



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

---

## EconoMe

Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit  
von Schutzmassnahmen  
gegen Naturgefahren

## Formelsammlung

Stand: 7. April 2016

---

# Impressum

---

## **Auftraggeber**

Bundesamt für Umwelt (BAFU), [www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch)

Schweizerische Bundesbahnen (SBB), [www.sbb.ch](http://www.sbb.ch)

## **Arbeitsgruppe**

Michael Bründl, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF (Projektleitung)

Linda Ettlin, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

André Burkard, wasser/schnee/lawinen

Nicole Oggier, wasser/schnee/lawinen

Fabian Dolf, GEOTEST AG

Peter Gutwein, Gutwein IT-Service

Reto Baumann, BAFU (Sektion Rutschungen, Lawinen und Schutzwald)

Bernard Loup, BAFU (Sektion Rutschungen, Lawinen und Schutzwald)

Urs Nigg, BAFU (Sektion Hochwasserschutz)

Eva Gertsch, BAFU (Sektion Hochwasserschutz)

Marc Hauser, SBB

## **Autoren**

Michael Bründl, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

Linda Ettlin, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

André Burkard, wasser/schnee/lawinen

Nicole Oggier, wasser/schnee/lawinen

Fabian Dolf, GEOTEST AG

Peter Gutwein, Gutwein IT-Service

## **Zitiervorschlag**

Bründl, M., Ettlin, L., Burkard, A., Oggier, N., Dolf, F. und Gutwein, P. (2015): EconoMe - Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren. Formelsammlung. 56 S.

Das vorliegende Dokument ist eine überarbeitete und zusammengeführte Fassung der Formelsammlung EconoMe vom 21. Dezember 2011 und des Methodikberichts EconoMe-Railway vom 25. Juni 2012.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>1 Fixe Objekte (Gebäude, Sonderobjekte)</b>	<b>7</b>
1.1 Schadenausmass Personen . . . . .	7
1.2 Schadenausmass Sachwerte . . . . .	7
<b>2 Strassenverkehr und mechanische Aufstiegshilfen</b>	<b>8</b>
2.1 Schadenausmass Personen . . . . .	8
2.2 Schadenausmass fixe Sachwerte . . . . .	10
<b>3 Schienenverkehr</b>	<b>11</b>
3.1 Wahrscheinlichkeit Schadenbilder . . . . .	11
3.1.1 Direkttreffer . . . . .	11
3.1.2 Anprall auf abgelagertes Material . . . . .	13
3.1.3 Kollision mit Gegenzug . . . . .	14
3.2 Schadenausmass Personen . . . . .	16
3.2.1 Direkttreffer . . . . .	16
3.2.2 Anprall . . . . .	16
3.2.3 Kollision mit Gegenzug . . . . .	17
3.3 Gesamtes Schadenausmass Personen . . . . .	19
3.4 Schadenausmass mobile Sachwerte . . . . .	19
3.4.1 Direkttreffer . . . . .	19
3.4.2 Anprall . . . . .	20
3.4.3 Kollision mit Gegenzug . . . . .	20
3.4.4 Gesamtes Schadenausmass mobile Sachwerte . . . . .	22
3.5 Schadenausmass fixe Sachwerte (Infrastruktur) . . . . .	23
3.5.1 Punktobjekte (Schaltposten, Kabelanlagen, etc.) . . . . .	23
3.5.2 Linienobjekte (Einspur, Mehrspur, etc.) . . . . .	23
3.5.3 Gesamtes Schadenausmass fixe Sachwerte . . . . .	24
3.6 Gesamtes Schadenausmass Sachwerte . . . . .	24
<b>4 Leitungen</b>	<b>25</b>
<b>5 Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen</b>	<b>25</b>
<b>6 Schadenausmass Szenario <i>j</i></b>	<b>27</b>
<b>7 Kollektives Risiko</b>	<b>28</b>

