

Steinschlagrisiko

Challenge cwm1

16. Januar 2024



Nils Walker, Benjamin Nater, Lukas Rinke, Kimon Arvanitis

¹ Bild erstellt mit DALL-E 3

Abstract

Die Kantonsstrasse unterhalb von Schiers (GR) sieht sich zunehmend mit Steinschlagrisiken konfrontiert. Steine lösen sich von zwei verschiedenen Stellen an einer Felswand, gefährden Verkehrsteilnehmer:innen und stellen die Effektivität der veralteten Steinfangnetze in Frage. Eine dringende Überholung dieser Netze ist geplant, kann aber frühestens in einem Jahr umgesetzt werden. Vor diesem Hintergrund wurde unser Projektteam beauftragt, das Risiko von Todesfällen durch Steinschlag zu analysieren und zu bewerten.

Unsere Datenanalyse, basierend auf drei Monaten Feldarbeit von Geologen:innen, umfasst 100 Beobachtungen von Steinschlägen. Das Projektteam hat detaillierte Monte Carlo-Simulationen durchgeführt, um das Steinschlagrisiko über einen Zeitraum von über einer Million Jahren zu modellieren. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die simulierten Daten die realen Datenverteilungen grösstenteils wiedergeben. Besonders bei den Geschwindigkeits- und Delta-Zeit-Daten gibt es eine hohe Übereinstimmung mit den Originaldaten, während bei der Masse leichte Abweichungen zu beobachten sind. Das gerechnete Modell kommt zum Schluss, dass die jährliche Wahrscheinlichkeit eines Todesfalls durch Steinschlag bei 0.027% liegt, was über dem vom Kanton geforderten Grenzwert von 0.01% liegt.

Angesichts dieses Ergebnisses und der bevorstehenden Verzögerung bei der Installation neuer Sicherheitsnetze empfiehlt das Projektteam dringend, die betroffene Kantonsstrasse zum Schutz der Öffentlichkeit vorübergehend zu schliessen. Zusätzlich raten wir zur Beschleunigung des Prozesses zur Erneuerung der Steinfangnetze, um langfristig die Sicherheit auf der Strasse zu gewährleisten.

Inhaltsverzeichnis

Inhalt

1. Einleitung.....	4
2. Datenanalyse	4
2.1 Ausgangslage der Daten	4
2.2 Verteilungen der Variablen	6
3. Simulation der Steinschlagereignisse	7
4. Simulation des Netzbruches und Treffer.....	10
5. Empfehlung und Begründung.....	11

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Deskriptive Statistiken	5
Tabelle 2: Deskriptive Statistiken	5
Tabelle 3: Verteilungen der Zufallsvariablen.....	6

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Scatterplot - Masse und Geschwindigkeit	5
Abbildung 2: Visuelle Datenanalyse der Geschwindigkeit	7
Abbildung 3: QQ-Plots Geschwindigkeitsverteilungen in Zone 1.....	7
Abbildung 4: Evaluation der Simulation Zone 1	8
Abbildung 5: Evaluation der Simulation Zone 2	9
Abbildung 6: Jährliche Wahrscheinlichkeit der Todesfälle pro simulierte Jahre	10

1. Einleitung

Die Sicherheit der Kantonsstrasse unterhalb Schiers (GR) steht gegenwärtig im Fokus aufgrund zunehmender Steinschlaggefahr. Aktuelle Ereignisse zeigen, dass Steine von zwei unterschiedlichen Stellen einer Felswand abrutschen, was potenziell gefährliche Situationen für Verkehrsteilnehmer:innen verursacht. Der betroffene Strassenabschnitt wird derzeit von Steinfangnetzen geschützt, diese sind jedoch veraltet und weniger wirksam. Trotz laufender Planungen für den Ersatz dieser Netze kann die Umsetzung frühestens in einem Jahr erfolgen.

In Anbetracht wiederholter Steinschlagereignisse in den letzten Monaten besteht die Besorgnis, dass die bestehenden Sicherheitsnetze das Risiko für Verkehrsteilnehmenden nicht mehr ausreichend mindern können. Die Unsicherheit beunruhigt die Bevölkerung sowie Kantonsingenieur:innen. Zudem könnten Verzögerungen bei Ersatzmassnahmen zu weiteren vergleichbaren Ereignissen führen, bevor neue Schutzvorrichtungen installiert werden.

