



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Verkehr BAV

Emch+
Berger

Weiterentwicklung Screening- und RE-Methodik

Version 1.2 | 17. Februar 2021

Modellierung der Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung von Gefahrgut mit Bayes'schen Netzen

Methodik und Dokumentation



Emch+Berger AG Bern

bern@emchberger.ch | www.emchberger.ch

Gesamtlösungen sind unser Plus.

Änderungsjournal

Datum	Version	Änderungen
11.10.2019	Version 0.1	Berichtsentwurf erstellt durch Dr. Kathrin Keller, Dr. Renato Spahni
19.02.2020	Version 0.2	Berichtsentwurf erstellt durch Dr. Kathrin Keller, Dr. Renato Spahni, Dr. Peter Gerber
13.11.2020	Version 1.0	Bericht erstellt durch Dr. Kathrin Keller, Dr. Renato Spahni, Dr. Peter Gerber
05.02.2021	Version 1.1	Aktualisierung des Berichts aufgrund der Rückmeldungen des BAV durch Dr. Kathrin Keller, Dr. Renato Spahni
17.02.2021	Version 1.2	Aktualisierung des Berichts aufgrund der Rückmeldungen des BAV durch Dr. Kathrin Keller, Dr. Renato Spahni

Impressum

Auftragsnummer	MSB180069
Auftraggeber	Bundesamt für Verkehr BAV
Datum	17. Februar 2021
Version	1.2
Autor(en)	Dr. Kathrin Keller, Dr. Renato Spahni, Dr. Peter Gerber
Freigabe	Dr. Peter Gerber
Datei	J:\F_rm\MSB180069\4_plan\Bericht\BN_Methodik_V_1.2_210217.docx
Seitenanzahl	69
Copyright	© Emch+Berger AG Bern

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Hintergrund Bayes'sche Netze	2
2.1	Grundlagen zu Bayes'schen Netzen	2
2.2	Anwendungsmöglichkeiten von Bayes'schen Netzen	2
3	Vorgehensweise und Struktur	3
4	Netzstruktur	4
4.1	Übersicht grobe Netzstruktur	4
4.2	Subnetze	5
4.2.1	Eskalierte Entgleisung	6
4.2.2	Eskalierter Zusammenstoss	9
4.2.3	Eskalierter Brand	11
4.2.4	Zusammensetzung des Zugs (potenzielle GG-Menge)	12
4.2.5	Beschädigung und Freisetzungsrates nach eskaliertem Ereignis	13
4.2.6	Häufigkeit der Störfallszenarien	16
4.3	Resultierendes Gesamtnetz	18
5	Festlegung der Defaultwerte	20
5.1	Grundlagen	20
5.1.1	Ausgangsdaten für eskalierte Entgleisung und Zusammenstoss	20
5.1.2	Korrekturfaktor «Geschwindigkeit»	22
5.1.3	Wahrscheinlichkeit instantane resp. kontinuierliche Freisetzung	23
5.1.4	Korrekturfaktor 10 (dickwandige Kesselwagen)	24
5.1.5	Korrekturfaktor 5 (Kesselwagen gemäss GEI)	24
5.1.6	Korrekturfaktor GEII (sicherheitstechnisch beste Kesselwagen gemäss GEII)	24
5.1.7	Zündungswahrscheinlichkeiten im Freisetzungsfall	25
5.2	Subnetze	25
5.2.1	Eskalierte Entgleisung	26
5.2.2	Eskalierter Zusammenstoss	38
5.2.3	Eskalierter Brand	40
5.2.4	Zusammensetzung des Zugs (potenzielle GG-Menge)	42
5.2.5	Beschädigung und Freisetzungsrates nach eskaliertem Ereignis	45
5.2.6	Häufigkeit der Störfallszenarien	50
6	Kalibrierung des BN	55
6.1	Vergleich mit Screening 2018	55
6.2	Kalibrierung auf das CH-Streckennetz	56
7	Anwendung und Umsetzung im Screening	59
8	Grundlagen	63
9	Glossar / Definitionen	64
Anhang A	Resultierendes Gesamtnetz	A-1
A.1	Bayes'sches Netz für Primärereignisse	A-1
A.2	Bayes'sches Netz für Sekundärereignisse	A-2

1 Einleitung

Der Umgang mit flüssigen sowie gasförmigen Gefahrgütern und deren Transport ist mit Risiken behaftet. Mögliche Szenarien beinhalten die instantane Freisetzung durch Bruch des Behältnisses (Bersten Stehtank, Aufbrechen Kesselwagen in Folge Unfall) oder kontinuierliche Freisetzung durch Leckage, jeweils gefolgt von einer möglichen Ausbreitung der Substanz und Wirkung auf den Menschen. Diese Risiken sind gemäss den Vorgaben der Störfallverordnung (StFV) [1] zu bewerten.

Für die Beurteilung der Risiken durch den Transport von Gefahrgut (GG) mit der Bahn werden einerseits netzweite Risikoscreenings (Stufe Kurzbericht), andererseits lokale Risikoermittlungen durchgeführt. Die methodische Basis für die Ermittlung der Risiken geht auf den Methodikbericht Screening Personenrisiken [2] und die „Pilotrisikoanalyse Bahn“ [3] zurück und soll nun weiterentwickelt werden.

Im vorliegenden Projekt geht es insbesondere um die Eintretenswahrscheinlichkeit der Freisetzung von GG. Diese wurde bislang anhand eines Ereignisbaumes modelliert und soll in Zukunft möglicherweise mit einem Bayes'schen Netz (BN) berechnet werden.

Die zugrundeliegende Fragestellung ist folgende: «Was ist die bedingte Wahrscheinlichkeit für die Freisetzung einer bestimmten Menge GG unter der Voraussetzung, dass es zu einem Primärereignis gekommen ist?»

Unter einem Primärereignis werden dabei folgende Geschehnisse verstanden:

- Entgleisung
- Zusammenstoss

Die Wahrscheinlichkeiten der beiden Primärereignisse werden als Grundlage für die Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeit für eine Freisetzung verwendet. Kommt es zu einer Eskalation (ES) des Ereignisses, kann die Wahrscheinlichkeit für eine Freisetzung generell sowie die Wahrscheinlichkeit für die Freisetzung einer bestimmten Menge eines Leitstoffes (LS) ermittelt und in einem weiteren Schritt ein bestimmtes Wirkszenario (Gaswolkenexplosion, Lachenbrand, toxische Gaswolke etc.) bestimmt werden.

Als Sekundärereignis wird zudem das Szenario «Eskalation eines Brandes» berücksichtigt. Ausgehend von einer Freisetzung infolge Entgleisung oder Zusammenstoss kommt es zu einem Brand und einer Unterfeuerung von noch nicht betroffenen GG-Wagen, welche in Folge ggf. ebenfalls bersten oder Leck schlagen.

Bei der Abbildung dieser Ereignisse und Prozesse in Modellen müssen neben ortsspezifischen Einflussgrössen zahlreiche netzspezifische Modellparameter berücksichtigt werden.

Für eine komplette Ermittlung der Freisetzungshäufigkeit müssen die einzelnen Modellkomponenten (Subnetze) kombiniert werden. Eine entsprechende Struktur für das BN wurde vom BAV vorgeschlagen [4].

Das langfristige Ziel ist die Methodik und die Resultate aus dem BN für das schweizweite Risikoscreening einzusetzen. Dazu werden alle möglichen Zustände im BN berechnet und die resultierenden Ereignissenarien mit zugehörigen Wahrscheinlichkeiten in einer Datenbank abgelegt. Im Risikoscreening können diese Resultate für einen einzelnen Berechnungspunkt auf dem Schienennetz abgerufen und verwendet werden. Dabei handelt es sich um einen iterativen Prozess. Damit die Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeiten der Gefahrgutfreisetzungen mittels dem Bayes'schen Netz belastbare Resultate liefert, müssen die entsprechenden Parameter im Tool kalibriert werden. Die definitive Kalibrierung und Festlegung der Parameter für die Auswertung der einzelnen Berechnungspunkte des BN kann jedoch nur unter Berücksichtigung der topologischen und betrieblichen Daten des betrachteten Schienennetzes aus dem Screeningtool erfolgen.

2 Hintergrund Bayes'sche Netze

2.1 Grundlagen zu Bayes'schen Netzen

Ein BN ist ein gerichteter azyklischer Graph, in welchem die Knoten Zufallsvariablen und die Kanten bedingte Abhängigkeiten zwischen den Variablen beschreiben. Werden die Zufallsvariablen am Berechnungspunkt auf einen lokalen Zustand, daher auf einen festen Wert, festgelegt, spricht man von Evidenz in diesem Knoten. Hierbei wird zwischen Knoten, welche für das gesamte Eisenbahnnetz identisch definiert sind, und Knoten, die aufgrund lokaler Evidenzen unterschiedlich definiert sind, unterschieden. Daher sind letztere Knoten massgebend für die Ereignisraten an den einzelnen Berechnungspunkten. Ist ein BN einmal erstellt und alle bedingten Abhängigkeiten festgelegt, kann durch Festlegung der Evidenzen für einen einzelnen Fall die Zielgrösse, z.B. «Freisetzung nach eskalierter Entgleisung», berechnet werden. Die bedingten Abhängigkeiten (Kanten) zwischen zwei oder mehreren Knoten werden durch sogenannte bedingte Wahrscheinlichkeitstabellen festgelegt. Dabei sind die einzelnen Elemente dieser Tabelle die bedingten Übergangswahrscheinlichkeiten vom Zustand eines oder von der Kombination der Zustände mehrerer Knoten in einen der Zustände des Zielknotens (siehe Glossar in Kapitel 9).

2.2 Anwendungsmöglichkeiten von Bayes'schen Netzen

Es gibt grundsätzlich zwei Anwendungsmöglichkeiten für BN. Dazu gehört das oben beschriebene

1.) Auswerten des BN nach Belegen der Knoten mit Evidenzen oder Verteilungen

und

2.) Betreiben von Inferenz im BN und Maschinen-basiertes Lernen des BN.

Im Fall 1.) dient das BN dazu, die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung aller beteiligten Variablen unter Ausnutzung bekannter bedingter Unabhängigkeiten möglichst kompakt zu repräsentieren. Das BN kann auch als Ereignisbaum dargestellt und ausgewertet werden. Der Vorteil liegt in der Übersichtlichkeit und Handhabung der Prozessabbildung.

Liegen in Fall 2.) für Ausgangs- und Zielknoten Evidenzen vor, so kann mit Hilfe von Algorithmen auch die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung berechnet werden. Durch Maschinen-basiertes Lernen kann im BN neben der Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeit auch die Struktur eines geeigneten Netzes erstellt werden.

In diesem Projekt wird ausschliesslich die Anwendungsmöglichkeit 1.) genutzt, da kausale Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung ausgearbeitet und die Struktur des BN vorgegeben werden. Für die langfristige Anwendung des BN auf das schweizerische Eisenbahnnetz werden Evidenzen oder vorgegebene statistische Verteilungen für jeden einzelnen Berechnungspunkt definiert und das BN lokal ausgewertet.

Ein Vorteil bei der Anwendung des BN gegenüber dem Ereignisbaum ist die einfache Auswertung an einem beliebigen Knoten im BN. Durch Angabe spezifischer Evidenzen in einzelnen Knoten können statistische Zusammenhänge zwischen zwei beliebigen Knoten ausgelesen und mit Daten aus dem Gütertransport und dem schweizerischen Eisenbahnnetz verglichen werden. Beispielsweise kann aus dem BN der Zusammenhang zwischen der Kollisionsanordnung bei einem Zusammenstoss und der Wahrscheinlichkeit eines Umfallens des Kesselwagens ausgelesen und mit Statistiken verglichen werden.

3 Vorgehensweise und Struktur

In einem ersten Schritt wurde die Netzstruktur definiert, welche in Kapitel 4 beschrieben ist. Das Netz wird pro Richtung separat berechnet und ausgewertet,

In einem zweiten Schritt erfolgte die Definition von Defaultwerte für die bedingten Wahrscheinlichkeiten zwischen den Knoten (Kapitel 5). Neben Defaultwerte wurden auch Modelle und deren Parameter mit pragmatischem Aufwand festgelegt. Dazu wurden einfache Normierungen von Ereignisraten und Kalibrationen der Modellparameter über den ganzen Parameterraum durchgeführt, so dass die Resultate des BN mit den Resultaten bisheriger Screenings [2], [5], [6] in einfacher Weise verglichen werden konnten.

Um das BN für den Gütertransport auf dem gesamten schweizerischen Schienennetz anwenden und Resultate für ein neues Screening liefern zu können sind ausführliche und aufwendige Kalibrationen der Parameter notwendig. Die Parameterkalibrationen, die Diskussion dazu und die finale Festlegung der Defaultwerte sind nicht Bestandteil des vorliegenden Auftrages und erfolgt erst in einer nächsten Phase nach Abschluss dieser Studie in einer Begleitgruppe unter Einbezug von Fachexperten.

Gewisse Defaultwerte sind bereits jetzt in ihrer Grössenordnung bekannt und wurden in der Erstellung dieses BN übernommen. Diese Defaultwerte sind mit Angabe der Quellen dokumentiert oder als Expertenschätzungen angegeben.

Gewisse Defaultwerte sind unbekannt und wurden als Annahmen gekennzeichnet. Für diese Werte sind notwendigerweise noch statistische Grundlagen bereitzustellen. Bei Knoten, wo der Einfluss auf die Freisetzungswahrscheinlichkeit vermutet wird, wurden diese strukturell im BN erfasst und mit Dummy-Werten versehen, so dass sie noch keinen Einfluss auf das Ergebnis (Freisetzungswahrscheinlichkeit) haben, aber später angepasst werden können.

In einem dritten Schritt wurde das erarbeitete BN mittels der Softwareapplikation R umgesetzt. Das Verhalten und die Ergebnisse der Subnetze sowie des gesamten BN wurden jeweils unter Verwendung der Defaultwerte getestet und plausibilisiert (Robustheits-Tests). Die Implementierung in R sowie die Anwendung des BN ist im zugehörigen Manual [7] dokumentiert.

Zwecks einer groben Evaluation wurden Resultate zum Vergleich mit den Entgleisungs-, Zusammenstoss- und Freisetzungsraten im aktualisierten Screening 2018 erstellt. Im Nachgang zu den vorliegenden Arbeiten muss das BN jedoch auf das CH-Schienennetz kalibriert werden, die entsprechenden anzupassenden Parameter werden aufgeführt (Kapitel 6).

4 Netzstruktur

Folgend wird die definitive Version des Netzes vorgestellt. Das Netz wird pro Richtung separat berechnet, entsprechend werden sämtliche Parameter pro Richtung ausgewiesen.

4.1 Übersicht grobe Netzstruktur

Ziel des BN ist die Ermittlung der bedingten Wahrscheinlichkeit der Freisetzung einer bestimmten Menge eines bestimmten LS. Voraussetzung für eine störfallrelevante Freisetzung ist ein vorgängiges Primärereignis, berücksichtigt werden hierbei: Entgleisung und Zusammenstoss.

Bei der Entgleisung wird zusätzlich zwischen dem «Initialereignis» und dem «Eskalierten Ereignis» unterschieden. Ersteres, die eigentliche Entgleisung (Ereignis «Rad eines Wagens springt aus Spur»), geht nicht notwendigerweise mit einer Eskalation einher (= Wagen verbleibt auf Schotter im Bereich des Lichtraumprofils, keine GG-Freisetzung). Die «Eskalation» des Ereignisses (Verlassen des Lichtraumprofils) resultiert potenziell im Ereignis «Umfallen oder Überpuffern des/der Wagen/s infolge Entgleisung» und einer Gefahrgutfreisetzung. Diese Unterscheidungen zwischen Entgleisung und Eskalation werden im Rahmen dieser Studie vorgenommen, um die Wirkung von Entgleisungsdetektoren abbilden zu können.

Beim Zusammenstoss ist die Unterscheidung zwischen Initial- und eskalierem Ereignis nicht sinnvoll, es wird angenommen, dass es sich im Ereignisfall immer um ein Ereignis mit potenzieller GG-Freisetzung handelt (= Eskaliertes Ereignis).

Bei den genannten Primärereignissen kann es zu einer Freisetzung brennbarer Flüssigkeiten mit anschliessender Zündung kommen. Hierbei ist es möglich, dass der Brand auf noch nicht betroffene GG-Wagen übergreift. Diese Eskalation eines Brandes ist als Sekundärereignis zu verstehen und wird als solches berücksichtigt.

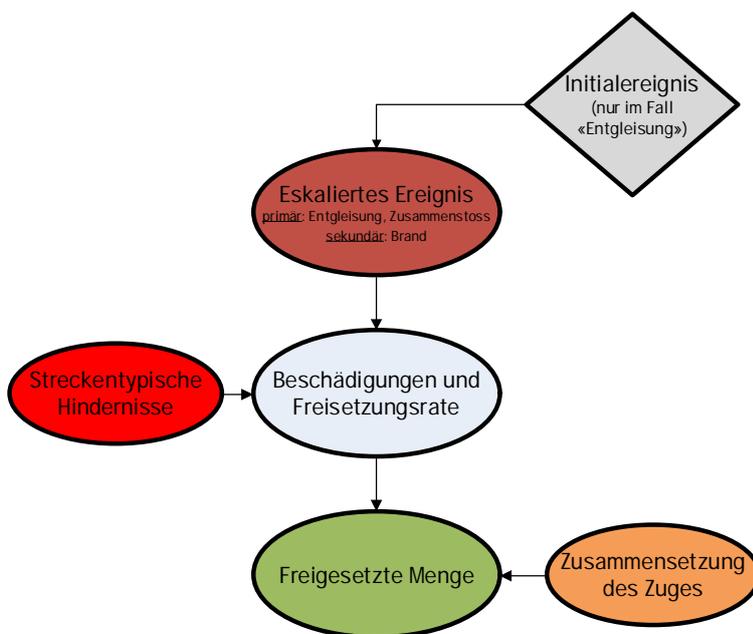


Abbildung 4-1: Grobe Netzstruktur für die Bayes'schen Netze (das detaillierte Gesamtnetz inkl. Störfallszenarien ist in Abbildung 4-11 gegeben)

Für jedes der möglichen Primärereignisse (Entgleisung, Zusammenstoss) wird ein einzelnes Subnetz zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit einer Eskalation (ES) erstellt. Die kleinste betrachtete

Einheit ist der Zug, die Anzahl der betroffenen Wagen (potenziell freisetzbare GG-Menge) wird im Subnetz *Zusammensetzung des Zuges* bestimmt.

Die Wahrscheinlichkeit für eine Beschädigung und der daraus resultierenden Freisetzungsrate wird in einem leitstoffspezifischen Netz ermittelt. So können die Auswirkungen verbesserter Umschliessungen und höherer Sicherheitsstandards für jeden LS direkt in den bedingten Wahrscheinlichkeiten der betroffenen Knoten wiedergegeben werden.

Die Wahrscheinlichkeit für die freigesetzte Menge ergibt sich aus der Wahrscheinlichkeit, dass durch ein eskaliertes Ereignis eine Verletzung der Umschliessung und damit eine bestimmte Freisetzungsrate möglich ist, und der Zusammensetzung des betroffenen Zuges (potenziell freisetzbare Menge).

Die streckenspezifischen Zustände (z.B. Weichendichte, Geschwindigkeit etc.) sind im BN mit durchschnittlichen Auftretenshäufigkeiten auf den schweizerischen GG-Strecken hinterlegt, teilweise basierend auf den aktuellen Screeningparametern [6]. Für jeden Berechnungspunkt sind die Eingabewerte zum Zustand pro Fahrtrichtung zu erfassen. Ist für einen Berechnungspunkt der Zustand eindeutig definiert, daher mit 100%-er Wahrscheinlichkeit einem Zustand zugeordnet, spricht man von Evidenz im entsprechenden Knoten. Für jede mögliche Kombination von Evidenzen berechnet das Netz die zugehörige bedingte Wahrscheinlichkeit für eine Freisetzung und anschliessend für ein Störfallszenario. Die berechneten Freisetzungsraten können dann in einem zukünftigen Screening EDV-Tool pro Fahrtrichtung abgerufen und für die weiteren Risikoberechnungen verwendet werden.

Die verwendeten Begriffe und Grössen in diesem Bericht sind im Glossar (Kapitel 9) definiert.

4.2 Subnetze

So weit nicht weiter ausgeführt beziehen sich **weiss** hinterlegte Knoten auf Eingaben für das gesamte Netz, **gelb** hinterlegte Knoten auf Ausgaben für die Verwendung in einem anderen Subnetz oder als Resultat für die Wahrscheinlichkeit eines Szenarios. Knoten mit **blauen** Ringen sind netzweit gleich definiert, **grüne** Ringe kennzeichnen leitstoff-spezifische Parameter, **rote** Ringe bei Eingabewerten deuten darauf hin, dass diese Knoten Evidenzen zum betreffenden Berechnungspunkt beinhalten, bei Ausgabewerten ist dieser auf den Berechnungspunkt bezogen.

Lokalisierung

Wird ein Knoten in dieser Methodik als netzweiter Knoten bezeichnet, bedeutet das nicht zwingend, dass dieser Knoten an jedem Ort denselben Wert hat (regionale Unterschiede sind möglich). Es bedeutet aber, dass dieser Knoten durch eine netzweite Betrachtung festgelegt wird und nicht aufgrund lokaler Abklärungen bestimmt oder präzisiert werden muss.

Ein lokaler Knoten wird durch lokale Werte festgelegt (Evidenzen), die den Zustand am Betrachtungsort beschreiben. Die lokalen Werte können aus einer schweizweiten Datenbank oder durch Abklärungen vor Ort erhoben werden.

Unterteilung betrachteter Bereich

Der Bereich direkt um den Berechnungspunkt mit einem Radius von 200 m¹ wird folgend Eskalationszone (ESZ) genannt. Der entgegen der Fahrtrichtung vorgelagerten ESZ befindet sich die Vorzone (VZ). Diese hat eine Länge von 5 km², entsprechend beginnt die VZ bei 5.2 km vor dem Berechnungspunkt (Abbildung 4-2). Diese zonale Unterteilung ist wesentlich für die Abbildung der eskalieren Entgleisung, welche im entsprechenden Subnetz (Kapitel 4.2.1) und im Entgleisungsmodell (Kapitel 5.2.1) nachfolgend beschrieben wird.

¹ Definiert durch BAV zur Berücksichtigung einer gewisse Unschärfe bzgl. der Längen der verkehrenden Güterzüge

² Erfahrungswert/Annahme gem. realer Ereignisse (u.a. Entgleisung Daillens)

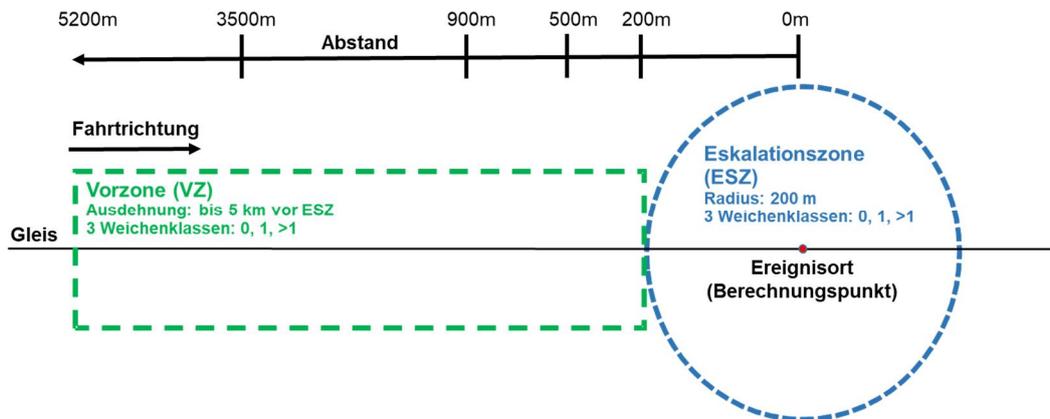


Abbildung 4-2: Unterteilung des Bereichs bezüglich des Berechnungspunkts in VZ und ESZ pro Fahrtrichtung

4.2.1 Eskalierte Entgleisung

Das Subnetz «Eskalierte Entgleisung» beschreibt die Einflüsse und Abläufe, welche eine Entgleisung soweit eskalieren lassen, dass es zu einer Verletzung der GG-Umschliessung kommen kann.

