



Steinschlagrisiko

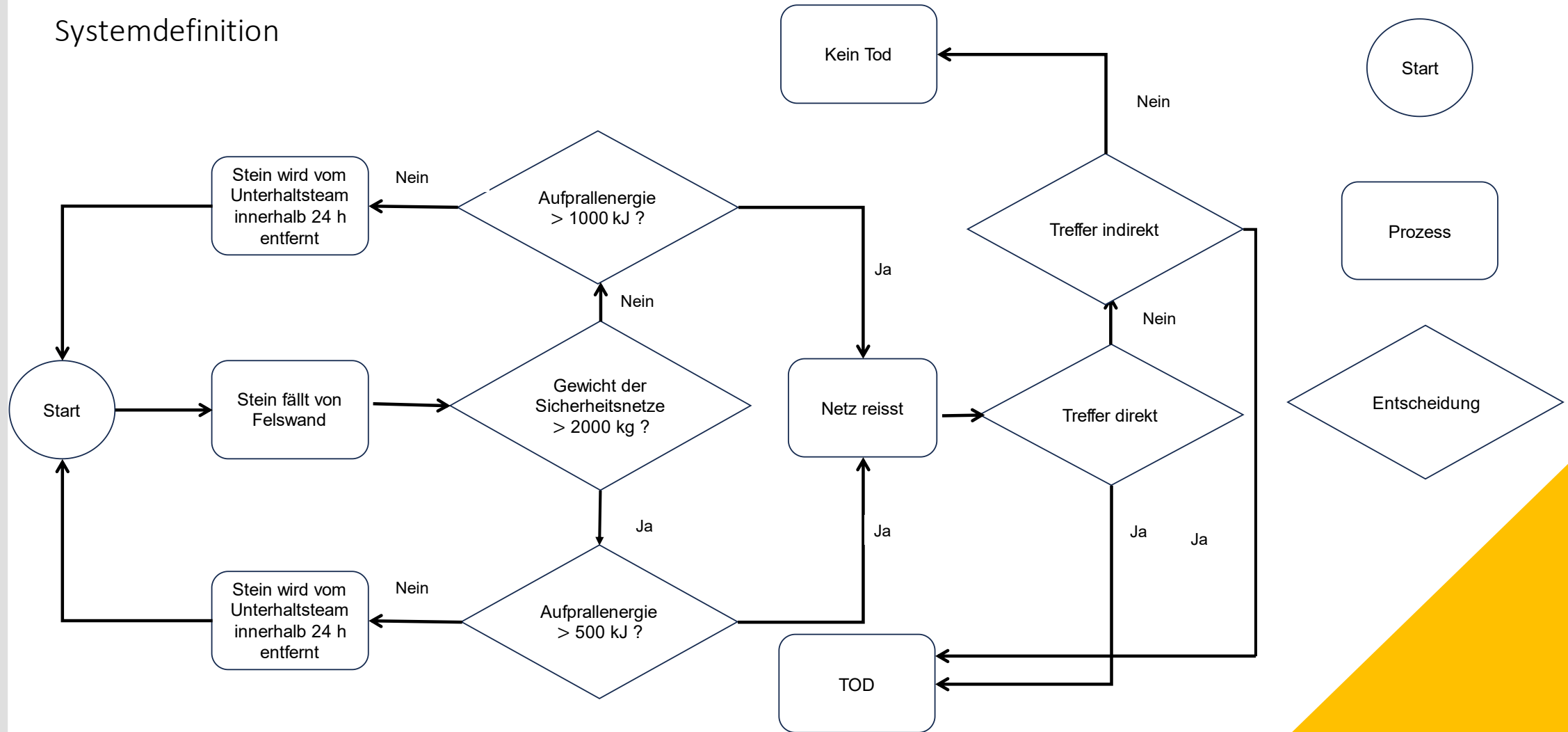
Muss die Strasse gesperrt werden?

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

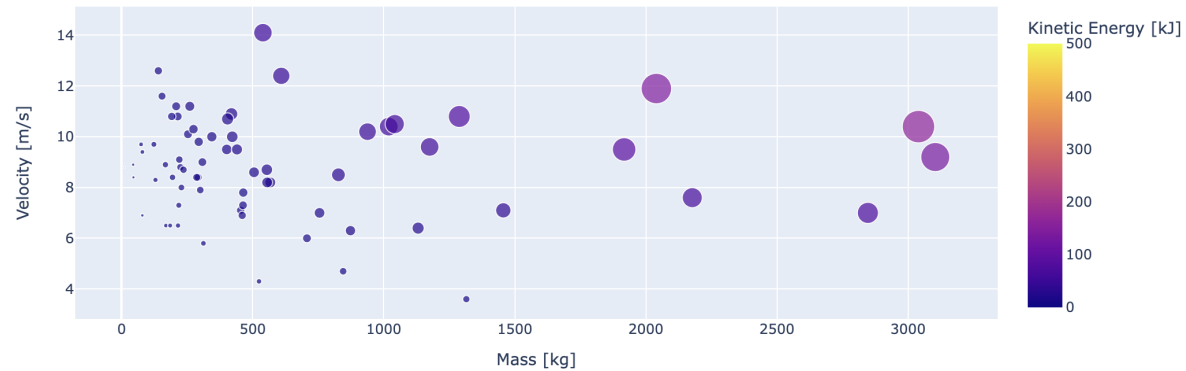
| | Date | Time | Mass [kg] | Velocity [m/s] | Kinetic Energy [kJ] | DateTime | TimeDiffHours |
|-----|------------|-------|-----------|----------------|---------------------|---------------------|---------------|
| 0 | 01/01/2019 | 09:00 | 194 | 8.4 | 6.844320 | 2019-01-01 09:00:00 | 0.0 |
| 1 | 01/01/2019 | 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

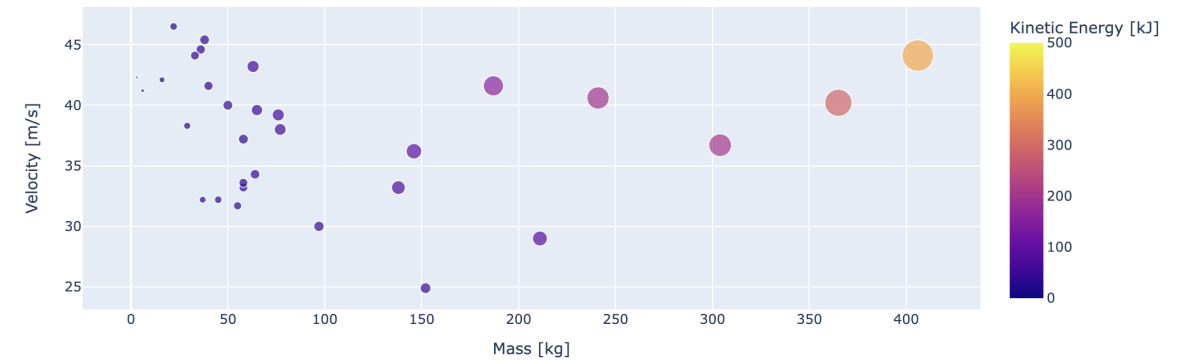
| | Date | Time | Mass [kg] | Velocity [m/s] | Kinetic Energy [kJ] | DateTime | TimeDiffHours |
|-----|------------|-------|-----------|----------------|---------------------|---------------------|---------------|
| 0 | 01/01/2019 | 09:00 | 194 | 8.4 | 6.844320 | 2019-01-01 09:00:00 | 0.0 |
| 1 | 01/01/2019 | 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

