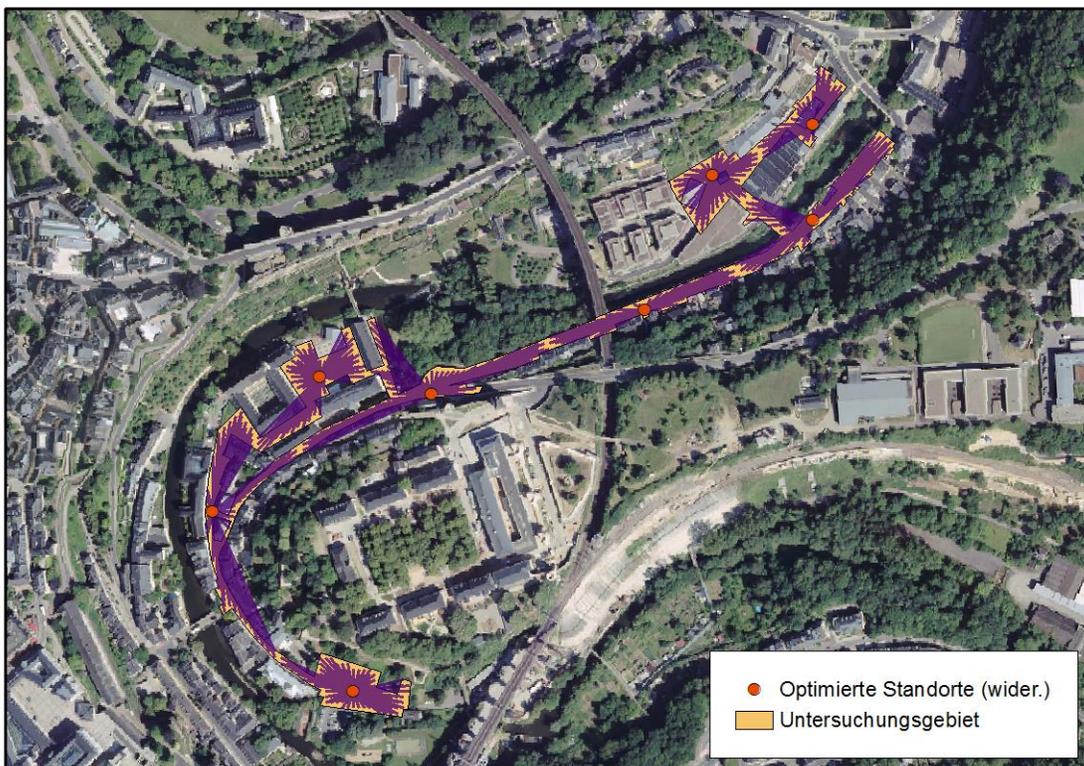


Abbildung 78: Fallbeispiel 4 - Zuweisung der Einsatzorte zu den optimierten Standorten (wider.)



Abbildung 79: Fallbeispiel 4 - Darstellung der verschiedenen Standorte nach Optimierung

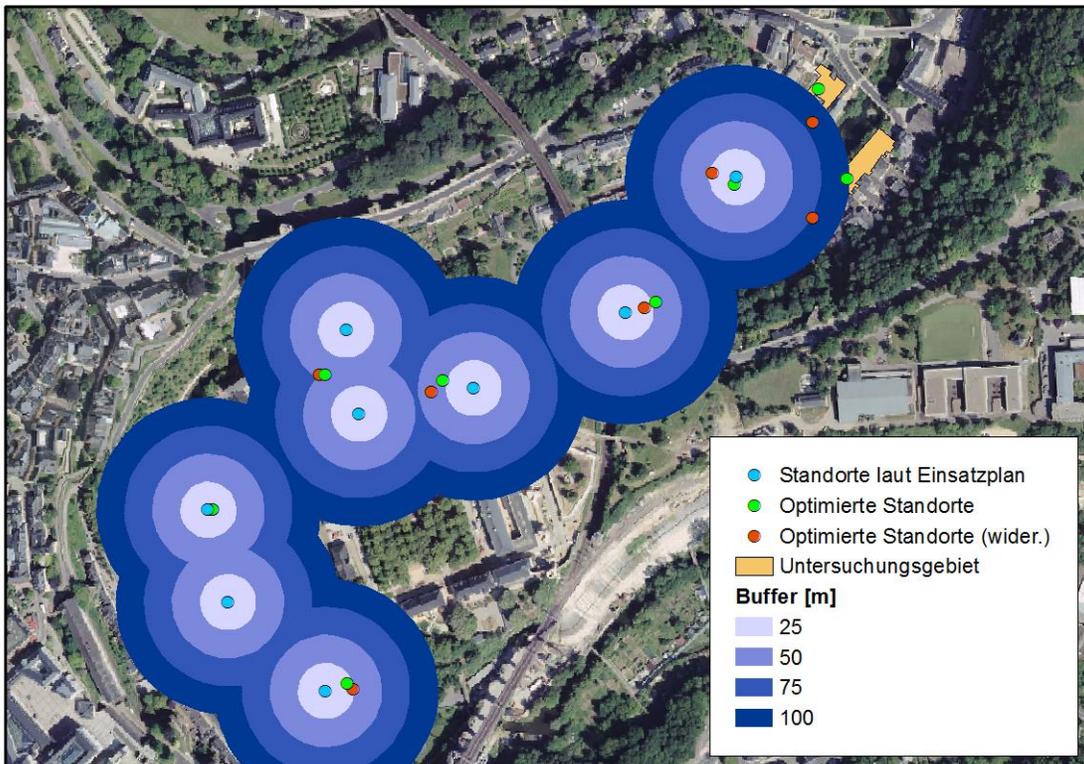


Abbildung 80: Fallbeispiel 4 - Buffer-Analyse



Abbildung 81: Fallbeispiel 4 - Buffer-Analyse der optimierten Standorte

Tabelle 15: Fallbeispiel 4 - Ergebnisse der Buffer-Untersuchung

Buffer	Position gegenüber den Standorten laut Einsatzplan				Position gegenüber den widerstandsfrei optimierten Standorten	
	Widerstandsfreie Fortbewegung		Widerstandsbehaftete Fortbewegung		Standorte innerhalb der Buffer-distanz	Σ Anteil aller Standorte
	Standorte innerhalb der Buffer-distanz	Σ Anteil aller Standorte	Standorte innerhalb der Buffer-distanz	Σ Anteil aller Standorte		
25 m	3	37,5 %	4	50 %	6	75 %
50 m	3	75 %	2	75 %	2	100 %
75 m	0	75 %	0	75 %	0	100 %
100 m	1	87,5 %	2	100 %	0	100 %
> 100 m	1	100 %	0	100 %	0	100 %

5.4.6.3 Bemessung der notwendigen Standorte mittels Location-Allocation-Analyse

Für den dritten Untersuchungsschritt können die Vorbereitungen in den Location-Allocation-Analyse-Einstellungen aus Ziffer 5.4.6.2 übernommen werden. Anschließend kann nach dem unter Ziffer 4.7.3 beschriebenen Prinzip die Anzahl notwendiger Standorte ermittelt werden, um alle potentiellen Einsatzorte innerhalb des vorgegebenen Impedanz-Grenzwertes von 300 Sekunden (= 5 Minuten) abzudecken:

Tabelle 16: Fallbeispiel 4 - Ergebnisse der Standort-Bemessung

Szenario	Anzahl bemessener Standorte
Nach Einsatzplan	8
Widerstandsfreie Fortbewegung	2
Widerstandsbehaftete Fortbewegung	2

