

Bericht

# **«Relevanz von Risikomodellparametern» - Bereich «Risiken für die Bevölkerung beim Transport gefährlicher Güter auf der Bahn»**

## Relevanz von Risikomodellparametern

Version: 1.0  
Datum: 08.06.2020  
Autor: Joanna Weng, Monika Reif, Christoph Zaugg  
ID: CB: DOC432936

---

**Verteiler:**

|                 |                                                          |
|-----------------|----------------------------------------------------------|
| Joanna Weng     | ZHAW – Zentrum für Angewandte Mathematik und Physik ZAMP |
| Monika Reif     | ZHAW – Zentrum für Angewandte Mathematik und Physik ZAMP |
| Christoph Zaugg | ZHAW – Zentrum für Angewandte Mathematik und Physik ZAMP |

**Änderungsnachweis:**

|   |             |            |                              |
|---|-------------|------------|------------------------------|
| 1 | Joanna Weng | 15.11.2019 | Dokument erstellt (0.6)      |
| 2 | Joanna Weng | 08.06.2020 | BAFU Kommentare eingepflegt. |

**Urheberrechtshinweis**

Copyright © 2020 bei ZHAW.

Alle Rechte bleiben vorbehalten. Ausser für den vertragsgemässen Gebrauch darf diese Publikation weder ganz noch teilweise reproduziert, archiviert oder versendet werden, ohne die vorgängige schriftliche Zustimmung des Urheberrechtsträgers einzuholen; dies betrifft elektronische, mechanische, physische (Bsp. Fotokopie) Formen sowie Grafiken und andere Formen. Gedruckt und publiziert in der Schweiz. Zur Anwendung kommt schweizerisches Recht.

Obwohl die ZHAW überzeugt ist, dass die in dieser Publikation enthaltenen Informationen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung korrekt sind, unterliegt die Publikation möglichen Änderungen ohne entsprechende Benachrichtigungspflicht.

Alle erwähnten Warenzeichen und eingetragenen Marken sind Eigentum des jeweiligen Urheberrechtsträgers.

**Hinweis zur Geheimhaltung**

Alle Informationen in diesem Dokument sind streng vertraulich und dürfen nur von der ZHAW publiziert werden.

# Inhalt

|       |                                                                        |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Einleitung.....                                                        | 4  |
| 1.1   | Ziel dieses Dokuments .....                                            | 4  |
| 1.2   | Struktur des Dokuments .....                                           | 4  |
| 2     | Methoden zur Parameterrelevanzanalyse .....                            | 5  |
| 2.1.1 | Übersicht zu verwendeten Methoden und Auswahlkriterien .....           | 5  |
| 2.1.2 | Sobol-Zerlegung .....                                                  | 6  |
| 2.1.3 | Partielle Ableitungen.....                                             | 8  |
| 2.1.4 | Monte Carlo Simulation .....                                           | 8  |
| 3     | Aufbau des Risikomodells .....                                         | 9  |
| 3.1.1 | Implementierung der Sobol Zerlegung und der partiellen Ableitung ..... | 10 |
| 4.1.1 | Ergebnisse der Sobol Zerlegung .....                                   | 12 |
| 4.1.2 | Ergebnisse der Partiellen Ableitung .....                              | 13 |
| 4.1.3 | Konsistenzchecks und Vergleich mit der Monte Carlo Methode .....       | 14 |
| 4.1.4 | Konsistenzchecks und Vergleich mit dem Screening Tool.....             | 14 |
| 4.1.5 | Bewertung der Stabilität des Rankings.....                             | 15 |
| 4.1.6 | Empfehlungen.....                                                      | 16 |
| 5     | Verzeichnisse .....                                                    | 17 |
| 5.1   | Literaturnachweis.....                                                 | 17 |
| 5.2   | Abbildungsverzeichnis .....                                            | 17 |
| 5.3   | Verzeichnis der Tabellen .....                                         | 17 |
| 6     | Anhang .....                                                           | 18 |

# 1 Einleitung

In den quantitativen Risikoermittlungen gemäss der Störfallverordnung (StFV, SR 814.012) werden viele Parameter eingesetzt, die sehr unterschiedlich sind bezüglich Qualität (Genauigkeit der Schätzung) und Bedeutung (Einfluss auf das in einem Ausmass-/Wahrscheinlichkeitsdiagramm ausgewiesene Risiko). Für die Verbesserung der Qualität der Resultate und damit der Beurteilung der Risiken braucht es mathematisch begründete, gezielte Verbesserungen der wichtigen Parameter. Mit einer mathematischen Relevanzanalyse soll deshalb für die eingesetzten Risikoermittlungs- oder Risikoabschätzungsmethoden der Einfluss der verwendeten Parameter auf das ausgewiesene Risiko dargelegt werden. Mit den Resultaten sollen die Anstrengungen der zum Teil aufwändigen Parameterabschätzungen besser fokussiert werden können. Die Risikoermittlungen sollen so verlässlichere Resultate für die Beurteilung des mit absoluten Werten ausgewiesenen Risikos ergeben.

## 1.1 Ziel dieses Dokuments

In einer ersten Phase soll diese Analyse für die Methoden des Bahnbereichs durchgeführt werden. Hierbei sollen die Risiken für die Bevölkerung beim Transport gefährlicher Güter auf der Bahn am Beispiel des Leitstoff Chlors betrachtet werden.

Es werden dabei die folgenden Ziele verfolgt:

1. Literatur-Recherche und Auswahl geeigneter Methoden zur Parameterrelevanzanalyse.
2. Analyse der Methoden in Bezug auf die eingesetzten Parameter.
3. Aufbereitung und mathematische Ausformulierung des Risikomodells im Sinne der Anwendung der ausgewählten Methoden.
4. Ermittlung der Schlüsselparameter (technische, umgebungsbedingte, «human factors», etc.).
5. Analyse zum Einfluss der Parameter auf das Resultat der Risikoermittlung (Sensitivitätsbetrachtungen).