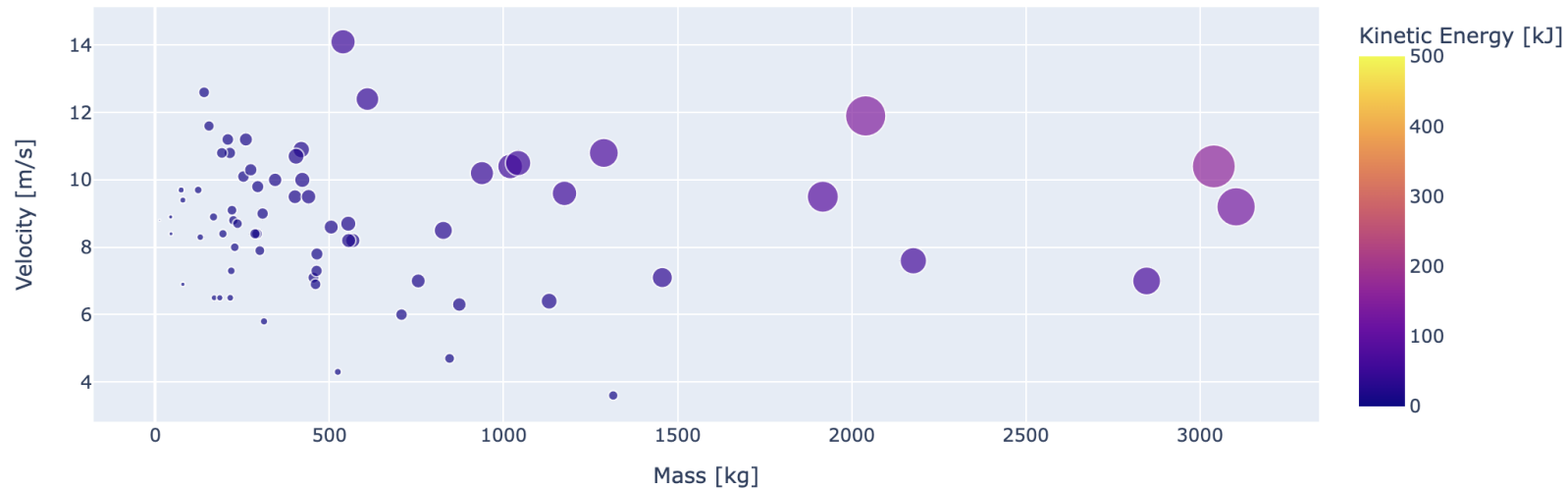


Scatter-Diagram of Separation Zone 2

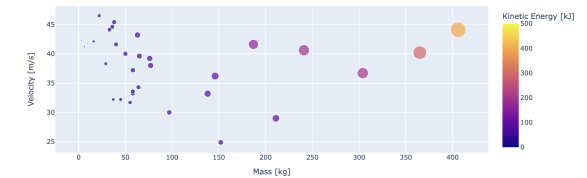


Explorative Datenanalyse: Kinetische Energie

Scatter-Diagram of Separation Zone 1

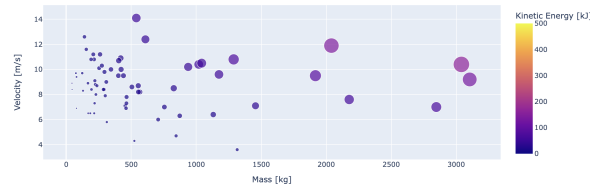


Scatter-Diagram of Separation Zone 2

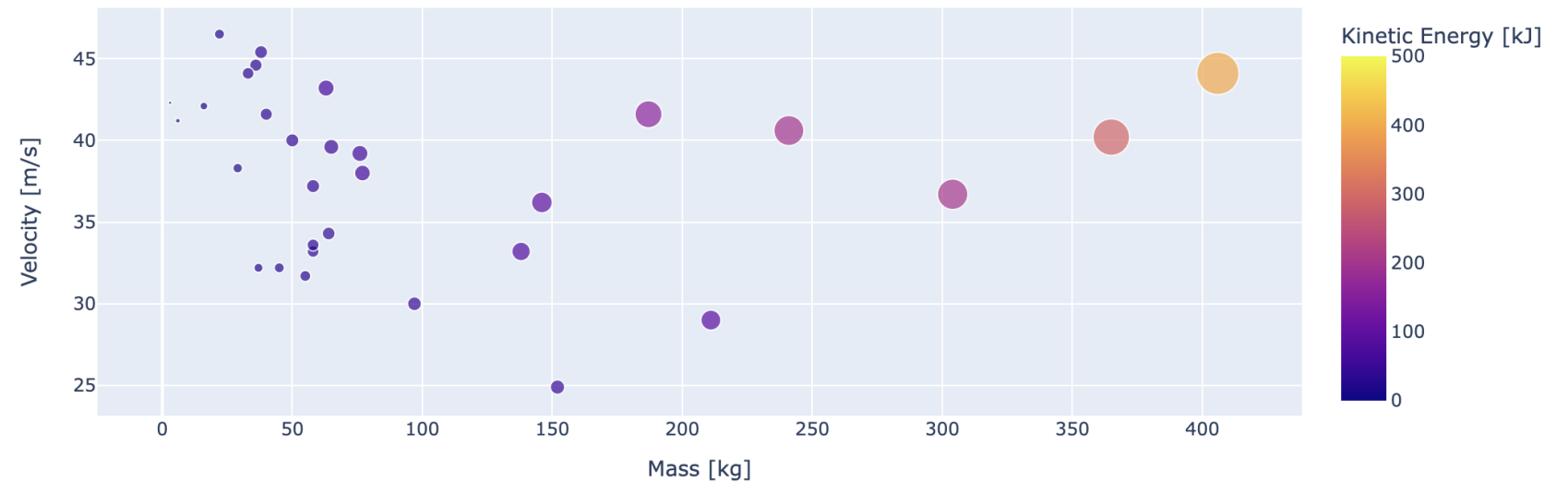


Explorative Datenanalyse: Kinetische Energie

Scatter-Diagram of Separation Zone 1

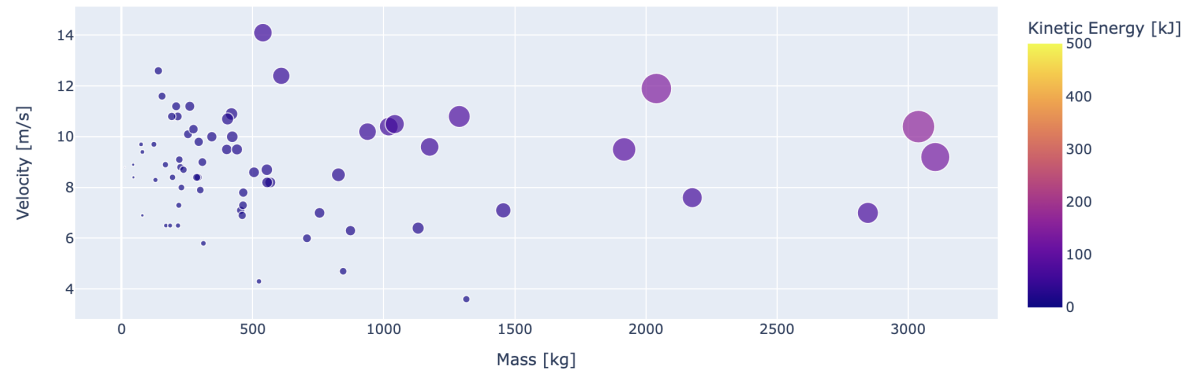