Hierbei wird unterschieden zwischen dem «Initialereignis», der eigentlichen Entgleisung (Ereignis «Rad eines Wagens springt aus Spur»), und der «Eskalation» des Ereignisses (Verlassen des Lichtraumprofils, es kann ein «Umfallen oder Überpuffern des/der Wagen/s» und eine Gefahrgutfreisetzung resultieren).

Je nach Ereignis ist es möglich, dass sich die Orte von Entgleisung und Eskalation unterscheiden:

- Eskalation sofort: Bei diesem Fall entspricht der Ort der Entgleisung ebenfalls dem Ort der Eskalation. Oftmals handelt es sich hierbei um eine Weiche als Auslöser. Dieser Fall, welcher sich ausschliesslich in der ESZ ereignet, wird folgend als Direkte Entgleisung und Eskalation (DE) bezeichnet.
- Eskalation verzögert: Die eigentliche Entgleisung geht oftmals nicht sofort mit einer Eskalation einher, sondern geschieht vorgelagert (in der VZ oder in noch grösserer Distanz). Die Eskalation geschieht oftmals zeitverzögert auf einer Weiche, was bedeutet, dass die Entgleisung durch Entgleisungsdetektoren festgestellt und eine Eskalation verhindert oder zumindest die Entgleisungsgeschwindigkeit verringert werden könnte. Dieser Fall wird folgend als Eskalation nach Vorgelagerte Entgleisung (VE) bezeichnet.

Um beiden Fällen Rechnung zu tragen wird das Sub-Netz «Eskalierte Entgleisung» entsprechend aufgebaut (Abbildung 4-4). Die beiden Fälle sind unabhängig möglich, eine VE ist keine zwingende Voraussetzung für eine Eskalierte Entgleisung. Jedoch wird für einen Zustand im BN der Ort der Entgleisung entweder als lokal oder vorgelagert abgebildet.

Weichendichten

Zur Berechnung des Knotens «Eskalierte Entgleisung» sind die Weichendichten in der ESZ und in der VZ entscheidend. Die Weichendichte in der ESZ ist dabei definiert durch die tatsächlich befahren Anzahl Weichen in einer Fahrtrichtung innerhalb der ESZ (Abbildung 4-2). Dabei werden nur die befahrenen Weichen innerhalb der VZ und der ESZ gezählt (Abbildung 4-3). Dabei werden die 3 Klassen der Weichendichten «keine Weichen», «eine Weiche» und «mehr als eine Weiche» (0, 1 und >1) unterschieden. Bei mehreren Gleisen und unterschiedlichen Weichendichten pro Fahrtrichtung ist für die konservative Risikobetrachtung die maximale Weichendichte zu verwenden oder das BN pro Gleis auszuwerten und anschliessend die Resultate gewichtet zu addieren.



Abbildung 4-3: Bestimmung der Weichendichte durch Anzahl befahrener Weichen pro Fahrtrichtung innerhalb der VZ und der ESZ

Weichenabstand

Zusätzlich zu den Weichendichten wird der Abstand vom Berechnungspunkt zur ersten vorgelagerten Weiche (Abbildung 4-2) im Modell der eskalierten Entgleisung berücksichtigt. Im BN wird der Abstand in die diskreten Klassen «< 200 m», «200 m – 500 m», «500 m – 900 m», «900 m – 3'500 m» und «> 3.5 km» eingeteilt. Hierbei ergeben sich die Klassengrenzen anhand der Distanzen für das Modell der vorgelagerten Entgleisung (Kapitel 5.2.1). Die Platzierung der vorgelagerten Weiche innerhalb der Vorzone definieren die Grenzen bei 900 m und 3'500 m, wobei ein Zug bei einer Bremsung durch Aktivierung des Entgleisungsdetektors in einer Distanz von grösser als 900m in jedem Fall anhalten kann. Die Klassen kleiner als 900 m werden in 3 Klassen von zunehmender Länge (200m, 300m und 400m) unterteilt, um eine Unterscheidung der Endgeschwindigkeit am Berechnungspunkt zu erreichen.

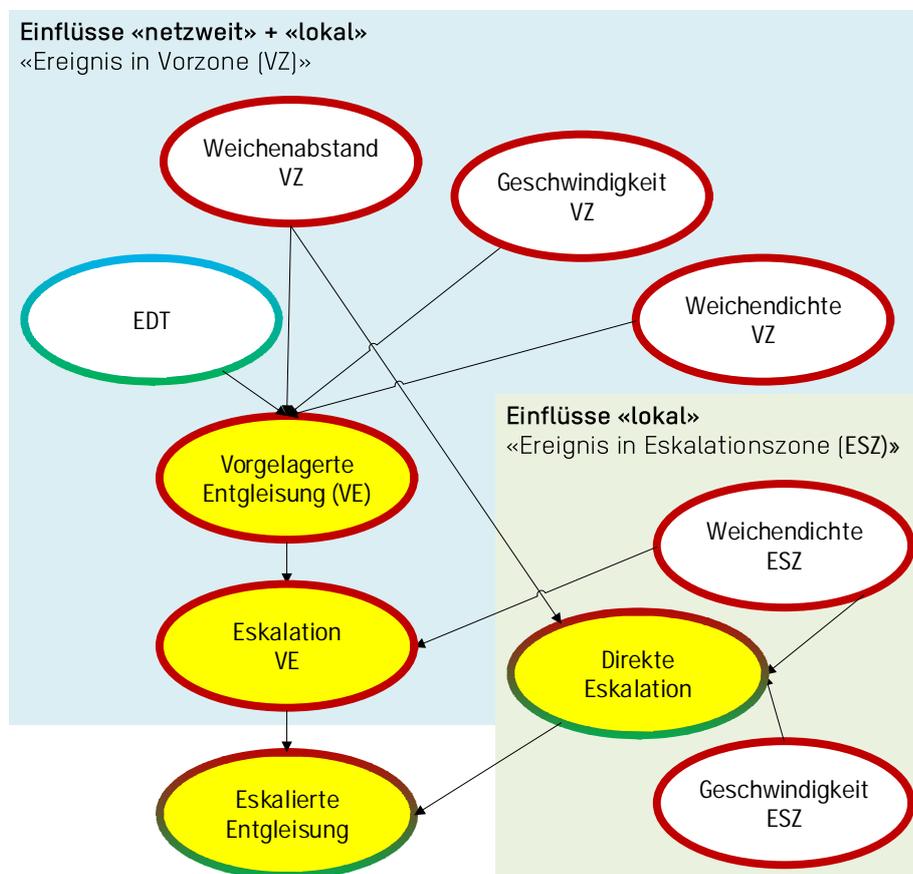


Abbildung 4-4: Subnetz „Eskalierte Entgleisung“

Folgend werden die Knoten samt der für die Berechnungen verwendeten Zustände pro Richtung beschrieben.

Tabelle 4-1: Knoten des Subnetzes "Eskalierter Entgleisung"

	Knoten	Beschreibung	Lokali- sierung	Zustände [Anzahl]	Kanten ³
Input	Weichenabstand VZ	Abstand zur nächsten befahrenen, vorgelagerten Weiche (siehe Abbildung 4-2)	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> - < 200 m - 200-500 m - 500-900 - 900-3500 m - > 3.5 km [5] 	W
	Weichendichte VZ	Anzahl der befahrenen Weichen innerhalb der VZ	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Weichen - 1 Weiche - >1 Weiche 	W
	Geschwindigkeit VZ	Zugelassene Maximalgeschwindigkeit in der VZ	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> - 0-40 km/h - 40-60 km/h - 60-80 km/h - 80-100 km/h - 100-120 km/h [5] 	W
	Entgleisungsdetektor EDT Leitstoffabhängig	Vorhandensein eines aktivierten Entgleisungsdetektors auf dem betroffenen Wagen	Netz- weit	<ul style="list-style-type: none"> - ja (vorhanden, wirksam) - nein (nicht vorhanden / vorhanden, nicht wirksam) [2] 	W
Input	Weichendichte ESZ	Anzahl der befahrenen Weichen innerhalb der ESZ	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Weichen - 1 Weiche - >1 Weiche 	W
	Geschwindigkeit ESZ	Zugelassene Maximalgeschwindigkeit in der ESZ	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> - 0-40 km/h - 40-60 km/h - 60-80 km/h - 80-100 km/h - 100-120 km/h [5] 	W
Output	Vorgelagerte Entgleisung VE	Wahrscheinlichkeit einer Entgleisung für den angegebenen Fall	Netz- weit	<ul style="list-style-type: none"> - ja, bei 0-40 km/h - ja, bei 40-60 km/h - ja, bei 60-80 km/h - ja, bei 80-100 km/h - ja, bei 100-120 km/h - keine Entgleisung [6] 	M
	Eskalation nach Entgleisung VE	Wahrscheinlichkeit einer Eskalation nach vorgelagerter Entgleisung	Netz- weit	<ul style="list-style-type: none"> - ES bei 0-40 km/h - ES bei 40-60 km/h - ES bei 60-80 km/h - ES bei 80-100 km/h - ES bei 100-120 km/h - keine Eskalation [6] 	M
	Direkte Eskalation	Bedingte Wahrscheinlichkeit für eine eskalierte Entgleisung bei einer bestimmten Entgleisungsgeschwindigkeit	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> - ES bei 0-40 km/h - ES bei 40-60 km/h - ES bei 60-80 km/h - ES bei 80-100 km/h - ES bei 100-120 km/h - keine Eskalation [6] 	M

³Die Kanten beschreiben die bedingten Abhängigkeiten zwischen den Variablen. Möglich sind hierbei folgende drei Fälle: Modellberechnung (M), fixer Wert (W), Default-Wert (D)

Knoten	Beschreibung	Lokalisierung	Zustände [Anzahl]	Kanten ³
Eskalierte Entgleisung	Bedingte Wahrscheinlichkeit für eine eskalierte Entgleisung bei einer bestimmten Entgleisungsgeschwindigkeit	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – ES bei 0-40 km/h – ES bei 40-60 km/h – ES bei 60-80 km/h – ES bei 80-100 km/h – ES bei 100-120 km/h – keine Eskalation [6] 	M

4.2.2 Eskalierter Zusammenstoss

Das Subnetz «Eskalierter Zusammenstoss» beschreibt die Einflüsse und Abläufe, welche dazu führen, dass es bei einem Zusammenstoss zu einer Verletzung der GG-Umschliessung kommen kann.

Im Gegensatz zur Entgleisung wird nicht zwischen «Initialereignis» und «Eskalation» des Ereignisses unterschieden; es wird angenommen, dass es im Falle eines Zusammenstosses potenziell immer zu einer Freisetzung kommen kann.

Voraussetzung für einen Zusammenstoss ist, dass sowohl technisches als auch menschliches Versagen vorliegt. Dies wird im Rahmen des Zusammenstossmodells berücksichtigt (Kapitel 5.2.2).

Die Möglichkeit eines Zusammenstosses aufgrund der Verletzung des Lichtraumprofils nach einer eskalierten Entgleisung wird hier nicht explizit betrachtet. Dieser Fall kann als Auffahren auf einen anderen Zug abgebildet werden.

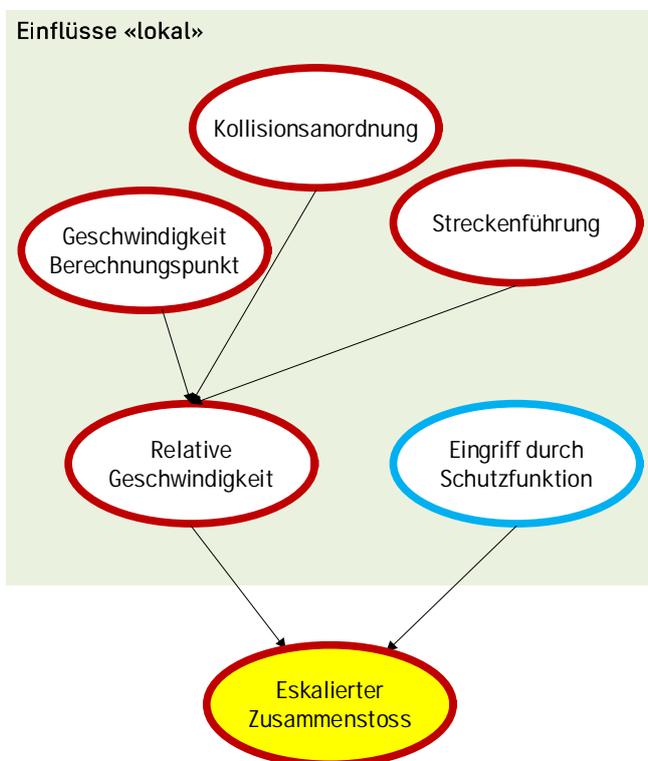


Abbildung 4-5: Subnetz „Eskalierter Zusammenstoss“

Der eskalierte Zusammenstoss kann für alle möglichen Geschwindigkeiten, Kollisionsanordnungen und Streckenführung in der ESZ ausgewertet werden.

Bei der Streckenführung ist der Zustand «einspurig» als Streckenabschnitt ohne Weichen zu verstehen. Daher ist beispielsweise ein langer Streckenabschnitt mit mehreren Gleisen und ohne Weichen als «einspurig» einzustufen. Analog sind «mehrspurige» Streckenabschnitte als Abschnitte

mit einer Weiche und «Spurwechsel» als Abschnitte mit mehr als einer Weiche zu verstehen, da ein Zusammenstoss vor allem bei Weichen auftreten kann (ausser Auffahr-, Frontalkollision). Das Verständnis für die Streckenführung ist daher analog zur Entgleisung mit der Weichendichte von «0», «1» oder «>1» Weichen.

Folgend werden die Knoten des Subnetzes "Eskalierter Zusammenstoss" samt der für die Berechnungen verwendeten Zustände pro Richtung beschrieben.

Tabelle 4-2: Knoten des Subnetzes "Eskalierter Zusammenstoss"

Input	Knoten	Beschreibung	Lokalisierung	Zustände [Anzahl]	Kanten ³
	Streckenführung	Handelt es sich um eine einspurige Strecke ohne Weichen, oder sind mehrere Spuren und Weichen vorhanden. Dies beeinflusst die Wahrscheinlichkeit für einen Zusammenstoss.	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – einspurig⁴ – mehrspurig – Spurwechsel [3] 	W
	Kollisionsanordnung	Fahrtrichtungen der beiden Züge, Frontal resultiert in einer deutlich grösseren Relativgeschwindigkeit.	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – Frontal – Auffahren – Flankenfahrt [3] 	W
	Eingriff durch Schutzfunktion	Als Schutzfunktion ist die Kombination aus technischer und menschlicher Überwachung und Zugbeeinflussung zu verstehen	Netzweit/Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – ja – nein [2] 	W
	Geschwindigkeit ESZ	Zugelassene Maximalgeschwindigkeit in der ESZ	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – 0-40 km/h – 40-60 km/h – 60-80 km/h – 80-100 km/h – 100-120 km/h [5] 	W
	Relative Geschwindigkeit	Die Relativgeschwindigkeit der beiden Züge gemäss zugelassener Maximalgeschwindigkeit auf Streckenabschnitt in [km/h]	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – 0-40 km/h – 40-60 km/h – 60-80 km/h – 80-100 km/h – > 100 km/h – Nicht relevant [6] 	W
Output	Eskalierter Zusammenstoss	Bedingte Wahrscheinlichkeit für einen eskalierten Zusammenstoss bei einer bestimmten Relativgeschwindigkeit	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – ja, mit 0-40 km/h – ja, mit 40-60 km/h – ja, mit 60-80 km/h – ja, mit 80-100 km/h – ja, mit >100 km/h – nein [6] 	M

⁴ Das Verständnis für die Streckenführung «einspurig», «mehrspurig» und «Spurwechsel» ist analog zur Entgleisung mit der Weichendichte von «0», «1» oder «>1» Weichen zu verstehen, da insbesondere Flankenfahrten und Frontalzusammenstösse nur bei Weichen auftreten können.

4.2.3 Eskalierter Brand

Nach einem Primäreignis (Kapitel 4.2.1 und 4.2.2), welches eine Freisetzung brennbarer Flüssigkeiten mit anschliessender Zündung zur Folge hat, ist es möglich, dass der Brand auf noch nicht betroffene GG-Wagen übergreift. Diese Eskalation eines Brandes ist als Sekundäreignis zu verstehen.

Beispiele:

- Ein Benzinganzzug verunfallt, ein Kesselwagen wird beschädigt und läuft aus, es kommt zu einem Brand. Durch die Unterfeuerung bersten weitere Kesselwagen.
- Ein gemischter Güterzug verunfallt, ein Benzin-Kesselwagen wird beschädigt und läuft aus. Es kommt zu einem Brand. Durch die Unterfeuerung birst ein Druckkesselwagen mit Propan oder Chlor.

Sekundäre Freisetzungen von gefährlichen Gütern können aus Eisenbahnwagen erfolgen, welche durch das Primäreignis nicht beschädigt wurden, die sich aber im Wirkungsbereich eines Lachenbrandes oder eines brennenden Wagens befinden. Dazu zählen auch Züge, welche nicht vom Primäreignis betroffenen sind, z. B. Züge im Bahnhofsbereich.

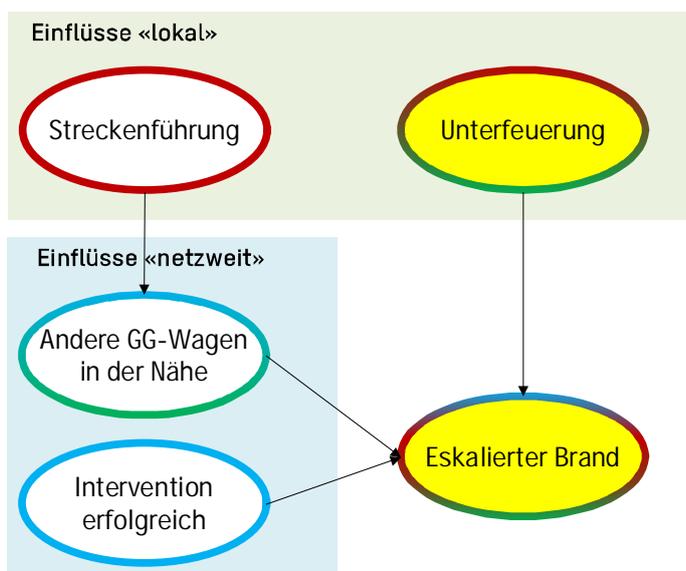


Abbildung 4-6: Subnetz "Eskalierter Brand" ausgelöst durch Unterfeuerung nach einem Lachenbrand infolge eines Primäreignisses

Dieses Subnetz wird als Sekundäreignis nach Auswertung für das Ereignis Lachenbrand des Primäreignisses berechnet. Folgend werden die Knoten samt der für die Berechnungen verwendeten Zustände beschrieben.

Tabelle 4-3: Knoten des Subnetzes "Eskalierter Brand"

	Knoten	Beschreibung	Lokalisierung	Zustände [Anzahl]	Kanten ³
Input	Unterfeuerung Leitstoffabhängig	Folge einer eskalieren Entgleisung/eines eskalieren Zusammenstosses mit GG-Freisetzung und folgendem Lachenbrand	Lokal	– ja – nein [2]	M
	Streckenführung	Handelt es sich um eine einspurige Strecke, oder sind mehrere Spuren vorhanden. Dies beeinflusst die Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Kollisionsanordnung vorzufinden.	Lokal	– einspurig – mehrspurig – Spurwechsel [3]	W
	Intervention erfolgreich	Verhinderung eines möglichen Übergriffs auf noch nicht beschädigte Wagen	Netzweit	– ja – nein [2]	W

	Knoten	Beschreibung	Lokalisierung	Zustände [Anzahl]	Kanten ³
	Andere GG-Wagen in der Nähe <i>Leitstoffabhängig</i>	Befinden sich im Unglückzug in unmittelbarer Nähe zu den vom Brandbetroffenen Wagen andere GG-Wagen? Abhängig von Streckenführung	Netzweit	– ja – nein [2]	W
Output	Eskaliertes Brand <i>Leitstoffabhängig</i>	Ausweitung des Brandes auf noch unbeschädigte Wagen in [# / Eskaliertes initial Ereignis]	Lokal	– ja – nein [2]	M

4.2.4 Zusammensetzung des Zugs (potenzielle GG-Menge)

Das folgende Subnetz beschreibt die Faktoren, welche die potenziell freisetzbare GG-Menge beeinflussen. Die potenziell freisetzbare Menge hängt ab von der Anzahl und Grösse voller GG-Gebinde des betroffenen LS dieses Zuges, und der Reihung dieser GG-Wagen. Die Anzahl Wagen und die Wagenreihung haben zudem einen Einfluss auf die Häufigkeit einer potenziell freisetzbaren Menge. Bei Ganzzügen ist beispielsweise immer mindestens ein Gefahrgutwagen betroffen (Kapitel 5.2.4).

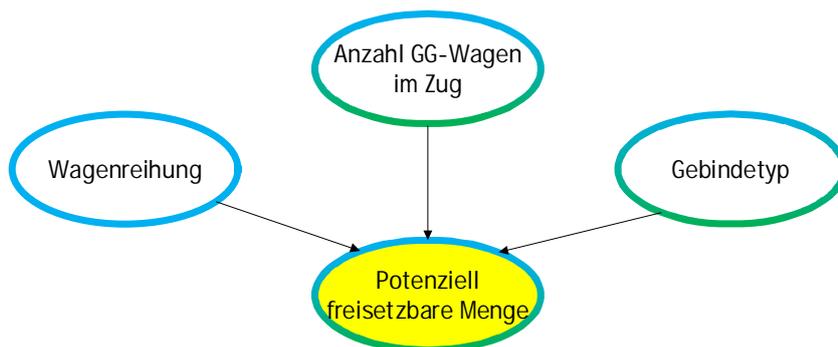


Abbildung 4-7: Subnetz "Zusammensetzung des Zugs"

Folgend werden die Knoten samt der für die Berechnungen verwendeten Zustände beschrieben.

Tabelle 4-4: Knoten des Subnetzes "Zusammensetzung des Zugs"

	Knoten	Beschreibung	Lokalisierung	Zustände [Anzahl]	Kanten ³
Input	Wagenreihung	Anordnung von GG-Wagen im Zug, befinden sich diese in unmittelbarer Nähe von einander	Netzweit	– einzeln – mehrere [2]	W
	Anzahl GG-Wagen im Zug <i>Leitstoffabhängig</i>	Zu erwartende Menge an GG transportierenden Wagen pro Zug	Netzweit	– 1 Wagen – 3 Wagen – Ganzzug	W
	Gebindetyp <i>Leitstoffabhängig</i>	Es werden nur Kesselwagen und Tankcontainer unterschieden	Netzweit	– Kesselwagen (KW) – Tankcontainer (TC) [2]	W
Output	Potenziell freisetzbare Menge <i>Leitstoffabhängig</i>	Durch ein Ereignis potenziell freisetzbare Menge an GG in einem Zug	Netzweit	– 0 m ³ – 0-20 m ³ – 20-40 m ³ – 40-80 m ³ – 80-120 m ³ – 120-160 m ³ – 160-240 m ³ [2], [5]	M

4.2.5 Beschädigung und Freisetzungsrate nach eskaliertem Ereignis

Die nachfolgenden Netze für Primärereignisse (Abbildung 4-8) und Sekundärereignisse (Abbildung 4-9) sind jeweils für jeden LS auszuwerten.