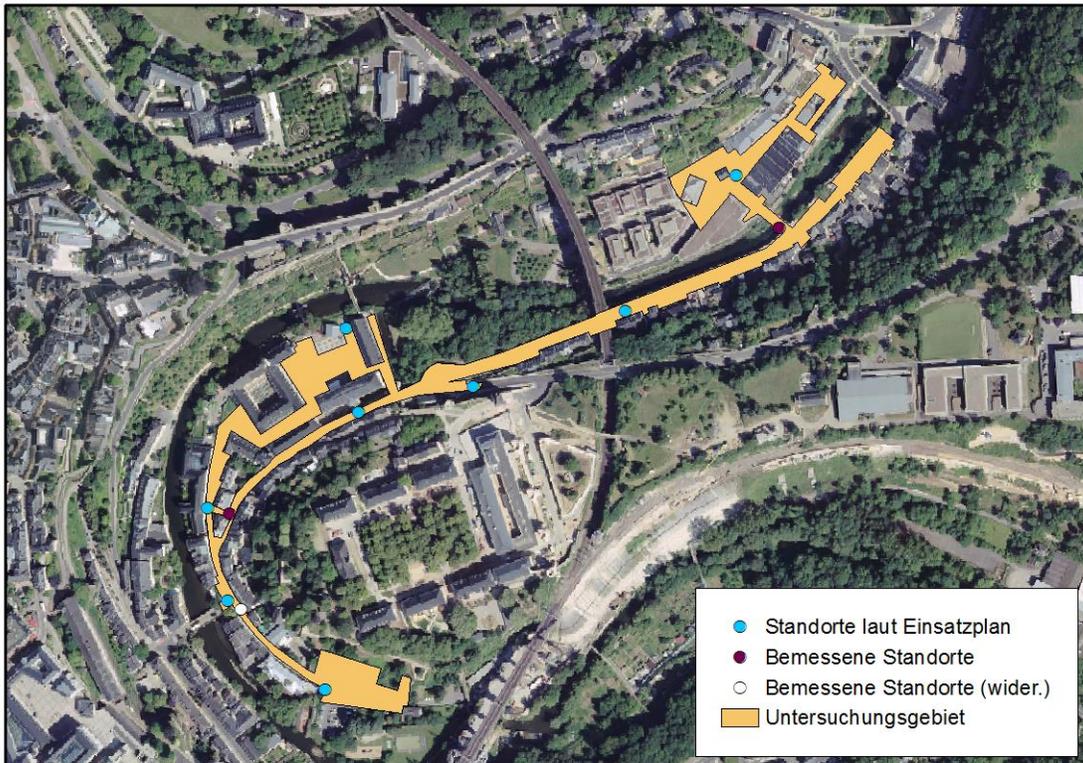


Abbildung 82: Fallbeispiel 4 - Räumliche Verteilung der bemessenen Standorte

III. Kapitel
Ergebnisse
Diskussion

6 Ergebnisse

Unter Ziffer 5 wurde die entwickelte Methodik anhand von vier realen Fallbeispielen zur Untersuchung der aufgeworfenen Fragestellungen praktisch angewendet. Die einzelnen Ergebnisse wurden jeweils sowohl graphisch als auch tabellarisch dokumentiert. Nachfolgend sollen diese Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert werden. Anhand der ermittelten Ergebnisse werden dann in der anschließenden Diskussion einsatztaktische Hinweise für die praktische Einsatzplanung abgeleitet werden.

6.1.1.1 Allgemeiner Vergleich

Die gewählten Fallbeispiele unterscheiden sich alle hinsichtlich des Veranstaltungstyps sowie –ortes, der Geländegröße sowie der Besucherzahlen. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass keine dieser Faktoren die Untersuchung im Sinne eines systematischen Fehlers beeinflussen konnte. Tabelle 17 fasst die wichtigsten Faktoren nochmals zusammen:

Tabelle 17: Vergleich der Fallbeispiele

	Fallbeispiel 1	Fallbeispiel 2	Fallbeispiel 3	Fallbeispiel 4
Veranstaltungstyp	Straßenfest	Open-Air Festival	Künstlerfest	Musikveranstaltung
Fläche	36.430 m ²	11.783 m ²	23.886 m ²	23.712 m ²
Besucher im Untersuchungsgebiet	70.000	7.000	8.000	12.000
Eingesetzte Rettungstrupps laut Einsatzplan	11	4	3	8
Durchschnittliche Personendichte	1,9	0,6	0,3	0,5
Max. ermittelte Personendichte	5	4	3	3

Die Tabelle zeigt, dass das Fallbeispiel 1 allgemein eine sehr hohe durchschnittliche Dichte (1,9 P/m²) aufweist, während die anderen drei Fallbeispiele vergleichbar geringe durchschnittliche Personendichten (0,3 – 0,6 P/m²) aufweisen. Für die weitere Diskussion der Ergebnisse kann das Fallbeispiel 1 somit als Beispiel mit einer hohen Personendichte verwendet werden, während die Fallbeispiele 2-4 als Beispiele mit geringen Personendichten angesehen werden können.

6.1.1.2 Untersuchung der räumlichen Abdeckung mittels Einzugsgebieten

Die Untersuchung der räumlichen Abdeckung mittels Einzugsgebieten wurde zur Klärung der Fragestellung durchgeführt, ob die Personendichten auf einem Veranstaltungsgelände einen signifikanten Einfluss auf die zeitliche Abdeckung verschiedener Bereiche durch die Rettungstrupps haben. Hierfür wurde die prozentuale Abdeckung aller potentiellen Einsatzorte im Untersuchungsgebiet in Relation zur Eintreffzeit, ausgehend von den im Einsatzplan festgelegten Standorten, ermittelt. Die nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse der vier Fallbeispiele zusammen:

Tabelle 18: Zusammenfassung der prozentuellen Abdeckung aller potentiellen Einsatzorte

Impedanzen der Einzugsgebiete [s]	Fallbeispiel 1		Fallbeispiel 2		Fallbeispiel 3		Fallbeispiel 4	
	ohne Widerstand	Mit Widerstand						
0	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
60	76,07 %	40,79 %	98,67 %	84,66 %	91,16 %	76,03 %	86,72 %	55,52 %
120	99,93 %	75,73 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	92,41 %
180	99,93 %	86,61 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	99,89 %
240	99,93 %	91,91 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
300	100 %	94,56 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
360	100 %	98,98 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
420	100 %	99,73 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
480	100 %	99,93 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
540	100 %	99,93 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
600	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

In der nachfolgenden Abbildung werden die prozentuellen Abdeckungen der potentiellen Einsatzorte bei einer widerstandsfreien und einer widerstandsbehafteten Fortbewegung gegenübergestellt:

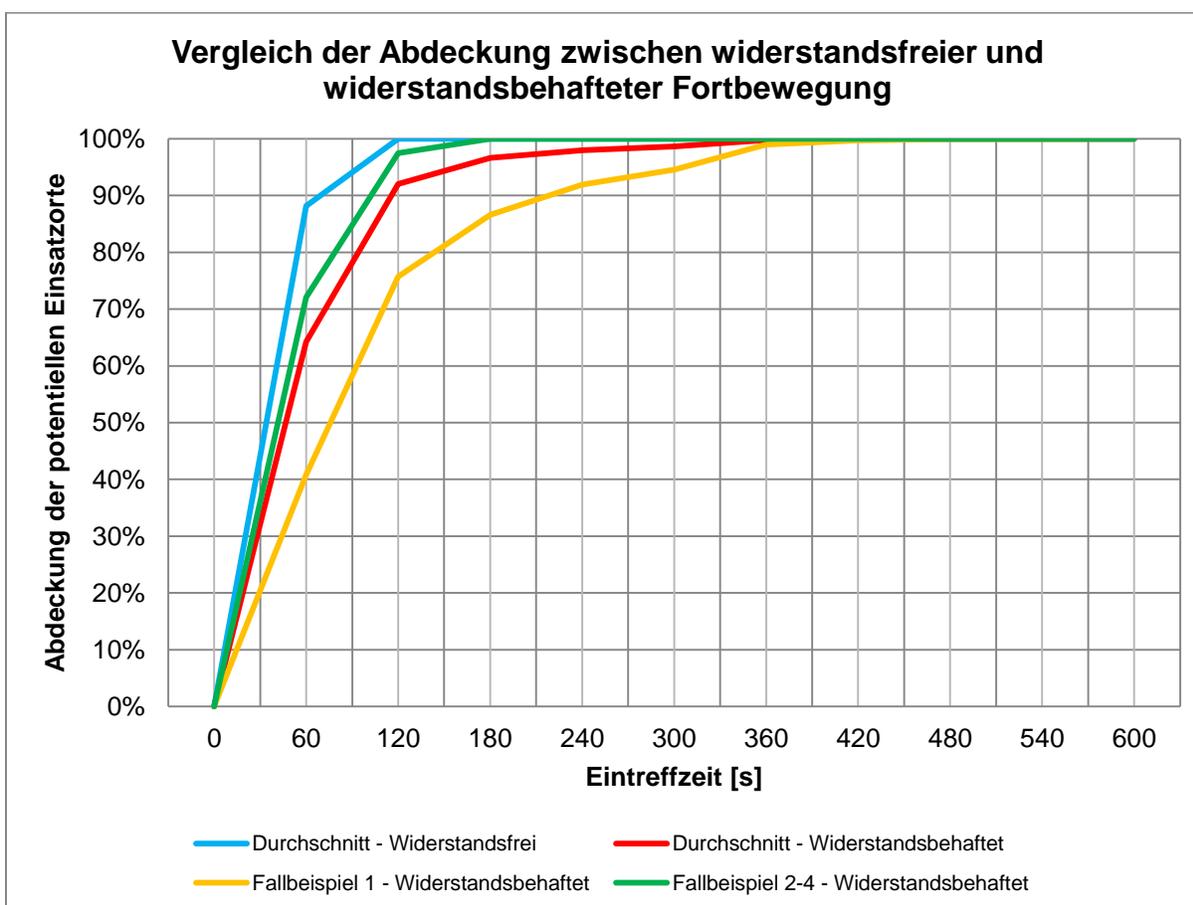


Abbildung 83: Vergleich der Abdeckung zwischen widerstandsfreier und widerstandsbehafteter Fortbewegung