Scatter-Diagram of Separation Zone 2

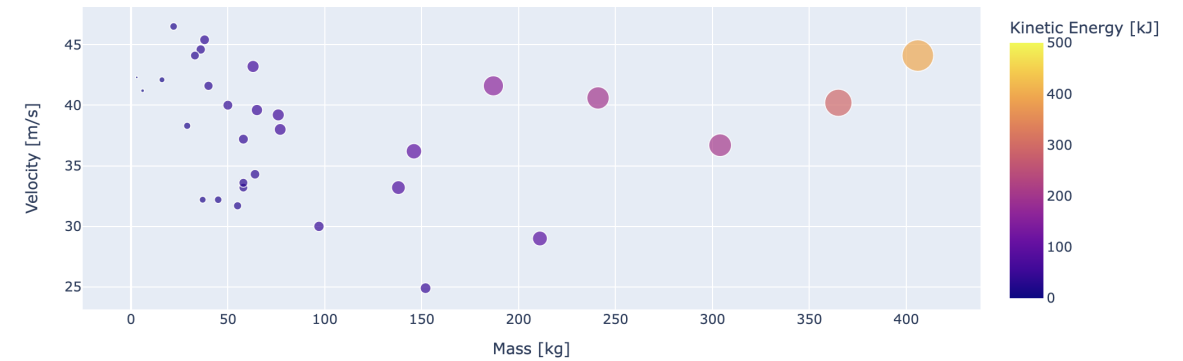


Explorative Datenanalyse: Kinetische Energie

Scatter-Diagram of Separation Zone 1

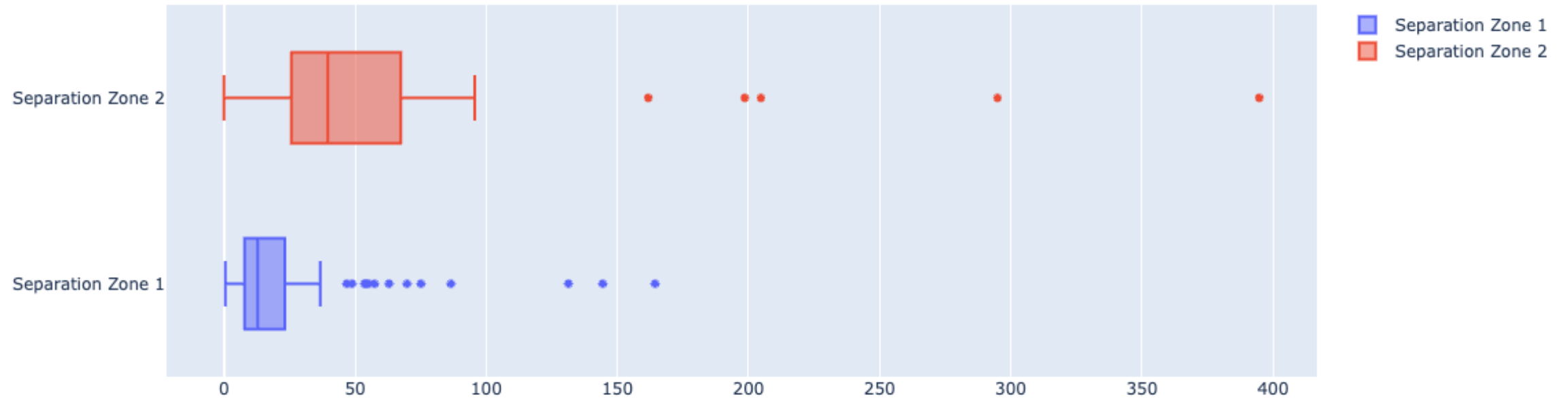


Scatter-Diagram of Separation Zone 2

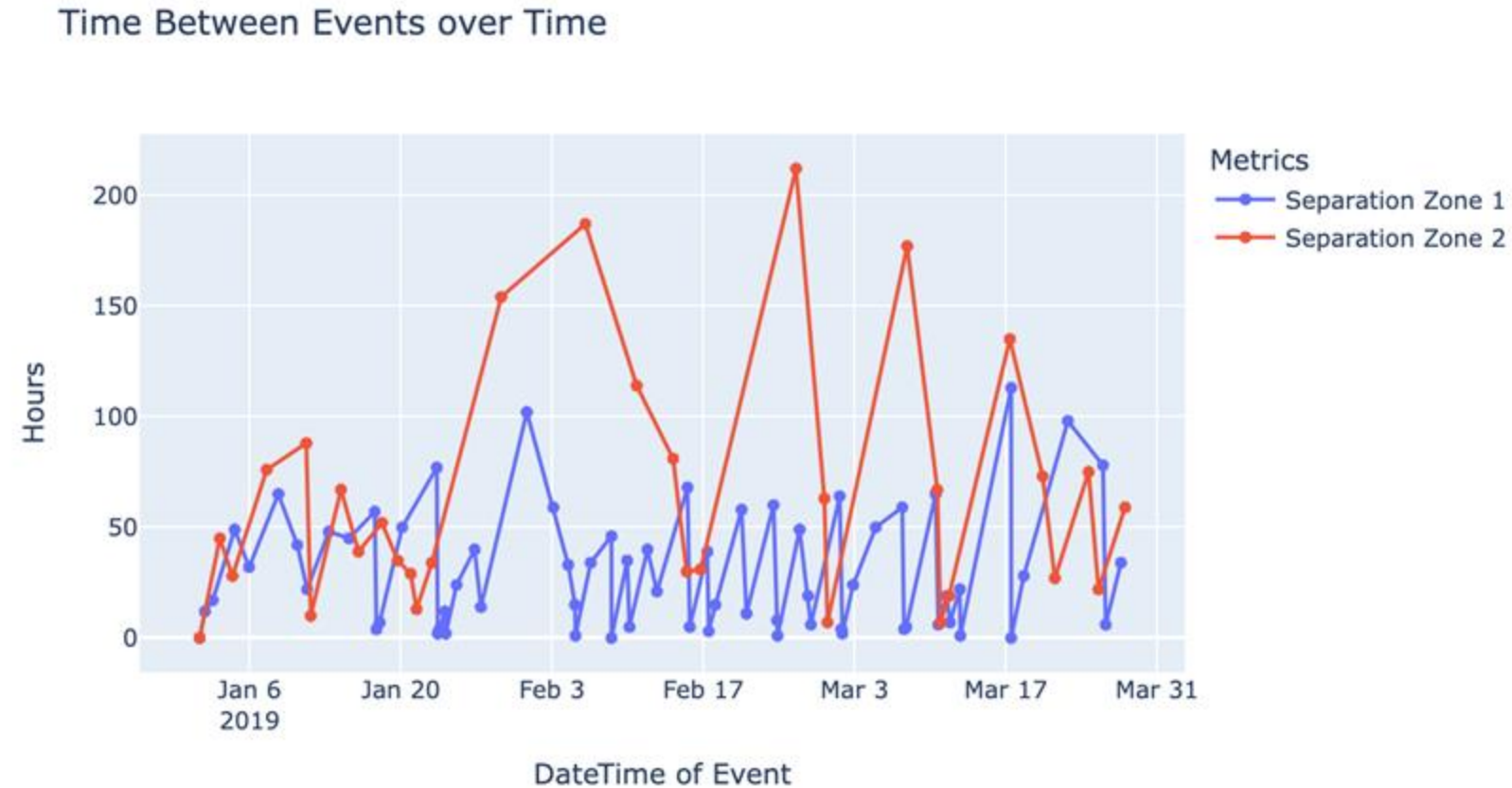


Explorative Datenanalyse: Kinetische Energie

Rockfall Boxplot By Kinetic Energy

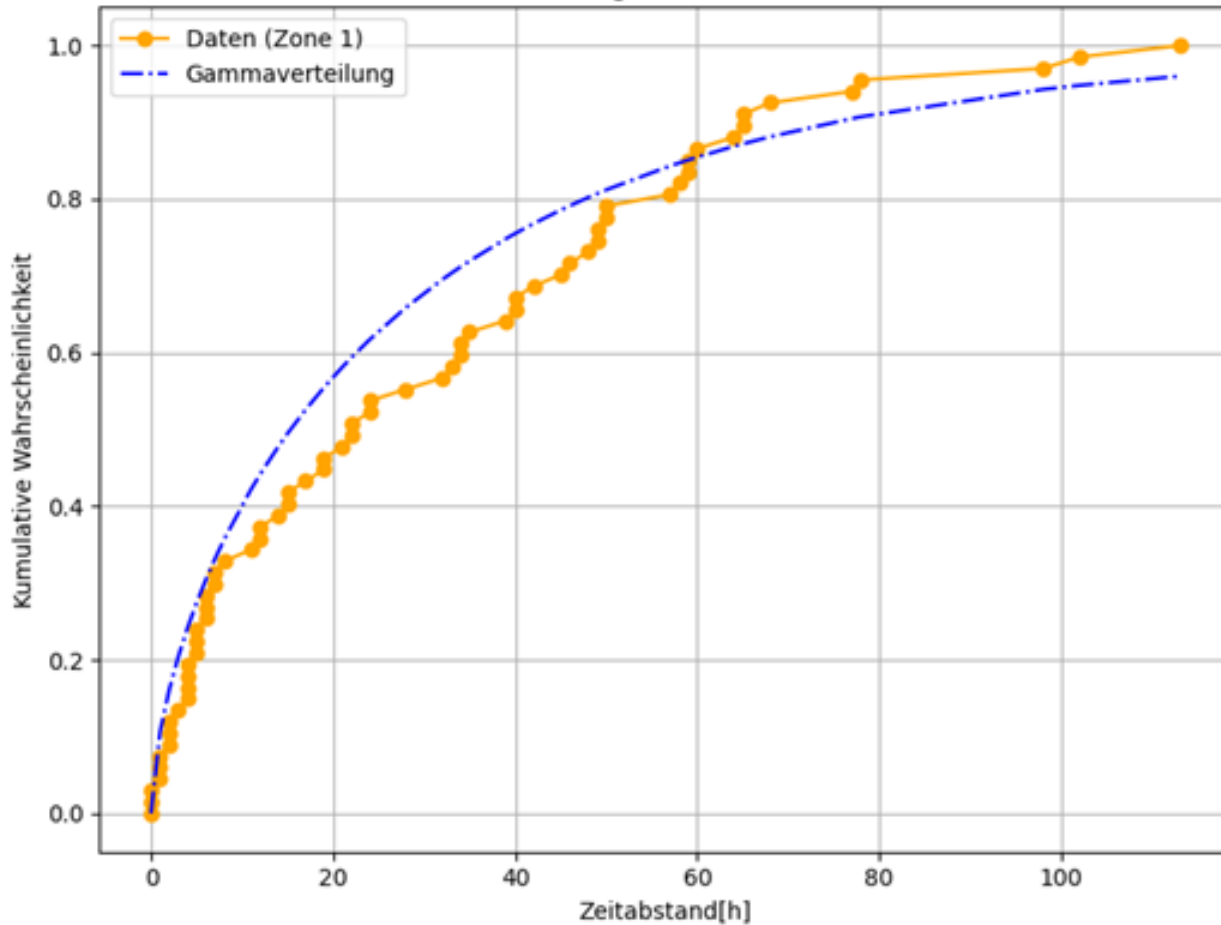


Explorative Datenanalyse: Zeitabstände

