



Steinschlagrisiko

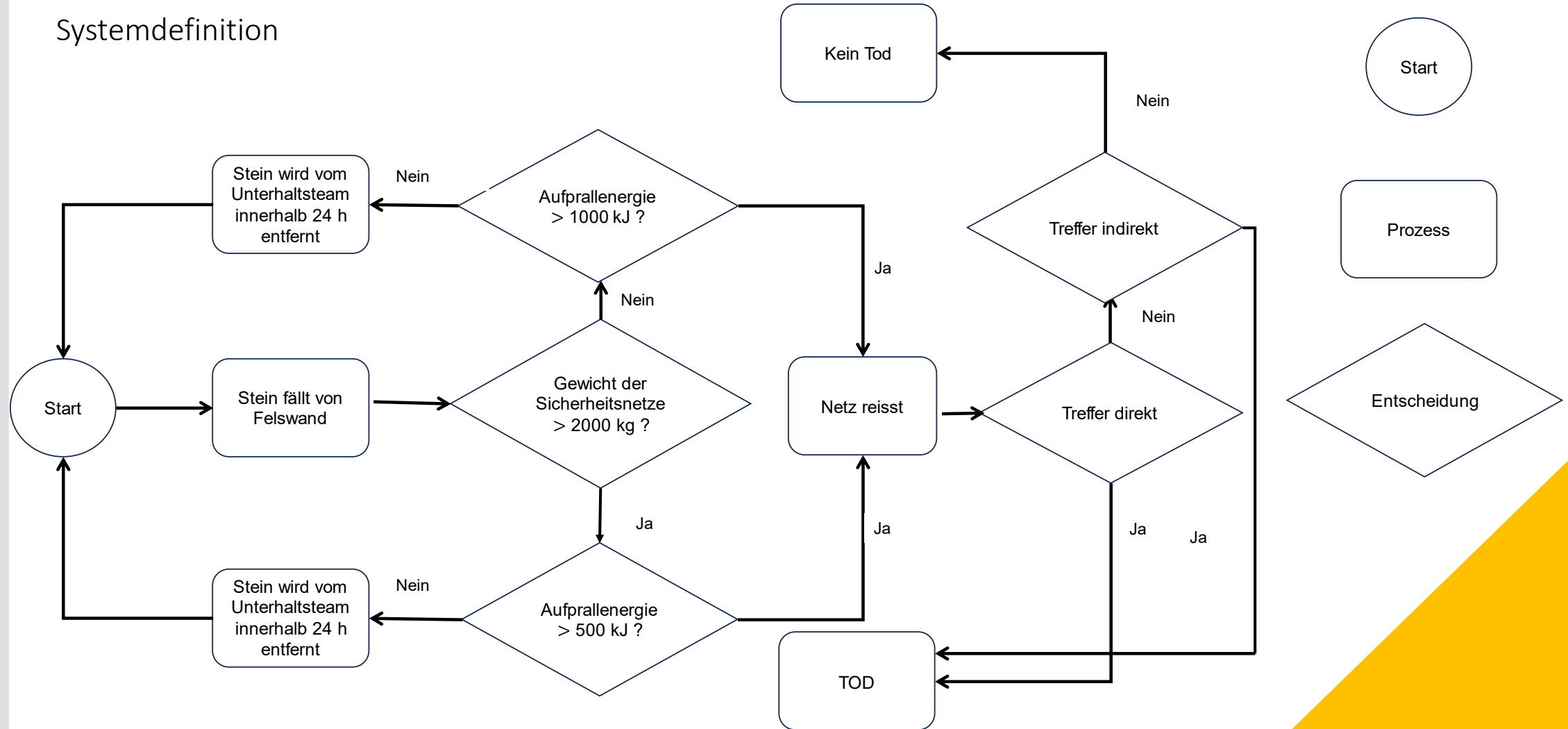
Muss die Strasse gesperrt werden?

Inhalt

1. Systemdefinition
2. Tools
3. Explorative Datenanalyse
4. Monte-Carlo Simulation
5. Berechnung
6. Auswertung
7. Praxisbeispiel Tiefbauamt GR

1. Systemdefinition

Systemdefinition



2. Tools



Python v3.11.5



**Jupyter
Notebook**



VSCode/Pycharm

3. Explorative Datenanalyse

Explorative Datenanalyse

Date	Uhrzeit	m [kg]	v [m/s]
2019-01-01	09:00	38	45.4
2019-01-03	06:00	187	41.6
2019-01-04	10:00	36	44.6
2019-01-07	14:00	6	41.2
2019-01-11	06:00	65	39.6
2019-01-11	16:00	58	33.2
2019-01-14	11:00	365	40.2
2019-01-16	02:00	22	46.5
2019-01-18	06:00	146	36.2
2019-01-19	17:00	29	38.3
2019-01-20	22:00	40	41.6
2019-01-21	11:00	304	36.7

Datum	Uhrzeit	Masse [kg]	Geschwindigkeit [m/s]
2019-01-01	09:00	194	8.4
2019-01-01	21:00	224	8.8
2019-01-02	14:00	3104	9.2
2019-01-04	15:00	228	8.0
2019-01-05	23:00	755	7.0
2019-01-08	16:00	215	6.5
2019-01-10	10:00	300	7.9
2019-01-11	08:00	1019	10.4
2019-01-13	08:00	1288	10.8
2019-01-15	05:00	344	10.0
2019-01-17	14:00	707	6.0
2019-01-17	18:00	938	10.2

Explorative Datenanalyse

Date	Uhrzeit	m [kg]	v [m/s]
2019-01-01	09:00	38	45.4
2019-01-03	06:00	187	41.6
2019-01-04	10:00	36	44.6
2019-01-07	14:00	6	41.2
2019-01-11	06:00	65	39.6
2019-01-11	16:00	58	33.2
2019-01-14	11:00	365	40.2
2019-01-16	02:00	22	46.5
2019-01-18	06:00	146	36.2
2019-01-19	17:00	29	38.3
2019-01-20	22:00	40	41.6
2019-01-21	11:00	304	36.7

Datum	Uhrzeit	Masse [kg]	Geschwindigkeit [m/s]
2019-01-01	09:00	194	8.4
2019-01-01	21:00	224	8.8
2019-01-02	14:00	3104	9.2
2019-01-04	15:00	228	8.0
2019-01-05	23:00	755	7.0
2019-01-08	16:00	215	6.5
2019-01-10	10:00	300	7.9
2019-01-11	08:00	1019	10.4
2019-01-13	08:00	1288	10.8
2019-01-15	05:00	344	10.0
2019-01-17	14:00	707	6.0
2019-01-17	18:00	938	10.2

Explorative Datenanalyse

Date	Uhrzeit	m [kg]	v [m/s]
2019-01-01	09:00	38	45.4
2019-01-03	06:00	187	41.6
2019-01-04	10:00	36	44.6
2019-01-07	14:00	6	41.2
2019-01-11	06:00	65	39.6
2019-01-11	16:00	58	33.2
2019-01-14	11:00	365	40.2
2019-01-16	02:00	22	46.5
2019-01-18	06:00	146	36.2
2019-01-19	17:00	29	38.3
2019-01-20	22:00	40	41.6
2019-01-21	11:00	304	36.7

Datum	Uhrzeit	Masse [kg]	Geschwindigkeit [m/s]
2019-01-01	09:00	194	8.4
2019-01-01	21:00	224	8.8
2019-01-02	14:00	3104	9.2
2019-01-04	15:00	228	8.0
2019-01-05	23:00	755	7.0
2019-01-08	16:00	215	6.5
2019-01-10	10:00	300	7.9
2019-01-11	08:00	1019	10.4
2019-01-13	08:00	1288	10.8
2019-01-15	05:00	344	10.0
2019-01-17	14:00	707	6.0
2019-01-17	18:00	938	10.2

Explorative Datenanalyse

Date	Uhrzeit	m [kg]	v [m/s]
2019-01-01	09:00	38	45.4
2019-01-03	06:00	187	41.6
2019-01-04	10:00	36	44.6
2019-01-07	14:00	6	41.2
2019-01-11	06:00	65	39.6
2019-01-11	16:00	58	33.2
2019-01-14	11:00	365	40.2
2019-01-16	02:00	22	46.5
2019-01-18	06:00	146	36.2
2019-01-19	17:00	29	38.3
2019-01-20	22:00	40	41.6
2019-01-21	11:00	304	36.7

Datum	Uhrzeit	Masse [kg]	Geschwindigkeit [m/s]
2019-01-01	09:00	194	8.4
2019-01-01	21:00	224	8.8
2019-01-02	14:00	3104	9.2
2019-01-04	15:00	228	8.0
2019-01-05	23:00	755	7.0
2019-01-08	16:00	215	6.5
2019-01-10	10:00	300	7.9
2019-01-11	08:00	1019	10.4
2019-01-13	08:00	1288	10.8
2019-01-15	05:00	344	10.0
2019-01-17	14:00	707	6.0
2019-01-17	18:00	938	10.2

Explorative Datenanalyse

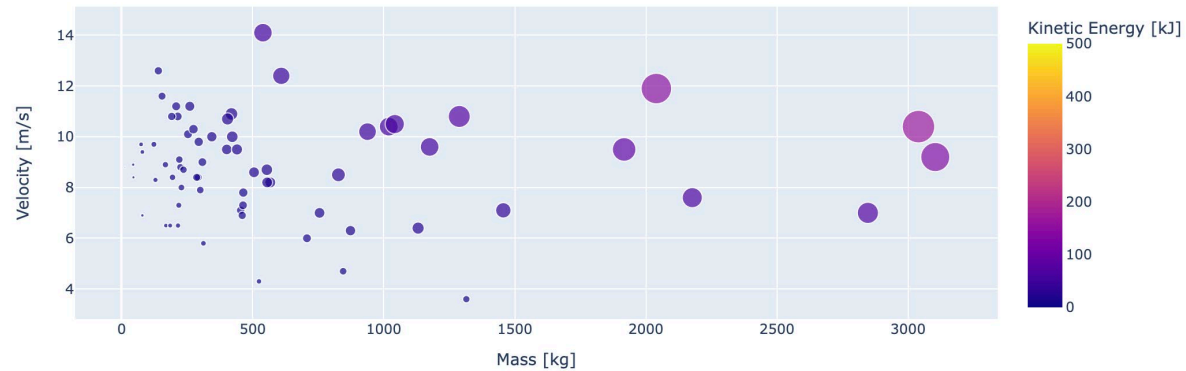
	Date	Time	Mass [kg]	Velocity [m/s]	Kinetic Energy [kJ]	DateTime	TimeDiffHours
0	01/01/2019	09:00	194	8.4	6.844320	2019-01-01 09:00:00	0.0
1	01/01/2019	21:00	224	8.8	8.673280	2019-01-01 21:00:00	12.0
2	02/01/2019	14:00	3104	9.2	131.361280	2019-01-02 14:00:00	17.0
3	04/01/2019	15:00	228	8.0	7.296000	2019-01-04 15:00:00	49.0
4	05/01/2019	23:00	755	7.0	18.497500	2019-01-05 23:00:00	32.0
...
63	18/03/2019	16:00	167	8.9	6.614035	2019-03-18 16:00:00	28.0
64	22/03/2019	18:00	2847	7.0	69.751500	2019-03-22 18:00:00	98.0
65	26/03/2019	00:00	44	8.9	1.742620	2019-03-26 00:00:00	78.0
66	26/03/2019	06:00	45	8.4	1.587600	2019-03-26 06:00:00	6.0
67	27/03/2019	16:00	312	5.8	5.247840	2019-03-27 16:00:00	34.0