Tabelle 19: Vergleich der durchschnittlichen Eintreffzeiten nach Abdeckung

Prozentuelle Abdeckung der Einsatzorte	Durchschnittliche Eintreffzeit [s]			
	Widerstandsfreie Fortbewegung	Widerstand-behaftete Fortbewegung	Hohe Dichten (Fallbeispiel 1)	Geringe Dichten (Fallbeispiel 2-4)
80 %	55	95	145	75
90 %	70	110	220	100
100 %	115	360	360	180
Ø Abweichung gegenüber der widerstandsfreien Fortbewegung		108	162	38

Folgende Beobachtungen sind den oben dargestellten Tabellen und Abbildungen zu entnehmen:

- Die prozentuelle Erreichbarkeit der Einsatzorte ist bei der widerstandsbehafteten Fortbewegung über alle Eintreffzeiten hin schlechter als bei der widerstandsfreien Fortbewegung. Die durchschnittliche Abweichung der Abdeckung beträgt rund 108 Sekunden.
- Bei allen Fallbeispielen, außer bei der widerstandsbehafteten Fortbewegung bei Fallbeispiel 1, konnten die Veranstaltungsgelände flächendeckend innerhalb der Zielhilfsfrist von 5 Minuten, ausgehend von den durch die Einsatzplanung festgelegten Standorten, abgedeckt werden.
- Die Abweichung bei hohen Dichten (Fallbeispiel 1) ist mit durchschnittlich 162 Sekunden gegenüber der widerstandsfreien Fortbewegung am größten.
- Die Abweichung bei geringen Dichten (Fallbeispiele 2-4) ist mit durchschnittlich 38 Sekunden gegenüber der widerstandsfreien Fortbewegung deutlich geringer.
- Bei hohen Dichten kann es zu einer Überschreitung der vorgegebenen Hilfsfrist kommen.

Die aufgeworfene Fragestellung kann somit wie folgt beantwortet werden:

- Die Verteilung der Menschenmengen auf einem Veranstaltungsgelände hat grundsätzlich einen signifikanten Einfluss auf die zeitliche Erreichbarkeit verschiedener Bereiche durch die Einsatzkräfte. Insbesondere bei hohen durchschnittlichen Dichten ($\geq 1,9 \text{ P/m}^2$) innerhalb des Veranstaltungsgebietes kann es durch die Widerstände der Menschenmengen zu spürbarer Verschlechterung der Eintreffzeiten bis hin zu schlimmstenfalls einer Überschreitung der vorgegebenen Hilfsfrist kommen. Bei geringeren Personendichten ist der Effekt deutlich kleiner und hat in der Regel keinen signifikanten Einfluss auf die Einhaltung der Hilfsfrist.

6.1.1.3 Standortoptimierung der Einheiten mittels Location-Allocation-Analyse

Der zweite Untersuchungsschritt sollte den Einfluss der Menschenmengen auf einem Veranstaltungsgelände auf die Standortplanung der Einsatzkräfte analysieren. Hierfür wurden über eine Location-Allocation-Analyse jeweils die effektivsten Standorte bei einer widerstandsfreien und einer widerstandsbehafteten Fortbewegung ermittelt und die räumliche Abweichung deren Positionen anschließend mit den durch die Einsatzplanung vorgegebenen Standorte verglichen.

Tabelle 20: Zusammenfassung der Ergebnisse der Standortoptimierung gegenüber den tatsächlichen Standorten

Bufferdistanz	Anteile der Standorte innerhalb der Bufferdistanz zu den tatsächlichen Standorten							
	Fallbeispiel 1		Fallbeispiel 2		Fallbeispiel 3		Fallbeispiel 4	
	Ohne Widerstand	Mit Widerstand	Ohne Widerstand	Mit Widerstand	Ohne Widerstand	Mit Widerstand	Ohne Widerstand	Mit Widerstand
25 m	18%	36%	50 %	25 %	0	0	37,5 %	50 %
50 m	55%	64%	100 %	100 %	33 %	33 %	75 %	75 %
75 m	64%	82%	100 %	100 %	100 %	100 %	75 %	75 %
100 m	82%	82%	100 %	100 %	100 %	100 %	87,5 %	100 %
> 100 m	100%	100%	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Tabelle 21: Vergleich der Ergebnisse der Standortoptimierung gegenüber den tatsächlichen Standorten

Bufferdistanz	Durchschnittlicher Anteil an optimierten Standorten innerhalb der Bufferdistanz zu den tatsächlichen Standorten	
	Widerstandsfreie Fortbewegung	Widerstandsbehaftete Fortbewegung
25 m	23%	28%
50 m	66%	68%
75 m	85%	89%
100 m	94%	96%
> 100 m	100%	100%

Tabelle 22: Zusammenfassung der Ergebnisse der widerstandsbehafteten Standortoptimierung gegenüber den widerstandsfrei optimierten Standortpositionen

Bufferdistanz	Durchschnittlicher Anteil an widerstandsbehaftet optimierten Standorten innerhalb der Bufferdistanz zu den widerstandsfrei optimierten Standortpositionen				
	Fallbeispiel 1	Fallbeispiel 2	Fallbeispiel 3	Fallbeispiel 4	Ø
25 m	55 %	100 %	100 %	75 %	83 %
50 m	82 %	100 %	100 %	100 %	96 %
75 m	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
100 m	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
> 100 m	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Folgende Beobachtungen sind den oben dargestellten Tabellen zu entnehmen:

- Mehr als 66 % der durch die Location-Allocation-Analyse als effizienteste Standorte ermittelten Positionen liegen in weniger als 50 m Distanz zu den durch die Einsatzplanung vorgegebenen Positionen.
- Rund 95 % der durch die Location-Allocation-Analyse als effizienteste Standorte ermittelten Positionen liegen in maximal 100 m Distanz zu den durch die Einsatzplanung vorgegebenen Positionen.

- Die Positionen der widerstandsfrei und widerstandsbehaftet ermittelten effizientesten Standorte unterscheiden sich in durchschnittlich 83 % der Fälle um weniger als 25 Meter, in durchschnittlich 96 % der Fälle um weniger als 50 m.
- Die Positionen der widerstandsfrei und widerstandsbehaftet ermittelten effizientesten Standorte liegen nie mehr als 75 m auseinander.
- Am weitesten liegen die Positionen der widerstandsfrei und widerstandsbehaftet ermittelten effizientesten Standorte beim Fallbeispiel mit hohen Dichten (Fallbeispiel 1) auseinander. Bei zwei der drei anderen Fallbeispiele liegen die Positionen sogar alle in einer maximalen Distanz von jeweils 25 m zueinander.

Die aufgeworfene Fragestellung kann somit wie folgt beantwortet werden:

- Der Einfluss der Menschenmengen innerhalb einer Veranstaltungsfläche auf die Standortplanung von Einsatzkräften ist bei geringen Personendichten vernachlässigbar gering. Erst bei großen durchschnittlichen Dichten ($\geq 1,9 \text{ P/m}^2$) verschieben sich die Standorte leicht, hin zu einer Verdichtung im Bereich von Bereichen mit besonders hohen Dichten (vergleiche Abbildung 29 und Abbildung 30). Der Unterschied zwischen den Positionen der widerstandsfrei und widerstandsbehaftet ermittelten effizientesten Standorte beträgt jedoch immer eine maximale Distanz von 75 m. Bei allen Fallbeispielen geringer Dichte sind sowohl die widerstandsfrei als auch die widerstandsbehaftet ermittelten effizientesten Standorte immer sehr gleichmäßig über das Veranstaltungsgelände verteilt. Die zurückzulegende Strecke überwiegt somit als Widerstandsfaktor gegenüber geringen Personendichten. Erst bei hohen Dichten kommt es zu der bereits erwähnten Verdichtung der Positionen in den Bereichen mit einer besonders dichten Menschenansammlung, das heißt erst hier überwiegt die Dichte gegenüber der zurückzulegenden Strecke.