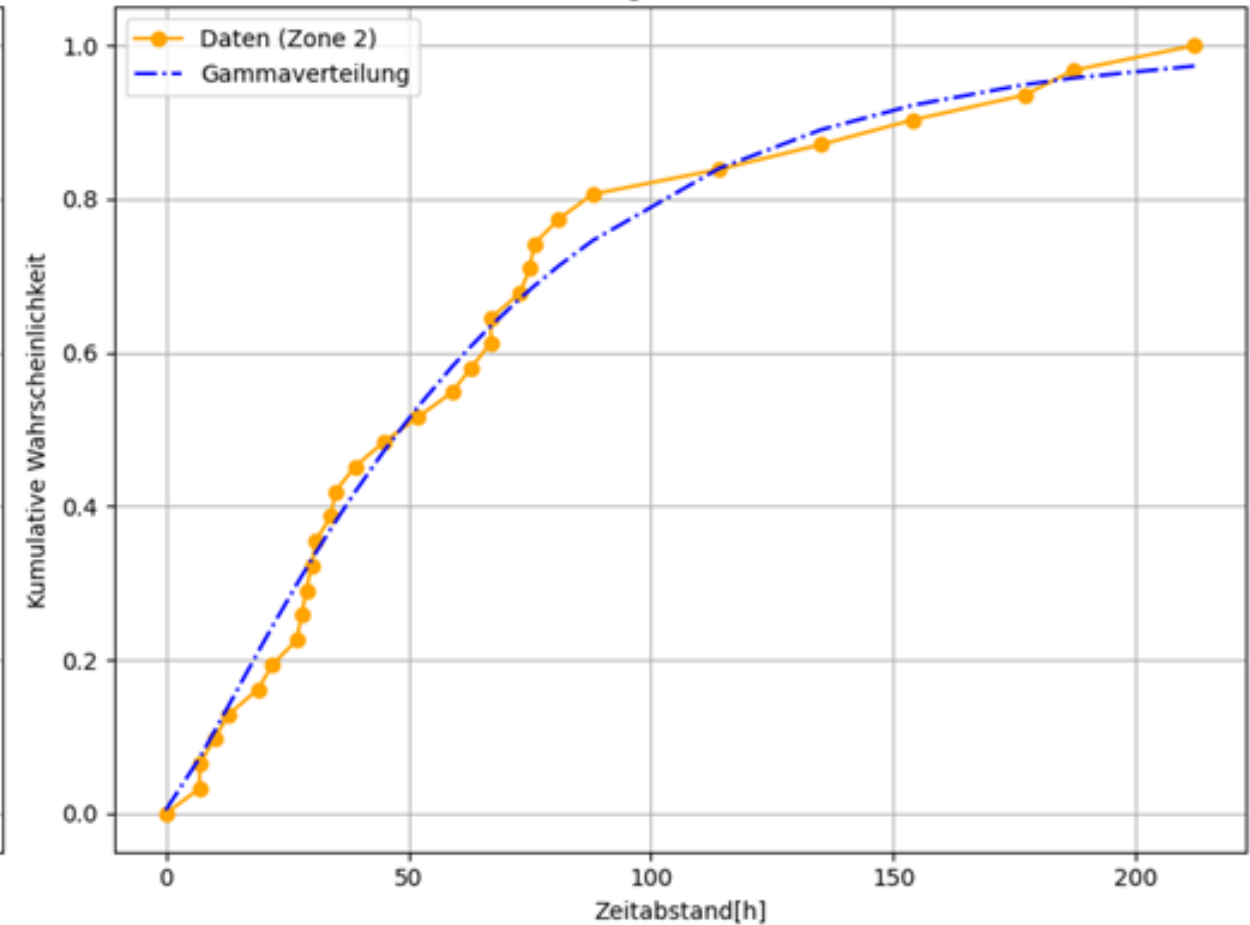


Explorative Datenanalyse: Zeitabstände

Kumulative Verteilung für Zeitabstände in Zone 1

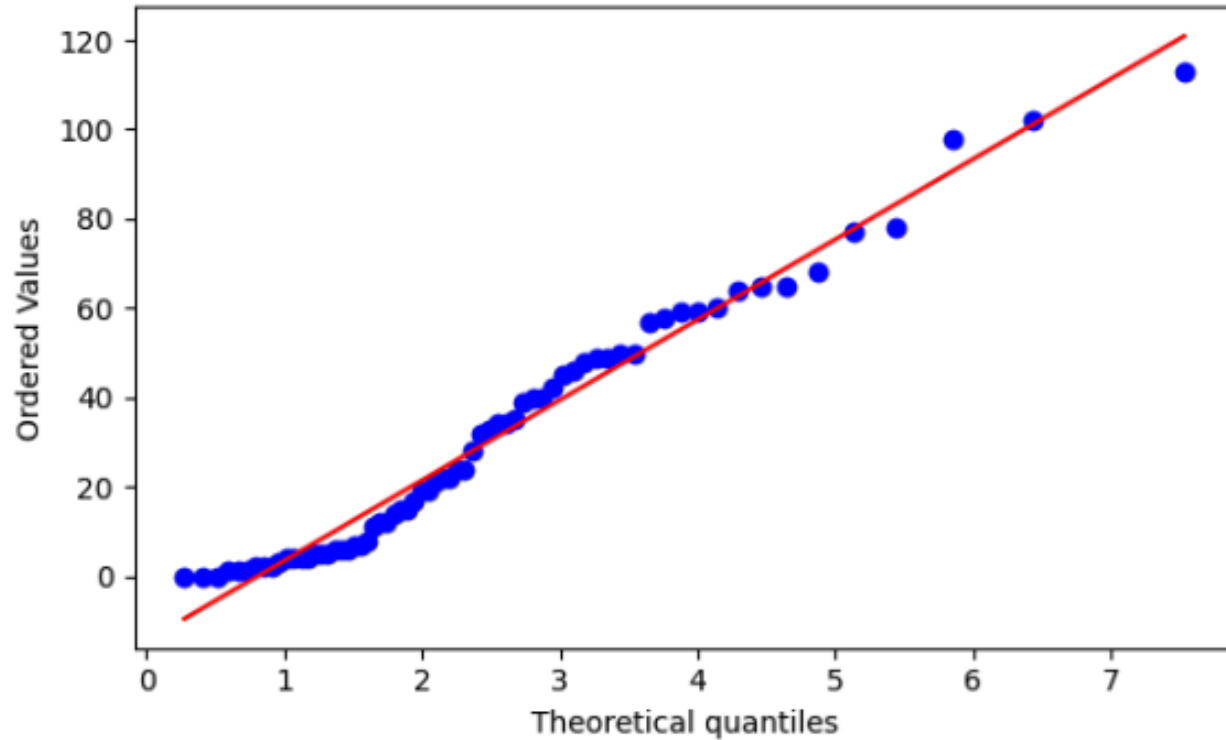


Kumulative Verteilung für Zeitabstände in Zone 2

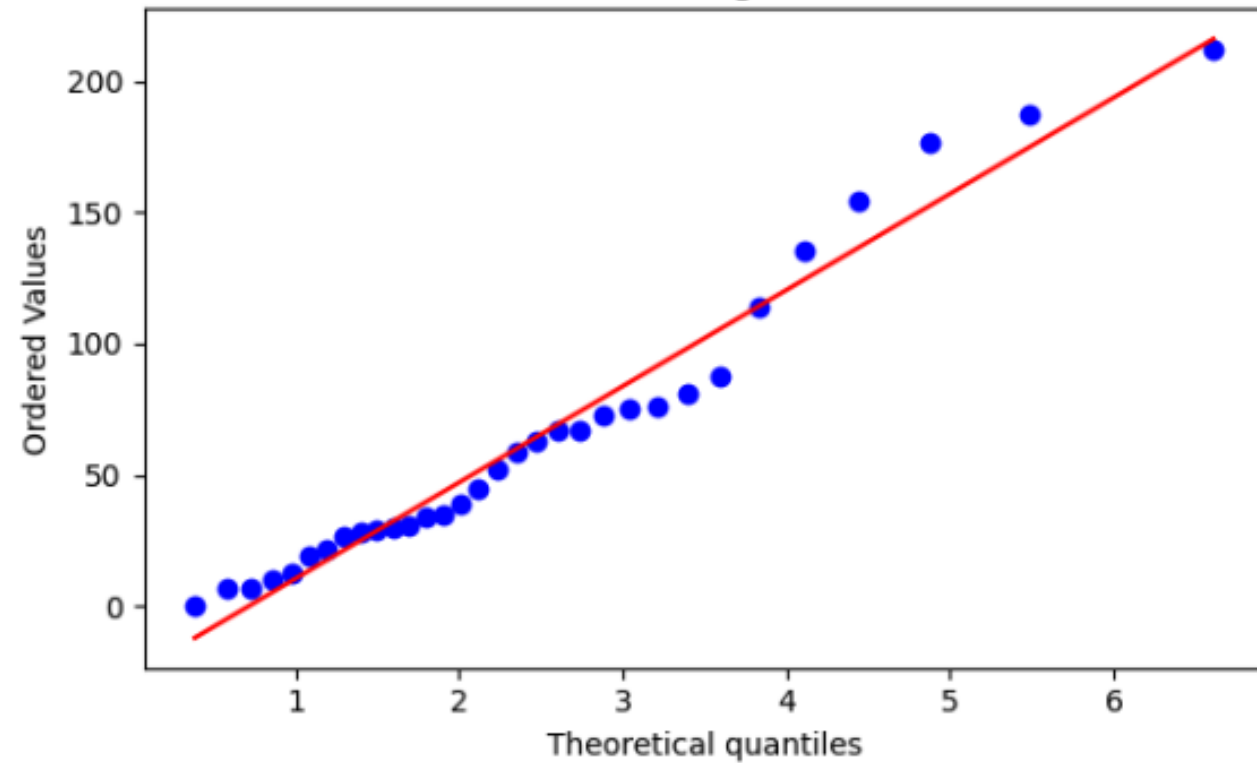


Explorative Datenanalyse: Zeitabstände

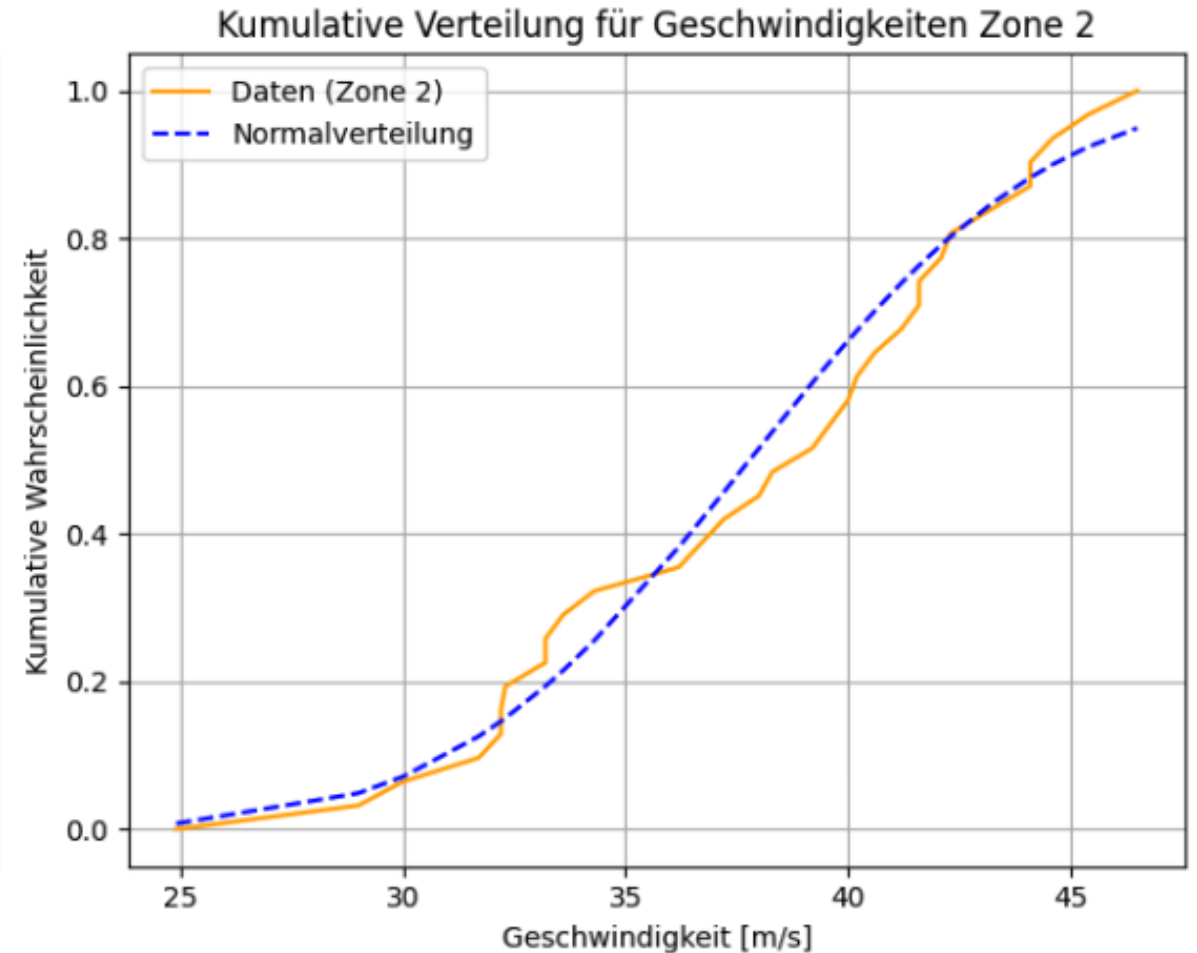
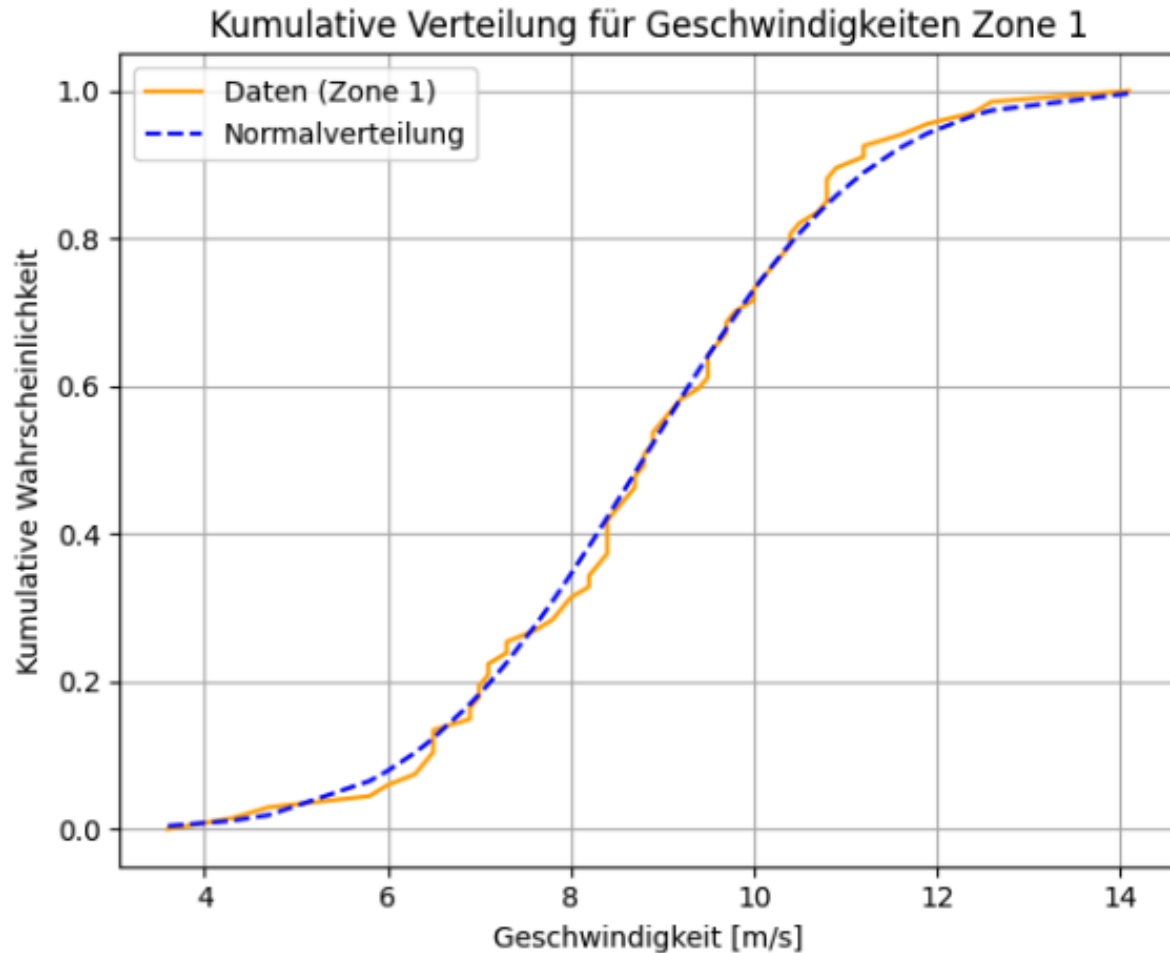
Q-Q-Plot Gammaverteilung Zeitabstände Zone 1