Explorative Datenanalyse

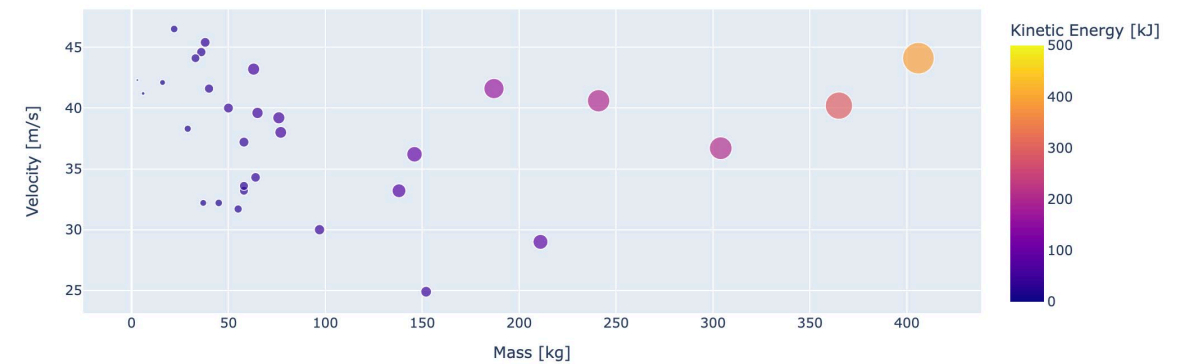
	Date	Time	Mass [kg]	Velocity [m/s]	Kinetic Energy [kJ]	DateTime	TimeDiffHours
0	01/01/2019	09:00	194	8.4	6.844320	2019-01-01 09:00:00	0.0
1	01/01/2019	21:00	224	8.8	8.673280	2019-01-01 21:00:00	12.0
2	02/01/2019	14:00	3104	9.2	131.361280	2019-01-02 14:00:00	17.0
3	04/01/2019	15:00	228	8.0	7.296000	2019-01-04 15:00:00	49.0
4	05/01/2019	23:00	755	7.0	18.497500	2019-01-05 23:00:00	32.0
...
63	18/03/2019	16:00	167	8.9	6.614035	2019-03-18 16:00:00	28.0
64	22/03/2019	18:00	2847	7.0	69.751500	2019-03-22 18:00:00	98.0
65	26/03/2019	00:00	44	8.9	1.742620	2019-03-26 00:00:00	78.0
66	26/03/2019	06:00	45	8.4	1.587600	2019-03-26 06:00:00	6.0
67	27/03/2019	16:00	312	5.8	5.247840	2019-03-27 16:00:00	34.0