6.1.1.4 Bemessung der notwendigen Standorte mittels Location-Allocation-Analyse

Bei dem letzten Untersuchungsschritt sollte die Frage untersucht werden, ob eine Personalerhöhung aufgrund des widerstandsbehafteten Vorankommens bei großen anwesenden Menschenmengen innerhalb einer Veranstaltungsfläche notwendig ist, um eine vorgegebene Eintreffzeit einhalten zu können. Hierfür wurde mittels Location-Allocation-Analyse die notwendige Anzahl an Rettungstrupps ermittelt, um die jeweiligen Untersuchungsgebiete jeweils bei widerstandsfreier und widerstandsbehafteter Fortbewegung innerhalb einer vorgegebenen Hilfsfrist von 5 Minuten flächendeckend zu erreichen.

Tabelle 23: Zusammenfassung der Ergebnisse der Bemessung der notwendigen Standorte

Szenario	Anzahl bemessener Standorte			
	Fallbeispiel 1	Fallbeispiel 2	Fallbeispiel 3	Fallbeispiel 4
Nach Einsatzplan	11	4	3	8
Widerstandsfreie Fortbewegung	1	1	1	2
Widerstandsbehaftete Fortbewegung	5	1	1	2

Folgende Beobachtungen sind der oben dargestellten Tabelle zu entnehmen:

- In allen Fällen ist die Anzahl der mittels Location-Allocation-Analyse ermittelten notwendigen Standorte für eine flächendeckende und zeitgerechte Erreichbarkeit deutlich geringer als die durch die Einsatzplanung jeweils vorgegebene Menge an Rettungstrupps.
- Bei hohen Dichten (Fallbeispiel 1) ist die Anzahl an vorzuhaltenden Trupps bei widerstandsbehafteter Fortbewegung deutlich größer als bei der widerstandsfreien Fortbewegung. Trotzdem beträgt die ermittelte Anzahl weniger als die Hälfte der laut Einsatzplan vorgesehenen Kräfte.
- Bei geringen Dichten (Fallbeispiele 2-4) gibt es keine Unterschiede zwischen widerstandsbehafteter und widerstandsfreier Planung.

Die aufgeworfene Fragestellung kann somit wie folgt beantwortet werden:

- Bei hohen durchschnittlichen Personendichten wurde eine notwendige Erhöhung der vorzuhaltenden Anzahl an Rettungskräften für eine flächendeckende und zeitgerechte Erreichbarkeit eines Veranstaltungsgeländes gegenüber einer widerstandsfreien Betrachtung nachgewiesen. Die Personendichte hat demnach einen theoretischen Einfluss auf die Anzahl vorzuhaltender Kräfte. Bei gleicher Personenanzahl aber unterschiedlichen Dichten, wie zum Beispiel bei unterschiedlichen Größen der Veranstaltungsfläche, müssten demnach theoretisch weitere Trupps als Kompensation zu den hohen Dichten eingesetzt werden. Es wurde jedoch auch nachgewiesen, dass in allen Fällen die anhand der einsatzplanerischen Gefährdungsbeurteilung der Veranstaltung und der Besucherzahlen bemessene Anzahl an Rettungskräften die theoretisch ermittelte notwendige Anzahl an Kräften für eine zeitgerechte und flächendeckende Erreichbarkeit – abhängig von den Personendichten – deutlich übersteigt. In der Praxis ist eine Erhöhung der Rettungstrupps aufgrund großer Dichten also nicht notwendig, wenn bereits eine Bemessung anhand der Besucherzahlen erfolgt ist.

7 Abschlussdiskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, zu untersuchen, welchen Einfluss, im Sinne eines Widerstandes, eine Menschenmenge auf die Einsatz- und Standortplanung von Rettungskräften bei einer Großveranstaltung haben kann. Anhand von vier realen Fallbeispielen wurde die im Rahmen der Arbeit entwickelte Untersuchungsmethodik praktisch mittels eines geographischen Informationssystems angewendet und die Ergebnisse anschließend ausgewertet und diskutiert. Die in der Einleitung aufgeworfenen Fragestellungen wurden unter Ziffer 6 im Rahmen der Ergebnisdokumentation ausgiebig diskutiert.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Menschenmengen durchaus einen Einfluss auf die Fortbewegung von Rettungskräften haben können. Je höher die Personendichte, umso signifikanter ist dabei der Widerstandseinfluss der Menschenmenge. Die zeitliche und räumliche Abdeckung eines Veranstaltungsgeländes durch Rettungskräfte von vorgegebenen Standorten ist deshalb bei hohen Dichten schlechter als bei geringeren Dichten.

Der Widerstandseffekt ist bei kleinen Personendichten ($\leq 0,6 \text{ P/m}^2$) für die Einsatzplanung jedoch in allen Hinsichten vernachlässigbar gering. Erst bei hohen durchschnittlichen Dichten ($\geq 1,9 \text{ P/m}^2$) innerhalb einer vorgegebenen Fläche sollte die Einsatzplanung die Verteilung der Menschenmengen auf dem Veranstaltungsgelände zwingend mit berücksichtigen.

Anhand der Fallbeispiele konnte leider kein Rückschluss auf die Situation bei mittleren Dichten (zwischen $0,6$ und $1,9 \text{ P/m}^2$) gezogen werden. In Anlehnung an die unter Ziffer 6 zusammengefassten Ergebnisse kann jedoch vermutet werden, dass auch bei mittleren Dichten der Einfluss auf die Standortplanung noch verhältnismäßig gering ist und vernachlässigt werden kann. Dies wird damit begründet, dass bei hohen Dichten der Einfluss der Menschenmenge auf die Erreichbarkeit sowie die Standortplanung der Rettungskräfte zwar als signifikant angesehen werden kann, jedoch trotzdem nicht so groß ist, dass eine gravierende Unterversorgung bestimmter Bereiche aus einsatztaktischer Sicht die Folge sein könnte. Dies sollte jedoch durch eine weitere Untersuchung von Fallbeispielen mit mittleren Dichten bestätigt werden.

7.1 Einsatztaktische Betrachtung

In der Einleitung wurde die Fragestellung aufgeworfen, ob sich aus den Ergebnissen allgemeingültige einsatztaktische Hinweise ableiten lassen können, welche eine Veranstaltungs-Einsatzplanung auch ohne geoinformatische Werkzeuge unterstützen können. Voraussetzung hierfür ist jedoch die Kenntnis über die ungefähre durchschnittliche Personendichte innerhalb des Veranstaltungsgeländes, welche über die Veranstaltungsfläche sowie die erwartete Besucherzahl verlässlich abgeschätzt werden kann. Nachfolgend werden deshalb verschiedene auf den Ergebnissen basierende einsatztaktische Hinweise zusammengefasst:

- Im Rahmen jeder Veranstaltungs-Einsatzplanung sollte die durchschnittliche Personendichte ermittelt werden. Ergänzend hierzu sollten Bereiche mit zu erwartenden sehr hohen Dichten („Hot Spots“) identifiziert werden.
- Standorte von Rettungstrupps sollten möglichst gleichmäßig über das gesamte Veranstaltungsgelände verteilt sein, um unabhängig von der Verteilung der Besucher eine flächendeckende und zeitgerechte Abdeckung des gesamten Geländes sicherstellen zu können.
- Eine dichtebasierte Standortanpassung sollte zwingend vorgenommen werden, wenn eine zu erwartende hohe durchschnittliche Personendichte ($\geq 1,9 \text{ P/m}^2$) für die Veranstaltung vorliegt. In diesem Fall sollten die Rettungstrupps verdichtet in den Bereichen mit besonders hohen zu erwartenden Dichten eingesetzt werden.

- Die Anzahl der vorzuhaltenden Rettungskräfte sollte nach den gängigen Bemessungsstandards erfolgen. Eine Erhöhung der vorzuhaltenden Anzahl an Rettungskräften aufgrund von hohen erwarteten Personendichten ist nicht notwendig unter der Voraussetzung, dass eine gefährdungsbasierte Bemessung anhand der allgemeinen Besucherzahlen durchgeführt wurde.
- Der Einsatz von nicht-fußläufigen Rettungstrupps (zum Beispiel Motorrädern, Rettungswagen oder Fahrrädern) ist nur bei durchschnittlich geringen Personendichten ($< 1 \text{ P/m}^2$) eine eventuell effizienzsteigernde Alternative.