In diesem Bericht widmen wir uns der Aufgabe, anhand vorhandener Daten die Wahrscheinlichkeit von Todesfällen durch Steinschlag zu berechnen. Diese Berechnungen sind essentiell für die Entscheidung, ob die Kantonsstrasse vorübergehend gesperrt werden sollte, um die Sicherheit der Verkehrsteilnehmenden zu gewährleisten. Eine Schlüsselanforderung des Kantons an das Projektteam besteht darin, nachzuweisen, dass die jährliche Wahrscheinlichkeit von Todesfällen infolge von Steinschlag geringer ist als 0.0001 (0.01%). Anderenfalls müsse die betroffene Strasse zum Schutz der Bevölkerung geschlossen werden.

Der Bericht ist wie folgt strukturiert, in Kapitel 2 werden die Ausgangsdaten analysiert und die entscheidenden Annahmen bezüglich der Verteilung in den Daten beschrieben. In Kapitel 3 erörtern wir die Monte Carlo Simulation und beschreiben dann in Kapitel 4 die Berechnung des Steinschlagrisikos. Basierend auf den Berechnungen argumentieren wir in Kapitel 5 unsere Empfehlung und schliessen den Bericht mit einem Fazit ab.

Dieser Bericht gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 erfolgt eine sorgfältige Analyse der Ausgangsdaten, wobei wir die entscheidenden Annahmen hinsichtlich der Verteilungen in den Daten detailliert darlegen. Kapitel 3 widmet sich der Durchführung und Erörterung der Monte Carlo Simulation. Anschliessend wird in Kapitel 4 die Methodik zur Berechnung des Steinschlagrisikos beschrieben. Basierend auf diesen Berechnungen leiten wir in Kapitel 5 unsere Empfehlungen ab und begründen diese.

2. Datenanalyse

2.1 Ausgangslage der Daten

Für die Planung der neuen Sicherheitsnetze wurden Geolog:innen beauftragt, während drei Monaten Daten zu den Steinschlagereignissen aufzunehmen. Dabei wurden die Geschwindigkeit und die Masse der Steine festgehalten sowie der Zeitpunkt der Ereignisse registriert. Die Geschwindigkeiten der Steine wurden präzise von einem Radar dokumentiert und die Masse der Steine berufen sich auf Expert:innenn-Schätzungen der Geolog:innen. Für die Analyse hat das Projektteam zwei Datensätze für die Steinschläge der beiden Ablösungszonen während der drei Monate erhalten. Die Datensätze verfügen über 68 Observationen für die erste Ablösungszone respektive 32 Observationen für die zweite Ablösungszone. In Tabelle 1 und 2 werden die deskriptiven Statistiken der beiden Datensätze

zusammengefasst. Auf Anhieb sehen wir, dass die durchschnittliche Masse der Steine in der ersten Ablösungszone ($Mean = 628.63 \text{ kg}$) deutlich grösser ist als in der zweiten Ablösungszone ($Mean = 104.07$).

Deskriptive Statistiken – Zone 1					
Statistische Masse	N	Mean	St. Dev	Min	Max
Masse [kg]	68	628.63	695.88	12.0	3104.0
Geschwindigkeit [m/s]	68	8.79	1.99	3.6	14.1
Δ -Zeit	68	30.1	27.79	0.0	113

Tabelle 1: Deskriptive Statistiken

Zudem stellen wir fest, dass die durchschnittliche Geschwindigkeit der Steine ($Mean = 37.79 \text{ m/s}$) in der zweiten Ablösungszone höher ist als in der ersten ($Mean = 8.79 \text{ m/s}$). Ergänzend stellen wir fest, dass die Abstände zwischen den Steinschlagereignissen (Δ -Zeit²) in der zweiten Ablösungszone wesentlich grösser sind. In Tabelle 2 sehen wir, dass der leichteste Stein unter 0.0 kg wiegt ($Min = 0.0 \text{ kg}$). Wir gehen davon aus, dass es sich dabei um einen sehr kleinen Stein handelt, der vom Radar registriert wurde.