## 1.2 Struktur des Dokuments

Zuerst werden die Ergebnisse der Literatur-Recherche präsentiert und die zwei ausgewählten Methoden näher erläutert. Danach wird die betrachtete Risikoanalyse skizziert und die Implementation des Risikomodells in den Programmen Maple [4] und Matlab [5] beschrieben. Am Ende werden die Resultate präsentiert und diskutiert.

## 2 Methoden zur Parameterrelevanzanalyse

### 2.1.1 Übersicht zu verwendeten Methoden und Auswahlkriterien

Eine Literatur-Recherche zeigt (vgl. [3]), dass sich Sensitivitäts-Methoden grob in deterministische und stochastische Ansätze einteilen lassen. Diskrete deterministische Methoden führen zu oft verwendeten Tornado-Diagramm. Ein solches Diagramm wird in Abbildung 1 illustriert:

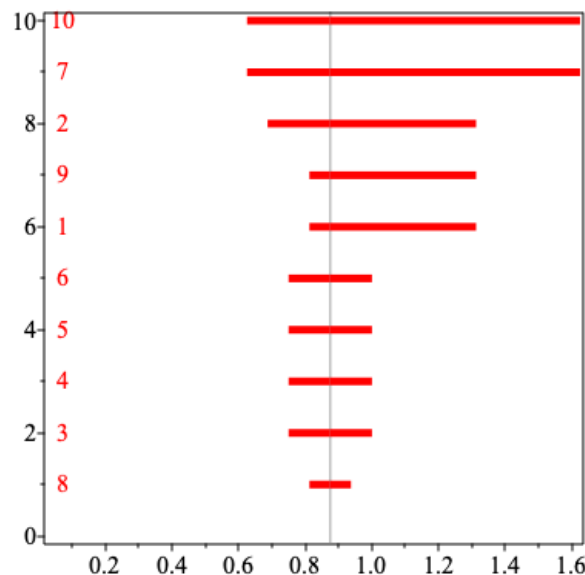


Abbildung 1: Beispiel Tornado-Diagramm

In Abbildung 1 hängt die zu untersuchende Funktion von zehn Input-Variablen ab. In jeder Variablen weichen wir vom Base Case um einen Best Case und um einen Worst Case ab, wobei wir die übrigen Variablen fixiert halten. Die dabei auftretenden Funktionsänderungen werden in Abhängigkeit der Variablen aufgetragen. Die Variablen 10 und 7 die höchste Sensitivität. Die Gestalt eines Tornado-Diagramms hängt stark von der Wahl des Base Case ab.

Weil der Output unseres Modells eine differenzierbare Funktion ist, verwenden wir partielle Ableitungen. Stochastische Methoden basieren auf der Varianz oder der kumulierten Verteilungsfunktion. Wir haben uns für eine Varianz-Analyse entschieden, weil wir sie exakt bestimmen können.

In der Analyse wurden die drei Methoden verwendet, die unten präzisiert werden. Der Grund für die Wahl genau dieser Methoden besteht darin, dass sich eine Methode zwar schnell implementieren lässt, aber lokal ist (vgl. unten, Methode 2). In unserer Analyse spielt diese Methode die Rolle eines Scouts, der uns zur Orientierung dient. Um den Nachteil der Lokalität auszuwachen, wird eine globale Methode implementiert (vgl. unten, Methode 1), die allerdings mit einem hohen Rechenaufwand verbunden ist. Die Resultate beider Methoden sind exakt, also nicht mit numerischen Fehlern behaftet, weil wir sie mit symbolischen Methoden bestimmen. Zu ihrer Berechnung verwenden wir ein Computer-Algebra-System (Maple), das Rechnungen regelbasiert durchführt. Die dritte Methode ist eine Monte-Carlo Methode und damit numerisch. Ihre Implementierung erfolgt unabhängig von der Implementierung der beiden ersten Methoden in Matlab. Da sie ähnliche Resultate liefert, validiert sie die Resultate der beiden ersten Methoden.

- Methode 1: führt eine Sobol-Zerlegung (vgl. [2]) durch. Diese Methode ist eine globale Varianz-Analyse und damit stochastischer Natur. Deren Resultate lassen sich analytisch exakt berechnen. Eventuelle Interaktionen zwischen den Parametern lassen sich entdecken und können bei Bedarf ebenfalls berücksichtigt werden.
- Methode 2: verwendet partielle Ableitungen (vgl. [3], Chapter 5, Differentiation-Based Methods) und ist somit deterministischer Natur. Sie hat den Vorteil, dass die Sensitivität der Parameter mit kleinem Aufwand bestimmt werden kann. Da bei dieser Methode die Sensitivitäts-Indizes auch negativ ausfallen können, ergibt sich so eine Möglichkeit für einen Cross-Check der Implementierung. Als Nachteil ergibt sich, dass es sich um eine lokale Methode handelt, d.h. die Werte der Sensitivitäts-Indizes hängen wie beim Tornado-Diagramm stark von der Wahl des Base Case ab.
- Methode 3: basiert auf einer Monte-Carlo Simulation.

### 2.1.2 Sobol-Zerlegung

Bei dieser Methode werden die Input-Variablen  $x = (\xi_1, \dots, \xi_n)$  als Zufalls-Variablen auf dem Quader  $Q(n) = [a_1, b_1] \times \dots \times [a_n, b_n]$  aufgefasst. Dabei ist der Base Case  $= (B_1, \dots, B_n)$  der Mittelpunkt dieses Quaders. Jede Input-Variable  $\xi_i$  wird von einer Gleichverteilung auf dem Intervall  $[a_i, b_i]$  gesteuert. Die Intervallgrenzen werden folgendermassen bestimmt:

$$a_i = (1 - \alpha)B_i \text{ und } b_i = (1 + \alpha)B_i$$

Um die Stabilität der Sobol-Zerlegung zu beurteilen, wird auch untersucht, ob sich das Ranking der Variablen mit den höchsten Sensitivitätswerten ändert, wenn die Zerlegung für verschiedene  $\alpha$ -Werte durchgeführt wird.

