

**Welchen Effekt haben unterschiedliche Alarmmethoden auf den
Ausgang von Evakuierungen? Agentenbasierte Modellierung
eines hochwassergefährdeten Gebiets in Kandersteg**

Masterarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Bern

vorgelegt von

Michèle Grindat

2023

Leiter der Arbeit

Prof. Dr. Andreas Paul Zischg

Geographisches Institut der Universität Bern

Forschungsgruppe Geomorphologie, Naturgefahren- und Risikoforschung

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle für die breite Unterstützung, die ich während meines Arbeitsprozesses erhalten habe, bedanken. Ein herzliches Dankeschön geht an meinen Betreuer Dr. Andreas Zischg. Er hat mir ermöglicht, dass ich in die Welt des agentenbasierten Modellierens eintauchen konnte, von der ich vor dem Beginn meiner Arbeit noch nicht einmal wusste, dass sie existiert. Wenn ich vor Herausforderungen stand, konnte er mich mit wertvollen Denkanstößen unterstützen die mir halfen, diese Herausforderungen zu meistern. Ein besonderer Dank gilt auch meinen Kommiliton:innen am Geographischen Institut, die mich sowohl durch fachliche Anregungen als auch durch unterhaltsame Kaffeepausen unterstützt haben. Zu guter Letzt danke ich Ladina Binkert und Brigitte Grütter Grindat für das Gegenlesen der Arbeit.

Zusammenfassung

Der „Spitze Stei“ ist eine Felsformation auf dem Gemeindegebiet Kanderstegs, dessen instabile Flanke seit 2018 erhöhte Aktivität aufweist (Graf & Riner 2019). Bei einem Totalabsturz der aktiven Felsmasse könnte diese das Abflusssystem des darunter liegenden Oeschinensees versperren. Infolgedessen würde sich der See während rund eines Jahres auffüllen und könnte aufgrund einer durch einen weiteren kleinen Felssturz verursachten Flutwelle ausbrechen. Von der daraus resultierenden Überschwemmung wären grosse Teile des Dorfkerns von Kandersteg betroffen (Zimmermann & Hunziker 2020). Um Todesfälle zu vermeiden, müsste die Bevölkerung vorgängig evakuiert werden.

Die vorliegende Arbeit hat es zum Ziel die Auswirkungen von drei Alarmmethoden (Sirenen, Notfallkoordinatoren und Mundpropaganda) auf die Anzahl der toten und isolierten Personen während der Evakuierung Kanderstegs zu untersuchen. Zudem soll der Einfluss der Vorlaufzeit und der Evakuierungsbereitschaft der Personen auf die Todesfälle und Isolationen untersucht werden. Für die Simulation der Evakuierung wurde der methodische Ansatz des agentenbasierten Modellierens gewählt. Das Evakuierungsmodell wurde in der Multi-Agenten-Programmiersprache NetLogo entwickelt. Als Untersuchungsperimeter wurde ein 1 km² grosses Gebiet in der Dorfmitte Kanderstegs definiert. Die Fliesstiefen der Flutwelle wurden separat in der numerischen Simulationssoftware BASEMENT berechnet und anschliessend im Modell integriert. Durch die Fliesstiefen konnten die Isolations- und Todesfälle definiert werden. Dies sind die Outputvariablen des Modells. Die untersuchten Inputvariablen sind: Anzahl Alarmrepetitionen und prozentualer Anteil erreichter Personen während des Sirenenalarms, Anzahl Notfallkoordinatoren, prozentualer Anteil an Mundpropagandaverbreiter:innen, Vorlaufzeit sowie die Bereitschaft der Personen nach dem ersten resp. zweiten Alarm zu evakuieren. Anhand einer Sensitivitätsanalyse wurde der Zusammenhang zwischen den Inputvariablen und den Outputvariablen des agentenbasierten Modells untersucht.

Es besteht ein negativer Zusammenhang zwischen der Anzahl der durch Sirenen erreichten Personen und der Anzahl der toten und isolierten Personen. Ebenfalls einen negativen Zusammenhang weist die Anzahl der Sirenenalarmrepetitionen mit den Modelloutputs auf. Ein negativer Zusammenhang konnte auch bei der Anzahl an Notfallkoordinatoren und der Anzahl an toten und isolierten Personen gefunden werden. Nur einen leichten negativen Zusammenhang weist der prozentuale Anteil der Mundpropagandaverbreiter:innen mit den beiden Outputvariablen auf. Es ist eine Vorlaufzeit von mindestens 60 Minuten nötig, um im Modell keine toten oder isolierten Evakuierenden zu generieren. Die Evakuierungsbereitschaft weist ebenfalls einen negativen Zusammenhang mit den Outputvariablen auf. Dieser ist für den ersten Alarm stärker ausgeprägt als für den zweiten.

Zusammenfassend führt eine hohe Alarmrepetition, eine kombinierte Alarmierung durch mehrere Methoden, genügend Vorlaufzeit sowie eine hohe Evakuierungsbereitschaft zu einer möglichst geringen Anzahl an toten oder isolierten Personen während der Evakuierung des Untersuchungsperimeters in Kandersteg.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	vii
1 Einleitung	8
1.1 Grundlagen	8
1.1.1 Integrales Risikomanagement	8
1.2 Forschungsstand	11
1.2.1 Agentenbasierte Modellierung (ABM)	11
1.2.2 NetLogo	12
1.2.3 Anwendungsbereiche von ABM im Hochwasserrisikomanagement	13
1.2.4 Agentenbasiertes Modellieren in der Schweiz	16
1.3 Betrachtungsperimeter	16
1.4 Problemstellung	18
1.5 Zielsetzung	19
1.6 Forschungsfragen	20
2 Daten	21
2.1 Fliesstiefen-Raster	21
2.2 SwissTLM3D Strassennetz	21
2.3 Gebäude- und Wohnungsregister und SwissTLM3D Gebäude	21
3 Methoden	22
3.1 Agentenbasierte Modellierung	22
3.2 Modellaufbau	23
3.2.1 Untersuchungsperimeter	23
3.2.2 Modellüberblick	24
3.2.3 Überflutungssimulation	25
3.2.4 Agenten	27
3.2.5 Setup-Befehle: Aufstellen des Modells	29
3.2.6 Go-Befehle: Ablauf eines Zeitschrittes	31
3.2.7 Verifizierung	34
3.3 Sensitivitätsanalyse	35
3.3.1 Szenariendefinition	36
3.3.2 Outputvariablen	38
3.3.3 Regressionsanalyse der Resultate	38
4 Resultate	40
4.1 Alarmmethoden	40
4.1.1 Sirenen	40

4.1.2	Koordinatoren	44
4.1.3	Mundpropaganda	46
4.1.4	Vergleich der Alarmszenarien	48
4.2	Vorlaufzeit	49
4.3	Evakuierungsbereitschaft	52
5	Diskussion	54
5.1	Interpretation der Resultate	54
5.1.1	Sirenen	54
5.1.2	Koordinatoren	54
5.1.3	Mundpropaganda	55
5.1.4	Vergleich der Alarmszenarien	56
5.1.5	Vorlaufzeit	56
5.1.6	Evakuierungsbereitschaft	57
5.2	Kritik	57
5.2.1	Einschränkungen der untersuchten Szenarios in Kandersteg	57
5.2.2	Einschränkungen des Modellaufbaus	58
5.2.3	Einschränkungen des Standardszenarios	60
6	Schlussfolgerung	62
6.1	Beantwortung der Forschungsfragen	62
6.2	Ausblick	64
	Quellenverzeichnis	66
	Anhang	73

Abbildungsverzeichnis

1	Kreislauf des Integralen Risikomanagements	9
2	Die unterschiedlichen Evakuierungsarten	11
3	Übersichtskarte des Betrachtungsperimeters	17
5	Graphisches Interface des Modells nach dem Setup.	30
6	Graphisches Interface des Modells während eines Modelldurchlaufs.	30
7	Visualisierung der Prozesse eines Zeitschrittes im Modell	32
8	Einfluss des prozentualen Anteils erreichter Evakuierender auf die Anzahl der toten Evakuierenden für verschiedene Alarmrepetitionen. Alarmszenario: Sirenen. 41	
9	Einfluss des prozentualen Anteils erreichter Evakuierender auf die Anzahl der toten Evakuierenden für verschiedene Alarmrepetitionen. Alarmszenario: Sirenen. 41	
10	Einfluss des prozentualen Anteils erreichter Evakuierender auf die Anzahl der toten Evakuierenden für verschiedene Alarmrepetitionen. Alarmszenario: Sirenen + Mundpropaganda.	43
11	Einfluss des prozentualen Anteils erreichter Evakuierender auf die Anzahl der isolierten Evakuierenden für verschiedene Alarmrepetitionen. Alarmszenario: Sirenen + Mundpropaganda.	43
12	Einfluss der Anzahl Koordinatoren auf die Anzahl toter Evakuierender.	45
13	Einfluss der Anzahl Koordinatoren auf die Anzahl isolierter Evakuierender	45
14	Einfluss des prozentualen Anteils an Mundpropagandaverbreiter:innen auf die Anzahl der toten Evakuierenden.	47
15	Einfluss des prozentualen Anteils an Mundpropagandaverbreiter:innen auf die Anzahl der isolierten Evakuierenden.	47
16	Anzahl tote und isolierte Evakuierende für die unterschiedlichen Alarmszenarien. 48	
17	Einfluss der Vorlaufzeit auf die Anzahl der toten Evakuierenden.	50
18	Einfluss der Vorlaufzeit auf die Anzahl der isolierten Evakuierenden.	50
19	Einfluss des prozentualen Anteils der Evakuierenden, die nach dem ersten Alarm evakuieren auf die Anzahl der toten Evakuierenden	53
20	Einfluss des prozentualen Anteils der Evakuierenden, die nach dem zweiten Alarm evakuieren auf die Anzahl der toten Evakuierenden	53

Tabellenverzeichnis

1	Charakteristika der modellierten Flutwelle.	26
2	Angaben für den Hydrographen der modellierten Flutwelle.	26
3	Eigenschaften der Evakuierenden.	28
4	Durch Parameter Sweeping getestete Variablen.	35
5	Werte der Modellvariablen im Standardszenario.	36
6	Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen dem Anteil erreichter Evakuierender und den Outputvariablen.	42
7	Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen der Anzahl Warnwiederholungen und den Outputvariablen.	42
8	Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen der Anzahl Koordinatoren und der Anzahl toten Evakuierenden.	44
9	Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen der Anzahl Koordinatoren und der Anzahl isolierten Evakuierenden.	44
10	Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen dem prozentualen Anteil an Mundpropagandaverbreiter:innen und den Outputvariablen.	46
11	Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen der Vorlaufzeit und der Anzahl toten Evakuierenden.	51
12	Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen der Vorlaufzeit und der Anzahl isolierten Evakuierenden.	51
13	Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen der Anzahl Evakuierenden nach dem 1. Alarm und nach dem 2. Alarm und der Anzahl toter Evakuierender.	52

1 Einleitung

1.1 Grundlagen

1.1.1 Integrales Risikomanagement

In der Schweiz erfolgt der Schutz vor Naturgefahren, beispielsweise vor Hochwasser, durch integrales Risikomanagement (IRM). Risikomanagement wird definiert als „koordinierte Aktivitäten zur Lenkung und Kontrolle einer Organisation im Hinblick auf Risiken“ (Internationale Organisation für Standardisierung 2018, S. 3). Ziel des Risikomanagements in der Schweiz ist es, die Risiken für die Bevölkerung möglichst tief zu halten. Damit von einem integralen Risikomanagement gesprochen werden kann, müssen vier Voraussetzungen erfüllt sein (Bundesamt für Bevölkerungsschutz 2022):

- Integrale Gefährdungsanalyse: Betrachtung sämtlicher relevanten Risiken in einem Gebiet
- Integrale Bewertung und Beurteilung von Gefährdungen: Indikatoren entsprechen ökologischen, ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeitskriterien
- Integrale Massnahmenplanung: in Betracht ziehen der Massnahmen aus der ganzen Bandbreite von Vorbeugung, Bewältigung und Regeneration
- Integrale Partizipation: Einbezug aller relevanten Verantwortungsträger:innen, Fachpersonen und Betroffenen

Die Massnahmen, welche bei der integralen Massnahmenplanung in Betracht gezogen werden sollen, können als Kreislauf dargestellt werden (Abbildung 1). Im Folgenden werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Massnahmen im Kontext des Hochwasserschutzes näher betrachtet.

Systeme für Warnung und Alarmierung

Ein Frühwarnsystem ist eine Kombination von verschiedenen Systemen zur Überwachung von Naturgefahren. Damit soll ein sinnvoller Umgang mit diesen ermöglicht werden. Ein wirksames Frühwarnsystem besteht aus vier Komponenten (United Nations Office for Disaster Risk Reduction 2014) :

1. Kenntnis des Katastrophenrisikos durch die systematische Datenerfassung und Risikobewertung
2. Erkennung, Überwachung, Analyse und Vorhersage von Gefahren und möglichen Folgen
3. Verbreitung von spezifischen und umsetzbaren Warnungen und damit verbundenen Informationen über Wahrscheinlichkeit und Auswirkungen der Gefahr durch eine offizielle Quelle
4. Bereitschaft auf allen Ebenen, auf die eingegangenen Warnungen zu reagieren



Abbildung 1: Kreislauf des Integralen Risikomanagements (Bundesamt für Bevölkerungsschutz 2022).

Frühwarnsysteme können in zwei Kategorien aufgeteilt werden: Warnsysteme und Alarmsysteme. Erstere erkennen die Vorläufer des eigentlichen Ereignisses selbst und ermöglichen, nach der Warnung entsprechende Massnahmen zu planen und einzuleiten. Alarmsysteme erkennen dagegen das Ereignis selbst. Sie sind in der Lage, direkt Massnahmen auszulösen, beispielsweise das automatische Sperren von Strassen oder eine Alarmierung der Bevölkerung (Sättele et al. 2012). Des Weiteren gilt es zwischen der Vorlaufzeit von Hochwasservorhersagen und der Vorlaufzeit für Hochwasserwarnungen zu unterscheiden. Ersteres beschreibt die Zeit zwischen dem Erstellen der Hochwasservorhersage und dem Eintreten des Ereignisses vor Ort. Die Vorlaufzeit für Hochwasserwarnungen beschreibt hingegen die Zeitspanne zwischen dem Erhalt der Warnung und dem Eintreten des Ereignisses vor Ort (Parker 2017). Dementsprechend ist die Vorlaufzeit für Hochwasservorhersagen immer länger als jene für Hochwasserwarnungen.

Alarmierung und Verhaltensanweisungen

Kommt es zu einem Ereignis, müssen die betroffenen Personen informiert und ihnen entsprechende Verhaltensanweisungen mitgegeben werden. Warnungen werden in Bezug auf Hochwasser definiert als „Information in Form einer Vorhersage einer Flut, welche wahrscheinlich eintreffen wird“ (Parker 2017, S. 1). Die Warnungen gehen dabei vor allem an Personen, welche sich innerhalb des Gefährdungsperrimeters aufhalten. Ausserdem werden Warnungen an Betriebe weitergeleitet, die wichtige Infrastrukturen (z.B. die Stromversorgung) betreuen. Zudem werden Rettungskräfte gewarnt, um beispielsweise anschliessend Personen aus dem gefährdeten Gebiet zu evakuieren (Parker 2017).

Des Weiteren wird in der Schweiz zwischen „Warnung“ und „Alarm“ unterschieden. Ein Alarm wird erst herausgegeben, wenn es sich um eine lebensbedrohliche Situation handelt (Bundesamt für Bevölkerungsschutz 2015). Hochwasserwarnungen (und Warnungen vor Naturgefahren und Katastrophen im Allgemeinen) und Alarme können über die selben Kanäle verbreitet werden. Bei Hochwasser wird das Alarmierungszeichen „Allgemeiner Alarm“ verwendet. Das Alarmierungszeichen „Wasseralarm“ wird nur verwendet, um Zonen unterhalb einer Stauanlage bezüglich eines Totalbruchs zu alarmieren. In der Schweiz verbreiten hauptsächlich stationäre, teils auch mobile Sirenen Warnungen und Alarme. Zudem herrscht eine Verbreitungspflicht für Schweizer Radio- und Fernsehsender, welche die Warnungen bzw. Alarme der Behörden ausstrahlen müssen (Bundesamt für Bevölkerungsschutz 2015). Eine weitere Option ist die Verbreitung von Information über die App „Alertswiss“. Der Vorteil hierbei ist, dass die Personen nicht nur alarmiert werden können, sondern zusätzlich relevante Informationen zu dem Ereignis erhalten (Bundesamt für Bevölkerungsschutz 2017). Ausserdem können Notfallkoordinatoren, welche bei der Evakuierung vor Ort helfen (beispielsweise die Polizei und die Feuerwehr), eingesetzt werden um Informationen weiterzugeben. Dadurch kann die Warnung oder Alarmierung persönlich an die sich im betroffenen Gebiet aufhaltenden Personen weitergegeben werden. Weiter können zusätzliche Anweisungen mitgegeben werden, beispielsweise zur optimalen Evakuierungsrouten (Wang et al. 2021). Neben den hier erwähnten direkten Warn- und Alarmsystemen, gibt es auch ein sogenanntes indirektes Warn- bzw. Alarmsystem. Darunter wird das Weitergeben eines Alarms oder einer Warnung per Mundpropaganda verstanden. Das heisst, dass die Informationen welche eine Person erhält, mündlich an eine andere Person weitergegeben wird. Die Alarmierung erfolgt also durch die betroffenen Personen selbst und nicht durch die Autoritäten (O’Shea et al. 2020).

Rettung/ Evakuierung

Während des Einsatzes aufgrund einer akuten Naturgefahr ist zudem nötig sicherzustellen, dass sich die anwesenden Personen aus der Gefahrenzone begeben. Im Falle von Hochwassern geschieht dies häufig durch eine Evakuierung der betroffenen Personen. Es werden drei Arten von Evakuierungen unterschieden, welche sich in ihrer zeitlichen Relation zum Schadenseintritt unterscheiden (Abbildung 2). Eine vorsorgliche Evakuierung wird bereits durchgeführt, be-



Abbildung 2: Die unterschiedlichen Evakuierungsarten (Bundesamt für Bevölkerungsschutz 2011).

vor das Ereignis eintritt. Normalerweise kommt es dabei lediglich zu einem kurzfristigen Ortswechsel. Jedoch kann in gewissen Fällen eine vorsorgliche Evakuierung zu einer regulären Evakuierung werden. Die Notevakuierung beginnt kurz vor dem Schadenseintritt und dauert auch noch eine gewisse Zeit während des Ereignisses an. Personen werden dabei unverzüglich aus dem akut gefährdeten Gebiet evakuiert, z.B. wenn sich dieses unter einer Stauanlage befindet. Unter einer Evakuierung wird dagegen die Verlegung von Personen von einem gefährdeten in ein weniger gefährdetes Gebiet über einen längeren Zeitraum hinweg verstanden (Bundesamt für Bevölkerungsschutz 2011).

Bei der Evakuierungsplanung muss miteinbezogen werden, wie viele Personen auf persönliche Transportmittel zurückgreifen können und wie viele öffentliche Transportmittel in Anspruch nehmen müssen. Dabei begeben sich im Durchschnitt 66 % der Bevölkerung selbständig aus dem Evakuierungsgebiet heraus, der Rest ist auf öffentliche Verkehrsmittel angewiesen (Bundesamt für Bevölkerungsschutz 2011). Laut Expertenbefragungen durch Kowald et al. (2012) werden bei geringer Evakuierungsdistanz das eigene Auto sowie das Evakuieren zu Fuss bevorzugt. Zudem muss der dafür verantwortliche Führungsstab vorangehend die Evakuierungsrouten und die Aufnahmestellen definieren. In den Aufnahmestellen müssen die evakuierten Personen erfasst werden können und erste medizinische Versorgung erhalten. Zum Schluss muss sichergestellt werden, dass die Rückführung der Bevölkerung in das zuvor verlassene Gebiet reibungslos abläuft. Da dies ebenfalls ein komplexer Prozess sein kann, wird dieser meist separat geplant und koordiniert (Bundesamt für Bevölkerungsschutz 2011).

1.2 Forschungsstand

1.2.1 Agentenbasierte Modellierung (ABM)

Agentenbasiertes Modellieren (ABM) ist eine Methode zur Modellierung von realen Systemen, bei denen die individuellen Unterschiede zwischen den Systemeinheiten von Bedeutung sind. Die sogenannten Agenten in diesen Modellen können Einheiten auf unterschiedlichen Skalen darstellen, von Atomen bis hin zu ganzen Institutionen. Die Agenten können sowohl miteinander als auch mit ihrer Umwelt während eines jeden Zeitschrittes interagieren. Dadurch wird ihnen ermöglicht, ihre Umgebung zu verändern. Ein Beispiel hierfür sind Landnutzungsmodelle, bei welchen die Agenten den Nutzungstyp einer Zelle von Wald zu Ackerland ändern können, indem sie den Wald abholzen und als Acker verwenden. Umgekehrt können die Agenten auch durch ihre Umwelt verändert werden, beispielsweise indem eine kontaminierte Zelle einen Agenten in einem virologischen Modell infiziert. Auch Wechselwirkungen sind möglich,

beispielsweise wenn ein Agent das verfügbare Essen einer Zelle verzehrt, dadurch sein eigenes Energielevel steigt und gleichzeitig das Ernährungspotential der Zelle verringert wird (Malanson & Walsh 2015). Dies unterscheidet die agentenbasierte Modellierung von der gleichungsbasierten Modellierung, bei der Individuen als eine einzelne Einheit oder durch mehrere Einheiten, jedoch nur anhand von Durchschnittswerten dargestellt werden können (van Dyke Parunak et al. 1998). Auf die Vorteile der agentenbasierten Modellierung wird in Kapitel 3.1 ausführlich eingegangen.

Die agentenbasierte Modellierung hat ihren Ursprung im Konzept der zellulären Automaten (CA). Das Konzept begann mit der Von-Neumann-Maschine, einer theoretischen selbstreproduzierenden Maschine, die in den 1950er-Jahren konstruiert wurde (Langton 1984). Der Unterschied zwischen zellulären Automaten und agentenbasierten Modellen besteht darin, dass die Agenten in CA unbeweglich sind, während sich Agenten in einem ABM frei bewegen können. Dies ermöglicht die Modellierung komplexerer Phänomene (Wilensky & Rand 2015). Eines der ersten richtigen agentenbasierten Modelle war das Segregationsmodell von Thomas Schelling aus dem Jahr 1971. Es zeigt, wie sich Agenten, welche in einer Nachbarschaft mit gemischter ethnischer Herkunft leben, automatisch voneinander abgrenzen. Dies geschieht selbst dann, wenn es nur eine geringe Präferenz dafür gibt, neben einem Agenten mit gleicher ethnischer Herkunft zu leben. Dadurch konnte er anhand eines Modells mit nur wenigen Verhaltensregeln einen in der realen Welt beobachtbaren Effekt reproduzieren (Schelling 1971).

Es gibt verschiedene Softwares, welche speziell zur agentenbasierten Modellierung konzipiert wurden. Diese unterscheiden sich unter anderem in der verwendeten Programmiersprache, dem Aufwand für die Modellentwicklung und den Anwendungsbereichen. Demensprechend wird je nach Vorwissen und Forschungsinteresse der Nutzenden eine andere Software gewählt. Die am häufigsten verwendeten Softwares sind NetLogo, MASON, Repast, Java Swarm und Objective-C Swarm. Im Rahmen dieser Arbeit wird im Detail auf die Software NetLogo eingegangen (Kapitel 1.2.2). Eine ausführlicher Vergleich der state-of-art Softwares für agentenbasiertes Modellieren findet sich in Abar et al. (2017).

1.2.2 NetLogo

Die Entwicklung der ABM-Software NetLogo begann 1999 durch Uri Wilensky und die erste Betaversion wurde im Jahr 2000 veröffentlicht (Thiele et al. 2011). Die aktuellste Version der Software ist die Version 6.3.0 vom 29. September 2022. Die Software kann kostenlos von der Webseite des Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling der Northwestern University (USA) heruntergeladen werden, welche auch für den Unterhalt der Software zuständig ist (Northwestern University 2022b).

Die Grundeinheit in NetLogo sind die Agenten. Es gibt vier vordefinierte Arten von Agenten: Den *Observer*, *Patches*, *Turtles* und *Links*. Der *Observer* stellt globale Variablen bereit und verwaltet diese. Zudem hat er Zugriff auf die anderen Agenten. *Patches* sind immobile Agenten. Sie haben einen festen Standort innerhalb des virtuellen Raumes,

welcher mit x- und y- Koordinaten angegeben wird. Alle *Patches* zusammen bilden das Raster der NetLogo Welt (der Bereich, in dem sich die Simulation abspielt) und definieren dadurch die Ausdehnung dieser. Sie haben bereits implementierte, vordefinierte Variablen, wie beispielsweise eine Identifikationsnummer und einen Farbcode. Ihnen können aber auch selbst definierte Variablen hinzugefügt werden (z.B. der Nutzungstyp oder das Ernährungspotential). *Turtles* sind im Gegensatz zu den *Patches* mobile Agenten. Sie können sich auf der durch die *Patches* definierten Welt bewegen. Auch sie haben vordefinierte Variablen, welche durch eigene ergänzt werden können. Zudem ist es möglich, verschiedene Arten von *Turtles* zu deklarieren, sogenannte *Breeds*. Diese erben alle Variablen der *Turtles*, können aber zusätzlich eigene Variablen haben, welche nicht alle *Turtles* übernehmen. Der letzte Typ sind die *Links*, welche Verbindungen zwischen zwei *Turtles* darstellen. Sämtliche Agententypen können miteinander kommunizieren und interagieren (Thiele et al. 2011).

1.2.3 Anwendungsbereiche von ABM im Hochwasserrisikomanagement

Agentenbasierte Modelle werden heute zur Beantwortung von diversen Fragestellungen in den Sozial-, Politik-, Wirtschafts- und Naturwissenschaften eingesetzt. Sie können Phänomene in den folgenden Bereichen modellieren (Bonabeau 2002):

1. Flows: Evakuierung, Verkehrs- und Kundenflussmanagement
2. Märkte: Börse, Shopbots, Software-Agenten und strategische Simulationen
3. Organisationen: Betriebsrisiko und Organisationsdesign
4. Diffusion: Diffusion von Innovation und Adoptionsdynamik

Abläufe wie Evakuierungen können auf verschiedenen Massstabsebenen simuliert werden, von der Evakuierung von Agenten in einem Raum (z. B. während eines Konzerts) bis hin zur Evakuierung ganzer Städte oder Regionen. Als Simulationen in diesem kleinen Massstab durchführbar wurden, ergab sich die Möglichkeit, agentenbasierte Modelle auch im Hochwasserrisikomanagement anzuwenden. Die Verwendung von ABM in diesem Bereich gilt jedoch noch als junges Phänomen. Zhuo & Han (2020) überprüften die Literatur zu agentenbasierten Modellen und Hochwasserrisikomanagement. Zwischen 2005 und 2019 stieg die Zahl der Arbeiten zu diesem Thema von 1 auf 16 pro Jahr. Ein starker Anstieg war insbesondere zwischen 2016 und 2017 zu verzeichnen. Die meisten Arbeiten untersuchten Studiengebiete im Vereinigten Königreich und in den USA. Dabei wurden keine Studien gefunden, deren Untersuchungsgebiet in der Schweiz lag (oder diese entsprachen nicht den Suchkriterien der Autoren). Zhuo & Han (2020) gruppieren die Verwendung agentenbasierter Modelle im Hochwasserrisikomanagement in drei Anwendungsbereiche: hydrologische Modellierung, Echtzeit Hochwasserfallmanagement und langfristige Hochwasseranpassungsplanung. Die wenigsten untersuchten Studien verwendeten ABM für die hydrologische Modellierung. Ein Beispiel für diesen Anwendungsbereich findet sich in Reaney (2008). Das agentenbasierte Modell wurde genutzt,

um den räumlichen und zeitlichen Ursprung des Abflusses zu verfolgen, der während eines Sturmereignisses in semi-ariden Gebieten in einen Kanal eintritt. Die Agenten stellen dabei das Wasser dar, das sich durch die Landschaft bewegt und von der sie Informationen abrufen können. Sie können entscheiden, wohin sie sich bewegen möchten, mit den Optionen in der aktuellen Zelle zu bleiben, im Boden zu versickern oder in die benachbarte Zelle zu fließen. Das agentenbasierte Modell kann daher zum Prozessverständnis beitragen, wie Strömung während eines Sturmereignisses erzeugt und übertragen wird.