Deskriptive Statistiken – Zone 2					
Statistische Masse	N	Mean	St. Dev	Min	Max
Masse [kg]	32	99.25	104.07	0.0	406.0
Geschwindigkeit [m/s]	32	37.79	5.4	24.9	46.5
Δ -Zeit	32	64.25	55.53	0.0	212.0

Tabelle 2: Deskriptive Statistiken

Die deutlichen Unterschiede in den Daten der beiden Ablösungszonen lassen sich ebenfalls im Scatterplot erkennen, wie in Abbildung 1 dargestellt wird. Hierbei werden die Masse (auf der X-Achse) und die Geschwindigkeit (auf der Y-Achse) aller Steine abgebildet. Die Steine sind dabei nach ihrer jeweiligen Ablösungszone farblich unterschieden, was es uns ermöglicht, zu identifizieren, welche Steine aus welcher Zone stammen.

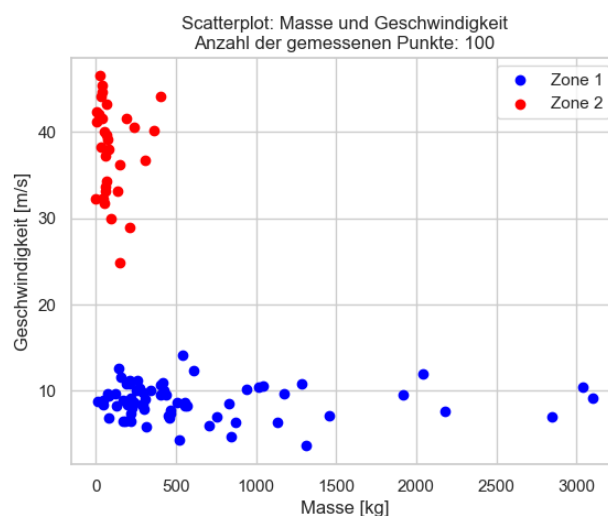


Abbildung 1: Scatterplot - Masse und Geschwindigkeit

²Die Originaldaten beinhalteten einen Zeitstempel sowie das Datum des Steinschlags. Wir haben diese kombiniert und für die Veranschaulichung der Verteilung die Abstände zwischen den Steinen verwendet.

Ein Ingenieur:innenbüro hat geschätzt, dass Sicherheitsnetze bis zu einer Aufprallenergie von 1000 kJ sicher sind. Diese Aufprallenergie ist jedoch auch von den bereits im Netz liegenden Steinen beeinflusst. Falls bereits Steine mit einer Gesamtmasse über 2000 kg in den Sicherheitsnetzen liegen, können die Netze nur noch eine Aufprallenergie von 500 kJ auffangen. Die Steine werden zudem von einem Unterhaltsteam mit einer Reaktionszeit von 24 Stunden entfernt. Das tägliche Verkehrsaufkommen beträgt insgesamt 1200 Autos wobei es auf der Strecke nicht zu Stau kommt und die Tempolimits 60 km/h beträgt.

2.2 Verteilungen der Variablen

Für die Durchführung der Simulation, deren detaillierte Beschreibung im Kapitel 3 erläutert wird, ist ein tiefgehendes Verständnis der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der verschiedenen Variablen zentral. Denn diese Verteilungen sowie die zugehörigen Parameter bilden die Grundlage für die Simulation. Das Projektteam geht davon aus, dass die Steine aus beiden Ablösungszonen in das gleiche Netz fallen werden. Aufgrund der starken Unterschiede in den Daten der beiden Zonen erfolgt eine separate Analyse der Verteilungen für jede Variable innerhalb der jeweiligen Ablösungszone. In Tabelle 3 präsentieren wir die Ergebnisse dieser Analyse und führen die Variablen der beiden Zonen sowie ihre entsprechenden Verteilungen auf. Exemplarisch möchten wir am Beispiel der Variable *Geschwindigkeit [m/s]* aus der ersten Zone erläutern, wie wir zu den Ergebnissen der Tabelle 3 gelangt sind. Detaillierte Analysen zu den weiteren Variablen finden sich im beigefügten Jupyter Notebook.