<b>8</b>	<b>Durchschnittliches individuelles Risiko</b>	<b>29</b>
8.1	Personen in fixen Objekten (Gebäude, Sonderobjekte)	29
8.2	Personen auf Strasse und in mechanischen Aufstiegshilfen	29
8.3	Personen im Schienenverkehr	30
8.4	Berechnen des durchschnittlichen individuellen Risikos	31
<b>9</b>	<b>Nutzen/Kosten-Verhältnis</b>	<b>32</b>
9.1	Bestimmen der Wirksamkeit (Risikoverminderung)	32
9.2	Abschätzen der Kosten	32
9.3	Bestimmen des Nutzen/Kosten-Verhältnisses	33
	<b>Anmerkungen</b>	<b>36</b>
	<b>Literatur</b>	<b>38</b>
<b>A</b>	<b>Glossar</b>	<b>39</b>
<b>B</b>	<b>Parameterverzeichnis</b>	<b>41</b>
<b>C</b>	<b>Anhang</b>	<b>51</b>
C.1	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit	51
C.2	Übersicht aller möglichen Schadenbilder im Schienenverkehr	53
C.3	Temporäre, organisatorische Massnahmen im Schienenverkehr	56
C.3.1	Vorsorgliche Sperrung	56
C.3.2	Fahren auf Sicht	56
C.4	Ereigniswahrscheinlichkeit im Gleisbereich	57
C.4.1	Stein-/Blockschlag	57
C.4.2	Lawine, Überschwemmung dynamisch und statisch, Murgang/ Wasser aus Murgang, Hangmure sowie Rutschung spontan	57
C.4.3	Übrige Gefahrenprozesse	58
C.5	Wahrscheinlichkeiten unterbrochene Fahrleitung und Warnung des Lokführers	59
C.6	Entgleisungswahrscheinlichkeit infolge Direkttreffers und Anpralls	59
C.7	Beispielrechnung Wahrscheinlichkeit Kollision mit Gegenzug	63
C.8	Beispielrechnung kollektives Risiko	66
C.9	Letalität Personen im Schienenverkehr bei Direkttreffer und Anprall	68
C.10	Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte Schienenverkehr	72
C.11	Allgemeine Bemerkung zu Richtwerten für Einheitspreise sowie Standardwerten für Schadenempfindlichkeiten und Letalitäten	75

## Abbildungsverzeichnis

1	Herleitung $p(rA)$ . . . . .	51
2	Ereignisbaum aller möglichen Schadenbilder im Schienenverkehr .	53
3	Ereignisunterbaum A der möglichen Schadenbilder im Schienenverkehr . . . . .	54
4	Ereignisunterbaum B der möglichen Schadenbilder im Schienenverkehr . . . . .	55
5	Schematische Darstellung $p(EGl)$ . . . . .	58
6	Komplementär-kumulatives Häufigkeits-Ausmass Diagramm . . .	67
7	Letalität Personen im Schienenverkehr bei Direkttreffer $\lambda(Dir)$ für günstiges Gelände. . . . .	70
8	Letalität Personen im Schienenverkehr bei Direkttreffer $\lambda(Dir)$ für ungünstiges Gelände bzw. für Brücken. . . . .	70
9	Letalität Personen im Schienenverkehr bei Anprall $\lambda(Anp)$ für günstiges Gelände. . . . .	71
10	Letalität Personen im Schienenverkehr bei Anprall $\lambda(Anp)$ für ungünstiges Gelände bzw. für Brücken. . . . .	71
11	Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte Schienenverkehr bei Anprall . . . . .	74

## Tabellenverzeichnis

1	Richtwerte $p(rA)$ . . . . .	52
2	Standardwerte $p(uF)$ , $p(wa)$ und $p(Anp)$ . . . . .	59
3	Entgleisungswahrscheinlichkeit nach Direkttreffer $p(EDir)$ . . . .	61
4	Entgleisungswahrscheinlichkeit nach Anprall $p(EAnp)$ . . . . .	62
5	Herleitung der Wahrscheinlichkeit eines Gegenzuges . . . . .	64
6	Herleitung der Wahrscheinlichkeit einer Kollision mit einem Gegenzug . . . . .	65
7	Schadenausmass in Szenario $j$ . . . . .	66
8	Herleitung der Häufigkeit von Szenario $j$ . . . . .	66
9	Standardwerte $SE(Dir)$ . . . . .	73
10	Einheitspreis für mobile Sachwerte des Schienenverkehrs . . . . .	75

## Einleitung

Diese Formelsammlung ersetzt die Formelsammlung EconoMe vom 21. Dezember 2011 (Bründl et al., 2011) und fasst die wichtigsten Aspekte aus dem Methodikbericht EconoMe-Railway vom 25. Juni 2012 (Winkler et al., 2012) zusammen. Diverse bahnspezifische Parameter sind auf der Arbeit von Liener und Schönthal (2014) abgestützt. Bründl et al. (2011) beziehen sich auf folgende Grundlagen: Borter (1999); Bründl (2009); Wilhelm (1997, 1999) und Winkler und Burkard (2005). Die Formeln in diesem Dokument erheben nicht den Anspruch, die Realität abbilden zu können. Sie ermöglichen lediglich, Schaden- und Risikoabschätzungen auf gut dokumentierte und nachvollziehbare Weise durchzuführen.