Agentenbasierte Modelle, die im Echtzeit Hochwassernotfallmanagement verwendet werden, können die Bewegung von Menschen während eines Hochwasserereignisses simulieren. Die Forschungsinteressen reichen von der Untersuchung der Hochwasserexposition und Vulnerabilitätsbewertung (Dawson et al. 2011; Dai et al. 2020) bis hin zum Testen der Wirksamkeit von Hochwasserwarnsystemen (Du et al. 2017). Agentenbasierte Modelle, die für die langfristige Hochwasseranpassung verwendet werden, sind ähnlich konstruiert wie diejenigen, die für die Echtzeit Hochwassernotfallplanung eingesetzt werden. Sie haben aber zusätzlich die Möglichkeit, langfristige sozioökonomische Faktoren einzubeziehen, die das Hochwasserrisiko beeinflussen. Ein Beispiel dafür sind die Einflüsse verschiedener Institutionen, wie beispielsweise die Hochwasserrichtlinie der Europäischen Union (Abebe et al. 2019). Daher simulieren diese Modelle oft einen längeren Zeitraum als Modelle, die für das Echtzeit Notfallmanagement verwendet werden.

Da die vorliegende Arbeit im Echtzeit Notfallmanagement angesiedelt ist, wird im Folgenden der Forschungsstand auf diesem Gebiet weiter ausgeführt. Wie erwähnt, hat die Popularität der agentenbasierten Modellierung für die Hochwasserrisikoanalyse erst vor kurzem zugenommen und ist immer noch ein relativ junges Forschungsgebiet. Daher gibt es nur eine begrenzte Anzahl von Studien, die sich diesem Thema widmen. Die Größenordnung, in der die Phänomene beobachtet werden, sowie deren Forschungsschwerpunkte variieren von Studie zu Studie. Mordvintsev et al. (2014) koppelten ein Hochwassermodell mit einem Fluchtmodell für Fussgängergruppen in St. Petersburg (Russland), um die Auswirkungen von Kreuzungen und Planungsstrategien auf Fussgängerwege zu reproduzieren. Eine Studie, welche ebenfalls auf der städtischen Ebene angelegt ist, wird in Medina et al. (2016) erläutert. Hier wurde eine Literaturrecherche mit Feldarbeit und Expertenwissen kombiniert, um verschiedene Evakuierungsstrategien zu testen. Bei Shirvani et al. (2020) wurde das ABM verwendet, um verschiedene Hochwasser-Fussgänger-Interaktionen zu simulieren. Sie untersuchten ein Szenario, in dem die Agenten aus einem überfluteten Einkaufszentrum evakuiert werden müssen. Wang et al. (2020) kreierte ein agentenbasiertes Modell auf der Gemeinschaftsebene, welches hauptsächlich auf die Eigenschaften der Agenten selbst fokussierte. Ziel war es, herauszufinden, wie Eigenschaften einer Gemeinschaft (z. B. der Prozentsatz gefährdeter Bewohner:innen) und psychologische Eigenschaften (z. B. die Risikotoleranzschwelle) und das Verhalten, sich gegenseitig bei der Evakuierung zu helfen, den Evakuierungsprozess beeinflussen. Ein ähnlicher Ansatz wurde in Bernardini et al. (2017) gewählt. Es wurde festgestellt, dass viele Modelle den Einfluss auf

das menschliche Verhalten bei Evakuierungen unterschätzen. Daher lag der Schwerpunkt dieser Studie darauf, den menschlichen Faktor auf der Grundlage einer Videanalyse vergangener Evakuierungen besser einzubeziehen. Das ABM wurde auf städtischer Ebene umgesetzt. Oh et al. (2021) verwendeten ein agentenbasiertes Modell, um ein städtisches Hochwasserevakuierungsszenario zu erstellen. Ziel war es, die Wechselwirkung zwischen Evakuierungseffizienz und Fairness (d.h. die Gleichverteilung der Betroffenheit durch das Hochwasser) zu untersuchen.

Es gibt auch Studien, die die Qualitäten von agentenbasierten Modellen für die Hochwasserevakuierung mit anderen Modellierungsansätzen vergleichen. Liu (2018) untersuchte in ihrer Arbeit agentenbasiertes Modellieren, den *Spatial Analysis Approach* sowie den *Traffic Assignment Approach*. Dabei wurde die Anwendung der verschiedenen Modelle auf die Vorhersage des Überschwemmungsausmaßes, die Schätzung von Netzwerkengpässen, das Verhalten der Evakuierenden und die Nachfrage nach Unterkünften getestet. Diese Modelle wurden im Stadtmasstab für Brisbane (Australien) implementiert.

Folglich sind die Studieninteressen in Bezug auf agentenbasierte Modellierung und Hochwasserevakuierung sehr vielfältig. Ein aufstrebendes Gebiet ist dabei die Erprobung von Warn- und Alarmsystemen von Hochwasserereignissen. Das Hauptziel besteht darin, die Unterschiede in den Evakuierungsergebnissen (z. B. Verlust von Menschenleben oder Sachschäden) darzustellen, wenn Warn- und Alarmmethoden verwendet werden oder nicht. Du et al. (2017) untersuchten die Vorteile, die eine genauere Hochwasservorhersage mit längeren Vorlaufzeiten für eine Evakuierung hat. Sie kamen zum Schluss, dass das Sammeln von Informationen über menschliches Verhalten und Wohneigenschaften für die Evakuierung von Vorteil sein können. Dadurch können den einzelnen Agenten individuelle Prognosen bereitgestellt werden, z.B. wann der optimale Evakuierungszeitpunkt für sie erreicht ist. Zudem wird auch die Rolle beschrieben, welche die sozialen Medien für die Evakuierung spielen könnten, da sie Echtzeitinformationen über die Hochwassersituation liefern können. Yang et al. (2018) bewerteten die Faktoren, die die Verluste in einem Haushalt während einer Überschwemmung im Einzugsgebiet des Ng Thung-Flusses lenken, wie beispielsweise Immobilienwerte, Warninformationen und Sturmbedingungen. Es wurde festgestellt, dass ein Hochwasserwarnsystem in der Art und Weise, wie sie es in ihrem Modell implementiert haben, 30-44 % der Hochwasserschäden reduziert. O'Shea et al. (2020) testeten, ob Agenten während einer Evakuierung in Carlisle (Grossbritannien) besser auf direkte oder indirekte Hochwasserwarnungen reagieren. Ausserdem untersuchten sie den Einfluss der ortsspezifischen Stadtopographie und -morphologie auf die optimale Evakuierungsstrategie. Sie kamen zum Schluss, dass eine indirekte Hochwasserwarnung durch andere Agenten effektiver sei als eine direkte Anweisung der Behörden. Auch kam es aufgrund der standortspezifischen Topographie häufiger zu Staus, wenn die Agenten bereits vor dem Ausbruch des Hochwassers wussten, dass sie in einer solchen Situation evakuiert werden müssen.

1.2.4 Agentenbasiertes Modellieren in der Schweiz

Agentenbasierte Modelle werden in der Schweiz vor allem in drei Bereichen eingesetzt: Verkehr, Landnutzung und Landwirtschaft sowie im Energiesektor. Verkehrsbezogene ABM werden verwendet, um grossräumige öffentliche Verkehrsnetze zu entwerfen (Manser et al. 2020) oder um die Reisenachfrage über alle Mobilitätsoptionen hinweg zu simulieren (Scherr et al. 2020). Die Anwendungsgebiete der Modelle zur Landnutzungs- und Landwirtschaftssimulation sind vielfältig. Sie reichen von der Nachverfolgung von Landnutzungsänderungen (Baum et al. 2020; Lauber 2006) bis hin zur Überprüfung von Verteilungsschemata von Stickstoff (Schmidt et al. 2021). Die Arbeit von Burg et al. (2021) liegt an der Schnittstelle zwischen landwirtschaftlichen und energiebezogenen Forschungsfragen. Sie untersuchten die Bereitschaft der Landwirt:innen, private oder kollektive Biogasanlagen zu bauen, und/oder ob sie bereit waren, Dung an eine dieser Anlagen zu liefern. Weitere Beispiele für energiebezogene Forschungsinteressen sind die Modellierung des Wärmebedarfs einer mittelgrossen Stadt in der Schweiz (Pagani et al. 2020) und die Untersuchung, welche politischen Massnahmen in Gebäuden ergriffen werden müssen, um die Ziele für Treibhausgasemissionen zu erreichen (Nägeli et al. 2020).

Der Einsatz von agentenbasierten Modellen zur Simulation von Evakuierungen ist dagegen noch selten. Ein Beispiel für deren Verwendung ist die Simulation einer Evakuierung nach einem Unfall im Kernkraftwerk Gösgen (Axhausen et al. 2013). Die Autoren nutzten das Open-Source-Forschungsprojekt MATSim (Multi-Agent Transport Simulation), ein Softwarepaket zur Simulation von Multi-Agenten-basierten Verkehrssystemen. Diese Software wird von der ETH Zürich, der TU Berlin und der senzoo AG laufend weiterentwickelt. Sie ist in der Lage, Evakuierungen sowohl von Fussgängern als auch von Autos zu simulieren (Axhausen et al. 2013). Lämmel et al. (2008) verwendeten die gleiche Software, um eine gross angelegte Fussgängersimulation für das hypothetische Szenario eines Dammbrochs der Sihlsee-Staumauer bei Zürich zu modellieren. Zudem wurden agentenbasierte Modelle dazu verwendet, um Brandschutzkonzepte zu testen, wie beispielsweise die Machbarkeitsstudie eines Future Circular Collider am CERN (Ronchi et al. 2019).

1.3 Betrachtungssperimeter

Kandersteg ist eine politische Gemeinde im Berner Oberland die im Einzugsgebiet der Kander liegt. Das Gemeindegebiet umfasst eine Fläche von 134.31 km² (Bundesamt für Statistik 2020a), wovon jedoch aufgrund der alpinen Lage nur rund 30 % genutzt werden können. Die Einwohnerzahl beträgt knapp 1'300 (Bundesamt für Statistik 2020b). Die wichtigsten Gewässer Kanderstegs sind die Kander, der Oeschinensee sowie der Öschibach. Der Oeschinensee ist ein auf 1'578 m liegender Bergsee, welcher durch mehrere Bergrutsche entstanden ist. Der Öschibach fliesst zuerst unterirdisch vom See ab, fliesst dann oberirdisch in das Dorf Kandersteg hinein und mündet in die Aare (Abbildung 3).

Das Gebiet vom „Spitze Stei“ liegt südwestlich des Oeschinensees auf dem Gemeindegebiet von Kandersteg. Es handelt sich um eine Felsformation, deren instabile Flanke seit 2018 eine

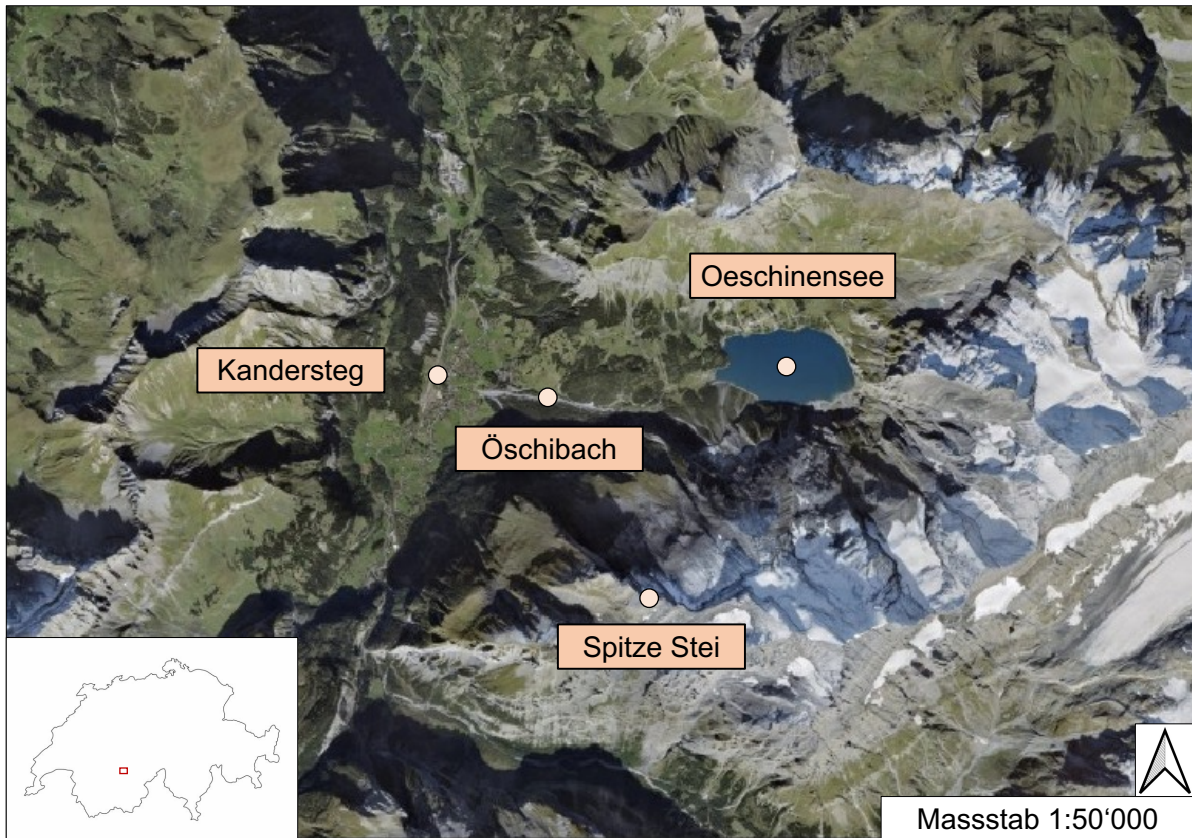


Abbildung 3: Übersichtskarte des Betrachtungsperimeters. Orthofoto: swisstopo (2019b).

stark erhöhte Aktivität aufweist. 2019 kam es zu einem Felsabsturz, bei welchem sich ein Block mit einem Volumen von $15'000 \text{ m}^3$ aus der Gipfelzone löste (Graf & Riner 2019). Auf einer Fläche von 0.5 km^2 sind Rutschprozesse mit einem Volumen von 20 Mio. m^3 im Gange. Dies ist eine saisonale Entwicklung, bei der im Frühling durch das Auftauen des Schnees Wasser in den Untergrund gelangt, wodurch die Rutschung beschleunigt wird. Zudem wird angenommen, dass das Auftauen des Permafrostes eine massgebliche Rolle bei der Entwicklung der Rutschung spielt (Kienholz 2021). Seit 2018 wird am „Spitze Stei“ ein ausführliches Monitoring der Rutschung durch Warn- und Alarmsysteme betrieben (Graf & Riner 2019).

Im Zuge des Gefahrenmanagements wurde zudem ein geologisches Prozessmodell erarbeitet, welches die Modellierung verschiedener Abbruchszenarien (= Primärprozess) sowie der daraus entstehenden Sekundär- und Tertiärprozessen ermöglicht. Für den Abbruch wurden 8 Szenarien definiert. Diese reichen von Teilabstürzen von Fels und Schuttmaterial mit Abbruchvolumen von $200'000 \text{ m}^3$ (Szenario 1 und 2) bis zum Totalabsturz mit 20 Mio. m^3 (Riner & Kienholz 2021). Als einer der Folgeprozesse der Bergsturzereignisse mit mehr als 3 Mio. m^3 Volumen, können Veränderungen des Terrains im Bereich des Dammes des Oeschinensees resultieren. Bei einer Ablagerung des Materials von mehreren Metern Mächtigkeit können die bestehenden unterirdischen Abflusssysteme zum Öschibach zerstört werden. Zudem würde durch das feinkörnige Material der Ablagerungen fast keine Entwässerung stattfinden können, sodass das Seewasser aufgestaut würde. Der Seespiegel würde sich während einiger Monate

durch den Eintrag von Regenwasser erhöhen. Bei einer Ablagerung nach dem Totalabsturz von 20 Mio. m³, wird von einer See-Stauhöhe von +34 m ausgegangen. Dies führt zu einer berechneten Füllzeit von rund einem Jahr. Gäbe es nun einen Felssturz oder eine Lawine am östlichen Ufer des Oeschinensees, könnte dies zu einem Überschwappen des aufgestauten Wassers führen. Dadurch würde es zu einem Bruch des Dammes und einer unverzüglichen Entleerung des Sees kommen. Fast das gesamte Dorfgebiet Kanderstegs wäre in diesem Szenario von der Flutwelle, welche mehrere Meter Höhe aufweisen könnte, betroffen. Das Wasser könnte über die Kander in den Thunersee abfließen und zu einem Seespiegelanstieg von über einem halben Meter innerhalb eines Tages führen (Zimmermann & Hunziker 2020).

Auf der Basis der bisherigen Erkenntnisse wurde zudem ein Sicherheitskonzept für die Gemeinde Kandersteg erstellt. Dieses behandelt die Gefahrenbeurteilung, den Betrieb und Unterhalt des Monitorings sowie die Kommunikation unter den verschiedenen Zuständigkeitsbereichen. Für die Ereignisbewältigung und Massnahmenkoordination ist der „Kernstab Spitze Stei“ zuständig. Dazu gehören neben der Gemeindeverwaltung auch die wichtigsten Akteure im Ernstfall, beispielsweise die Feuerwehr und die Schwellenkooperation (Riner & Kienholz 2021). Das Notfallkonzept für die Gemeinde Kandersteg sieht vor, dass die Anwohner:innen bei Evakuierungsbedarf persönlich durch eine Schreiberin, einen Telefonanruf oder einen Kurier informiert werden. Weiter kann über den Sirenenalarm und die damit verbundene Weitergabe von Informationen über das Radio alarmiert werden. Die Evakuierungsanordnung erfolgt durch den Gemeinderat (Gemeinde Kandersteg 2019).

1.4 Problemstellung

Die Untersuchung des Effekts von Alarm- und Warnsystemen während einer Evakuierung mit agentenbasierten Modellen ist ein aufstrebendes Gebiet im Hochwasserrisikomanagement. Wie in Kapitel 1.2.3 ersichtlich, wurden bisher teilweise widersprüchliche Ergebnisse erzielt. Es ist beispielsweise noch nicht eindeutig, ob Alarmlösungen die Evakuierung erleichtern oder bei falscher Anwendung sogar die Evakuierungseffizienz verringern. Zudem gibt es nur sehr wenige Studien, welche den Effekt der Kombination von unterschiedlichen Alarmmethoden untersucht haben.

Ausserdem wird ersichtlich, dass die meisten agentenbasierten Modelle, die in der Hochwasserevakuierung eingesetzt werden, auf städtischer Ebene angelegt wurden. Agentenbasierte Modelle fehlen, welche die Auswirkungen von unterschiedlichen Alarmmethoden im ländlichen Raum untersuchen. Dies ist von Relevanz, da ländliche Gebiete weniger dicht besiedelt sind. Dadurch könnten sich die Informationen über die Evakuierung anders ausbreiten als in Städten. Zudem ist hier das Verkehrssystem weniger dicht ausgebaut, was zu einem anderen Evakuierungsmuster führen könnte.

Als Untersuchungsgebiet eignet sich deshalb die Gemeinde Kandersteg, welche eine geringe Bevölkerungsdichte aufweist und dadurch repräsentativ für den ländlichen Raum ist. Zudem stellen der „Spitze Stei“ und der damit verbundenen möglichen Sekundärprozesse ein ernstzunehm-

mendes Risiko dar. Im Zuge des integrativen Risikomanagements sollen die Anwohner:innen Kanderstegs vor möglichen Folgen geschützt werden. Kandersteg verfügt zwar über ein Monitoring um die Prozesse am Fels zu beobachten, für allfällige Veränderungen des Oeschinensees und des Öschibachs sind jedoch noch keine Warn- oder Alarmsysteme eingerichtet. Da davon ausgegangen wird, dass der Seeausbruch plötzlich (analog eines Staudammbruches) eintritt (Zimmermann & Hunziker 2020), ist es wichtig, dass die Alarmierung der Personen möglichst schnell erfolgen kann. Um eine möglichst effiziente Evakuierung zu ermöglichen, muss daher die Wirkung verschiedener Alarmmethoden getestet werden. Da es sich beim Überflutungserignis des Oeschinensees jedoch um einen Präzedenzfall handelt, können keine Informationen aus vergangenen Ereignissen herangezogen werden. Deshalb soll auf die Methode der agentenbasierten Modellierung zurückgegriffen werden, um sowohl die Flutwelle, als auch die dadurch notwendige Evakuierung zu modellieren.

1.5 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Auswirkungen von verschiedenen Verhaltensweisen, Alarmmethoden und deren Vorlaufzeit auf die Evakuierung in ländlichen Gebieten anhand des Beispiels der Oeschinensee-Flutwelle zu untersuchen. Dazu wird ein hydrologisches agentenbasiertes Modell in NetLogo entwickelt, um die Überflutung, die verschiedenen Alarmmethoden und die Reaktionen der Agenten darauf zu simulieren. Es werden drei Arten von Kommunikationskanälen implementiert: Sirenen und Koordinatoren als direkte Alarmmethoden sowie Mundpropaganda als indirekte Warnmethode. Zudem soll untersucht werden, welchen Einfluss der prozentuale Anteil der evakuierungsbereiten Agenten und die Vorlaufzeit der Alarmierung auf den Ausgang der Evakuierung hat.

Des Weiteren soll das Modell mit einem übersichtlichen Interface gestaltet werden. Dadurch können Variablen einfach und direkt im Interface geändert werden, ohne dass Änderungen im zugrundeliegenden Code vorgenommen werden müssen. Dies ermöglicht eine einfache Wiederverwendung und Anpassung des Modells durch andere Nutzer:innen.

1.6 Forschungsfragen

Basierend auf der vorausgehenden Problemstellung sowie der Zielsetzung wurden folgende Forschungsfragen ausgearbeitet:

1. Wie wirkt sich der Einsatz von drei unterschiedlichen Alarmmethoden (Sirenen, Koordinatoren, Mundpropaganda) auf die Anzahl der toten oder isolierten Evakuierenden in einem ausgewählten Gebiet in Kandersteg aus?
 - 1.1 Wie wirkt sich die Anzahl der Alarmrepetitionen und der prozentuale Anteil der alarmierten Evakuierenden auf die Anzahl toter oder isolierter Evakuierender aus?
 - 1.2 Wie wirkt sich die Anzahl an Koordinatoren im Untersuchungsperimeter auf die Anzahl der toten oder isolierten Evakuierenden aus?
 - 1.3 Wie wirkt sich der prozentuale Anteil an Evakuierenden, welche den Alarm per Mundpropaganda verbreiten auf die Anzahl der toten oder isolierten Evakuierenden aus?
2. Welchen Einfluss hat die Vorlaufzeit auf die Anzahl der toten oder isolierten Evakuierenden in einem ausgewählten Gebiet in Kandersteg?
3. Welchen Einfluss hat die Evakuierungsbereitschaft auf die Anzahl der toten oder isolierten Evakuierenden in einem ausgewählten Gebiet in Kandersteg?

Da durch agentenbasierte Modelle emergente Phänomene modelliert werden, deren Ausgang oftmals nur schwer vorhersagbar ist (Bonabeau 2002), wird auf das Aufstellen von Hypothesen verzichtet.

2 Daten

2.1 Fliesstiefen-Raster

Die in der Arbeit verwendeten Fliesstiefen-Raster werden durch ein hydrologisches Modell generiert, welches in der numerischen Simulationssoftware BASEMENT angefertigt wird. Eine genauere Erläuterung des Entstehungsprozesses folgt in Kapitel 3.2.3. Sie enthalten die Fliesstiefen für die einzelnen Rasterzellen für jeweils einen Zeitschritt. Insgesamt werden 6 Fliesstiefen-Raster verwendet, um das Durchfliessen der Flutwele durch den Untersuchungsperimeter in Kandersteg zu simulieren. Diese repräsentieren den Zustand der Überflutung mit jeweils 10 Minuten Abstand zwischen den generierten Rastern. Damit entspricht ein generiertes Raster jeweils der Überflutungsausdehnung während eines Zeitschritts im agentenbasierten Modell. Die Überflutung von Kandersteg dauert zwar länger als 60 Minuten, jedoch wird nach dieser Zeit der Spitzenabfluss in Kandersteg erreicht sein (Zimmermann & Hunziker 2020) und die Fliesstiefen beginnen wieder zu sinken. Sie sind deshalb für die Modellierung nicht mehr relevant und werden im agentenbasierten Modell nicht miteinbezogen. Die Überflutungsraster stehen im ASCII-Format mit einer Zellgrösse von 2.44 m x 2.44 m zur Verfügung, was der Zellgrösse bzw. Patchgrösse des ABM entspricht.

2.2 SwissTLM3D Strassennetz

Um die Strassen im Untersuchungsperimeter zu repräsentieren, die als Evakuierungsrouten für Autos und Fussgänger:innen dienen, wird das Strassennetz des SwissTLM3D verwendet. Der Datensatz wird durch das Bundesamt für Landestopographie (swisstopo) zur Verfügung gestellt (swisstopo 2021). Die ursprünglich als ESRI Shapefile vorliegende Datei wurde in das ASCII-Rasterformat mit Zellgrösse 2.44 x 2.44 m umgewandelt. Zudem wird eine Transformation ins globale Koordinatenbezugssystem WGS84 vorgenommen, da die Schweizer Koordinatenbezugssysteme nicht von NetLogo unterstützt werden.

2.3 Gebäude- und Wohnungsregister und SwissTLM3D Gebäude

Um die Gebäude im Untersuchungsperimeter zu repräsentieren und gleichzeitig Informationen über die im Gebäude wohnenden Personen zu nutzen, wird ein kombinierter Datensatz aus dem eidgenössischen Gebäude- und Wohnungsregister (Stand 2018) sowie den Gebäuden des swissTLM3D (Stand 2019) verwendet. Dieser wird durch das Mobiliar Lab für Naturrisiken bereitgestellt. Der Datensatz wird als ESRI Shapefile im Koordinatenbezugssystem WGS84 verwendet.

3 Methoden

3.1 Agentenbasierte Modellierung

Um die Forschungsfragen hinreichend beantworten zu können, wird ein agentenbasiertes Modell in NetLogo entwickelt. Laut Malanson und Walsh (2015) sind agentenbasierte Modelle im Allgemeinen ein passendes Werkzeug, um Forschungsfragen in der Geographie zu beantworten. Sie sind von hohem Nutzen, wenn individuelle Verhaltensweisen zu kollektiven Resultaten führen (Zhuo & Han 2020). Dies gilt für die hier untersuchten Evakuierungsszenarien, da das Verhalten der Agenten eine wichtige Rolle für den Ausgang der Evakuierung spielt (O'Shea et al. 2020). Zudem sind sie sinnvoll um Modellinteraktionen zwischen Agenten ohne starre Position zu simulieren (Bonabeau 2002), was bei der Modellierung einer Evakuierung essentiell ist.