Verteilungen der Zufallsvariablen	
Zone 1	Verteilung
Masse [kg]	Gammaverteilung
Geschwindigkeit [m/s]	Normalverteilung
Δ -Zeit	Exponentialverteilung
Zone 2	Verteilung
Masse [kg]	Gammaverteilung
Geschwindigkeit [m/s]	Normverteilung
Δ -Zeit	Exponentialverteilung

Tabelle 3: Verteilungen der Zufallsvariablen

Im ersten Schritt analysierten wir zuerst die Variablen visuell. In Abbildung 2 wird das Histogramm sowie ein Boxplot der Variable *Geschwindigkeit [m/s]* dargestellt. Aus dieser Visualisierung schlussfolgern wir, dass die Geschwindigkeitsdaten in der ersten Zone eine relativ symmetrische Verteilung um den Medianwert aufweisen. Sie zeigen eine konsistente Streuung und weisen keine signifikanten Ausreisser auf. Zur weiteren Untersuchung haben wir in Abbildung 3 Quantil-Quantil-Diagramme (QQ-Plots) erstellt, die darauf abzielen, die Übereinstimmung der beobachteten Daten mit einer Normal- bzw. Gammaverteilung zu prüfen. Die QQ-Plots zeigen, dass die Geschwindigkeitsdaten aus Zone 1 gut zu diesen theoretischen Verteilungen passen, mit geringfügigen Abweichungen an den Enden der Verteilung. Da es ohne zusätzliche Kontextinformationen schwierig ist, eine endgültige Entscheidung über die passendere Verteilung zu treffen, haben wir anschliessend mit der Fitter-Funktion in Python die fünf am besten passenden Verteilungen für diese Variable ermittelt. Sowohl die Normalverteilung als auch die Gammaverteilung wurden als mögliche Modelle identifiziert. Wobei Normalverteilung als die geeignetste Verteilung identifiziert wurde.