**Dokumentaufbau** In den ersten fünf Kapiteln wird jeweils für eine der fünf Objektkategorien aufgezeigt, wie das Sachschadenausmass und gegebenenfalls das Personenschadenausmass berechnet wird. Es folgen Kapitel zur Erläuterung der Berechnung des gesamten Schadenausmasses, des Risikos und des Nutzen/Kosten-Verhältnisses. In diesem Hauptteil der Formelsammlung liegt der Fokus auf den in EconoMe verwendeten Formeln. Längere Erklärungen, Beispiele und Angaben zu Standardwerten wurden zur besseren Übersicht in den Anhang ausgelagert. Auch Fussnoten, welche mehr als einmal referenziert werden, sowie Fussnoten grösseren Umfangs, sind nach dem Hauptteil der Formelsammlung - unter der Überschrift *Anmerkungen* - zu finden. Diese Anmerkungen sind mit Grossbuchstaben indiziert, während die herkömmlichen Fussnoten durchnummeriert und am Ende der jeweiligen Seite angebracht sind.

**Wahrscheinliches Schadenausmass** In der Risikotheorie (Bründl, 2009) wird zwischen Schadenausmass und wahrscheinlichem Schadenausmass unterschieden, damit ein klarer Unterschied gegeben ist zwischen dem Schadenausmass im Ereignisfall (Objekt wird tatsächlich getroffen) und dem Schadenausmass, welches unter Annahme einer bestimmten räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit zu erwarten ist (wahrscheinliches Schadenausmass). Ein allfälliger Aversionsfaktor ist jeweils auf das Schadenausmass (im Ereignisfall) anzuwenden. Darauf wird jedoch in EconoMe verzichtet, weshalb in dieser Formelsammlung jeweils nur das wahrscheinliche Schadenausmass erwähnt wird.

**Monetarisiertes Schadenausmass Personen** Damit Sachrisiken mit Personenrisiken verglichen werden können, werden Personenrisiken monetarisiert. Die Grenzkosten werden standardmässig mit 5 Mio CHF pro verhindertes Todesopfer festgelegt.

# 1 Fixe Objekte (Gebäude, Sonderobjekte)

## 1.1 Schadenausmass Personen

Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für Personen in fixen Objekten ist gegeben durch:

$$Aw(PG)_{i,j} = p(rA)_j \cdot \lambda(G)_{i,j} \cdot N(P)_i \cdot p(pr)_i \cdot (1 - \epsilon_i) \quad [Tf] \quad (1)$$

Das gesamte wahrscheinliche Schadenausmass für Personen in allen Objekten in Szenario  $j$  ist gegeben durch:

$$Aw(PG)_j = \sum_i Aw(PG)_{i,j} \quad [Tf] \quad (2)$$

wobei

$Aw(PG)_{i,j}$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen (Anzahl Todesfälle) für das fixe Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PG)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen (Anzahl Todesfälle) für alle fixen Objekte (Gebäude, Sonderobjekte) in Szenario $j$ .	[Tf]
$p(rA)_j$	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.1).	[-]
$\lambda(G)_{i,j}$	Letalität Personen im fixen Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität (s. Anhang C.11). <sup>B</sup>	[-]
$N(P)_i$	Anzahl durchschnittlich anwesender Personen im fixen Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt).	[Pers.]
$p(pr)_i$	Präsenzwahrscheinlichkeit einer Person im fixen Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt). <sup>1</sup>	[-]
$\epsilon_i$	Objektschutzfaktor fixes Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität. <sup>C</sup>	[-]

## 1.2 Schadenausmass Sachwerte

Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für Sachwerte bei fixen Objekten ist gegeben durch:

<sup>1</sup>**Beispiel**  $p(pr) = 0.75$  heisst, dass sich die Person während 18 Stunden pro Tag im Objekt aufhält. Standardmässig ist in EconoMe der Wert für die Berechnung des individuellen Risikos auf  $p(pr) = 0.8$  (19.2 Stunden pro Tag) festgelegt. Der Wert kann geändert werden.