Explorative Datenanalyse: Kinetische Energie

Scatter-Diagram of Separation Zone 1

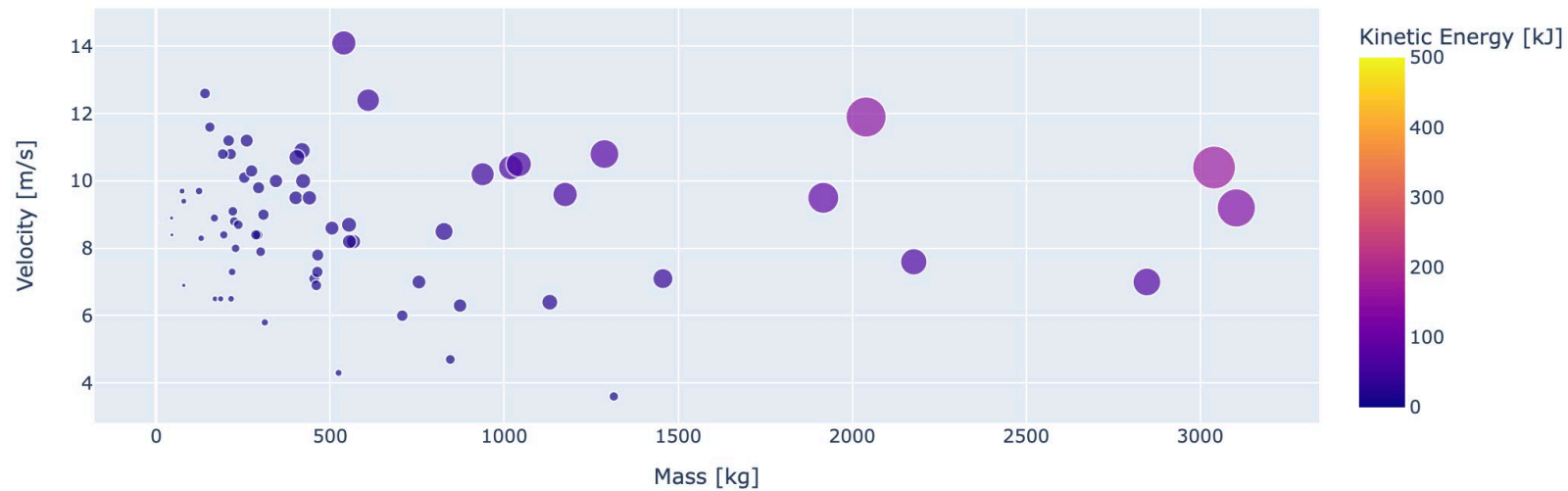


Scatter-Diagram of Separation Zone 2

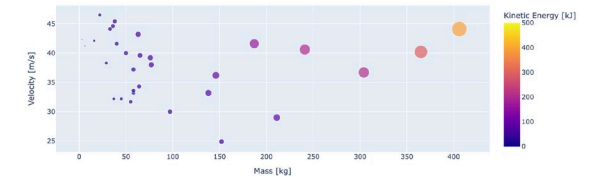


Explorative Datenanalyse: Kinetische Energie

Scatter-Diagram of Separation Zone 1

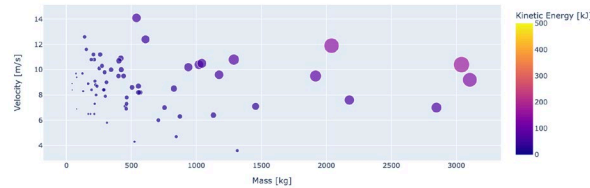


Scatter-Diagram of Separation Zone 2

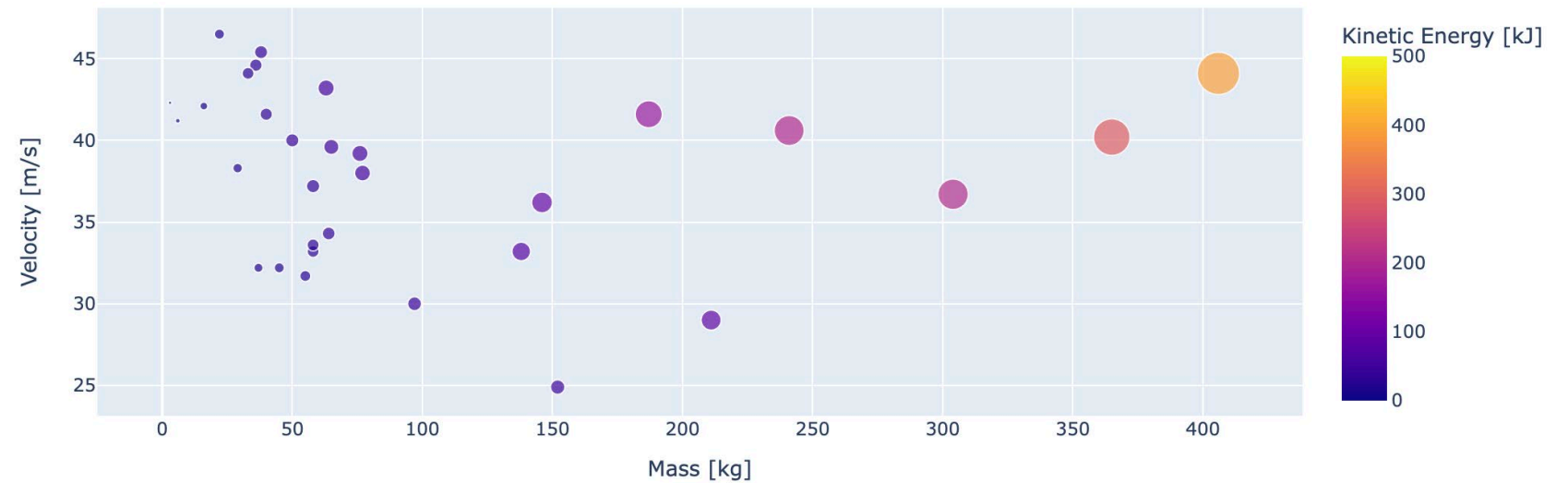


Explorative Datenanalyse: Kinetische Energie

Scatter-Diagram of Separation Zone 1

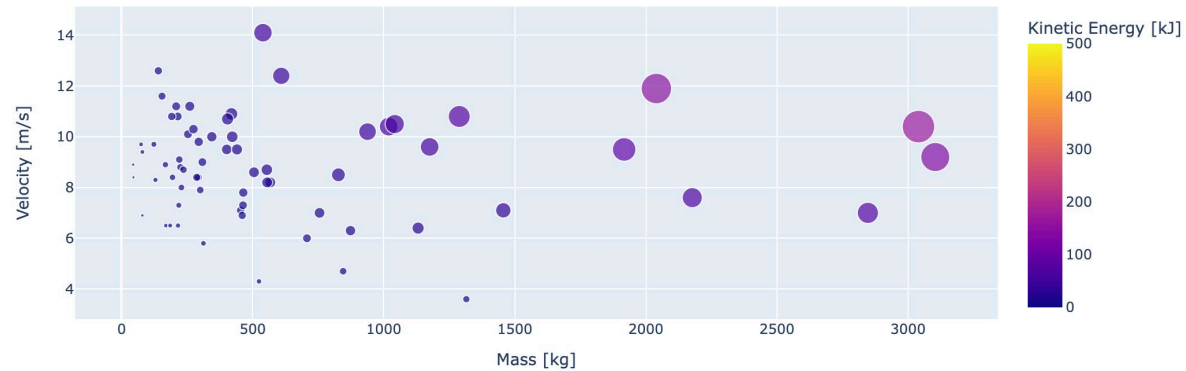


Scatter-Diagram of Separation Zone 2

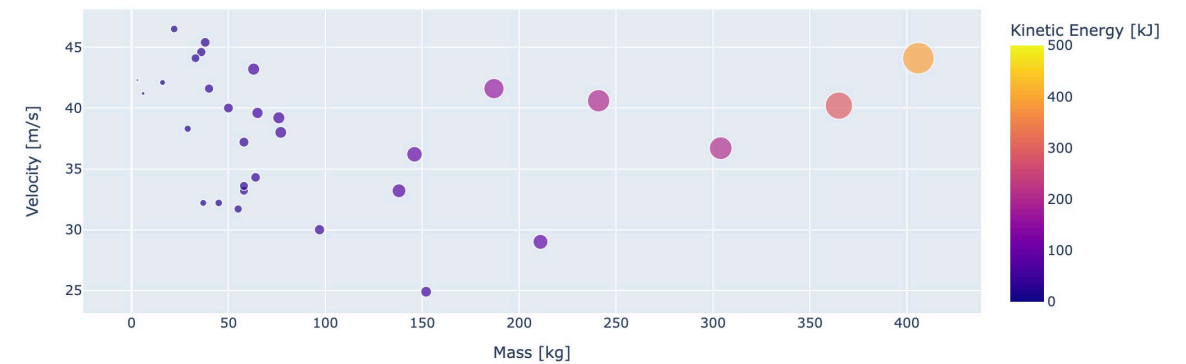


Explorative Datenanalyse: Kinetische Energie

Scatter-Diagram of Separation Zone 1