Im Rahmen der Einsatzplanung muss immer berücksichtigt werden, dass der Aufwand verhältnismäßig bleibt. Eine Berücksichtigung und detaillierte Erhebung der Personendichten im Rahmen der Planungsphase wird deshalb bei kleineren erwarteten Dichten als nicht notwendig erachtet. Wie dargestellt lohnt sich der Aufwand erst bei großen zu erwartenden Dichten, da erst hier signifikante Verschlechterungen hinsichtlich der flächendeckenden und zeitgerechten Versorgung die Folge sein können.

In der Realität kommen zusätzlich die unter Ziffer 2.2 dargestellten Widerstandsfaktoren zum Tragen. Deren Einfluss auf die Einsatz- und Standortplanung muss also zusätzlich und unabhängig von den Personendichten berücksichtigt werden.

7.2 Übertragung auf dynamische Verhältnisse

Die vorliegende Untersuchung erfolgte in einem statischen Rahmen, sodass die Ergebnisse auch für diese Situationen als valide angenommen werden können. Die Ergebnisse können also im Rahmen der statischen Einsatzplanung als Orientierungshilfe verlässlich berücksichtigt werden. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei der Bewegung von und in Menschenmengen in der Praxis jedoch meistens um ein dynamisches Phänomen.

Die in der einsatzplanerischen Vorbereitungsphase statisch geplanten Standorte der Rettungstrupps müssen deshalb während einer Veranstaltung gegebenenfalls durch die Einsatzleitung an die dynamischen Verhältnisse angepasst werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn der Einsatzleitung aktuelle Kenntnisse über die Verteilung der Menschenmenge auf dem Veranstaltungsgelände zur Verfügung stehen. Dies ist bei vielen Veranstaltungen jedoch nicht der Fall, sodass die Einsatzleitung oftmals reaktiv oder erfahrungsbasiert entscheidet und handelt. Zur Erfassung dieser dynamischen Verhältnisse müssen somit unter anderem erst auch noch die technischen Voraussetzungen (z.B. Drohne, Live-Kamerabilder, etc.) geschaffen werden.

Zur Kompensation dieser fehlenden technischen Lösungen werden in der Praxis den Einsatzkräften oftmals größere Einsatzgebiete zugewiesen und deren tatsächliche Standortwahl erfolgt nach eigenem Ermessen. Dieses Prinzip der „Streifen laufen“ ermöglicht eine flexible Verschiebung der Rettungskräfte hin zu den Bereichen hoher Dichten, kann bei fehlender Koordinierung jedoch auch zu einer Unterversorgung verschiedener Bereiche führen. Die tatsächliche Positionierung der Trupps sollte also für eine möglichst effiziente Abdeckung und eine Vermeidung von Bereichen mit Unter- und Überversorgungen immer durch die Einsatzleitung unter Orientierung an der statischen Planung erfolgen.

7.3 Simulation und technische Verfeinerung

Die vorgestellte Methode basiert teilweise auf schätzenden oder vereinfachenden Verfahren. Zur weiteren Verbesserung der Ergebnisse kann insbesondere die Erhebung der Personendichten durch technische Hilfsmittel verfeinert werden, wie dies unter Ziffer 4.5.1 beschrieben wurde. Hierdurch können die Ergebnisse weiter validiert und – zum Beispiel für mittlere Dichten – erweitert werden. Das Ziel sollte es sein, genaue Grenzen festzulegen, ab welchen Personendichten welche einsatztaktischen Maßnahmen sinnvoll sind.

Liegen weiterhin valide Kenntnisse über dynamische Verhältnisse der Menschenmenge vor, zum Beispiel durch eine erfolgte Analyse der Personenströme auf dem Veranstaltungsgelände, könnten diese in einer agenten-basierten Simulation mit den statischen Daten kombiniert untersucht werden. Es sollte die Fragestellung untersucht werden, ob die dynamischen Verhältnisse einer Menschenmenge die Einsatzplanung zusätzlich signifikant beeinflussen, oder ob eine statische Betrachtung ausreicht.

IV. Kapitel

Literaturverzeichnis

Anhänge

8 Literaturverzeichnis

- [1] Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in Deutschland. 1998. *Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten*, Bonn.
- [2] Bartelme, N. 2005. *Geoinformatik. Modelle, Strukturen, Funktionen*. Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Bibliographisches Institut GmbH. *Deutscher Duden Online*. www.duden.de.
- [4] Bill, R. 2010. *Grundlagen der Geo-Informationssysteme*. Wichmann, Berlin.
- [5] Bingaith, A. A. 2010. *Implementing GIS for Facilities Management at the California Institute of Technology*. Major Individual Project, University of Redlands.
- [6] Blanco, M. 2016. *Modèle d'isochrones automatisé du mouvement potentiel des personnes portées disparues*. Masterarbeit, Université de Sherbrooke.
- [7] Boltes, M. 2015. *Automatische Erfassung präziser Trajektorien in Personenströmen hoher Dichte*. Zugl.: Köln, Univ., Diss., 2014. Schriften des Forschungszentrums Jülich IAS series 27. Forschungszentrum Jülich Zentralbibl, Jülich.
- [8] Bundesministerium für Arbeit und Soziales. 2008. *Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge*. ArbMedVV.
- [9] De Lange, N. 2013. *Geoinformatik in Theorie und Praxis*. Springer-Verlag, Berlin.
- [10] Doherty, P. J., Quinghua, G., Doke, J., and Ferguson, D. *An analysis of probability of area techniques for missing persons in Yosemite National Park*. In *Applied Geography*, 99–110.
- [11] Drechsel, J. *Standortplanung von Einsatzkräften bei Großereignissen*. In *Operations Research Proceedings 2005*, 29–34.
- [12] ESRI. *Location-Allocation-Analyse*. <http://desktop.arcgis.com/de/arcmap/latest/extensions/network-analyst/location-allocation.htm>. Accessed 12 October 2016.
- [13] ESRI. *Vergleichen von Interpolationsmethoden*. ArcGIS Pro Onlinehilfe. <https://pro.arcgis.com/de/pro-app/tool-reference/3d-analyst/comparing-interpolation-methods.htm>. Accessed 9 October 2016.
- [14] Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz. 2014. *Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten*. MVStättVO.
- [15] Fang, Z., Lo, S. M., and Lu, J. *On the relationship between crowd density and movement velocity*. In *Fire Safety Journal* 38, 271–283.
- [16] Fang, Z., Yuan, J., Wang, Y., and Lo, S. *Survey of pedestrian movement and development of a crowd dynamics model*. In *Fire Safety Journal* 43, 459–465.
- [17] Federal Emergency Management Agency. 2005. *Special Event Contingency Planning*.
- [18] Fradi, H. and Dugelay, J.-L. 2012. *People counting system in crowded scenes based on feature regression*. 20th European Signal Processing Conference. EURECOM, Sophia Antipolis.
- [19] Fradi, H., Zhao, X., and Dugelay, J.-L. *Crowd density analysis using subspace learning on local binary pattern*. EURECOM, Sophia Antipolis.
- [20] *Gesetz betreffend Lage, Beschaffenheit, Einrichtung und Betrieb von Veranstaltungsstätten*. Wiener Veranstaltungsstättengesetz. In *LGBl. Nr. 31/2013*.
- [21] Gouvernement de Luxembourg. 2012. *Règlement grand-ducal du 10 mai 2012 portant nouvelles nomenclature et classification des établissements classés et modifiant le règlement grand-ducal modifié du 14 septembre 2000 concernant les études des risques et les rapports de sécurité; le règlement grand-ducal modifié du 7 mars 2003 concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement*.
- [22] Graser, A. 2016. *Integration Open Spaces into OpenStreetMap Routing Graphs for Realistic Crossing Behaviour in Pedestrian Navigation*. *GI_Forum* DOI: 10.1553/giscience2016_01_s217. Austrian Institute of Technology, Wien.