$$Aw(G)_{i,j} = p(rA)_j \cdot SE(G)_{i,j} \cdot W(G)_i \cdot (1 - \epsilon_i) \quad [CHF] \quad (3)$$

Das gesamte wahrscheinliche Schadenausmass aller Objekte  $Aw(G)_j$  in Szenario  $j$  ist gegeben durch:

$$Aw(G)_j = \sum_i Aw(G)_{i,j} \quad [CHF] \quad (4)$$

wobei

$Aw(G)_{i,j}$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für das fixe Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(G)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für alle fixen Objekte (Gebäude, Sonderobjekte) in Szenario $j$ .	[CHF]
$p(rA)_j$	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.1).	[-]
$SE(G)_{i,j}$	Schadenempfindlichkeit fixes Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität (s. Anhang C.11). <sup>D</sup>	[-]
$W(G)_i$	Sachwert fixes Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt, s. Anhang C.11).	[CHF]
$\epsilon_i$	Objektschutzfaktor fixes Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität. <sup>C</sup>	[-]

## 2 Strassenverkehr und mechanische Aufstiegshilfen

### 2.1 Schadenausmass Personen

Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für Personen im Strassenverkehr und in mechanischen Aufstiegshilfen ist gegeben durch:

$$Aw(PS)_j = p(rA)_j \cdot \lambda(S)_j \cdot \beta(S) \cdot \frac{DTV \cdot g_j}{v(S) \cdot 24000} \quad [Tf] \quad (5)$$

wobei

$Aw(PS)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen im Strassenverkehr bzw. in mechanischen Aufstiegshilfen in Szenario $j$ .	[Tf]
$p(rA)_j$	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.1).	[-]

$\lambda(S)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Letalität Personen im Strassenverkehr bzw. in mechanischen Aufstiegshilfen in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität (s. Formel 6). <sup>B</sup>	[-]
$\beta(S)$	Durchschnittlicher Besetzungsgrad Strassenfahrzeuge bzw. mechanischer Aufstiegshilfen. <sup>E</sup>	[Pers.]
$DTV$	Durchschnittlicher täglicher Verkehr (Strassenverkehr bzw. mechanische Aufstiegshilfen). Bei mechanischen Aufstiegshilfen entspricht dies der durchschnittlichen Anzahl transportierter Personen pro Tag.	[1/d]
$g_j$	Länge der gesamten gefährdeten Strecke in Szenario $j$ , berechnet als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher, mittlerer und starker Intensität. <sup>F</sup>	[m]
$v(S)$	Durchschnittliche Geschwindigkeit Strassenfahrzeuge bzw. mechanischer Aufstiegshilfen im gefährdeten Streckenabschnitt. Der Faktor 24000 ist zur Umrechnung von $[\frac{km}{h}]$ in $[\frac{m}{d}]$ .	$[\frac{km}{h}]$

Die über die gefährdete Strecke gemittelte Letalität (im Strassenverkehr, in mechanischen Aufstiegshilfen bzw. im Schienenverkehr) ist gegeben durch:

$$\lambda(\cdot)_j = \frac{(\lambda(\cdot)_s \cdot g_{s,j}) + (\lambda(\cdot)_m \cdot g_{m,j}) + (\lambda(\cdot)_{st} \cdot g_{st,j})}{g_{s,j} + g_{m,j} + g_{st,j}} \quad [-] \quad (6)$$

wobei

$\lambda(\cdot)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Letalität Personen (im Strassenverkehr, in mechanischen Aufstiegshilfen bzw. im Schienenverkehr) in Szenario $j$ . <sup>2, B</sup>	[-]
$\lambda(\cdot)_s,$ $\lambda(\cdot)_m,$ $\lambda(\cdot)_{st}$	Letalität Personen (im Strassenverkehr, in mechanischen Aufstiegshilfen bzw. im Schienenverkehr) für schwache, mittlere bzw. starke Intensität in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.11). <sup>B</sup>	[-]
$g_{s,j}, g_{m,j},$ $g_{st,j}$	Länge der gefährdeten Abschnitte in Szenario $j$ in schwacher, mittlerer bzw. starker Intensität.	[m]