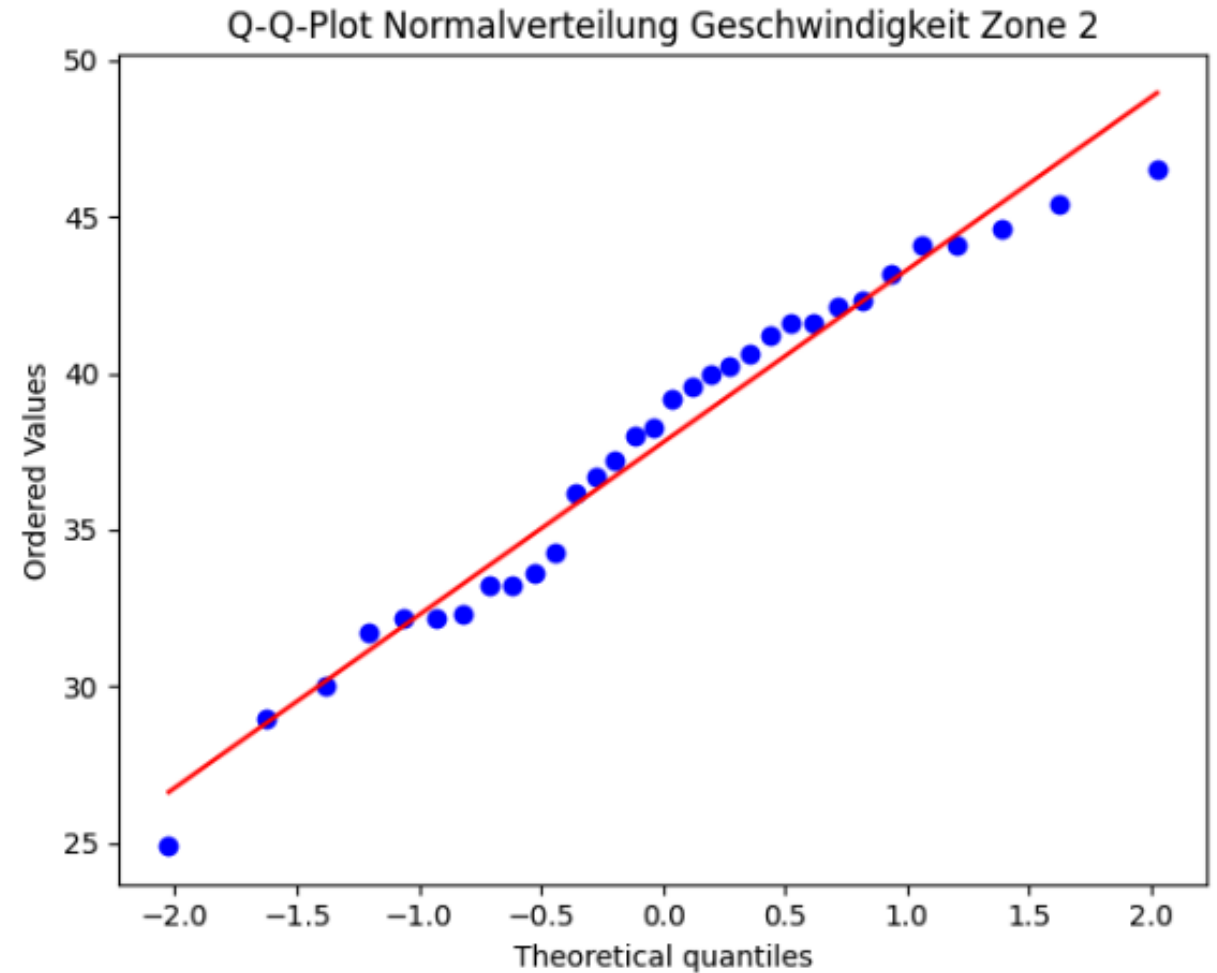
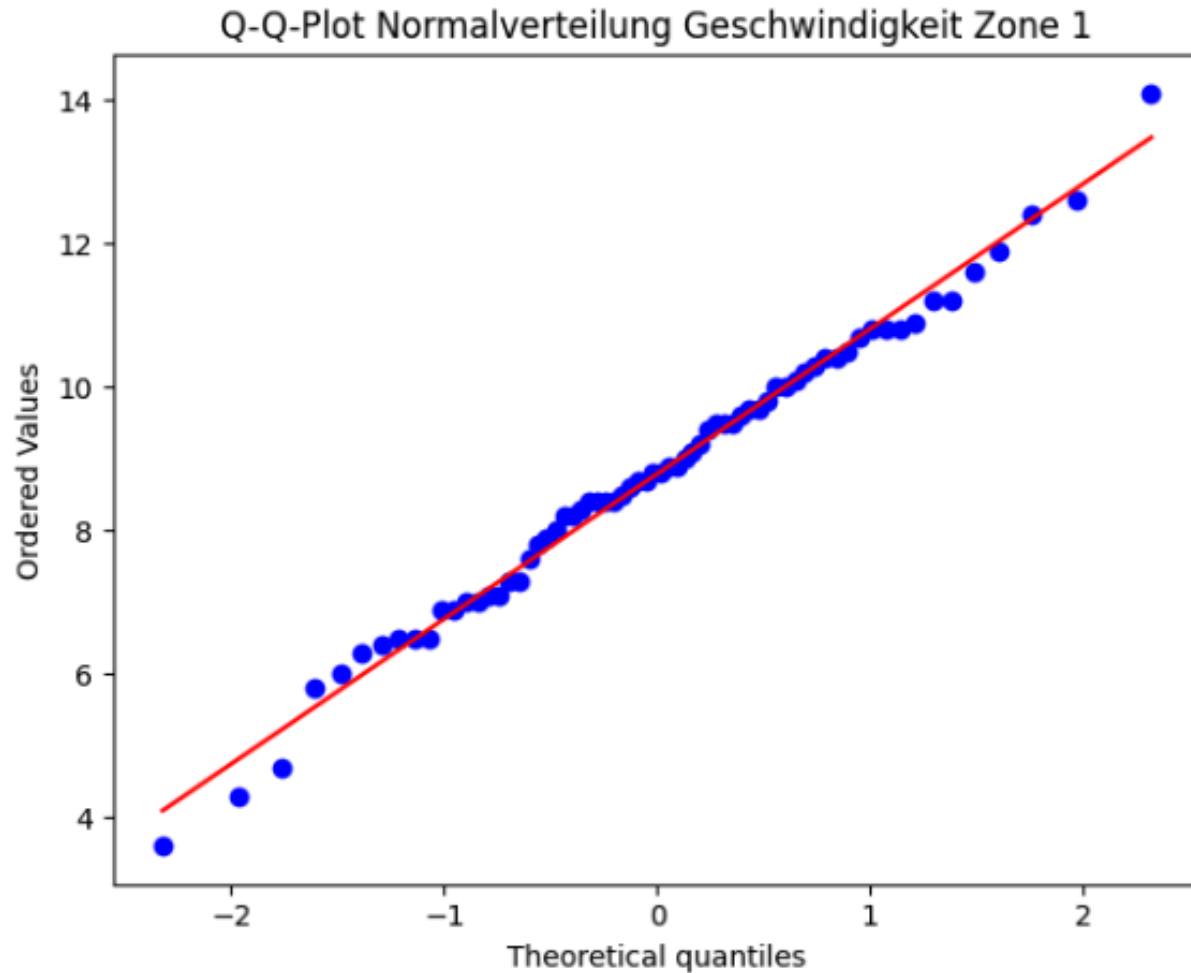
Q-Q-Plot Gammaverteilung Zeitabstände Zone 2