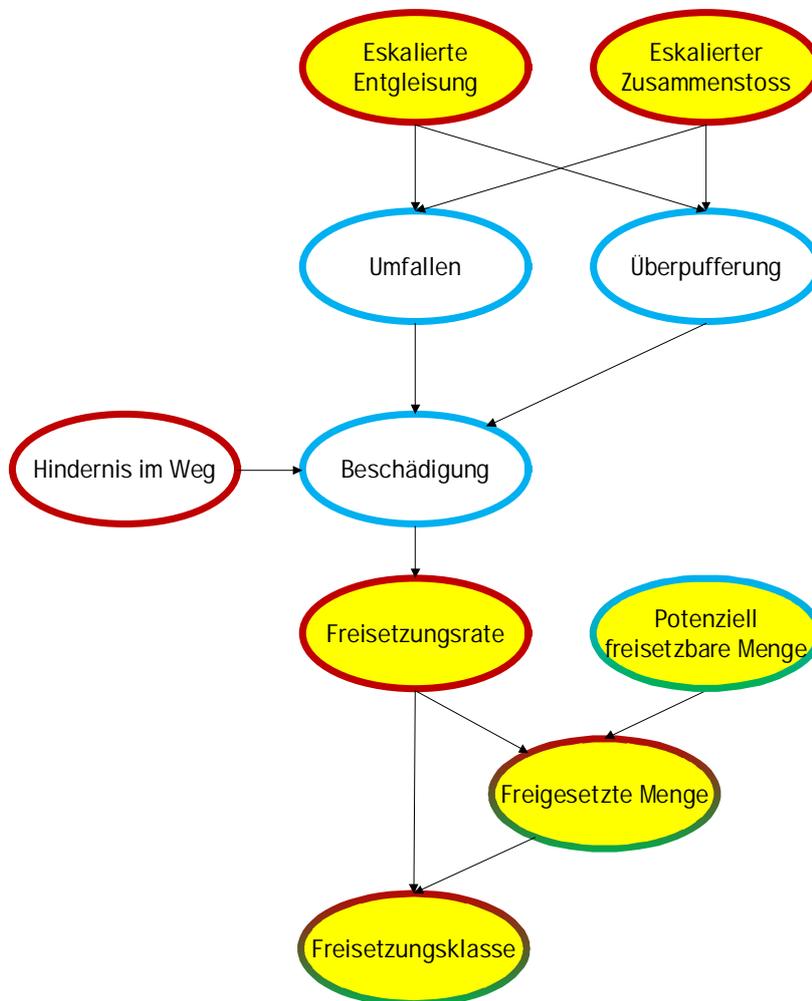


Abbildung 4-8: Subnetz "Freisetzung nach eskaliertem Primärereignis"

Bei einer eskalierten Entgleisung und einem eskalierten Zusammenstoss ist eine Verletzung der Umschliessung nach Überpufferung und Umfallen möglich. Sicherheitseinrichtungen an den Kesselwagen mindern oder verhindern je nach LS eine Beschädigung, dies fliesst in den bedingten Wahrscheinlichkeiten der Beschädigungsknoten für jeden LS ein (Kapitel 5.2.5). Entscheidend sind auch die im System enthaltene kinetische Energie und der Impuls, gegeben durch die Relativgeschwindigkeit bzw. Entgleisungsgeschwindigkeit.

Beim Sekundärereignis führt die Unterfeuerung durch einen Lachenbrand zu einem eskalierten Brand und allfällig zu einem Bersten eines weiteren Wagens, welcher beim Primärereignis nicht involviert war.

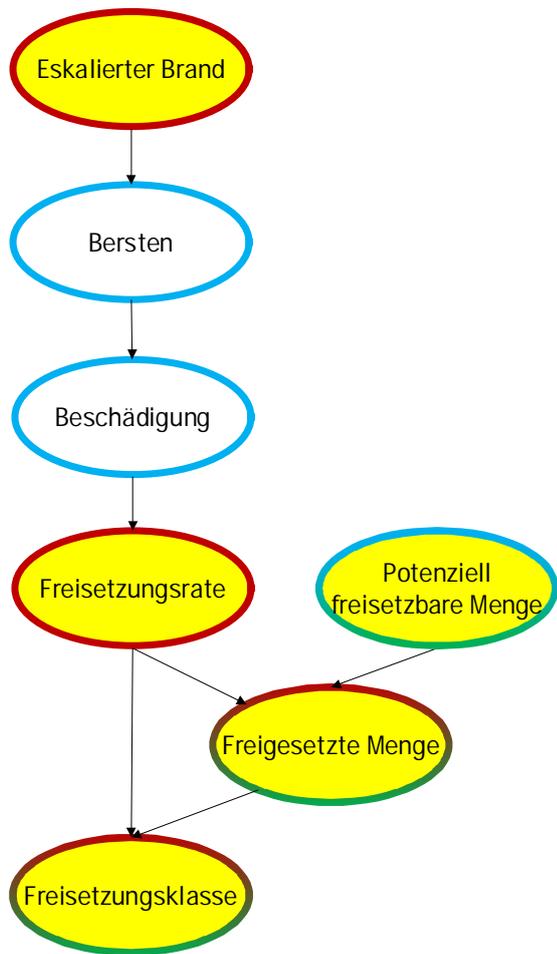


Abbildung 4-9: Subnetz "Freisetzung nach eskaliertem Sekundärereignis"

Folgend werden die Knoten samt der für die Berechnungen verwendeten Zustände beschrieben.

Tabelle 4-5: Knoten des Subnetzes "Freisetzung nach eskalierter Entgleisung"

	Knoten	Beschreibung	Lokalisierung	Zustände [Anzahl]	Kanten ³
Input	Eskalierter Entgleisung	Bedingte Wahrscheinlichkeit für eine eskalierte Entgleisung bei einer bestimmten Entgleisungsgeschwindigkeit Output aus dem Subnetz <i>Eskalierter Entgleisung</i>	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – ja, mit 0-40 km/h – ja, mit 40-60 km/h – ja, mit 60-80 km/h – ja, mit 80-100 km/h – ja, mit 100-120 km/h – nein [6] 	M
	Eskalierter Zusammenstoss	Bedingte Wahrscheinlichkeit für einen eskalierter Zusammenstoss bei einer bestimmten Relativgeschwindigkeit Output aus dem Subnetz <i>eskaliertes Zusammenstoss</i>	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – ja, mit 0-40 km/h – ja, mit 40-60 km/h – ja, mit 60-80 km/h – ja, mit 80-100 km/h – ja, mit >100 km/h – nein [6] 	M
	Eskalierter Brand	Ausweitung des Brandes auf noch unbeschädigte Wagen in [# / Eskalierter initial Ereignis]	Netzweit/Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – ja – nein [2] 	M

	Knoten	Beschreibung	Lokalisierung	Zustände [Anzahl]	Kanten ³
		Output aus dem Subnetz <i>eskalierter Brand</i>			
	Hindernis im Weg	Dummy-Knoten	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> - DUMMY - DUMMY [2] 	D
	Bersten	Wahrscheinlichkeit, dass es in Folge von Unterfeuerung zu einem Bersten kommt (von einem/mehreren Wagen)	Netzweit	<ul style="list-style-type: none"> - ja - nein [2] 	M
	Umfallen	Wahrscheinlichkeit, dass es in Folge einer Entgleisung oder eines Zusammenpralls zu einem Umfallen kommt (von einem/mehreren Wagen)	Netzweit	<ul style="list-style-type: none"> - ja, mit 0-40 km/h - ja, mit 40-60 km/h - ja, mit 60-80 km/h - ja, mit 80-100 km/h - ja, mit >100 km/h - nein [6] 	M
	Überpufferung	Wahrscheinlichkeit, dass es in Folge einer Entgleisung oder eines Zusammenpralls zu einer Überpufferung kommt (von einem/mehreren Wagen)	Netzweit	<ul style="list-style-type: none"> - ja, mit 0-40 km/h - ja, mit 40-60 km/h - ja, mit 60-80 km/h - ja, mit 80-100 km/h - ja, mit >100 km/h - nein [6] 	M
	Beschädigung	Wahrscheinlichkeit das ein verunfallter Wagen in Folge einer Beschädigung GG freisetzt («ins»: instantan, «kon»: kontinuierlich, siehe Kapitel 5.2.5 für Definitionen)	Netzweit	<ul style="list-style-type: none"> - ja, Armaturen - ins.: katastrophal - ja, Armaturen - kon.: klein - ja, Armaturen - kon.: gross - ja, Tankwand - ins.: katastrophal - ja, Tankwand - kon.: klein - ja, Tankwand - kon.: gross - ja, Tankboden - ins.: katastrophal - ja, Tankboden - kon.: klein - ja, Tankboden - kon.: gross - nein [13] 	M
	potenziell freisetzbare Menge	Durch ein Ereignis potenziell freisetzbare Menge an GG in einem Zug Output aus dem Subnetz: <i>Zusammensetzung des Zuges</i>	Netzweit/Lokal	<ul style="list-style-type: none"> - 0 m³ - 0-20 m³ - 20-40 m³ - 40-80 m³ - 80-120 m³ - 120-160 m³ - 160-240 m³ [2], [5] 	M
Output	Freisetzungsrate	Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Freisetzungsrate gemäss der in Kapitel 6 definierten Parametern	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> - instantan: katastrophal - kontinuierlich: klein - kontinuierlich: gross - keine Freisetzung [5] 	M
	Freigesetzte Menge	Wahrscheinlichkeitsverteilung für die durch das Ereignis freigesetzte Menge an GG	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> - 0 m³ - 0-10 m³ - 10-20 m³ 	M

Knoten	Beschreibung	Lokalisierung	Zustände [Anzahl]	Kanten ³
			<ul style="list-style-type: none"> - 20-40 m³ - 40-60 m³ - 60-80 m³ - 80-120 m³ - 120-160 m³ - 160-240 m³ [2],[5],[9] 	
Freisetzungsklasse	Bedingte Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte freigesetzte Menge bei einer bestimmten Freisetzungsrate	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> - Instantan, 0 m³ - Instantan, 0-10 m³ - Instantan, 10-20 m³ - Instantan, 20-40 m³ - Instantan, 40-60 m³ - Instantan, 60-80 m³ - Instantan, 80-120 m³ - Instantan, 120-160 m³ - Instantan, 160-240 m³ - Kontinuierlich, 0 m³ - Kontinuierlich, 0-10 m³ - Kontinuierlich, 10-20 m³ - Kontinuierlich, 20-40 m³ - Kontinuierlich, 40-60 m³ - Kontinuierlich, 60-80 m³ - Kontinuierlich, 80-120 m³ - Kontinuierlich, 120-160 m³ - Kontinuierlich, 160-240 m³ - Keine Freisetzung [2],[5],[9] 	M

4.2.6 Häufigkeit der Störfallszenarien

Es ist nun möglich mit einem Subnetz anschliessend an die Freisetzung direkt die Wahrscheinlichkeit für ein bestimmtes Störfallszenario zu erhalten. Hierbei haben sowohl die Art der Freisetzung (instantan, kontinuierlich) wie auch die freigesetzte Menge einen Einfluss auf das Störfallszenario.

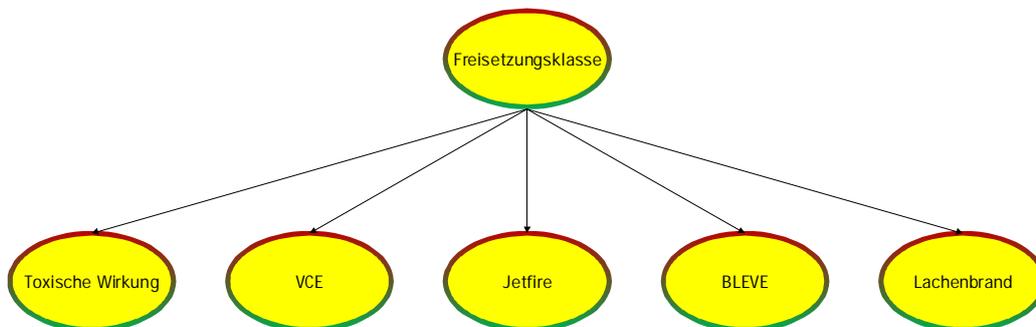


Abbildung 4-10: Subnetz "Störfallszenario"

Folgend werden die Knoten samt der für die Berechnungen verwendeten Zustände beschrieben.

Tabelle 4-6: Knoten des Subnetzes "Störfallszenario"

	Knoten	Beschreibung	Lokali- sierung	Zustände	Kan- ten ³
Input	Freisetzungsklassen	Bedingte Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte freigesetzte Menge bei einer bestimmten Freisetzungsrate Output aus dem Subnetz: <i>Freisetzung nach Entgleisung/Zusammenstoss/Brand</i>	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – Instantan, 0 m³ – Instantan, 0-10 m³ – Instantan, 10-20 m³ – Instantan, 20-40 m³ – Instantan, 40-60 m³ – Instantan, 60-80 m³ – Instantan, 80-120 m³ – Instantan, 120-160 m³ – Instantan, 160-240 m³ – Kontinuierlich, 0 m³ – Kontinuierlich, 0-10 m³ – Kontinuierlich, 10-20 m³ – Kontinuierlich, 20-40 m³ – Kontinuierlich, 40-60 m³ – Kontinuierlich, 60-80 m³ – Kontinuierlich, 80-120 m³ – Kontinuierlich, 120-160 m³ – Kontinuierlich, 160-240 m³ – Keine Freisetzung 	M
Out-	Humantoxische Wirkung	Toxische Wirkung gemäss Störfallszenarien	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – ja – nein 	M
	VCE	VCE-Szenarien gemäss Störfallszenarien	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – sofort – verzögert – keine 	M
	BLEVE	BLEVE-Szenario gemäss Störfallszenarien	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – ja – nein 	M
	Jet fire	Jet fire-Szenario gemäss Störfallszenarien	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – ja – nein 	M
	Lachenbrand	Lachenbrand-Szenarien Störfallszenarien	Lokal	<ul style="list-style-type: none"> – sofort – verzögert – keine 	M

4.3 Resultierendes Gesamtnetz

Das resultierende Gesamtnetz, welches sämtliche Subnetze kombiniert, ist für die Primäreignisse in Abbildung 4-11 und für das Sekundäreignis in Abbildung 4-12 dargestellt (grosse Versionen in Anhang A).

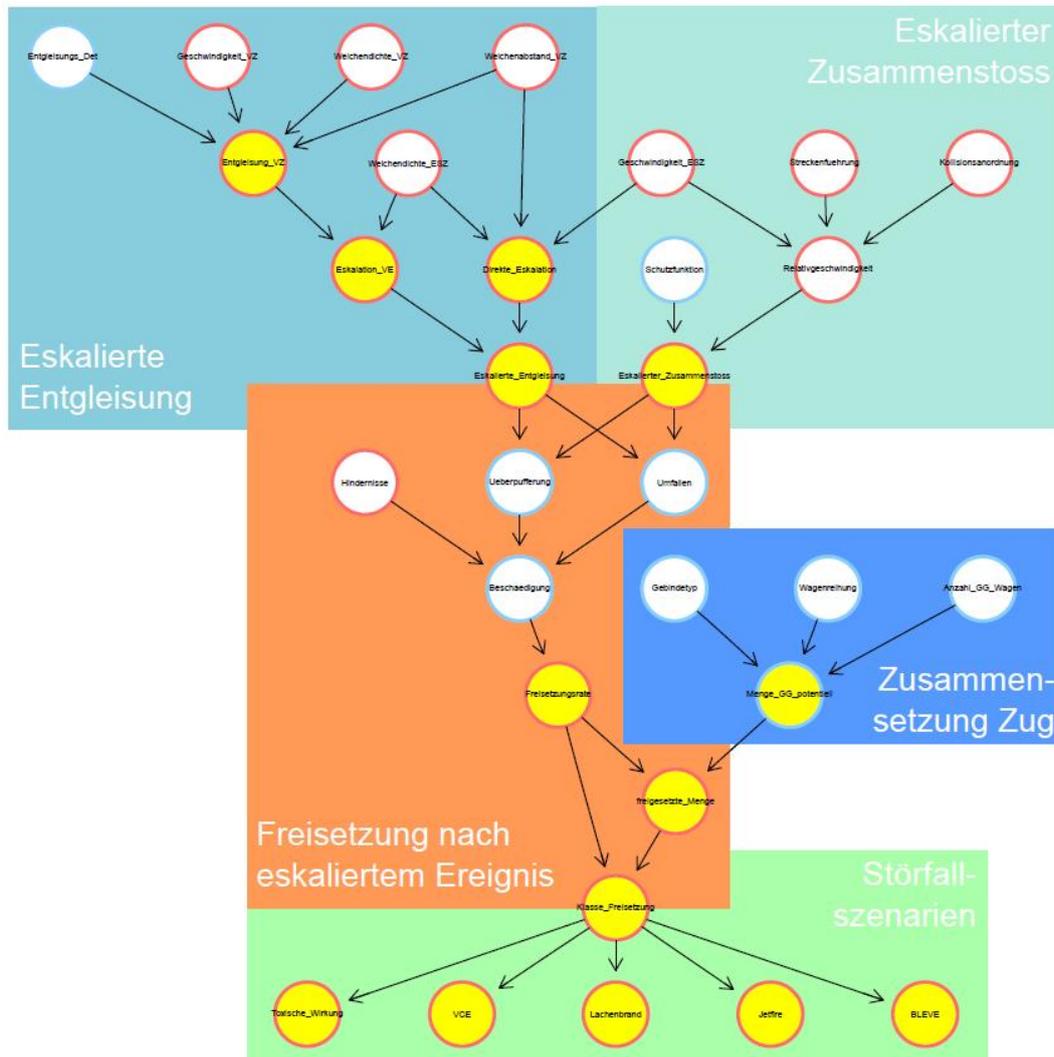


Abbildung 4-11: Bayes'sches Netz komplett für Primäreignisse

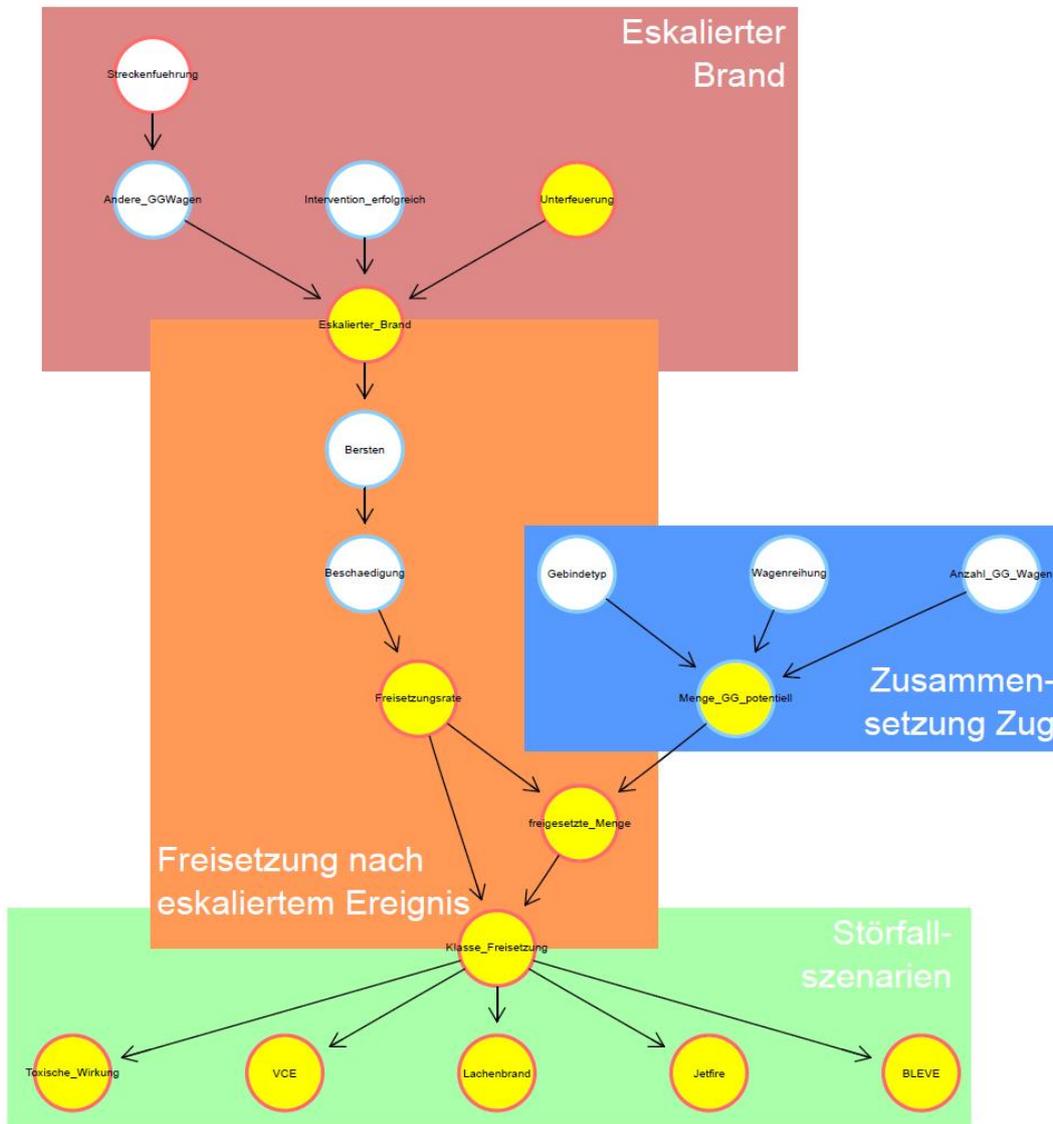


Abbildung 4-12: Bays'sches Netz komplett für Sekundärereignisse

5 Festlegung der Defaultwerte

Folgend werden die angenommenen Defaultwerte für die Parameter sowie die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Knoten festgelegt. Zudem werden Modelle und ihre Parameter angegeben.

5.1 Grundlagen

Folgend werden die Grundlagen aufgeführt, welche zur Bestimmung der Defaultwerte verwendet werden. Sofern vorhanden, werden diese Werte auf der Screeningmethodik für Personenrisiken [2] und Umweltrisiken [5] basiert. Dabei werden Werte aus der neuesten Version der Screeningmethodik 2018 [6] bevorzugt verwendet und das BN darauf basierend kalibriert. Teilweise mussten auch Annahmen getroffen werden, die im Rahmen des Kalibrierungsprozesses zu überprüfen, anzupassen oder zu präzisieren sind.

5.1.1 Ausgangsraten für eskalierte Entgleisung und Zusammenstoss

Ausgangswert für die Entgleisungs- bzw. Zusammenstossrate auf dem schweizerischen Schienennetz ist die zeitlich gemittelte Unfallrate von $2.75 \cdot 10^{-8}$ pro Zug-km für das Jahr 2018 [6]. Dabei setzt sich die Unfallrate aus der Rate der Entgleisungen (λ^E) und Zusammenstösse (λ^Z) zusammen, wobei die Zusammenstossrate rund 70% der Entgleisungsrate beträgt (Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Entgleisungs- und Zusammenstossrate gemäss Screening Personenrisiken [6] für die Bestimmung der Ausgangsrate im BN

	1976-2018	2018	2018
	/Zug-km	/Zug-km	/Zug-100m
Entgleisung	5.83E-08	1.61E-08	1.61E-09
Zusammenstoss	4.12E-08	1.14E-08	1.14E-09
Gesamt	9.95E-08	2.75E-08	2.75E-09

Die Ausgangsraten im BN werden mit den bedingten Wahrscheinlichkeiten des Modells für die Entgleisung und die eskalierte Entgleisung (Kapitel 5.2.1) bzw. den Zusammenstoss und den eskalierten Zusammenstoss (Kapitel 5.2.2) multipliziert. Um die Entgleisungs- bzw. Zusammenstossraten für das Jahr 2018 gemäss Tabelle 5-1 zu erhalten, sind die beiden Ausgangsraten im BN zu kalibrieren. Die Kalibration erfolgt durch Anwendung des BN auf das störfallrelevante Schienennetz (Kapitel 6.2).

In dieser Studie wurde für eine erste Abschätzung der Ausgangsraten für Entgleisungen und Zusammenstösse im BN von den durchschnittlichen Verteilungen der Evidenzen gemäss dem schweizweiten Screening 2018 [6] und Gleichverteilungen der Evidenzen ausgegangen. Die verwendeten Verteilungen der Evidenzen (p) der Inputknoten der Subnetze Entgleisung und Zusammenstoss sind in Tabelle 5-2 bis Tabelle 5-8 dargestellt. Diese Verteilungen sind in dieser ersten Abschätzung für alle LS identisch. Eine Ausnahme dazu ist die Wirkung des Entgleisungsdetektors. Hier wird angenommen, dass 0.1% aller Gefahrgutwagen einen vorhandenen und eingeschalteten Entgleisungsdetektor aufweisen. Für die Substanz Chlor (LS 7) hingegen wird angenommen, dass der Entgleisungsdetektor zu 99.9% vorhanden ist und wirkt.

Die Zustände für den Abstand der vorgelagerten Weiche werden anteilmässig ihrer Länge pro Gesamtlänge der VZ (5.2 km) verteilt für die Kalibration des BN (Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Verteilung Abstand vorgelagerte Weiche als Anteil zur Gesamtlänge von 5.2 km zur Berechnung der Ausgangsrate im BN

Zustände Abstand vorgelagerte Weiche	p [-]
< 200 m	0.04
200-500 m	0.06
500-900 m	0.08
900-3500 m	0.50
> 3.5 km	0.33

Die Geschwindigkeiten in der VZ und der ESZ (Tabelle 5-3) sind identisch der Geschwindigkeiten auf dem störfallrelevanten Schienennetz [6] verteilt für die Kalibration des BN.