- [23] Hanno, P. and Maurer, K. 2005. *Gefahrenabwehr bei Großveranstaltungen*. Verlagsgesellschaft Stump + Kossendey mbH, Edewecht.
- [24] Hubert, K. L. 2003. *A Cellular Automaton Model for Crowd Movement and Egress Simulation*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen.
- [25] Inspection du Travail et des Mines et Service d'Incendie et d'Ambulances de la Ville de Luxembourg. 2012. *Salles recevant du public*, ITM-SST 1507.2.
- [26] Inspection du Travail et des Mines et Service d'Incendie et d'Ambulances de la Ville de Luxembourg. 2013. *Concerts en plein air recevant plus de 5000 personnes*, ITM-SST 1560.1.
- [27] Inspection du Travail et des Mines et Service d'Incendie et d'Ambulances de la Ville de Luxembourg. 2014. *Simulation d'évacuation de personnes à l'aide d'une approche performancielle*, ITM-SST 1553.2.
- [28] Jenness, J. 2012. Repeating Shapes.
- [29] Klüpfel, H. L. 2003. *A Cellular Automaton Model for Crowd Movement and Egress Simulation*. Doktorarbeit, Universität Duisburg-Essen.
- [30] Knopp, P. 2010. *Personen- und Fahrzeuggeschwindigkeiten in Menschenmengen bei Sanitätswachdiensten*. Bachelorarbeit, Fachhochschule Köln.
- [31] Knopp, P. and Schmidt, J. 2010. *Der Kölner Algorithmus im Vergleich zum Maurer - Schema. Hinweise zur richtigen Anwendung des Kölner Algorithmus*.
- [32] Landeshauptstadt München - Kreisverwaltungsreferat - Branddirektion. 2011. *Sicherheitsrechtliche Beurteilung und Vorbeugender Brand- und Gefahrenschutz bei Großveranstaltungen. Eine Handreichung für Sicherheitsbehörden, Polizei und Brandschutzstellen*, München.
- [33] Le Bon, G. 2016. *Psychologie der Massen*. Nikol Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, Hamburg.
- [34] Nelson, Harold, E., and Mowrer, F. W. *Emergency movement*. In SFPE handbook of fire protection engineering 2.
- [35] Oberhagemann, D. 2012. *Statische und dynamische Personendichten bei Großveranstaltungen*. Technischer Bericht 13-01, Altenberge.
- [36] Richard, L. C. and Ghazala, S. *Facility Locations with the Manhattan Metric in the Presence of Barriers To Travel*. In Operations Research, 652–669.
- [37] Rogsch, C. *Vergleichende Untersuchung zur dynamischen Simulation von Personenströmen*. Berichte des Forschungszentrums Jülich 4185. Forschungszentrum Jülich, Jülich.
- [38] Schadschneider, A. *The Nagel-Schreckenberg model revisited*. In The European Physical Journal B, 573–582.
- [39] Schmidt, J. 2007. *Kölner Algorithmus zur Planung der medizinischen Gefahrenabwehr bei Großveranstaltungen*.
- [40] Schmiedel, R., Behrendt, H., and Betzler, E. 2012. *Regelwerk zur Bedarfsplanung Rettungsdienst*. Mendel, Witten.
- [41] Shirine Riachi, Walid Karam, and Hanna Greige. 2014. *An Improved Real-Time Method for Counting People in Crowded Scenes Based on a Statistical Approach*. DOI=10.13140/2.1.4853.6966.
- [42] Thompson, A. P. 1994. *Developing new techniques for modelling crowd movement*. PhD Thesis, University of Edinburgh.
- [43] Thompson, P. and Marchant, E. *Computer and fluid modelling of evacuation*. In Safety Science, 277–289.
- [44] Tobler, W. 1993. *Non-isotropic modeling. Three presentations on geographical analysis and modeling*. University of California, Technical report 93-1.
- [45] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen. 2003. *Brandschutzarbeitshilfe - Bauten mit Räumen mit großer Personenbelegung*.
- [46] Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. 2015. *Brandsicherheitswachdienst und Sanitätsdienst bei Veranstaltungen*, MB 13-06.

- [47] Weidmann, U. 1993. *Transporttechnik der Fussgänger*. Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs. IVT, Zürich.
- [48] Wickelmaier, F. *Empirische Untersuchung zur Erfassung von Wissen durch deterministische und probabilistische Wissensstrukturen*. Diplomarbeit, Universität Regensburg.
- [49] Zacherle, C. 2014. *Crowd management. Verhinderung von Massenphänomenen bei Großveranstaltungen*. Diplomica Verlag, Hamburg, Germany.

9 Anhänge

9.1 Datensätze

N°	Name	Beschreibung	Autor	BoundingBox	Format	Stand	Bezugsquelle
Datensatz 1	gis.osm_buildings_a_free_1.shp	Gebäude in Luxemburg als Polygone	Openstreetmap	W: 5.737553 N: 50.183769 O: 6.517192 S: 49.447732	Polygon- Shapefile	03.10.2016	download.geofabrik.de
Datensatz 2	gis.osm_natural_free_1.shp	Naturobjekte	Openstreetmap	W: 5.736472 N: 50.179733 O: 6.518751 S: 49.451291	Punkt- Shapefile	03.10.2016	download.geofabrik.de
Datensatz 3	gis.osm_landus_a_free_1.sshp	Landnutzung	Openstreetmap	W: 5.724714 N: 50.186920 O: 6.531574 S: 49.446460	Polygon- Shapefile	03.10.2016	download.geofabrik.de
Datensatz 4	Luxembourg – Orthoimagery 2013	Orthophoto- Basemap	Esri_BeLux_Content	W: 5.667800 N: 50.204337 O: 6.582166 S: 49.416434	WMS	17.09.2016	arcgis.com

9.2 Erhebung der Personendichten - Aufnahmeorte

9.2.1 Fallbeispiel 1

Foto	Datum	Uhrzeit	Y-Koordinate (vor Korrektur)	X-Koordinate (vor Korrektur)	Ermittelte Dichte
1	22.06.2016	22:06	49.609897	6.132453	3
2	22.06.2016	22:06	49.610028	6.132333	4
3	22.06.2016	22:08	49.610163	6.132314	0
4	22.06.2016	22:08	49.610163	6.132169	0
5	22.06.2016	22:09	49.610608	6.131847	1
6	22.06.2016	22:12	49.610458	6.130411	1
7	22.06.2016	22:13	49.610763	6.130403	2
8	22.06.2016	22:13	49.610778	6.130436	3
9	22.06.2016	22:14	49.610888	6.130997	1
10	22.06.2016	22:15	49.611082	6.131658	0
11	22.06.2016	22:16	49.611308	6.131325	2
12	22.06.2016	22:17	49.611278	6.130836	1
13	22.06.2016	22:17	49.611272	6.130842	1
14	22.06.2016	22:18	49.610900	6.130019	2
15	22.06.2016	22:18	49.610900	6.130020	5
16	22.06.2016	22:20	49.611175	6.130186	5
17	22.06.2016	22:21	49.611237	6.129850	1
18	22.06.2016	22:21	49.611242	6.129828	1
19	22.06.2016	22:21	49.611355	6.129917	3
20	22.06.2016	22:23	49.611858	6.131378	4
21	22.06.2016	22:23	49.611947	6.130989	1
22	22.06.2016	22:23	49.611933	6.130942	2
23	22.06.2016	22:25	49.611917	6.131342	4
24	22.06.2016	22:25	49.611912	6.131336	3
25	22.06.2016	22:25	49.611912	6.131336	2
26	22.06.2016	22:26	49.611862	6.131608	2
27	22.06.2016	22:26	49.611878	6.131545	1
28	22.06.2016	22:27	49.612797	6.131378	0
29	22.06.2016	22:29	49.613930	6.131147	1
30	22.06.2016	22:29	49.613620	6.131545	0
31	22.06.2016	22:32	49.612045	6.133889	0
32	22.06.2016	22:33	49.611633	6.134114	1
33	22.06.2016	22:34	49.611375	6.134053	3
34	22.06.2016	22:34	49.611370	6.134025	2
35	22.06.2016	22:34	49.611370	6.134025	3
36	22.06.2016	22:36	49.611370	6.133311	2
37	22.06.2016	22:36	49.611370	6.133311	3
38	22.06.2016	22:36	49.611370	6.133311	2

39	22.06.2016	22:37	49.611480	6.132611	1
40	22.06.2016	22:37	49.611458	6.132619	1
41	22.06.2016	22:37	49.611462	6.132436	4
42	22.06.2016	22:39	49.611283	6.132611	5
43	22.06.2016	22:40	49.611205	6.132636	3
44	22.06.2016	22:41	49.611000	6.132530	2
45	22.06.2016	22:43	49.610905	6.133503	1
46	22.06.2016	22:44	49.610962	6.134014	1
47	22.06.2016	22:46	49.611258	6.134811	5
48	22.06.2016	22:49	49.612083	6.133803	4
49	22.06.2016	22:49	49.611867	6.134297	0
50	22.06.2016	22:50	49.611875	6.134286	3
51	22.06.2016	22:50	49.611442	6.135105	3
52	22.06.2016	22:52	49.612117	6.133867	2
53	22.06.2016	22:52	49.612117	6.133864	2
54	22.06.2016	22:53	49.612397	6.133661	1
55	22.06.2016	22:54	49.612580	6.133167	1
56	22.06.2016	22:55	49.613412	6.131939	1
57	22.06.2016	22:57	49.613880	6.131111	4