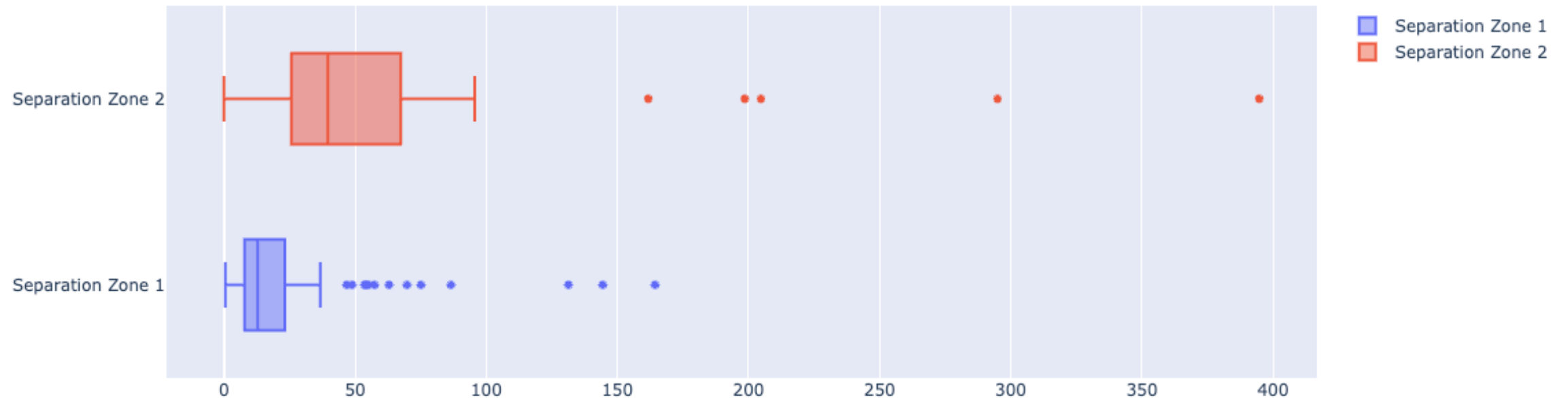


Scatter-Diagram of Separation Zone 2



Explorative Datenanalyse: Kinetische Energie

Rockfall Boxplot By Kinetic Energy

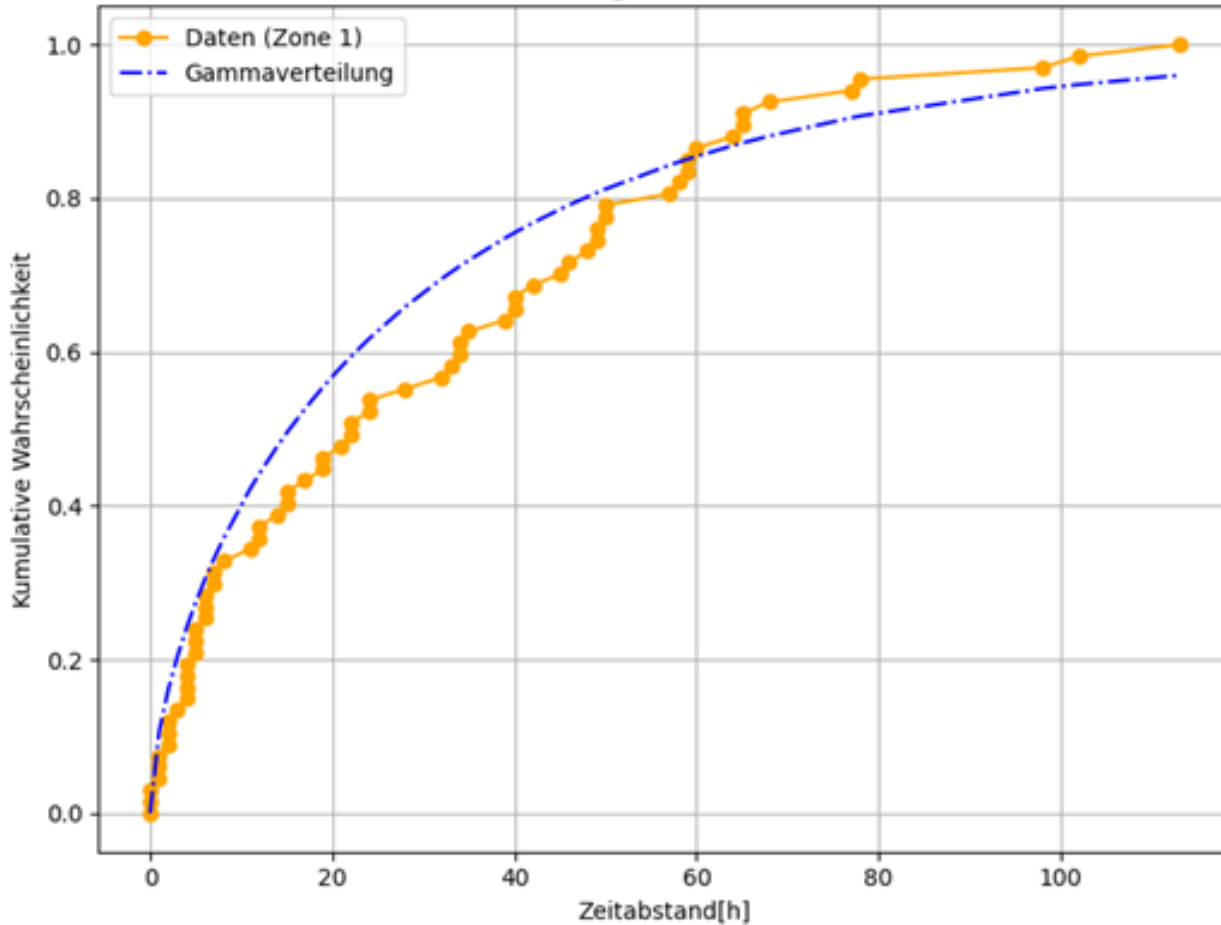


Explorative Datenanalyse: Zeitabstände

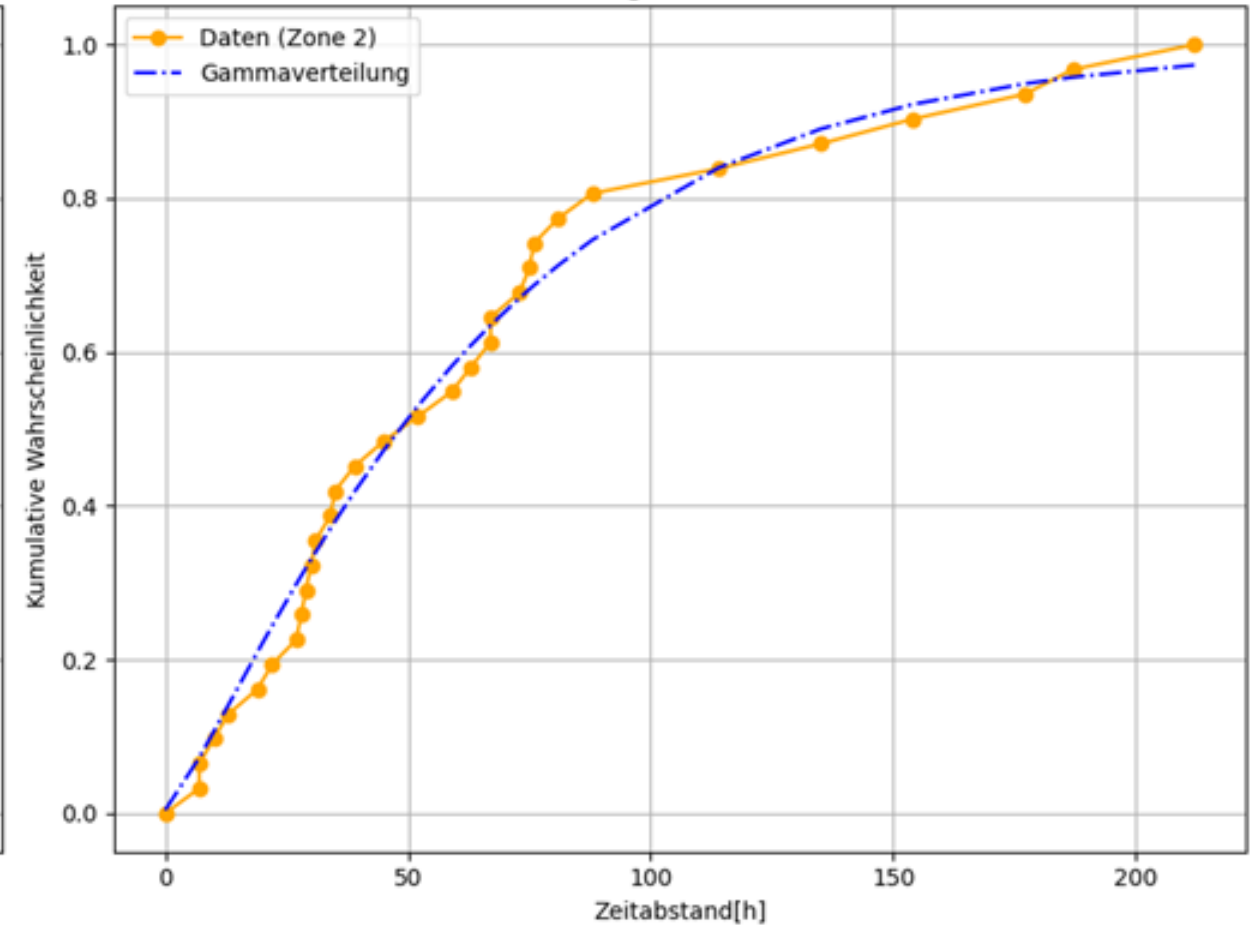


Explorative Datenanalyse: Zeitabstände

Kumulative Verteilung für Zeitabstände in Zone 1

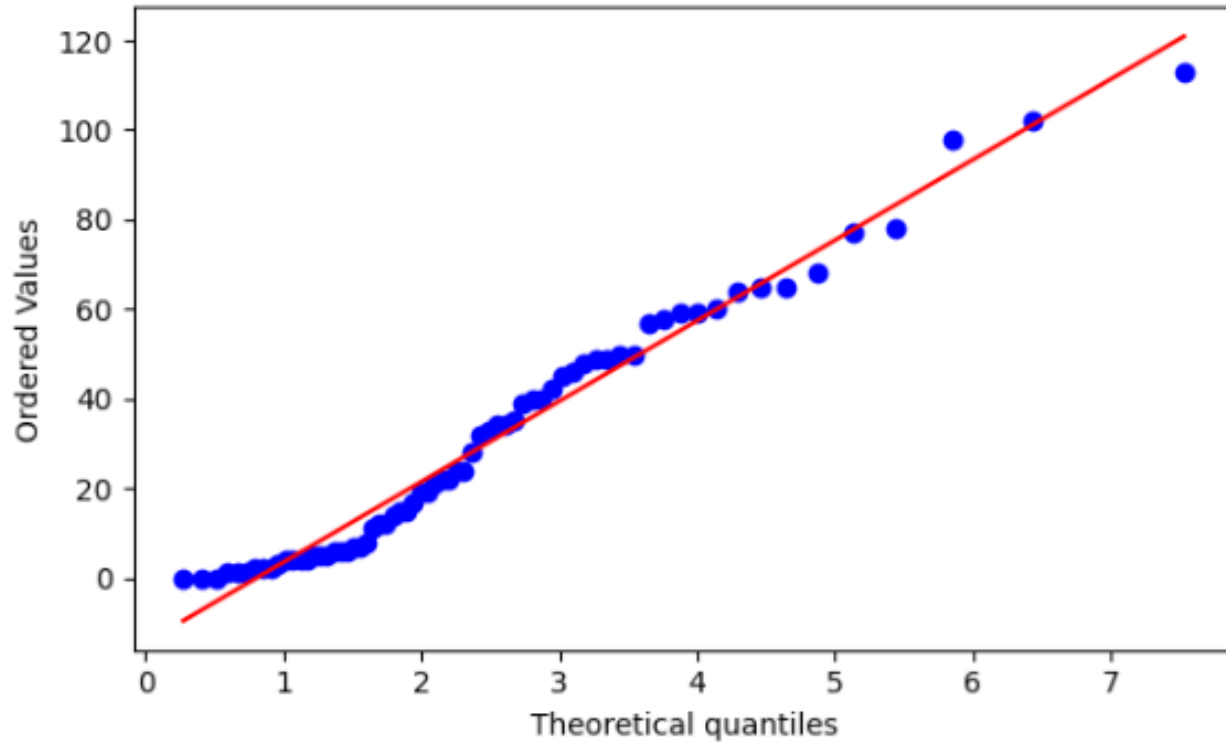


Kumulative Verteilung für Zeitabstände in Zone 2

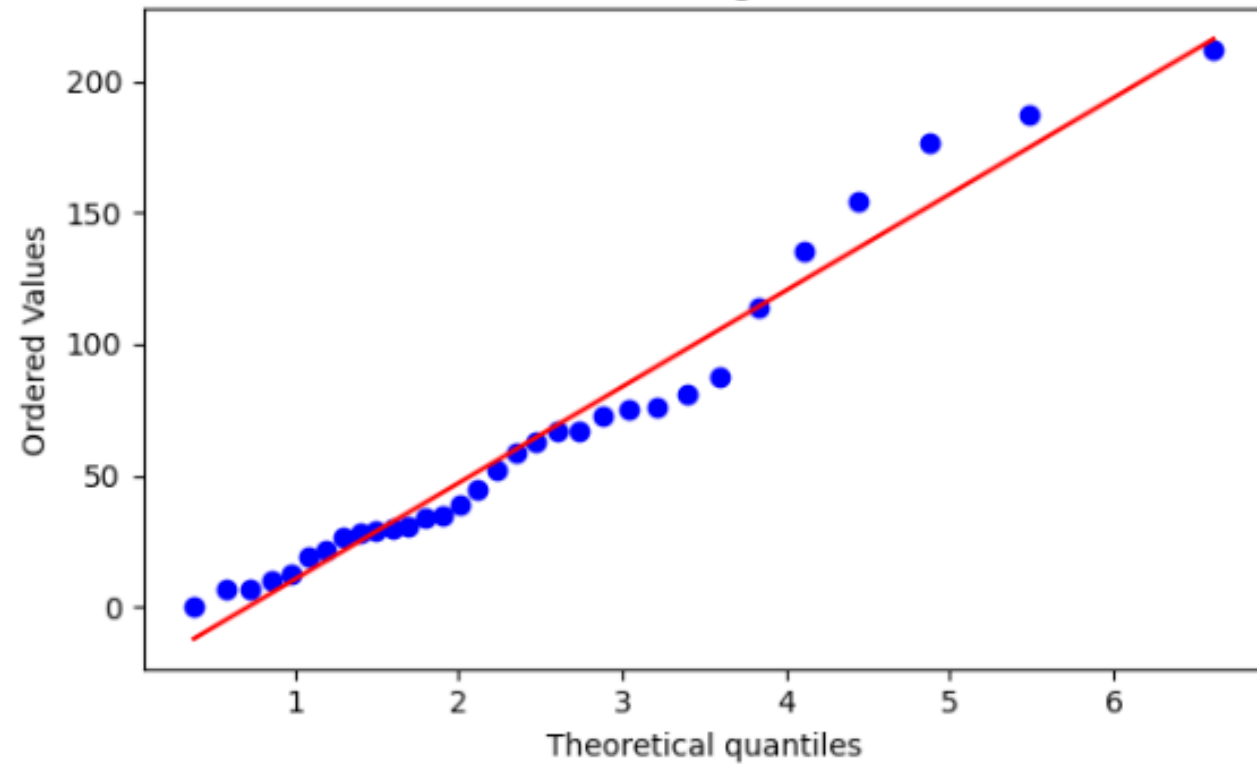


Explorative Datenanalyse: Zeitabstände

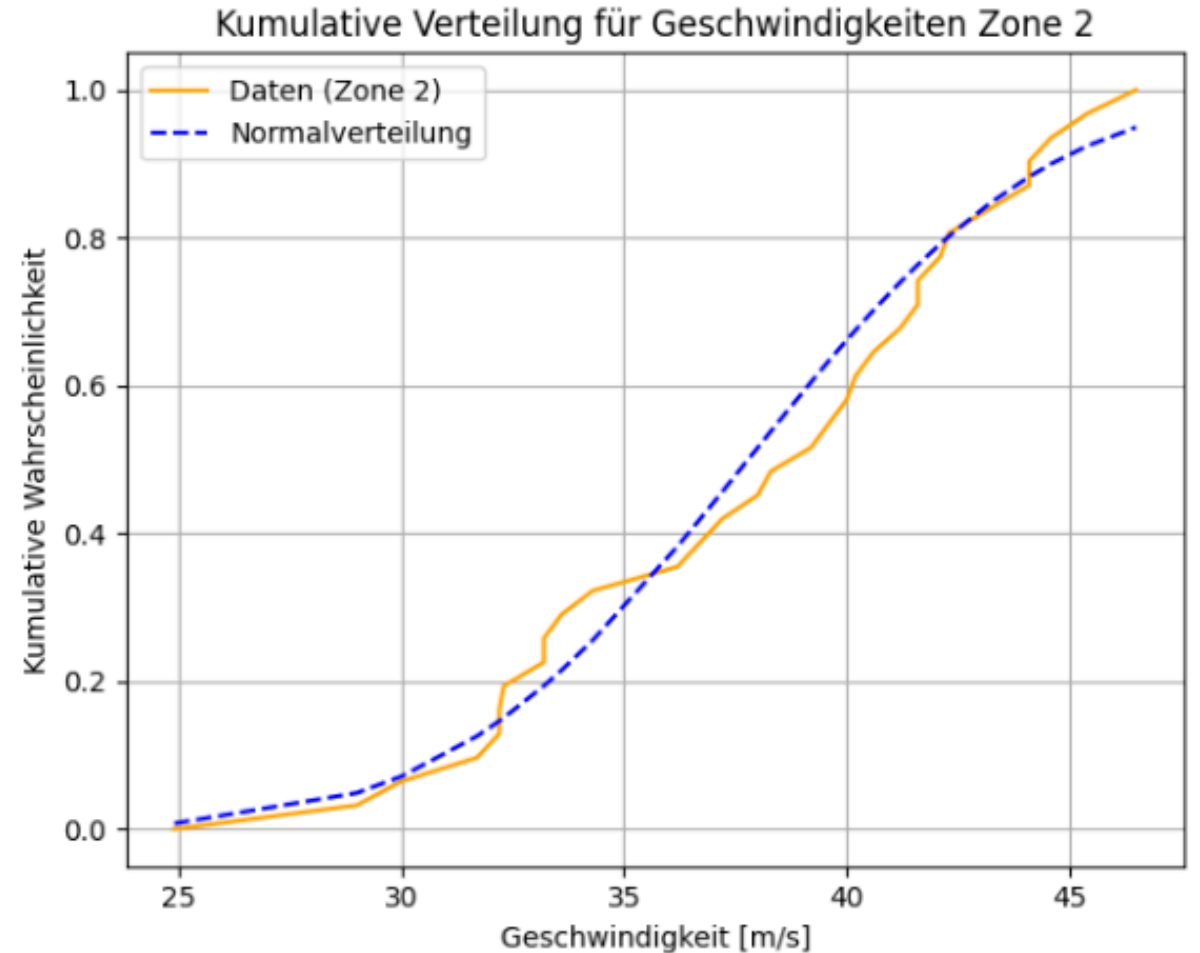
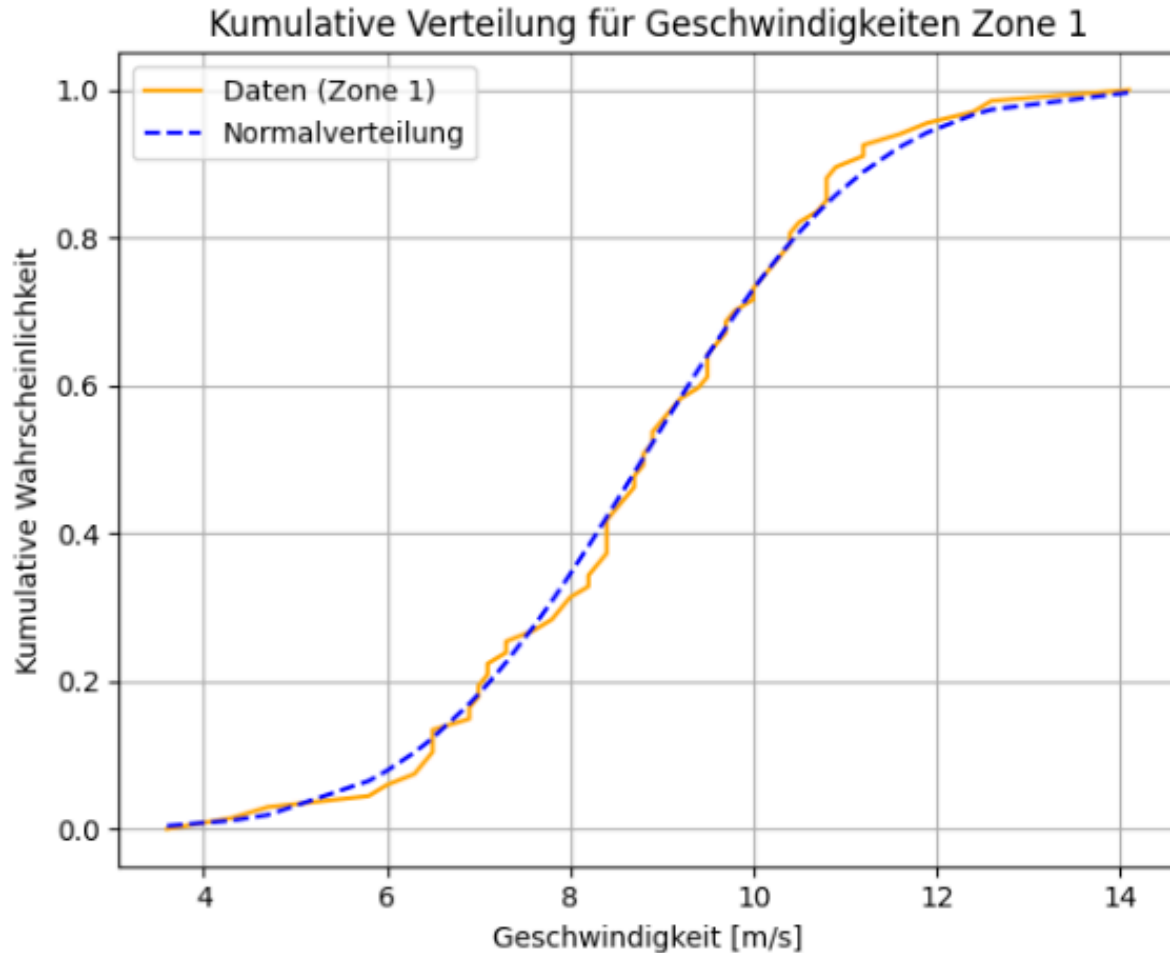
Q-Q-Plot Gammaverteilung Zeitabstände Zone 1