Tabelle 5-3: Geschwindigkeitsverteilung [6] in der VZ und der ESZ zur Berechnung der Ausgangsrate im BN

Zustände Geschwindigkeit [km/h]	p [-]
0-40	0.01
40-60	0.01
60-80	0.17
80-100	0.80
100-120	0.01

Es wird angenommen, dass Entgleisungsdetektoren kaum (0.1%) vorhandenhanden ist bei den aktuell eingesetzten Wagen (Tabelle 5-4). Die Ausnahme bilden Wagen für den Transport der Substanz Chlor (LS 7), welche fast ausschliesslich (99.9%) mit EDT ausgerüstet sind (vertauschte Wahrscheinlichkeiten in Tabelle 5-4).

Tabelle 5-4: Zustände Entgleisungsdetektor zur Berechnung der Ausgangsraten im BN

Zustände EDT	p [-]
ja (vorhanden, wirksam)	0.001
nein (nicht vorhanden / vorhanden, nicht wirksam)	0.999

Die Weichendichten in der VZ und der ESZ (Tabelle 5-5) für die Kalibration des BN sind entsprechend der Weichendichten auf dem störfallrelevanten Schienennetz gemäss Screening 2018 [6] verteilt. Dabei entsprechen diese Zustände (Kapitel 4.2.1) den Weichendichtenklassen «keine Weichen», «1-2 Weichen» und «Weichendichte > 2» im Screening 2018.

Tabelle 5-5: Verteilung Weichendichte [6] in der VZ und der ESZ zur Berechnung der Ausgangsrate im BN

Zustände Anzahl Weichen	p [-]
0	0.75
1	0.15
>1	0.10

Auf dem störfallrelevanten Schienennetz [6] entspricht die Streckenführung der Verteilung der Weichendichte (Tabelle 5-5). Daher ist bei 75% der Streckenabschnitte (Tabelle 5-6) die Streckenführung «einspurig» (oder «mehrspurig ohne Weichen»), wo Zusammenstösse unwahrscheinlich sind.

Tabelle 5-6: Verteilung Streckenführung [6] in der ESZ zur Berechnung der Ausgangsrate im BN

Zustände Streckenführung	p [-]
einspurig ⁵	0.75
mehrspurig	0.15
Spurwechsel	0.10

Für die Häufigkeit der Kollisionsart wird eine Gleichverteilung angenommen (Tabelle 5-7).

Tabelle 5-7: Zugrunde gelegte Zustände Kollisionsanordnung zur Berechnung der Ausgangsrate im BN

Zustände Kollisionsanordnung	p [-]
Frontal	0.333
Auffahren	0.333
Flankenfahrt	0.333

Für die Häufigkeit einer vorhandenen Schutzfunktion zur Verhinderung eines Zusammenstosses wird eine Gleichverteilung angenommen (Tabelle 5-8).

Tabelle 5-8: Zugrunde gelegte Zustände Schutzfunktion zur Berechnung der Ausgangsrate im BN

Zustände Schutzfunktion	p [-]
ja	0.5
nein	0.5

Die Normierung der Modellparameter für die eskalierte Entgleisung und den eskalierten Zusammenstoss wurde für diese gleichverteilten Zustände so bestimmt, dass die mittleren statistischen Ereignisraten resultieren (Spalte der Raten für 2018 in Ereignisse /Zug-100m in Tabelle 5-1). Eine Anwendung des BN auf das schweizerische Schienennetz bedingt, dass die Ausgangsraten für die vorherrschenden realen Zustände auf allen Streckenabschnitten entsprechend schweizweit gewichtet und neu normiert werden müssen. Diese Normierung ist nicht Teil dieser Analyse. Das Vorgehen zur Kalibrierung des BN wird in Kapitel 6.2 erläutert.

5.1.2 Korrekturfaktor «Geschwindigkeit»

Die Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung steigt mit der Geschwindigkeit, bei welcher ein Ereignis (Entgleisung, Zusammenstoss) stattfindet. Korrekturfaktoren für diese Abhängigkeit basierend auf der Screening-Methodik Personenrisiken [2] sowie der Studie GEIL [13] sind in Tabelle 5-9 aufgeführt.

⁵ Das Verständnis für die Streckenführung «einspurig», «mehrspurig» und «Spurwechsel» ist analog zur Entgleisung mit der Weichendichte von «0», «1» oder «>1» Weichen (Kapitel 4.2.2) zu verstehen, da insbesondere Flankenfahrten und Frontalzusammenstösse nur bei Weichen auftreten können.

Tabelle 5-9: Korrekturfaktoren zur Ermittlung der Freisetzungshäufigkeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit (Referenz: 80 km/h)

Geschwindigkeit (km/h)	Methodikbericht 2014 [2]		Bericht GEII (2020) [13]	
	LS Benzin	LS Propan/Chlor	Standard Kesselwagen	Druckkesselwagen
10	0.23	0.02	0.13	0.01
20	0.38	0.03	0.25	0.03
30	0.50	0.06	0.38	0.04
40	0.62	0.10	0.50	0.10
50	0.72	0.22	0.63	0.31
60	0.82	0.44	0.75	0.58
70	0.91	0.67	0.88	0.80
80	1.00	1.00	1.00	1.00
90	1.09	1.22	1.13	1.13
100	1.17	1.32	1.25	1.25
110	1.25	-	1.38	1.38
120	1.33	-	1.50	1.50

5.1.3 Wahrscheinlichkeit instantane resp. kontinuierliche Freisetzung

Die Wahrscheinlichkeit, ob eine Freisetzung instantan resp. kontinuierlich vonstattengeht, ist ebenfalls geschwindigkeitsabhängig. Korrekturfaktoren für diese Abhängigkeit basierend auf der Screening-Methodik Personenrisiken [2] sind in Tabelle 5-10 aufgeführt.

Tabelle 5-10: Wahrscheinlichkeit einer instantanen bzw. kontinuierlichen Freisetzung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Gefahrgutzugs (Referenz: 80 km/h)

Geschwindigkeit (km/h)	Methodikbericht Screening 2014 [2]			
	LS Benzin		LS Propan/ Chlor	
	instantan	kontinuierlich	instantan	kontinuierlich
10	2.0%	98.0%	0.5%	99.5%
20	4.0%	96.0%	1.0%	99.0%
30	8.0%	92.0%	1.5%	98.5%
40	10.0%	90.0%	2.0%	98.0%
50	12.0%	88.0%	3.0%	97.0%
60	14.0%	86.0%	3.5%	96.5%
70	17.0%	83.0%	4.0%	96.0%
80	20.0%	80.0%	5.0%	95.0%
90	23.0%	77.0%	6.0%	94.0%
100	25.0%	75.0%	8.0%	92.0%

5.1.4 Korrekturfaktor 10 (dickwandige Kesselwagen)

Der Korrekturfaktor von 10 für die Freisetzungsrates der „dickwandigen Gaskesselwagen“ gegenüber den „dünnwandigen Benzin-Kesselwagen“ geht auf die Pilotrisikoermittlung aus dem Jahr 1998 [3] zurück. Im Bericht Quantifizierung Massnahmen GEII [13] erfolgte eine Überprüfung. Die Faktoren sind in Tabelle 5-11 aufgeführt.

Tabelle 5-11: Korrekturfaktor für die Freisetzungsrates der „dickwandigen Gaskesselwagen“ gegenüber den „dünnwandigen Benzin-Kesselwagen“

Typ Kesselwagen		Faktor
Standard-Kesselwagen		1
Druck-Kesselwagen	Methodikbericht Screening 2014 [2]	10
	Bericht GEII (2020) [13]	4

5.1.5 Korrekturfaktor 5 (Kesselwagen gemäss GEI)

Der Korrekturfaktor von 5 bezieht sich auf die Freisetzungsrates der im Rahmen der ersten Gemeinsamen Erklärung eingeführten „verbesserten Kesselwagen“ (im Vergleich zu den „dickwandigen Gaskesselwagen“ – siehe Faktor 10). Diese Wagen sind heute RID Standard. Im Bericht Quantifizierung Massnahmen GEII [13] erfolgte eine Überprüfung. Die Faktoren sind in Tabelle 5-12 aufgeführt.

Tabelle 5-12: Korrekturfaktor für die Freisetzungsrates der „verbesserten Kesselwagen gemäss GEI“ gegenüber den „dickwandigen Gaskesselwagen“

Typ Kesselwagen		Faktor
Standard-Kesselwagen		1
Druck-Kesselwagen	Methodikbericht Screening 2014 [2]	5
	Bericht GEII (2020) [13]	4.1

Der tiefere Wert von 4.1 gemäss GEII [13] ist jedoch ohne Wirkung EDT ermittelt.

5.1.6 Korrekturfaktor GEII (sicherheitstechnisch beste Kesselwagen gemäss GEII)

Der Korrekturfaktor GEII bezieht sich auf die Freisetzungsrates der «sicherheitstechnisch besten Kesselwagen» gemäss GEII gegenüber der im Rahmen der ersten Gemeinsamen Erklärung eingeführten „verbesserten Kesselwagen“. Die Quantifizierung erfolgte im Bericht GEII [13], der Faktor ist in Tabelle 5-13 aufgeführt.

Tabelle 5-13: Korrekturfaktor GEII für die Freisetzungsrates der „sicherheitstechnisch besten Kesselwagen“ gemäss GEII gegenüber den „verbesserten Kesselwagen gemäss GEI“

Typ Kesselwagen			Faktor
Standard-Kesselwagen			1
Sicherheitstechnisch beste Druck-Kesselwagen	Bericht GEII (2020) [13]	Umsetzung gemäss GEII	1.9
		Swissrule A	1.9
		Swissrule B	2.4

Dieser Faktor gilt für den Transport von Chlor in den «sicherheitstechnisch besten Kesselwagen» und entsprechend momentan ausschliesslich für die Substanz Chlor (LS 7). Für die Berechnungen im BN wird ein mittlerer Faktor 2.0 für den sicherheitstechnisch besten Chlor-Kesselwagen verwendet.

5.1.7 Zündungswahrscheinlichkeiten im Freisetzungsfall

Je nach Freisetzungsrate (instantan/kontinuierlich) und Substanzart (Gas/Flüssigkeit) unterscheidet sich die Zündungswahrscheinlichkeit im Freisetzungsfall. Werte hierfür sind im Methodikbericht Screening Personenrisiken 2014 [2] gegeben, die Werte sind folgend aufgeführt:

Tabelle 5-14: Zündungswahrscheinlichkeiten im Freisetzungsfall gemäss Methodikbericht Screening Personenrisiken 2014 [2]

		Zündungswahrscheinlichkeiten im Freisetzungsfall		Resultierende Faktoren	
LS Benzin					
		Zündung		Zündung	
Instantane Freisetzung	nein	30.0%		keine	30.0%
	ja	70.0%		verzögert	9.8%
		verzögert	14.0%	sofort	60.2%
		sofort	86.0%		
Kontinuierliche Freisetzung	nein	40%		keine	40.0%
	ja	60%		verzögert	10.2%
		verzögert	17%	sofort	49.8%
		sofort	83%		
LS Propan					
		Zündung		Zündung	
Instantane Freisetzung	sofort - ja	90%		sofort	90%
	sofort - nein	10%		verzögert	8.0%
		verzögerte Zündung	80%	keine	2.0%
		keine Zündung	20%		
Kontinuierliche Freisetzung	sofort - ja	70%		sofort	70%
	sofort - nein	30%		verzögert	12.0%
		verzögerte Zündung	40%	keine	18.0%
		keine Zündung	60%		

5.2 Subnetze

Folgend werden die angenommenen Defaultwerte der Subnetze aufgeführt. Soweit sinnvoll werden die Werte in einer Tabelle aufgeführt, ansonsten im Anschluss im Rahmen der Methodik.

Hinweise zu den Tabellen mit den Zuständen der Knoten

Folgend ist beispielhaft die vereinfachte Tabelle des Knotens «Eskalierter Zusammenstoss» aufgeführt.

Die grün hinterlegten Zeilen (hier: Schutzfunktion und Relativgeschwindigkeit [km/h]) zeigen die vorgelagerten Parameter/Knoten, welche diesen Knoten beeinflussen. In der Tabelle werden sämtliche Kombinationen dieser vorgelagerten Parameter abgebildet (Schutzfunktion vorhanden bei 0-40 km/h; Schutzfunktion vorhanden bei 40-60 km/h; ...), diese werden in der obersten Zeile nummeriert.

Tabelle 5-15: Beispieltabelle Knoten-Zustände

Zustände Zusammenstoss	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Schutzfunktion	ja					
Relativgeschwindigkeit [km/h]	0-40	40-60	60-80	80-100	>100	Nicht relevant
ja, bei 0-40	0.5	0.05	0	0	0	0
ja, bei 40-60	0	0.45	0.05	0	0	0
ja, bei 60-80	0	0	0.45	0.05	0	0
ja, bei 80-100	0	0	0	0.45	0.05	0
ja, bei >100	0	0	0	0	0.45	0
Kein Zusammenstoss	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1

Für jede dieser Kombination wird weiter unten in den hellgrauen Zellen eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zugeordnet, zu betrachten sind jeweils die Spalten (die Werte in den hellgrauen Zellen ergeben pro Spalte immer 1). Im vorliegenden Fall handelt es sich um eine logische Zuordnung.

Lesebeispiele:

#1 / Schutzfunktion vorhanden bei 0-40 km/h	Es wird angenommen, dass es – in 50% der Fälle zu einem Zusammenstoss bei einer V von 0-40 km/h kommt (Zustand «ja, bei 0-40») – in 50% der Fälle zu keinem Zusammenstoss kommt (Zustand «Kein Zusammenstoss»)
#2 / Schutzfunktion vorhanden bei 40-60 km/h	Es wird angenommen, dass es – in 5% der Fälle zu einem Zusammenstoss bei einer V von 0-40 km/h kommt (Zustand «ja, bei 0-40») – in 45% der Fälle zu einem Zusammenstoss bei einer V von 40-60 km/h kommt (Zustand «ja, bei 40-60») – in 50% der Fälle zu keinem Zusammenstoss kommt (Zustand «Kein Zusammenstoss»)
#8 / Schutzfunktion vorhanden; Relativgeschwindigkeit nicht relevant	Es wird angenommen, dass es – in 100% der Fälle zu keinem Zusammenstoss kommt (Zustand «Kein Zusammenstoss»)

5.2.1 Eskalierte Entgleisung

In Tabelle 5-16 sind die Parameter des Subnetzes «Eskalierte Entgleisung» (Tabelle 4-2) aufgeführt. Das Subnetz basiert auf einem Modell, in welchem diese Parameter Berücksichtigung finden. Modell und Parameter-Werte sind nachfolgend angegeben.

Tabelle 5-16: Knoten des Subnetzes "Eskalierte Entgleisung"

	Knoten	Zustand	Wert
Input	Weichenabstand VZ	– < 200 m – 200-500 m – 500-900 – 900-3500 m – > 3.5 km	Berücksichtigung in Entgleisungsmodell

	Knoten	Zustand	Wert
	Weichendichte VZ	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Weichen - 1 Weiche - >1 Weiche 	Berücksichtigung in Entgleisungsmodell
	Geschwindigkeit VZ	<ul style="list-style-type: none"> - 0-40 km/h - 40-60 km/h - 60-80 km/h - 80-100 km/h - 100-120 km/h 	Berücksichtigung in Entgleisungsmodell
	Entgleisungsdetektor EDT Leitstoffabhängig	<ul style="list-style-type: none"> - ja (vorhanden, wirksam) - nein (nicht vorhanden / vorhanden, nicht wirksam) 	Berücksichtigung in Entgleisungsmodell
	Vorgelagerte Entgleisung VE	<ul style="list-style-type: none"> - ja, bei 0-40 km/h - ja, bei 40-60 km/h - ja, bei 60-80 km/h - ja, bei 80-100 km/h - ja, bei 100-120 km/h - keine Entgleisung 	Wird mit BN berechnet
Input	Weichendichte ESZ	<ul style="list-style-type: none"> - 0 Weichen - 1 Weiche - >1 Weiche 	Berücksichtigung in Entgleisungsmodell
	Geschwindigkeit ESZ	<ul style="list-style-type: none"> - 0-40 km/h - 40-60 km/h - 60-80 km/h - 80-100 km/h - 100-120 km/h 	Berücksichtigung in Entgleisungsmodell
Output	Eskalation nach Entgleisung VE	<ul style="list-style-type: none"> - ES bei 0-40 km/h - ES bei 40-60 km/h - ES bei 60-80 km/h - ES bei 80-100 km/h - ES bei 100-120 km/h - keine Eskalation [6] 	Wird mit BN berechnet
	Direkte Eskalation	<ul style="list-style-type: none"> - ES bei 0-40 km/h - ES bei 40-60 km/h - ES bei 60-80 km/h - ES bei 80-100 km/h - ES bei 100-120 km/h - keine Eskalation [6] 	Wird mit BN berechnet
	Eskalierte Entgleisung	<ul style="list-style-type: none"> - ES bei 0-40 km/h - ES bei 40-60 km/h - ES bei 60-80 km/h - ES bei 80-100 km/h - ES bei 100-120 km/h - keine Eskalation [6] 	Wird mit BN berechnet

Modell für die eskalierte Entgleisung im BN

Im Modell der eskalierten Entgleisung im BN werden basierend auf der Ausgangsrate (Kapitel 5.1.1) die bedingten Wahrscheinlichkeiten und Ratenfaktoren (siehe Glossar) für die einzelnen Zustände der Knoten im Subnetz «eskalierte Entgleisung» (Abbildung 4-4) berechnet. Dabei wird neben einer

direkten Entgleisung und Eskalation (DE) auch die Eskalation nach einer vorgelagerten Entgleisung (VE) als physikalisch-statistisches Modell abgebildet (Kapitel 4.2.1). Dies ist sinnvoll, um die Wirkung von Entgleisungsdetektoren in Abhängigkeit der Entfernung zum betrachteten Berechnungspunkt und dem Bremsweg des Zuges zu beschreiben.

Am Berechnungspunkt der vorgelagerten Entgleisung gibt es ein Initialereignis, z.B. kann beim Fahren über eine Weiche eine bestehende Schwachstelle komplett versagen. Dieses wird in diesem Modell als «Entgleisung» definiert. Der entgleiste Wagen kann dann über einen längeren Streckenabschnitt mitgezogen werden, bis schliesslich, z.B. beim Befahren der nächsten Weiche, eine Eskalation stattfindet.

Die Entgleisung selbst hängt von der Weichendichte ab (Kapitel 4.2.1). Eine Entgleisung ist häufiger in Gegenwart von Weichen. Defekte Wagen (Flachstellen, Radlager, Aufhängung) entgleisen oft bei Weichen. Ebenfalls können aber auch Weichen defekt sein und einen nicht defekten Wagen zum Entgleisen bringen. Die zugrunde gelegten Faktoren zur Erhöhung der Entgleisungsrate und der Eskalationsrate in Abhängigkeit der Weichendichten und der Abstand der vorgelagerten Weiche wurden in einem Workshop mit dem BAV festgelegt und sind nachfolgend für alle möglichen Situationen aufgeführt.

Zur Beurteilung der Wahrscheinlichkeit einer Situation wird die qualitative Beschreibung durch quantitative Werte für die bedingten Wahrscheinlichkeiten hinterlegt (Tabelle 5-17). Die bedingte Wahrscheinlichkeit «äusserst gering» wurde auf 0.01% festgelegt und die nachfolgenden Zahlenwerte verdoppeln sich jeweils.

Tabelle 5-17: Bedingte Wahrscheinlichkeiten zur Beschreibung der Entgleisungssituation und Eskalationssituation

Beschreibung der Situation	Bedingte Wahrscheinlichkeit
unmöglich	0.00%
äusserst gering	0.01%
äusserst gering-sehr gering	0.02%
sehr gering	0.04%
sehr gering-gering	0.08%
gering	0.16%
gering-mässig	0.32%
mässig	0.64%
mässig-erheblich	1.28%
erheblich	2.56%
erheblich-hoch	5.12%
hoch	10.24%
sehr hoch	20.48%

Situationen für die Vorgelagerte Entgleisung in der VZ

Die möglichen Situationen bei der VE setzten sich zusammen gemäss der Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 in Abhängigkeit der offenen Strecke (OS) und den vorhandenen Weichen (W).

Situation 1 ohne Weiche in der VZ ist nicht abhängig vom Weichenabstand, da keine Weichen vorhanden sind:

Vorzone VZ		
Ereignisse	Häufigkeit	1 
VE auf OS vor Weiche	sehr gering	4.00E-04
VE auf OS hinter Weiche	unmöglich	0.00E+00
VE an W	unmöglich	0.00E+00
Wagendefekt	gering	1.60E-03
kein Defekt	99.8%	9.98E-01

Situation 2 mit «1» Weiche ist abhängig vom Weichenabstand für die Ereignisse „VE an W“, „Wagendefekt“ und kein „Defekt“:

> 3.5 km	900m-3500m	< 900m
1. Weiche am Anfang der Vorzone	1. Weiche in der Mitte der Vorzone	1. Weiche am Ende der Vorzone
Ereignisse	Häufigkeit	2 
VE auf OS vor Weiche	sehr gering	4.00E-04
VE auf OS hinter Weiche	sehr gering	4.00E-04
VE an W	gering-mässig	3.20E-03
Wagendefekt	gering	1.60E-03
kein Defekt	99.3%	9.93E-01
VE auf OS vor Weiche	sehr gering	4.00E-04
VE auf OS hinter Weiche	sehr gering	4.00E-04
VE an W	mässig-erheblich	1.28E-02
Wagendefekt	gering-mässig	3.20E-03
kein Defekt	97.7%	9.77E-01
VE auf OS vor Weiche	sehr gering	4.00E-04
VE auf OS hinter Weiche	sehr gering	4.00E-04
VE an W	mässig-erheblich	1.28E-02
Wagendefekt	mässig	6.40E-03
kein Defekt	97.9%	9.79E-01

Situation 3 mit «>1» Weichen ist abhängig von Weichenabstand für alle Häufigkeiten:

> 3.5 km	900m-3500m	< 900m
1. Weiche am Anfang der Vorzone	1. Weiche in der Mitte der Vorzone	1. Weiche am Ende der Vorzone
Ereignisse	Häufigkeit	3 
VE auf OS vor Weichen	sehr gering	4.00E-04
VE auf OS hinter	äusserst gering-sehr	2.00E-04
VE an W	gering-mässig	3.20E-03
Wagendefekt	sehr gering-gering	8.00E-04
kein Defekt	99.2%	9.92E-01
VE auf OS vor Weichen	sehr gering	4.00E-04
VE auf OS hinter	äusserst gering	1.00E-04
VE an W	mässig-erheblich	1.28E-02
Wagendefekt	mässig	6.40E-03
kein Defekt	95.5%	9.55E-01
VE auf OS vor Weichen	sehr gering	4.00E-04
VE auf OS hinter	äusserst gering	1.00E-04
VE an W	mässig	6.40E-03
Wagendefekt	sehr gering	4.00E-04
kein Defekt	96.7%	9.67E-01

Damit ergeben sich für die verschiedenen Weichendichten in der VZ, dem Weichenabstand zur vor-
gelagerten Weiche für die Entgleisung auf der OS und an der W folgende bedingten Wahrschein-
lichkeiten für die Entgleisung:

Weichendichte_VZ	0				
Weichenabstand_VZ	< 200m	200-500m	500-900m	900-3500m	> 3.5 km
VE auf OS	4.00E-04	4.00E-04	4.00E-04	4.00E-04	4.00E-04
VE an W	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
VE	4.00E-04	4.00E-04	4.00E-04	4.00E-04	4.00E-04

Weichendichte_VZ	1				
Weichenabstand_VZ	< 200m	200-500m	500-900m	900-3500m	> 3.5 km
VE auf OS	4.00E-04	4.00E-04	4.00E-04	4.00E-04	4.00E-04
VE an W	1.28E-02	1.28E-02	1.28E-02	1.28E-02	3.20E-03
VE	1.32E-02	1.32E-02	1.32E-02	1.32E-02	3.60E-03

Weichendichte_VZ	> 1				
Weichenabstand_VZ	< 200m	200-500m	500-900m	900-3500m	> 3.5 km
VE auf OS	4.00E-04	3.88E-04	3.71E-04	3.48E-04	2.65E-04
VE an W	6.40E-03	6.40E-03	6.40E-03	1.28E-02	3.20E-03
VE	6.80E-03	6.79E-03	6.77E-03	1.31E-02	3.47E-03

Situationen für die Eskalation in der ESZ

Die möglichen Situationen für eine ES in der ESZ sich zusammen gemäss der Abbildung 4-2 und Ab-
bildung 4-3 in Abhängigkeit der VE, eines Wagendefekts (WD) und der direkten Eskalation in der
ESZ zusammen.