Ein Vorteil von agentenbasierten Modellen ist, dass die Heterogenität von Individuen abgebildet werden kann. Das ermöglicht den Agenten, Attribute mit verschiedener Ausprägung zu besitzen, wie die hier untersuchte Evakuierungsbereitschaft. Agentenbasierte Modelle werden auch verwendet, um emergente Phänomene zu simulieren. Das bedeutet, dass sie Phänomene reproduzieren können, welche erst durch die Interaktion einzelner Teile zustande kommen, bei einer separaten Betrachtung der einzelnen Teile hingegen nicht auftreten würden (Medina et al. 2021). Darüber hinaus gibt es mehrere Beispiele in denen ABM erfolgreich eingesetzt wurden, um den Einfluss von Frühwarnsystemen auf die Hochwasserevakuierung zu modellieren (Du et al. 2017; Yang et al. 2018; O'Shea et al. 2020).

Das agentenbasierte Modell wird in der Software NetLogo implementiert. Die Software wurde ausgewählt, weil sie aufgrund ihrer relativ einfachen Programmiersprache für Einsteiger:innen im agentenbasierten Modellieren geeignet ist. Dadurch können durch einfache Programmieranweisungen komplexe Phänomene dargestellt werden (Wilensky & Rand 2015). Ein weiterer Vorteil ist, dass NetLogo über eine integrierte graphische Benutzeroberfläche verfügt, welche es erlaubt, den programmierten Code direkt visuell darzustellen. Ausserdem wurden bereits mehrere ABM in NetLogo entwickelt, welche Hochwasserevakuierungen modellieren (O'Shea et al. 2020; Dawson et al. 2011; Yang et al. 2018). Daraus lässt sich schliessen, dass NetLogo für die Entwicklung eines Modells um den vorliegenden Forschungsgegenstand zu untersuchen angemessen ist.

Als methodische Alternative käme beispielsweise der systemdynamische Modellierungsansatz infrage, welcher der vorherrschende Ansatz im Hochwasserrisikomanagement ist (Barendrecht et al. 2017). Diese Modelle haben bereits dazu beigetragen, fundierte Erkenntnisse über Evakuierungsprozesse zu gewinnen. So kamen Simonovic und Ahmad (2005) zur Erkenntnis, dass der Zeitpunkt der Evakuierungsanweisung die wichtigste Variable ist, welche das menschliche Verhalten während einer Überschwemmung in einem bestimmten Untersuchungsgebiet beeinflusst. Der Nachteil liegt darin, dass die Heterogenität menschlicher Gesellschaften nicht in das

Systemdynamikmodell einbezogen werden kann (Di Baldassarre et al. 2013), da es an angemessener Repräsentation des Individuums mangelt.

Eine einfachere Methode zum Modellieren von Evakuierungen ist die Verwendung des Network Analyst Tools in ArcGIS. Dieses Tool ist in der Lage, die Bewegung von Fahrzeugen zu analysieren und den kürzesten Weg von einem Punkt zum anderen innerhalb eines Netzwerks zu berechnen. Ein Beispiel wurde in Watik und Jaelani (2019) bereitgestellt, in dem die besten Hochwasserevakuierungsrouten durch die Anwendung der Network Analyst-Erweiterung auf Landsat 8-Bilder ermittelt wurden. Diese Methode ist aber nur geeignet, wenn alle Agenten das gleiche Verhalten zeigen bzw. ihr individuelles Verhalten für die Forschungsfrage nicht relevant ist, da eine Zuordnung unterschiedlicher Verhaltensweisen nicht möglich ist. Da die vorliegende Arbeit die Phänomene untersucht, die entstehen, wenn Agenten heterogenes Verhalten aufweisen, kann das Network Analyst Tool nicht alle gewünschten Aspekte abdecken und ist dadurch nicht zur Beantwortung der Forschungsfragen geeignet.

Eine weitere Option ist der *Traffic Assignment Approach*. Dieser simuliert, wie Reisenachfragen und Transportnetzwerke innerhalb von Transportsystemen interagieren. Die Kosten und Fahrzeugströme jedes Elements des Netzes werden berechnet, abhängig von Nachfrageströmen, Benutzern, Pfadwahlverhalten und Linkkosten (Maio et al. 2012). Zunächst scheint dies eine gleichwertige Methode zur Beantwortung der Forschungsfragen zu sein, da den Evakuierenden auch unterschiedliche Verhaltensweisen zugeordnet werden können. Des Weiteren können auch Alarmsysteme implementiert werden. Jedoch kann nur eine Evakuierung entlang von Verkehrswegen modelliert werden. Da das Untersuchungsgebiet aufgrund seiner ruralen Lage nur über ein begrenztes Strassennetz verfügt und aufgrund des kleinen Untersuchungsperimeters die Evakuierung hauptsächlich zu Fuss stattfindet, wäre die Evakuierungssimulation nicht adäquat genug.

3.2 Modellaufbau

Bevor das Modell in NetLogo erstellt werden kann, muss zuerst ein konzeptuelles Modell erarbeitet werden. Es hält fest, was der Untersuchungsgegenstand des Modells ist, welche Charakteristiken jedes Modellelement aufweist und definiert die Reihenfolge der Prozessabläufe. Auf Basis des konzeptuellen Modells wird dann das tatsächliche Modell in NetLogo programmiert. In Anhang A befindet sich der Link zum GitHub Repository mit dem kompletten Modellcode. Das konzeptuelle Modell dient zudem der Verifizierung des tatsächlichen Modells (Kapitel 3.2.7). In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Aspekte des konzeptuellen Modells beschrieben.

3.2.1 Untersuchungssperimeter

Das Modell beschränkt sich auf die Untersuchung der Auswirkungen der Flutwelle und die damit einhergehende Evakuierung in einem 1 km x 1 km grossen Gebiet innerhalb von Kandersteg (Abbildung 4). Das Gebiet befindet sich etwa in Dorfmitte und umfasst 425 Gebäudeeinheiten.



Abbildung 4: Der Untersuchungsperimeter des Modells. Orthofoto: swisstopo(2019b)

Dieser Untersuchungsperimeter wird ausgewählt, weil der Öschibach mitten durch fliesst und aufgrund dessen schon früh die Auswirkungen der Flutwelle bemerkbar werden. Zudem befindet sich das Feuerwehrmagazin innerhalb dieses Perimeters, welches als Ausgangspunkt für die Koordinatoren dient. Die Grösse von 1 km² wird gewählt, um ein hoch aufgelöstes Modell mit einer Patchgrösse von 2.44 m x 2.44 m simulieren zu können. Bei einem grösseren Perimeter müsste eine niedrigere Auflösung gewählt werden, um nicht an die Grenzen der Rechenkapazität von NetLogo zu stossen. Die hohe räumlich Auflösung ist für diese Arbeit jedoch relevant, um die Interaktion zwischen den Agenten korrekt darstellen zu können.

3.2.2 Modellüberblick

Das in dieser Arbeit verwendete Modell wird in NetLogo Version 6.2.2 (Veröffentlichungsdatum Dezember 2021) entwickelt. Es wird mit dem Ziel erstellt, eine virtuelle Population von Agenten

zu kreieren, welche die virtuelle Version des Untersuchungsperimeters in Kandersteg bevölkern. Innerhalb dieser virtuellen Welt wird eine Notevakuierung simuliert. Als Szenario wird eine Evakuierung am späteren Abend ausgesucht. Deshalb wird davon ausgegangen, dass 80 % der sich im Perimeter befindenden Agenten im Perimeter selbst wohnhaft sind und 20 % ausserhalb des Perimeters wohnen. Die Notevakuierung wird durch drei verschiedene Alarmmethoden (Sirenen, Koordinatoren, Mundpropaganda) ausgelöst. Die Vorlaufzeit des Alarms ist abhängig vom betrachteten Szenario (Kapitel 3.3.1). In der vorliegenden Arbeit wird unter Vorlaufzeit die Zeit zwischen dem Erhalt des Alarms und dem Eintreten des Ereignisses vor Ort verstanden. Die Agenten entscheiden danach, abhängig von ihrer zu Beginn definierten Evakuierungsbereitschaft, ob sie evakuieren möchten oder nicht. Als Evakuierungspunkte gelten alle Patches, welche den äussersten Rand der NetLogo Welt, also des Untersuchungsperimeters, bilden. Dabei wählen die Agenten aus, ob sie zu Fuss evakuieren oder das eigene Auto verwenden. Diese zwei Verkehrsmittel werden verwendet, da sie laut Expertenbefragungen bei kurzstreckigen Evakuierungen bevorzugt werden (Kowald et al. 2012). Die Evakuierung eines Agenten gilt dann als gelungen, wenn er einen der Evakuierungspunkte erreicht, bevor ihn die Flut tödlich trifft. Die Simulation wird beendet, sobald alle Koordinatoren und Evakuierenden einen Evakuierungspunkt erreicht haben oder, falls es zur Isolation von Personen kommt, nach 120 Minuten Laufzeit (was dreizehn Modellzeitschritten entspricht).

3.2.3 Überflutungssimulation

Um die Reaktion der Agenten auf die Überflutung simulieren zu können, wird das ABM mit einem hydrologischen Modell gekoppelt. Da die Agenten keine Auswirkungen auf den Verlauf der Überflutung haben, wird ein sogenanntes *loose coupling* der zwei Modelle angewendet. Das bedeutet, dass das hydrologische Modell unabhängig vom agentenbasierten Modell aufgesetzt wird, und dessen Outputs in das agentenbasierte Modell hineingeladen werden, um damit interagieren zu können. Dies hat zum Vorteil, dass eine Fehlerbehebung in beiden Modellen einfacher ist und die Geschwindigkeit der Berechnungen höher wird, als bei einem *tight coupling*, bei welchem die Überflutungssimulation direkt im ABM selbst programmiert wird (O'Shea et al. 2020). Die Überflutungssimulation wird als hydrologisches Modell in BASEMENT Version 2.8.2 aufgesetzt. Bei BASEMENT handelt es sich um ein frei verfügbares numerisches Simulationstool für hydro- und morphodynamisches Modellieren, welches von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich entwickelt wurde (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich 2022).

1. Preprocessing

Das hydrologische Modell benötigt topographische Inputdaten, um den Fließweg des Hochwassers berechnen zu können. Da BASEMENT keine topographischen Rohdaten verarbeiten kann, muss zuerst eine von der Software lesbare Grid-Datei erstellt werden. Dafür wird das QGIS-Plugin „BASEmesh“ verwendet. Zuerst wird ein *quality mesh* erstellt, welches die Simulationsfläche in Dreiecke ungleicher Grösse einteilt. Dabei wird

ein minimaler Dreieckswinkel von 28 Grad und eine maximale Dreiecksfläche von 2'500 m² gewählt. Dadurch entstehen zwei Shapefiles, eines mit den Knotenpunkten und eines mit den Flächen der Dreiecke. Das *quality mesh* erhält jedoch noch keine Höheninformation. Deshalb erfolgt die Interpolation der Höhen mittels digitalem Höhenmodell auf die Knotenpunkte. Dazu wird das digitale Höhenmodell von swisstopo (Bundesamt für Landestopographie 2019a) in einer Auflösung von 2 m x 2 m verwendet. Die interpolierten Daten werden dann als *computational grid* im „2dm“ Format exportiert und in BASEMENT weiterverwendet.

Tabelle 1: Charakteristika der modellierten Flutwelle.

Ausbruchvolumen	44 Mio. m ³
Spitzenabfluss	4'500 m ³ /s
Geschwindigkeit	4-8 m ³ /s
Fliesszeit des Spitzenabflusses (Oeschinenensee - Thunersee)	1h 45 min

2. Hydologische Modellierung

Im BASEMENT-Commandfile müssen verschiedene Parameter angegeben werden, die das Hochwasser bzw. die Flutwelle charakterisieren. Diese werden aus Zimmermann & Hunziker (2020) entnommen (Tabelle 1). Zudem müssen Informationen zu den physikalischen Eigenschaften der Flutwelle angegeben werden. Für die Viskosität wird der Standardwert $1e^{-6}$ gewählt, ebenso für die Dichte des Fluids, für welche die Standardeinstellung 1000 kg/m³ beträgt. Da es sich bei dem Modell um ein reines Überschwemmungsmodell handelt, wird kein Geschiebe berücksichtigt. Zudem muss die Art der Reibung definiert werden. Hierfür wird der Strickler-Koeffizient k_{str} [m^(1/3)/s] gewählt und mit 30 ebenfalls der Standardwert verwendet. Es wird angenommen, dass der Untergrund des von der Flutwelle durchströmten Geländes einheitlich ist, was zur Folge hat, dass alle Elemente den gleichen Reibungskoeffizienten erhalten. Zudem wird ein Hydrograph ins Modell eingespielen, welcher den Abfluss der Flutwelle darstellt (Tabelle 2). Das BASEMENT Commandfile der hydrologischen Modellierung befindet sich in Anhang B.

Tabelle 2: Angaben für den Hydrographen der modellierten Flutwelle.

Zeit [h]	Abfluss [m ³]
0	50
2	1'250
7.5	50

3. Postprocessing

Rasterdaten können in NetLogo nur als ASCII-Dateien eingelesen werden. Deshalb werden die durch BASEMENT herausgegebenen Shapefiles in ASCII-Dateien umgewandelt. Ausserdem werden die im Koordinatensystem LV95 vorliegenden Daten in das Globale Koordinatensystem WGS84 umgewandelt, um sie in NetLogo verwenden zu können.

3.2.4 Agenten

- Patches

Patches repräsentieren die physische Umwelt, welche durch die GIS-Daten geschaffen wird. Die Zellgrösse der NetLogo Patches wird durch die Rasterzellgrösse der GIS-Daten (2.44 m x 2.44 m) definiert. Jedem Patch wird durch das Gebäude- und Strassenraster ein Untergrund (Strasse, Gebäude, Offene Fläche, Evakuierungspunkt) zugewiesen. Gebäude-Patches speichern zusätzlich die Gebäude-ID, die Anzahl Personen die im Gebäude wohnen, sowie die Anzahl Haushalte pro Gebäude. Sobald ein Patch überflutet wird, wird dies ebenfalls anhand der booleschen Variabel `flooded?` und der aktuellen Fliesstiefe festgehalten. Die Patches können daher als Umwelt-Agenten angesehen werden, da die Turtles (Koordinatoren, Evakuierende, Autos) auf die in den Patches gespeicherte Information zugreifen und anhand dieser Entscheidungen treffen können. Die Turtles sind jedoch nicht in der Lage, die Eigenschaften der Patches zu ändern.

- Turtles

- Evakuierende

Die Evakuierenden machen den Grossteil der Turtles im Modell aus. Sie repräsentieren im Modell Anwohner:innen und sonstige Personen, die während der Evakuierung in Kandersteg anwesend sein könnten. Aus der Gebäude- und Wohnungsstatistik geht hervor, dass innerhalb des Untersuchungsperimeters 485 Personen wohnen. Da ein Verhältnis von Anwohner:innen zu nicht-Anwohner:innen 80:20 betragen soll, wurden dementsprechend 485 Evakuierende mit Wohnort innerhalb des Perimeters und 121 mit Wohnort ausserhalb des Perimeters erstellt. Die Aufgabe der Evakuierenden ist zu entscheiden, ob sie mit der Evakuierung beginnen möchten, sobald sie alarmiert werden. Falls dies der Fall ist, sollen sie das geeignete Transportmittel aussuchen und sich zu einem der Evakuierungspunkte begeben. Sie besitzen verschiedene statische und dynamische Eigenschaften, welche für den Verlauf der Evakuierung relevant sind. Diese sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Eigenschaften der Evakuierenden.

Eigenschaft	Bedeutung	Typ	Wertebereich	Zustand
household-in-perimeter?	Legt fest, ob sich der Haushalt des Evakuierenden im Perimeter befindet	boolesch	true/false	statisch
geb-id-e	Falls Haushalt innerhalb des Perimeters: Nummer, welche alle Evakuierenden aus demselben Gebäude haben	integer	0 – 1543	statisch
ob-order	Bereitschaft, nach 1. Alarm zu evakuieren	float	0.0 – 1.0	statisch
ob-conf	Bereitschaft, nach 2. Alarm zu evakuieren	float	0.0 – 1.0	statisch
wom-spreader?	<i>true</i> wenn Mundpropaganda weitergegeben wird	boolesch	true/false	statisch
alarmed?	Wird <i>true</i> sobald erster Alarm erhalten	boolesch	true/false	dynamisch
evacuating?	Wird <i>true</i> sobald Entscheidung zur Evakuierung getroffen	boolesch	true/false	dynamisch
isolated?	Wird <i>true</i> sobald Bedingungen für Isolation erfüllt sind	boolesch	true/false	dynamisch
goal	Nächstes Ziel (entweder Auto oder evacuation-point)	Koordinaten	-296 – 296	dynamisch
evacuation-point	Evakuierungspunkt, welcher bei Evakuierung zu Fuss angesteuert wird	Koordinaten	-296 – 296	dynamisch
in-car?	Wird <i>true</i> sobald in Auto eingestiegen	boolesch	true/false	dynamisch

- Koordinatoren

Koordinatoren stellen Polizisten und Feuerwehrleute dar, die im Ernstfall eingesetzt werden, um die Evakuierung zu koordinieren. Sie sind für eine der drei implementierten Alarmmethoden zuständig. Ihnen wird die Aufgabe erteilt, die Gebäude innerhalb des Untersuchungsperimeters abzulaufen und die sich darin befindenden Evakuierenden zu alarmieren. Die Anzahl der Koordinatoren ist abhängig vom untersuchten Szenario. Deren Eigenschaften können in Anhang C1 nachgeschlagen werden.

- Autos

Autos können von den Evakuierenden als Transportmittel genutzt werden. Alle Autos haben fünf Sitzplätze zur Verfügung, um Evakuierende aufzunehmen. Sobald das Auto eine evakuierende Person aufgenommen hat, kann sich dieses über das Strassennetzwerk (jene Patches, die als „Strasse“ ausgewiesen sind) Richtung Evakuierungspunkt fortbewegen. Deren Eigenschaften können in Anhang C2 nachgeschlagen werden.

3.2.5 Setup-Befehle: Aufstellen des Modells

Ein Modell in NetLogo besteht grundsätzlich aus zwei Arten von Befehlen: „Setup-Befehlen“ und „Go-Befehlen“. Die Setup-Befehle definieren, welche Prozesse zum Aufbau des Modells nötig sind, bevor die zeitliche Komponente des Modells startet. Die Go-Befehle definieren, welche Prozesse innerhalb eines Zeitschrittes ablaufen (Wilensky & Rand 2015). Während des Setups werden das Höhenmodell, das Strassenraster sowie das Gebäuderaster von NetLogo eingelesen und deren Information in den Patches gespeichert. Zudem wird der Umriss der GIS-Daten als Umriss der NetLogo Welt gesetzt. Dadurch entspricht die Ausdehnung der NetLogo Welt genau jener der GIS Daten, wodurch die graphische Darstellung des Modells auf dem Interface massstabsgetreu wiedergegeben wird. Zudem werden die Koordinatoren (*coordinators*), die Evakuierenden (*evacuees*) und die Autos (*cars*) als Unterkategorie (*breeds*) von Turtles erstellt. Die Koordinatoren werden auf ihren Ausgangspunkt im Feuerwehrmagazin gesetzt. Die Evakuierenden werden anhand der Gebäudestatistik auf die Gebäude verteilt. Diejenigen Evakuierenden, welche nicht innerhalb des Perimeters wohnen, werden zufällig auf jene Patches verteilt, welche entweder als offene Fläche oder Strasse ausgewiesen werden. Die Autos werden aufgrund ihrer Haushaltszugehörigkeit auf den Strassenpatch gesetzt, der am nächsten zum ihnen zugewiesenen Haushalt liegt. Jedem Haushalt werden im Schnitt 1.38 Autos zur Verfügung gestellt. Dies entspricht der durchschnittlichen Anzahl Autos pro Haushalt in Gebieten ausserhalb des Einflusses städtischer Kerne in der Schweiz (Bundesamt für Statistik 2017). Abbildung 5 zeigt das graphische Interface des Modells nach dem Setup.



Abbildung 5: Graphisches Interface des Modells nach dem Setup.

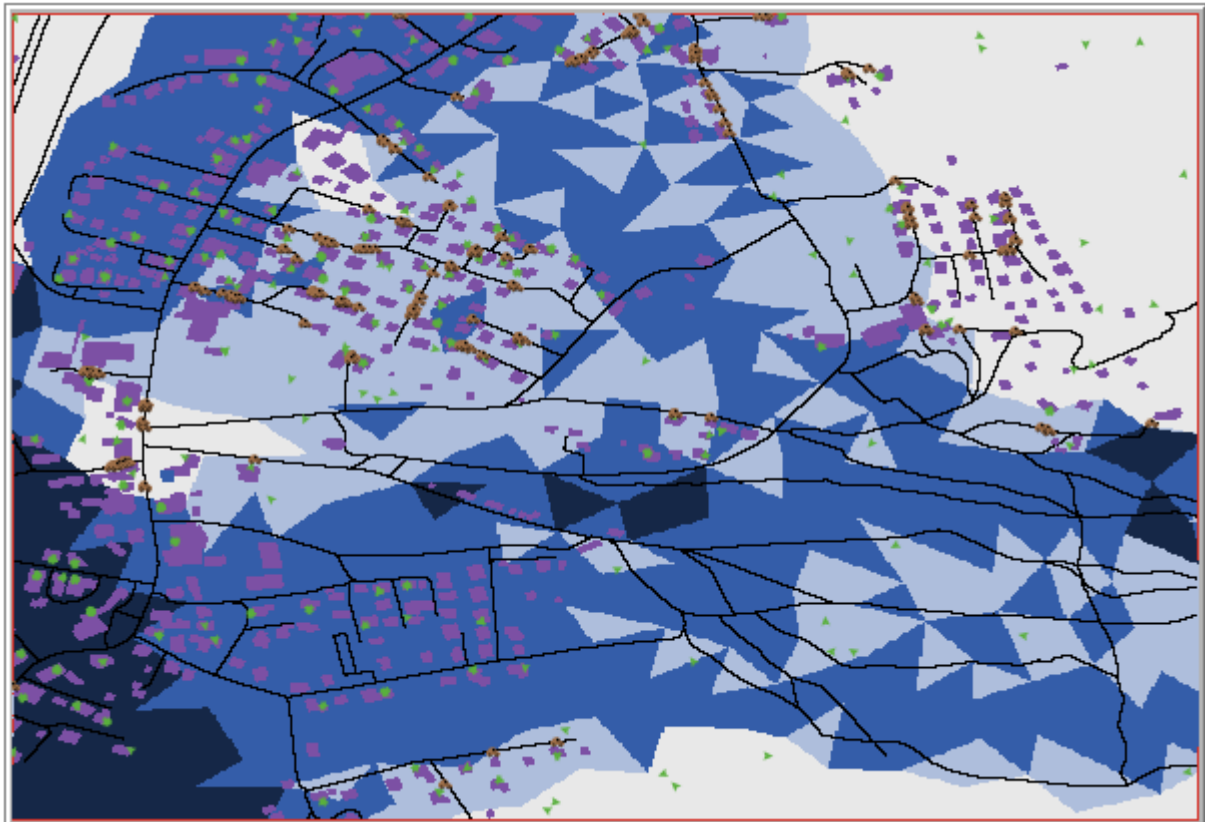


Abbildung 6: Graphisches Interface des Modells während eines Modelldurchlaufs.

3.2.6 Go-Befehle: Ablauf eines Zeitschrittes

Im Folgenden werden die verschiedenen Prozesse, welche innerhalb eines Modellzeitschrittes ablaufen, erörtert.

1. Eintreffen des Überflutungsereignisses

Zu Beginn eines jeden Zeitschrittes wird erörtert, ob die Vornwarnzeit kleiner ist als die bereits vergangene Anzahl an Zeitschritten. Ist dies der Fall, wird fortan in jedem Zeitschritt ein neuer Überflutungslayer ins Modell geladen und die darin vorhandene Information zu den Wassertiefen in die Patches übertragen. Zur Visualisierung werden die überfluteten Patches zusätzlich blau eingefärbt (Abbildung 6).

2. Alarmierung

Der Ablauf der Evakuierung während eines Zeitschrittes im Modell in NetLogo erfolgt analog der Evakuierungszeitachse von Wang et al. (2021). Eine graphische Darstellung der Zusammenhänge findet sich in Abbildung 7.

- Sirenen

Aus dem Pool der zu evakuierenden Agenten wird in jedem Zeitschritt eine vorgängig definierte Anzahl an Evakuierenden informiert. Im Standardszenario beträgt diese 90 % der zu evakuierenden Agenten. Wer alarmiert wird, wird zufällig bestimmt.

- Koordinatoren

Jeder Koordinator wählt ein Gebäude aus, welches sich am nächsten zu seinem momentanen Standort befindet. Dieses Haus steht dann den anderen Koordinatoren nicht mehr zur Verfügung, sodass nicht mehrere Koordinatoren zum gleichen Gebäude laufen, um die Anwohner:innen zu alarmieren. Dies basiert auf der Annahme, dass die Koordinatoren in der Realität miteinander per Telefon oder über Funk kommunizieren können und dadurch mitteilen, auf welches Gebäude sie sich gerade zubewegen und welche sie schon informiert haben. In jedem Zeitschritt bemessen die Koordinatoren die Distanz zwischen ihrem Ziel (dem zu alarmierenden Gebäude) und ihrem momentanen Standpunkt. Dann bewegen sie sich auf den Nachbar-Patch zu, der die kürzeste Distanz zu ihrem Ziel aufweist. Wird als Alarmmethode zusätzlich Mundpropaganda verwendet, können die Koordinatoren auch Evakuierende, welche sie unterwegs treffen, alarmieren. Sind sie an ihrem Zielgebäude angekommen, werden alle sich im Gebäude befindenden Evakuierenden alarmiert. Anschliessend sucht sich der Koordinator wieder ein neues Gebäude in der Nähe. Dies geschieht so lange, bis alle Gebäude alarmiert wurden. Danach verlässt der Koordinator ebenfalls den Perimeter und wird so selbst zum evakuierenden Agenten.