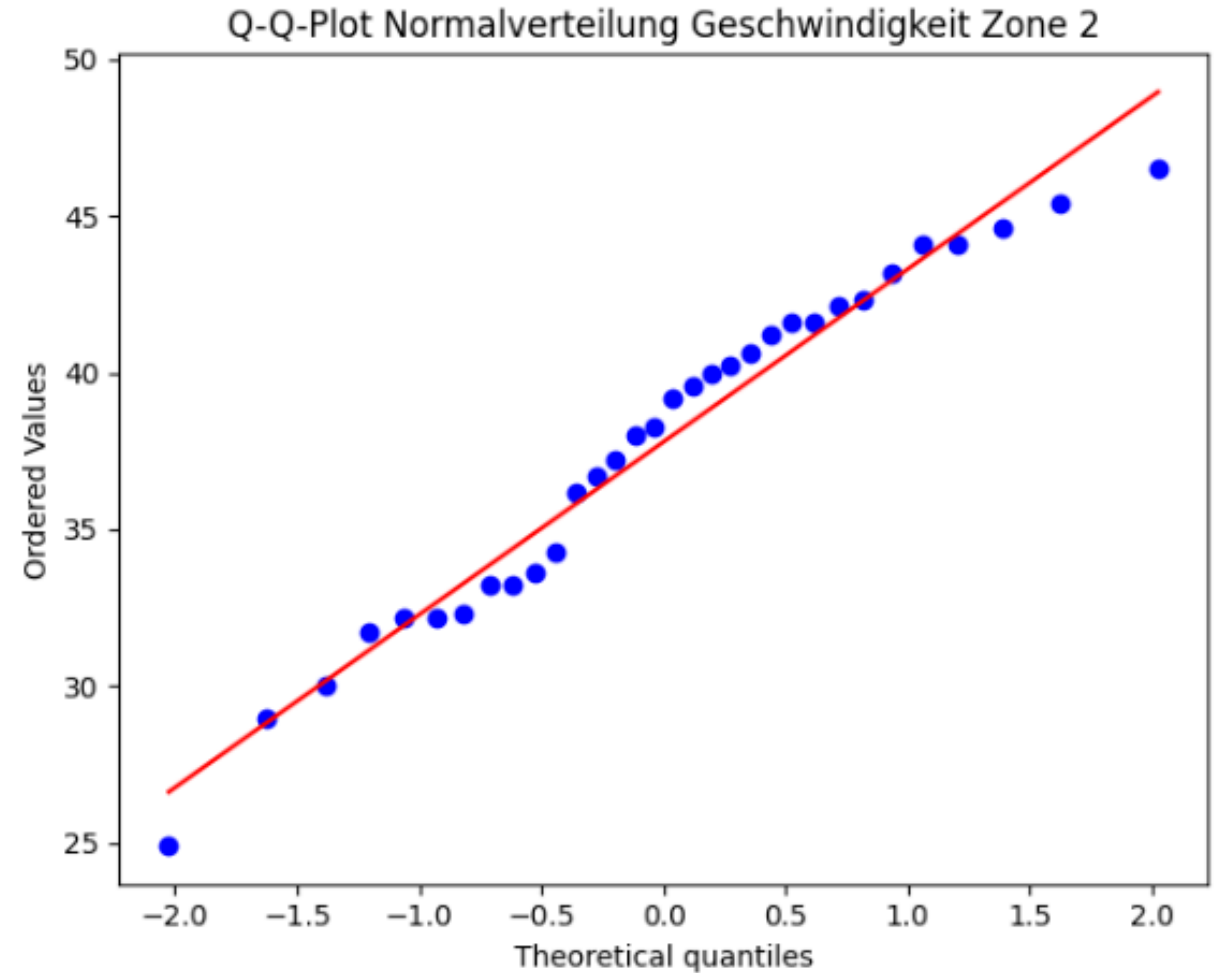
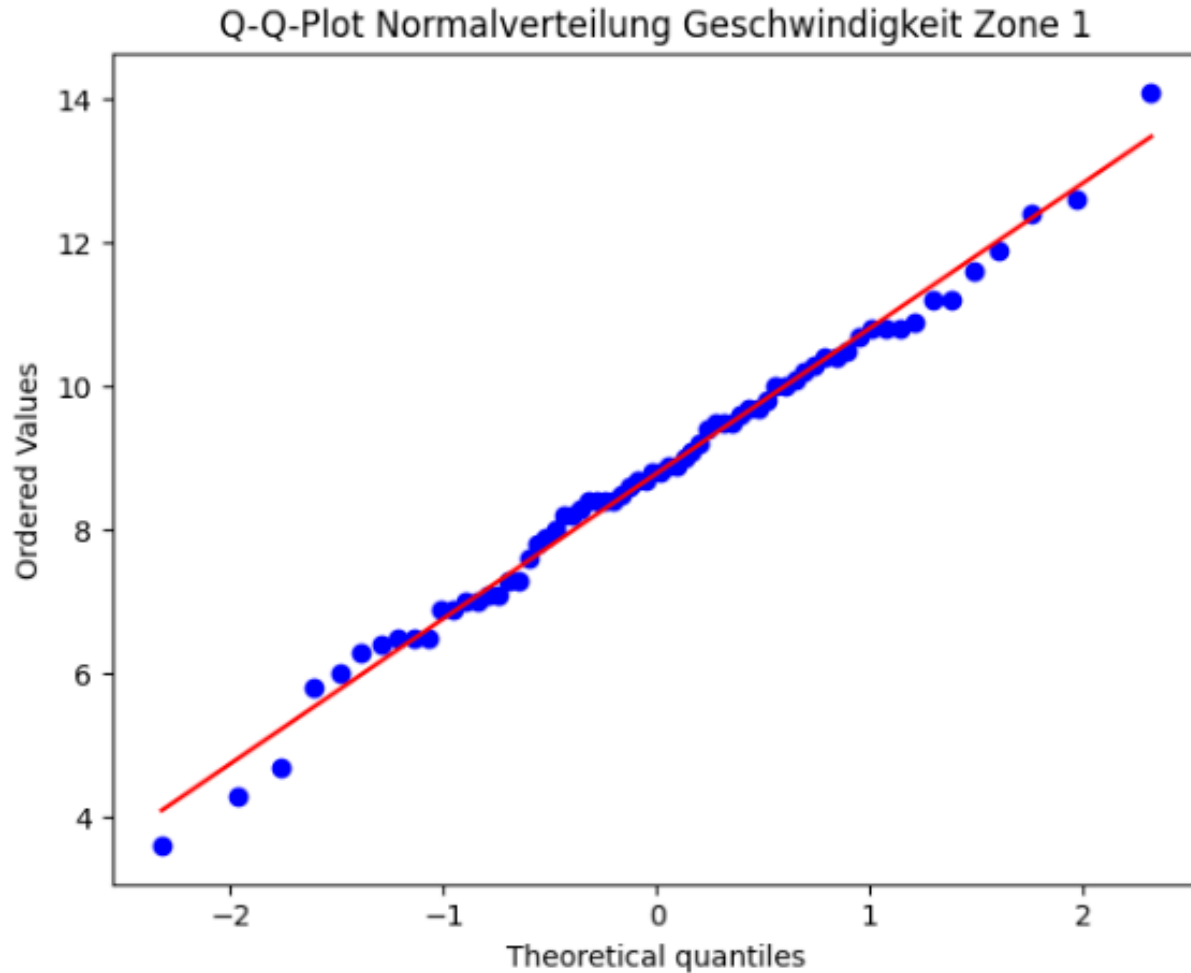
Q-Q-Plot Gammaverteilung Zeitabstände Zone 2



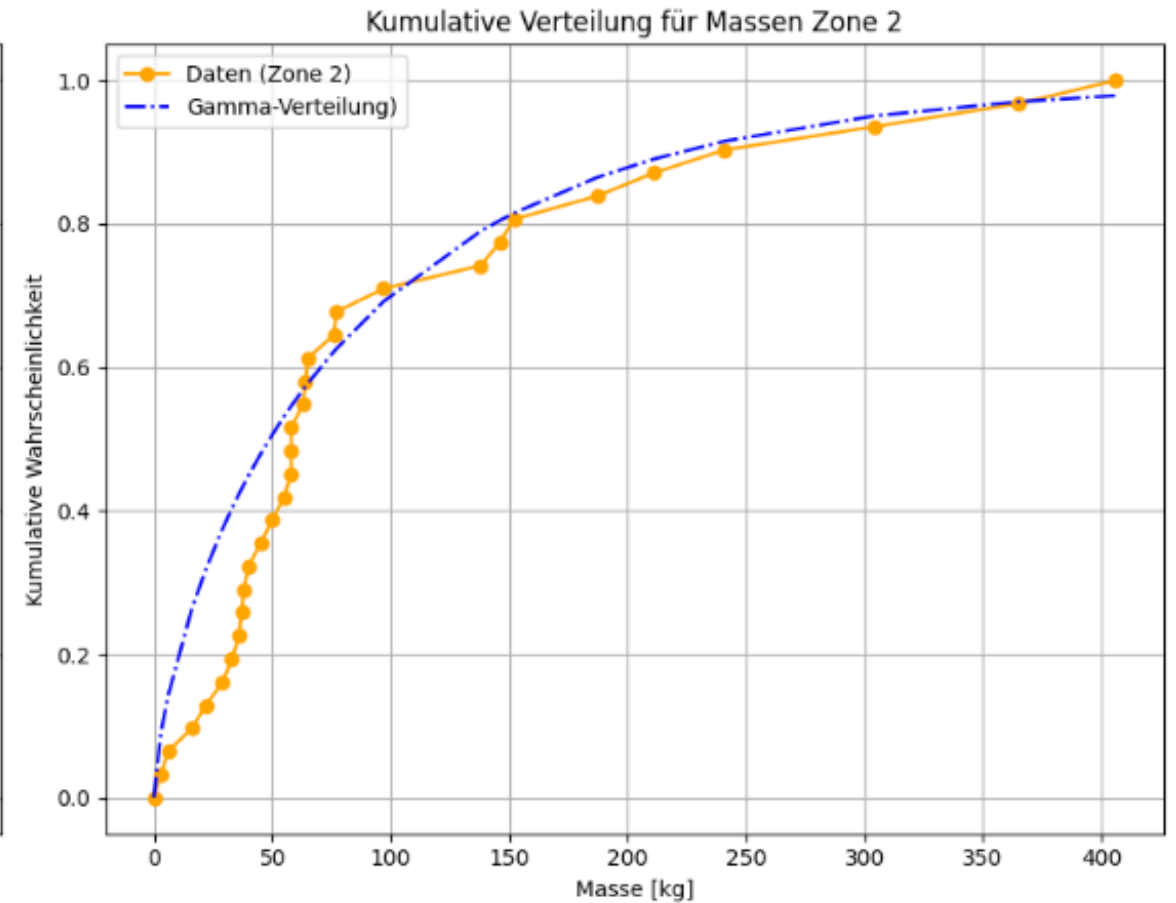
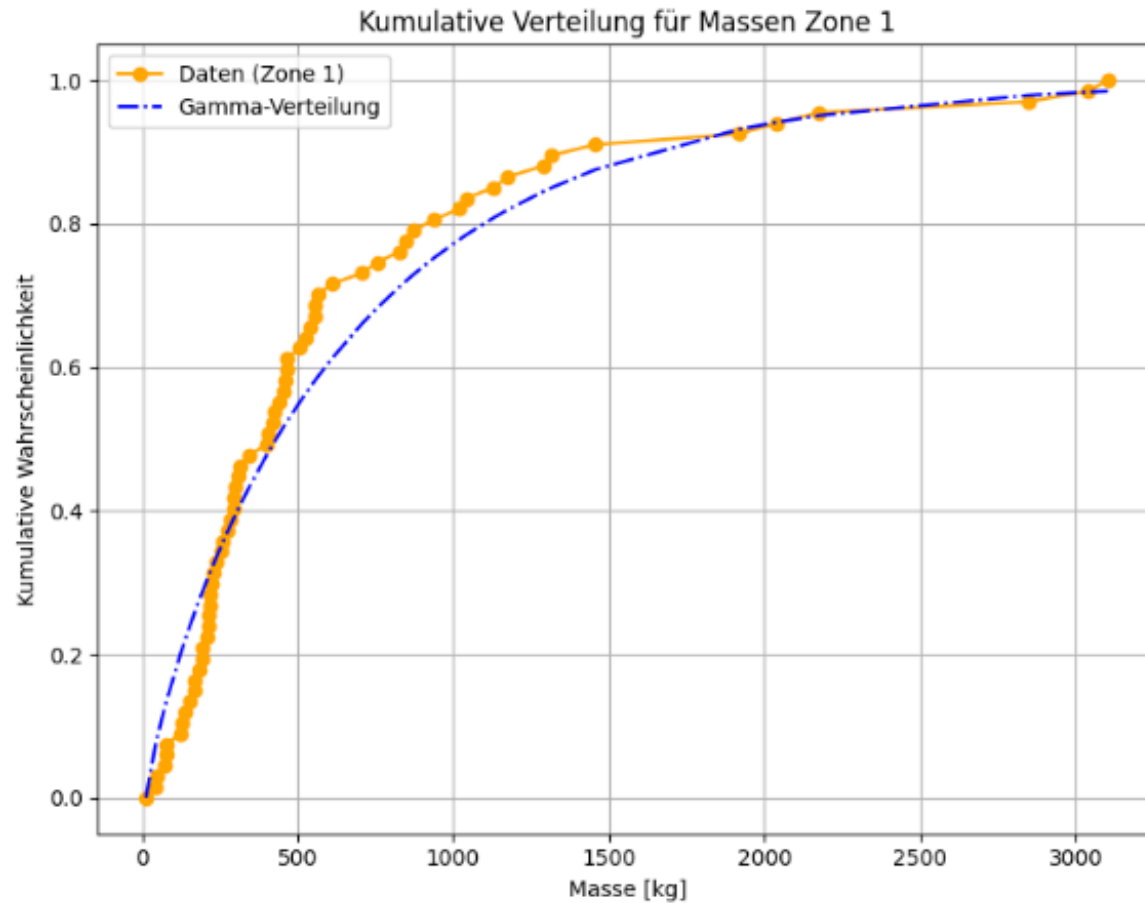
Explorative Datenanalyse: Geschwindigkeit