Situationen a, b, c sind abhängig von Weichendichte in der ESZ:

Eskalationszone ESZ		
Ereignisse	Häufigkeit einer ES	a
ES nach VE	mässig- erheblich	1.2800E-02
WD direkte ES	gering	1.6000E-03
direkte ES	äusserst gering	1.0000E-04

Eskalationszone ESZ		
Ereignisse	Häufigkeit einer ES	b
ES nach VE	erheblich	2.5600E-02
WD direkte ES	mässig	6.4000E-03
direkte ES	sehr gering	4.0000E-04

Eskalationszone ESZ		
Ereignisse	Häufigkeit einer ES	c
ES nach VE	erheblich-hoch	5.1200E-02
WD direkte ES	mässig- erheblich	1.2800E-02
direkte ES	gering	1.6000E-03

Damit ergeben sich für die ES nach VE für verschiedenen Weichendichten in der ESZ die folgenden
bedingten Wahrscheinlichkeiten:

Weichendichte_ESZ	0	1	> 1
ES nach VE	1.28E-02	2.56E-02	5.12E-02

Für die direkte ES in Abhängigkeit des Weichenabstands zur vorgelagerten Weiche und der Weichendichte in der ESZ ergeben sich die folgenden bedingten Wahrscheinlichkeiten:

Weichendichte_ESZ	0				
Weichenabstand_VZ	< 200m	200-500m	500-900m	900-3500m	> 3.5 km
WD direkte ES	2.56E-06	2.56E-06	2.56E-06	2.56E-06	2.56E-06
direkte ES	9.98E-05	9.98E-05	9.98E-05	9.98E-05	9.98E-05
Total direkte ES	1.02E-04	1.02E-04	1.02E-04	1.02E-04	1.02E-04

Weichendichte_ESZ	1				
Weichenabstand_VZ	< 200m	200-500m	500-900m	900-3500m	> 3.5 km
WD direkte ES	4.10E-05	4.10E-05	4.10E-05	2.05E-05	1.02E-05
direkte ES	3.92E-04	3.92E-04	3.92E-04	3.91E-04	3.97E-04
Total direkte ES	4.32E-04	4.32E-04	4.32E-04	4.11E-04	4.08E-04

Weichendichte_ESZ	> 1				
Weichenabstand_VZ	< 200m	200-500m	500-900m	900-3500m	> 3.5 km
WD direkte ES	5.12E-06	5.12E-06	5.12E-06	8.19E-05	1.02E-05
direkte ES	1.55E-03	1.55E-03	1.55E-03	1.53E-03	1.59E-03
Total direkte ES	1.55E-03	1.55E-03	1.55E-03	1.61E-03	1.60E-03

Bremswegberechnung zur Bestimmung der Wirkung eines Entgleisungsdetektors

Um die Wirkung eines Entgleisungsdetektors bei Gefahrgutwagen zu bestimmen wurde die Berechnung des Bremsweges mit einem Verzögerungsrechner durchgeführt⁶. Mit dem Verzögerungsrechner können anhand der Bremsparameter der gesamte Bremsweg bei gegebener Zugsgeschwindigkeit und die Restgeschwindigkeit bei inkompletter Bremsung bestimmt werden (Abbildung 5-1). Der Verzögerungsrechner geht bei den verwendeten Parametern von einer Bremsaufbauzeit von 11 Sekunden aus, bis die volle Bremskraft auf die ganze Zugskomposition wirkt.

Für alle Abschnitte entsprechend dem Weichenabstand der vorgelagerten Weiche in der Vorzone wird bestimmt, ob ein Zug bei vorgegebener Geschwindigkeit bis zum Berechnungspunkt bremsen kann. Falls er nicht bremsen kann, da sein Bremsweg länger ist als der Abstand zum Berechnungspunkt, wird seine Endgeschwindigkeit bestimmt mit der er den Berechnungspunkt erreicht.

Die Berechnung wird wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben in Fahrtrichtung durchgeführt.

⁶ <https://bahntechnik-bahnbetrieb.de/verzoegerungsrechner/>

Eingabewerte und Ergebniswerte

Verzögerungsrechner

1. Zugtype [Auswahl]
in Arbeit Güterzug lang (750m, 120km/h)

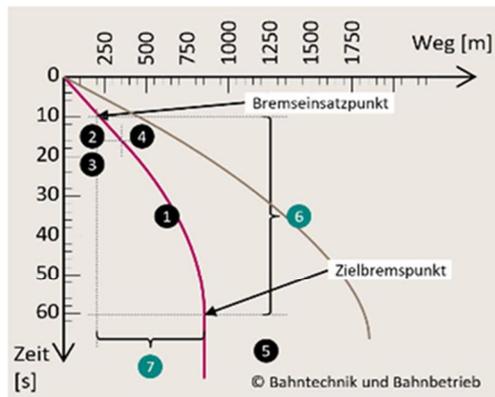
2. Verzögerungsart [Auswahl]
Zwangsbremsverzögerung

3. Mittlere Zwangsbremsverzögerung [Auswahl, m/s²]
1,0 (z.B. Zwangsbremswert bei durchschnittlich schweren Güte

4. Bremsstellung bzw. Bremsart [Auswahl]
G (Güterzugbremse, für lange, schwere oder ungleichmäßig be

5. Auslastungsgrad [Auswahl]
mittlere Kapazitätsauslastung

6. mittlere Steigung oder Neigung der Strecke [Promille]
0



1. Im ersten Schritt kann der Bediener die Zugtype auswählen. Mit ihr sind bestimmte Eigenschaften wie Zuglänge, Zuggewicht oder die Maximalgeschwindigkeit verbunden. Damit werden beispielsweise Fehleingaben per se vermieden. Zugleich sind mit der Auswahl der Zugtype auch Standardwerte vorgegeben, die die Bedienung beispielsweise Laien einfacher machen.
2. Mit der Verzögerungsart wählt man aus, ob es sich bei der

Abbildung 5-1: Eingabe und Ergebniswerte des verwendeten Verzögerungsrechners?

Unter Berücksichtigung der Bremswegberechnung und den Knoten der Eskalierten Entgleisung ergeben sich die folgenden Tabellen für die bedingten Übergangswahrscheinlichkeiten im BN jeweils mit und ohne EDT («Entgleisungs_Det»):

VE auf OS ohne EDT

Entgleisungs_Det	nein				
Weichendichte_VZ	alle				
Weichenabstand_VZ	alle				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	1.00	0	0	0	0
ja bei 40-60	0	1.00	0	0	0
ja bei 60-80	0	0	1.00	0	0
ja bei 80-100	0	0	0	1.00	0
ja bei 100-120	0	0	0	0	1.00
keine Eskalation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

VE auf OS ohne EDT

Entgleisungs_Det	nein				
Weichendichte_VZ	alle				
Weichenabstand_VZ	alle				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	1.00	0	0	0	0
ja bei 40-60	0	1.00	0	0	0
ja bei 60-80	0	0	1.00	0	0
ja bei 80-100	0	0	0	1.00	0
ja bei 100-120	0	0	0	0	1.00
keine Eskalation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Lesebeispiel: Ist der Zug nicht mit einem EDT ausgerüstet und entgleist auf offener Strecke in der VZ, dann ist die Restgeschwindigkeit bei der Eskalation dieselbe wie bei der VE. Diese Logik gilt für alle folgenden Tabellen mit Zügen ohne EDT.

VE an W mit EDT

Entgleisungs_Det	ja				
Weichendichte_VZ	0				
Weichenabstand_VZ	alle				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	0	0	0	0	0
ja bei 40-60	0	0	0	0	0
ja bei 60-80	0	0	0	0	0
ja bei 80-100	0	0	0	0	0
ja bei 100-120	0	0	0	0	0
keine Eskalation	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Lesebeispiel: Wenn keine Weiche da ist in der VZ, dann kann keine VE an einer Weiche stattfinden. Diese Logik gilt für alle folgenden Tabellen mit VZ ohne Weiche.

VE an W ohne EDT

Entgleisungs_Det	nein				
Weichendichte_VZ	0				
Weichenabstand_VZ	alle				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	0	0	0	0	0
ja bei 40-60	0	0	0	0	0
ja bei 60-80	0	0	0	0	0
ja bei 80-100	0	0	0	0	0
ja bei 100-120	0	0	0	0	0
keine Eskalation	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

VE an W mit EDT

Entgleisungs_Det	ja				
Weichendichte_VZ	1, >1				
Weichenabstand_VZ	> 200m				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	0.25	0.25	0.00	0.00	0.00
ja bei 40-60	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00
ja bei 60-80	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
ja bei 80-100	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
ja bei 100-120	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
keine Eskalation	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00

Lesebeispiel: Ist der Zug mit einem EDT ausgerüstet und findet eine Entgleisung in der VZ auf offener Strecke statt bei einer Geschwindigkeit von 0-40 km/h, so trifft er in 25% der Fälle am Ereignisort/Berechnungspunkt mit einer Restgeschwindigkeit von 0-40 km/h ein. In 75% der Fälle kann er vor dem Ereignisort/Berechnungspunkt anhalten («keine Eskalation»).

VE an W ohne EDT

Entgleisungs_Det	nein				
Weichendichte_VZ	1, >1				
Weichenabstand_VZ	> 200m				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	1.00	0	0	0	0
ja bei 40-60	0	1.00	0	0	0
ja bei 60-80	0	0	1.00	0	0
ja bei 80-100	0	0	0	1.00	0
ja bei 100-120	0	0	0	0	1.00
keine Eskalation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

VE an W mit EDT

Entgleisungs_Det	ja				
Weichendichte_VZ	1, >1				
Weichenabstand_VZ	200-500m				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	0.00	0.17	0.17	0.17	0.00
ja bei 40-60	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00
ja bei 60-80	0.00	0.00	0.17	0.50	0.00
ja bei 80-100	0.00	0.00	0.00	0.33	0.50
ja bei 100-120	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
keine Eskalation	1.00	0.83	0.50	0.00	0.00

VE an W ohne EDT

Entgleisungs_Det	nein				
Weichendichte_VZ	1, >1				
Weichenabstand_VZ	200-500m				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	1.00	0	0	0	0
ja bei 40-60	0	1.00	0	0	0
ja bei 60-80	0	0	1.00	0	0
ja bei 80-100	0	0	0	1.00	0
ja bei 100-120	0	0	0	0	1.00
keine Eskalation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

VE an W mit EDT

Entgleisungs_Det	ja				
Weichendichte_VZ	1, >1				
Weichenabstand_VZ	500-900m				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00
ja bei 40-60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38
ja bei 60-80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13
ja bei 80-100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13
ja bei 100-120	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
keine Eskalation	1.00	1.00	1.00	0.88	0.38

VE an W ohne EDT

Entgleisungs_Det	nein				
Weichendichte_VZ	1, >1				
Weichenabstand_VZ	500-900m				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	1.00	0	0	0	0
ja bei 40-60	0	1.00	0	0	0
ja bei 60-80	0	0	1.00	0	0
ja bei 80-100	0	0	0	1.00	0
ja bei 100-120	0	0	0	0	1.00
keine Eskalation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

VE an W mit EDT

Entgleisungs_Det	ja				
Weichendichte_VZ	1, >1				
Weichenabstand_VZ	900-3500m				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	0	0	0	0	0
ja bei 40-60	0	0	0	0	0
ja bei 60-80	0	0	0	0	0
ja bei 80-100	0	0	0	0	0
ja bei 100-120	0	0	0	0	0
keine Eskalation	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

VE an W ohne EDT

Entgleisungs_Det	nein				
Weichendichte_VZ	1, >1				
Weichenabstand_VZ	900-3500m				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	1.00	0	0	0	0
ja bei 40-60	0	1.00	0	0	0
ja bei 60-80	0	0	1.00	0	0
ja bei 80-100	0	0	0	1.00	0
ja bei 100-120	0	0	0	0	1.00
keine Eskalation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

VE an W mit EDT

Entgleisungs_Det	ja				
Weichendichte_VZ	1, >1				
Weichenabstand_VZ	> 3.5km				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	0	0	0	0	0
ja bei 40-60	0	0	0	0	0
ja bei 60-80	0	0	0	0	0
ja bei 80-100	0	0	0	0	0
ja bei 100-120	0	0	0	0	0
keine Eskalation	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

VE an W ohne EDT

Entgleisungs_Det	nein				
Weichendichte_VZ	1, >1				
Weichenabstand_VZ	> 3.5km				
Geschwindigkeit_VZ	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120
ja bei 0-40	1.00	0	0	0	0
ja bei 40-60	0	1.00	0	0	0
ja bei 60-80	0	0	1.00	0	0
ja bei 80-100	0	0	0	1.00	0
ja bei 100-120	0	0	0	0	1.00
keine Eskalation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Mit diesen Grundlagen kann nun die Berechnung der Ereignisrate einer eskalierten Entgleisung im BN durchgeführt werden.

Beispielrechnung entlang eines Gleises

Bei der Verwendung der Resultate des BN in einem zukünftigen EDV-TOOL werden die berechneten Raten für die Eskalierte Entgleisung entlang der Strecke ausgelesen. Um die Wirkung des Modells

für die eskalierte Entgleisung zu visualisieren wird eine Beispielrechnung entlang eines Gleises durchgeführt.

In diesem Beispiel fährt ein Zug von links nach rechts über Weichen an den Stellen 0 m, 2'000 m und 4'000 m (Abbildung 5-2). Dabei ergeben sich 5 Szenarien:

- Szenario 1: keine Weichen
- Szenario 2: 1 Weiche bei 0 m und 4'000 m
- Szenario 3: >1 Weiche bei 0 m und 4'000 m
- Szenario 4: 1 Weiche bei 2'000 m und 4'000 m
- Szenario 5: >1 Weiche bei 2'000 m und 4'000 m

Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 zeigen, dass an den Orten der Weichen die bedingte Wahrscheinlichkeit für eine eskalierte Entgleisung steigt. Der Anstieg ist grösser «>1» Weiche (Szenario 3 & 5) als bei «1» Weiche (Szenario 2 & 4).

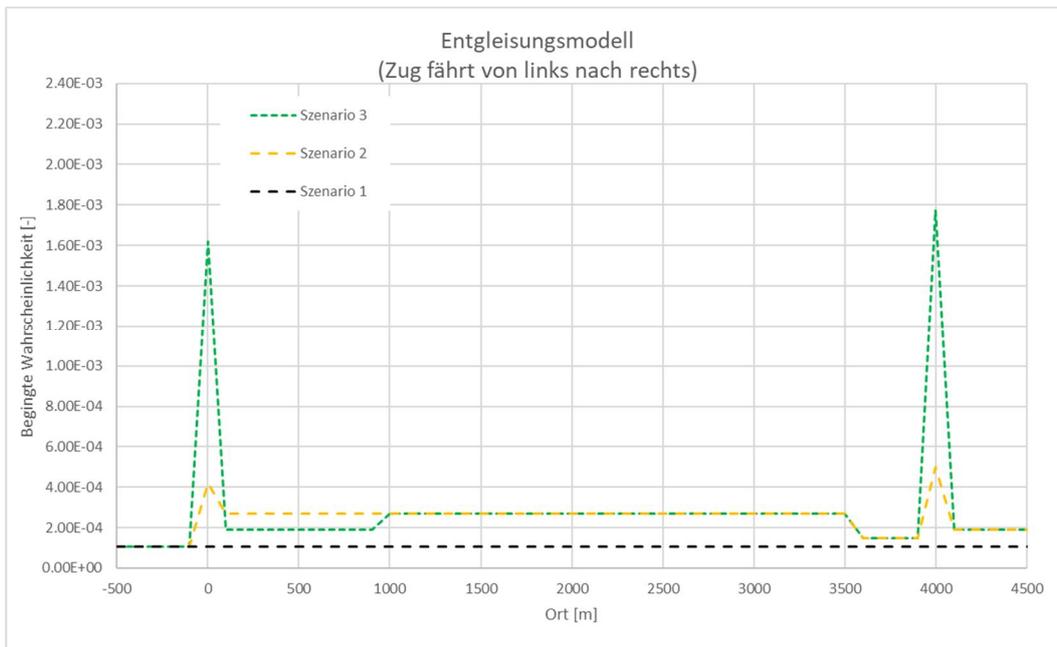


Abbildung 5-2: Streckenverlauf des Faktors für die Eskalationsrate für 5 Szenarien in einseitiger Fahrtrichtung

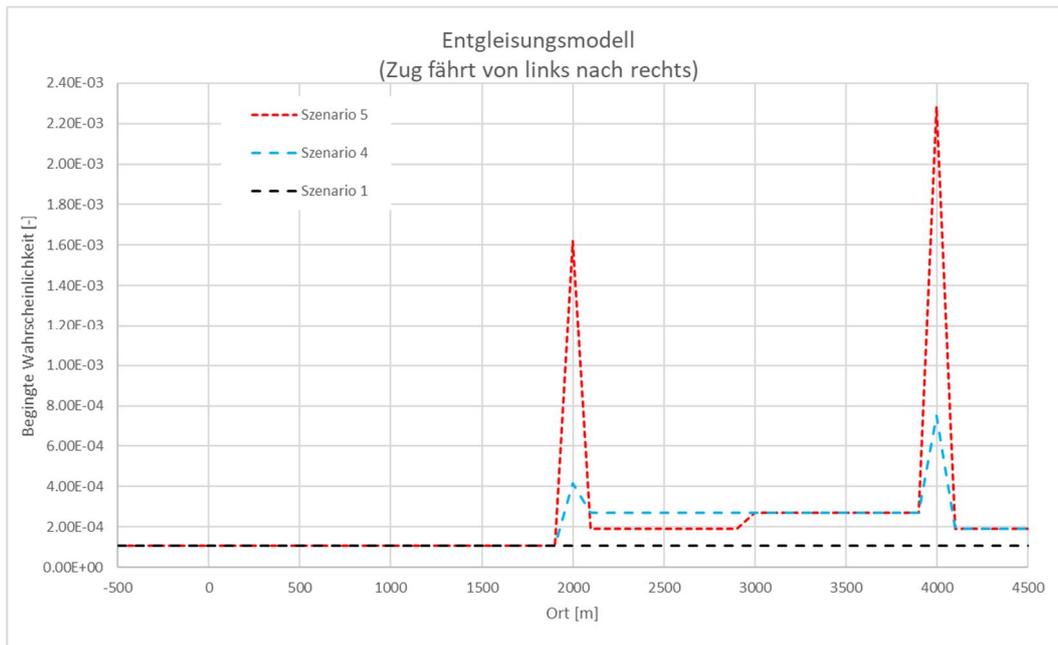


Abbildung 5-3: Streckenverlauf des Faktors für die Eskalationsrate für 5 Szenarien in einseitiger Fahrtrichtung

Die Spitzenhöhen sind aber ebenfalls abhängig von der Anzahl und dem Abstand der vorgelagerten Weichen. So ist die bedingte Wahrscheinlichkeit bei 4'000 m am grössten, da je nach Szenario bei 0 m und 2'000 m Weichen vorgelagert sind, welche eine vorgelagerte Entgleisung auslösen können.

Nach dem Überfahren einer Weiche/mehreren Weichen (rechts von 0 m, 2000 m, 4000 m) fällt die bedingte Wahrscheinlichkeit für eine Eskalation. Diese bleibt jedoch über der Wahrscheinlichkeit für die offene Strecke ohne Weichen (Szenario 1), da nun mindestens eine Weiche vorgelagert ist. Die Wahrscheinlichkeit ist tiefer nach «>1» Weichen (Szenario 3 & 5), da eine vorangehende Eskalation auf der Weiche wahrscheinlicher ist. Dieser Effekt wird nach weiteren 900 m vergessen (1'000 m in Abbildung 5-2, 3'000 m in Abbildung 5-3). Nach 4'000 m gibt es keinen Unterschied zwischen den Szenarien 2, 3, 4 & 5, da in allen Fällen nun mindestens 2 Weichen in der Vorzone (5'200 m Länge) liegen.

Bei den Szenarien 2 & 3 gibt es eine Reduktion der Wahrscheinlichkeit einer Eskalation nach 3'500 m gemäss den Annahmen für die vorgelagerte Entgleisung in der VZ (siehe Beginn Kapitel 5.2.1).

Mögliche Quellen für die Parameterkalibration bei der eskalierten Entgleisung

Die verwendeten Parameter wurden in einem ersten Schritt aufgrund eines Vergleichs mit dem Screening Personenrisiken 2018 [6] kalibriert und sind vor einer Anwendung auf das schweizerische Schienennetz neu zu bestimmen (Kapitel 6.2). Dabei können Daten aus nachfolgenden möglichen Quellen ausgewertet werden:

- Abstand Weiche bei Entgleisung: DfA
- Geschwindigkeit bei Entgleisung: DfA
- Entgleisungsdetektor: Statistiken SBB Cargo, Wagenhalter
- Weichendichte Berechnungspunkt: DfA
- Geschwindigkeit Berechnungspunkt: DfA
- Eskalierte Entgleisung: Ereignisdatenbanken SBB/BAV [# /Jahr]

5.2.2 Eskalierter Zusammenstoss

In Tabelle 5-18 sind die zugrunde gelegten Default-Werte des Subnetzes «Eskalierter Zusammenstoss» (siehe Abbildung 4-5) zusammengefasst. Die Werte und ihre Abschätzung sind nachfolgend aufgeführt.

Tabelle 5-18: Knoten des Subnetzes "Eskalierter Zusammenstoss"

	Knoten	Zustand	Wert
Input	Streckenführung	<ul style="list-style-type: none"> – einspurig⁷ – mehrspurig – Spurwechsel 	Berücksichtigung in Zusammenstossmodell
	Kollisionsanordnung	<ul style="list-style-type: none"> – Frontal – Auffahren – Flankenfahrt 	Berücksichtigung in Zusammenstossmodell
	Eingriff durch Schutzfunktion	<ul style="list-style-type: none"> – ja – nein 	<ul style="list-style-type: none"> – 50% – 50%
	Geschwindigkeit ESZ	<ul style="list-style-type: none"> – 0-40 km/h – 40-60 km/h – 60-80 km/h – 80-100 km/h – 100-120 km/h 	Berücksichtigung in Zusammenstossmodell
	Relative Geschwindigkeit	<ul style="list-style-type: none"> – 0-40 km/h – 40-60 km/h – 60-80 km/h – 80-100 km/h – > 100 km/h 	Wird mit Zusammenstossmodell berechnet
Output	Eskalierter Zusammenstoss	<ul style="list-style-type: none"> – ES bei 0-40 km/h – ES bei 40-60 km/h – ES bei 60-80 km/h – ES bei 80-100 km/h – ES bei 100-120 km/h – keine Eskalation [6] 	Wird mit Zusammenstossmodell berechnet

Modell für den eskalierten Zusammenstoss im BN

Im Fall eines Zusammenstosses zwischen zwei Zügen besteht die Wahrscheinlichkeit einer Eskalation und allfälliger Freisetzung des involvierten Gefahrguts. Die Eskalationswahrscheinlichkeit bei einem Zusammenstoss wird als sehr hoch eingeschätzt und wird für das Modell als $\omega^Z = 0.9$ angenommen⁸. Die Rate eines eskalierten Zusammenstosses basiert aber ebenfalls auf den Zuständen der vorgeschalteten Knoten (Tabelle 5-18). Die Ereignisrate λ_{SF} hängt insbesondere von der Streckenführung (SF), der Ausgangsrate (Kapitel 5.1.1) und der Eskalationswahrscheinlichkeit ab (Formel 1).

$$\lambda_{SF} = f_{SF} \cdot \omega^Z \cdot \lambda^{Z,BN} \text{ [/Zug-100m]} \quad \text{Formel 1}$$

Dabei sind Zusammenstösse auf einspurigen Streckenabschnitten und mehrspurigen Streckenabschnitten ohne Weichen deutlich seltener als bei mehrspurigen Streckenabschnitten mit Weichen oder bei Spurwechseln. Der Korrekturfaktor f_{SF} aufgrund der Streckenführung und Weichen für die einzelnen Zustände ist in Tabelle 5-19 angegeben.