Ein Effekt der Ordnung  $1 \leq k \leq (n - 1)$  ist eine Funktion  $f_I(x_I)$ , die nur von  $k$  Input-Variablen  $x_I = (\xi_{i_1}, \dots, \xi_{i_k})$  abhängt. Mit  $I$  werden  $k$  geordnete Indices  $1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n$  bezeichnet.

Die Sobol-Zerlegung stellt die Funktion  $F$  als Summe aller Effekte bis und mit Ordnung  $(n - 1)$  dar:

$$F(x) = f_0 + \sum_I f_I(x_I)$$

Die Effekte der Ordnung  $(k + 1)$  können rekursiv aus allen Effekten bis und mit Ordnung  $k$  durch Integrationen bestimmt werden. Zudem stehen die Effekte orthogonal zueinander, d.h. es gilt:

$$\int_{Q(n)} dx f_I(x_I) f_J(x_J) = 0 \text{ für } I \neq J$$

Deshalb ist die Modell-Varianz  $V_0 = \int_{Q(n)} dx F^2(x) - f_0^2$  gleich der Summe der Varianzen  $V_I = \int_{Q(n-k)} dx f_I^2(x)$  aus den einzelnen Effekten  $f_I(x_I)$ :

$$V_0 = \sum_I V_I$$

Die Sensitivität  $S_I$  der Input-Variablen  $x_I$  wird quantifiziert durch den Anteil der Varianz des Effekts  $f_I$  an der Modell-Varianz  $V_0$ :

$$S_I = \frac{V_I}{V_0}$$

Die Analyse zeigt, dass die Effekte erster Ordnung bereits einen sehr hohen Anteil (über 99%) der Modell-Varianz  $V_0$  erklären. Deshalb wird auf diese Effekte fokussiert und es werden die folgenden Grössen berechnet:

|                                                       |                                                  |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| (1) $f_0 = \int_{Q(n)} dx F(x)$                       | (2) $V_0 = \int_{Q(n)} dx F^2(x) - f_0^2$        |
| (3) $f_i(x_i) = \int_{Q(n-1)} dx_{\sim i} F(x) - f_0$ | (4) $V_i = \int_{a_i}^{b_i} d\xi_i f_i^2(\xi_i)$ |

Tabelle 1: Modellgrössen

Dabei bezeichnet  $x_{\sim i}$  alle Input-Variablen ausser der Variablen  $\xi_i$  und  $f_0$  ist der Erwartungswert des Modells. Für die zugehörigen Sensitivitäts-Indices  $S_i$  ergibt sich:

$$S_i = \frac{V_i}{V_0}$$

Das Model  $F$  ist eine Summe von Produkten aus Potenzen der Input-Variablen. Um die in Tab. 2 aufgeführten Modellgrössen  $f_0$ ,  $V_0$ ,  $f_i(x_i)$  und  $V_i$  zu bestimmen, müssen  $n(n+1)$  1-dimensionale Integrationen durchgeführt werden (s. Tabelle 2):

| Grösse     | Bedeutung                                                  | Aufwand                                |
|------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| $f_0$      | Erwartungswert des Modells                                 | $n$ -dimensionales Integral            |
| $f_i(x_i)$ | Effekte erster Ordnung für $1 \leq i \leq n$               | $n$ Integrale, je $(n-1)$ -dimensional |
| $V_0$      | Modell-Varianz                                             | $n$ -dimensionales Integral            |
| $V_i$      | Varianzen zu Effekten erster Ordnung für $1 \leq i \leq n$ | $n$ Integrale, je 1-dimensional        |

Tabelle 3: Aufwand für die Berechnung der Modellgrössen

Mit dem Computer-Algebra-System Maple (Version 2019.1) benötigt ein Rechner (MacBook Pro, 2.3 GHz Quad-Core Intel Core i5, Speicher: 16 GB 2133 MHz LPDDR3, Graphikkarte: Intel Iris Plus Graphics 655 1536 MB) ca. 320 Sekunden für 155 Variablen.

Bei dieser Methode gehen Input-Werte ein, die im Quader  $Q(n)$  um den Base Case abgegriffen werden. Es handelt sich also um eine globale Methode.

### 2.1.3 Partielle Ableitungen

Als partielle Ableitung wird die Ableitung einer Funktion mit mehreren Argumenten (hier die reellen Variablen  $\xi_i$ ) nach einem dieser Argumente bezeichnet. Die Werte der übrigen Argumente werden jeweils konstant gehalten.

Die Differentiale der reellen Variablen  $\xi_i$  werden proportional zu den Base Case Werten  $B_i$  gewählt:

$$d\xi_i = \beta B_i \text{ für } 1 \leq i \leq n \text{ mit dimensionsloser Proportionalitäts-Konstanten } \beta$$

Der Sensitivitäts-Index  $G_i$  für die Variable  $\xi_i$  ist der Anteil  $\partial_i F(B) B_i$  der Linearisierung bei differentieller Änderung dieser Variablen an der gesamten Linearisierung  $\sum_{j=1}^n \partial_j F(B) B_j$  im Base Case  $B$ :

$$G_i = \frac{\partial_i F(B) B_i}{\sum_{j=1}^n \partial_j F(B) B_j} \text{ mit } \sum_{1 \leq i \leq n} G_i = 1$$

Anders als bei den Sensitivitäts-Indizes der Sobol-Zerlegung können die Werte  $G_i$  auch negativ werden. Das bedeutet, dass die Zunahme der Input-Variablen  $\xi_i$  zu einer Abnahme der Output-Variablen  $y$  führt.

Um die Ränge der Input-Variablen bei beiden Methoden zu vergleichen, wird auch mit  $|G_i|$  gearbeitet. Die Sensitivitäts-Indizes  $G_i$  werden nur im Base Case  $B$  abgegriffen, die Methode ist also lokal, d.h. die Werte  $G_i$  hängen von der Wahl der Angriff-Stelle ab. Dafür lassen sie sich innerhalb weniger Sekunden berechnen. Negative Werte werden als Cross Check für die Implementierung verwendet.

### 2.1.4 Monte Carlo Simulation

Die beiden gewählten Methoden wurden mittels einer Monte Carlo Simulation überprüft.