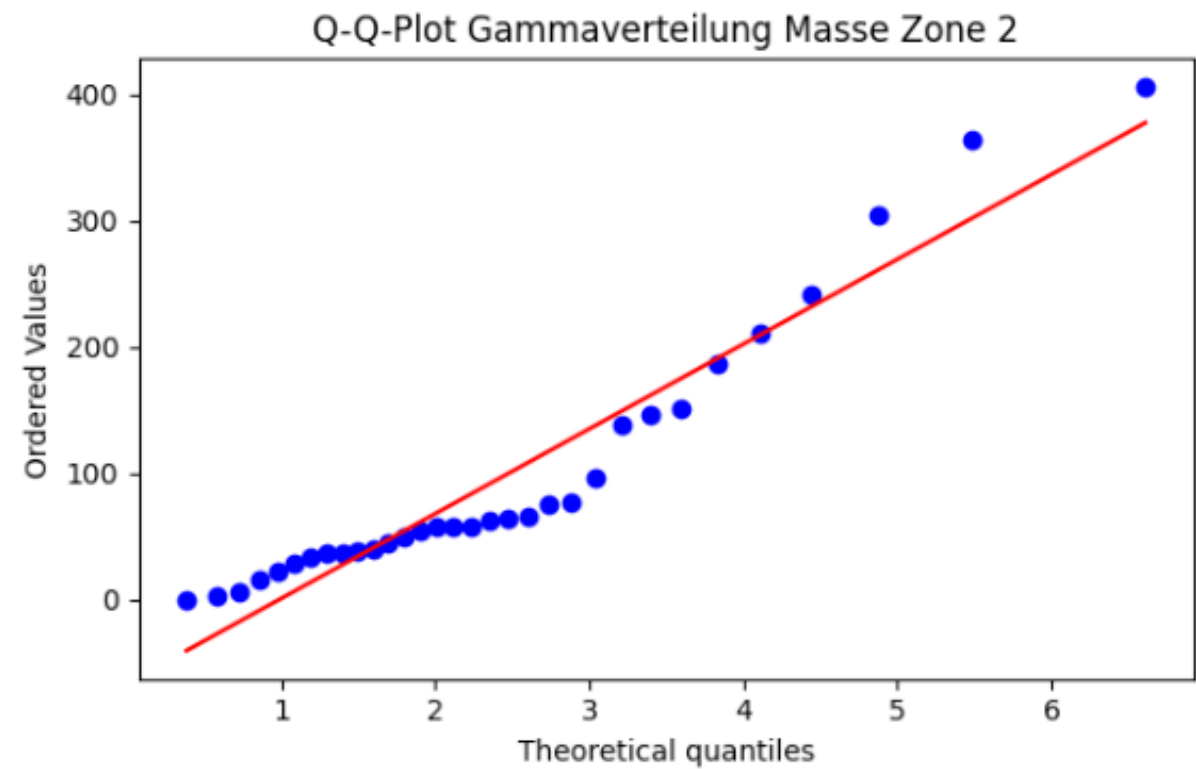
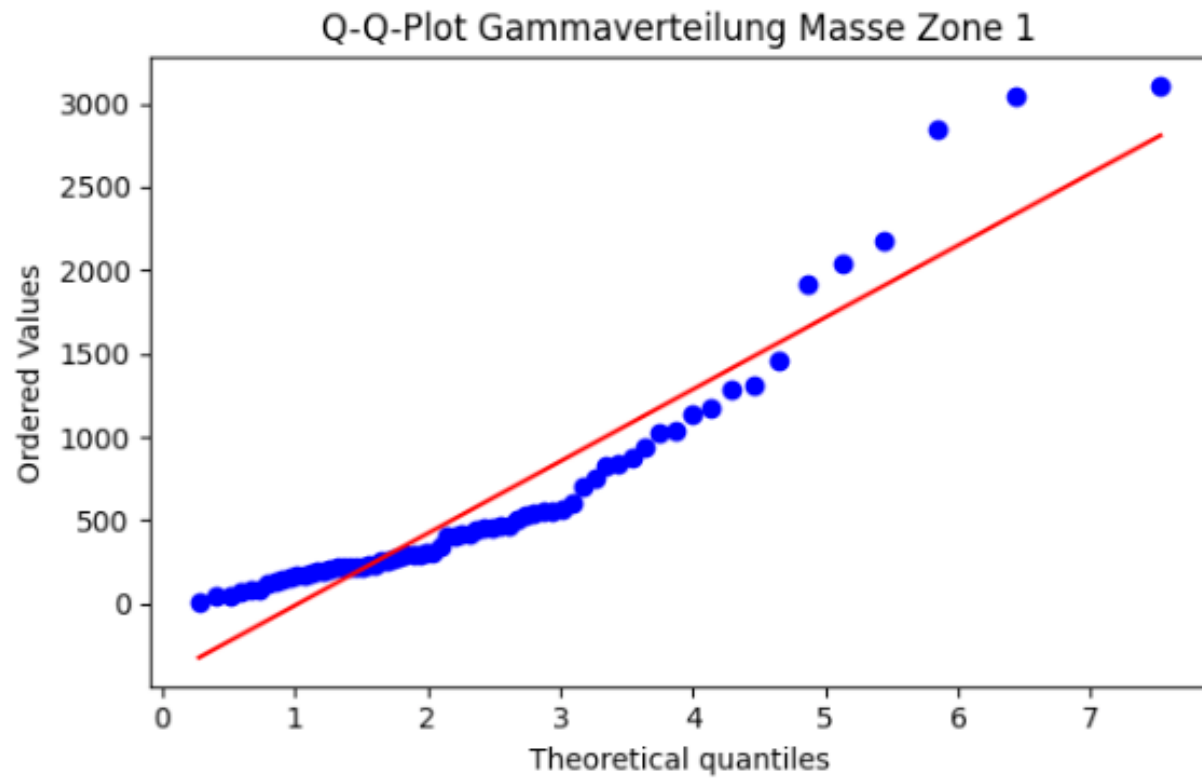
Explorative Datenanalyse: Geschwindigkeit



Explorative Datenanalyse: Masse



Explorative Datenanalyse: Masse



Explorative Datenanalyse: Verteilungsfunktionen

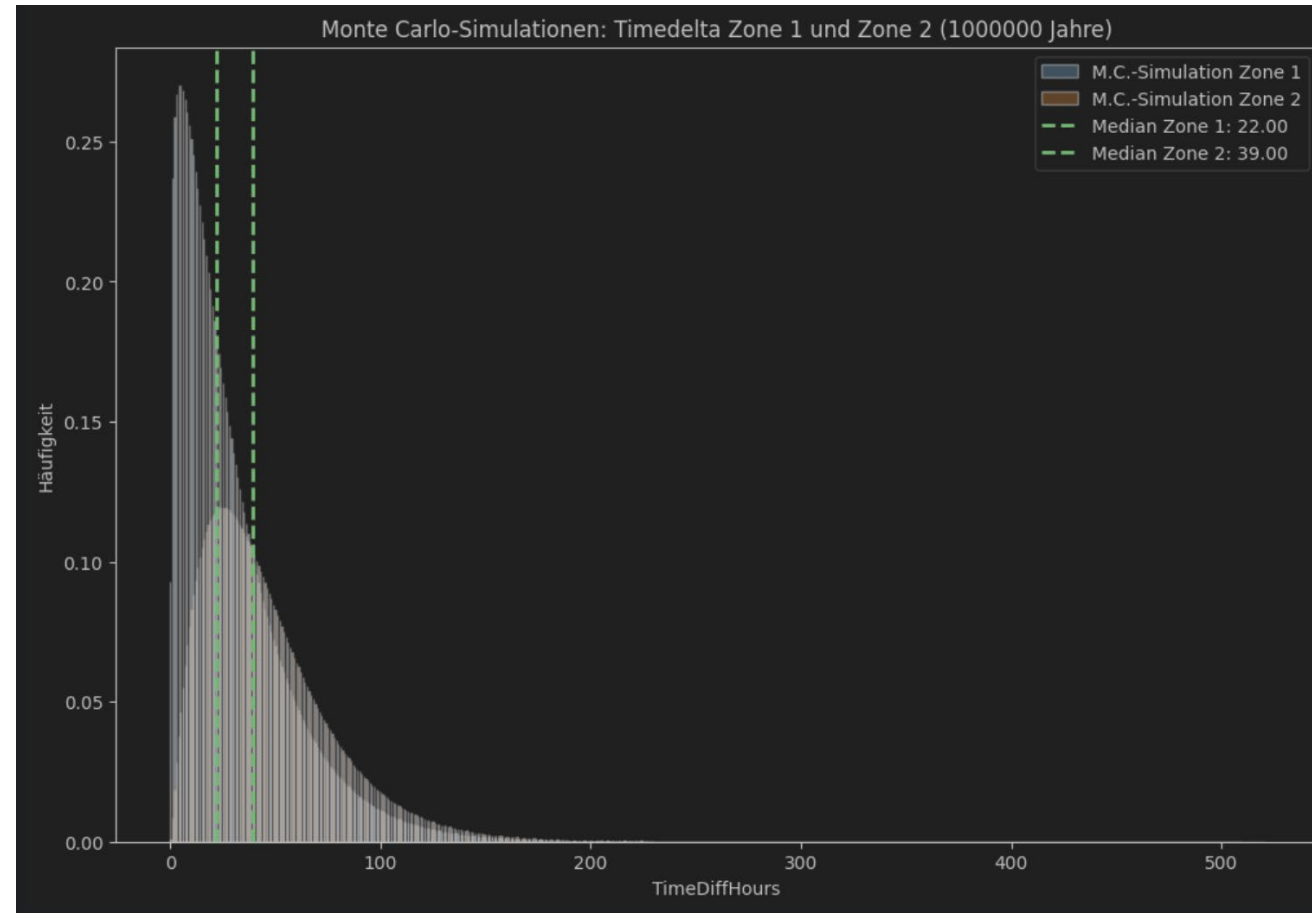
Zufallsvariable	Verteilungsfunktion
Zeitabstände [h]	Gammaverteilung
Geschwindigkeit [m/s]	Normalverteilung
Masse [kg]	Gammaverteilung