⁷ Das Verständnis für die Streckenführung «einspurig», «mehrspurig» und «Spurwechsel» ist analog zur Entgleisung mit der Weichendichte von «0», «1» oder «>1» Weichen (Kapitel 4.2.2) zu verstehen, da insbesondere Flankenfahrten und Frontalzusammenstösse nur bei Weichen auftreten können.

⁸ Bagatellzusammenstösse sind für die Freisetzungshäufigkeit nicht relevant. Der definitive Wert ist im Rahmen der Kalibrierung aufgrund der statistischen Daten festzulegen.

Tabelle 5-19: Korrekturfaktor f_{SF} für die Streckenführung/Weichen und resultierende Ereignisrate (Formel 1)

Streckenführung	Faktor	Rate [/Zug-100m]
einspurig ⁹	0.1	1.0E-10
mehrspurig	4	4.2E-09
Spurwechsel	8	8.4E-09

Beim Auffahren eines Zuges auf einen anderen ist die Relativgeschwindigkeit die Differenz der beiden Zuggeschwindigkeiten, bei einem Frontalzusammenstoss die Summe dieser Geschwindigkeiten. Es wird davon ausgegangen, dass die jeweilige Geschwindigkeit der beiden Züge beim Zusammenstoss kleiner ist als ihre erlaubte Fahrgeschwindigkeit gemäss RADN an diesem Berechnungspunkt.

Aus der Kollisionsanordnung und der Geschwindigkeit am Berechnungspunkt lassen sich die Relativgeschwindigkeiten beim eskalierten Zusammenstoss definieren (Tabelle 5-20, Tabelle 5-21). Bei der Frontalkollision wird davon ausgegangen, dass die Zuggeschwindigkeit durch Sicherheitssysteme oder den Lokführer stark reduziert wird, so dass die Relativgeschwindigkeit der erlaubten Geschwindigkeit am Berechnungspunkt entspricht ($\pm 10\%$). Beim Auffahren oder bei der Flankenfahrt wird in 10% der Fälle eine kleinere Relativgeschwindigkeit als die erlaubte Geschwindigkeit am Berechnungspunkt angenommen. Eine Flankenfahrt auf einem einspurigen Streckenabschnitt ohne Weichen ist nicht möglich.

Tabelle 5-20: Zugrunde gelegte bedingte Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit der Züge (Reihe) beim Zusammenstoss im Fall einer Frontalkollision von der Geschwindigkeit am Berechnungspunkt (Spalten)

Kollisionsanordnung	Frontal				
	Geschwindigkeit [km/h]	0-40	40-60	60-80	80-100
0-40	90%	10%	0%	0%	0%
40-60	10%	80%	10%	0%	0%
60-80	0%	10%	80%	10%	0%
80-100	0%	0%	10%	80%	10%
>100	0%	0%	0%	10%	90%

Tabelle 5-21: Zugrunde gelegte bedingte Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit der Züge (Reihe) beim Zusammenstoss im Fall einer Auffahrkollision oder Flankenfahrt von der Geschwindigkeit am Berechnungspunkt (Spalten)

Kollisionsanordnung	Auffahren oder Flankenfahrt (nur bei mehrspuriger Streckenführung und bei Spurwechseln)				
	Geschwindigkeit [km/h]	0-40	40-60	60-80	80-100
0-40	100%	10%	0%	0%	0%
40-60	0%	90%	10%	0%	0%
60-80	0%	0%	90%	10%	0%
80-100	0%	0%	0%	90%	10%
>100	0%	0%	0%	0%	90%

⁹ Das Verständnis für die Streckenführung «einspurig», «mehrspurig» und «Spurwechsel» ist analog zur Entgleisung mit einer Weichendichte von «0», «1» oder «>1» Weichen (Kapitel 4.2.2) zu verstehen, da insbesondere Flankenfahrten und Frontalzusammenstösse nur bei Weichen auftreten können.

Vor einem potenziellen Zusammenstoss kann das Eingreifen durch eine Schutzfunktion einen Zusammenstoss verhindern oder die Wahrscheinlichkeit dafür verringern. Als Schutzfunktion ist die Kombination aus technischer und menschlicher Überwachung und Zugbeeinflussung zu verstehen (Zugleitsystem etc.), welche eine Gegenfahrt von Zügen zu einem bestimmten Grad verhindert.

Sollte der Zusammenstoss nicht verhindert werden, kann jedoch die Relativgeschwindigkeit gesenkt werden. Die Wirkung der Schutzfunktion ist in Tabelle 5-22 abgebildet. Bei einer vorhandenen Schutzfunktion wird von einer Chance von 50% ausgegangen, dass es keinen Zusammenstoss gibt. Für die Kalibration des BN wird davon ausgegangen, dass eine Schutzfunktion in 50% der Fälle vorhanden ist (Tabelle 5-18). Dies ergibt daher eine Schutzwirkung bei insgesamt 25% der potenziellen Zusammenstösse. Generell wird zudem bei einer vorhandenen Schutzfunktion zusätzlich die Relativgeschwindigkeit in 10% der Fälle reduziert (Tabelle 5-22). Die Schutzfunktion ist aktuell nicht geschwindigkeitsabhängig.

Tabelle 5-22: Zugrunde gelegte bedingte Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit der Züge beim Zusammenstoss von der Schutzfunktion.

Zustände Zusammenstoss (W bei bestimmter V)	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
Schutzfunktion	ja						nein					
Relativgeschwindigkeit [km/h]	0-40	40-60	60-80	80-100	>100	Nicht relevant	0-40	40-60	60-80	80-100	>100	Nicht relevant
ja, bei 0-40	0.5	0.05	0	0	0	0	1	0.1	0	0	0	0
ja, bei 40-60	0	0.45	0.05	0	0	0	0	0.9	0.1	0	0	0
ja, bei 60-80	0	0	0.45	0.05	0	0	0	0	0.9	0.1	0	0
ja, bei 80-100	0	0	0	0.45	0.05	0	0	0	0	0.9	0.1	0
ja, bei >100	0	0	0	0	0.45	0	0	0	0	0	0.9	0
Kein Zusammenstoss	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	0	0	0	0	0	1

Alle Faktoren von der Ausgangsrate (*Formel 1*) entlang der Knoten im Subnetz «eskaliertes Zusammenstoss» bis zum Endknoten «eskaliertes Zusammenstoss» werden ausgewertet und es resultieren 6 Ereignisraten zu den möglichen Zuständen des Endknotens (Tabelle 5-18).

Mögliche Quellen für die Parameterkalibration beim eskalierten Zusammenstoss

Die verwendeten Parameter wurden in einem ersten Schritt aufgrund eines Vergleichs mit dem Screening Personenrisiken 2018 kalibriert und sind vor einer Anwendung des BN auf das schweizerische Schienennetz neu zu bestimmen. Dabei können Daten aus nachfolgenden möglichen Quellen ausgewertet werden:

- Streckenführung: GIS Daten
- Kollisionsanordnung: Analyse NEDB Ereignisse mit Zusammenstössen der Züge, erweitert um Lokale Betrachtungen wie Einfluss von Spurwechsel etc.
- Eingriff durch Schutzfunktion: Sektion Sicherheitstechnik
- Relativgeschwindigkeit: Statistik SBB
- Potenzieller Zusammenstoss: Ereignisdatenbanken SBB/BAV [# /Jahr]

5.2.3 Eskalierter Brand

Folgend werden die Default-Werte des Subnetzes «Eskalierter Brand» (siehe Abbildung 4-6) aufgeführt respektive hergeleitet. Hierbei handelt es sich grundsätzlich um ein Sekundärereignis, vorausgehen muss zwingend eine Freisetzung infolge Entgleisung oder Zusammenstoss.

Unterfeuerung (Leitstoff-/Substanzabhängig)

Die Rate der Unterfeuerung entspricht der Ereignisrate eines Lachenbrandes aus den Primäreignissen. Die Unterfeuerung ist nur bei einem Lachenbrand möglich daher infolge einer Freisetzung von brennbaren Flüssigkeiten. Die Unterfeuerung ist deshalb leitstoffabhängig.

Zustände Unterfeuerung	p [-]
ja	Rate des Lachenbrandes aus den Primäreignissen
nein	1-(Rate des Lachenbrandes aus den Primäreignissen)

Streckenführung

Hat einen Einfluss auf den Knoten «Andere GG-Wagen in der Nähe».

Details/Zustände, siehe Subnetz «Eskalierter Zusammenstoss»

Intervention erfolgreich

Durch eine erfolgreiche Intervention kann die Eskalation eines Brandes verhindert werden. Es wird angenommen, dass hier aufgrund der vielen Unbekannten eine netzweite Wahrscheinlichkeit zugrunde gelegt werden kann.

Es wird angenommen, dass in 75% der Fälle eine Eskalation verhindert werden kann.

Zustände Intervention	p [-]
ja	0.75
nein	0.25

In der Screening-Methodik Personenrisiken [2] wird für den LS Propan für den Punkt «Intervention bei exponiertem Propankesselwagen: nein / ja» eine Wahrscheinlichkeitsverteilung von 50/50 angenommen. Obige 75% «Intervention erfolgreich» leiten sich aus der Annahme ab, dass ein Lachenbrand weniger schnell eskaliert als ein Ereignis infolge Propanfreisetzung, und dass die Interventionskräfte entsprechend mehr Zeit haben.

Andere GG-Wagen in der Nähe (Leitstoff-/Substanzabhängig)

Ein eskalierter Brand ist nur relevant, wenn weitere GG-Wagen vor Ort sind welche unterfeuert werden können. Die Wahrscheinlichkeit, dass dies der Fall ist, ist abhängig von der Streckenführung. Einfache Annahmen für die Implementierung werden getroffen gemäss folgender Tabelle.

Zustände GG-Wagen in Nähe	#1	#2	#3
Streckenführung	einspurig	mehrspurig	Spurwechsel
ja	0.25	0.25	0.25
nein	0.75	0.75	0.75

Eskalierter Brand (Leitstoff-/Substanzabhängig)

Ein eskalierter Brand ist nur möglich, wenn a) ein unterfeuernder Lachenbrand vorliegt und b) durch diesen weitere GG-Wagen betroffen sind.

Zustände eskalierter Brand	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Lachenbrand	ja				nein			
Andere GG-Wagen	ja		nein		ja		nein	

Zustände eskalierter Brand	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
Intervention erfolgreich	ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein
ja	0.05	0.5	0	0	0	0	0	0
nein	0.95	0.5	1	1	1	1	1	1

5.2.4 Zusammensetzung des Zugs (potenzielle GG-Menge)

Folgend werden die Default-Werte des Subnetzes «Zusammensetzung des Zugs (potenzielle GG-Menge)» (siehe Abbildung 4-7) aufgeführt respektive hergeleitet.

Anzahl GG-Wagen (Leitstoff-/Substanzabhängig)

Dier Anzahl an GG-Wagen im Zugverband hat einen Einfluss auf die potenziell freisetzbare Menge. Dieser Parameter kann lokal vom Netzmittelwert abweichen, dies insbesondere durch das häufige Verkehren von Blockzügen (Ganzzügen) auf bestimmten Abschnitten. Letztere transportieren in erster Linie Mineralölstoffe (LS Benzin, LS Mineralöl) und den Stoff Chlor (LS 7). Die durchschnittliche Anzahl GG-Wagen beträgt 26.6 Wagen. Ein Ganzzug/Sonderzug für den Stoff Chlor besteht aus 6-7 Wagen.

Basierend auf der Screening-Methodik [2], [5] sowie *Expert judgement* werden folgende Annahmen für die Kalibration des BN zugrunde gelegt:

Personenrisiken:	<ul style="list-style-type: none"> – LS Propan/LS Chlor: 1 Wagen pro Güterzug (5% 3 Wagen) – LS Benzin: teils 1 oder 3 Wagen, mehrheitlich Ganzzüge (Anteil 60%) – LS tox. Flüssigkeiten: 1 Wagen pro Güterzug (10% 3 Wagen) – Substanz Chlor: teils 1 (oder 3) Wagen, überwiegend Ganzzüge (Anteil 90%)
Umweltrisiken:	<ul style="list-style-type: none"> – LS Mineralöl: analog LS Benzin – LS Epichlorhydrin/ Perchlorethylen analog tox. Flüssigkeiten.

Annahmen Verteilung		1 Wagen	3 Wagen	Ganzzug
Personenrisiken	1 LS Benzin	0.1	0.2	0.7
	2 LS Propan	0.95	0.05	0
	3 LS tox. Flüssigkeit I	0.9	0.1	0
	4 LS tox. Flüssigkeit II	0.9	0.1	0
	5 LS tox. Gas I	0.95	0.05	0
	6 LS tox. Gas II	0.95	0.05	0
	7 Substanz Chlor	0.075	0.025	0.9
Umweltrisiken	8 LS Mineralölprodukte	0.1	0.2	0.7
	9 LS Epichlorhydrin	0.9	0.1	0
	10 LS Perchlorethylen	0.9	0.1	0

Für die Verwendung der berechneten Raten des BN ist die vorliegende Wagenverteilung pro LS jedoch nicht relevant. Im zukünftigen EDV-Tool wird die Verteilung der Wagen an einem untersuchten Punkt auf dem Schienennetz ermittelt, die entsprechenden Raten aller LS ausgelesen und gewichtet gemittelt.

Zustände potenziell freisetzbare Menge (m ³)	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
20-40	0	0.15	0	0.15	0	0.37	0	0.17	0	0.40	0	0.40
40-80	0.15	0	0.15	0	0.37	0	0.17	0.08	0.44	0.35	0.44	0.35
80-120	0	0	0	0	0	0	0.08	0	0.28	0.25	0.28	0.25
120-160	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0	0.11	0
160-240	0	0	0	0	0	0	0	0	0.17	0	0.17	0

Die Kombination von «1 GG-Wagen im Zug» und «mehrere Wagen in Reihung» ist nicht möglich. Eine Abfrage an das BN kann aber technisch gemacht werden, wobei das BN immer die Werte identisch zur Kombination «1 GG-Wagen im Zug» und «einzelne Wagen in Reihung» liefert. In gleicher Weise wird für die Kombination «Ganzzug» und «einzelne Wagen in Reihung» immer die Werte identisch zur Kombination «Ganzzug» und «mehrere Wagen in Reihung» geliefert.

Für den Stoff Chlor (LS 7) ergibt sich aufgrund der Wagenkonfigurationen folgende Tabelle:

Zustände potenziell freisetzbare Menge (m ³)	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
Anzahl GG-Wagen im Zug	1				3				Ganzzug			
Wagenreihung	einzelne		mehrere		einzelne		mehrere		einzelne		mehrere	
Gebindetyp	KW	TC	KW	TC	KW	TC	KW	TC	KW	TC	KW	TC
0	0.63	0.63	0.63	0.63	0.25	0.25	0.33	0.33	0	0	0	0
0-20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20-40	0	0.37	0	0.37	0	0.75	0	0	0	0.34	0	0.34
40-80	0.37	0	0.37	0	0.25	0	0	0.67	0.34	0.49	0.34	0.49
80-120	0	0	0	0	0.50	0	0.67	0	0.28	0.17	0.28	0.17
120-160	0	0	0	0	0	0	0	0	0.21	0	0.21	0
160-240	0	0	0	0	0	0	0	0	0.17	0	0.17	0

Für die LS betreffend wasserlöslichen Umweltstoffen (LS 9, LS 10) sind kleinere potenziellen Freisetzungsvolumen analog zu Kesselwagen bei LS Benzin zu verwenden:

Zustände potenziell freisetzbare Menge (m ³)	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
Anzahl GG-Wagen im Zug	1				3				Ganzzug			
Wagenreihung	einzelne		mehrere		einzelne		mehrere		einzelne		mehrere	
Gebindetyp	KW	TC	KW	TC	KW	TC	KW	TC	KW	TC	KW	TC
0	0.85	0.85	0.85	0.85	0.63	0.63	0.75	0.75	0	0	0	0
0-20	0	0.15	0	0.15	0	0.37	0	0.17	0	0	0	0
20-40	0.15	0	0.15	0	0.37	0	0.17	0.08	0	0.4	0	0.4
40-80	0	0	0	0	0	0	0.08	0	0.44	0.35	0.44	0.35
80-120	0	0	0	0	0	0	0	0	0.28	0.25	0.28	0.25
120-160	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11	0	0.11	0

Zustände potenziell freisetzbare Menge (m ³)	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12
160-240	0	0	0	0	0	0	0	0	0.17	0	0.17	0

5.2.5 Beschädigung und Freisetzungsrates nach eskaliertem Ereignis

Folgend werden die angenommenen Default-Werte des Subnetzes «Beschädigung und Freisetzungsrates nach eskaliertem Ereignis» (siehe Abbildung 4-8) aufgeführt respektive hergeleitet.

Eskalierter Entgleisung

Einfluss auf Überpufferung und Umfallen -> Eine eskalierte Entgleisung ist Voraussetzung, dass es zu einem Umfallen oder einer Überpufferung kommen kann.

Resultat des Subnetzes «Eskalierter Entgleisung» (4.2.1 / 0)

Eskalierter Zusammenstoss

Einfluss auf Überpufferung und Umfallen -> Ein eskalierter Zusammenstoss ist Voraussetzung, dass es zu einem Umfallen oder einer Überpufferung kommen kann.

Resultat des Subnetzes «Eskalierter Zusammenstoss» (0 / 5.2.2)

Eskalierter Brand

Einfluss auf Freisetzungsrates -> Der eskalierte Brand ist die Grundlage für ein Behälterversagen und eine weitere Freisetzung bei neu betroffenen Wagen.

Resultat des Subnetzes «Eskalierter Brand» (4.2.3 / 5.2.3)

Potenziell freisetzbare Menge

Definiert die maximal freisetzbare Menge.

Resultat des Subnetzes «Zusammensetzung des Zugs» (4.2.4 / 5.2.4)

Hindernis im Weg

Je grösser die Dichte der potenziell tankbeschädigenden Hindernisse am Gleis ist, desto wahrscheinlicher kommt es in Folge einer eskalieren Entgleisung zu einer Beschädigung (Armaturen, Tankwand oder Tankboden).

Mangels aktuell verfügbarer Grundlagen wird dieser Punkt als Dummy-Knoten umgesetzt.

Zustände Hindernisse	p [-]
dummy 1	1
dummy 2	0

Bersten

Wird ein Wagen unterfeuert, kann es zu einem Bersten des Kessels kommen. Folgend wird angenommen, dass hierzu eine Unterfeuerung eines Kessels notwendig ist, beispielsweise durch die Freisetzung eines benachbarten Benzinkesselwagens mit Zündung der Lache. Entsprechend ist der Fall nur möglich, wenn ein «Eskalierter Brand» vorliegt. Es wird angenommen, dass es bei einem eskalieren Brand in 50% der Fälle zu einem Bersten kommt.

Zustände Bersten	#1	#2
Eskalierter Brand	ja	nein
ja	0.5	0
nein	0.5	1

Umfallen (eines/mehrerer Wagen)

Fällt ein Wagen um, erhöht dies die Wahrscheinlichkeit, dass es im Ereignisfall zu einer Beschädigung (Armaturen, Tankwand oder Tankboden) kommt.

Ein Umfallen eines Kesselwagens ist nach einer eskalierten Entgleisung wahrscheinlicher als nach einem Zusammenstoss. Entsprechend werden folgende Annahmen für Wahrscheinlichkeiten, dass ein oder mehrere Wagen umfallen, zugrunde gelegt.

- nach Entgleisung: in 20% der Fälle
- nach Zusammenstoss: in 5% der Fälle

Diese Werte gelten bei allen Geschwindigkeiten (die Geschwindigkeitsabhängigkeit wird im Folgeknoten «Beschädigung» berücksichtigt). Zudem werden die Ereignisse «Eskalierter Zusammenstoss» und «Eskalierte Entgleisung» separat betrachtet, es finden nie beide Ereignisse zusammen statt. Dies äussert sich in der Wahrscheinlichkeitsübergangstabelle dadurch, dass nur Spaltenwerte > 0 enthalten, welche «keine» Eskalation bei der Entgleisung oder beim Zusammenstoss haben.

Folgend zu Illustrationszwecken ein Auszug aus dem entsprechenden Excel-Blatt.

Zustände Umfallen	[...]	#25	#26	#27	#28	#29	#30	#31	#32	#33	#34	#35	#36
Eskalierter Zusammenstoss		>100 km/h						keine					
Eskalierter Entgleisung		0-40	40-60	60-80	80-100	100-120	keine	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120	keine
0-40		0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0
40-60		0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0
60-80		0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0
80-100		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0
>100		0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0.05	0
Keine Eskalation		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.80	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	1.0

Überpufferung (eines/mehrerer Wagen)

Kommt es zur Überpufferung von einem/mehreren Wagen, erhöht dies die Wahrscheinlichkeit, dass es im Ereignisfall zu einer Beschädigung kommt (dies gilt insbesondere für den Tankboden).

Überpufferungen treten insbesondere bei Zusammenstössen auf [13]. Entsprechend werden folgende Annahmen für Wahrscheinlichkeiten, dass ein/mehrere Wagen überpuffert, zugrunde gelegt:

- nach Entgleisung: in 5% der Fälle
- nach Zusammenstoss: in 20% der Fälle

Diese Werte gelten bei allen Geschwindigkeiten (die Geschwindigkeitsabhängigkeit wird im Folgeknoten «Beschädigung» berücksichtigt). Zudem werden die Ereignisse «Eskalierter Zusammenstoss» und «Eskalierte Entgleisung» separat betrachtet, es finden nie beide Ereignisse zusammen statt.

Folgend zu Illustrationszwecken ein Auszug aus dem entsprechenden Excel-Blatt.

Zustände Überpufferung	[...]	#25	#26	#27	#28	#29	#30	#31	#32	#33	#34	#35	#36
Eskalierter Zusammenstoss		>100						keine					
Eskalierter Entgleisung		0-40	40-60	60-80	80-100	100-120	keine	0-40	40-60	60-80	80-100	100-120	keine
0-40		0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0
40-60		0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0
60-80		0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0
80-100		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0
>100		0	0	0	0	0	0.05	0	0	0	0	0.2	0
keine		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.95	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	1.0

Beschädigung

Voraussetzung für eine mögliche Beschädigung von Armaturen, Tankwand oder Tankboden ist «Bersten», «Umfallen» oder «Überpufferung». Ebenfalls eine Rolle spielt das Vorhandensein von «Hindernissen», diese sind momentan jedoch noch als DUMMY implementiert. Folgende Annahmen liegen zugrunde:

- Bersten: Führt zu Beschädigung von Tankboden & Tankwand (Anteil je hälftig), Freisetzung instantan & katastrophal)
- Überpufferung: Führt zur Beschädigung des Tankbodens, geschwindigkeitsabhängig
- Umfallen: Führt zu Beschädigung von Tankwand & Armaturen (Anteil je hälftig), geschwindigkeitsabhängig

Für die Berechnung der geschwindigkeitsabhängigen Beschädigungswahrscheinlichkeiten infolge der Ereignisse «Überpufferung» und «Umfallen» werden folgende Grundverteilungen zugrunde gelegt. Diese Werte gelten für 120 km/h und werden für die anderen Geschwindigkeiten mit dem entsprechenden Korrekturfaktor skaliert (siehe unten).

	Armaturen	Tankwand	Tankboden
kontinuierlich: klein	0.40	0.40	0.40
kontinuierlich: gross	0.10	0.10	0.10
instantan: katastrophal	0.04	0.40	0.40

Diese «Ausgangswahrscheinlichkeiten» werden mit folgenden Faktoren multipliziert:

- Korrekturfaktor «Geschwindigkeit» (5.1.1)
- Wahrscheinlichkeit instantane resp. kontinuierliche Freisetzung (5.1.3)
- Korrekturfaktor 10 (dickwandige Kesselwagen; 0)
- Korrekturfaktor 5 (Kesselwagen gemäss GEI; 5.1.5)
- Korrekturfaktor GEII (sicherheitstechnisch beste Chlorkesselwagen gemäss GEII; 0)

Die Ereignisse «Bersten», «Umfallen» und «Überpufferung» werden separat betrachtet, es finden nie mehrere Ereignisse gleichzeitig statt. Folgend zu Illustrationszwecken einige ausgewählte Spalten aus dem entsprechenden Excel-Blatt.