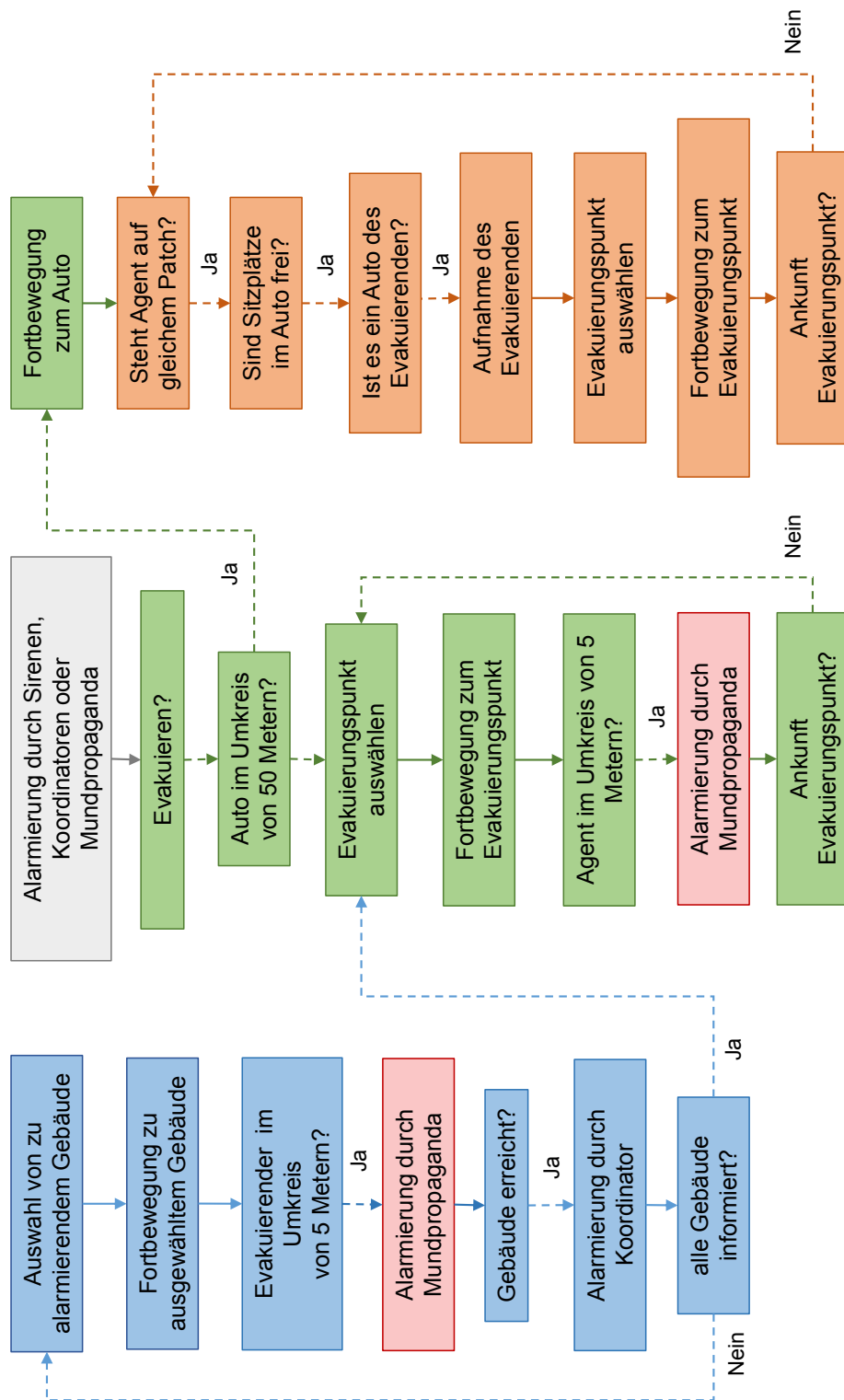


Abbildung 7: Visualisierung der Prozesse eines Zeitschrittes im Modell.
(blau = Koordinatoren, grün = Evakuierende, orange = Autos)

- Mundpropaganda

Während des Setups des Modells wird definiert, welche Evakuierenden den Alarm per Mundpropaganda verbreiten. Im Standardszenario sind das 90 %. Trifft ein Evakuierender auf einen anderen, der sich in einem Radius von fünf Metern befindet, kann er ihn alarmieren.

3. Evakuierungsentscheidung

Alle Evakuierenden, welche ausserhalb des Perimeters wohnen, entscheiden sich direkt nach dem ersten Alarm zu evakuieren. Dies ist angelehnt an das agentenbasierte Modell von Axhausen et al. (2013), in dem sich ebenfalls alle Evakuierenden mit Wohnung ausserhalb des Perimeters dazu entscheiden, direkt zu evakuieren bzw. zu ihrem Wohnort zurückzukehren. Ebenfalls entscheiden sich auch alle Evakuierenden direkt zu evakuieren, wenn sie die Flutwelle selbst wahrnehmen (d.h. wenn sie einen Patch mit einer Wassertiefe über 25 cm in einem Radius von 100 m sehen). Die restlichen Evakuierenden entscheiden anhand ihrer Variablen *obedience-order* und *obedience-confirmation*, ob sie nach dem ersten, zweiten oder dritten Alarm evakuieren.

4. Transport

Anschliessend bestimmen die Evakuierenden ihr Transportmittel. Steht ihnen im Umkreis von 50 Metern ein Auto zur Verfügung, wählen sie das Auto als Transportmittel aus. Ansonsten wird die Evakuierung zu Fuss angestrebt. Ist ein Evakuierender bei seinem bevorzugten Auto angelangt, wird dieser vom Auto aufgenommen. Fortan agiert das Auto genau gleich, wie ein zu Fuss Evakuierender. Es muss also seinen Zielort definieren und eine Evakuierungsrouten suchen. Jedoch stehen ihm dazu nur die Patches zur Verfügung, welche als Strasse ausgewiesen sind. Zudem kann das Auto während der Fahrt weitere Evakuierende aufnehmen, sofern noch Plätze im Auto vorhanden sind. Das Implementieren der Aufnahme von anderen Evakuierenden basiert auf den Bevölkerungsbefragungen von Axhausen et al. (2013), bei welchen 98 % der Personen angaben, andere Personen im Evakuierungsfall mitzunehmen, 57 % davon würden dafür sogar zusätzlichen Platz schaffen.

5. Definition des Zielortes

Haben sich die Evakuierenden dazu entschieden, zu Fuss zu evakuieren, ermitteln sie den Evakuierungspunkt, der sich am nächsten zu ihnen selbst befindet. Dieses Vorgehen kann damit begründet werden, dass die meisten Evakuierenden Einwohner:innen der Gemeinde Kandersteg repräsentieren und daher in ihrer gewohnten Umgebung abschätzen können, welcher Evakuierungspunkt am nächsten liegt.

6. Evakuierungsrouten

Die Wahl der Evakuierungsrouten erfolgt gleich wie bei den Koordinatoren. Es wird in jedem Zeitschritt berechnet, welcher der Nachbar-Patches die kürzeste Distanz zum Zielort aufweist. Auf diesen Patch begeben sich dann die Evakuierenden.

7. Eintreffen am Zielort

Trifft der Evakuierende auf seinem Ziel-Patch (dem ausgewählten Evakuierungspunkt) ein, wird dieser aus der Modellierung entfernt und der Zähler mit den evakuierten Agenten wird um eins erhöht. Dasselbe gilt für Autos, welche auf ihrem Ziel-Patch angelangt sind. Die Anzahl der evakuierten Agenten wird hierbei um die entsprechende Anzahl Evakuierender im Auto erhöht.

Um die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Agenten simulieren zu können, werden die Schritte 5 - 7 in jedem Zeitschritt des Modells unterschiedlich oft repetiert. Koordinatoren und zu Fuss gehende Evakuierende wiederholen die Schritte 84 Mal, um innerhalb eines Zeitschrittes ungefähr 200 m zurückzulegen, was einer Geschwindigkeit von 1.2 km/h entspricht. Autos wiederholen die Schritte 500 Mal und legen dadurch ungefähr 5'000 m innerhalb eines Zeitschrittes zurück, was ungefähr einer Geschwindigkeit von 30km/h entspricht.

3.2.7 Verifizierung

Das agentenbasierte Modell wird einer Verifizierung unterzogen, um aufzuzeigen, dass die Abläufe im tatsächlichen Modell denen des konzeptuellen Modells entsprechen (Wilensky & Rand 2015). Das Modell wurde durch zwei verschiedene Methoden verifiziert: iteratives programmatisches Testen und Parameter Sweeping.

• Iteratives programmatisches Testen

Diese Methode wird direkt während des Programmierens angewandt. Sie beinhaltet folgende Aspekte:

- Testen der einzelnen Einheiten: Jede Einheit des funktionalen Codes (z.B. die Wahl des Verkehrsmittels) wird separat getestet, ob diese so funktioniert wie im konzeptuellen Modell beschrieben.
- Debugging Walkthroughs: NetLogo hat kein integriertes Debugging-Tool. Deshalb wird auf verschiedene Methoden zurückgegriffen, welche sich unter den Nutzer:innen von NetLogo etabliert haben. Es wird ein *debugging?*-Schalter eingebaut, welcher zur Folge hat, dass die für das Debugging relevanten Teile des Codes gelesen werden. Beispielsweise wird dann nicht mehr mit einer fixen Anzahl von Evakuierenden gerechnet. Stattdessen kann die Anzahl variiert werden, um das Parameter-Sweeping durchführen zu können. Zudem werden Print-Statements verwendet, um zu überprüfen, ob der Code tatsächlich ausgeführt wird. Auch Plots und Monitore werden genutzt, um eine visuelle Untersuchung der Entwicklung von Variablen und Teilergebnissen vorzunehmen.
- *Go once*-Knopf: Der Knopf lässt das Modell für einen einzigen Zeitschritt laufen. Dadurch kann überprüft werden, ob ein Fehler erst ab einem gewissen Zeitschritt eintritt.

Tabelle 4: Durch Parameter Sweeping getestete Variablen.

Variabel	Minimum	Erhöhung	Maximum
number-of-evacuees	0	10	2000
number-of-coordinators	0	10	100
number-of-cars	0	10	500
ratio-residents-externals	0	0.1	1
obedience-order	0	0.1	1
obedience-confirmation	0	0.1	1
prewarning-time	0	10	480
receive-warning	0	0.1	1
warning-lenght	0	1	100
word-of-mouth-spreaders	0	0.1	1

- Nachrechnen der Zwischenergebnisse: Einige Schritte im Modell beinhalten das Berechnen von bestimmten Anteilen, z.B. die Anzahl der Evakuierenden, welche Mundpropaganda verbreiten. Das erwartete Ergebnis wird ausserhalb des Modells selbst berechnet und dann mit dem Ergebniss des Modells verglichen um zu überprüfen, ob die Modellberechnungen korrekt sind.

- **Parameter Sweeping**

Parameter Sweeping ist ein Prozess, bei dem die Inputvariablen eines Modells systematisch variiert werden, um deren Einfluss auf die Modelloutputs zu beobachten (Anderson & Tittler 2014). Dadurch kann überprüft werden, ob das Modell in allen Situationen so reagiert wie erwartet. Wichtig ist es dabei auch die Extremwerte zu untersuchen. Werden beispielsweise dem Modell von Beginn an keine Evakuierenden hinzugefügt, aber es gibt trotzdem tote oder isolierte Evakuierende, liegt ein Fehler im Code vor. Tabelle 4 zeigt auf, welche Variablen im Parameter Sweeping untersucht werden. Zusätzlich werden die beiden Extremwerte und die Erhöhung pro Schritt angegeben.

3.3 Sensitivitätsanalyse

Durch die Validierung eines Modells wird überprüft wie gut die im Modell implementierten Phänomene den tatsächlichen Abläufen der Realität entsprechen. Die Validierung eines agentenbasierten Modells erweist sich oftmals als schwierig, da für die meisten Fragestellungen keine Daten aus der realen Welt herbeigezogen werden können, um diese für die Validierung zu verwenden. Es gibt keine Daten von realen Fällen die ähnlich genug zur in dieser Arbeit untersuchten Situation sind, beispielsweise bezüglich des Verlaufs der Flutwelle, Grösse des Untersuchungsperimeters und der Erfassung der Toten und Isolierten. Da das Modell nicht anhand von externen Daten validiert werden kann, wird die Methode der Sensitivitätsanalyse gewählt, um zu überprüfen, ob in sich stimmige Ergebnisse erzielt werden. Bei einer Sensitivitätsanalyse

Tabelle 5: Werte der Modellvariablen im Standardszenario.

Variabel	Bedeutung	Wert
alarm-mode	Eingesetzte Alarmmethode	„Kombination“
receive-alarm	Bruchteile der Evakuierenden, die Alarm empfangen	0.9
obedience-order	Bruchteile der Evakuierenden, die nach erster Alarmierung evakuieren	0.6
obedience-confirmation	Bruchteile der Evakuierenden, die nach zweiter Alarmierung evakuieren	0.8
prewarning-time	Vorlaufzeit in Anzahl Minuten	60
alarm-length	Wie viele Zeitschritte der Alarm wiederholt wird	12
number-of-coordinators	Anzahl Koordinatoren	20
wom-spreader	Bruchteile der Evakuierenden, die Mundpropaganda verbreiten	0.9

eines agentenbasierten Modells wird der Effekt, der die Variation von Inputvariablen auf die Outputvariablen hat, untersucht (Borgonovo et al. 2022). Dabei werden die Werte der der Inputvariablen in einem sinnvollen Bereich variiert und anschliessend mit einem Durchlauf verglichen, bei dem keine Veränderung der untersuchten Variabel stattgefunden hat. Dementsprechend ist das Vorgehen bei der Sensitivitätsanalyse ähnlich wie beim Parameter Sweeping. Letzteres hat aber neben dem Auffinden von Fehlern oftmals das Ziel, den optimalen Wert für eine Variable zu finden um einen gewünschten Output zu erzielen. Bei der Sensitivitätsanalyse liegt der Fokus hingegen auf der Analyse des Zusammenhangs zwischen Input und Output.

Entsprechend den Forschungsfragen werden fünf verschiedene Szenarien definiert, welche anhand der Sensitivitätsanalyse untersucht werden (Kapitel 3.3.1). Der Zusammenhang zwischen den erzeugten Outputvariablen (Kapitel 3.3.2) und den in Inputvariablen wird anschliessend mittels Regressionsanalyse untersucht (Kapitel 3.3.3).

3.3.1 Szenariendefinition

Um die verschiedenen Szenarien untereinander vergleichen zu können, wurde ein Standardszenario definiert (Tabelle 5). Anhand dieses Szenarios wurden dann die einzelnen für die Forschungsfragen relevanten Variablen variiert. Ausserdem wird immer ein Nullszenario mitgerechnet, um dieses anschliessend mit den abweichenden Szenarien zu vergleichen. Das Nullszenario entspricht dem Standardszenario, mit der Änderung, dass die zu untersuchenden Variablen alle auf 0 gestellt werden. Dadurch kann überprüft werden, ob die Veränderung der Variable (z.B. der Anzahl Koordinatoren) tatsächlich einen Einfluss auf das Resultat hat oder ob das veränderte Szenario die gleichen Resultate liefert wie das Nullszenario.

In den eckigen Klammern werden jeweils der Start- und Endwert der Variable angegeben. Der Mittlere Wert gibt an, um wie viel die Variable pro Schritt erhöht wird. Folgende Szenarien werden erstellt (Angabe des Minimalwertes, der Erhöhung und des Maximalwertes in eckigen Klammern):

- Sirenen
 - alarm-mode: kein Alarm, Sirenen, Sirenen + Koordinatoren, Sirenen + Mundpropaganda
 - receice-alarm: [0 0.1 1]
 - alarm-length: [0 1 12]
- Koordinatoren
 - alarm-mode: kein Alarm, Koordinatoren, Sirenen + Koordinatoren, Koordinatoren + Mundpropaganda
 - number-of-coordinators: [0 5 50]
- Mundpropaganda
 - prewarning-time: 20 min.¹
 - alarm-mode: kein Alarm, Sirenen + Mundpropaganda, Koordinatoren + Mundpropaganda
 - word-of-mouth-spreaders: [0 0.1 1]
- Vorlaufzeit
 - alarm-mode: kein Alarm, Sirenen, Koordinatoren, Sirenen + Koordinatoren, Sirenen + Mundpropaganda, Koordinatoren + Mundpropaganda, Kombination
 - pre-warningtime: [0 0.1 1]
- Evakuierungsbereitschaft
 - prewarning-time: 20 min.¹
 - alarm-mode: Kombination
 - obedience-order: [0 0.1 1]
 - obedience-confirmation: [0 0.1 1]

¹Die Vorlaufzeit musste hier auf 20 Minuten reduziert werden, da nach dem ersten Modelldurchlauf festgestellt wurde, dass es weder tote noch isolierte Evakuierende gab, und der Zusammenhang deshalb nicht untersucht werden konnte.

Jeder Modelldurchlauf eines Szenarios mit einer bestimmten Kombination an Variablen (z.B. `alarm-mode = „coordinators“` und `number-of-coordinators = 25`) wird jeweils 20 Mal repliziert. Um diese Modelldurchläufe mit wechselnden Variablenwerten automatisiert durchführen zu können, wurde das Tool „BehaviorSpace“ verwendet. BehaviorSpace ist ein in NetLogo integriertes Softwaretool, dank dem Experimente mit Modellen durchgeführt und automatisiert werden können. BehaviorSpace führt einen Modellablauf viele Male durch, variiert systematisch die Einstellungen des Modells und zeichnet die Ergebnisse eines jeden Modellablaufs auf (Northwestern University 2022a). Die Replikation ist notwendig, da das Modell über verschiedene Zufallskomponenten verfügt, beispielsweise bei der Aufstellung der Agenten zu Beginn des Modells. Dadurch können die Resultate des Experiments leicht variieren. Um auszuschliessen, gerade einen zufällig hohen oder zufällig tiefen Output generiert zu haben, wird von den 20 Versuchen jeweils der Mittelwert berechnet und für die Regressionsanalyse verwendet.

3.3.2 Outputvariablen

Um die Forschungsfragen hinreichend beantworten zu können, wurden bei den Modelldurchläufen folgende Outputvariablen untersucht:

- Tote Evakuierende
Hiermit wird die Anzahl der toten Evakuierenden am Ende eines Modelldurchlaufs erfasst. Als tot werden Agenten eingestuft, welche sich ausserhalb eines Gebäudes befinden und einer Fliesstiefe von mehr als 25 cm ausgesetzt sind. Agenten innerhalb eines Gebäudes werden als tot eingestuft, wenn diese einer Fliesstiefe von mehr als 1.5 m ausgesetzt sind.
- Isolierte Evakuierende
Hiermit wird die Anzahl der isolierten Evakuierenden am Ende eines Modelldurchlaufs erfasst. Als isoliert werden Evakuierende eingestuft, welche im Umkreis von 5 m komplett von Wasser umgeben sind und sich aufgrund dessen nicht von ihrem Standort weg bewegen können. Für Agenten ausserhalb von Gebäuden werden Fliesstiefen grösser als 25 cm als nicht mehr passierbar angesehen, innerhalb von Gebäuden Fliesstiefen grösser als 1.5 m.

3.3.3 Regressionsanalyse der Resultate

Um den Zusammenhang zwischen Input- und Outputvariablen zu untersuchen, wird eine Regressionsanalyse in Excel durchgeführt. Die Regressionsanalyse ermittelt den Beitrag einer unabhängigen Variable zur Varianz und Grösse einer abhängigen Variable (Wilks 2019). Folgende Kennzahlen sind relevant (Urban & Mayerl 2011):

- Korrelationskoeffizient
Der Korrelationskoeffizient zeigt auf, wie stark der Zusammenhang zwischen zwei Variablen ist. Er kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Je näher er an 1 liegt, desto stärker

ist die positive Korrelation zwischen den zwei Variablen. Ist er negativ, deutet dies auf eine negative Korrelation hin. Das bedeutet, dass, je höher die eine Variable ist, desto tiefer ist die andere.

- Bestimmtheitsmass (R^2)

Das Bestimmtheitsmass gibt Auskunft darüber, wie gut die abhängige Variable durch die unabhängige Variable erklärt werden kann. Das Bestimmtheitsmass kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je höher der Wert, desto besser erklärt die unabhängige Variable die abhängige Variable.

- Standardfehler der abhängigen Variable

Dieser gibt an, wie weit die untersuchten Datenpunkte im Durchschnitt von der Regressionsgeraden entfernt sind.

- t-Statistik

Die t-Statistik ist der Output eines t-Tests. Dieser wird angewendet, um herauszufinden, ob die Unterschiede zweier Gruppen signifikant oder rein zufällig sind. Je weiter weg von Null der Wert ist, desto höher ist der Einfluss der unabhängigen Variable auf die abhängige Variable.

- P-Wert

Der P-Wert gibt Auskunft über die Irrtumswahrscheinlichkeit der Analyse. Dieser muss unter einem gewissen Signifikanzniveau liegen, damit bestätigt werden kann, dass das Ergebnis nicht zufällig ist. In der vorliegenden Arbeit wird ein Signifikanzniveau von 0.05 verwendet, was dem wissenschaftlichen Standard entspricht (Fahrmeir et al. 2016).

4 Resultate

Im folgenden Kapitel werden die für die Beantwortung der Forschungsfragen relevanten Ergebnisse aus der Sensitivitätsanalyse präsentiert. Bei den dargestellten Werten handelt es sich um die von jeweils 20 Modelldurchläufen gebildeten Mittelwerte.

4.1 Alarmmethoden

4.1.1 Sirenen

Die Alarmierung durch Sirenen wurde anhand der Anzahl erreichter Evakuierender pro Zeitschritt und der Anzahl Repetitionen des Alarms untersucht. Abbildung 8 zeigt den Einfluss des Anteils erreichter Evakuierender pro Zeitschritt auf die Anzahl der toten Evakuierenden. Dabei wird zusätzlich aufgezeigt, wie sich dieser Anteil für unterschiedlich lange Alarmrepetitionen auswirkt. Im Nullszenario, in dem kein Alarm eingesetzt wurde, bleibt die Anzahl der toten Evakuierenden unabhängig von den erreichten Evakuierenden ungefähr gleich hoch. Sobald ein gewisser Anteil an Evakuierenden durch Sirenen gewarnt wird, sinkt die Anzahl Toter, unabhängig davon, wie oft der Alarm wiederholt wird. Werden 100% der Evakuierenden alarmiert, kann die Anzahl der toten Evakuierenden bereits nach einer Alarmierung auf 52 reduziert werden. Ab einer dreimaligen Repetition des Alarms wird die Anzahl der toten Evakuierenden auf 0 reduziert.

Ein ähnliches Muster weist auch die Anzahl isolierter Evakuierender auf. Auch hier kann die Anzahl Isolierter sowohl durch die erreichten Evakuierenden pro Zeitschritt, als auch durch die Anzahl an Alarmrepetitionen reduziert werden (Abbildung 9).

Wird im Modell zusätzlich durch Mundpropaganda alarmiert, kann die Anzahl der toten Evakuierenden stärker reduziert werden. Werden 100% der Evakuierenden alarmiert, wird die Anzahl der Toten auf durchschnittlich 4 Evakuierende reduziert (Abbildung 10). Zudem wird ersichtlich, dass die Anzahl der Toten bereits beim Erreichen von 10% der Evakuierenden pro Zeitschritt stark reduziert wird. Bei 5 bis 12 Alarmrepetitionen können die Todesfälle um 74 - 80 % im Vergleich zum Nullszenario verringert werden. Die Anzahl der Isolierten wird dadurch sogar um 85 - 90 % verringert (Abbildung 11).

Ausserdem wurde untersucht, welchen Effekt die Anzahl alarmierter Evakuierender und die Anzahl Repetitionen des Alarms hat, wenn zusätzlich zum Sirenenalarm auch Koordinatoren eingesetzt werden. Der Zusammenhang konnte nicht mittels Regressionsanalyse erfasst werden. Dies liegt daran, dass die Anzahl der toten Evakuierenden für jede getestete Kombinationsmöglichkeit entweder bei 0 oder 1 liegt. Isolierte gibt es bei der Kombination von Sirenen und Koordinatoren keine.

Die Regressionsanalyse wurde separat für die beiden untersuchten Inputvariablen durchgeführt. Dafür wurde ein Basisszenario geschaffen, von dem aus lediglich eine der beiden Variablen variiert wurde. Um den Einfluss des Anteils an erreichten Evakuierenden zu ermitteln, wurde der Alarm einmal wiederholt und die Anzahl erreichter Evakuierender zwischen 0 und 100 %

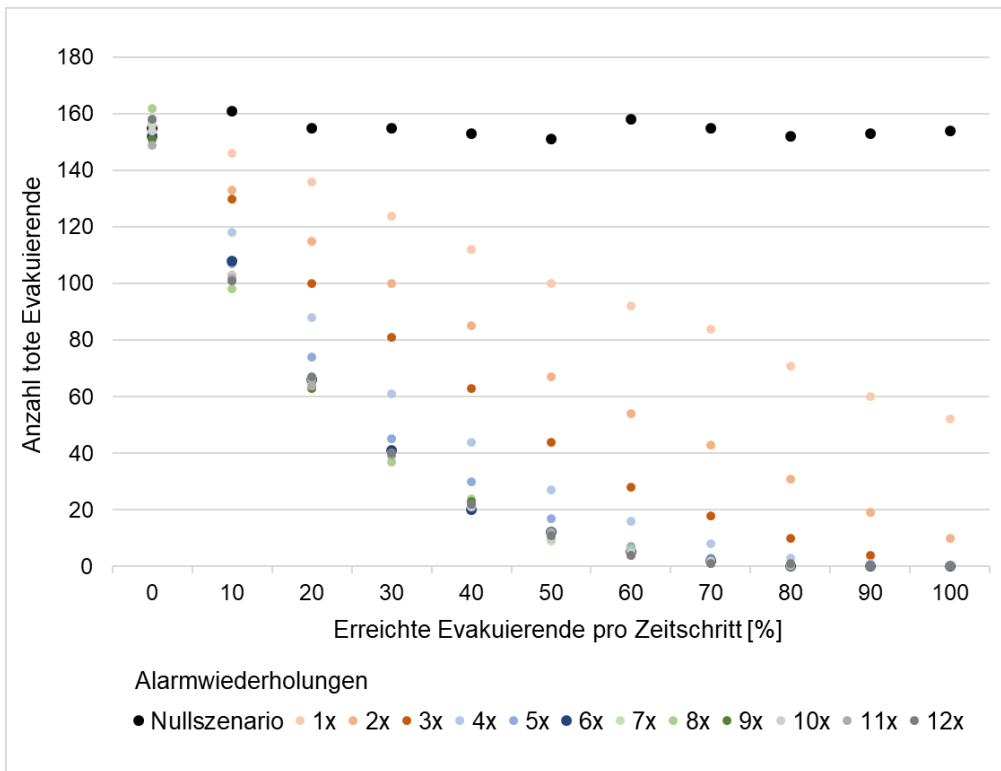


Abbildung 8: Einfluss des prozentualen Anteils erreichter Evakuierender auf die Anzahl der toten Evakuierenden für verschiedene Alarmrepetitionen. Alarmszenario: Sirenen.

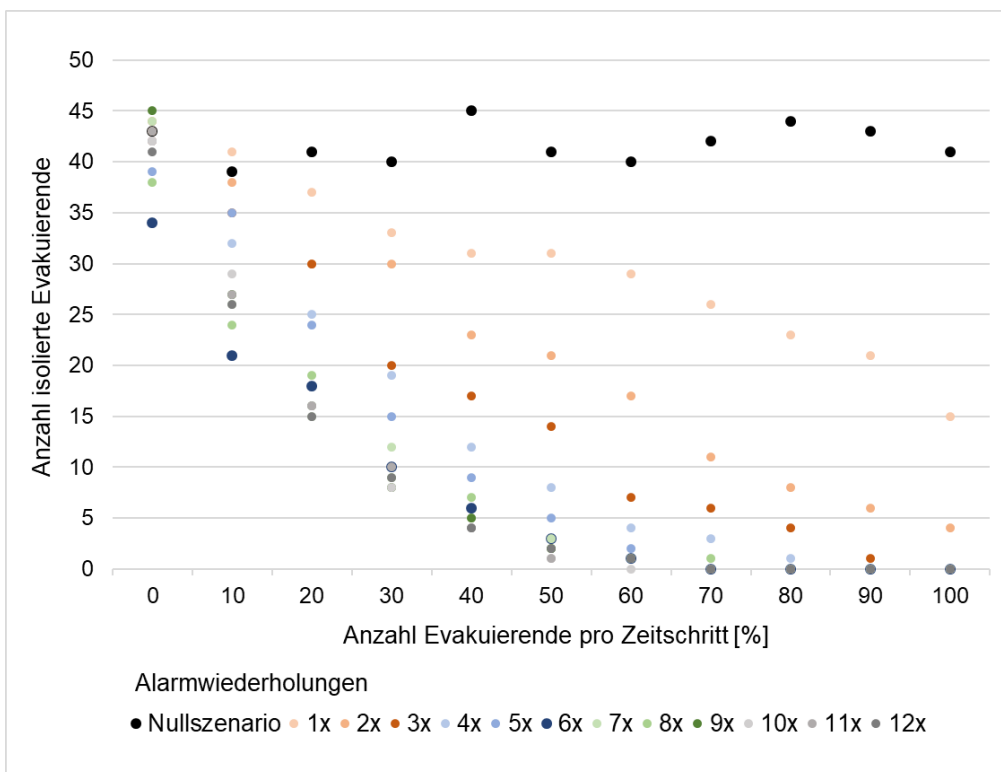


Abbildung 9: Einfluss des prozentualen Anteils erreichter Evakuierender auf die Anzahl der toten Evakuierenden für verschiedene Alarmrepetitionen. Alarmszenario: Sirenen.

in Zehnerschritten variiert. Für die beiden Alarmszenarien „Sirenen“ und „Sirenen + Mundpropaganda“ wird ein negativer linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl erreichten und Anzahl toten Evakuierenden sichtbar (Tabelle 6). Dieser weist Korrelationskoeffizienten von -0.99 resp. -0.91 auf. Mit P-Werten von $2.39e^{-8}$ resp. $7.32e^{-8}$ liegen die Werte deutlich unter dem Signifikanzniveau von 0.05. Es konnte ebenfalls ein signifikanter Zusammenhang mit der Anzahl isolierter Evakuierender nachgewiesen werden. Hier wurden Regressionskoeffizienten von -0.98 resp. -0.83 ermittelt. Die P-Werte von $2.24e^{-8}$ resp. $7.32e^{-8}$ bestätigen auch hier auch statistische Signifikanz. Für das Alarmszenario „Sirenen + Koordinatoren“ konnte keine Regressionsanalyse durchgeführt werden, da die Anzahl der toten und isolierten Evakuierenden jeweils nur zwischen 0 und 1 schwankt.