Monte Carlo Simulation ist ein Verfahren aus der Stochastik, bei dem eine sehr grosse Zahl gleichartiger Zufallsexperimente die Basis darstellt. Die Grundlage bietet das Gesetz der grossen Zahlen, gemäss dem die relativen Häufigkeiten bei ständiger Wiederholung des Zufallsexperiments fast sicher gegen die tatsächliche Wahrscheinlichkeit konvergieren.

Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation kann untersucht werden, wie ein Modell auf zufällig generierte Eingabewerte reagiert. Das Verfahren wird in den meisten Fällen in drei Schritten durchgeführt:

1. Es werden  $N$  Eingaben zufällig generiert (diese werden auch als Szenarien bezeichnet).
2. Für jede der  $N$  Eingaben wird eine Simulation durchgeführt, d.h. der Ausgabewert in Abhängigkeit der zufällig generierten Eingaben ermittelt.
3. Die Ausgaben der Simulationen werden zusammengefasst und ausgewertet. Häufig verwendete Messgrössen sind der Mittelwert einer Ausgabe, die Verteilung der Ausgabewerte und der minimale oder maximale Ausgabewert.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass für die Generierung der zufälligen Ereignisse geeignete Algorithmen eingesetzt werden, die scheinbar zufällige Zahlen berechnen. Dies spielt vor allem bei mehreren Eingangsvariablen eine grössere Rolle, da dort der gesamte Bereich der möglichen Kombinationen der Variablen durch die Zufallszahlen abgedeckt werden muss.

### 3 Aufbau des Risikomodells

Grundlage ist der Bericht „Risiken für die Bevölkerung beim Transport gefährlicher Güter auf der Bahn“ [1].

Um die Risiken für die Bevölkerung und Umwelt durch Gefahrguttransporte auf der Schiene zu berechnen, hat das BAV ein Screening-Tool für Personenrisiken und für Umweltrisiken erstellt. Der obere Bericht [1] ist eine Aktualisierung des Berichts Dokumentation Methodik und Grundlagen Screening Personenrisiken Bahn 2011 vom Februar 2013 und beschreibt die Methodik und das Modell, das dem Screening Tool zugrunde liegt. Die Methodik ist in Abbildung 2 dargestellt.

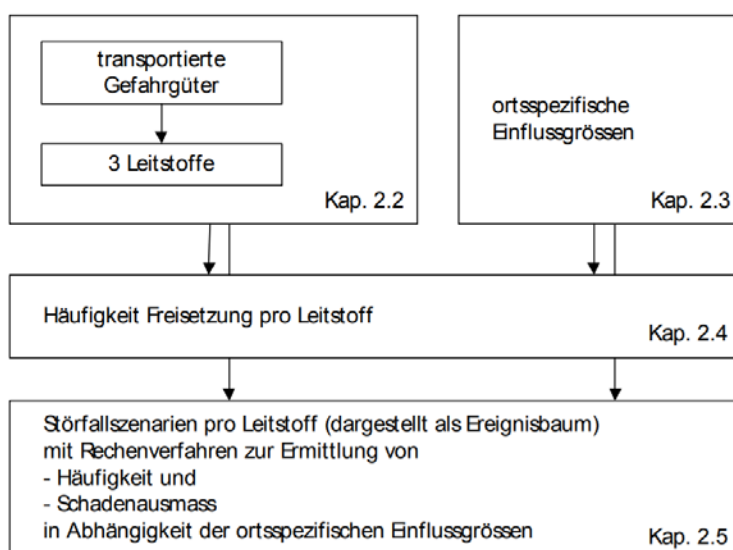


Abbildung 2: Gliederung der Methodik

Für die transportierten Gefahrgüter werden jeweils drei Leitstoffe definiert (Benzin, Propan, Chlor). Jeder Gefahrgutstoff wird nun einem dieser Leitstoffe zugeordnet. Daraus ergibt sich die Transportmenge pro Leitstoff. Basierend auf ortsspezifischen Einflussgrößen (z.B. Weichendichte, Streckentyp) wird jeweils das jährliche Risiko pro 100m Abschnitt ermittelt. Dazu wird unter Berücksichtigung der Menge der transportierten Gefahrgüter pro Leitstoff die ortsspezifische Freisetzungshäufigkeit pro Leitstoff errechnet («Formel 1»). Die Freisetzungshäufigkeit wird als Initialgrösse für Ereignisbaumanalyse verwendet, die unterschiedliche Ereignisse, welche das Schadensausmass beeinflussen, abbilden (Störfallszenarien). Während in der Formel 1 also betrachtet wird, wie wahrscheinlich eine Freisetzung von Gefahrgut ist, befassen sich die Ereignisbäume mit der Frage, was die Folgen der Freisetzung sind. Für das Schadensausmass wird betrachtet wie viele Personen durch das Ereignis in der betroffenen Umgebung oder in involvierten Reisezügen zu Tode kommen. Details sind in [1] beschrieben.

### 3.1.1 Implementierung der Sobol Zerlegung und der partiellen Ableitung

Aus dem Bericht (vgl. [1]) wird für den Transport von Chlor ein Modell der Gestalt  $y = F(x)$  ermittelt. Mit  $x = (\xi_1, \dots, \xi_n)$  werden die  $n = 155$  Input-Variablen bezeichnet und  $y$  ist die reelle Output-Variable. Die Input-Variablen sind die Parameter, deren Sensitivität mit Hilfe zweier Methoden quantifiziert wird. Bei der ersten Methode handelt es sich um die Sobol-Zerlegung (vgl. [2]). Weil dabei Input-Werte in einer Umgebung des Base Case verwendet werden, ist diese Methode globaler Natur und weil das Modell eine Struktur besitzt, die einfach genug ist, können die relevanten Sensitivitäts-Indices mit einem Computer-Algebra-System sogar exakt bestimmt werden. Die zweite Methode verwendet die partiellen Ableitungen von  $F$  nach den Input-Variablen  $\xi_i$  und spielt die Rolle eines Cross Checks.