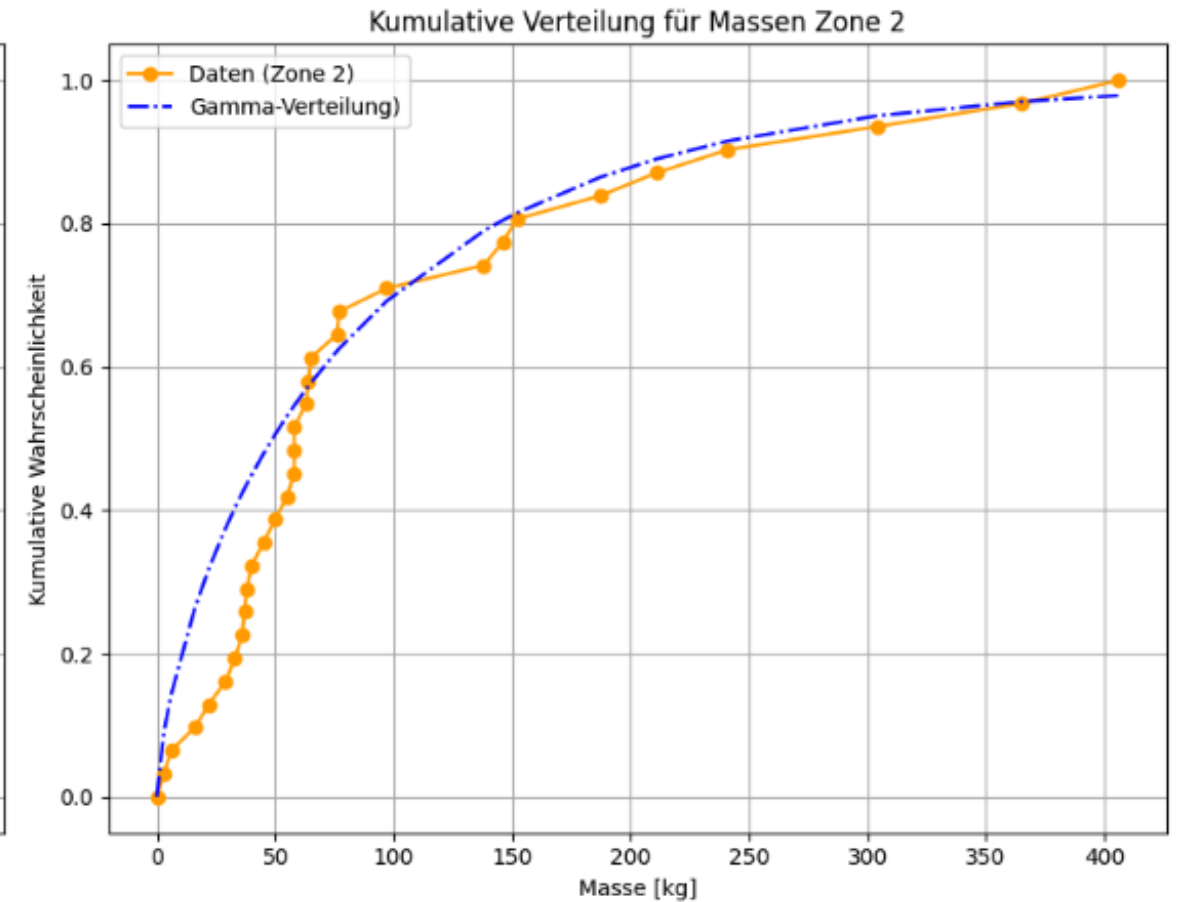
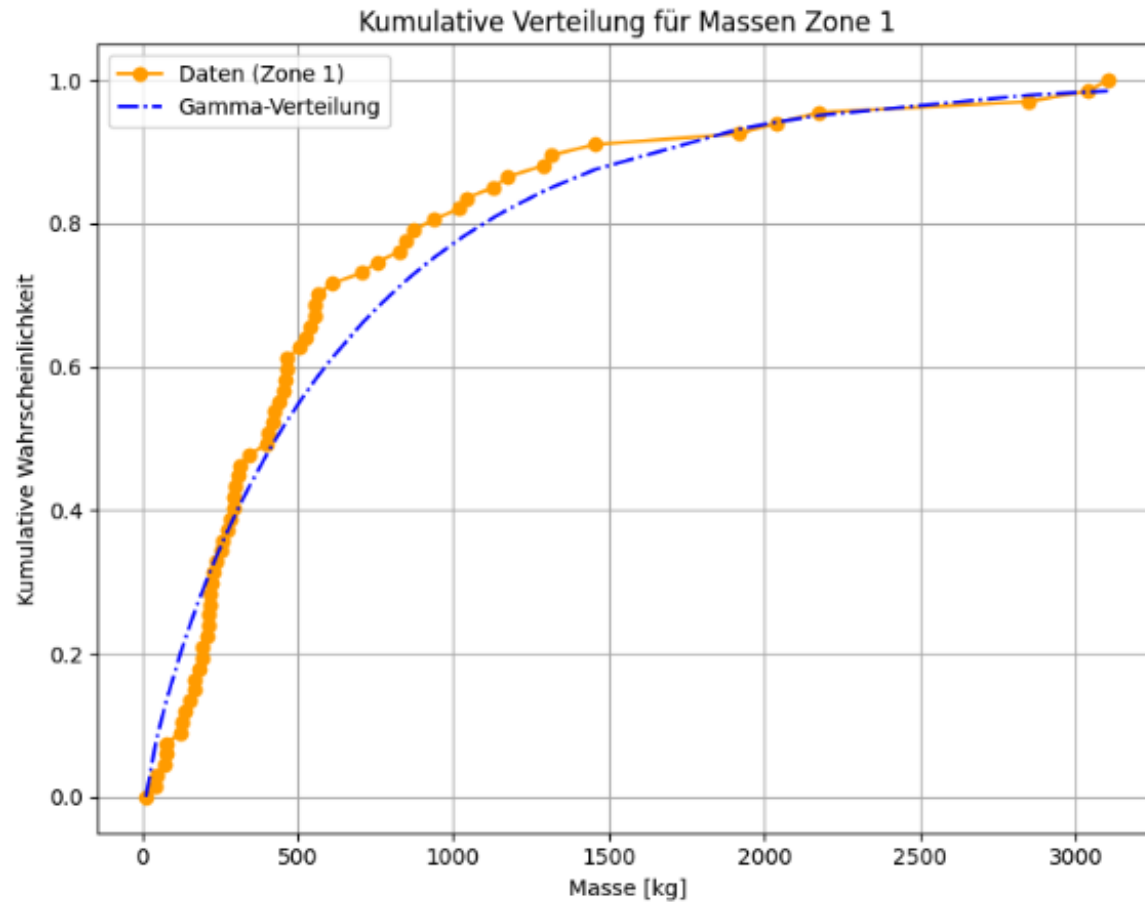
Explorative Datenanalyse: Geschwindigkeit



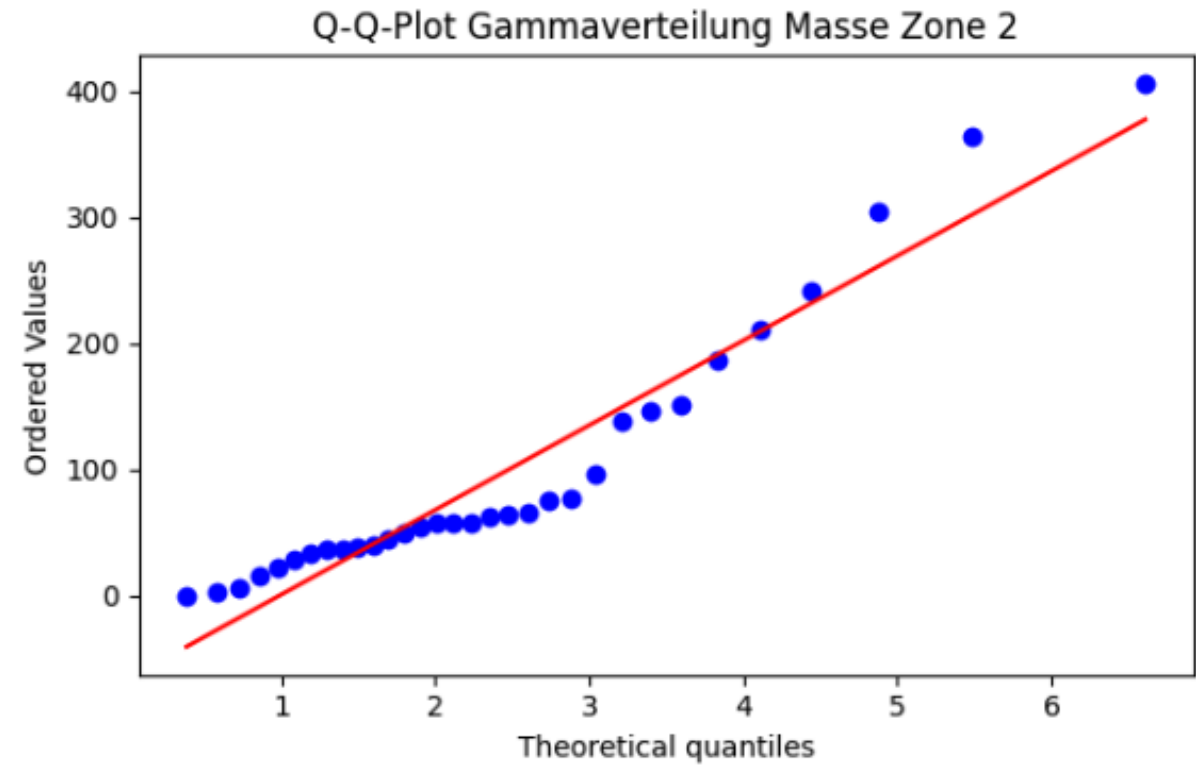
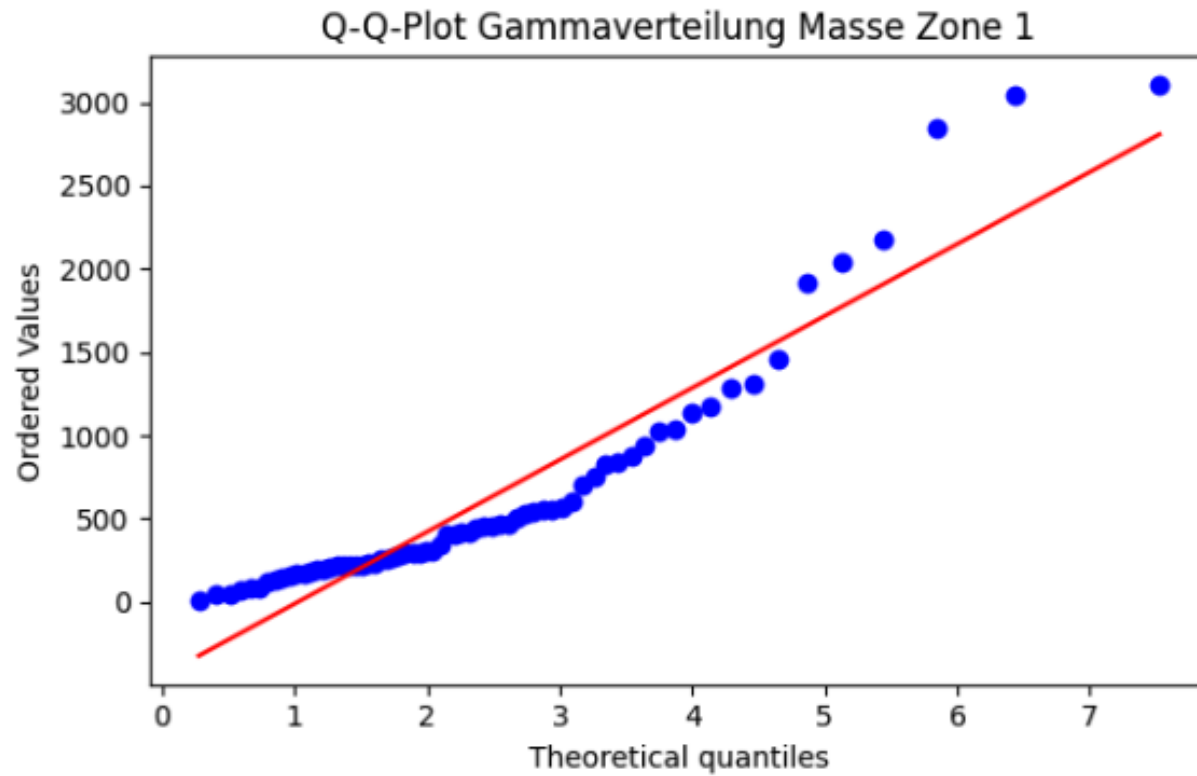
Explorative Datenanalyse: Geschwindigkeit