Um den Zusammenhang der Anzahl Alarmrepetitionen mit den Outputvariablen zu untersuchen, wurde der Anteil alarmierter Evakuierender auf 10% gestellt. Hier ist der negative lineare Zusammenhang mit Korrelationskoeffizienten von ≤ -0.78 etwas weniger stark ausgeprägt als bei der ersten untersuchten Variabel. Jedoch ist er mit P-Werten von ≤ 0.002 immer noch signifikant (Tabelle 7). Auch hier konnte keine Regressionsanalyse für das Alarmszenario „Sirenen + Koordinatoren“ durchgeführt werden, da die Anzahl der toten und isolierten Evakuierenden jeweils nur zwischen 0 und 1 schwankt.

Tabelle 6: Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen dem Anteil erreichter Evakuierender und den Outputvariablen.

Alarmszenario	Output	Korrelationsk.	R ²	Standardfehler	t-Statistik	P-Wert
Sirenen	Tote	-0.99	0.99	1.17	-65.14	$2.39e^{-8}$
Sirenen	Isolierte	-0.98	0.97	1.47	-18.05	$2.24e^{-8}$
Sirenen + Koordinatoren	Tote	-	-	-	-	-
Sirenen + Koordinatoren	Isolierte	-	-	-	-	-
Sirenen + Mundpropaganda	Tote	-0.91	0.84	2.10	-6.87	$7.32e^{-8}$
Sirenen + Mundpropaganda	Isolierte	-0.83	0.69	7.90	-4.5	0.002

Tabelle 7: Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen der Anzahl Warnwiederholungen und den Outputvariablen.

Alarmszenario	Output	Korrelationsk.	R ²	Standardfehler	t-Statistik	P-Wert
Sirenen	Tote	-0.88	0.77	10.04	-6.12	$7.66e^{-5}$
Sirenen	Isolierte	-0.78	0.62	4.07	-4.30	0.001
Sirenen + Koordinatoren	Tote	-	-	-	-	-
Sirenen + Koordinatoren	Isolierte	-	-	-	-	-
Sirenen + Mundpropaganda	Tote	-0.78	0.62	23.87	-4.22	0.001
Sirenen + Mundpropaganda	Isolierte	-0.78	0.60	7.35	-4.10	0.002

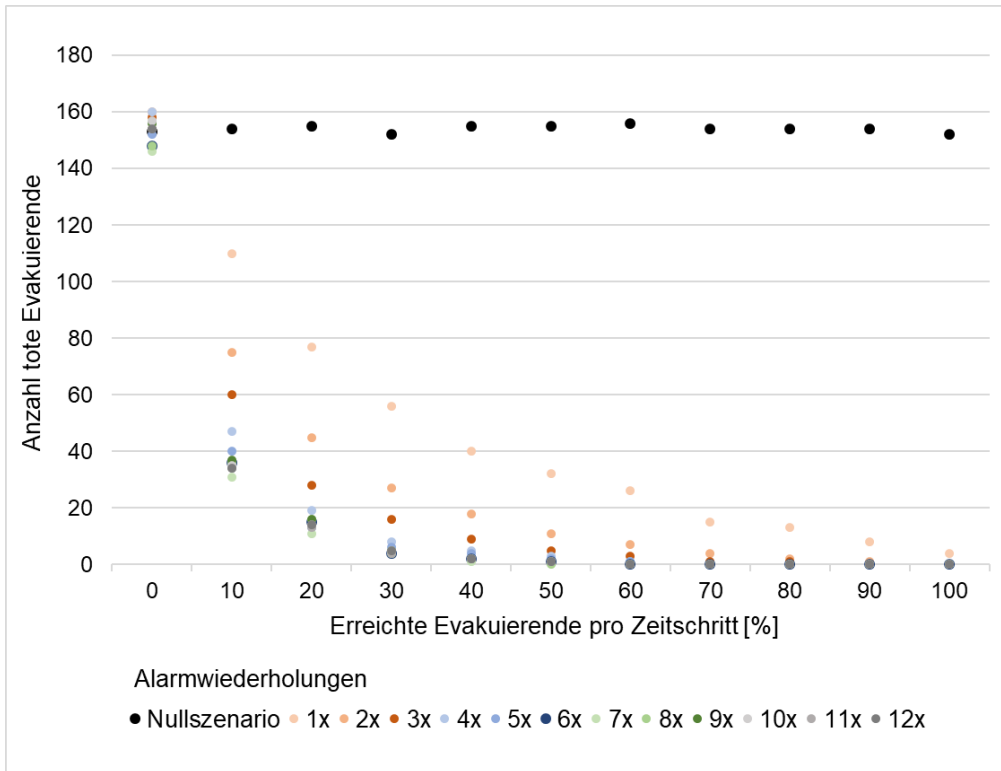


Abbildung 10: Einfluss des prozentualen Anteils erreichter Evakuierender auf die Anzahl der toten Evakuierenden für verschiedene Alarmrepetitionen. Alarmszenario: Sirenen + Mundpropaganda.

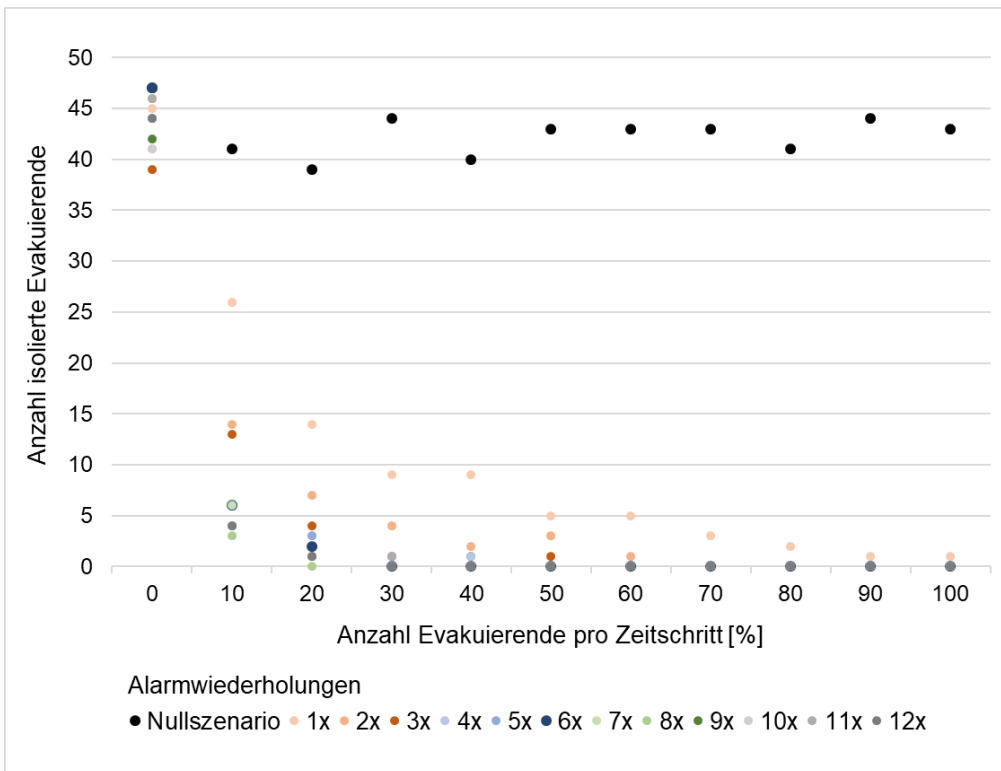


Abbildung 11: Einfluss des prozentualen Anteils erreichter Evakuierender auf die Anzahl der isolierten Evakuierenden für verschiedene Alarmrepetitionen. Alarmszenario: Sirenen + Mundpropaganda.

4.1.2 Koordinatoren

Die Alarmierung durch Koordinatoren wurde dahingehend untersucht, welchen Einfluss die Anzahl eingesetzter Koordinatoren auf die Anzahl toter und isolierter Evakuierender hat. In Abbildung 12 wird ersichtlich, dass ein negativer linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl Koordinatoren und der Anzahl Toten besteht. Ab 25 Koordinatoren im Untersuchungsperimeter werden keine Toten mehr verzeichnet. Der negative Zusammenhang konnte auch durch die Regressionsanalyse bestätigt werden: Der Korrelationskoeffizient liegt bei -0.9, der P-Wert bei 0.005 (Tabelle 8). Zu beachten gilt, dass nur die ersten 6 Observationen in die Berechnung miteinbezogen wurden, d.h. bis zu einer Anzahl von 25 Koordinatoren. Dies gilt auch für die Regressionsanalyse der Kombination aus Koordinatoren und Mundpropaganda. Auch hier kann mit einem Korrelationskoeffizienten von -0.85 und einem P-Wert von 0.03 ein negativer linearer Zusammenhang nachgewiesen werden. Im Szenario, indem zusätzlich Sirenen eingesetzt werden, kommt es beim Einsatz von 5 Koordinatoren zu insgesamt 3 Toten, bei jeder anderen Anzahl an Koordinatoren wird kein einziger Toter verzeichnet. Eine Regressionsanalyse konnte deshalb nicht durchgeführt werden.

Dasselbe Muster ist auch bei der Anzahl an isolierten Evakuierenden zu erkennen (Abbildung 13). Je mehr Koordinatoren für die Alarmierung eingesetzt werden, desto weniger Isolationen werden verzeichnet. Auch hier besteht ein deutlicher negativer linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl Koordinatoren und der Anzahl isolierter Evakuierender (Tabelle 9). Werden zusätzlich Sirenen eingesetzt, kann die Anzahl der Isolierten auf 0 reduziert werden. Bei einer Kombination mit Mundpropaganda wird die Anzahl ebenfalls verringert, jedoch erst bei einem Einsatz von mindestens 10 Koordinatoren. Der negative lineare Zusammenhang ist jedoch mit einem P-Wert von 0.12 nicht statistisch signifikant.

Tabelle 8: Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen der Anzahl Koordinatoren und der Anzahl toter Evakuierender.

Alarmszenario	Observ.	Korrelationsk.	R ²	Standardfehler	t-Statistik	P-Wert
Koordinatoren	6	-0.90	0.81	23.11	7.86	0.005
Koordinatoren + Sirenen	-	-	-	-	-	-
Koordinatoren + Mundpropaganda	6	-0.85	0.73	36.33	-3.28	0.03

Tabelle 9: Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen der Anzahl Koordinatoren und der Anzahl isolierten Evakuierender.

Alarmszenario	Observ.	Korrelationsk.	R ²	Standardfehler	t-Statistik	P-Wert
Koordinatoren	6	-0.90	0.81	23.11	7.86	0.005
Koordinatoren + Sirenen	-	-	-	-	-	-
Koordinatoren + Mundpropaganda	6	-0.70	0.50	15.16	-1.95	0.12

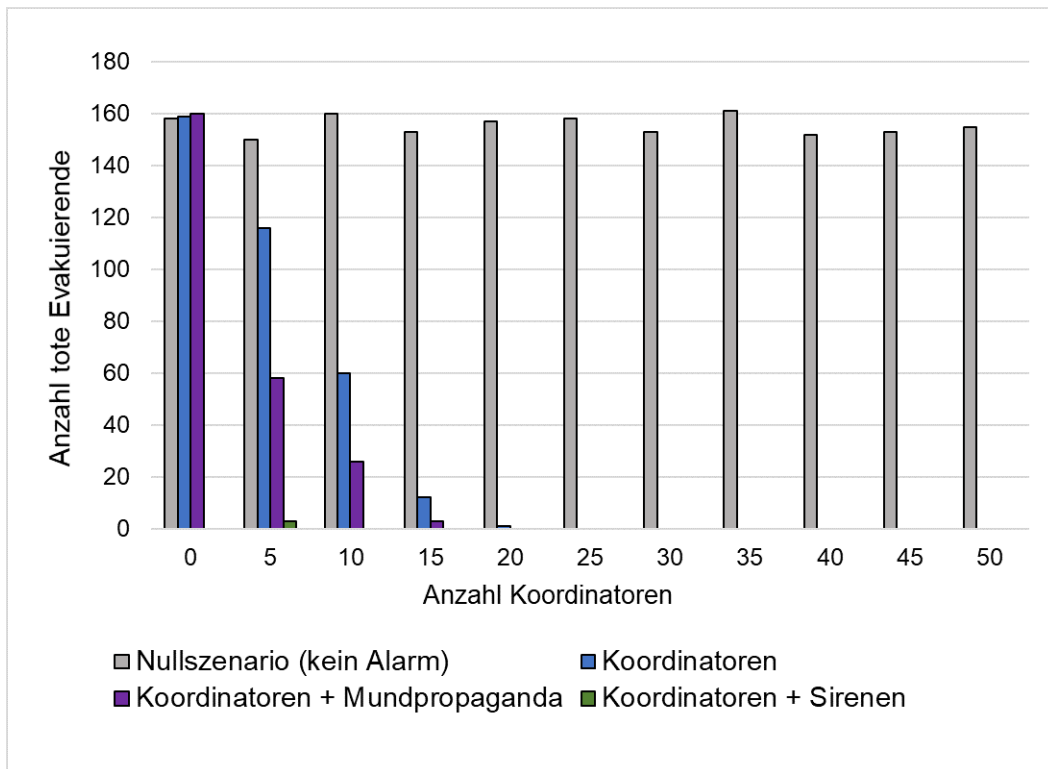


Abbildung 12: Einfluss der Anzahl Koordinatoren auf die Anzahl toter Evakuierender.

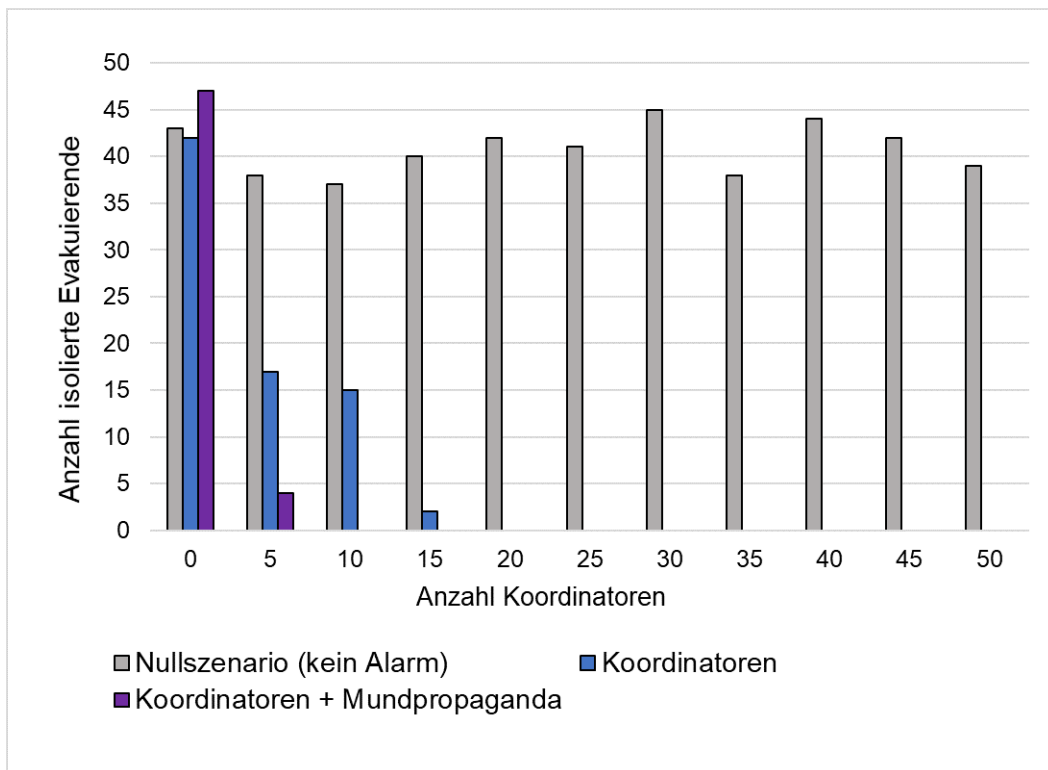


Abbildung 13: Einfluss der Anzahl Koordinatoren auf die Anzahl isolierter Evakuierender. Das Alarmszenario „Koordinatoren + Sirenen“ ist nicht abgebildet, da die Anzahl Isolierter durchgängig 0 beträgt.

4.1.3 Mundpropaganda

Die Alarmierung durch Mundpropaganda wurde dahingehend untersucht, welchen Einfluss der prozentuale Anteil an Mundpropagandaverbreiter:innen auf die Anzahl der toten und isolierten Evakuierenden hat. Bei einer rein visuellen Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Mundpropagandaverbreiter:innen und Todesfällen scheint es keinen erkennbaren Zusammenhang zu geben (Abbildung 14). Die Todesfälle fallen bei einer Alarmierung durch Mundpropaganda und Koordinatoren lediglich etwas tiefer aus als im Nullszenario. Bei der Alarmierung durch Mundpropaganda und Sirenen fallen die Todesfälle dagegen erheblich tiefer aus, sie schwanken zwischen 10 und 28 Fällen. Durch die Regressionsanalyse wird ersichtlich, dass durchaus ein leichter negativer Zusammenhang zwischen den Mundpropagandaverbreiter:innen und den Todesfällen besteht. Das Alarmszenario „Sirenen + Mundpropaganda“ weist einen Korrelationskoeffizienten von -0.71 auf, „Koordinatoren + Mundpropaganda“ einen Korrelationskoeffizienten von -0.64. Beide Ergebnisse sind mit P-Werten von 0.014 bzw. 0.036 statistisch signifikant. Bei einer Betrachtung des Bestimmtheitsmasses wird jedoch ersichtlich, dass für beide Alarmszenarien jeweils nur ca. die Hälfte aller Datenpunkte der Outputvariabel durch die Inputvariabel (Mundpropagandaverbreiter:innen) erklärt werden können (Tabelle 10).

Die Anzahl der isolierten Evakuierenden kann durch die Alarmierung per Koordinatoren und Mundpropaganda im Vergleich zum Nullszenario deutlich reduziert werden (Abbildung 15). Die Anzahl der Toten sinkt, je höher der prozentuale Anteil der Mundpropagandaverbreiter:innen ist. Ein ähnliches Muster weist auch das Alarmszenario „Sirenen + Mundpropaganda“ auf. Bei einem Mundpropagandaverbreiter:innen Anteil von bis zu 40% werden nur 1-2 Isolierte pro Szenario verzeichnet, ab 50% kommt es zu gar keinen Isolationsfällen mehr. Die Regressionsanalyse zeigt auf, dass der negative Zusammenhang zwischen Mundpropagandaverbreiter:innen und isolierten Evakuierenden etwas stärker ausfällt, als der Zusammenhang mit den Todesfällen. Für das Alarmszenario „Sirenen + Mundpropaganda“ wird ein Korrelationskoeffizient von -0.71 und ein P-Wert von 0.013 ermittelt. Das Alarmzenario „Koordinatoren + Mundpropaganda“ weist einen Korrelationskoeffizienten von -0.76 und einen P-wert von 0.007 auf. Auch hier können wieder nur rund die Hälfte aller Datenpunkte der Outputvariabel durch die Inputvariabel erklärt werden.

Tabelle 10: Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen dem prozentualen Anteil an Mundpropagandaverbreiter:innen und den Outputvariablen.

Alarmszenario	Output	Korrelationsk.	R ²	Standardfehler	t-Statistik	P-Wert
Mundpropaganda + Sirenen	Tote	-0.71	0.51	5.00	-3.03	0.014
Mundpropaganda + Sirenen	Isolierte	-0.71	0.52	0.70	-3.10	0.013
Mundpropaganda + Koordinatoren	Tote	-0.64	0.40	9.90	-2.50	0.036
Mundpropaganda + Koordinatoren	Isolierte	-0.76	0.58	5.54	-3.48	0.007

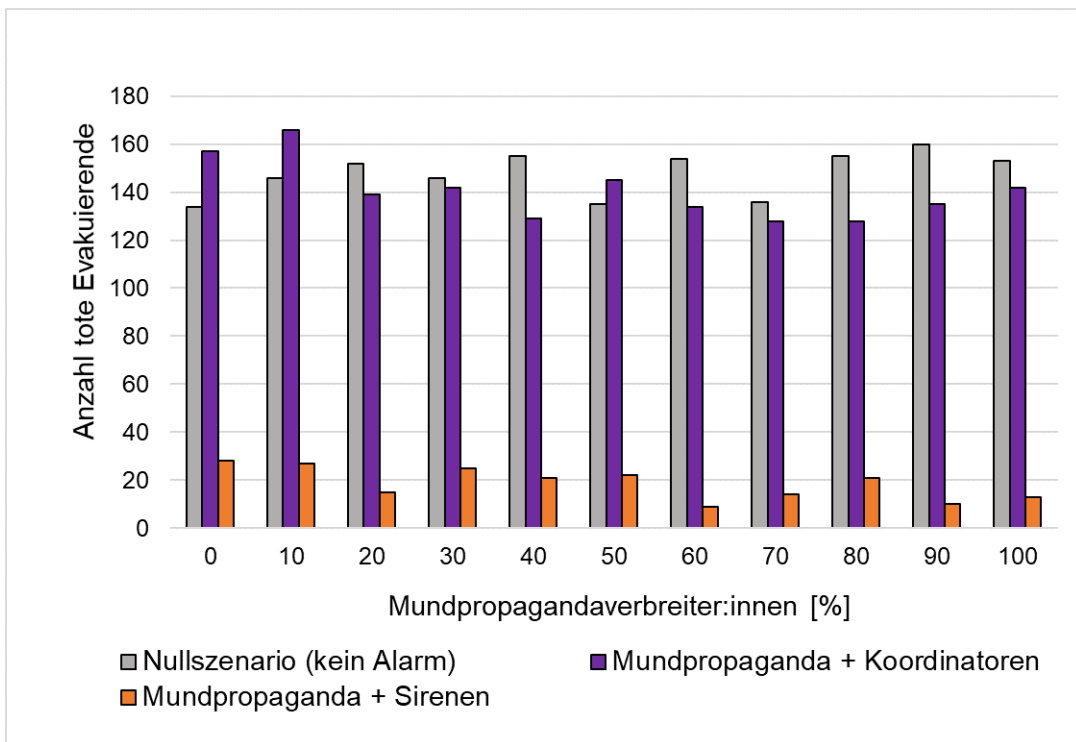


Abbildung 14: Einfluss des prozentualen Anteils an Mundpropagandaverbreiter:innen auf die Anzahl der toten Evakuierenden.

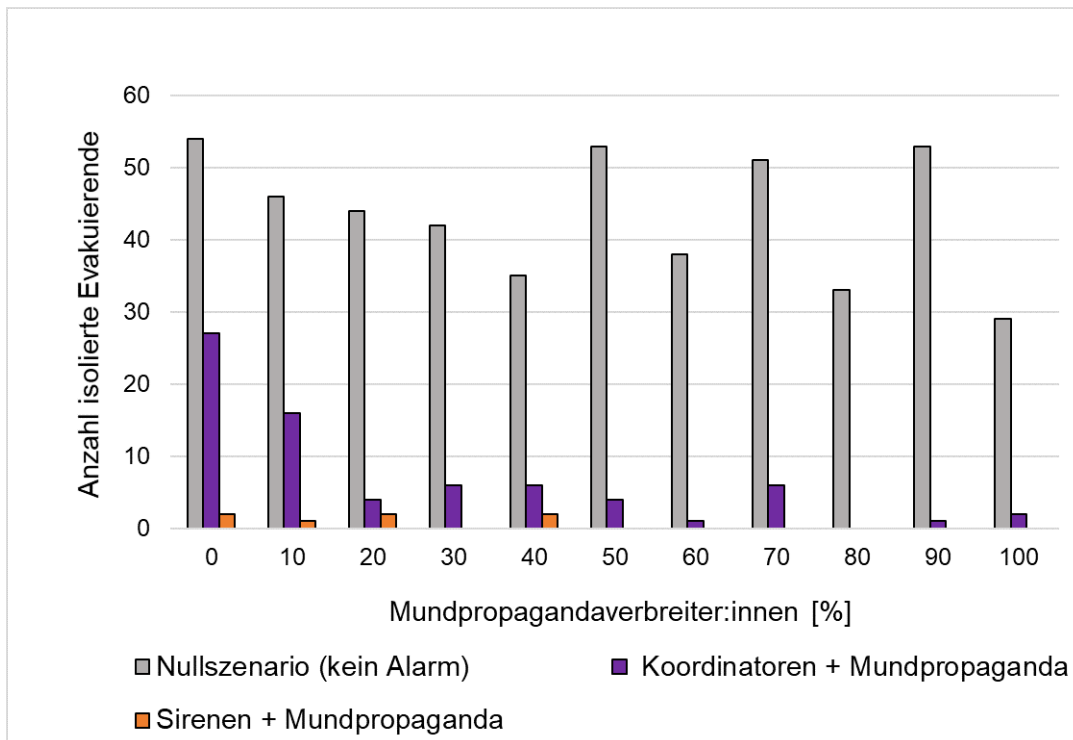


Abbildung 15: Einfluss des prozentualen Anteils an Mundpropagandaverbreiter:innen auf die Anzahl der isolierten Evakuierenden.

4.1.4 Vergleich der Alarmszenarien

Zusammenfassend werden die Anzahl der Todesfälle und Isolationen aus verschiedenen Alarmszenarien miteinander verglichen. Da bei einer Vorlaufzeit von 60 Minuten keine toten oder isolierten Evakuierenden auftreten, werden die Unterschiede anhand einer Vorlaufzeit von 20 Minuten aufgezeigt. Abbildung 16 zeigt die Anzahl der toten und isolierten Evakuierenden für die verschiedenen Alarmszenarien. Es wird ersichtlich, dass durch Koordinatoren sowie deren Kombination mit Mundpropaganda die Anzahl der toten und isolierten Evakuierenden im Vergleich zum Nullszenario nur geringfügig reduziert wird. Bei einer Alarmierung mit Koordinatoren kommt es zu 147 Toten und 18 Isolierten, mit zusätzlicher Mundpropaganda ebenfalls zu 147 Toten, aber nur zu 5 Isolierten. Sirenen und eine Kombination mit Koordinatoren, Mundpropaganda oder beidem reduzieren die Todesfälle dagegen deutlich. Die Anzahl der Toten liegt zwischen 15 („Sirenen + Mundpropaganda“) und 29 („Kombination“). Auffällig ist, dass die Kombination der drei Alarmmethoden etwas mehr Tote verursacht als die Alarmierung durch Sirenen oder zusätzlicher Mundpropaganda. Isolierte Evakuierende gibt es in keinem der vier Alarmszenarios.