Zustände Beschädigung	#31	#36	#37	#42	#67	#72
Hindernisse	dummy 1					
Bersten	ja		nein			
Ueberpufferung	kein		0-40		kein	
Umfallen	0-40	keine	0-40	keine	0-40	keine
Armaturen - instantan: katastrophal	0	0	0	0	0.000	0
Armaturen - kontinuierlich: klein	0	0	0	0	0.111	0
Armaturen - kontinuierlich: gross	0	0	0	0	0.001	0
Tankwand - instantan: katastrophal	0	0.5	0	0	0.006	0
Tankwand - kontinuierlich: klein	0	0	0	0	0.111	0
Tankwand - kontinuierlich: gross	0	0	0	0	0.054	0
Tankboden - instantan: katastrophal	0	0.5	0	0.01	0	0
Tankboden - kontinuierlich: klein	0	0	0	0.22	0	0
Tankboden - kontinuierlich: gross	0	0	0	0.11	0	0
nein	1	0	1	0.63	0.69	1

Freisetzungsrate (Leckrate)

Die Freisetzungsrate ergibt sich aus der Art der Beschädigung – ist eine Freisetzung infolge Beschädigung «instantan: katastrophal» (unabhängig ob von Armaturen, Tankboden, Tankwand), ist die Freisetzungsrate «instantan: katastrophal». Nachfolgend ist die entsprechende logische Zuordnungstabelle aufgeführt. Folgend zu Illustrationszwecken ein Auszug aus dem entsprechenden Excel-Blatt.

Zustände Freisetzungsrate	#1	#2	#3	#4	#5	#6	[...]	#10
Beschädigung	Armaturen -			Tankwand -				nein
	inst.: katastrophal	kont.: klein	kont.: gross	inst.: katastrophal	kont.: klein	kont.: gross		
instantan: katastrophal	1	0	0	1	0	0		0
kontinuierlich: klein	0	1	0	0	1	0		0
kontinuierlich: gross	0	0	1	0	0	1		0
keine Freisetzung	0	0	0	0	0	0		1

Eine quantitative Leckrate wurde nicht definiert im BN, jedoch werden die Zustände verwendet für die Unterscheidung der freigesetzten Menge und der möglichen Störfallszenarien (Kapitel 5.2.6). Im Rahmen der Kalibrierung sind die quantitativen Leckraten mit den Störfallszenarien und den entsprechend freigesetzten Mengen abzustimmen.

Freigesetzte Menge

Die tatsächlich freigesetzte Menge ergibt sich aus der Art der potenziell freisetzbaren Menge und der Freisetzungsrate.

- katastrophale Beschädigung: die gesamte potenzielle Menge wird freigesetzt
- kleine Beschädigung: max. die Hälfte der potenziellen Menge wird freigesetzt, zudem die Wahrscheinlichkeit für kleinere Freisetzungsmengen erhöht.

Damit können unterschiedliche Freisetzungsszenarien betreffend Freisetzungsrate und potenziell freisetzbare Menge wie im bisherigen Screening [2], [5] abgebildet werden. Die verwendeten

prozentualen Aufteilungen der freigesetzten Mengen basieren auf ersten groben Abschätzungen und sind in der aktuellen Version identisch für alle LS. Im Rahmen der Kalibrierung des BN sind die freigesetzten Mengen pro LS und Störfallszenario zu definieren. Folgend zu Illustrationszwecken ein Auszug aus dem entsprechenden Excel-Blatt.

Zustände freigesetzte Menge [m ³]	#8	#9	#10	#11	#12	#15	#16	#17	#18	#19	[...]
Freisetzungsrate	kontinuierlich: klein					kontinuierlich: gross					
Potenziell freisetzbare Menge	0	0-20	20-40	40-80	80-120	0	0-20	20-40	40-80	80-120	
0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
0-10	0	1	0.6	0.45	0.4	0	0.5	0	0	0	
10-20	0	0	0.4	0.35	0.3	0	0.5	0	0	0	
20-40	0	0	0	0.2	0.2	0	0	1	0	0	
40-60	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0.5	0	
60-80	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	
80-120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
120-160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
160-240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Freisetzungsklasse

Die Freisetzungsklasse kombiniert die Freisetzungsrate mit der freigesetzten Menge. Folgend zu Illustrationszwecken ein Auszug aus dem entsprechenden Excel-Blatt.

Zustände Freisetzungsklasse	#10	#11	#12	#13	#14	[...]	#19	#20	#21	#22	#23	[...]
Freisetzungsrate	kontinuierlich: klein						kontinuierlich: gross					
Freigesetzte Menge	0	0-10	10-20	20-40	40-60		0	0-10	10-20	20-40	40-60	
instantan - 0-10	0	1	0	0	0		0	0	0	0	0	
instantan - 10-20	0	0	1	0	0		0	0	0	0	0	
instantan - 20-40	0	0	0	1	0		0	0	0	0	0	
instantan - 40-60	0	0	0	0	1		0	0	0	0	0	
instantan - 60-80	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
instantan - 80-120	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
instantan - 120-160	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
instantan - 160-240	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
kontinuierlich - 0-10	0	0	0	0	0		0	1	0	0	0	
kontinuierlich - 10-20	0	0	0	0	0		0	0	1	0	0	
kontinuierlich - 20-40	0	0	0	0	0		0	0	0	1	0	
kontinuierlich - 40-60	0	0	0	0	0		0	0	0	0	1	
kontinuierlich - 60-80	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
kontinuierlich - 80-120	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
kontinuierlich - 120-160	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	

Zustände Freisetzungsklasse	#10	#11	#12	#13	#14	[...]	#19	#20	#21	#22	#23	[...]
kontinuierlich - 160-240	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	
keine Freisetzung	1	0	0	0	0		1	0	0	0	0	

5.2.6 Häufigkeit der Störfallszenarien

Folgend werden die Default-Werte des Subnetzes «Häufigkeit der Störfallszenarien» (siehe *Abbildung 4-10*) aufgeführt respektive hergeleitet.

Freisetzungsklasse

Kombination der Freisetzungsrates und der freigesetzten Menge.

Resultat des Subnetzes «Beschädigung und Freisetzungsrates nach eskaliertem Ereignis» (4.2.5 / 5.2.5)

Humantoxische Wirkung (**Leitstoffabhängig**)

Die toxische Wirkung ist leitstoffabhängig – nicht alle LS/Substanzen sind für Menschen giftig (nicht toxisch sind LS 1/2/8/9/10).

Leitstoffe	Zustand	Wert [-]
1/2/8/9/10 (nicht toxisch)	– ja	– 0
	– nein	– 1
3/4 (tox. Flüssigkeiten)	«Freisetzungsklasse = instantan»	
	– ja	– 1
	– nein	– 0
	«Freisetzungsklasse = kontinuierlich»	
	– ja	– 1
	– nein	– 0
5/6/7 (tox. Gase)	«Freisetzungsklasse = instantan»	
	– ja	– 1
	– nein	– 0
	«Freisetzungsklasse = kontinuierlich»	
	– ja	– 1
	– nein	– 0

VCE (**Leitstoffabhängig**)

Die grundsätzliche Möglichkeit, dass sich eine VCE ereignet, ist leitstoffabhängig – nicht alle LS/Substanzen sind entflammbar (nicht brennbar sind LS 3/4/5/6/7/8/9/10).

Die Eintretenswahrscheinlichkeit einer VCE ist abhängig von der Zündungswahrscheinlichkeit, welche sich je nach Freisetzungsrates (instantan/kontinuierlich) unterscheidet. Für LS 1/Benzin und 2/Propan sind entsprechende Werte im Methodikbericht Screening Personenrisiken 2014 [2] gegeben (siehe 5.1.7).

Bei LS 2/Propan geht die freigesetzte Substanz mehr oder weniger instantan in die Gasphase über, durch die sich sofort bildende Gaswolke ist eine VCE sowohl sofort als auch mit Verzögerung möglich.

Bei LS 1/Benzin muss das flüssige Gefahrgut jedoch erst via Verdampfung in die Gasphase übergehen, was mit einer gewissen Zeitverzögerung geschieht. Bei einer sofortigen Zündung resultiert dies entsprechend nicht in einer VCE, sondern einem Lachenbrand. Eine VCE ist nur möglich, wenn die Zündung verzögert auftritt.

Es resultieren folgende Werte für die verschiedenen LS und unter den vorgegebenen Zündungswahrscheinlichkeiten [10]:

Leitstoffe	Zustand	Wert [-]
1 (LS Benzin)	«Freisetzungsklasse = instantan»	
	– sofortige Zündung	– 0
	– verzögerte Zündung	– 0.098
	– keine Zündung	– 0.902
	«Freisetzungsklasse = kontinuierlich»	
	– sofortige Zündung	– 0
	– verzögerte Zündung	– 0.102
	– keine Zündung	– 0.898
2 (LS Propan)	«Freisetzungsklasse = instantan»	
	– sofortige Zündung	– 0.9
	– verzögerte Zündung	– 0.08
	– keine Zündung	– 0.02
	«Freisetzungsklasse = kontinuierlich»	
	– sofortige Zündung	– 0.7
	– verzögerte Zündung	– 0.12
	– keine Zündung	– 0.18
3/4/5/6/7/8/9/10	– sofortige Zündung	– 0
	– verzögerte Zündung	– 0
	– keine Zündung	– 1

Lachenbrand (Leitstoffabhängig)

Die grundsätzliche Möglichkeit, dass sich ein Lachenbrand ereignet, ist leitstoffabhängig – nicht alle LS/Substanzen sind entflammbar (nicht brennbar sind LS 3/4/5/6/7/8/9/10).

Die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Lachenbrandes ist abhängig von der Zündungswahrscheinlichkeit, welche sich je nach Freisetzungsklasse (instantan/kontinuierlich) unterscheidet. Für LS 1/Benzin und 2/Propan sind entsprechende Werte im Methodikbericht Screening Personenrisiken 2014 [2] gegeben (siehe 5.1.7).

Bei LS 1/Benzin ist die Zündung eines Lachenbrandes sowohl sofort als auch mit Verzögerung möglich, die aufgeführten Zündungswahrscheinlichkeiten gelten.

Im Falle des LS 2/Propan geht die freigesetzte Substanz mehr oder weniger instantan in die Gasphase über. Im Falle einer verzögerten Zündung ist entsprechend die Substanz bereits komplett in die Gasphase übergegangen - das Resultat ist kein Lachenbrand, sondern eine VCE respektive Verpuffung (je nach Vorhandensein Verdämmung). Auch bei einer sofortigen Zündung ist die Substanz bereits mindestens teilweise in der Gasphase, hier ist ebenfalls anstatt eines Lachenbrandes eine Verpuffung oder Deflagration zu erwarten.

Es resultieren folgende Werte für die verschiedenen LS und unter den vorgegebenen Zündungswahrscheinlichkeiten [10]:

Leitstoffe	Zustand	Wert [-]
1 (LS Benzin)	«Freisetzungsklasse = instantan»	
	– sofortige Zündung	– 0.602
	– verzögerte Zündung	– 0.098
	– keine Zündung	– 0.3
	«Freisetzungsklasse = kontinuierlich»	
	– sofortige Zündung	– 0.498

Leitstoffe	Zustand	Wert [-]
	– verzögerte Zündung	– 0.102
	– keine Zündung	– 0.4
2 (LS Propan)	– sofortige Zündung	– 0
	– verzögerte Zündung	– 0
	– keine Zündung	– 1
3/4/5/6/7/8/9/10	– sofortige Zündung	– 0
	– verzögerte Zündung	– 0
	– keine Zündung	– 1

Jet fire (Leitstoffabhängig)

Mögliche Ursachen von Jet fires (Stichflamme) im Kontext Bahn sind der Boilover eines unter atmosphärischem Druck stehenden Flüssigkeitsbehälters oder ein kritischer Druckanstieg in einem Tank bei keinem/zu geringem Druckausgleich. So kann es zum Beispiel als Folge von Unterfeuerung zu Überdruck im Tank kommen, wodurch der Domdeckel des Waggons weggeschleudert wird und sich das entweichende Gasgemisch in eine bevorzugte Richtung entzündet. Beim Grossbrand von Affoltern (1994) entstand beispielsweise während mehrerer Minuten eine Stichflamme von grosser Höhe¹⁰.

Die grundsätzliche Möglichkeit, dass sich ein Jet fire (Stichflamme) ereignet, ist entsprechend leitstoffabhängig – nicht alle LS/Substanzen sind entflammbar (nicht brennbar sind LS 3/4/5/6/7/8/9/10).

Jet fire können nur bei kontinuierlichen Freisetzungen auftreten. Die Eintretenswahrscheinlichkeit einer Stichflamme ist abhängig von der Zündungswahrscheinlichkeit, für LS 1/Benzin und 2/Propan sind entsprechende Werte im Methodikbericht Screening Personenrisiken 2014 [2] gegeben (siehe 5.1.7).

Eine quantitative Aussage zu den Wahrscheinlichkeiten ist aufgrund der vorliegenden Grundlagen nicht möglich. Bei Flüssigkeiten ist dies u.a. deshalb der Fall, da für ein entsprechendes Austreten der Substanz ein gewisser Druck im Kessel vorhanden sein muss. Bzgl. Flüssigkeiten entspricht das Ereignis jedoch in etwa einer kontinuierlichen Freisetzung in Folge des Szenarios «Eskalierter Brand» (4.2.3 / 5.2.3).

Entsprechend dieser Punkte sind folgende Aussagen möglich

- Jet fire ist ein relevantes Szenario im Rahmen des Transports von (druckverflüssigten) Gas. Bei Flüssigkeiten ist dies nicht der Fall, Grund ist die Auslegung der Kessel auf tiefere Drücke.
- Relevant sind sowohl brennbare als auch nicht brennbare Substanzen.
- Eine Quantifizierung der Wahrscheinlichkeiten ist nicht möglich. Das Ereignis entspricht jedoch in etwa einer kontinuierlichen Freisetzung in Folge des Szenarios «Eskalierter Brand» (4.2.3 / 5.2.3).

Es resultieren folgende Werte für die verschiedenen LS:

Leitstoffe	Zustand	Wert [-]
1 (LS Benzin)	«Freisetzungsklasse = instantan»	
	– ja	– 0
	– nein	– 1
	«Freisetzungsklasse = kontinuierlich»	
	– ja	– 0.6

¹⁰ https://de.wikipedia.org/wiki/Eisenbahnunfall_von_Z%C3%BCrich-Affoltern
<https://www.youtube.com/watch?v=IEzL7SOXDXy>

Leitstoffe	Zustand	Wert [-]
	- nein	- 0.4
2 (LS Propan)	«Freisetzungsklasse = instantan»	
	- ja	- 0
	- nein	- 1
	«Freisetzungsklasse = kontinuierlich»	
	- ja	- 0.82
	- nein	- 0.18
3/4/5/6/7/8/9/10	- ja	- 0
	- nein	- 1

BLEVE (Leitstoffabhängig)

Eine BLEVE («boiling liquid expanding vapor explosion») ist eine instantane Freisetzung durch eine physikalische Explosion. Praktisch alle Flüssigkeiten, die bestimmte Lagerbedingungen erreichen, können einem BLEVE-Ereignis zugrunde liegen (nicht nur brennbare Stoffe). Die Auswirkungen lassen sich folgend gruppieren [15] :

- Stosswellenüberdruck
- Trümmerwurf
- Feuerball und Wärmestrahlung (vorausgesetzt, es handelt sich eine brennbare Substanz)

Im Bericht FAW LS Benzin [10] wurde festgehalten, dass BLEVEs im Kontext von transportierten Flüssigkeiten zu vernachlässigen sind - da die für Flüssigkeiten ausgelegten Tanks im Vergleich zu den Tanks für (druckverflüssigte) Gase nur verhältnismässig geringe Drücke verkraften, platzen diese auf und laufen aus, bevor sich ein entsprechender Überdruck aufgebaut hat. In diesem Fall kommt es entsprechend zur Ausbildung einer Lache und, bei einer möglichen Zündung, einem Lachenbrand. Analog zu diesen Resultaten werden BLEVEs in den aktuellen Richtlinien für den Gefahrguttransport in den Niederlanden [16] ausschliesslich in den Szenarienbäumen für brennbare Gase berücksichtigt, nicht jedoch für brennbare Flüssigkeiten.

Tabelle 5-23 zeigt die Ursachen von BLEVEs basierend auf Ereignisdaten.

Tabelle 5-23: Ursachen von BLEVEs basierend auf Ereignisdaten Quelle: Prugh, 1991, übernommen aus [15]

Cause	Number of incidents	Percentage (%)
Exposure to fire	17	34.7
Mechanical damage	11	22.4
Overfilling	10	20.4
Runaway reaction	6	12.2
Overheating	3	6.1
Vapor-space explosion	1	2.1
Mechanical failure	1	2.1
Total	49	100.0

Ursache ist oftmals die Exposition des Behältnisses zu offenem Feuer (siehe auch [14]). In diesem Fall kommt es während der BLEVE von brennbaren Substanzen durch die bereits vor Ort vorhandene Zündungsquelle neben Druckwelle und Trümmerwurf oft zu einem Feuerball und der instantanen Abbrennung des freigesetzten Materials.

Eine quantitative Aussage zu den Wahrscheinlichkeiten ist aufgrund der vorliegenden Grundlagen nicht möglich. Die Ursache «Unterfeuerung» entspricht jedoch in etwa dem Szenario «Eskalierter Brand» (4.2.3 / 5.2.3)

Entsprechend dieser Punkte sind folgende Aussagen möglich

- BLEVE ist ein relevantes Szenario im Rahmen des Transports von (druckverflüssigten) Gasen (Propan, Chlor). Bei Flüssigkeiten ist dies nicht der Fall, Grund ist die Auslegung der Kessel auf tiefere Drücke.
- Relevant sind sowohl brennbare als auch nicht brennbare Substanzen.
- Die häufigste Ursache «Unterfeuerung» entspricht in etwa dem Szenario «Eskalierter Brand» (4.2.3 / 5.2.3)

Leitstoffe	Zustand	Wert [-]
1/3/4/8/9/10 (Flüssigkeiten)	- ja	- 0
	- nein	- 1
2/5/6/7 (druckverflüssigte Gase)	«Freisetzungsklasse = instantan»	
	- ja	- 1
	- nein	- 0
	«Freisetzungsklasse = kontinuierlich»	
	- ja	- 0
	- nein	- 1

6 Kalibrierung des BN

Für diverse Knoten ist die schweizweite Verteilung der Zustände bekannt aus dem aktuellen Screening 2018 [6]. Für andere Knoten sind keine CH-Werte vorhanden bzw. bekannt, weshalb im Rahmen der Erarbeitung des BN erste Annahmen getroffen wurden (Kapitel 5.1). Dabei handelt es sich um einen iterativen Prozess. Damit die Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeiten der Gefahrgutfreisetzungen mittels dem Bayes'schen Netz belastbare Resultate liefert, müssen die entsprechenden Parameter im Tool kalibriert werden. Die definitive Kalibrierung und Festlegung der Parameter für die Auswertung der einzelnen Berechnungspunkte des BN kann jedoch nur unter Berücksichtigung der topologischen und betrieblichen Daten des betrachteten Schienennetzes aus dem Screeningtool erfolgen.

Folgendes Kapitel vergleicht die resultierenden Freisetzungsraten des BN mit den Raten aus dem Screening 2018 [6]. Im Anschluss wird aufgelistet, welche Parameter bei einer detaillierten Kalibrierung auf das CH-Netz respektive bei Vorhandensein neuer/robuster Daten angepasst werden sollten.

6.1 Vergleich mit Screening 2018

Zwecks einer ersten groben Evaluation wurden die Resultate des BN mit dem Screening 2018 verglichen unter folgenden Gesichtspunkten:

- Die Annahmen zu den Zuständen der einzelnen Knoten (Verteilungen und Werte) sind in Kapitel 5.1 angegeben.
- Beim Output wird jeweils die Evidenz der zu berechnenden Konfiguration gesetzt und das BN ausgewertet.
- In einem ersten Schritt werden zwecks Vergleich der Freisetzungsraten die Faktoren der bestehenden Screening-Methodik [6] verwendet. In einem zweiten Schritt und für die Berechnung der Matrix aller möglichen Kombinationen werden aktuellere Faktoren (GEII Projekt [13], Kapitel 5.1.2-5.1.6) verwendet.
- Evaluert werden können jene LS, welche in der Screening-Methodik ebenfalls berücksichtigt werden können: LS Benzin, LS Propan, LS Chlor.

Freisetzungsraten in Abhängigkeit der Weichendichte in der ESZ

Im Screening 2018 [6] werden sind die Freisetzungsraten pro Zug und 100 m und Jahr bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h wie folgt festgelegt:

Weichendichte	LS Benzin		LS Propan/ Chlor	
	Screening 2018	Screening 2018	Screening 2018	Screening 2018
0		2.9E-11		2.9E-12
1	10.00	2.9E-10	10.00	2.9E-11
>1	19.66	5.7E-10	19.66	5.7E-11

Dabei wurden die Freisetzungsraten der Weichendichten gemäss Definition dieser Methodik (Kapitel 4.2.1) zugeordnet. Die Freisetzungsraten unterscheiden sich um einen Faktor 10 zwischen LS Benzin und LS Propan/LS Chlor, sowie um einen Faktor 10 bzw. 20 bei «1 Weiche» bzw. «>1 Weiche» gegenüber «0 Weichen».

Unter den Annahmen bei der Kalibration mit denselben Faktoren wie im Screening 2018 ergeben sich für die Freisetzungsraten ähnliche, leicht abweichenden Werte:

Weichendichte	LS Benzin		LS Propan		Stoff Chlor	
	total (1/J/Zug-100m)		total (1/J/Zug-100m)		total (1/J/Zug-100m)	
0	3.5E-11		7.6E-13		4.5E-12	
1	2.6E-10	7.3	5.6E-12	7.3	3.3E-11	7.3
>1	6.9E-10	19.6	1.5E-11	19.6	8.8E-11	19.6

Das Verhältnis der Freisetzungsrates von «1 Weiche» gegenüber «0 Weichen» ist mit 7.3 leicht kleiner als beim Screening 2018. Beim LS Propan sind die absoluten Raten rund ein Faktor 5 tiefer als beim Screening. Dies resultiert aus der Tatsache, dass bei der Kalibration angenommen wurde, dass 95% der Gefahrgutmengen in einzelne Wagen transportiert wird, welche eine kleinere Freisetzungswahrscheinlichkeit als bei einem Ganzzug haben (Kapitel 5.2.4).

Hier ist anzumerken, dass die Raten pro Zug und 100 m und Jahr definiert sind, unabhängig von der Gesamtmenge des transportierten Gefahrguts auf der Strecke. Werden die im BN berechneten Raten dann im zukünftigen EDV-Tool verwendet, werden durch die Gewichtung der transportierten Menge pro Zug die Freisetzungsraten gesenkt. Beispielsweise sinkt dann die Freisetzungsrates pro Wagen in einem Chlor-Ganzzug mit 6 Wagen um eben einen Faktor 6. Daher braucht es 6 Mal mehr Züge, wenn jeweils nur ein Wagen den Stoff Chlor transportiert.

Wenn man nun die aktuellen Faktoren aus dem GEII Projekt [13] berücksichtigt, verändern sich die Raten wie folgt:

Weichendichte	LS Benzin		LS Propan		Stoff Chlor	
	total (1/J/Zug-100m)		total (1/J/Zug-100m)		total (1/J/Zug-100m)	
0	3.5E-11		1.9E-12		1.0E-12	
1	2.6E-10	7.3	1.4E-11	7.3	9.3E-12	8.9
>1	6.9E-10	19.6	3.7E-11	19.6	2.5E-11	24.5

Folgende Faktoren wurden dabei angepasst:

- Druckkesselwagen Faktor 4 statt 10 (Kapitel 0)
- Chlor-Druckkesselwagen Faktor 4.1 statt 1 (Kapitel 5.1.5)
- Korrektur beste Chlor-KW Sicherheitstechnik Faktor 2.0 statt 1 (Kapitel 5.1.6)
- Entgleisungsdetektor bei Chlor-KW ist in 99.9% statt 0.1% wirksam (ca. Faktor 1.2)

Nicht berücksichtigt sind die Reduktion der Geschwindigkeit auf maximal 40 km/h (Faktor 10) in diesem Vergleich. Beim Stoff Chlor wird deutlich, dass sich aufgrund der Wirkung des Entgleisungsdetektors die Verhältnisse zwischen den Freisetzungsraten verändern.