<sup>2</sup>**Beispiel** Szenario 30 Jahre:  $\lambda_m = 0.1, \lambda_{st} = 0.2, g_{m,30} = 10 \text{ m}, g_{st,30} = 90 \text{ m}$   
 $\Rightarrow \lambda_{30} = \frac{0.1 \cdot 10 + 0.2 \cdot 90}{10 + 90} = 0.19$

## 2.2 Schadenausmass fixe Sachwerte

Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für fixe Sachwerte des Strassenverkehrs und mechanischer Aufstiegshilfen (Linienobjekte wie Strassen, Brücken etc.) ist gegeben durch:

$$Aw(S)_j = p(rA)_j \cdot SE(S)_j \cdot W(S) \cdot g_j \quad [CHF] \quad (7)$$

wobei

$Aw(S)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass fixe Sachwerte für den Strassenverkehr bzw. mechanische Aufstiegshilfen in Szenario $j$ .	[CHF]
$p(rA)_j$	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.1).	[-]
$SE(S)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Schadenempfindlichkeit Strasse bzw. mechanische Aufstiegshilfe in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität (s. Formel 8). <sup>D</sup>	[-]
$W(S)$	Sachschadenwert Strasse bzw. mechanische Aufstiegshilfe pro Laufmeter (s. Anhang C.11).	$[\frac{CHF}{m}]$
$g_j$	Länge der gesamten gefährdeten Strecke in Szenario $j$ , berechnet als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher, mittlerer und starker Intensität. <sup>F</sup>	[m]

Die über die gefährdete Strecke gemittelte Schadenempfindlichkeit (Strassenverkehr, mechanische Aufstiegshilfen, Schienenverkehr bzw. Leitungen) ist gegeben durch:

$$SE(\cdot)_j = \frac{(SE(\cdot)_s \cdot g_{s,j}) + (SE(\cdot)_m \cdot g_{m,j}) + (SE(\cdot)_{st} \cdot g_{st,j})}{g_{s,j} + g_{m,j} + g_{st,j}} \quad [-] \quad (8)$$

wobei

$SE(\cdot)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Schadenempfindlichkeit (Strassenverkehr, mechanische Aufstiegshilfen, Schienenverkehr bzw. Leitungen) in Szenario $j$ . <sup>3,D</sup>	[-]
---------------	---	-----

<sup>3</sup> **Beispiel** Szenario 30 Jahre:  $SE_m = 0.5$ ,  $SE_{st} = 1$ ,  $g_{m,30} = 10$  m,  $g_{st,30} = 90$  m  
 $\Rightarrow SE_{30} = \frac{0.5 \cdot 10 + 1 \cdot 90}{10 + 90} = 0.95$

$SE(\cdot)_s,$	Schadenempfindlichkeit (Strassenverkehr, mechanische Aufstiegshilfen, Schienenverkehr bzw. Leitungen) für schwache, mittlere bzw. starke Intensität in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.11). <sup>D</sup>	[-]
$SE(\cdot)_m,$		
$SE(\cdot)_{st}$		
$g_{s,j}, g_{m,j},$	Länge der gefährdeten Abschnitte in Szenario $j$ in schwacher, mittlerer bzw. starker Intensität.	[m]
$g_{st,j}$		

### 3 Schienenverkehr

Die Abbildungen 2, 3 und 4 im Anhang geben eine Übersicht der möglichen Schadenbilder im Schienenverkehr.

#### 3.1 Wahrscheinlichkeit Schadenbilder

##### 3.1.1 Direkttreffer

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein abgehender Prozess einen Zug erfasst, ist gegeben durch:

$$p(Dir)_j = \frac{Fz \cdot (p(rA)_j \cdot g_j + l(B))}{v(B) \cdot 24000} \quad [-] \quad (9)$$

$$p(Dir)FaS_j = \frac{Fz \cdot (p(rA)_j \cdot g_j + l(B))}{v(B)_{FaS} \cdot 24000} \quad [-] \quad (10)$$

wobei

$p(Dir)_j$	Wahrscheinlichkeit Direkttreffer in Szenario $j$ . <sup>G</sup>	[-]
$p(Dir)FaS_j$	Wahrscheinlichkeit Direkttreffer in Szenario $j$ bei Fahren auf Sicht. <sup>G</sup>	[-]
$Fz$	Durchschnittliche Anzahl Zugsdurchfahrten pro Tag. <sup>G</sup>	[1/d]
$p(rA)_j$	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.1).	[-]
$g_j$	Länge der gesamten gefährdeten Strecke in Szenario $j$ , berechnet als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher, mittlerer und starker Intensität. <sup>F</sup>	[m]
$l(B)$	Durchschnittliche Zuglänge. <sup>G</sup>	[m]
$v(B)$	Durchschnittliche Geschwindigkeit der Züge im gefährdeten Streckenabschnitt. Der Faktor 24000 ist zur Umrechnung von $[\frac{km}{h}]$ in $[\frac{m}{d}]$ . <sup>G</sup>	$[\frac{km}{h}]$