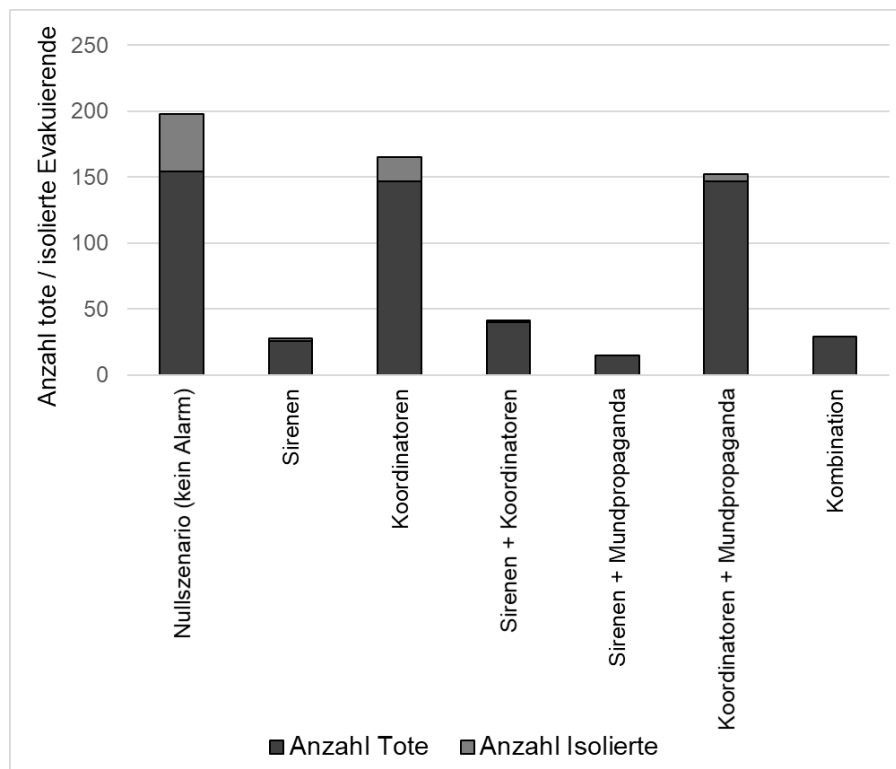


Abbildung 16: Anzahl tote und isolierte Evakuierende für die unterschiedlichen Alarmszenarien.

4.2 Vorlaufzeit

Um die zweite Forschungsfrage beantworten zu können, wurde der Einfluss der Vorlaufzeit auf die Anzahl der toten und isolierten Evakuierenden für jedes Alarmszenario untersucht. Bei der Alarmierung der Evakuierenden durch Koordinatoren gibt es bei einer Vorlaufzeit zwischen 0 und 30 Minuten ungefähr gleich viele Tote wie ohne jegliche Alarmierung (Abbildung 17). Ab 40 Minuten Vorlaufzeit beginnt die Anzahl der Toten jedoch stark zu sinken und ab 60 Minuten werden keine Toten mehr verzeichnet. Die Alarmszenarien „Sirenen“, „Sirenen + Koordinatoren“, „Sirenen + Mundpropaganda“ sowie die Kombination aller drei Alarmmethoden weisen einen ähnlichen Verlauf auf. Bereits mit einer Vorlaufzeit von 10 Minuten kann die Anzahl der Toten ungefähr halbiert werden. Bei 20 Minuten liegt die Anzahl der Toten je nach Alarmszenario noch zwischen 15 und 40 Evakuierenden. Sie kann mit 50 Minuten Vorlaufzeit ganz minimiert werden.

Durch die Regressionsanalyse wird ersichtlich, dass sich die Anzahl der toten Evakuierenden relativ gut anhand der Vorlaufzeit voraussagen lässt. Dies gilt jedoch nur bis zu einer gewissen Vorlaufzeit, da Anzahl der Toten dann auf 0 sinkt, und dadurch nicht mehr direkt mit einer Zunahme der Vorlaufzeit zusammenhängt. Deshalb wurden für die Regressionsanalyse je nach Alarmszenario unterschiedlich lange Vorlaufzeiten untersucht (Tabelle 11). Alle Alarmszenarien weisen einen Korrelationskoeffizienten von ≤ -0.91 und einen P-Wert von ≤ 0.035 auf. Letzterer liegt dabei für alle Szenarien unter dem Signifikanzniveau von 0.05. Bei den Alarmszenarien „Sirenen“, „Sirenen“+ Koordinatoren“, „Sirenen + Mundpropaganda“ und „Kombination“ konnte ein exponentieller negativer Zusammenhang nachgewiesen werden. Bei der Alarmierung durch Koordinatoren sowie durch „Koordinatoren + Mundpropaganda“ handelt es sich dagegen um einen linearen Zusammenhang.

Ein ähnliches Muster weist auch der Zusammenhang zwischen der Vorlaufzeit und der Anzahl der isolierten Evakuierenden auf. Hier wird deutlich, dass auch ein Alarm welcher erst eintritt, sobald die Überflutung begonnen hat, immer noch wirksam ist. Dies zeigt sich in der unterschiedlichen Anzahl an Isolierten bei einer Vorlaufzeit von 0 Minuten (Abbildung 18). Es werden zwischen 14 Isolierten („Kombination“) und 41 Isolierten („Koordinatoren + Mundpropaganda“) verzeichnet.

Werden Koordinatoren zur Alarmierung der Evakuierenden eingesetzt, sinkt die Anzahl der Isolierten bei einer Vorlaufzeit von 10 Minuten zuerst auf 20 Evakuierende und bleibt bis zu einer Vorlaufzeit von 40 Minuten ungefähr konstant. Mit 50 Minuten Vorlaufzeit wird die Anzahl isolierter Evakuierender auf 3 reduziert, und wird dann ab 60 Minuten ganz eliminiert. Sirenen, „Sirenen + Koordinatoren“, „Sirenen + Mundpropaganda“ sowie die Kombination aller drei Alarmmethoden zeigen von Beginn an eine starke Abnahme der Anzahl Isolierter, welche nach 30 Minuten Vorlaufzeit ganz auf 0 fällt.

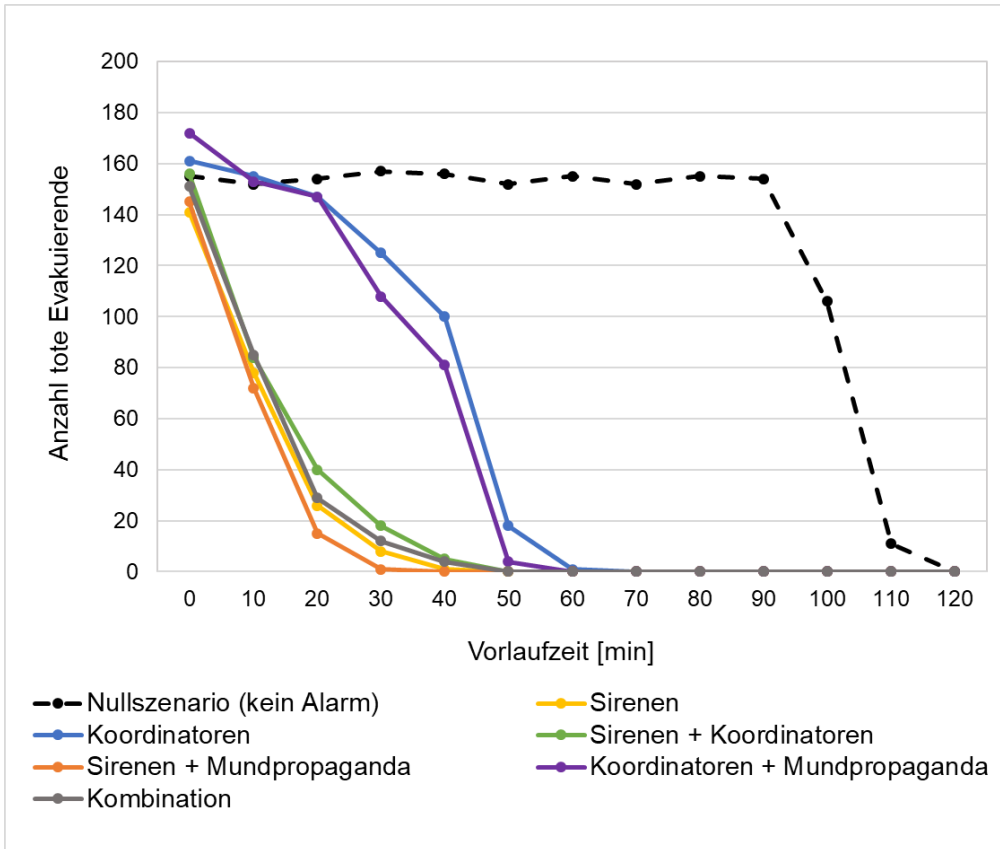


Abbildung 17: Einfluss der Vorlaufzeit auf die Anzahl der toten Evakuierenden.

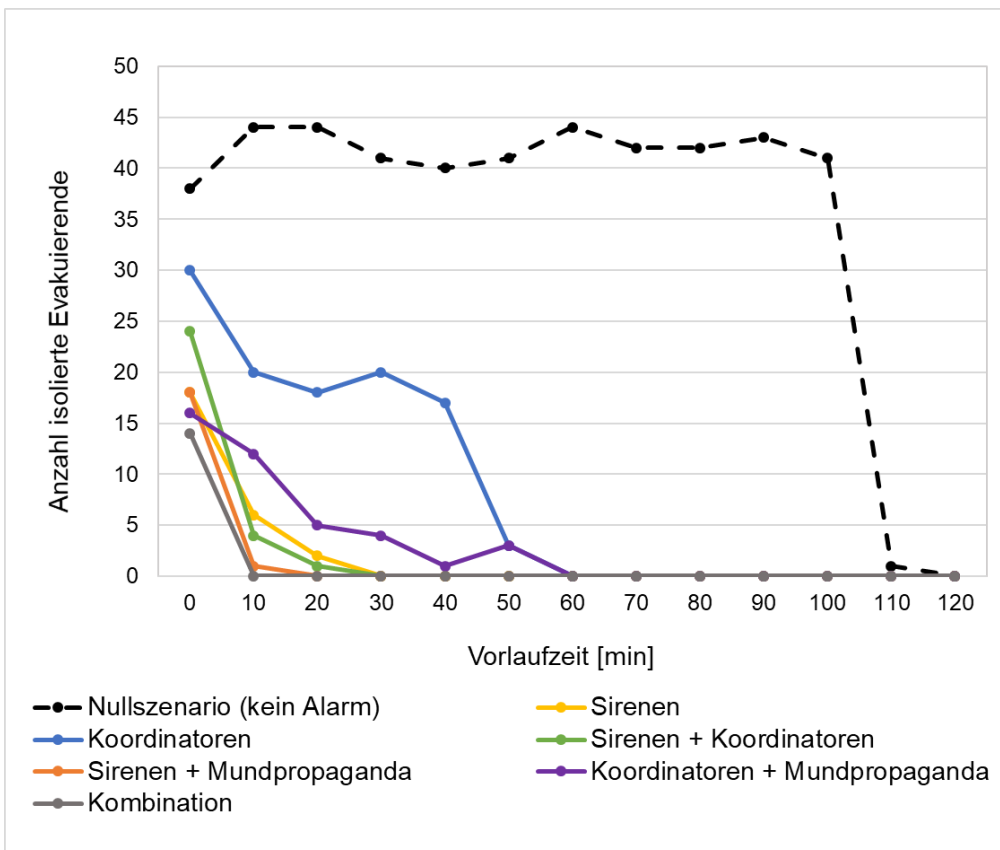


Abbildung 18: Einfluss der Vorlaufzeit auf die Anzahl der isolierten Evakuierenden.

Tabelle 11: Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen der Vorlaufzeit und der Anzahl toten Evakuierenden.

Alarmszenario	Vorlaufz.	Zus.	Korrelationsk.	R ²	Standardf.	t-Statistik	P-Wert
Sirenen	50 min	exponentiell	-0.90	0.82	27.17	-4.20	0.014
Koordinatoren	70 min	linear	-0.95	0.90	23.41	-7.61	2.68e ⁻⁴
Sirenen + Koordinatoren	50 min	exponentiell	-0.93	0.86	25.58	-4.85	0.008
Sirenen + Mundpropaganda	30 min	exponentiell	-0.97	0.93	0.7	-5.19	0.035
Koordinatoren + Mundpropaganda	60 min	linear	-0.97	0.93	20.05	-8.29	4.16e ⁻⁴
Kombination	60 min	exponentiell	-0.91	0.82	28.06	-4.32	0.012

Tabelle 12: Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen der Vorlaufzeit und der Anzahl isolierten Evakuierenden.

Alarmszenario	Vorlaufz.	Zus.	Korrelationsk.	R ²	Standardfehler	t-Statistik	P-Wert
Sirenen	30 min	exponentiell	-0.99	0.99	0.15	-13.91	0.005
Koordinatoren	60 min	linear	-0.85	0.82	4.42	-5.35	0.003
Sirenen + Koordinatoren	20 min	exponentiell	-0.99	0.99	0.17	-13.58	0.047
Sirenen + Mundpropaganda	20 min	exponentiell	-0.88	0.79	6.53	-1.95	0.302
Koordinatoren + Mundpropaganda	60 min	linear	-0.91	0.82	2.68	-4.94	0.004
Kombination	-	-	-	-	-	-	-

Mittels Regressionsanalyse konnte für manche Alarmszenarien bestätigt werden, dass ein Zusammenhang zwischen der Vorlaufzeit und der Anzahl der isolierten Evakuierenden besteht. Auch hier müssen die Untersuchten Vorlaufzeiten für jedes Alarmszenario individuell angepasst werden, um den Zusammenhang sichtbar zu machen (Tabelle 12). Zudem konnte keine Regressionsanalyse für die Kombination aller drei Alarmmethoden durchgeführt werden, da es nur ohne jegliche Vorlaufzeit bis zum Eintreffen der Flutwelle zu Toten kommt. Das Alarmszenario „Sirenen + Mundpropaganda“ weist einen P-Wert von 0.302 auf, weshalb der Zusammenhang nicht signifikant ist. Der Alarm durch Koordinatoren sowie durch „Koordinatoren + Mundpropaganda“ weisen beide einen negativen linearen Zusammenhang mit der Anzahl isolierten Evakuierenden auf. Der Korrelationskoeffizient beträgt -0.85 resp. -0.91, der P-Wert 0.005 resp. 0.004. Die Szenarien Sirenen, Koordinatoren, „Sirenen + Koordinatoren“ sowie „Koordinatoren + Mundpropaganda“ weisen einen Korrelationskoeffizient von ≤ -0.7 und einen P-Wert ≤ 0.047 auf. Demensprechend ist deren negativer exponentieller Zusammenhang zwischen der Vorlaufzeit und den isolierten Evakuierenden signifikant.

4.3 Evakuierungsbereitschaft

Um den Einfluss der Evakuierungsbereitschaft auf die Anzahl der toten oder isolierten Evakuierenden zu testen, wurden die zwei Variablen *obedience-order* (prozentualer Anteil, der nach dem ersten Alarm evakuiert) und *obedience-confirmation* (prozentualer Anteil, der nach dem zweiten Alarm evakuiert) untersucht. Dafür wurde ein Basiszenario geschaffen, in dem die eine der Variablen durchgängig 0 bleibt und die andere variiert wird. Wird der prozentuale Anteil an Evakuierenden, die sich nach dem 1. Alarm entscheiden zu evakuieren, betrachtet, wird ersichtlich, dass es einen negativen exponentiellen Zusammenhang mit der Anzahl an toten Evakuierenden gibt (Abbildung 19). Dieser weist einen Korrelationskoeffizienten von -0.93 auf und ist mit einem P-Wert von $2.98e^{-5}$ deutlich signifikant. Wird der Zusammenhang der Anzahl Evakuierenden nach dem zweiten Alarm mit den Todesfällen betrachtet, ist ein weniger starker Zusammenhang sichtbar (Abbildung 20). Es handelt sich hierbei um einen negativen linearen Zusammenhang mit einem Korrelationskoeffizienten von -0.87. Mit einem P-Wert von $5.00e^{-3}$ ist der Zusammenhang immer noch deutlich signifikant. Der Zusammenhang mit den isolierten Evakuierenden konnte nicht ermittelt werden, da es lediglich bei einem Evakuierungsanteil von 0 % nach der ersten Alarmierung zu Isolationsfällen kommt.

Tabelle 13: Regressionsanalyse des Zusammenhangs zwischen der Anzahl Evakuierenden nach dem 1. Alarm und nach dem 2. Alarm und der Anzahl toter Evakuierender.

Variabel	Zusammenh.	Korrelationsk.	R ²	Standardfehler	t-Statistik	P-Wert
<i>obedience-order</i>	exponentiell	-0.93	0.86	10.40	-7.70	$2.98e^{-5}$
<i>obedience-confirmation</i>	linear	-0.87	0.75	0.12	-5.29	$5.00e^{-3}$

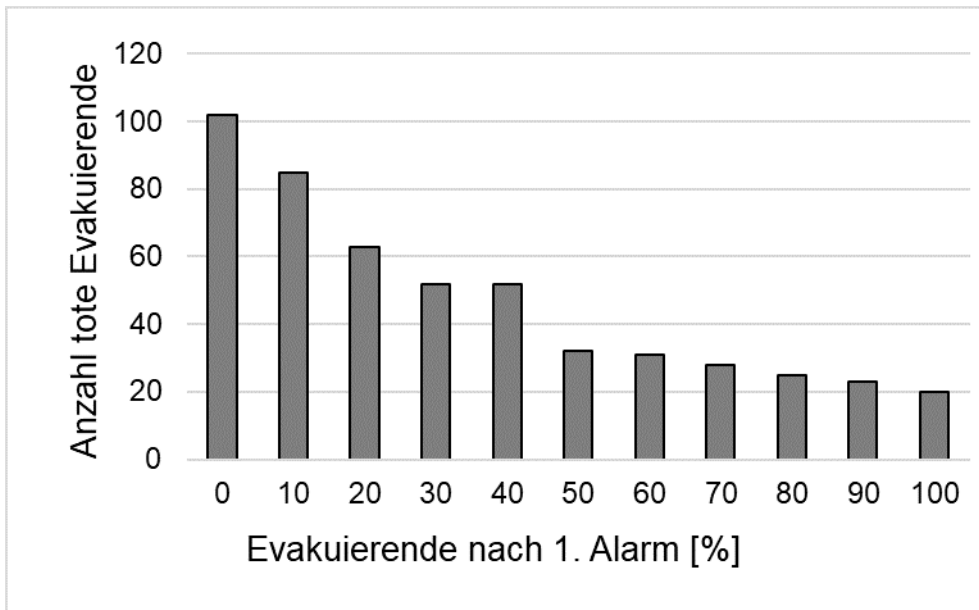


Abbildung 19: Einfluss des prozentualen Anteils der Evakuierenden, die nach dem ersten Alarm evakuieren auf die Anzahl der toten Evakuierenden. Evakuierungsanteil nach zweitem Alarm = 0 %.

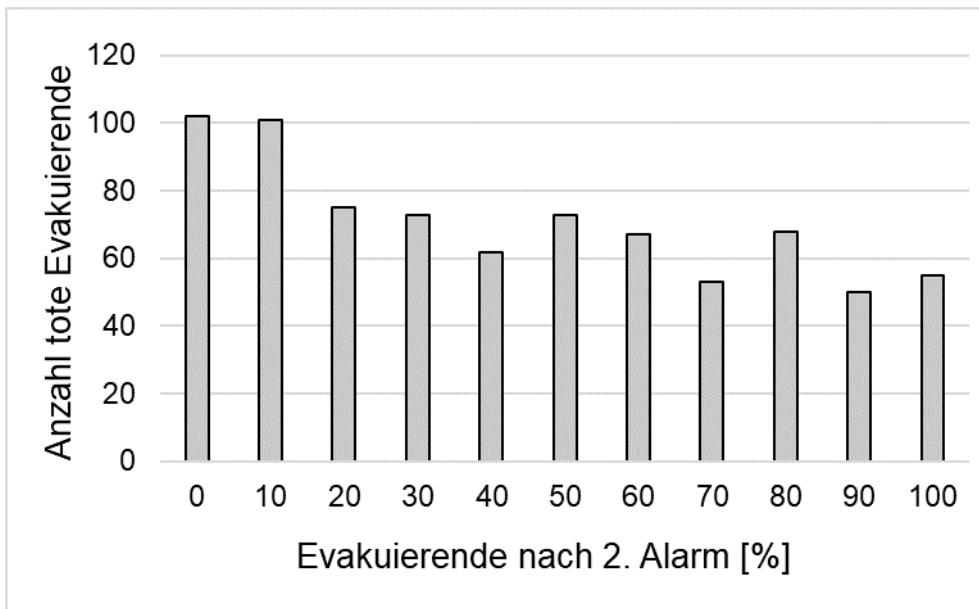


Abbildung 20: Einfluss des prozentualen Anteils der Evakuierenden, die nach dem zweiten Alarm evakuieren auf die Anzahl der toten Evakuierenden. Evakuierungsanteil nach dem ersten Alarm = 0 %.

5 Diskussion

5.1 Interpretation der Resultate

5.1.1 Sirenen

In Kapitel 4.1.1 konnte aufgezeigt werden, dass die Anzahl der toten und isolierten Evakuierenden sowohl durch die Anzahl an Alarmrepetitionen als auch durch die Anzahl der erreichten Agenten pro Zeitschritt reduziert werden kann. Dies deckt sich auch mit den Resultaten von Yang et al. (2018), die nachweisen konnten, dass eine erhöhte Warnrepetition zu mehr Möglichkeiten führt, die Warnung zu erhalten und zu evakuieren. Auffällig ist jedoch, dass es keinen grossen Unterschied in den Isolations- und Todeszahlen zwischen den Szenarien mit 6 bis 12 Alarmrepetitionen gibt. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass im Standardszenario die Überschwemmung nach 60 Minuten eintrifft, also gerade wenn der Alarm zum sechsten Mal wiederholt wurde. Der fehlende Unterschied zwischen den Szenarien könnte also dadurch zustande kommen, dass die meisten Evakuierenden bereits von der Flutwelle erfasst wurden, und der Alarm fast niemanden mehr erreicht. Dies könnte auch der Grund sein, wieso die Korrelation zwischen der Alarmrepetition und den Outputvariablen etwas tiefer ausfällt als die des prozentualen Anteils an Evakuierenden.

Zudem konnte aufgezeigt werden, dass die Alarmierung aus der Kombination von Sirenen und Koordinatoren sehr effizient ist, egal wie oft der Alarm wiederholt wird oder wie viele Evakuierende pro Zeitschritt durch den Alarm erreicht werden. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass beide Alarmsysteme einzeln bereits effizient sind: Mit Sirenenalarmen können die Evakuierenden über weite Distanzen alarmiert werden, Koordinatoren können in dem kleinen Untersuchungsperimeter mit den für das Standardszenario gewählten 20 Koordinatoren ebenfalls viele Evakuierende erreichen (Kapitel 5.1.2).

Werden Sirenen mit Mundpropaganda kombiniert, wird die Anzahl toter und isolierter Evakuierender gegenüber der alleinigen Alarmierung durch Sirenen leicht reduziert. Dies anhand der Implementierung des Alarms im Modell begründet werden. Aus dem Pool der Evakuierenden wird zufällig ausgewählt, wer durch die Sirenen alarmiert wird. Das hat zur Folge, dass Evakuierende welche sich im selben Gebäude aufhalten, nicht alle gleichzeitig alarmiert werden. Durch Mundpropaganda können anschliessend die restlichen Evakuierenden im selben Gebäude innerhalb von kurzer Zeit alarmiert werden.

5.1.2 Koordinatoren

In Kapitel 4.1.2 wurde ein negativer linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl an Koordinatoren und der Anzahl an Toten und Isolierten festgestellt. Bei im Standardszenario definierten 20 Koordinatoren kommt es nur zu einem Toten und keinen Isolierten. Das kann damit begründet werden, dass ab einer gewissen Anzahl an Koordinatoren in kurzer Zeit genug Evakuierende erreicht werden können, damit diese genügend Zeit haben, sich aus dem Perimeter zu entfernen.

Die Alarmierung durch Koordinatoren ist dahingehend effizient, als dass in einem Zeitschritt viele Evakuierende erreicht werden können, da sie sämtliche in einem Gebäude wohnenden Evakuierende auf einmal alarmieren. Die Alarmierung durch Koordinatoren ist jedoch ortsabhängig, weil sie sich zuerst immer ein Gebäude in ihrer Nähe suchen, welches sie alarmieren und von dort aus wiederum das nächste Gebäude aussuchen. Die Ergebnisse müssen jedoch auch im Kontext der Grösse des Untersuchungsperimeters betrachtet werden. Dieser umfasst eine Fläche von 1km^2 , was nur einem kleinen Teil der Überflutungsfläche entspricht. Im Ernstfall müsste ein viel grösserer Perimeter evakuiert werden. Ob dafür 20 Koordinatoren pro km^2 zur Verfügung stehen würden, ist unwahrscheinlich. Dementsprechend würde sich der Nutzen der Koordinatoren nicht so stark ausgeprägt zeigen. Jedoch wurden die Koordinatoren im Modell so implementiert, dass sie zu Fuss unterwegs sind. Im Ernstfall gäbe es für die Koordinatoren die Möglichkeit, gewisse Strecken mit dem Auto zurückzulegen. Dadurch könnten in derselben Zeit mehr Evakuierende informiert werden, was den geringeren Anteil an Koordinatoren ausgleichen würde. Durch eine Kombination von Sirenen und Koordinatoren werden noch weniger tote und isolierte Evakuierende verzeichnet. Dies kann wie schon im vorangehenden Kapitel erläutert damit begründet werden, dass die Alarmierung durch Sirenen sehr effizient ist und in Kombination mit Koordinatoren noch effizienter.

Auch durch den zusätzlichen Einsatz von Mundpropaganda kann die Anzahl der Toten und Isolierten reduziert werden, wenn auch nicht ganz so stark, wie durch den Einsatz von Sirenen. Durch Koordinatoren alleine findet nur eine einmalige Alarmierung statt, wonach sich noch nicht alle für eine Evakuierung entscheiden. Ein Vorteil der Mundpropaganda gegenüber der Alarmierung durch Koordinatoren ist, dass die Evakuierenden dadurch mehr als einmal alarmiert werden können. Da aber das Aufeinandertreffen von Evakuierenden im Modell, welches für die Weitergabe der Mundpropaganda nötig ist, vom Zufall abhängt, sinkt die Anzahl toter und isolierter Agenten nicht so stark wie bei einer zusätzlichen Alarmierung durch Koordinatoren.

5.1.3 Mundpropaganda

Mittels Regressionsanalyse konnte ein leichter negativer Zusammenhang zwischen dem prozentualen Anteil an Mundpropagandaverbreiter:innen und der Anzahl Toter und Isolierter gefunden werden (Kapitel 4.1.3). Dies wurde auch in O'Shea et al. (2020) beobachtet: Je mehr Agenten Mundpropaganda verbreiteten, desto schneller reagierten die Agenten auf die Flut. Gleichzeitig kamen die Autoren aber auch zum Schluss, dass das indirekte Warnsystem effektiver sei als eine Warnung durch Autoritäten, was in der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt werden konnte.