Insgesamt zeigt diese erste Abschätzung der schweizweiten Freisetzungsraten vernünftige und mit dem Screening 2018 vergleichbare Werte. Das BN ermöglicht zudem verschiedenste Situationen auf unterschiedlichen Streckenabschnitten und Abhängigkeiten zwischen den Zuständen zu vergleichen.

6.2 Kalibrierung auf das CH-Streckennetz

Das langfristige Ziel ist die Methodik und die Resultate aus dem BN für das Risikoscreening auf dem CH-Streckennetz einzusetzen. Dazu werden alle möglichen Zustände im BN berechnet und die resultierenden Ereignissenarien mit zugehörigen Wahrscheinlichkeiten in einer Datenbank abgelegt. Im Risikoscreening können diese Resultate für einen einzelnen Berechnungspunkt auf dem Schienennetz abgerufen und verwendet werden. Dabei handelt es sich – wie bereits erwähnt – um einen iterativen Prozess, bei dem die definitive Kalibrierung und Festlegung der Parameter für die Auswertung der einzelnen Berechnungspunkte unter Berücksichtigung der topologischen und betrieblichen Daten des betrachteten Schienennetzes erfolgen muss.

Die Kalibrierung des BN ist in folgender Reihenfolge vorzunehmen:

- 1.) Kalibrierung der Rate der Entgleisungen im BN (eskalierte Entgleisung) auf die zeitlich gemittelte Rate der Entgleisungen auf dem schweizerischen Schienennetz (Kapitel 5.1.1)
- 2.) Kalibrierung der Rate der Zusammenstösse im BN auf die zeitlich gemittelte Rate der Zusammenstösse auf dem schweizerischen Schienennetz (Kapitel 5.1.1)
- 3.) Kalibrierung der Freisetzungsraten im BN auf die zeitlich gemittelte Freisetzungsraten auf dem schweizerischen Schienennetz gemäss bestehendem Screening 2018 [8] oder aktuellen Ereignisstatistiken pro Leitstoff und Wagentyp (KW/TC)
- 4.) Kalibrierung der Freisetzungsraten im BN pro Störfallszenario auf noch zu definierende Leckraten und Freisetzungsmengen pro LS.

Die Reihenfolge ist einzuhalten. Bei weiteren Kalibrierungen oder Anpassungen gilt die generelle Regel: Kalibrierung des BN von Startknoten zu Zielknoten, daher von oben nach unten im BN. Die Raten können jeweils mit Faktoren linear skaliert werden. In Tabelle 6-1 sind die notwendigerweise (orange) und fakultativ nach *Expert Judgement* (gelb) zu kalibrierenden Faktoren und die zugehörigen Eingabewerte und Zwischenergebnisse (grau) für die einzelnen Subnetze aufgelistet. Die Werte sind jeweils auch in den Eingabedateien des BN markiert (orange und gelb in Excel-Input-Dateien, [7]).

Tabelle 6-1: Faktoren für die Kalibrierung des BN auf das CH-Streckennetz

SN	Parameter	File / Blatt ¹¹	Kommentar
Eskalierte Entgleisung	Ausgangsrate für eskalierte Entgleisung: Normierungsfaktor	EE_LS_1 / Eskalierte Entgleisung	Ausgangsra-ten/Defaultwerte: siehe Kapitel 5.1.1 und 0
	Weichenabstand VZ	EE_LS_1	
	Weichendichte VZ/ESZ	EE_LS_1	
	Geschwindigkeit VZ / ESZ	EE_LS_1	
	EDT	EE_LS_1	
Eskalierter Zusammenstoss	Ausgangsrate für Zusammenstoss: – Normierungsfaktor	ZE_LS_1 / V_relativ	Ausgangsra-ten/Defaultwerte: siehe Kapitel 5.1.1 und 5.2.2
	– 3 Faktoren für Weichendichten – Eskalationswahrscheinlichkeit		
	Kollisionsanordnung	ZE_LS_1	
	Streckenführung	ZE_LS_1	
	Schutzfunktion	ZE_LS_1	
	Wirkungsgrad Schutzfunktion	ZE_LS_1 / Eskalierter Zusammenstoss	
Eskalierter Brand	Andere GG-Wagen vor Ort	EB_LS_1	Defaultwerte: siehe Kapitel 5.2.3
	Intervention erfolgreich	EB_LS_1	
Zusammensetzung Zug	Anzahl GG-Wagen im Zug	ZZ_LS_1	Defaultwerte: siehe Kapitel 5.2.4
	Wagenreihung	ZZ_LS_1	
	Menge GG potenziell: Reduktionsfaktor	ZZ_LS_1-10 / leitstoffabhängig	

¹¹ Meist existiert für die Parameter in gleichnamiges Blatt. Wenn nicht, wird das entsprechende angegeben.

SN	Parameter	File / Blatt ¹¹	Kommentar
Freisetzung nach eskalier-tem Ereignis	Überpufferung	FS_LS_1	Defaultwerte: siehe Kapitel 5.2.5
	Umfallen	FS_LS_1	
	Bersten	FS_LS_1	
	Beschädigung: – Grundverteilungen Schwere der Beschädigung – Korrekturfaktor Screening 2018	FS_LS_1	
	Beschädigung: – Korrekturfaktoren (5/10/GEII)	FS_LS_1-10 / leit- stoffabhängig	Siehe Kapitel 5.1.2-0
Störfall-szenarien	Toxische Wirkung	FS_LS_1-10 / leit- stoffabhängig	Siehe Kapitel 5.1.7
	Lachenbrand		
	VCE		
	BLEVE		
	Jetfire		

7 Anwendung und Umsetzung im Screening

Folgend wird auf die Anwendung des BN im Rahmen einer Screening- oder RE-Methodik eingegangen. Die Erklärungen sind knappgehalten. Eine ausführliche Beschreibung der Umsetzung des BN in «R» sowie die Anwendung sind im Manual [7] beschrieben.

Ordnerstruktur und Output (Resultate)

Das Tool besteht aus einem R-Hauptskript («BN_komplett»), einem Excel-File zur Konfiguration («Konfiguration») sowie einer Reihe von Unterordnern.

Die Resultate des BN werden in den Unterordner «Output» rausgeschrieben. Es gibt verschiedene Konfigurationen, im Rahmen Screening- oder RE-Methodik ist «Berechnungen aller Möglichkeiten» relevant.

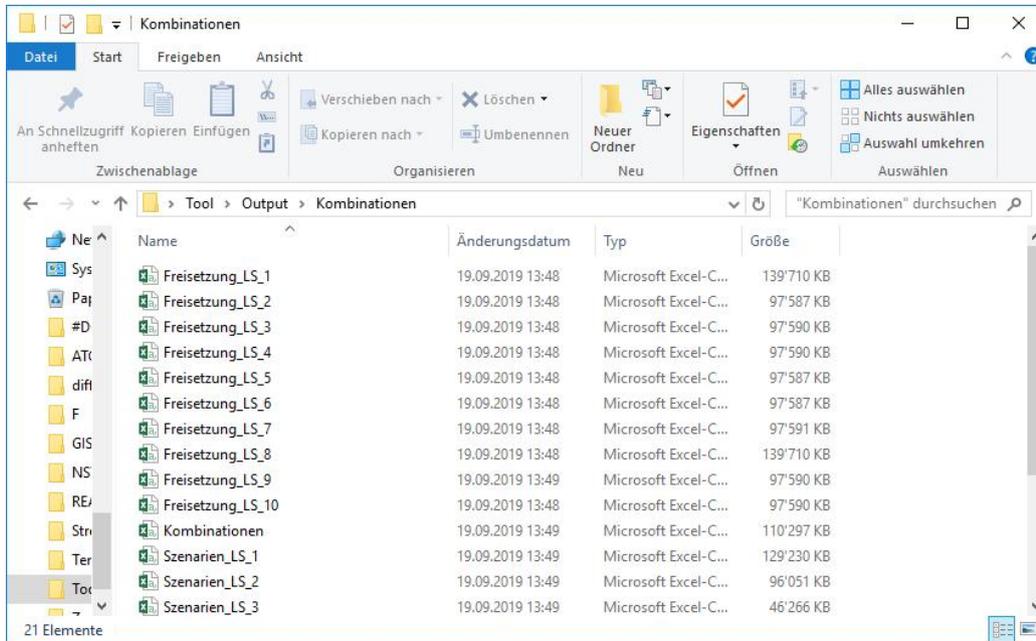
Programm Konfiguration	Format	Beschreibung
Berechnungen aller Möglichkeiten	.csv	Die Resultate für sämtliche möglichen Kombinationen werden pro LS in den Ordner «Output» herausgeschrieben. Als Memorygründen können diese Resultate nicht in Excel-Form herausgeschrieben werden – der Export erfolgt im CSV-Format (<i>Comma-separated values</i>). Diese Files können jedoch ebenfalls mit Excel geöffnet werden.

Mit dieser Konfiguration werden sämtliche insgesamt 1'944'000 verschiedenen möglichen Kombinationen pro LS berechnet und die Resultate herausgeschrieben. Die Kombinationen ergeben sich aus den verschiedenen Zuständen der relevanten Parameter:

	A	B	C	D	E	F	G
1	Zustände	Geschwindigkeit_VZ	Weichenabstand_VZ	Weichendichte_VZ	EDT	Geschwindigkeit_ESZ	Weichendichte_ESZ
2	Z_1	0-40	< 200 m	0	ja (vorhanden, wirksam)	0-40	0
3	Z_2	40-60	200-500 m	1	nein (nicht vorhanden / v)	40-60	1
4	Z_3	60-80	500-900 m	>1		60-80	>1
5	Z_4	80-100	900-3500 m			80-100	
6	Z_5	100-120	> 3.5 km			100-120	
7							
8							
9		1	2	3	4	5	6
10		Entgleisung					
11							
12							
13							
14	Szenario für Beispielrechnung						
	Dichtung	Geschwindigkeit_VZ	Weichenabstand_VZ	Weichendichte_VZ	EDT	Geschwindigkeit_ESZ	Weichendichte_ESZ

Resultate

Resultat der Berechnungen sind die Daten, welche zukünftig im netzweiten Screening als Input dienen könnten. Unter «Output/Kombinationen» werden drei verschiedene Arten von Files abgespeichert.



Kombinationen (1 File)

Im File «Kombinationen» wird für jede der 1'944'000 möglichen, berechneten Möglichkeiten die Nummer sowie die genaue Parameterkombination herausgeschrieben.

Nr.	Zugsgeschwindigkeit_vorgelagert	Weichenabstand_vorgelagert	EDT	Zugsgeschw...
1	1 0-40	< 100 m	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
2	2 100-120	< 100 m	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
3	3 40-60	< 100 m	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
4	4 60-80	< 100 m	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
5	5 80-100	< 100 m	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
6	6 0-40	> 2.5 km	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
7	7 100-120	> 2.5 km	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
8	8 40-60	> 2.5 km	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
9	9 60-80	> 2.5 km	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
10	10 80-100	> 2.5 km	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
11	11 0-40	100-500 m	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
12	12 100-120	100-500 m	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
13	13 40-60	100-500 m	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
14	14 60-80	100-500 m	ja (vorhanden, wirksam)	0-40
15	15 80-100	100-500 m	ja (vorhanden, wirksam)	0-40

Anhand dieser Tabelle kann später für einen Berechnungspunkt die passende Kombination ermittelt werden.

Freisetzung (pro LS->10 Files)

Wahrscheinlichkeiten der Freisetzungsmengen (in m³) und -raten (instantan vs. kontinuierlich) sämtlicher 1'944'000 berechneter Möglichkeiten. Die Nummer ermöglicht die Zuordnung zur jeweiligen Parameterkombination.

Nr.	instantan - 0-10	instantan - 10-20	instantan - 20-40	instantan - 40-60	instantan - 60-80	instantan - 80-120	instantan - 120-160	instantan - 160-200	instantan - 200-240	instantan - 240-280	instantan - 280-320	instantan - 320-360	instantan - 360-400	instantan - 400-440	instantan - 440-480	instantan - 480-520	instantan - 520-560	instantan - 560-600	instantan - 600-640	instantan - 640-680	instantan - 680-720	instantan - 720-760	instantan - 760-800	instantan - 800-840	instantan - 840-880	instantan - 880-920	instantan - 920-960	instantan - 960-1000	
1	1.145509602453934e-12	1.13174135241949e-12	6.46709344239708e-13	0.0124999999990321	0.0124999999990321	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000	0.0000000000000000

Szenario (pro LS->10 Files)

Bedingte Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Störfallszenarien (ausschliesslich bzgl. Personenrisiken) sämtlicher 1'944'000 berechneter Möglichkeiten. Die Nummer ermöglicht die Zuordnung zur jeweiligen Parameterkombination.

Nr.	TOX-instantan	TOX-kontinuierlich	TOX-nein	VCE-spontan	VCE-verzögert	VCE-keine	Lachenbrand-spontan	Lachenbrand-v
1	0.0150500000223836	0.00245000000455176	0.982499999973065	0.0150500000223836	0.00245000000455176	0.982499999973065	0.0150500000223836	0.00245000000455176

Mögliche Verwendung im Rahmen einer Screening- oder RE-Methodik (zukünftiges EDV-Tool)

Voraussetzungen

- Die streckenspezifischen Parameter (Infrastruktur, Zugzahlen, Gefahrgutzahlen etc.) sind in der Screening- oder RE-Methodik hinterlegt.
- Die Screening- oder RE-Methodik kann obige Files einlesen

Im Rahmen Screening- oder RE-Methodik zu berücksichtigen

Bei den Resultaten des BN handelt es sich um bedingte Wahrscheinlichkeiten relativ zu den Ausgangsraten für die Primärereignisse (Entgleisung und Zusammenstösse), daher Ereignisraten pro Zug-100 m und Jahr. Um absolute Ereignisraten pro Jahr zu erhalten sind die Resultate ausserhalb des BN noch mit den jährlichen Häufigkeiten der entsprechend transportierten Gefahrgutmengen (LS) in Einheiten von Kesselwagen/Tankcontainer zu multiplizieren, sowie weiteren Mittelungen wie Fahrtrichtung, Anteil Ganzzügen (Wagenreihung), Gebindetypen, etc. Zudem ist die HFO-Abdeckung nicht im BN berücksichtigt, der entsprechend gültige Korrekturfaktor muss ebenfalls multipliziert werden. Analog können weitere Faktoren definiert werden, ohne dass eine Anpassung des BN notwendig ist.

Vorgehen

1. Screening- oder RE-Methodik identifiziert anhand der streckenspezifischen Parameter im File «Kombinationen» die passende Kombination mit zugehöriger Nummer.
2. Die Resultate der identifizierten Kombination werden aus den leitstoffspezifischen Files «Freisetzung» ausgelesen.
3. Es folgt die Berechnung der Risikokurve. Hierzu werden die eingelesenen bedingten Freisetzungsraten mit den Anzahl Kesselwagen/Tankcontainer des aktuellen GG-Transports sowie weiteren Faktoren multipliziert (HFO etc.; s.o.).

8 Grundlagen

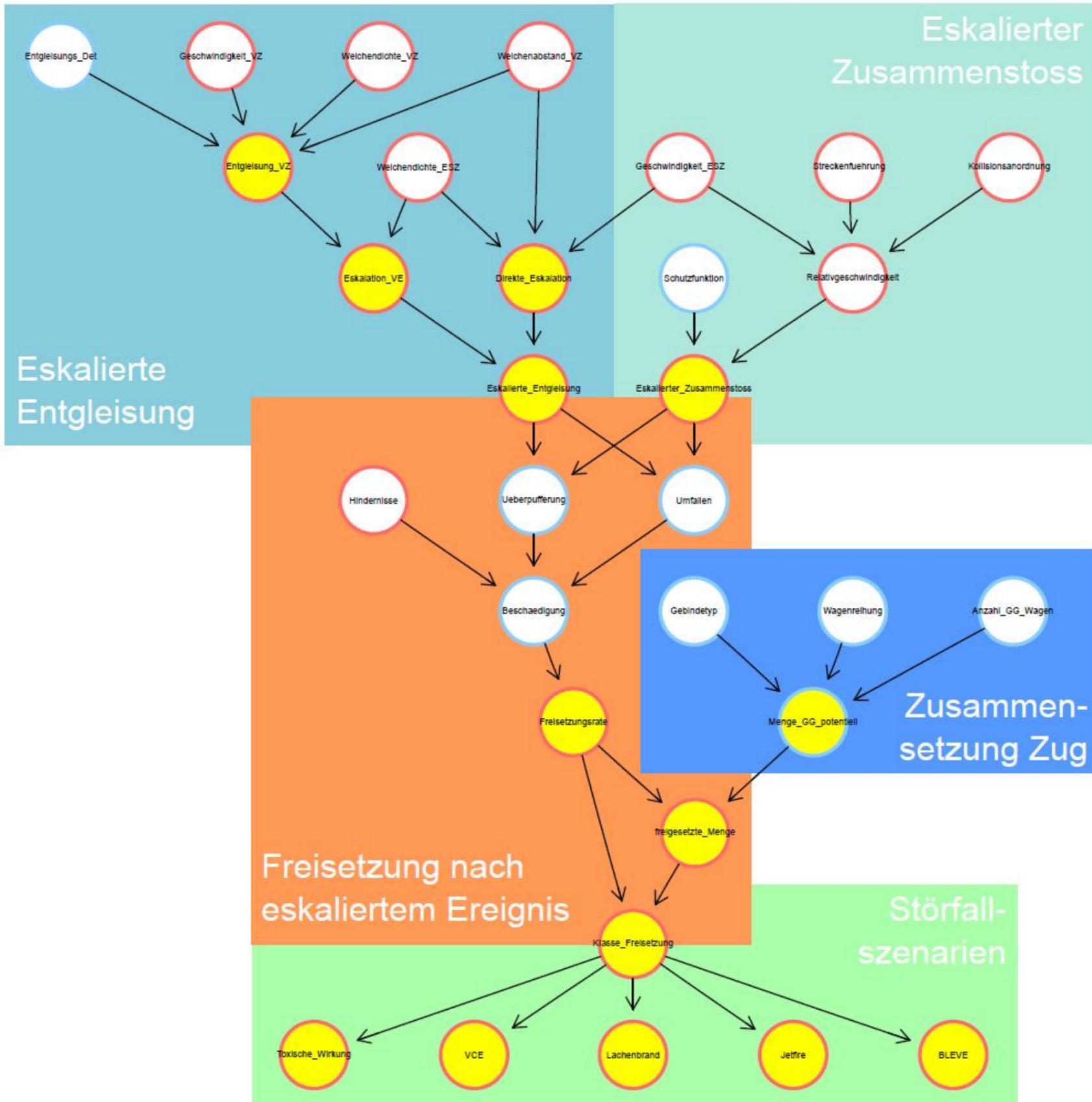
- [1] SR 814.012, 1991: Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung, StFV) vom 27. Februar 1991.
- [2] Ernst Basler und Partner, 2014: Methodikbericht Screening Personenrisiken Bahn 2014 (Februar 2015).
- [3] Ernst Basler und Partner, 1998: Pilotrisikoanalyse PRA Bahn 1998 (inkl. Fallbeispiele und Anhang)
- [4] BAV, 2018: Freisetzungshäufigkeit mit Hilfe Bayes'scher Netze, Vorschlag BAV, 16. Juli 2018
- [5] Ernst Basler und Partner, 2014: Methodikbericht Screening Umweltrisiken Bahn 2014 (Mai 2015).
- [6] BAV, 2020: Aktualisierung Screening Personen- und Umweltrisiken 2018 - Dokumentation Parameteraktualisierung, Bundesamt für Verkehr, Ernst Basler + Partner AG.
- [7] Emch+Berger AG, 2020: Modellierung der Wahrscheinlichkeit einer Freisetzung von Gefahrgut mit Bayes'schen Netzen - Manual zur Anwendung, V 1.1, 13. November 2020
- [8] Ernst Basler und Partner, 2018: Weiterentwicklung Screening- und RE-Methodik - Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von toxischen Gasen (LS Chlor), 15. April 2018.
- [9] suisseplan Ingenieure AG, 2018: Weiterentwicklung Screening- und RE-Methodik - Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von brennbaren schweren Gasen (LS Propan), 15. Januar 2018
- [10] Emch+Berger AG, 2017: Weiterentwicklung Screening- und RE-Methodik - Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von leicht brennbaren Flüssigkeiten (LS Benzin), 13. Juli 2017.
- [11] Emch+Berger AG, 2018: Weiterentwicklung Screening- und RE-Methodik - Ausbreitung und Wirkung von leicht flüchtigen, toxischen Flüssigkeiten, Version 1.1, 25. Juli 2018.
- [12] ENOTRAC AG, 2018: Örtliche Verteilung der Freisetzungsorte abgeleitet aus Unfallberichten, v1.0, 12. Juli 2018
- [13] Emch+Berger AG, 2020: Quantifizierung der risikosenkenden Wirkung der Massnahmen gemäss Gemeinsamer Erklärung II, Version 1.3, 20. August 2020.
- [14] Fingas, M. F., 2002: "Modeling and understanding BLEVES", in: The handbook of hazardous materials spills technology, New York, McGraw-Hill
- [15] Hemmatian, B., 2016: Contribution to the study of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions and their mechanical effects, Dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2016
- [16] RIVM, 2017: Handleiding Risicoanalyse Transport (HART) + Bijlagen, versie 1.2, RIVM, 11.1.2017
- [17] BAV, 2020: Risiken für die Bevölkerung und die Umwelt beim Transport gefährlicher Güter auf der Bahn, Aktualisierte netzweite Abschätzung der Risiken 2018, Bundesamt für Verkehr, Ernst Basler + Partner AG.

9 Glossar / Definitionen

Bedingte Wahrscheinlichkeit, Kanten	Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Knoten in Abhängigkeit der Werte der Knoten, daher der Begriff «bedingt».
DE	Direkte Entgleisung
Defaultwerte	Angenommene konstante Werte für die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Knoten, welche als Platzhalter dienen bis bessere Werte oder Modelle für die Abhängigkeiten bekannt sind.
EDT	Entgleisungsdetektor
Entgleisung	Radsatz (einer/mehrere) eines Kesselwagens springt aus der Spur. Dies führt nicht zwingend sofort zu einem relevanten Ereignis, ein solcher Zug kann noch km weiterfahren. Die Entgleisung kann bei Vorhandensein durch Entgleisungsdetektoren festgestellt und eine Eskalation verhindert oder zumindest die Entgleisungsgeschwindigkeit verringert werden kann.
ES	Eskalation
Eskalierte Entgleisung	Entgleisung mit möglicher GG-Freisetzung
Eskalierter Zusammenstoss	Zusammenstoss mit möglicher GG-Freisetzung
ESZ	Eskalationszone (200 m vor/nach Berechnungspunkt)
Evidenz, Eingabewert	Wert der Variable an einem spezifischen Berechnungspunkt, z.B. «100 km/h»
GG	Gefahrgut
Lokalisierung: lokal	Knoten hat lokal unterschiedliche Werte, kann aus schweizweiter Datenbank oder durch Abklärungen vor Ort bestimmt werden.
Lokalisierung: netzweit	Knoten hat netzweit gleiche Werte (Beispiel: Zustand Rollmaterial). Wird ein Knoten in dieser Methodik als netzweiter Knoten bezeichnet, bedeutet das nicht zwingend, dass dieser Knoten an jedem Ort denselben Wert hat (regionale Unterschiede möglich). Es bedeutet aber, dass dieser Knoten durch eine netzweite Betrachtung festgelegt wird und nicht aufgrund lokal unterschiedlicher Daten oder Abklärungen bestimmt oder präzisiert werden muss.
LS	Leitstoff
Parameter	Werte für Konstanten in der Parametrisierung der Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Knoten in mathematischen oder physikalischen Modellen, z.B. Modellparameter bei der «eskalierten Entgleisung».
Ratenfaktor	Faktor der an Ereignisrate multipliziert wird.
SN	Subnetz
Variable, Knoten	Grösse zur Beschreibung des Zustandes am Berechnungspunkt, z.B. «Geschwindigkeit»
V	Geschwindigkeit [km/h]
VE	Vorgelagerte Entgleisung
VZ	Vorgelagerte Zone (5 km vor ESZ)
W	Wahrscheinlichkeit
Zustandswahrscheinlichkeit	Wahrscheinlichkeitsverteilung der möglichen Werte der Variablen, soweit keine Evidenz vorliegt

Anhang A Resultierendes Gesamtnetz

A.1 Bayes'sches Netz für Primäreignisse



A.2 Bays'sches Netz für Sekundärereignisse