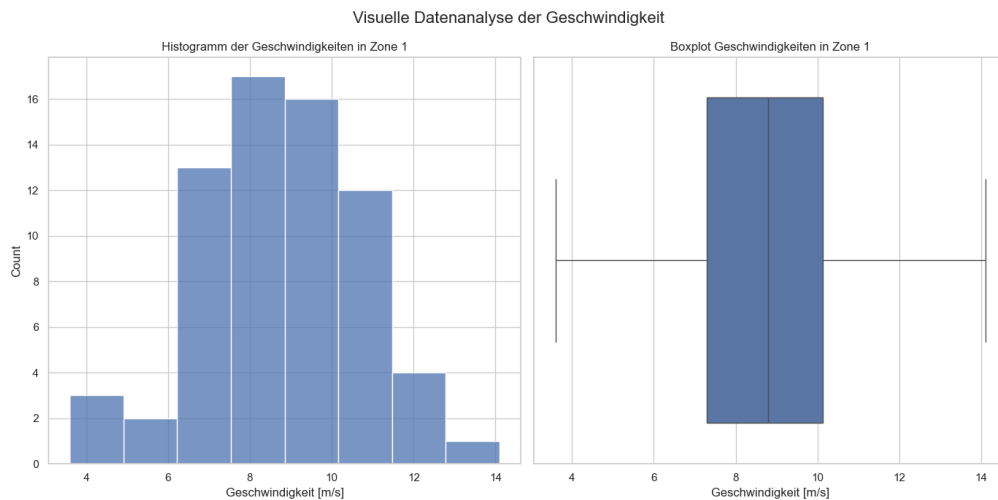


Abbildung 2: Visuelle Datenanalyse der Geschwindigkeit

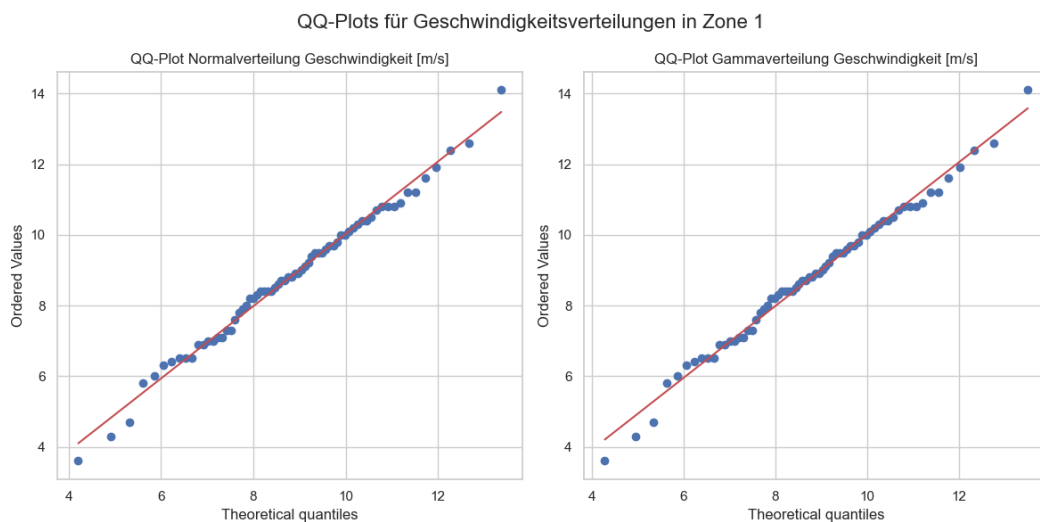


Abbildung 3: QQ-Plots Geschwindigkeitsverteilungen in Zone 1

3. Simulation der Steinschlagereignisse

Die Simulation der Daten basiert auf den Wahrscheinlichkeitsverteilungen und den entsprechenden Parametern, die wir in Kapitel 2 festgelegt haben. Wie zuvor erwähnt, wurden die Daten für jede Variable beider Zonen separat simuliert. Das Projektteam hat verschiedene Simulationen durchgeführt, wobei auch eine Simulation mit insgesamt 500 Millionen Steinschlagereignisse über einen Zeitraum von 1'173'499 Jahren simuliert wurde. Bei der Simulation berücksichtigten wir nicht nur die spezifischen Verteilungen der Daten, sondern auch das Verhältnis der Daten aus den beiden Zonen. Dementsprechend basieren 68% der simulierten Steinschlagereignisse auf den Verteilungen und Parametern der Variablen aus Zone 1, während 32% auf denen aus Zone 2 basieren. Ein entscheidender Schritt nach der Simulation ist die Überprüfung, ob die simulierten Daten die realen Datenverteilungen adäquat widerspiegeln. Andernfalls können die simulierten Daten nicht zuverlässig für die Berechnung des Steinschlagrisikos herangezogen werden.

In Abbildung 4 veranschaulichen wir diesen Vergleich, indem wir für jede Variable der ersten Zone die überlappenden Dichtekurven der Original- und Simulationsdaten sowie die überlappenden kumulativen Verteilungsfunktionen der Original- und Simulationsdaten darstellen.