Durch die zusätzliche Alarmierung durch Koordinatoren findet nur eine geringe Reduktion der Todesfälle statt. Ein möglicher Erklärungsversuch ist, dass es sich bei der Mundpropaganda um eine indirekte Alarmmethode handelt. Zuerst muss ein Evakuierender durch die Sirenen oder die Koordinatoren alarmiert werden, bevor der Alarm weitergeben werden kann. Es kommt also erst in einem zweiten Schritt zu einer Alarmierung per Mundpropaganda. Zusätzlich muss

der Evakuierende zuerst auf einen anderen Evakuierenden treffen, um den Alarm weiterzuleiten. Es ist daher wahrscheinlich, dass diese zwei Bedingungen nicht eintreffen, bevor die Evakuierenden von der Flut erfasst werden. Dementsprechend ist der Einfluss des Anteils an Mundpropagandaverbreiter:innen auf die untersuchten Outputs nicht so gross wie der der anderen untersuchten Variablen.

5.1.4 Vergleich der Alarmszenarien

Bei einer Alarmierung durch Koordinatoren sowie bei zusätzlicher Mundpropaganda kommt es bei einer Vorlaufzeit von 20 Minuten im Vergleich mit dem Nullszenario zu keinen erheblichen Unterschieden in den Modelloutputs (Kapitel 4.1.4). Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Koordinatoren länger als 20 Minuten benötigen, bis genügend Evakuierende alarmiert werden, da sie sich zuerst zu den Gebäuden begeben müssen. Ausserdem können durch sie viel weniger Evakuierende pro Zeitschritt alarmiert werden als durch Sirenen. Ebenfalls kann erst durch Mundpropaganda alarmiert werden, wenn es bereits zu einer Alarmierung durch Koordinatoren gekommen ist. Die Wahrscheinlichkeit dass dies passiert ist nach 20 Minuten noch relativ klein. Bei einer Alarmierung durch Sirenen können hingegen innerhalb von 20 Minuten schon genug Evakuierende alarmiert und in Bewegung gesetzt werden, damit diese nicht von der Flutwelle getroffen werden. Wieso dass die Alarmierung durch Sirenen und Mundpropaganda etwas weniger Tote verursacht als eine Kombination der drei Alarmmethoden kann hingegen nicht abschliessend begründet werden. Möglicherweise wäre der Unterschied bei einer höheren Anzahl an Modelldurchläufen nicht mehr so stark ausgeprägt, da die zufälligen Abweichungen einzelner Modelldurchläufe besser ausgeglichen würden.

5.1.5 Vorlaufzeit

In Kapitel 4.2 konnte aufgezeigt werden, dass ein negativer Zusammenhang zwischen der Vorlaufzeit und der Anzahl der toten und isolierten Evakuierenden besteht. Dieser Zusammenhang ist je nach Alarmszenario unterschiedlich stark ausgeprägt und nur bis zu einer gewissen Vorlaufzeit beobachtbar. In den vorangegangenen Kapiteln konnte bereits aufgezeigt werden, dass die Alarmsysteme unterschiedlich effizient sind. Dementsprechend wird auch unterschiedlich viel Vorlaufzeit benötigt, um die Anzahl der toten und isolierten Agenten auf null zu reduzieren. Auch hier wird wieder ersichtlich, dass die Koordinatoren etwas weniger effizient sind als die Sirenen. Dies lässt sich daran erkennen, dass der Zusammenhang zwischen der Vorlaufzeit und den beiden Outputs für die Alarmierung durch Koordinatoren und auch bei zusätzlicher Mundpropaganda linear ist. Bei den anderen Alarmszenarien liegt ein exponentieller Zusammenhang vor.

Es wird ersichtlich, dass bei einem Einsatz von Koordinatoren sowie bei zusätzlicher Mundpropaganda die Vorwarnzeit im Vergleich zum Nullszenario halbiert werden kann, ohne tote oder isolierte Evakuierende zu riskieren. Werden Sirenen oder deren Kombination mit einem anderen Alarmsystem eingesetzt, kann die Vorlaufzeit nochmals um mindestens 10 Minuten

reduziert werden. Die geringere benötigte Vorlaufzeit wurde auch in Yang et al. (2018) nachgewiesen. Sie kamen zum Schluss, dass die in einem kurzen Intervall aufeinander folgenden Warnungen, wie sie hier durch Sirenen erfolgen, kurze Vorlaufzeiten kompensieren können.

5.1.6 Evakuierungsbereitschaft

In Kapitel 4.3 wurde aufgezeigt, dass ein negativer Zusammenhang zwischen der Evakuierungsbereitschaft und der Anzahl der toten und isolierten Evakuierenden besteht. Die Ergebnisse können mit den Resultaten aus Dawson et al. (2011) verglichen werden. Hier wurde nachgewiesen, dass je höher der prozentuale Anteil an gewarnten und danach handelnden Personen ist, desto weniger Agenten sterben in ihrem Modell. Zudem wurde in Du et al. (2017) der Einfluss der Risikotoleranz auf die Evakuierung untersucht, was als Gegenstück zur Evakuierungsbereitschaft angesehen werden kann. Hier wurde ersichtlich, dass eine höhere Risikobereitschaft mit einer höheren Anzahl an Toten einhergeht und dass selbst lange Vorlaufzeiten gegen eine zu hohe Risikotoleranz nichts ausrichten können.

Der Zusammenhang zwischen Evakuierungsbereitschaft und den Outputvariablen ist stärker, wenn es sich um den ersten Alarm handelt. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass Evakuierende welche bereits nach dem ersten Alarm evakuieren, mehr Zeit haben um sich aus dem Perimeter zu begeben. Evakuiert man erst nach dem zweiten Alarm, bleibt weniger Zeit für die Evakuierung. Zudem kann es sein, dass manche Evakuierende nie ein zweites Mal alarmiert werden, und dementsprechend die Anzahl toter und isolierter Evakuierender erhöht ist. Dies ist bei der alleinigen Alarmierung durch Koordinatoren immer der Fall. Aber auch bei anderen Alarmszenarien kann es vorkommen, dass einige Evakuierende nur einmal gewarnt werden.

5.2 Kritik

5.2.1 Einschränkungen der untersuchten Szenarios in Kandersteg

Agentenbasierte Modelle wurden zwar schon mehrfach dazu verwendet, Überflutungsszenarien und die daraus folgenden Evakuierungen zu modellieren (vgl. Kapitel 1.2.3). Bisher wurden jeweils Szenarien untersucht, bei denen die Überschwemmung nur langsam voranschreitet, beispielsweise Küstenhochwasser (Dawson et al. 2011; O'Shea et al. 2020). In der vorliegenden Arbeit wird dagegen ein Szenario untersucht, bei dem die Überflutung nur wenig Zeit für die Evakuierung ermöglicht. Zudem ist innerhalb von zwei Zeitschritten fast der gesamte Untersuchungsperimeter überschwemmt, was der Evakuierung wenig Raum lässt. Dementsprechend ist es schwierig, Aussagen über die Zusammenhänge der einzelnen Variablen zu treffen, wenn sich die Dynamik zwischen den Variablen gar nicht erst bemerkbar machen kann, da die Flut bereits schnell und grossflächig eintrifft.

Wie in Kapitel 1.3 erläutert, dauert es bis zu einem Jahr, bis genug Seewasser aufgestaut wäre, um bei einem weiteren mittelgrossen Felssturz zu überlaufen. Dies könnte schon frühzeitig erkannt werden, und dementsprechend eine vorsorgliche Evakuierung Kanderstegs geplant und

durchgeführt werden. Dass den Evakuierenden zwischen null und zwei Stunden bleiben um sich aus dem Gefahrenperimeter zu begeben, ist dementsprechend unrealistisch kurz. Hätte man die Vorlaufzeit jedoch verlängert, hätte man den Zusammenhang zwischen den gewählten Variablen und der Anzahl an toten und isolierten Evakuierenden nicht untersuchen können, da es weder Tote noch Isolierte gegeben hätte.

Zudem wird die Vorlaufzeit im Modell als die Zeit definiert, die die Evakuierenden zwischen dem Alarm und dem Eintreffen der Flut im Untersuchungsperimeter haben. Bei der Betrachtung der hydrologischen Modellierung für den ganzen Überschwemmungsperimeter (dieser verläuft vom Oeschinensee bis in den Thunersee) wird jedoch ersichtlich, dass die Flutwelle vom Ausbruch aus dem Oeschinensee bis zum Erreichen des Perimeters nochmals zusätzliche 30 Minuten benötigen würde. Das heisst, dass die Evakuierenden selbst ohne jegliche Vorlaufzeit 30 Minuten zur Verfügung hätten, um sich aus dem Perimeter zu begeben.

Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass die Evakuierenden als gerettet gelten, wenn sich diese ausserhalb des Untersuchungsperimeters begeben können, bevor sie von der Flutwelle erfasst werden. Im Ernstfall wären sie jedoch ausserhalb des Untersuchungsperimeters noch nicht in Sicherheit, da sich das Hochwasser fast über den gesamten Dorfkern ausbreiten würde. Um die hier erlangten Erkenntnisse tatsächlich auf den Fall Kandersteg anwenden zu können, müsste man die Evakuierung des gesamten Gemeindegebiets modellieren. Damit stösst man jedoch an die Grenzen der Rechenkapazität von NetLogo.

5.2.2 Einschränkungen des Modellaufbaus

Bei der erstellten hydrologischen Modellierung handelt es sich um ein unkalibriertes, nicht verifiziertes und nicht validiertes Modell. Ausserdem wird die Überflutung ausschliesslich mit Wasser gerechnet, ohne Geschiebe miteinzubeziehen. Laut Zimmermann & Hunziker (2020) wäre eine solche Flutwelle jedoch auch geschiebeführend. Deswegen sind die modellierten Fliesstiefen nur grobe Annäherungen an die Fliesstiefen des tatsächlichen Hochwassers. Da der Fokus auf der agentenbasierten Modellierung der Evakuierung lag und nicht auf dem hydrologischen Modell, wurde diese Ungenauigkeit akzeptiert.

Ein agentenbasiertes Modell kann niemals komplett validiert oder verifiziert werden (Grimm & Railsback 2005). Das Modell wurde lediglich intern validiert, indem bei der Sensitivitätsanalyse jeweils ein Nullszenario mitgerechnet wurde. Dementsprechend sind die Ergebnisse, die in dieser Arbeit gewonnen wurden, nur im Modell selbst gültig und können nicht direkt auf andere Situationen übertragen werden.

Zudem handelt es sich bei dem hier entwickelten ABM um eine sehr stark vereinfachte Version der vor Ort stattfindenden Situation. Beispielsweise wurde dem Modell keine Höheninformation hinzugefügt. Dadurch hätte die Geschwindigkeit der Agenten angepasst werden können, je nachdem, ob sie sich hangaufwärts oder hangabwärts bewegen. Dies ist im Gemeindegebiet von Kandersteg, welches starke Höhenunterschiede aufweist, von Bedeutung. Ausserdem könnte die Höheninformation zur Routenplanung eingesetzt werden, beispielsweise indem die

Evakuierenden sich zu höheren Punkten innerhalb des Perimeters flüchten, weil dort die Wahrscheinlichkeit steigt, vor dem Hochwasser geschützt zu sein.

Zudem haben die Evakuierenden in der jetzigen Version des Modells nur drei Eigenschaften, die ihr Evakuierungsverhalten beeinträchtigen: die Zugehörigkeit zu einem Haushalt innerhalb oder ausserhalb des Perimeters, die Bereitschaft nach dem ersten, zweiten oder dritten Alarm zu evakuieren und die Möglichkeit, auf ein in der Nähe stehendes Auto zuzugreifen. Im Ernstfall wäre die Evakuierungsentscheidung noch von viel mehr Variablen abhängig, wie beispielsweise von der Haushaltszugehörigkeit, dem Geschlecht und dem Alter (Axhausen et al. 2013). Diese drei Variablen wurden den Evakuierenden zwar ursprünglich zugewiesen, jedoch konnte deren Implementierung in die Evakuierungsentscheidung aus Zeitgründen nicht umgesetzt werden.

Neben der Evakuierungsentscheidung gibt es noch weitere Verhaltensweisen, welche im Modell vernachlässigt wurden. Laut Wang et al. (2021) gibt es in der Evakuierungszeitachse eine Erkennungs- und Validierungsphase sowie eine Evaluations- und Vorbereitungsphase. Hier sind diese zwei Phasen jedoch verschmolzen, da das Erkennen und Evaluieren der Information in einem Schritt geschieht (während die Evakuierenden entscheiden, ob sie Evakuieren möchten, oder nicht). Eine Validierung der Information findet bei jenen Evakuierenden statt, die einen zweiten oder dritten Alarm benötigen, bis sie evakuieren. Eine Vorbereitungsphase findet dagegen gar nicht statt. Evakuierende können zudem im gleichen Zeitschritt alarmiert werden, entscheiden zu evakuieren, ihre Evakuierungsrouten planen, die erste Strecke zum Evakuierungspunkt zurücklegen und andere Evakuierende per Mundpropaganda alarmieren. Dieser schnelle Prozessablauf wird teilweise mit der gewählten Geschwindigkeit der Evakuierenden ausgleichen, die bei 1.2 km/h liegt. Sie kann damit begründet werden, dass ein Evakuierender in einem Zeitschritt mehrere zeitintensive Prozesse durchläuft, die dafür mit einer geringeren Ablaufgeschwindigkeit ausgeglichen werden. Trotzdem liegt die Geschwindigkeit der Evakuierenden an der unteren Grenze. Würde die Geschwindigkeit jedoch erhöht werden, wären die Evakuierenden schon zu schnell aus dem Untersuchungssperimeter raus, wodurch der Zusammenhang zwischen den einzelnen Variablen und den Outputs nicht untersucht werden könnte.

Zudem wurde das Modell in 10 Minuten Zeitschritten aufgesetzt. In jedem Zeitschritt werden die in Kapitel 3.2.6 erläuterten Prozesse immer in der gleichen Reihenfolge durchgeführt. Net-Logo ist dabei so aufgebaut, dass diese Prozesse nicht parallel, sondern immer nacheinander ablaufen. Dabei wird für jeden Prozess wieder zufällig ausgewählt, welcher Agent zuerst die Programmierbefehle ausführt (Wilensky & Rand 2015). Das hat auch zur Folge, dass zuerst alle Koordinatoren ihren Prozessablauf durchspielen, bevor dies die Evakuierenden tun. In den Zwischenschritten kann deshalb nicht miteinander interagiert oder sich gegenseitig beeinflusst werden. Im Ernstfall wäre dies natürlich möglich, da sich die Prozesse von Evakuierenden und Koordinatoren gleichzeitig und nicht hintereinander abspielen.

Des Weiteren besteht Verbesserungspotential bei der Implementierung der Alarmmethoden. Laut Kowald et al. (2012) hat die Informationsquelle zwar keinen Einfluss auf die Evakuierung. Trotzdem wäre es sinnvoll gewesen, dass die Evakuierenden, welche mindestens zwei Alarmierungen zur positiven Evakuierungsentscheidung benötigen, durch eine zweite Alarmmethode alarmiert werden müssen. So wie der Alarm jetzt implementiert ist, kann ein Evakuierender zweimal durch Sirenen oder Mundpropaganda gewarnt werden und aufgrund dessen entscheiden zu evakuieren. Im Ernstfall würde eine Person aber nach einem Sirenenalarm wahrscheinlich eine zusätzliche Quelle konsultieren, um die Echtheit des ersten Alarms bestätigen zu lassen. Ausserdem muss bei der Interpretation der Resultate bedacht werden, dass Mundpropaganda im Gegensatz zu den anderen zwei Alarmmethoden nicht direkt gesteuert werden kann. In der vorliegenden Arbeit wurde zwar untersucht, welchen Einfluss der prozentuale Anteil an Mundpropagandaverbreiter:innen hat. Dieser kann aber bei einer Evakuierung im Ernstfall nicht durch die Einsatzkräfte gesteuert werden. Eine indirekte Beeinflussung der Anzahl an Mundpropagandaverbreiter:innen könnte dadurch stattfinden, dass der Bevölkerung im Zuge der generellen Informierung über das Verhalten in Notfällen mitgeteilt wird, dass sie während der Evakuierung auch andere Personen über die Situation informieren sollen. Zuletzt wäre eine höhere Anzahl an Modelldurchläufen pro untersuchtem Szenario sinnvoll. Die für die vorliegende Arbeit verwendeten 20 Durchläufe haben sich bereits als sehr rechenintensiv herausgestellt, weshalb die Anzahl nicht erhöht werden konnte. Durch eine höhere Anzahl an Durchläufen und der anschliessenden Mittelwertbildung würden jedoch die Zufallsunterschiede der einzelnen Durchläufe geglättet werden. Dies wäre beispielsweise für den Vergleich der Alarmszenarien interessant, bei der die Kombination schlechter abgeschnitten hat als die Alarmierung durch Sirenen und Mundpropaganda. Bei einer erhöhten Anzahl an Durchläufen würde sich eventuell ein anderes Muster ergeben.

5.2.3 Einschränkungen des Standardszenarios

Das Standardszenario wurde definiert, um die Abänderungen der Variablen, die zur Beantwortung der Forschungsfragen manipuliert werden müssen, untereinander vergleichen zu können. Die Werte der Variablen wurden grösstenteils durch die Konsultation von Studien mit ähnlichem Forschungsgegenstand definiert. Im Nachhinein musste jedoch festgestellt werden, dass mehrere Probedurchläufe nötig gewesen wären, um ein optimales Standardardszenario zu definieren. Beispielsweise gab es mit einer Vorlaufzeit von 60 Minuten bei der Alarmierung durch die Kombination von Sirenen und einem zweiten Alarmsystem fast keine Tote. Deswegen konnte der Zusammenhang zwischen Input- und Outputvariablen für diese Alarmszenarien nur bedingt analysiert werden. Es ist anzunehmen, dass bei einer längeren Evakuierungszeit der Einfluss der einzelnen Variablen minimiert würde, und bei einer kürzeren Evakuierungszeit erhöht. Wäre die Vorlaufzeit stark verringert worden, wäre dies dagegen nicht mehr realistisch gewesen, da im Ernstfall, wie in Kapitel 5.2.1 erwähnt, auch ohne Alarm mindestens eine halbe Stunde vergeht, bevor die Flutwelle im Untersuchungsperimeter eintrifft.

Deshalb muss bei der Interpretation der Ergebnisse auch beachtet werden, dass die Regressionsanalyse je nach Variabel nicht für alle Alarmszenarien durchgeführt werden konnte, oder die Analyse nicht über die ganzen Daten hinweg durchgeführt wurde. Die fehlende Möglichkeit der Durchführung einer Regressionsanalyse heisst jedoch nicht, dass kein Zusammenhang zwischen den zwei untersuchten Variablen besteht. Daraus lässt sich lediglich ableiten, dass der Zusammenhang nicht mittels Regressionsanalyse ermittelt werden kann.

Nicht nur die Vorlaufzeit, sondern auch die Anzahl an Alarmrepetitionen und die Anzahl erreichter Evakuierender haben einen Einfluss auf die Effizienz des Systems. Die Quote von 90% erreichter Evakuierender ist durch die Angaben zur Sirenenabdeckung des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz (2015) begründet. Die Alarmrepetition über den ganzen Zeitraum hinweg wurde selbst gewählt, da aus den Unterlagen des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz nicht ersichtlich wurde, wie lange ein Sirenenalarm jeweils wiederholt wird. Mit dem Blick auf die Ergebnisse wäre es beispielsweise sinnvoll gewesen, den Alarm für einen Zeitschritt zu aktivieren (d.h. der Alarm würde 10 Minuten lang ertönen) und dann erst nach einem weiteren Zeitschritt ohne Alarm wieder zu aktivieren. Dies könnte damit begründet werden, dass ein Sirenenalarm immer mit einer Übermittlung von weiterführenden Informationen über das Radio einhergeht, weshalb es nötig wäre, die Sirenen jeweils zwischenzeitlich zu pausieren. Zudem entscheiden sich im Standardszenario 60% der Evakuierenden nach dem ersten Alarm zu evakuieren. Bei dem Empfang eines zweiten Alarms sind es 80 %; alle Restlichen evakuieren nach dem dritten Alarm. Da der Sirenenalarm so häufig wiederholt wird, und jeweils 90 % der Bevölkerung erreicht werden, haben sich nach zwei Zeitschritten bereits 93 % dafür entschieden, zu evakuieren. Dementsprechend ist der Effekt der beiden Variablen auf den Output minim, sobald Sirenen im Standardszenario mitgerechnet werden.

Die Anzahl an Koordinatoren wurde ebenfalls selbst gewählt, da keine Angaben zur Anzahl an Hilfskräften bei Evakuierungen gefunden wurden. Die Anzahl von 20 Koordinatoren scheint für die Grösse des Perimeters optimistisch. In den Abbildungen 12 und 13 wird ersichtlich, dass es durch den Einsatz von 20 Koordinatoren im Schnitt nur zu einem Todesfall und keinem Isolationsfall kommt. Da diese Anzahl im Standardszenario festgelegt wurde, konnte der Zusammenhang zwischen den untersuchten Variablen und den Outputs bei einer Alarmkombination nur bedingt untersucht werden, da die Alarmierung durch Koordinatoren alleine schon sehr effizient ist.

6 Schlussfolgerung

6.1 Beantwortung der Forschungsfragen

1. **Wie wirkt sich der Einsatz von drei unterschiedlichen Alarmmethoden (Sirenen, Koordinatoren, Mundpropaganda) auf die Anzahl toter oder isolierter Evakuierender in einem ausgewählten Gebiet in Kandersteg aus?**

Die Anzahl der toten und isolierten Evakuierenden kann durch den Einsatz von unterschiedlichen Alarmmethoden und deren Kombination reduziert werden. Sirenen stellen die effektivste Alarmmethode dar, gefolgt von der Alarmierung durch Koordinatoren. Den kleinsten Einfluss auf die Anzahl der toten und isolierten Evakuierenden in dem Untersuchungsperimeter übt die Mundpropaganda aus. Werden Sirenen mit einer oder beiden anderen Alarmmethoden kombiniert, kann die Anzahl der toten und isolierten am effektivsten reduziert werden.

- 1.1 **Wie wirkt sich die Anzahl der Alarmrepetitionen und der prozentuale Anteil der alarmierten Evakuierenden auf die Anzahl der toten oder isolierten Evakuierenden aus?**

Es besteht ein negativer linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl an erreichten Evakuierenden und der Anzahl der toten Evakuierenden. Bereits ab einer vierfachen Alarmrepetition treten keine Todesfälle mehr auf, insofern 90% der Evakuierenden pro Zeitschritt alarmiert werden.

Wird zusätzlich zum Sirenenalarm Mundpropaganda eingesetzt, sinkt die Anzahl der toten Evakuierenden im Verhältnis zu einer steigenden Anzahl erreichter Evakuierender schneller. Statistisch ist der Zusammenhang zwar immer noch signifikant, jedoch weniger stark ausgeprägt, als wenn lediglich Sirenen eingesetzt werden. Bei einer Verwendung von Sirenen und Koordinatoren konnte der Effekt nicht untersucht werden, da es durch die Kombination keine Todesfälle gab.

Die Anzahl erreichter Evakuierender weist einen negativen linearen Zusammenhang mit der Anzahl isolierter Evakuierender auf. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn zusätzlich noch durch Mundpropaganda gewarnt wird. Auch hier konnte der Effekt, den es möglicherweise durch zusätzliche Koordinatorenalarmierung gibt, aufgrund fehlender isolierter Evakuierender nicht untersucht werden.

- 1.2 **Wie wirkt sich die Anzahl an Koordinatoren im Untersuchungsperimeter auf die Anzahl der toten oder isolierten Evakuierenden aus?**

Es besteht ein negativer linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl Koordinatoren und der Anzahl der toten Evakuierenden. Ab einer Anzahl von 25 Koordinatoren können Todesfälle komplett vermieden werden. Dies gilt auch beim zusätzlichen Einsatz von Mundpropaganda. Werden neben Koordinatoren auch Sirenen eingesetzt, reichen bereits 10 Koordinatoren aus, um keine Todesfälle mehr zu verursachen.

Auch mit der Anzahl isolierten Evakuierenden besteht ein negativer linearer Zusammenhang. Ab 20 Koordinatoren können Isolationen komplett vermieden werden, bei zusätzlichem Einsatz von Mundpropaganda bereits ab 10. Bei einer Ergänzung mit Sirenen konnte der Zusammenhang nicht mittels Regressionsanalyse untersucht werden, da die Anzahl der toten Evakuierenden unabhängig von der Anzahl Koordinatoren 0 beträgt.

1.3 Wie wirkt sich der prozentuale Anteil an Evakuierenden, welche den Alarm per Mundpropaganda verbreiten auf die Anzahl der toten oder isolierten Evakuierenden aus?

Es besteht ein leichter negativer linearer Zusammenhang zwischen dem prozentualen Anteil an Mundpropagandaverbreiter:innen und der Anzahl toter Evakuierender. Bei einer Alarmierung durch Mundpropaganda und Koordinatoren können die Todesfälle gegenüber keiner Alarmierung nur leicht gesenkt werden, unabhängig von der Anzahl Mundpropagandaverbreiter:innen. Durch den zusätzlichen Einsatz von Sirenen werden die Todesfälle dagegen stark reduziert.

Der negative lineare Zusammenhang zwischen Mundpropagandaverbreiter:innen und der Anzahl an isolierten Evakuierender fällt etwas stärker aus. Hier kann die Anzahl Isolierter sowohl durch den Einsatz von Koordinatoren, als auch durch den zusätzlichen Einsatz von Sirenen gegenüber dem Nullszenario stark reduziert werden.

2. Welchen Einfluss hat die Vorlaufzeit auf die Anzahl der toten oder isolierten Evakuierenden in einem ausgewählten Gebiet in Kandersteg?

Der Einfluss der Vorlaufzeit auf die Anzahl toter Evakuierender variiert je nach Alarm-szenario. Bei einer Alarmierung mit Koordinatoren sowie deren Kombination mit Mundpropaganda können Todesfälle ab einer Vorlaufzeit von 60 Minuten vermieden werden. Dabei besteht ein negativer linearer Zusammenhang zwischen den beiden Variablen. Bei den restlichen Alarmszenarien (Sirenen, „Sirenen + Mundpropaganda“, „Sirenen + „Koordinatoren“, „Kombination“) wird die Anzahl der Toten bereits ab einer Vorlaufzeit von 20 Minuten drastisch reduziert und ab 50 Minuten ganz minimiert. Hierbei besteht ein negativer exponentieller Zusammenhang zwischen der Vorlaufzeit und der Anzahl der toten Evakuierenden.

Der Einfluss auf die isolierten Evakuierenden ist ähnlich dem auf die toten Evakuierenden. Die Alarmszenarien „Koordinatoren“ und „Koordinatoren + Mundpropaganda“ weisen einen negativen linearen Zusammenhang auf. Ab 60 Minuten Vorlaufzeit werden keine isolierten Evakuierenden mehr verzeichnet. Die restlichen Alarmszenarien weisen einen negativen exponentiellen Zusammenhang auf. Dabei kann die Isolation der Evakuierenden bereits ab einer Vorlaufzeit von 30 Minuten komplett vermieden werden.

3. Welchen Einfluss hat die Evakuierungsbereitschaft auf die Anzahl der toten oder isolierten Evakuierenden in einem ausgewählten Gebiet in Kandersteg?

Die Evakuierungsbereitschaft sowohl nach dem ersten, als auch nach dem zweiten Alarm weisen einen Zusammenhang mit der Anzahl an toten Evakuierenden auf. Für den ersten Alarm handelt es sich um einen negativen exponentiellen Zusammenhang. Das bedeutet, dass je höher der prozentuale Anteil an Evakuierenden ist, welche bereits nach einem Alarm evakuieren, desto tiefer liegen die Todesfälle. Zudem gibt es einen negativen linearen Zusammenhang zwischen der Anzahl Evakuierenden, welche nach dem zweiten Alarm evakuieren und den Todesfällen. Dieser ist etwas schwächer ausgeprägt als beim ersten Alarm.