Eine vollständige Liste der berücksichtigten Variablen wird im Anhang (vgl. Dokumentation) geführt. Der Base Case  $B = (B_1, \dots, B_n)$  besteht aus den Mittelpunkten  $B_i$  der Intervalle  $a_i \leq \xi_i \leq b_i$  für die Variations-Bereiche der Input-Variablen  $\xi_i$ , dem Bericht (vgl. [1]) entnommen werden.

Die Parameter für die Freisetzungshäufigkeit, die Ereignisse im Ereignisbaum und das Schadensausmass (Anzahl Tote) wurden in Maple abgebildet. Für jeden Parameter wurde ein Variationsbereich definiert basierend auf den im Bericht angegebenen Maximum und Minimum. Bei einigen Parametern wurde der Bereich erweitert.

Die beiden Methoden (Sobol Zerlegung und Partielle Ableitungen) wurden in Maple implementiert. In der Dokumentation (vgl. Anhang) werden Einzelheiten dieser Implementierung beschrieben. Der Anhang umfasst die Deklaration der insgesamt 155 Variablen. Zuerst wird aufgeführt, welche der Variablen in Formel (1) (vgl. [1], p.16) vorkommen.

Für die Transportmenge werden die 36 Stoffe die dem Leitstoff Chlor zugeordnet sind, zwischen 1500 und 3500 Tonnen variiert. Dies entspricht einer maximalen Transportmenge von 126 000t.

Dann werden die 32 Output-Terme im Ereignisbaum explizit als Funktionen der beteiligten Variablen aufgelistet und für die 64 Szenarien werden acht Muster angegeben, die zwischen den Zeilen mit den Letalitäten (in %) auftreten.

Für die Bevölkerungsdichte wird vereinfachend aus einem dichtbesiedelten Gebiet (Genf) ein Maximalwert pro Quadratkilometer übernommen. Das Intervall für die Anzahl Personen in der betrachteten Entfernung (z.B. 0-50m, 50-250m etc.) wird dann bestimmt, indem man die maximale Anzahl Personen auf ein Quadrat dieser Fläche skaliert. Dabei wird die maximal mögliche Personenzahl im Freifeld mit dem halben Wert der maximal möglichen Personenzahl im Gebäudeinneren festgelegt. Auf eine detailliertere Unterteilung (z.B. Tag/Nacht) wird verzichtet, da der Einfluss der Personenanzahl auf das Risiko aufgrund der denkbaren Extremwerte (von 0 bis zur maximal denkbaren Anzahl) bewertet wird. Die expliziten Terme aller Szenarien werden auch in Form einer Liste im Anhang präsentiert. Am Schluss des Anhangs befindet sich das Modell  $F$  in expliziter Form.

### 3.1.2 Implementierung der Monte Carlo Analyse

Zur Überprüfung der Ergebnisse wurde das Risikomodell in dem unabhängigen Programm Matlab implementiert.

Dabei wurde die Struktur des Ereignisbaums nachprogrammiert und zunächst die Werte für den Mittelwert der Eingangsvariablen (Base Case), den Minimalwert und den Maximalwert der Eingangsparameter berechnet. Dies dient der Ermittlung des Risikos des Base Cases sowie des Risikos ausgehend von den Randwerten.

Um das Modell weiterhin zu überprüfen, wurde eine Monte Carlo-Simulation mit 20'000 Replikationen durchgeführt. Dabei wurde der Erwartungswert des Risikos bestimmt, um diesen mit dem Ergebnis des Modells für die Sobol Zerlegung und die Partiellen Ableitungen zu vergleichen.

Um das Ranking der Parameter der beiden oben genannten Methoden zu bestätigen, wurden jeweils für einen Parameter zufällige Werte innerhalb des vorgegebenen Intervalls gewählt und damit das Risiko ermittelt.

Für die Auswertung der Simulation jeder Variablen wurden die absolute Streuung als Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert sowie die Varianz ermittelt. Dies wurde für alle 155 Variablen mit jeweils 20'000 Replikationen durchgeführt.

Daraus wurden zwei Rankings für den Einfluss des Parameters auf den Wert des Risikos erstellt, basierend auf der Differenz von Minimal- und Maximalwert sowie der Varianz.

## 4 Resultate und Empfehlungen

### 4.1.1 Ergebnisse der Sobol Zerlegung

Die Sobol Zerlegung liefert eine Rangliste über den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Ermittlung des Personenrisikos.

Dafür wurde die Sensitivität  $S_i$  der Input-Variablen  $\xi_i$  quantifiziert durch den Anteil der Varianz des Effekts dieser Variablen an der Modell-Varianz  $V_0$ . Die zehn Modellparameter mit dem grössten Werten für die Sensitivität  $S$  sind in Tabelle 3 aufgelistet.

| Rang | Variablen-index | Beschreibung                            | $S$  |
|------|-----------------|-----------------------------------------|------|
| 1    | 76              | Korrekturfaktor verbesserte Kesselwagen | 18.1 |
| 2    | 75              | Korrekturfaktor HFO                     | 18.1 |
| 3    | 74              | Korrekturfaktor Zuggeschwindigkeit      | 18.1 |
| 4    | 73              | Freisetzungsrage pro vollem Kesselwagen | 18.1 |
| 5    | 85              | Wind Tag                                | 8.6  |
| 6    | 82              | Tag/Nacht                               | 3.7  |
| 7    | 90              | Evakuationsmöglichkeit (Tabelle 17)     | 3.2  |
| 8    | 81              | Freisetzungsmenge                       | 2.4  |
| 9    | 97              | Mittlere Letalität Freifeld, 200-2'500m | 1.7  |
| 10   | 86              | Wind Nacht                              | 1.3  |

Tabelle 4: Parameter mit dem höchsten Sensitivitätsindex bei der Sobol Zerlegung

Die vier grössten Werte für die Sensitivität  $S$  besitzen Variablen, deren Wert in die Formel 1 des Berichts zur Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeit des Ereignisses eingehen.

Die weiteren Variablen mit hohen Sensitivitäten beschreiben Parameter des Ereignisbaumes wie Tag/Nacht, Wind Tag bzw. Nacht, Evakuationsmöglichkeit (Tabelle 17), Freisetzungsmenge und einen der Werte der Letalität.