4. Monte-Carlo Simulation

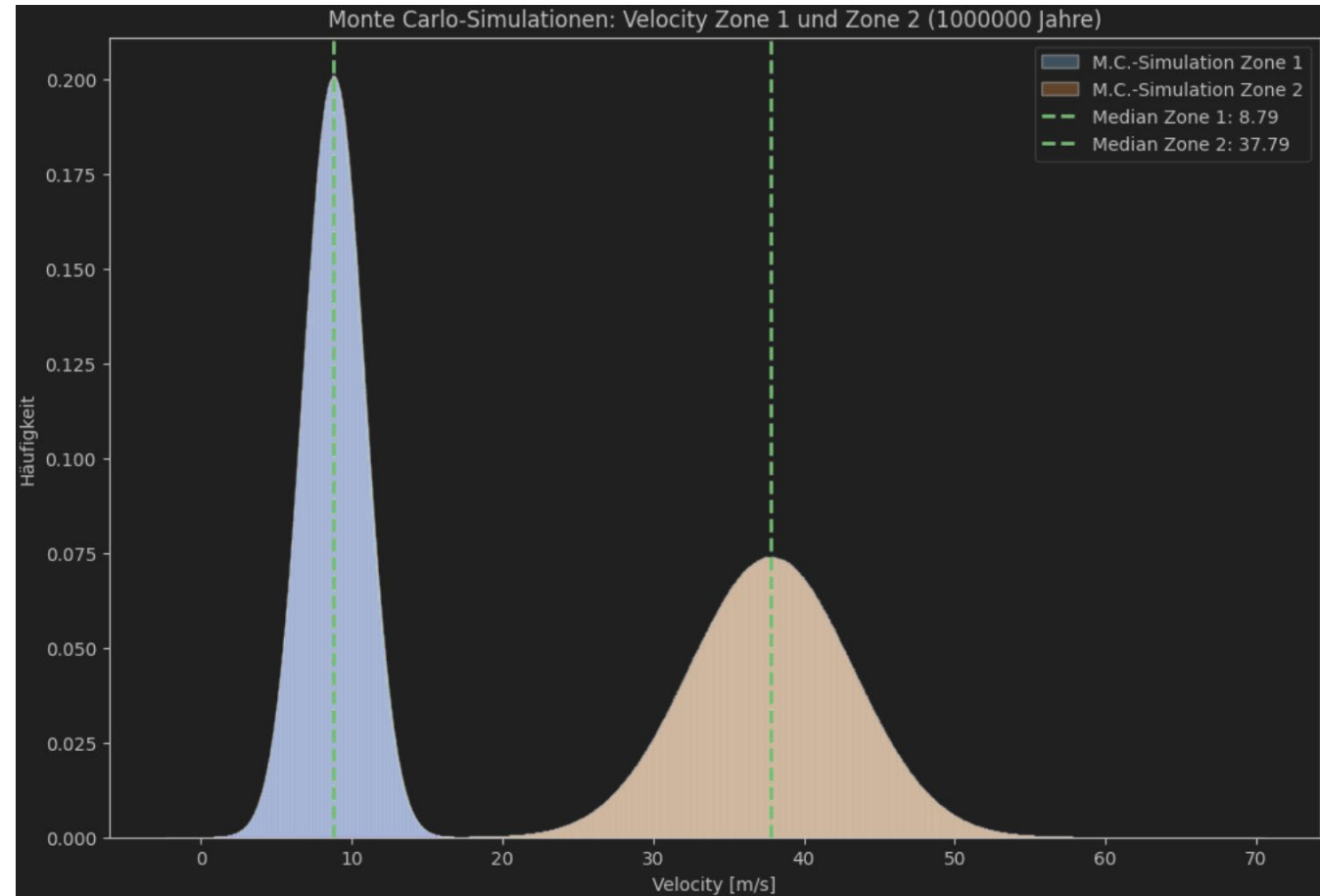
Umgang mit Ausreissern

- Ausreisser mit Median ersetzt
- Zone 1 und 2 wurden separat simuliert

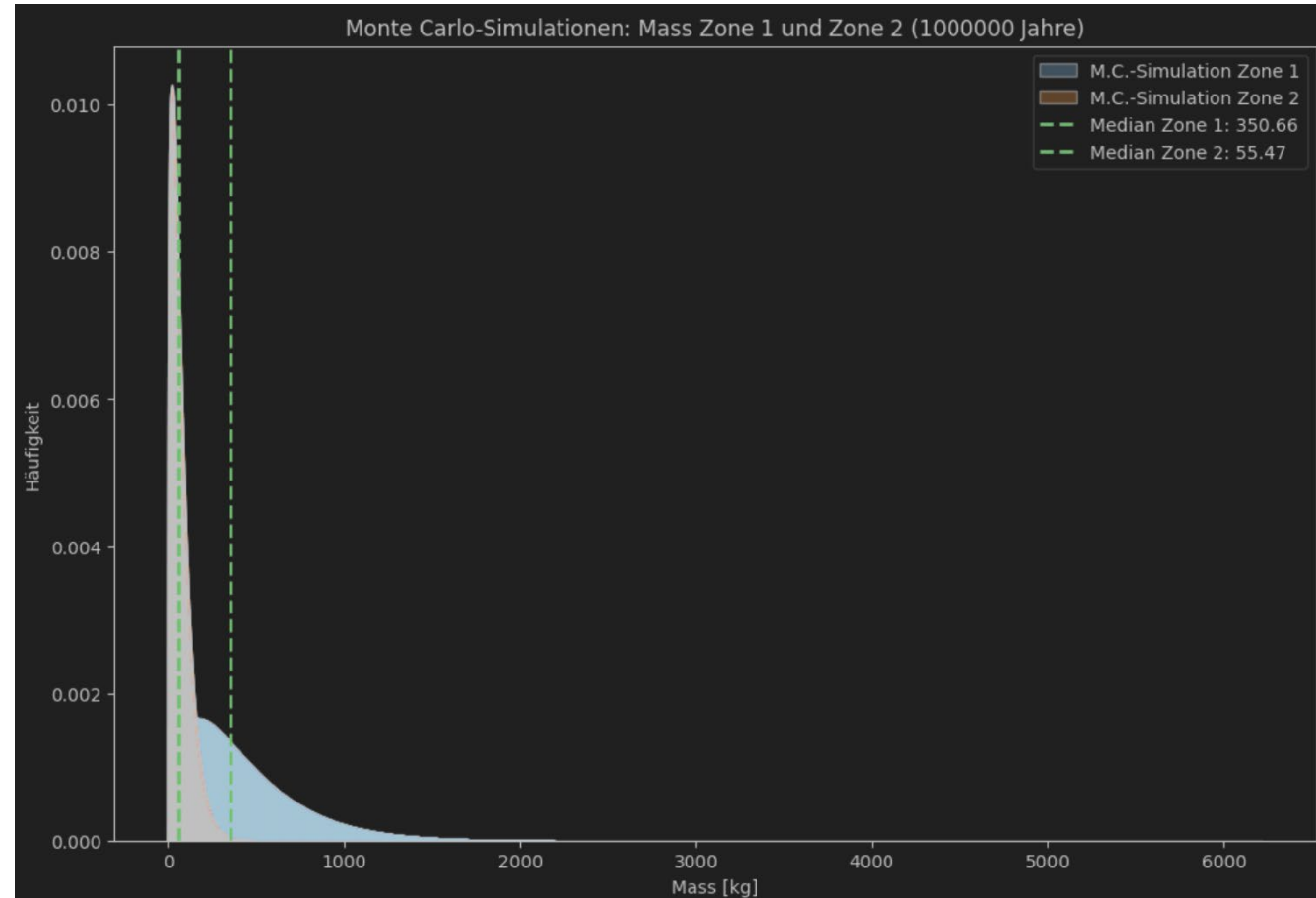
Monte-Carlo Simulation: Zeitabstände



Monte-Carlo: Geschwindigkeit

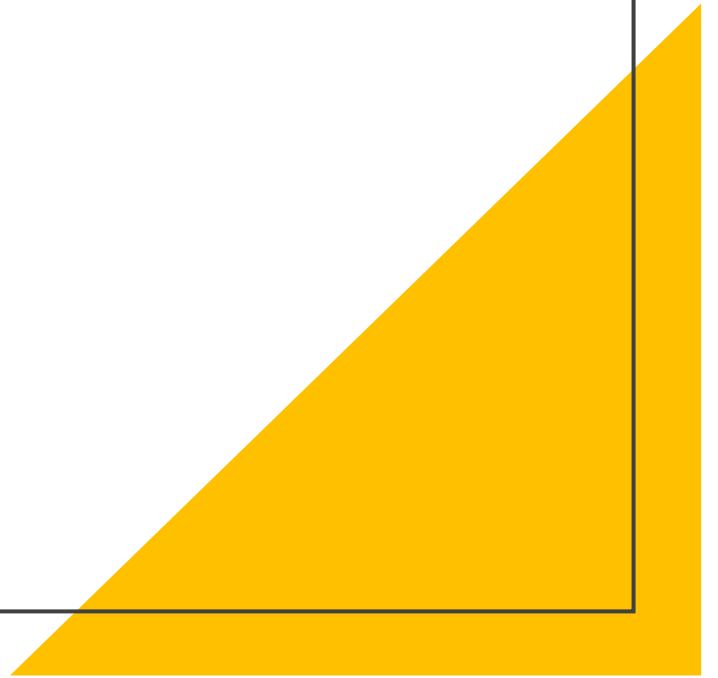


Monte-Carlo: Masse

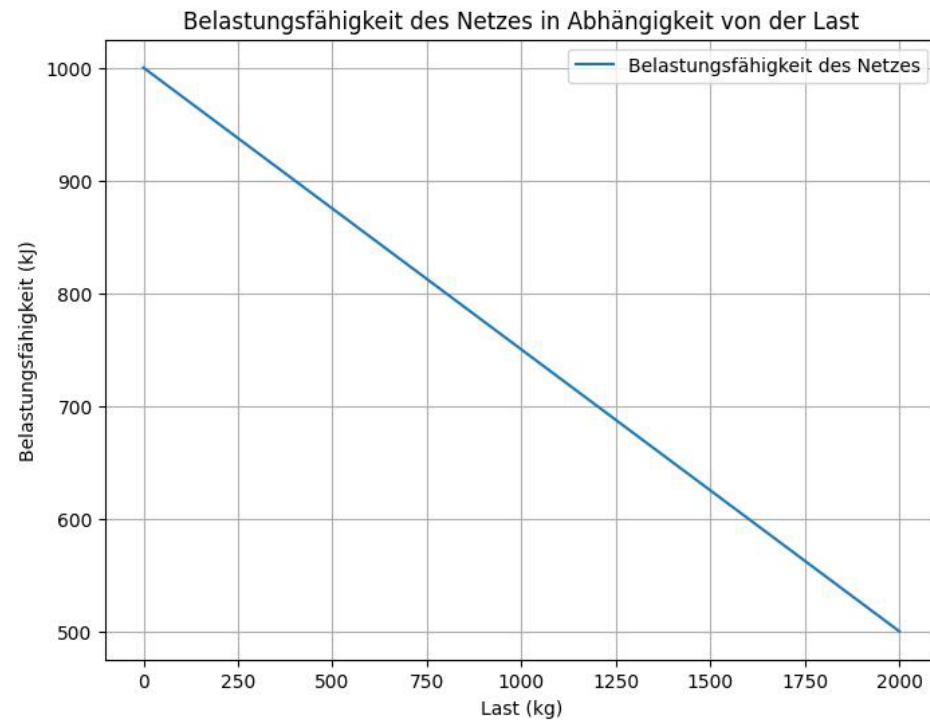


Verarbeitung Simulationsdaten

1. Kinetische Energie berechnen
2. Datum und Uhrzeit ermitteln
3. Kumulatives Gewicht im Netz ermitteln



Netzbruchwahrscheinlichkeit



- **Kinetische Energie $\geq (0.25 * \text{Kumulatives Gewicht im Netz}) + 1000$**