9.2.2 Fallbeispiel 2

Foto	Datum	Uhrzeit	Y-Koordinate (vor Korrektur)	X-Koordinate (vor Korrektur)	Ermittelte Dichte
1	09.07.2016	20:33	49.525292	6.157153	4
2	09.07.2016	20:33	49.525292	6.157153	2
3	09.07.2016	20:33	49.525372	6.157339	1
4	09.07.2016	20:34	49.525672	6.157961	0
5	09.07.2016	20:38	49.525075	6.158125	1
6	09.07.2016	20:38	49.525039	6.158136	1
7	09.07.2016	20:38	49.525014	6.158133	0
8	09.07.2016	20:38	49.524831	6.157786	3
9	09.07.2016	20:29	49.524606	6.157417	2
10	09.07.2016	20:40	49.524575	6.157358	1
11	09.07.2016	20:44	49.524447	6.157258	1
12	09.07.2016	20:44	49.524375	6.156914	1
13	09.07.2016	20:44	49.524311	6.156889	0
14	09.07.2016	20:45	49.524272	6.156136	0
15	09.07.2016	20:45	49.524394	6.155967	0
16	09.07.2016	20:45	49.524461	6.155897	1
17	09.07.2016	20:46	49.524556	6.155711	3
18	09.07.2016	20:46	49.524953	6.155619	2
19	09.07.2016	20:47	49.524894	6.155567	1
20	09.07.2016	20:47	49.524942	6.155939	1
21	09.07.2016	20:47	49.524942	6.155939	1
22	09.07.2016	23:02	49.525035	6.157117	4
23	09.07.2016	23:02	49.525093	6.157299	3
24	09.07.2016	23:02	49.525043	6.157287	4
25	09.07.2016	20:03	49.525388	6.157752	2
26	10.07.2016	20:48	49.524578	6.157122	1
27	11.07.2016	20:48	49.524522	6.157186	2
28	12.07.2016	20:48	49.524522	6.157186	2
29	13.07.2016	20:52	49.524703	6.157433	2
30	14.07.2016	20:53	49.524692	6.157536	0
31	15.07.2016	20:53	49.524808	6.157850	2
32	16.07.2016	20:53	49.524831	6.157922	0
33	17.07.2016	20:54	49.525189	6.158031	1
34	18.07.2016	20:54	49.525189	6.158031	1
35	19.07.2016	20:54	49.525439	6.157794	1
36	20.07.2016	20:55	49.525439	6.157794	1
37	21.07.2016	20:55	49.525280	6.157279	2
38	22.07.2016	20:56	49.525273	6.157123	2

9.2.3 Fallbeispiel 3

Foto	Datum	Uhrzeit	Y-Koordinate (vor Korrektur)	X-Koordinate (vor Korrektur)	Ermittelte Dichte
1	02.07.2016	16:55	49.518439	6.097825	0
2	02.07.2016	17:16	49.516933	6.097506	0
3	02.07.2016	17:16	49.517017	6.097422	0
4	02.07.2016	17:18	49.517703	6.097086	0
5	02.07.2016	17:18	49.517703	6.097086	0
6	02.07.2016	17:18	49.517703	6.097086	0
7	02.07.2016	17:47	49.518425	6.097800	0
8	02.07.2016	17:48	49.518811	6.098361	1
9	02.07.2016	17:49	49.518814	6.098339	0
10	02.07.2016	17:49	49.518558	6.097800	0
11	02.07.2016	14:53	49.517672	6.096967	0
12	02.07.2016	14:56	49.516889	6.097558	1
13	02.07.2016	17:56	49.516892	6.097542	1
14	02.07.2016	17:56	49.516981	6.097511	0
15	02.07.2016	18:21	49.518592	6.097928	0
16	02.07.2016	18:28	49.518181	6.096961	1
17	02.07.2016	18:29	49.517808	6.097036	0
18	02.07.2016	18:29	49.517669	6.097072	0
19	02.07.2016	18:30	49.517517	6.097544	0
20	02.07.2016	18:30	49.517442	6.097703	0
21	02.07.2016	18:31	49.517217	6.097719	0
22	02.07.2016	18:31	49.517161	6.097722	1
23	02.07.2016	19:20	49.518547	6.097858	0
24	02.07.2016	19:21	49.518547	6.097767	2
25	02.07.2016	19:21	49.518467	6.097508	0
26	02.07.2016	19:22	49.518242	6.097206	1
27	02.07.2016	19:22	49.518125	6.096786	1
28	02.07.2016	19:22	49.518125	6.096786	1
29	02.07.2016	19:25	49.518058	6.096806	3
30	02.07.2016	19:25	49.518058	6.096806	3
31	02.07.2016	19:26	49.517864	6.096944	0
32	02.07.2016	19:26	49.517833	6.096942	0
33	02.07.2016	19:26	49.517761	6.097053	0
34	02.07.2016	19:27	49.517758	6.097658	0
35	02.07.2016	19:27	49.517758	6.097658	0
36	02.07.2016	19:27	49.517758	6.097658	0
37	02.07.2016	19:28	49.517486	6.097753	0
38	02.07.2016	19:28	49.517186	6.097603	0
39	02.07.2016	19:29	49.516844	6.097425	0

9.2.4 Fallbeispiel 4

Foto	Datum	Uhrzeit	Y-Koordinate (vor Korrektur)	X-Koordinate (vor Korrektur)	Ermittelte Dichte
1	23.07.2016	20:38	49.613244	6.143014	0
2	23.07.2016	20:40	49.612531	6.142128	1
3	23.07.2016	20:40	49.612500	6.142156	2
4	23.07.2016	20:40	49.612475	6.141844	2
5	23.07.2016	20:42	49.612244	6.142225	3
6	23.07.2016	20:42	49.612103	6.142594	1
7	23.07.2016	20:42	49.612103	6.142594	0
8	23.07.2016	20:43	49.612442	6.143500	1
9	23.07.2016	20:43	49.612433	6.143486	1
10	23.07.2016	20:47	49.611867	6.142489	1
11	23.07.2016	20:48	49.611594	6.141542	0
12	23.07.2016	20:48	49.611575	6.141611	0
13	23.07.2016	20:49	49.611447	6.140861	1
14	23.07.2016	20:51	49.611122	6.140028	0
15	23.07.2016	20:51	49.611122	6.140028	1
16	23.07.2016	21:20	49.610703	6.139311	0
17	23.07.2016	21:20	49.610675	6.139069	0
18	23.07.2016	21:23	49.610572	6.137656	1
19	23.07.2016	21:23	49.610508	6.137719	0
20	23.07.2016	21:25	49.609592	6.136219	1
21	23.07.2016	21:25	49.609517	6.136031	1
22	23.07.2016	21:26	49.609628	6.135836	1
23	23.07.2016	21:29	49.610797	6.137172	2
24	23.07.2016	21:34	49.609314	6.135833	1
25	23.07.2016	21:34	49.609200	6.135906	2
26	23.07.2016	21:34	49.609100	6.135906	0
27	23.07.2016	21:34	49.608925	6.135892	1
28	23.07.2016	21:35	49.608750	6.136053	2
29	23.07.2016	21:36	49.608503	6.136447	2
30	23.07.2016	21:36	49.608506	6.136461	1
31	23.07.2016	21:36	49.608342	6.136942	3
32	23.07.2016	21:37	49.608161	6.137217	3
33	23.07.2016	21:37	49.608169	6.137244	2
34	23.07.2016	21:40	49.608792	6.135936	1
35	23.07.2016	21:40	49.608800	6.135908	1

9.3 Erhebung der Personendichten - Fotos

9.3.1 Fallbeispiel 1

N°	Foto	N°	Foto	N°	Foto
1		2		3	
4		5		6	
7		8		9	
10		11		12	
13		14		15	
16		17		18	
19		20		21	

22		23		24	
25		26		27	
28		29		30	
31		32		33	
34		35		36	
37		38		39	
40		41		42	



9.3.2 Fallbeispiel 2

N°	Foto	N°	Foto	N°	Foto
1		2		3	
4		5		6	
7		8		9	
10		11		12	
13		14		15	
16		17		18	
19		20		21	