Eine vollständige Liste der Sensitivitäten aller 155 Variablen sowie eine Dokumentation der Bedeutung der Variablen ist im Anhang zu finden.

Die Sensitivitäten der ersten vier bzw. fünf Werte unterschieden sich deutlich von den folgenden. Die Werte der Modellparameter der ersten fünf Ränge erklären zusammen bereits einen Anteil von mehr als 80% der Varianz des gesamten Modells. Die Modellparameter mit den Rängen sechs bis zehn erklären circa weitere 12% der Varianz.

Ab dem 11. Rang beträgt der Beitrag der Variablen zur Gesamtvarianz jeweils weniger als 1% und die 145 Variablen der Ränge 11 bis 155 erklären zusammen weniger als 8% der Gesamtvarianz. Bei Variablen mit sehr kleinen Varianzen, wie z.B. den einzelnen Personenanzahlen, wurde daher darauf verzichtet, diese noch detaillierter als bislang aufzuteilen, da durch eine noch stärkere Unterteilung in weitere Variablen deren Varianzen dann noch kleiner werden.

#### 4.1.2 Ergebnisse der Partiellen Ableitung

Die zweite Methode der Bewertung des Einflusses der Parameter auf Basis der Partiellen Ableitungen zeigt ein identisches Ranking der verschiedenen Modellparameter, wie in Tabelle 4 zu sehen ist.

Dabei ist jeweils der Betrag des Sensitivitäts-Index  $|G_i|$  für die Variable  $\xi_i$  als der Anteil der Linearisierung bei differentieller Änderung dieser Variablen an der gesamten Linearisierung im Base Case  $B$  angegeben.

| Rang | Variablen-index | Beschreibung                                  | $ G $ | $S$  |
|------|-----------------|-----------------------------------------------|-------|------|
| 1    | 76              | Korrekturfaktor verbesserte Kesselwagen       | 12.7  | 18.1 |
| 2    | 75              | Korrekturfaktor HFO                           | 12.7  | 18.1 |
| 3    | 74              | Korrekturfaktor Zuggeschwindigkeit            | 12.7  | 18.1 |
| 4    | 73              | Freisetzungsrates pro vollem Kesselwagen      | 12.7  | 18.1 |
| 5    | 85              | Wind Tag                                      | 8.7   | 8.6  |
| 6    | 82              | Tag/Nacht                                     | 5.7   | 3.7  |
| 7    | 90              | Zeitgerechte Evakuationsmöglichkeit (Tab. 17) | 5.3   | 3.2  |
| 8    | 81              | Freisetzungsmenge                             | 4.6   | 2.4  |
| 9    | 97              | Mittlere Letalität Freifeld, 200-2'500m       | 3.9   | 1.7  |
| 10   | 86              | Wind Nacht                                    | 3.4   | 1.3  |

Tabelle 5: Parameter mit dem höchsten Sensitivitätsindex bei der Methode der Partiellen Ableitungen

Das Ranking erfolgt über den Betrag des Sensitivitäts-Index  $|G_i|$ , da der Sensitivitäts-index auch negative Werte annehmen kann. Im Einzelnen erhält man bei den in Tabelle 5 zu findenden Variablen negative Indizes.

| Bedeutung          | Variablen-index | Wert Sensitivitäts-index $G$ |
|--------------------|-----------------|------------------------------|
| Wind Tag           | 85              | – 8.7%                       |
| Tag/Nacht          | 82              | – 5.7%                       |
| Wind Nacht         | 86              | – 3.4%                       |
| Intervention Nacht | 84              | – 2.4%                       |
| Intervention Tag   | 83              | – 0.15%                      |

Tabelle 6: Parameter mit negativen Sensitivitätsindex bei der Methode der Partiellen Ableitungen

Die negativen Werte lassen sich dadurch erklären, dass im Modell zur Ermittlung der Partiellen Ableitungen der Ereignisbaum so abgebildet wurde, wie er im Bericht zur Ermittlung der Personenrisiken [1] zu finden ist.

In den meisten Fällen ist der Ereignisbaum dabei so gestaltet, dass im jeweils oberen Ast einer Abzweigung das Ereignis abgebildet wird, das zu einem höheren Schadensausmass führt. An fünf Stellen ist dies nicht der Fall und daher ergeben sich an diesen Stellen auch negative partielle Ableitungen, da das Risiko mit grösseren Werten der Parameter ab- und nicht zunimmt.

Im Einzelnen sind dies:

Wind Tag bzw. Wind Nacht: Im oberen Ast ist jeweils Wind im unteren Ast Windstille zu finden. Bei einer grösseren Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Wind wird das Risiko geringer.

Tag/Nacht: Im oberen Ast ist der Tag im unteren Ast die Nacht zu finden. Da bei Nacht im Folgenden die Möglichkeit der Evakuierung als schlechter bewertet wurde, die Anzahl der betroffenen Personen jedoch identisch angenommen wird, wird das Risiko bei grösserer Wahrscheinlichkeit für Tag geringer.

Intervention Tag bzw. Intervention Nacht: Im oberen Ast zwar ist die nicht-erfolgreiche Evakuierung im unteren Ast die erfolgreiche Evakuierung zu finden, was der restlichen Konvention des Ereignisbaumes entspricht (grosses Ausmass oben, geringes Ausmass unten). Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit der Möglichkeit der Evakuierung in Tabelle 17 des Berichts über das Komplement, also die Wahrscheinlichkeit der erfolgreichen Evakuierung definiert. Bei höherer Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Evakuierung wird das Risiko geringer.

#### 4.1.3 Konsistenzchecks und Vergleich mit der Monte Carlo Methode

Für die beiden vorhergehenden Methoden wurde dieselbe Modellierung des Risikomodells in Maple verwendet. Um eine Überprüfung des Modells zu erreichen wurde der Erwartungswert des Risikos ermittelt, der für dieses Modell einen Wert von  $2.57 \cdot 10^{-5}$  Todesfälle je Streckenelement und Jahr liefert.