- **Netzbruchwahrscheinlichkeit**

$$= \frac{\text{Gesamtanzahl Netzbrüche}}{\text{Gesamtanzahl Ereignisse}}$$

Konvergieren der Simulation

- Konvergiert bei 1 Mio. Jahre
- 11351 Netzbrüche
- Netzbruchwahrscheinlichkeit = 0.0023%
- Gesamttodeswahrscheinlichkeit = 3.0407e-05%

5. Berechnungen

Input-Parameter Todeswahrscheinlichkeit

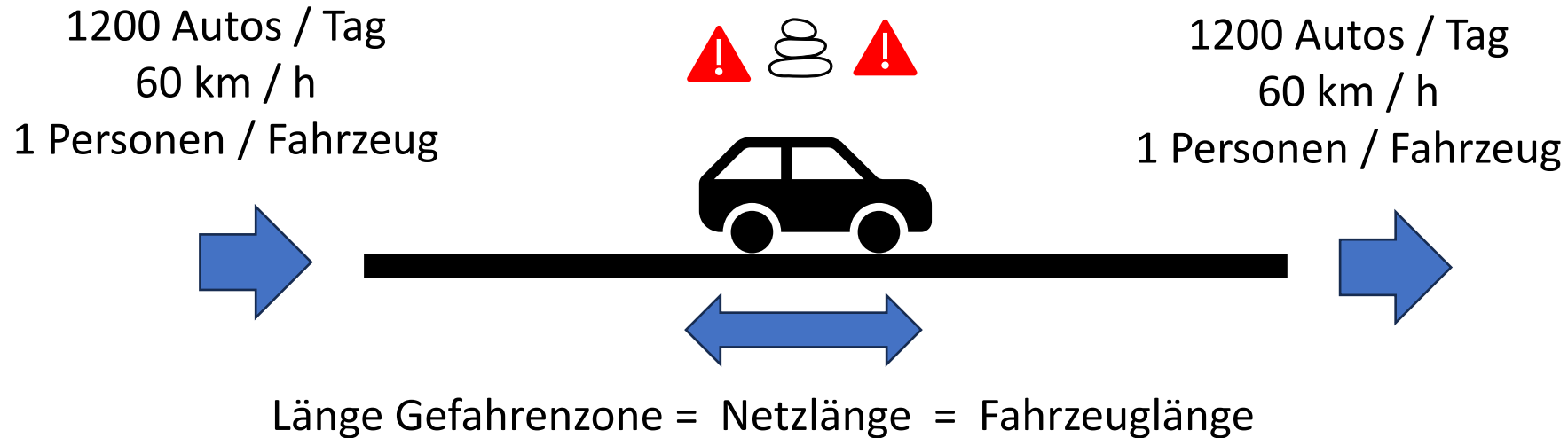


Parameter	Wert	Quelle
Geschwindigkeit	60 km/h	Projektgrundlagen
Verkehrsaufkommen	1200 Fahrzeuge pro Tag	Projektgrundlagen
Fahrzeuglänge	4.4 m	BFS
Fahrzeugbesetzungsgrad	1.6 Personen / Fahrzeug	Kanton Graubünden
Letalität indirekter Treffer (bei 60 km/h)	10 %	Kanton Graubünden
Letalität bei direktem Treffer	100%	Annahme
P(Steinnetzbruch pro Jahr)	0.0023%	Simulation
Reaktionszeit	1 Sekunde	BFU, Beratungsstelle für Unfallverhütung
Risikozeitanteil direkter Treffer	0.367 %	eigene Berechnung
Risikozeitanteil indirekter Treffer	0.44 %	eigene Berechnung

Gesamttodeswahrscheinlichkeit

Gesamttodeswahrscheinlichkeit pro Jahr

= (Risikozeitanteil indirekter Treffer + Risikozeitanteil direkter Treffer) * 1.6 Personen / Fahrzeug *
P (Steinnetzdurchbruch pro Jahr)



Risikozeitanteil direkter Treffer

Durchfahrtszeit durch die Gefahrenzone

$$t_{\text{pass}} = \frac{\text{Länge der Gefahrenzone}}{v} = \frac{4.4}{\frac{60}{3.6}} \approx 0.264 \text{ s}$$

Berechnung der gesamten Durchfahrtszeit aller Fahrzeuge pro Tag

= Anzahl der Fahrzeuge pro Tag * Durchfahrtszeit eines Fahrzeugs = 1200 Fahrzeuge * 0.264 Sekunden
= 316.8 Sekunden

Risikozeitanteil (zeitliche Präsenzwahrscheinlichkeit)

$$\frac{\text{Gesamte Durchfahrtszeit aller Fahrzeuge pro Tag}}{\text{Gesamtzeit pro Tag}} = \frac{316.8 \text{ Sekunden}}{86.400 \text{ Sekunden}} = 0.003667 \text{ oder } 0.367 \%$$

Risikozeitanteil indirekter Treffer

$$\text{Reaktionsweg} = \text{Geschwindigkeit in m/s} * \text{Reaktionszeit in Sekunden} = 16.67 \text{ m/s} * 1 \text{ s} = 16.67 \text{ m}$$

$$\text{Bremsweg} = \left(\frac{\text{Geschwindigkeit in km/h}}{10} \right)^2 = \left(\frac{60 \text{ km/h}}{10} \right)^2 = 36 \text{ m}$$

$$\text{Gesamter Anhalteweg} = \text{Reaktionsweg} + \text{Bremsweg} = 16.67 \text{ m} + 36 \text{ m} = 52.67 \text{ m}$$

$$\text{Zeit pro Fahrzeug für Anhalteweg} = \frac{\text{Gesamter Anhalteweg}}{\text{Geschwindigkeit in m/s}} = \frac{52.67 \text{ m}}{16.67 \text{ m/s}} = 3.16 \text{ s}$$

$$\text{Gesamte Risikozeit aller Fahrzeuge pro Tag} = 1200 \text{ Fahrzeug} * 3.16 \text{ s} * 0.1 \text{ (Letalität)} = 379.2 \text{ s}$$

$$\text{Risikozeitanteil} = \frac{\text{Gesamte Risikozeit aller Fahrzeuge pro Tag}}{\text{Gesamtzeit pro Tag}} = \frac{379.2 \text{ s}}{86400 \text{ s}} = 0.004389 \text{ oder } 0.44 \%$$

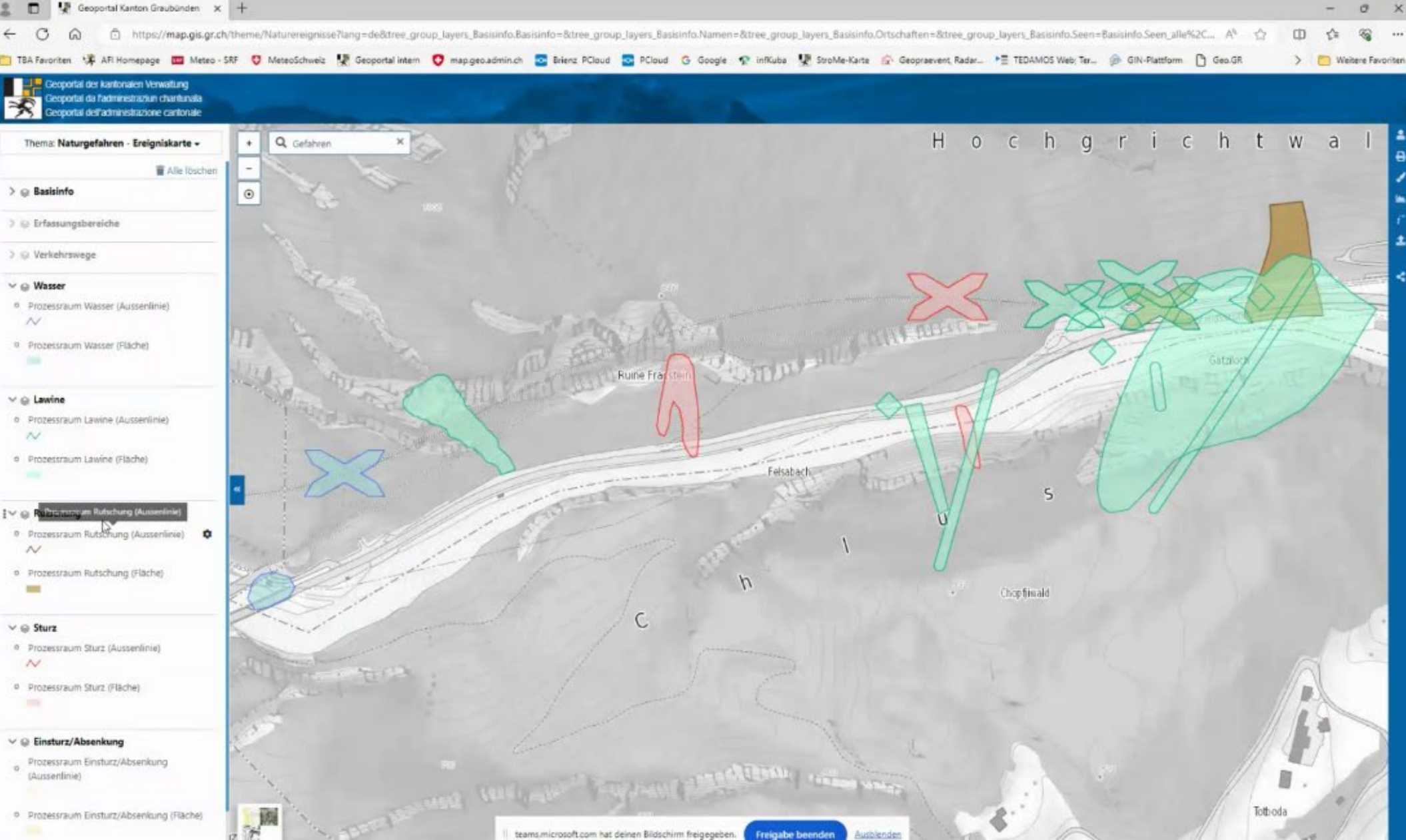
6. Auswertung

Empfehlung an den Kantonsingenieur

- Todeswahrscheinlichkeit **$3.0407 \times 10^{-5} \%$**
- Die Strasse kann offen bleiben

7. Praxisbeispiel

Tiefbauamt GR





teams.microsoft.com hat deinen Bildschirm freigegeben. [Freigabe beenden](#) [Ausblenden](#)

Christoph Nänni, TBA GR (Gast) — +