Explorative Datenanalyse: Masse



Explorative Datenanalyse: Masse



Explorative Datenanalyse: Verteilungsfunktionen

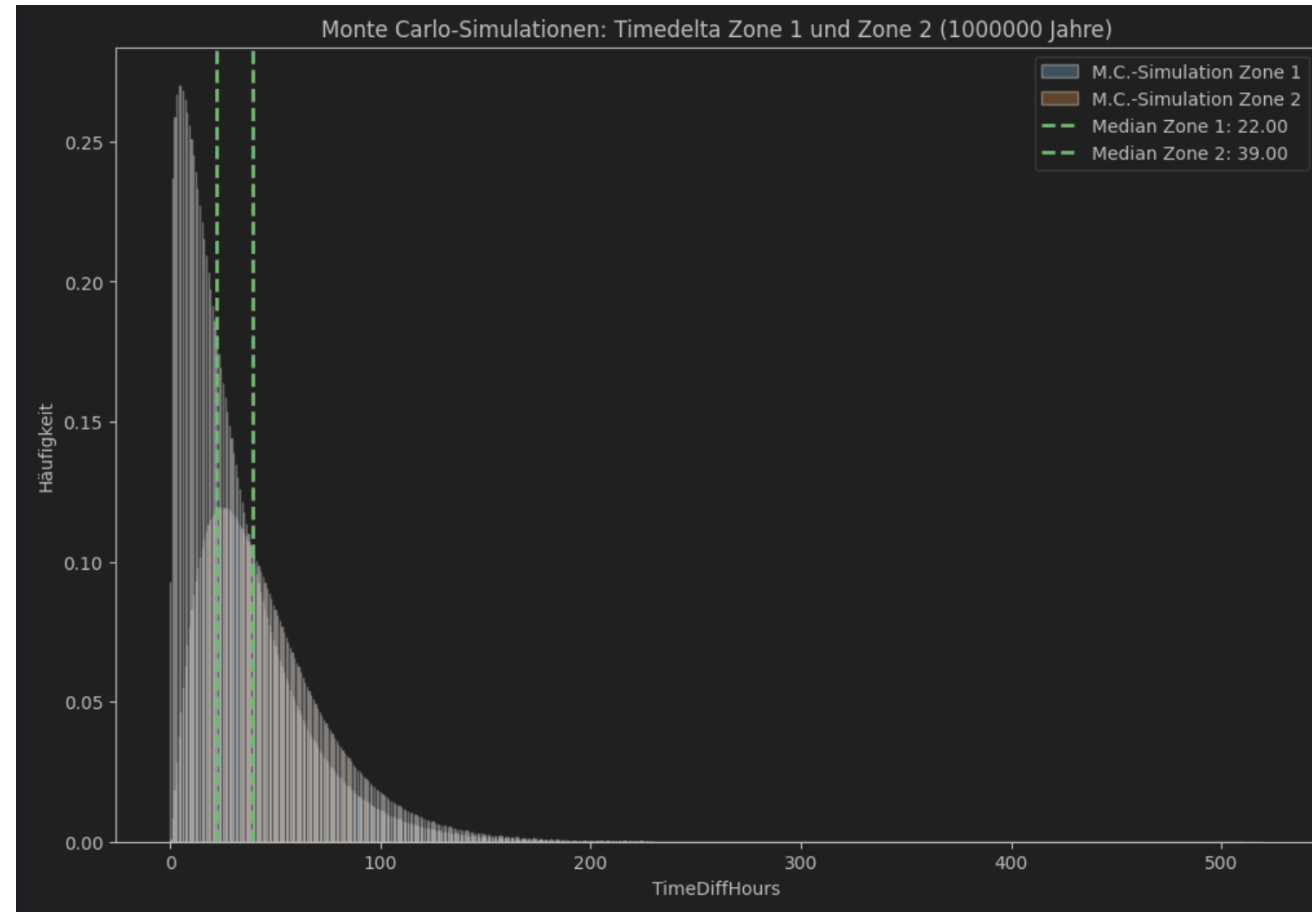
| Zufallsvariable | Verteilungsfunktion |
|-----------------------|---------------------|
| Zeitabstände [h] | Gammaverteilung |
| Geschwindigkeit [m/s] | Normalverteilung |
| Masse [kg] | Gammaverteilung |