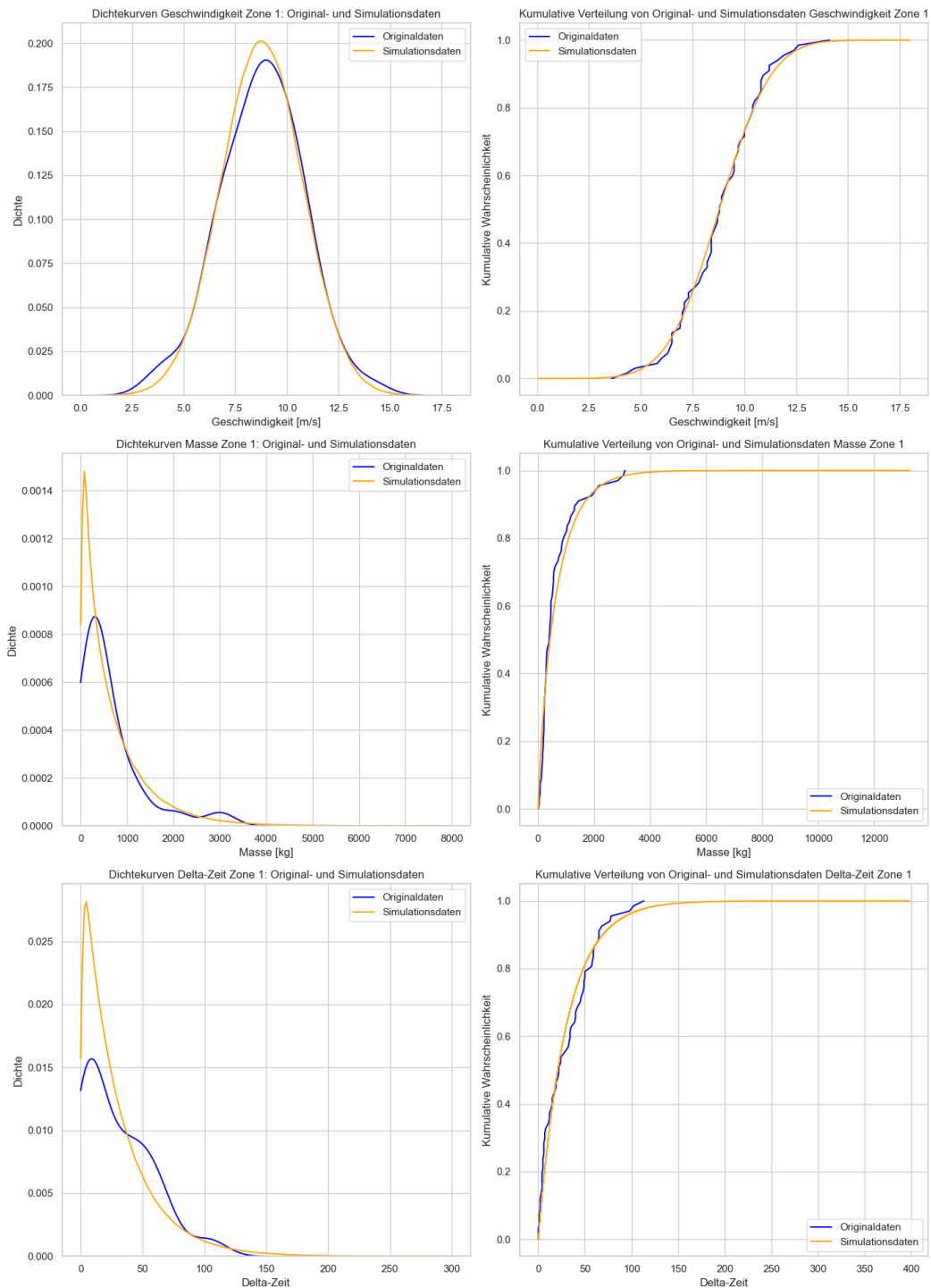


Abbildung 4: Evaluation der Simulation Zone 1

Die Untersuchung der Dichtekurven und kumulativen Verteilungsfunktionen (CDF) für Geschwindigkeit offenbart, dass die simulierte Daten die Verteilung der Geschwindigkeit in Zone 1 sehr gut widerspiegeln. Bei der Masse hingegen zeigen sich, insbesondere bei höheren Werten, merkliche Unterschiede zwischen den simulierten und den Originaldaten. Die Daten zur Delta-Zeit stimmen in der zentralen Verteilung gut überein, weisen aber an den extremen Enden Abweichungen auf.

Abbildung 5, welche die zweite Zone darstellt und analog zu Abbildung 4 aufgebaut ist, zeigt, dass die simulierten Daten auch hier die realen Verteilungen von Geschwindigkeit, Masse und Delta-Zeit grösstenteils korrekt abbilden. Besonders bei den Geschwindigkeitsdaten ist eine hohe Übereinstimmung mit den Originaldaten zu verzeichnen, während bei der Masse und der Delta-Zeit leichte Abweichungen zu beobachten sind.