Bei keiner der beiden Variablen konnte ein Zusammenhang mit der Anzahl der isolierten Evakuierenden berechnet werden. Aufgrund der kompletten Vermeidung der Isolationsfälle kann jedoch davon ausgegangen werden, dass jegliche Evakuierungsbereitschaft die Anzahl der Isolierten reduziert.

6.2 Ausblick

So wie das agentenbasierte Modell aufgebaut ist, bietet es viel Spielraum, um die Variablen näher zu untersuchen. Beispielsweise wäre es interessant, den zeitlichen Verlauf des Zusammenhangs zwischen Input- und Outputvariablen zu untersuchen. Ausserdem wurden die Variablen in dieser Arbeit weitgehendst isoliert betrachtet. Die Untersuchung der Variabelveränderung unter verschiedenen Alarmszenarien hat gezeigt, dass diese ebenfalls Einfluss auf den untersuchten Zusammenhang nehmen. Es wäre interessant, weitere solche Wechselwirkungen zu analysieren, die durch die hier durchgeführte Sensitivitätsanalyse nicht entdeckt wurden.

Wie in der Diskussion bereits erwähnt, könnte das Modell selbst noch um einige Aspekte ausgebaut werden. Um eine genauere hydrologische Modellierung zu erstellen, könnte das hydrologische Modell noch kalibriert, validiert und verifiziert werden. Zudem wäre es bei der momentanen Grösse des Perimeters sinnvoll, die Dreiecksgrösse des *quality mesh* zu reduzieren, um eine höhere Auflösung der Fliesstiefen zu erhalten. Ausserdem könnte die Fließgeschwindigkeit ebenfalls berechnet und in das agentenbasierte Modell integriert werden. Dies würde es ermöglichen, die Anzahl der Todesfälle realitätsgetreuer zu definieren, als wenn diese einzig anhand der Fliesstiefen definiert werden.

Um die Umwelt in NetLogo realistischer zu gestalten, wäre der Einbezug eines Höhenmodells sinnvoll. Dadurch könnte die Geschwindigkeit der Agenten an die Steigung angepasst werden. Zudem ermöglicht dies die Implementierung einer differenzierteren Routenplanung, beispielsweise indem höher gelegene Gebiete als Evakuierungspunkte bevorzugt werden.

Generell könnte die Evakuierungsentscheidung stark ausgebaut werden, beispielsweise durch den Einbezug sozio-demographischer Faktoren oder der Haushaltszugehörigkeit. Dazu gehört auch das Implementieren von panischem Verhalten, welches sowohl die Routenfindung als auch die Interaktion mit anderen Agenten beeinflussen würde.

Des Weiteren könnten zusätzliche Alarmmethoden implementiert und die Anwendung der bereits vorhandenen Methoden verfeinert werden. So könnte beispielsweise die Alarmierung per Alertswiss App implementiert werden, durch die Verhaltensanweisungen mitgeliefert werden, welche die Evakuierenden befolgen können. Zudem wäre es interessant, Mundpropaganda nicht nur über den direkten Kontakt mit anderen Agenten zu simulieren, sondern auch durch Textnachrichten oder Social Media. Dafür könnten die Agenten als miteinander verbundenes Netzwerk simuliert werden, worin sich die Information verbreiten kann.

Im Laufe der Arbeit wurden einige Limitationen der Modellierung mit NetLogo sichtbar. Eine Simulation für das ganze Gemeindegebiet oder sogar den ganzen Überflutungsperimeter wäre sicherlich sinnvoll, um die Dynamik während des Ernstfalles besser nachbilden zu können. Dafür müsste man aber eine leistungsfähigere agentenbasierte Software, wie beispielsweise Java Swarm, verwenden.

Ausserdem könnten die Resultate auch mit einem anderen methodischen Ansatz generiert und anschliessend mit den hier vorliegenden Resultaten verglichen werden. Eine sinnvolle Alternative wäre der *traffic assignment approach*, der jedoch noch dahingehend angepasst werden müsste, Evakuierungen zu Fuss simulieren zu können.

Zu guter Letzt kann generell hinterfragt werden, ob eine Modellierung von menschlichem Verhalten überhaupt möglich und sinnvoll ist. Da im untersuchten Beispiel der Überflutung von Kandersteg keine Daten zu ähnlichen vorangehenden Ereignissen vorliegen und ein Nachstellen des Ernstfalles unmöglich ist, bleibt die Modellierung die einzig mögliche Lösung um Erkenntnisse über den Einsatz von Alarmmethoden und die Evakuierungsentscheidungen der Personen vor Ort zu erhalten.

Quellenverzeichnis

- Abar, S., G. K. Theodoropoulos, P. Lemarinier & G. M. O'Hare (2017). „Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software“. In: *Computer Science Review* 24, S. 13–33. DOI: 10.1016/j.cosrev.2017.03.001. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574013716301198>.
- Abebe, Y. A., A. Ghorbani, I. Nikolic, Z. Vojinovic & A. Sanchez (2019). „A coupled flood-agent-institution modelling (CLAIM) framework for urban flood risk management“. In: *Environmental Modelling Software* 111, S. 483–492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815218301233>.
- Anderson, C. A. & M. G. Tittler (2014). „Development and verification of an agent-based model of opinion leadership“. In: *Implementation science : IS* 9, S. 136. DOI: 10.1186/s13012-014-0136-6. URL: <https://implementationscience.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13012-014-0136-6>.
- Axhausen, K. W., C. Dobler, M. Kowald, B. Jäggi & J. Koot (2013). „Grossräumige Evakuierung. Agenten-basierte Analyse“. In: *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung* 943. DOI: 10.3929/ethz-b-000073343. URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/73343>.
- Barendrecht, M. H., A. Viglione & G. Blöschl (2017). „A dynamic framework for flood risk“. In: *Water Security* 1, S. 3–11. DOI: 10.1016/j.wasec.2017.02.001. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468312416300232>.
- Baum, T., M. Mainberger, T. Taylor, W. Tinner, A. Hafner & R. Ebersbach (2020). „How many, how far? Quantitative models of Neolithic land use for six wetland sites on the northern Alpine forelands between 4300 and 3700 BC“. In: *Vegetation History and Archaeobotany* 29.6, S. 621–639. DOI: 10.1007/s00334-019-00768-9. URL: <https://doi.org/10.1007/s00334-019-00768-9>.
- Bernardini, G., S. Camilli, E. Quagliarini & M. D'Orazio (2017). „Flooding risk in existing urban environment from human behavioral patterns to a microscopic simulation model“. In: *Energy Procedia* 134, S. 131–140. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.549. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.549>.
- Bonabeau, E. (2002). „Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99.suppl 3, S. 7280–7287. DOI: 10.1073/pnas.082080899. URL: https://www.pnas.org/content/99/suppl_3/7280.
- Borgonovo, E., M. Pangallo, J. Rivkin, L. Rizzo & N. Siggelkow (2022). „Sensitivity analysis of agent-based models: a new protocol“. In: *Computational and Mathematical Organization Theory* 28.1, S. 52–94. DOI: 10.1007/s10588-021-09358-5. URL: <https://doi.org/10.1007/s10588-021-09358-5>.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz (2011). „Planungsgrundlage Evakuierung. Die Planung von kleinen Evakuierungen.“ Bern. URL: <https://www.babs.admin.ch/content/babs-internet/de/publikservice/downloads/unterlagen-ereignisbewaeltigung/>

- _jcr_content/contentPar/accordion/accordionItems/evakuierung/accordionPar/downloadlist/downloadItems/259_1467963837511.download/broschuereevakde.pdf.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz (2015). „Warnung, Alarmierung und Information“. Bern. URL: <https://aba.tg.ch/public/upload/assets/14590/uebersichtwarnungalarmierungde.pdf?fp=1>.
- (2017). „Neue Kanäle für Alarmierung und Ereignisinformation“. In: *Bevölkerungsschutz. Zeitschrift für Risikoanalyse und Prävention, Planung und Ausbildung, Führung und Einsatz* (31). URL: https://www.babs.admin.ch/content/babs-internet/de/publikservice/information/magazin/zeitschriftbabs.download/babs-internet/de/publications/publikationenservice/zeitschriftbevoelkerungsschutz/zeitschrift31_2018de.pdf.
 - (2022). *Integrales Risikomanagement. Bedeutung für den Schutz der Bevölkerung und ihrer Lebensgrundlagen*. Bern. URL: https://www.babs.admin.ch/content/babs-internet/de/aufgabenbabs/gefaehrdrisiken/_jcr_content/contentPar/tabs/items/dokumente/tabPar/downloadlist/downloadItems/487_1461676033419.download/88_064_d_Broschuere_Integrales_Risikomanagement.pdf.
- Bundesamt für Landestopographie, Hrsg. (2019a). *swissALTI3D. Digitales Höhenmodell der Schweiz*. URL: <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/height/alti3d.html#links>.
- Hrsg. (2019b). *SWISSIMAGE. Das digitale Farbirthofotomosaik der Schweiz*. URL: <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/images/ortho/swissimage10.html>.
 - Hrsg. (2021). *swissTLM3D. Strassen- und Wegnetz*. URL: <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlm3d.html>.
- Bundesamt für Statistik, Hrsg. (2017). *Fahrzeugbesitz der Haushalte, 2015 - Schweiz. Anzahl Autos, Motorräder, Kleinmotorräder, Mofas, Velos und E-Bikes pro Haushalt*. URL: <https://www.bfs.admin.ch/asset/de/2004957>.
- Hrsg. (2020a). *Generalisierte Grenzen 2020: Hilfsdatei*. 11947564. URL: <https://dam-api.bfs.admin.ch/hub/api/dam/assets/11947564/master>.
 - Hrsg. (2020b). *Ständige Wohnbevölkerung nach Staatsangehörigkeitskategorie, Geschlecht und Gemeinde, definitive Jahresergebnisse, 2021*. 11947564. URL: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/bevoelkerung/stand-entwicklung.assetdetail.23064816.html>.
- Burg, V., K. G. Troitzsch, D. Akyol, U. Baier, S. Hellweg & O. Thees (2021). „Farmer’s willingness to adopt private and collective biogas facilities: An agent-based modeling approach“. In: *Resources, Conservation and Recycling* 167, S. 105400. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105400. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921000070>.
- Dai, Q., X. Zhu, L. Zhuo, D. Han, Z. Liu & S. Zhang (2020). „A hazard-human coupled model (HazardCM) to assess city dynamic exposure to rainfall-triggered natural hazards“. In: *Environmental Modelling Software* 127, S. 104684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j>.

- envsoft.2020.104684. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815219304293>.
- Dawson, R. J., R. Peppe & M. Wang (2011). „An agent-based model for risk-based flood incident management“. In: *Natural Hazards* 59.1, S. 167–189. DOI: 10.1007/s11069-011-9745-4. URL: <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9745-4>.
- Di Baldassarre, G., M. Kooy, J. S. Kemerink & L. Brandimarte (2013). „Towards understanding the dynamic behaviour of floodplains as human-water systems“. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 17.8, S. 3235–3244. DOI: 10.5194/hess-17-3235-2013. URL: <https://hess.copernicus.org/articles/17/3235/2013/>.
- Du, E., S. Rivera, X. Cai, L. Myers, A. Ernest & B. Minsker (2017). „Impacts of Human Behavioral Heterogeneity on the Benefits of Probabilistic Flood Warnings: An Agent-Based Modeling Framework“. In: *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 53.2, S. 316–332. DOI: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12475>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1752-1688.12475>.
- Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (2022). *BASEMENT - A freeware simulation tool for hydro- and morphodynamic modelling*. URL: <https://basement.ethz.ch/about.html> (Zugriff: 26.05.2022).
- Fahrmeir, L., C. Heumann, R. Künstler, I. Pigeot & G. Tutz (2016). „Regressionsanalyse“. In: *Statistik: Der Weg zur Datenanalyse*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 437–475.
- Gemeinde Kandersteg (2019). *Ratgeber für Notsituationen*. Faktenblätter und Erläuterungen. GFO Kandersteg. URL: https://www.gemeindekandersteg.ch/fileadmin/user_upload/017_-_Ratgeber_Notsituationen_V5.2.pdf.
- Graf, K. & R. Riner (2019). *Kandersteg, „Spitze Stei“ Gefahrenmanagement 2019. Felsabbruch 20.12.2019: Kurzdokumentation*. Bericht Nr. 1418139.4. GEOTEST AG.
- Grimm, V. & S. F. Railsback (2005). *Individual-based Modeling and Ecology*. STU - Student edition. Princeton: Princeton University Press.
- Internationale Organisation für Standardisierung (2018). *ISO 31000:2018. Risk Management – Guidelines for principles and implementation of risk management*. Genf. URL: <https://www.iso.org/iso-31000-risk-management.html> (Zugriff: 29.11.2022).
- Kienholz, C. (2021). *Kandersteg, Rutschung „Spitze Stei“ Entwicklung Sommer 2021*. Bericht Nr. 1418139.21. GEOTEST AG.
- Kowald, M., J. Koot, C. Dobler & K. W. Axhausen (2012). „Soziales Verhalten in grossräumigen Evakuierungsereignissen in der Schweiz: Report“. In: *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung* 711. DOI: 10.3929/ethz-b-000045610. URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/45610>.
- Lämmel, G., M. Rieser & K. Nagel (2008). „Bottlenecks and congestion in evacuation scenarios: A microscopic evacuation simulation for large-scale disasters“. In: 5th Workshop on Agents in Traffic, Transportation (ATT) @ Autonomous Agents und Multiagent Systems (AAMAS)

- '08. Estoril, Portugal. URL: http://ki.informatik.uni-wuerzburg.de/~kluegl/att2008/pdf/ATT_11.pdf.
- Langton, C. G. (1984). „Self-reproduction in cellular automata“. In: *Physica D: Nonlinear Phenomena* 10.1, S. 135–144. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(84\)90256-2](https://doi.org/10.1016/0167-2789(84)90256-2). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167278984902562>.
- Lauber, S. (2006). „Agrarstrukturwandel im Berggebiet. Ein agentenbasiertes, räumlich explizites Agrarstruktur- und Landnutzungsmodell für zwei Regionen Mittelbündens“. In: *ART-Schriftenreihe* 2. DOI: 10.3929/ethz-a-005272915. URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/149501>.
- Liu, X. (2018). „City-scale evacuation management in flood scenarios, implementation and comparison of a multi-agent based approach and a traffic assignment approach“. Doktorarbeit. University of New South Wales. URL: <http://handle.unsw.edu.au/1959.4/60019>.
- Maiorani, M., G. Musolino & A. Vitiello (2012). „Traffic assignment models in road evacuation“. In: *WIT Transactions on Ecology and the Environment* 155, S. 1041–1051. DOI: 10.2495/SC120872. URL: <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/155/23186>.
- Malanson, G. P. & S. J. Walsh (2015). „Agent-based models: Individuals interacting in space“. In: *Applied Geography* 56, S. 95–98. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.009>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143622814002641>.
- Manser, P., H. Becker, S. Hörl & K. W. Axhausen (2020). „Designing a large-scale public transport network using agent-based microsimulation“. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 137, S. 1–15. DOI: 10.1016/j.tra.2020.04.011. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856420305668>.
- Medina, M., R. Huffaker, R. Muñoz-Carpena & G. Kiker (2021). „An empirical nonlinear dynamics approach to analyzing emergent behavior of agent-based models“. In: *AIP Advances* 11.3, S. 035133. DOI: 10.1063/5.0023116. URL: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0023116>.
- Medina, N., A. Sanchez & Z. Vojinovic (2016). „The Potential of Agent Based Models for Testing City Evacuation Strategies Under a Flood Event“. In: *12th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2016) - Smart Water for the Future. Procedia Engineering* 154, S. 765–772. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.581>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816319701>.
- Mordvintsev, A., V. Krzhizhanovskaya, M. Lees & P. Sloot (2014). „Simulation of City Evacuation Coupled to Flood Dynamics“. In: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*. Hrsg. von U. Weidmann, U. Kirsch & M. Schreckenberg. Cham: Springer, S. 485–499. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-02447-9_40. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-02447-9_40.
- Nägeli, C., M. Jakob, G. Catenazzi & Y. Ostermeyer (2020). „Policies to decarbonize the Swiss residential building stock: An agent-based building stock modeling assessment“. In: *Ener-*

- gy Policy* 146, S. 111814. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111814. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421520305322>.
- Northwestern University (2022a). *BehaviorSpace*. URL: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/behaviorspace.html> (Zugriff: 12. 12. 2022).
- (2022b). *NetLogo*. URL: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (Zugriff: 12. 12. 2022).
- O’Shea, T., P. Bates & J. Neal (2020). „Testing the impact of direct and indirect flood warnings on population behaviour using an agent-based model“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20.8, S. 2281–2305. DOI: 10.5194/nhess-20-2281-2020. URL: <https://nhess.copernicus.org/articles/20/2281/2020/>.
- Oh, W. S., Y. J. David & R. Muneeppeerakul (2021). „Efficiency-fairness trade-offs in evacuation management of urban floods: The effects of the shelter capacity and zone prioritization“. In: *PLoS One* 16 (6). DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253395>. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0253395>.
- Pagani, M., P. Maire, W. Korosec, N. Chokani & R. S. Abhari (2020). „District heat network extension to decarbonise building stock: A bottom-up agent-based approach“. In: *Applied Energy* 272, S. 115177. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115177. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920306899>.
- Parker, D. J. (2017). „Flood Warning Systems and Their Performance“. In: *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. DOI: 10.1093/acrefore/9780199389407.013.84. URL: <https://oxfordre.com/naturalhazardscience/view/10.1093/acrefore/9780199389407.001.0001/acrefore-9780199389407-e-84>.
- Reaney, S. M. (2008). „The use of agent based modelling techniques in hydrology: determining the spatial and temporal origin of channel flow in semi-arid catchments“. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 33.2, S. 317–327. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1540>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/esp.1540>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/esp.1540>.
- Riner, R. & C. Kienholz (2021). *Kandersteg, „Spitze Stei“. Sicherheitskonzept Gemeinde*. Bericht Nr.1418139.6a. GEOTEST AG.
- Ronchi, E., S. Arias, S. La Mendola & N. Johansson (2019). „A fire safety assessment approach for evacuation analysis in underground physics research facilities“. In: *Fire Safety Journal* 108, S. 102839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102839>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711218304958>.
- Sättele, M., M. Bründl & D. Straub (2012). „Classification of warning systems for natural hazards“. In: *Huber, Moormann & Proske: Proceedings of the 10th International Probabilistic Workshop*. Stuttgart.
- Schelling, T. C. (1971). „Dynamic models of segregation“. In: *The Journal of Mathematical Sociology* 1.2, S. 143–186. DOI: 10.1080/0022250X.1971.9989794. URL: <https://doi.org/10.1080/0022250X.1971.9989794>.

- Scherr, W., P. Manser, C. Joshi, N. Frischknecht & D. Métrailler (2020). „Towards agent-based travel demand simulation across all mobility choices – the role of balancing preferences and constraints“. In: *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 20.4, S. 152–172. DOI: 10.18757/ejtir.2020.20.4.4463. URL: <https://journals.open.tudelft.nl/ejtir/article/view/4463>.
- Schmidt, A., G. Mack, S. Mann & J. Six (2021). „Reduction of nitrogen pollution in agriculture through nitrogen surplus quotas: an analysis of individual marginal abatement cost and different quota allocation schemes using an agent-based model“. In: *Journal of Environmental Planning and Management* 64.8, S. 1375–1391. DOI: 10.1080/09640568.2020.1823344.
- Shirvani, M., G. Kesserwani & P. Richmond (2020). „Agent-based modelling of pedestrian responses during flood emergency: mobility behavioural rules and implications for flood risk analysis“. In: *Journal of Hydroinformatics* 22.5, S. 1078–1092. DOI: 10.2166/hydro.2020.031. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09640568.2020.1823344>.
- Simonovic, S. & S. Ahmad (2005). „Computer-based Model for Flood Evacuation Emergency Planning“. In: *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards* 34.1, S. 25–51. DOI: 10.1007/s11069-004-0785-x. URL: <https://ideas.repec.org/a/spr/nathaz/v34y2005i1p25-51.html>.
- Thiele, J., W. Kurth & V. Grimm (2011). „Agent- and Individual-based Modelling with NetLogo: Introduction and New NetLogo Extensions“. In: *Gemeinsame Tagung mit der Sektion Forstliche Biometrie und Informatik im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten*. Bd. 22. Göttingen.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2014). *Terminology. Early Warning Systems*. URL: <https://www.undrr.org/terminology/early-warning-system> (Zugriff: 22.06.2022).
- Urban, D. & J. Mayerl (2011). *Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Anwendung*. 4. Aufl. Bd. 2. Wiesbaden: Springer.
- van Dyke Parunak, H., R. Savit & R. L. Riolo (1998). „Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and Users' Guide“. In: *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*. Hrsg. von J. S. Sichman, R. Conte & N. Gilbert. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 10–25. DOI: https://doi.org/10.1007/10692956_2. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/10692956_2.
- Wang, Y., M. Kyriakidis & V. N. Dang (2021). „Incorporating human factors in emergency evacuation – An overview of behavioral factors and models“. In: *International Journal of Disaster Risk Reduction* 60, S. 102254. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2021.102254. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221242092100220X>.
- Wang, Z., J. Huang, H. Wang, J. Kang & W. Cao (2020). „Analysis of Flood Evacuation Process in Vulnerable Community with Mutual Aid Mechanism: An Agent-Based Simulation Framework“. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17.2. DOI: 10.3390/ijerph17020560. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/2/560>.

- Watik, N. & L. Jaelani (2019). „Flood Evacuation Routes Mapping Based on Derived- Flood Impact analysis from Landsat 8 Imagery Using Network Analyst Method“. In: *Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-3/W8, S. 455–460. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-455-2019>.
- Wilensky, U. & W. Rand (2015). *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo*. Illustrated Edition. Cambridge: The MIT Press.
- Wilks, D. S. (2019). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 4. Edition. Amsterdam: Elsevier.
- Yang, L., J. Schaffran, D. Süsler, R. Dawson & Y. Chen (2018). „Assessment of Flood Losses with Household Responses: Agent-Based Simulation in an Urban Catchment Area“. In: *Environmental Modeling and Assessment*, S. 1–20. DOI: 10.1007/s10666-018-9597-3. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10666-018-9597-3>.
- Zhuo, L. & D. Han (2020). „Agent-based modelling and flood risk management: A compendious literature review“. In: *Journal of Hydrology* 591, S. 125600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125600>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169420310611>.
- Zimmermann, M. & G. Hunziker (2020). *Spitze Stei. Szenarien Sekundärprozesse*. Faktenblätter und Erläuterungen. Bericht Nr.1418139.6a. Schwellenkoporation Kandersteg.

Anhang

Anhang A: Link zum GitHub Repository

<https://github.com/michelegrindat/masterthesis>

Anhang B: BASEMENT Commandfile

```
PROJECT {
title = OeschinenseeFlutwelle
author = MichèleGrindat
date = 05.04.2022
}
DOMAIN {
multiregion = BernerOberland
PHYSICAL_PROPERTIES {
gravity = 9.81
viscosity = 0.000001
rho_fluid = 1000
}
BASEPLANE_2D {
region_name = BernerOberland
GEOMETRY {
type = 2dm
file = grid2.2dm
STRINGDEF {
name = Inflow
node_ids = (2 8669 8715 8569 8667 8324 8788 8752 8480 22666 3)
upstream_direction = left
}
STRINGDEF {
name = Outflow
node_ids = (20245 23956 21186 21185 21713 21738 50 21677 21604 21579 21682)
upstream_direction = left
}
}
TIMESTEP {
start_time = 0.0
total_run_time = 39600
CFL = 0.9
minimum_time_step = 0.001
}
```

```
HYDRAULICS {
BOUNDARY {
type = hydrograph
string_name = Inflow
file = Inflow_stationary.txt
slope = 10
}
INITIAL {
type = dry
}
FRICTION {
type = strickler
default_friction = 30
input_type = index_table
index = (1 2 3)
friction = (63 60 60)
wall_friction = off
}
PARAMETER {
simulation_scheme = exp
riemann_solver = exact
minimum_water_depth = 0.05
}
BOUNDARY {
string_name = Outflow
type = zero_gradient
}}
OUTPUT {
console_time_step = 60
restart_time_step = 1E32
SPECIAL_OUTPUT {
output_time_step = 600
type = element_centered
format = shape
values = (depth) } } }
```

Anhang C1: Eigenschaften der Koordinatoren

Eigenschaft	Bedeutung	Typ	Wertebereich	Zustand
next-evacuation-house	Gebäude das als nächstes alarmiert wird	Koordinaten	-296 – 296	dynamisch
evacuation-point	Evakuierungspunkt welcher nach erfolgreicher Alarmierung aller angesteuert wird	Koordinaten	-296 – 296	dynamisch
geb-id-c	Gebäude-ID des zu alarmierenden Gebäudes	integer	0 – 1543	dynamisch
next-patch-cor	Nächster Patch der angesteuert wird	Koordinaten	-296 – 296	dynamisch
isolated?	Wird <i>true</i> sobald Bedingungen für Isolation erfüllt sind	boolesch	true/false	dynamisch

Anhang C2: Eigenschaften der Autos

Eigenschaft	Bedeutung	Typ	Wertebereich	Zustand
car-id	Definiert Zugehörigkeit zu Gebäude	integer	0 – 1543	statisch
seats	Anzahl Sitzplätze	integer	5	statisch
evacuues-no	Anzahl Evakuierende im Auto	integer	0 – 5	dynamisch
evacuation-point	Evakuierungspunkt der welcher angesteuert wird	Koordinaten	-296 – 296	dynamisch
last-patch-car	Letzter besuchter Patch	Koordinaten	-296 – 296	dynamisch
next-patch-car	Nächster Patch der angesteuert wird	Koordinaten	-296 – 296	dynamisch
stuck?	<i>true</i> wenn Auto isoliert ist	boolesch	true/false	dynamisch
evacuated?	<i>true</i> wenn an evacuation-point angelangt	boolesch	true/false	dynamisch

Erklärung

gemäss Art. 30 RSL Phil.-nat. 18

Name/Vorname: Grindat/Michèle

Matrikelnummer: 16-131-286

Studiengang: Geographie Master Mono

Bachelor

Master

Dissertation

Titel der Arbeit: Welchen Effekt haben unterschiedliche Alarmmethoden auf den Ausgang von Evakuierungen?
Agentenbasierte Modellierung eines hochwassergefährdeten Gebiets in Kandersteg.

LeiterIn der Arbeit: Dr. Andreas Zischg

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäss aus Quellen entnommen wurden, habe ich als solche gekennzeichnet. Mir ist bekannt, dass andernfalls der Senat gemäss Artikel 36 Absatz 1 Buchstabe r des Gesetzes vom 5. September 1996 über die Universität zum Entzug des auf Grund dieser Arbeit verliehenen Titels berechtigt ist.

Für die Zwecke der Begutachtung und der Überprüfung der Einhaltung der Selbständigkeitserklärung bzw. der Reglemente betreffend Plagiate erteile ich der Universität Bern das Recht, die dazu erforderlichen Personendaten zu bearbeiten und Nutzungshandlungen vorzunehmen, insbesondere die schriftliche Arbeit zu vervielfältigen und dauerhaft in einer Datenbank zu speichern sowie diese zur Überprüfung von Arbeiten Dritter zu verwenden oder hierzu zur Verfügung zu stellen.

Ort/Datum Bern, 20.01.2023

Unterschrift

M. Grindat