4. Monte-Carlo Simulation

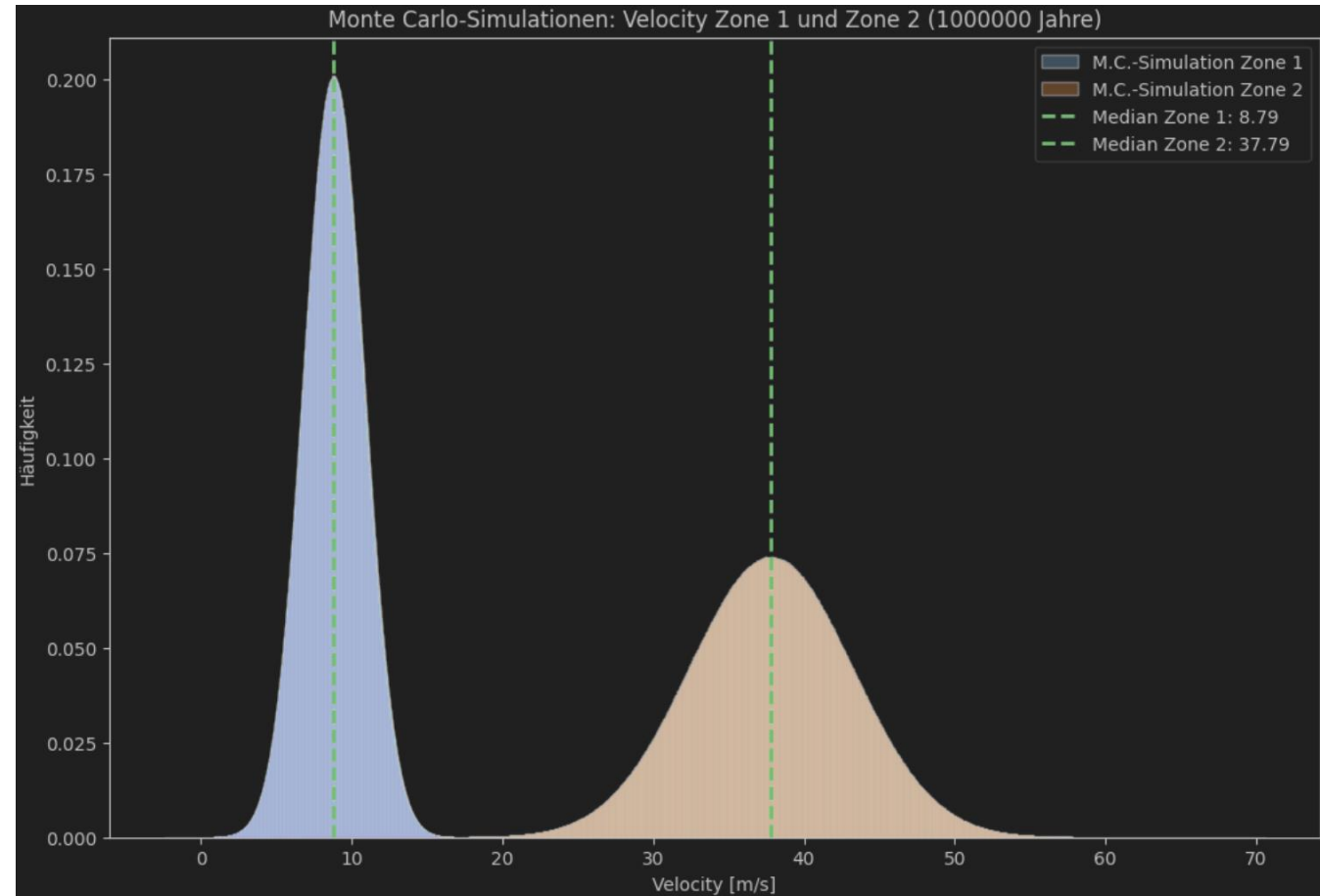
Umgang mit Ausreissern

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

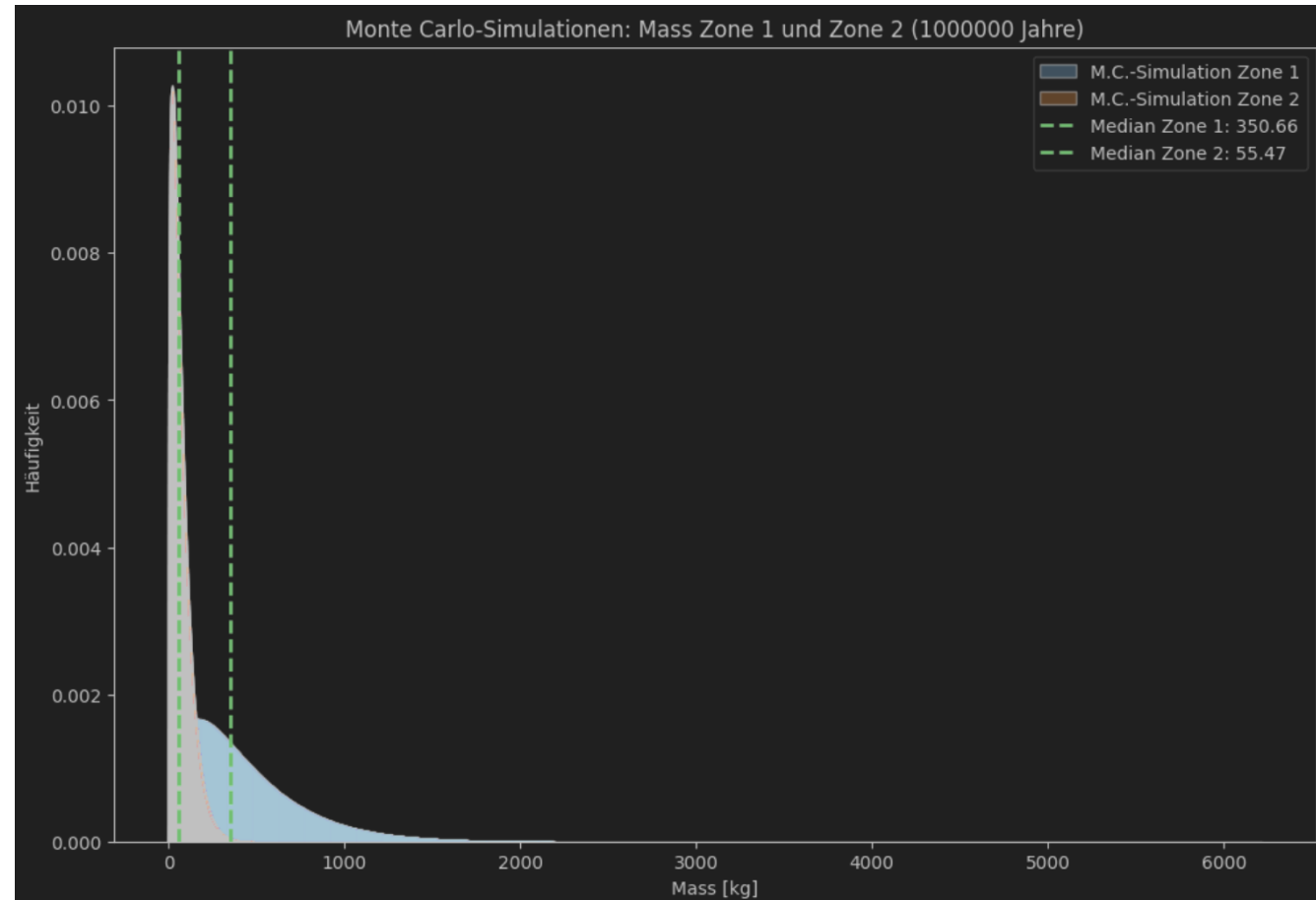
Monte-Carlo Simulation: Zeitabstände



Monte-Carlo: Geschwindigkeit



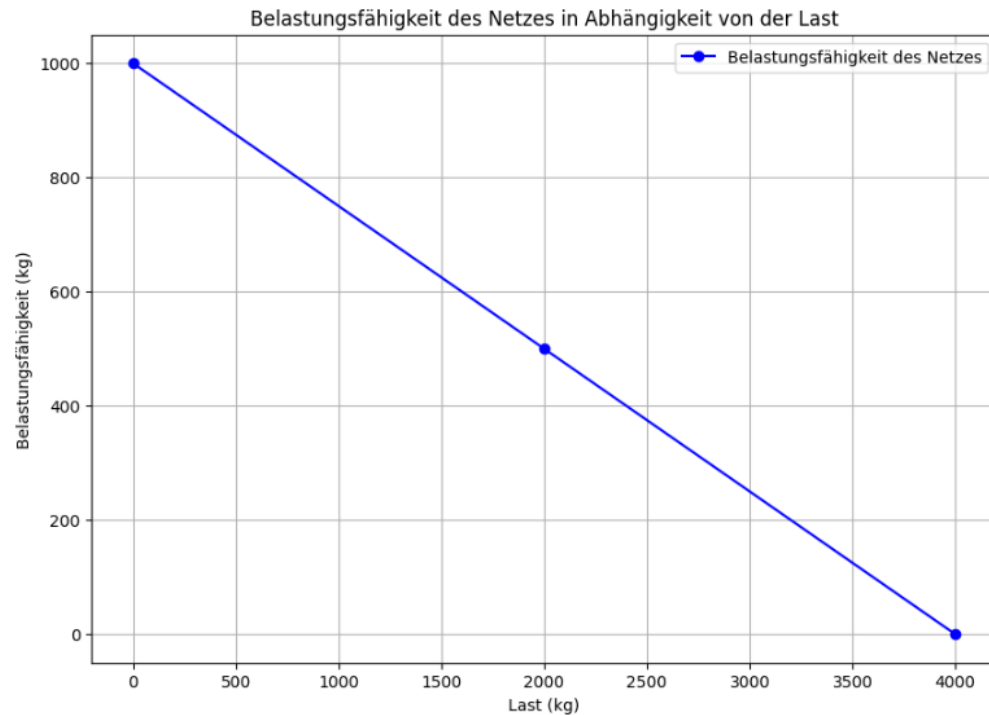
Monte-Carlo: Masse



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
- 11372 Netzbrüche
- Netzbruchwahrscheinlichkeit = 0.0023%
- Gesamttodeswahrscheinlichkeit = $3.0462 \times 10^{-5}\%$

5. Berechnungen

Input-Parameter Todeswahrscheinlichkeit

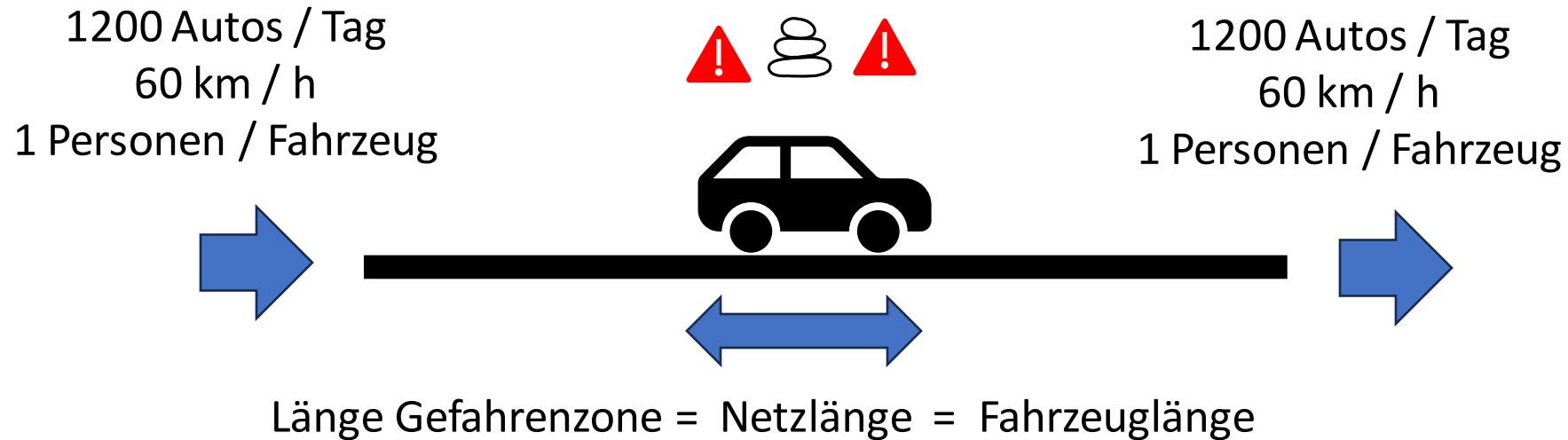


| Parameter | Wert | Quelle |
|---|----------------------------|---|
| Geschwindigkeit | 60 km/h | Projektgrundlagen |
| Verkehrsaufkommen | 1200 Fahrzeuge pro Tag | Projektgrundlagen |
| Fahrzeuglänge | 4.4 m | BFS |
| Fahrzeugbesetzungsgrad | 1.6 Personen / Fahrzeug | Kanton Graubünden |
| Letalität 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 |

Gesamttodesswahrscheinlichkeit

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 **$3.0462 \times 10^{-5} \%$**
- Die Strasse kann offen bleiben

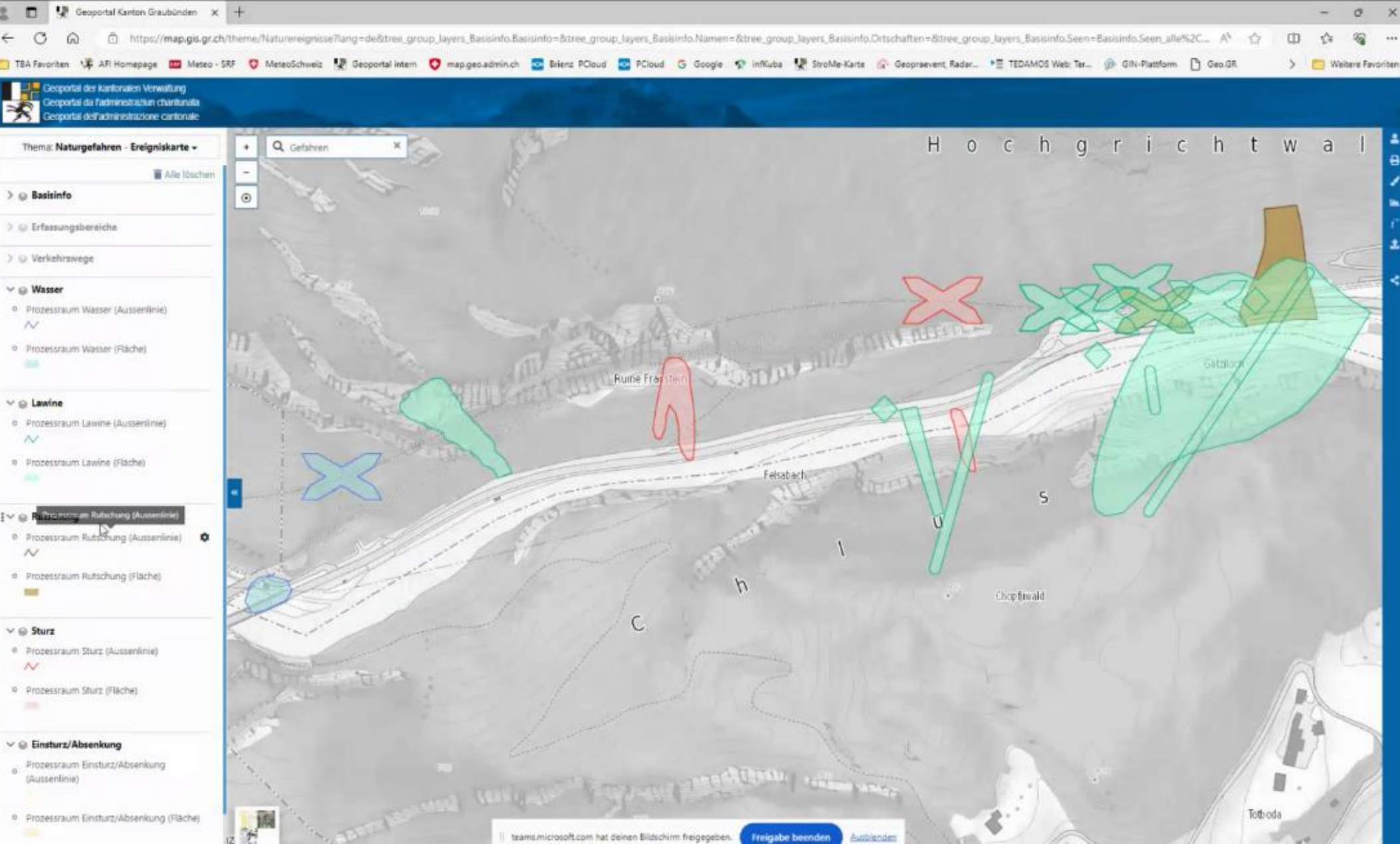
7. Praxisbeispiel

Tiefbauamt GR

23:23

🗨️ Aufklappen
💬 Chat
👤 5 Personen
👋 Heben
😊 Reagieren
🗺️ Ansicht
🏠 Räume
➕ Apps
⋮ Weitere
📷 Kamera
🎤 Mikro
📶 Teilen

Verlassen



Aswin Senthilrajan (s)

Christoph Nänni, TBA GR (Gast)

Mikhael Nabil

Perinpagumar Munnarathan (s)



Christoph Nänni, TBA GR (Gast)