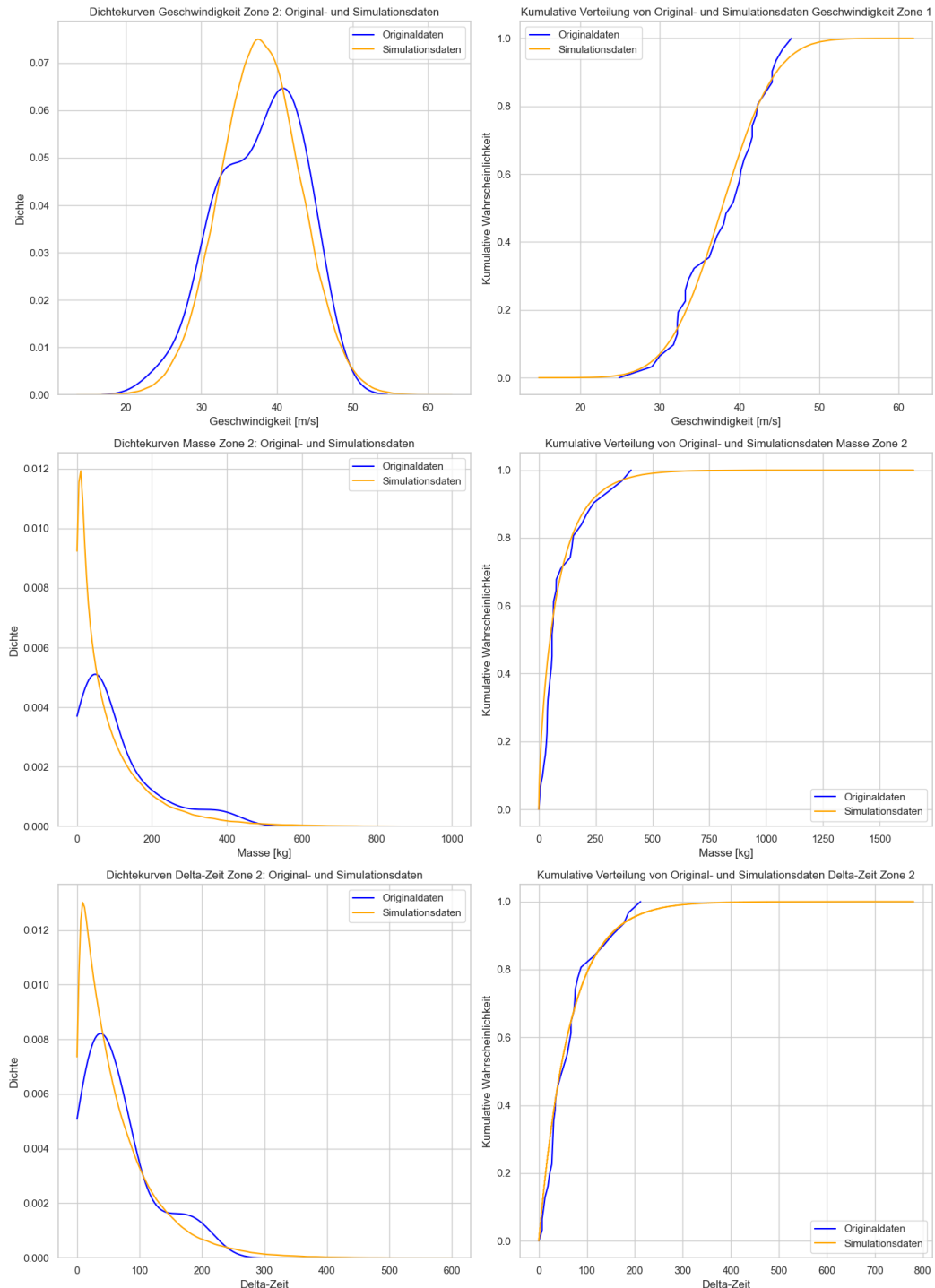


Abbildung 5: Evaluation der Simulation Zone 2

Das Projektteam kommt zum Schluss, dass die simulierten Daten in Bezug auf die Berechnung des Steinschlagrisikos als überwiegend zuverlässig und aussagekräftig betrachtet werden können, auch wenn gewisse Daten Unterschiede aufweisen.

4. Simulation des Netzbruches und Treffer

Um nun das Risiko eines Steinschlags und einen Netzbruch berechnen zu können, muss zuerst für jedes Steinschlagereignis die Aufprallenergie respektive kinetische Energie (kJ) berechnet werden:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Wobei m für die Masse und v^2 für die quadrierte Geschwindigkeit steht. Danach wird für jedes Ereignis berechnet wie viel Steinmasse bereits im Netz liegt. Sobald ein Stein fällt, startet ein 24h Fenster. Nach Ablauf des Fensters werden die gefallenen Steine aus dem Netz geräumt und ein neues Fenster startet wieder beim nächsten Stein. Anschliessend wird geschaut, ob ein Stein das Netz durchbricht und auf der Strasse landet oder nicht. Das Netz bricht immer, wenn die Aufprallenergie eines Steines grösser als 1'000 kJ ist oder wenn bereits 2'000 kg im Netz liegen und die Energie grösser als 500 kJ ist. Wenn das Netz in einem Fenster gebrochen ist, fallen alle weiteren Steine im gleichen Fenster durch.

Im nächsten Schritt werden dann die Steine, die auf die Strasse fallen, nach Tagen gruppiert. Pro Tag (pro Gruppe) werden dann 1'200 zufällige Zeitstempeln (auf Sekunden genau) generiert. Die Zeitstempeln geben das Verkehrsaufkommen von 1'200 täglichen Autos an. Dabei werden die Zeitstempel uniform über den Tag verteilt. Von einer Analyse, wann wie hoch das Verkehrsaufkommen ist, wurde abgesehen. Im letzten Schritt wird geschaut, ob ein Zeitstempel eines Autos mit einem Zeitpunkt eines Steinschlages übereinstimmt. Falls ein Treffer geschieht, wird von einem Todesfall ausgegangen. Um dann die Anzahl Todesfälle pro Jahr zu berechnen, teilen wir die Anzahl Todesfälle durch die Anzahl simulierte Jahre.