22		23		24	
25		26		27	
28		29		30	
31		32		33	
34		35		36	
37		38			

9.3.3 Fallbeispiel 3

N°	Foto	N°	Foto	N°	Foto
1		2		3	
4		5		6	
7		8		9	
10		11		12	
13		14		15	
16		17		18	
19		20		21	

22		23		24	
25		26		27	
28		29		30	
31		32		33	
34		35		36	
37		38			

9.3.4 Fallbeispiel 4

N°	Foto	N°	Foto	N°	Foto
1		2		3	
4		5		6	
7		8		9	
10		11		12	
13		14		15	
16		17		18	
19		20		21	

22		23		24	
25		26		27	
28		29		30	
31		32		33	
34		35			

9.4 Berechnung der Netzwerke

9.4.1 Fallbeispiel 1

Name: Untersuchungs_Wegenetzwerk_ND
Type: Shapefile-Based Network Dataset

Sources:
Edge Sources:
 Untersuchungs_Wegenetzwerk

Turns:
 <Global Turns>

Connectivity:
Group 1:
 Edge Connectivity:
 Untersuchungs_Wegenetzwerk (End Point)

Elevation Model: None

Attributes:

Length:
 Usage Type: Cost
 Data Type: Double
 Units Type: Meters
 Use by Default: True
 Source Attribute Evaluators:
 Untersuchungs_Wegenetzwerk (From-To): Field
 Language: VBScript
 Expression: [Shape]
 Untersuchungs_Wegenetzwerk (To-From): Field
 Language: VBScript
 Expression: [Shape]
 Default Attribute Evaluators:
 Default Edges: Constant = 0
 Default Junctions: Constant = 0
 Default Turns: Constant = 0

seconds_w:
 Usage Type: Cost
 Data Type: Double
 Units Type: Seconds
 Use by Default: False
 Source Attribute Evaluators:
 Untersuchungs_Wegenetzwerk (From-To): Field
 Language: VBScript
 Expression: [seconds_w]
 Untersuchungs_Wegenetzwerk (To-From): Field
 Language: VBScript
 Expression: [seconds_w]
 Default Attribute Evaluators:
 Default Edges: Constant = 0
 Default Junctions: Constant = 0

Default Turns: Constant = 0

seconds_f:

Usage Type: Cost

Data Type: Double

Units Type: Seconds

Use by Default: False

Source Attribute Evaluators:

Untersuchungs_Wegenetzwerk (From-To): Field

Language: VBScript

Expression: [seconds_f]

Untersuchungs_Wegenetzwerk (To-From): Field

Language: VBScript

Expression: [seconds_f]

Default Attribute Evaluators:

Default Edges: Constant = 0

Default Junctions: Constant = 0

Default Turns: Constant = 0

Directions:

Directions Ready: No

-Length Attribute Required

9.4.2 Fallbeispiel 2

Name: Untersuchungs_Wegenetzwerk_ND2

Type: Shapefile-Based Network Dataset

Sources:

Edge Sources:

Untersuchungs_Wegenetzwerk

Turns:

<Global Turns>

Connectivity:

Group 1:

Edge Connectivity:

Untersuchungs_Wegenetzwerk (End Point)

Elevation Model: None

Attributes:

Length:

Usage Type: Cost

Data Type: Double

Units Type: Meters

Use by Default: True

Source Attribute Evaluators:

Untersuchungs_Wegenetzwerk (From-To): Field

Language: VBScript

Expression: [Shape]

Untersuchungs_Wegenetzwerk (To-From): Field

Language: VBScript

Expression: [Shape]

Default Attribute Evaluators:

Default Edges: Constant = 0

Default Junctions: Constant = 0

Default Turns: Constant = 0

seconds_w:

Usage Type: Cost

Data Type: Double

Units Type: Seconds

Use by Default: False

Source Attribute Evaluators:

Untersuchungs_Wegenetzwerk (From-To): Field

Language: VBScript

Expression: [seconds_w]

Untersuchungs_Wegenetzwerk (To-From): Field

Language: VBScript

Expression: [seconds_w]

Default Attribute Evaluators:

Default Edges: Constant = 0

Default Junctions: Constant = 0

Default Turns: Constant = 0

seconds_f:

Usage Type: Cost

Data Type: Double

Units Type: Seconds

Use by Default: False

Source Attribute Evaluators:

Untersuchungs_Wegenetzwerk (From-To): Field

Language: VBScript

Expression: [seconds_f]

Untersuchungs_Wegenetzwerk (To-From): Field

Language: VBScript

Expression: [seconds_f]

Default Attribute Evaluators:

Default Edges: Constant = 0

Default Junctions: Constant = 0

Default Turns: Constant = 0

Directions:

Directions Ready: No

-Length Attribute Required

9.4.3 Fallbeispiel 3

Name: Untersuchungs_Wegenetzwerk_ND

Type: Shapefile-Based Network Dataset

Sources:

Edge Sources:

Untersuchungs_Wegenetzwerk

Turns:

<Global Turns>

Connectivity:

Group 1:

Edge Connectivity:

Untersuchungs_Wegenetzwerk (End Point)

Elevation Model: None

Attributes:

Length:

Usage Type: Cost

Data Type: Double

Units Type: Meters

Use by Default: True

Source Attribute Evaluators:

Untersuchungs_Wegenetzwerk (From-To): Field

Language: VBScript

Expression: [Shape]

Untersuchungs_Wegenetzwerk (To-From): Field

Language: VBScript

Expression: [Shape]

Default Attribute Evaluators:

Default Edges: Constant = 0

Default Junctions: Constant = 0

Default Turns: Constant = 0

seconds_f:

Usage Type: Cost

Data Type: Double

Units Type: Seconds

Use by Default: False

Source Attribute Evaluators:

Untersuchungs_Wegenetzwerk (From-To): Field

Language: VBScript

Expression: [seconds_f]

Untersuchungs_Wegenetzwerk (To-From): Field

Language: VBScript

Expression: [seconds_f]

Default Attribute Evaluators:

Default Edges: Constant = 0

Default Junctions: Constant = 0

Default Turns: Constant = 0

seconds_w:

Usage Type: Cost

Data Type: Double

Units Type: Seconds

Use by Default: False

Source Attribute Evaluators:

Untersuchungs_Wegenetzwerk (From-To): Field

Language: VBScript

Expression: [seconds_w]

Untersuchungs_Wegenetzwerk (To-From): Field

Language: VBScript

Expression: [seconds_w]

Default Attribute Evaluators:

Default Edges: Constant = 0

Default Junctions: Constant = 0

Default Turns: Constant = 0

Directions:

Directions Ready: No

-Length Attribute Required

9.4.4 Fallbeispiel 4

Name: Untersuchungs_Wegenetzwerk_ND

Type: Shapefile-Based Network Dataset

Sources:

Edge Sources:

Untersuchungs_Wegenetzwerk

Turns:

<Global Turns>

Connectivity:

Group 1:

Edge Connectivity:

Untersuchungs_Wegenetzwerk (End Point)

Elevation Model: None

Attributes:

Length:

Usage Type: Cost

Data Type: Double

Units Type: Meters

Use by Default: True

Source Attribute Evaluators:

Untersuchungs_Wegenetzwerk (From-To): Field

Language: VBScript

Expression: [Shape]

Untersuchungs_Wegenetzwerk (To-From): Field

Language: VBScript

Expression: [Shape]

Default Attribute Evaluators:

Default Edges: Constant = 0

Default Junctions: Constant = 0

Default Turns: Constant = 0

seconds_w:

Usage Type: Cost

Data Type: Double

Units Type: Seconds

Use by Default: False

Source Attribute Evaluators:

Untersuchungs_Wegenetzwerk (From-To): Field

Language: VBScript

Expression: [seconds_w]

Untersuchungs_Wegenetzwerk (To-From): Field

Language: VBScript

Expression: [seconds_w]

Default Attribute Evaluators:

Default Edges: Constant = 0

Default Junctions: Constant = 0

Default Turns: Constant = 0

seconds_f:
Usage Type: Cost
Data Type: Double
Units Type: Seconds
Use by Default: False
Source Attribute Evaluators:
 Untersuchungs_Wegenetzwerk (From-To): Field
 Language: VBScript
 Expression: [seconds_f]
 Untersuchungs_Wegenetzwerk (To-From): Field
 Language: VBScript
 Expression: [seconds_f]
Default Attribute Evaluators:
 Default Edges: Constant = 0
 Default Junctions: Constant = 0
 Default Turns: Constant = 0

Directions:
 Directions Ready: No
 -Length Attribute Required