Mittels der Modellierung des Risikomodells in Matlab wurden nun das Risiko für den Base Case (Ausgangswerte bzw. Mittelwerte der einzelnen Variablen) sowie für die maximalen und minimalen Werte der Variablen ermittelt.

Im Einzelnen ergeben sich die folgenden Werte:

1. Risiko mit mittleren Werten:  $2.58 \cdot 10^{-5}$  Todesfälle je Streckenelement und Jahr
2. Risiko mit minimalen Werten:  $2.33 \cdot 10^{-14}$  Todesfälle je Streckenelement und Jahr
3. Risiko mit maximalen Werten:  $1.62 \cdot 10^{-3}$  Todesfälle je Streckenelement und Jahr

Im nächsten Schritt wurde eine Monte Carlo-Simulation durchgeführt, bei der für alle Variablen zufällige gleichverteilte Werte innerhalb derselben Intervalle wie bei den beiden vorgeschlagenen Methoden gewählt wurden. Der ermittelte Mittelwert der 20'000 Replikationen liefert eine Schätzung für den Erwartungswert von  $2.57 \cdot 10^{-5}$  Todesfälle je Streckenelement und Jahr. Dieser Wert entspricht dem Wert des Modells für die beiden zuvor beschriebenen Varianten.

Zum Abgleich der zuvor beschriebenen Methoden wurde jeweils ein Parameter variiert und die absolute Streuung bzw. Varianz des ermittelten Risikos in Abhängigkeit des Parameters bestimmt. Dabei ergibt sich ebenfalls, dass die Faktoren der Formel 1 des Risikomodells [1] die grössten Varianzen liefern. Dies entspricht der Beobachtung, die bei den beiden gewählten Methoden gemacht wurde.

#### 4.1.4 Konsistenzchecks und Vergleich mit dem Screening Tool

Der Erwartungswert der verschiedenen Modelle wurde zudem mit ermittelten Risikowerten des Screening Tools abgeglichen. Um die Grössenordnung des Risikos abzuschätzen wurden verschiedene Elemente im Screening Tool [6] untersucht und die entsprechenden Daten exportiert. Dazu wurde exemplarisch der Erwartungswert für das Element A10702 berechnet, das ein hohes Risiko aufweist (rot markiert im Screening Tool, W/A-Diagramm (Summenkurve) teilweise über Grenzwert). Der Erwartungswert ist  $6.4 \cdot 10^{-5}$  (Personen pro Jahr und Streckensegment). Wenn man das mit dem oberen Risiko mit mittleren Werten vergleicht ( $2.58 \cdot 10^{-5}$  Todesfälle je Streckenelement und Jahr) wird deutlich die Ergebnisse der ausgewählten Methoden in der richtigen Grössenordnung liegen.

#### 4.1.5 Bewertung der Stabilität des Rankings

Um die Stabilität des Rankings der beiden vorgeschlagenen Methoden zu überprüfen, wurde jeweils der Base Case als mittlerer Wert gewählt und dann das Intervall festgelegt, in dem die Variablen variiert werden können.

Für die bislang angegebenen Ergebnisse wurde ein Intervall der Variablen in einem Bereich von – 5% und + 5% um den Base Case festgelegt. Um die Stabilität des Rankings zu testen wurde dieses Intervall auf  $\pm 10\%$ ,  $\pm 15\%$  und  $\pm 20\%$  erweitert.

Wenn auf diese Art der Quader um den Base Case vergrößert wird, dann bleibt der Erwartungs-Wert stabil, die Varianzen im Modell nehmen zu und die durch die Effekte erster Ordnung erklärten Varianzen nehmen leicht ab (Varianzen höherer Ordnung erhalten mehr Bedeutung), s. Tabelle 6: Variation des Intervalls ( $\alpha$  Parameter)Tabelle 6 .

| $\alpha$ | Erwartungswert (Modell) | Varianz (Modell)      | Erklärte Varianz (Effekte 1. Ordnung) |
|----------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| 5%       | $2.6 \cdot 10^{-5}$     | $3.04 \cdot 10^{-12}$ | 99.8%                                 |
| 10%      | $2.6 \cdot 10^{-5}$     | $1.22 \cdot 10^{-11}$ | 99.2%                                 |
| 15%      | $2.6 \cdot 10^{-5}$     | $2.78 \cdot 10^{-11}$ | 98.1%                                 |
| 20%      | $2.6 \cdot 10^{-5}$     | $5.01 \cdot 10^{-11}$ | 96.7%                                 |

Tabelle 7: Variation des Intervalls ( $\alpha$  Parameter)

In Tabelle 7 sind die Signifikanzindizes der Top Ten der Sobol Zerlegung in Abhängigkeit der verschiedenen Intervalle für die Variablen aufgeführt.

Mit zunehmender Intervallgröße ( $\alpha$ -Werten) nehmen die Werte der Sensitivitätsindizes ab. Das bedeutet, dass die grösseren Ränge des Rankings der Variablen einen zunehmenden Einfluss auf das ermittelte Risiko bei grösseren Intervallen besitzen. Das Ranking der Top Ten bleibt jedoch stabil.

| Rang | Variablen-index | Beschreibung                            | $\alpha = 5\%$ | $\alpha = 10\%$ | $\alpha = 15\%$ | $\alpha = 20\%$ |
|------|-----------------|-----------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1    | 76              | Korrekturfaktor verbesserte Kesselwagen | 18.1           | 18.0            | 17.8            | 17.6            |
| 2    | 75              | Korrekturfaktor HFO                     | 18.1           | 18.0            | 17.8            | 17.6            |
| 3    | 74              | Korrekturfaktor Zuggeschwindigkeit      | 18.1           | 18.0            | 17.8            | 17.6            |
| 4    | 73              | Freisetzungsrate pro vollem Kesselwagen | 18.1           | 18.0            | 17.8            | 17.6            |
| 5    | 85              | Wind Tag                                | 8.60           | 8.55            | 8.46            | 8.34            |
| 6    | 82              | Tag/Nacht                               | 3.67           | 3.64            | 3.61            | 3.55            |
| 7    | 90              | Evakuationsmöglichkeit (Tabelle 17)     | 3.23           | 3.21            | 3.17            | 3.13            |
| 8    | 81              | Freisetzungsmenge                       | 2.39           | 2.37            | 2.35            | 2.31            |
| 9    | 97              | Mittlere Letalität Freifeld, 200-2'500m | 1.74           | 1.73            | 1.71            | 1.69            |
| 10   | 86              | Wind Nacht                              | 1.28           | 1.28            | 1.26            | 1.25            |