In den simulierten Daten kommen wir mit dieser Modellierung bei 500 Millionen Steinschlagereignissen auf insgesamt 22'241 Ereignisse, bei denen das Schutznetz reisst. Zudem werden 319 Fälle verzeichnet, in denen ein vorbeifahrendes Auto direkt von einem Stein getroffen wird. Wir nehmen an, dass ein direkter Treffer eines Autos von einem Steinschlag zu einem Todesfall führt. Über den gesamten simulierten Zeitraum hinweg errechnet sich daraus eine jährliche Wahrscheinlichkeit eines Todesfalls von 0.00027 (0.027%). In Abbildung 4 präsentieren wir die Wahrscheinlichkeit der Todesfälle über die Anzahl simulierte Steinschlagereignisse.

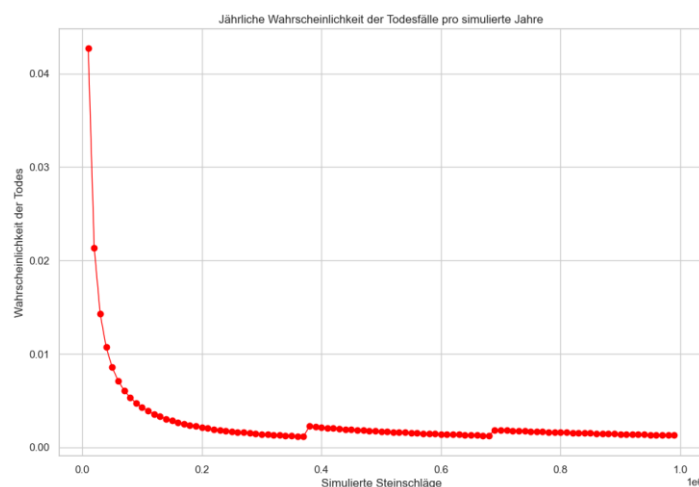


Abbildung 6: Jährliche Wahrscheinlichkeit der Todesfälle pro simulierte Jahre

Wir können beobachten, wie die Wahrscheinlichkeit der Todesfälle auf den Wert 0.00027 konvergiert.

5. Empfehlung und Begründung

Eine Schlüsselanforderung des Kantons an das Projektteam bestand darin, nachzuweisen, dass die jährliche Wahrscheinlichkeit von Todesfällen infolge von Steinschlag geringer als 0.01% ist. Das Projektteam kommt jedoch zum Schluss, dass die jährliche Wahrscheinlichkeit eines Todesfalls bei 0.027% liegt und somit über dem vorgegebenen Wert des Kantons liegt. Dementsprechend empfiehlt das Projektteam die betroffene Strasse zum Schutz der Bevölkerung zu schliessen.

Das Projektteam möchte im Sinne der Transparenz darauf hinweisen, dass die Analyse gewissen Einschränkungen unterliegt. Wie bereits in Kapitel 3 diskutiert, gibt es leichte Abweichungen in einigen Simulationsdaten, die Analyse könnte daher davon profitieren die Simulation noch genauer auszuführen. Darüber hinaus bestehen weitere Möglichkeiten, die Genauigkeit der Analyse zu erhöhen. Beispielsweise könnten bestimmte Daten aus dem Originaldatensatz entfernt werden, um zu beobachten, wie sich dies auf die Berechnungsergebnisse auswirkt. Ebenso könnten komplexere Verkehrsmodelle integriert werden. In der aktuellen Berechnung gehen wir von einer gleichmässigen Verteilung der 1'200 Autos über den Tag aus, was jedoch nicht die Realität des Verkehrsflusses widerspiegelt. Zudem haben wir uns in unserer Analyse auf die Auswirkungen direkter Treffer auf Autos beschränkt und sind davon ausgegangen, dass jeweils nur eine Person in einem Auto sitzt. Indirekte Treffer und mehr Insassen in einem Auto könnten das Risiko zusätzlich erhöhen. Trotz dieser Einschränkungen führen unsere Modelle bereits zu der Empfehlung, die Strasse zu schliessen, um die Sicherheit der Bevölkerung zu gewährleisten. Das Projektteam glaubt daher, dass diese Massnahme ausreichend ist, um ein hohes Schutzniveau zu bieten, auch wenn die Analyse weiter verfeinert werden könnte