Tabelle 8: Sensitivitätsindizes der Sobol Zerlegung für verschiedene Intervalle der Variablen

Zusätzlich wurden die Transportmengen in mehreren Schritten erhöht, um die Stabilität des Rankings auch bezüglich höherer Transportmengen zu prüfen wie sie bei anderen Stoffen auftreten können. Bei den 36 zum Leitstoff Chlor zugehörigen Stoffe wurden jeweils die Intervalle dieser Variablen von 1'500 bis 3'500t auf das 10- und 100-fache erhöht. Dabei zeigte sich, dass auch bei höheren Transportmengen die Sensitivitäten und v.a. das Ranking der Variablen unverändert ist.

| Rang | Variablen-index | Beschreibung                             | 1'500...3'500t | 15'000...35'000t | 150'000...350'000t |
|------|-----------------|------------------------------------------|----------------|------------------|--------------------|
| 1    | 76              | Korrekturfaktor verbesserte Kesselwagen  | 18.1           | 18.1             | 18.1               |
| 2    | 75              | Korrekturfaktor HFO                      | 18.1           | 18.1             | 18.1               |
| 3    | 74              | Korrekturfaktor Zuggeschwindigkeit       | 18.1           | 18.1             | 18.1               |
| 4    | 73              | Freisetzungsrates pro vollem Kesselwagen | 18.1           | 18.1             | 18.1               |
| 5    | 85              | Wind Tag                                 | 8.60           | 8.60             | 8.60               |
| 6    | 82              | Tag/Nacht                                | 3.67           | 3.67             | 3.67               |
| 7    | 90              | Evakuationsmöglichkeit (Tabelle 17)      | 3.23           | 3.23             | 3.23               |
| 8    | 81              | Freisetzungsmenge                        | 2.39           | 2.39             | 2.39               |
| 9    | 97              | Mittlere Letalität Freifeld, 200-2'500m  | 1.74           | 1.74             | 1.74               |
| 10   | 86              | Wind Nacht                               | 1.28           | 1.28             | 1.28               |

Tabelle 9: Sensitivitätsindizes der Sobol Zerlegung für verschiedene Intervalle der Transportmengen

#### 4.1.6 Empfehlungen

Mit Hilfe der drei Methoden konnten die Modellvariablen mit den grössten Sensitivitäten ermittelt werden. Es zeigte sich dabei, dass die ersten Variablen bereits einen Grossteil der Gesamtvarianz erklären und die restlichen Variablen einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Varianz des Modells besitzen.

Um das Modell zu verbessern könnten nun zwei Aspekte behandelt werden.

1. Variablen mit einer kleinen Sensitivität könnten zusammengefasst oder über feste Werte (z.B. Mittelwert) im Modell festgelegt werden, um die hohe Anzahl an Variablen zu verringern und damit das Modell zu vereinfachen.
2. Wenn das Ziel besteht, das Modell noch realitätsnäher zu gestalten, könnte entsprechender Fokus auf Variablen mit einer hohen Sensitivität gelegt werden, um diese dann mit Hilfe von zur Verfügung stehenden Datenquellen kombiniert mit Expertenwissen oder Simulationen noch genauer zu bestimmen.

Diese beiden Massnahmen würden zu einer Reduktion der Modellkomplexität und zu einer noch realitätsnäheren Bewertung des Risikos führen.

## 5 Verzeichnisse

### 5.1 Literaturnachweis

- [1] Risiken für die Bevölkerung beim Transport gefährlicher Güter auf der Bahn, Bundesamt für Verkehr BAV, Februar 2015
- [2] Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models, I.M. Sobol, MMCE, VOL.1, NO 4, pp. 407-414
- [3] Sensitivity Analysis, Emanuele Borgonovo, Springer International Series in Operations Research & Management Science (Volume 251, 2017, Editor: Frederick S. Hillier)
- [4] Maple Version 2019.1. Maplesoft, a division of Waterloo Maple Inc., Waterloo, Ontario.  
<https://www.maplesoft.com/>
- [5] MATLAB. Version 2019 (R2019a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.; 2010.
- [6] <http://www.screeningtggbahn.ch/TgG20.Web/>, Zugriff 09.11.2019

### 5.2 Abbildungsverzeichnis

|                                             |   |
|---------------------------------------------|---|
| Abbildung 1: Beispiel Tornado-Diagramm..... | 5 |
| Abbildung 2: Gliederung der Methodik .....  | 9 |

### 5.3 Verzeichnis der Tabellen

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Modellgrössen .....                                                                            | 7  |
| Tabelle 2: Aufwand für die Berechnung der Modellgrössen.....                                              | 7  |
| Tabelle 3: Parameter mit dem höchsten Sensitivitätsindex bei der Sobol Zerlegung .....                    | 12 |
| Tabelle 4: Parameter mit dem höchsten Sensitivitätsindex bei der Methode der Partiellen Ableitungen.....  | 13 |
| Tabelle 5: Parameter mit negativen Sensitivitätsindex bei der Methode der Partiellen Ableitungen.....     | 13 |
| Tabelle 6: Variation des Intervalls ( $\alpha$ Parameter) .....                                           | 15 |
| Tabelle 7: Sensitivitätsindizes der Sobol Zerlegung für verschiedene Intervalle der Variablen.....        | 15 |
| Tabelle 7: Sensitivitätsindizes der Sobol Zerlegung für verschiedene Intervalle der Transportmengen ..... | 16 |

## 6 Anhang

Anhang 1: Dokumentation der Input Variablen des Risikomodells – Anhang1\_Modell\_Dokumentation.pdf

Anhang 2: Liste des Rankings der Sobol- Zerlegung – Anhang2\_Liste\_Sobol.xls