$v(B)_{FaS}$  Durchschnittliche Geschwindigkeit der Züge im gefährdeten Streckenabschnitt während Fahren auf Sicht. Der Faktor 24000 ist zur Umrechnung von  $\left[\frac{km}{h}\right]$  in  $\left[\frac{m}{d}\right]$ .

### Wahrscheinlichkeit der einzelnen Schadenbilder Direkttreffer<sup>H</sup>

Wahrscheinlichkeit Direkttreffer bei Normalbetrieb ohne anschließende Entgleisung:

$$p(SDir1)_j = (1 - p(vSp)) \cdot (1 - p(FaS)) \cdot p(EGl) \quad [-] \quad (11) \\ \cdot p(Dir)_j \cdot (1 - p(EDir)_j)$$

Wahrscheinlichkeit Direkttreffer bei Normalbetrieb mit nachfolgender Entgleisung ohne Kollision:

$$p(SDir2)_j = (1 - p(vSp)) \cdot (1 - p(FaS)) \cdot p(EGl) \quad [-] \quad (12) \\ \cdot p(Dir)_j \cdot p(EDir)_j \cdot (1 - p(Kol))$$

Wahrscheinlichkeit Direkttreffer bei Fahren auf Sicht:

$$p(SDir3)_j = (1 - p(vSp)) \cdot p(FaS) \cdot p(EGl) \cdot p(Dir)_{FaS_j} \quad [-] \quad (13)$$

Wahrscheinlichkeit des gesamten Schadenbildes Direkttreffer:

$$p(SDir)_j = p(SDir1)_j + p(SDir2)_j + p(SDir3)_j \quad [-] \quad (14)$$

wobei

$p(SDir_n)_j$	Wahrscheinlichkeit der einzelnen Schadenbilder Direkttreffer in Szenario $j$ .	[-]
$p(SDir)_j$	Wahrscheinlichkeit des Schadenbildes Direkttreffer in Szenario $j$ als Summe der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Schadenbilder Direkttreffer.	[-]
$p(vSp)$	Wahrscheinlichkeit vorsorgliche Sperrung (s. Anhang C.3.1).	[-]
$p(FaS)$	Wahrscheinlichkeit, dass Fahren auf Sicht angeordnet wird (s. Anhang C.3.2).	[-]
$p(EGl)$	Ereigniswahrscheinlichkeit im Gleisbereich (s. Anhang C.4).	[-]
$p(Dir)_j$	Wahrscheinlichkeit Direkttreffer in Szenario $j$ (s. Formel 9).	[-]
$p(EDir)_j$	Entgleisungswahrscheinlichkeit infolge Direkttreffers in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität (s. Anhang C.6).	[-]

$p(Kol)$	Wahrscheinlichkeit Kollision mit Gegenzug innerhalb von 4 Minuten nach Entgleisung (s. Formel 21 und Anhang C.7).	[-]
$p(Dir)FaS_j$	Wahrscheinlichkeit Direkttreffer bei Fahren auf Sicht in Szenario $j$ (s. Formel 9).	[-]

### 3.1.2 Anprall auf abgelagertes Material

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug auf abgelagertes Material auffährt, ist gegeben durch:

$$p(Anp) = 1 - \overline{p(Anp)} \quad [-] \quad (15)$$

$$\overline{p(Anp)} = p(wa) \cdot (1 - p(uF)) + p(uF) \cdot (1 - p(wa)) + p(wa) \cdot p(uF) \quad [-] \quad (16)$$

wobei

$\overline{p(Anp)}$	Wahrscheinlichkeit, dass es nicht zu einem Anprall kommt.	[-]
$p(Anp)$	Wahrscheinlichkeit Anprall. <sup>1</sup>	[-]
$p(wa)$	Wahrscheinlichkeit, dass der Lokführer rechtzeitig gewarnt werden kann (s. Anhang C.5).	[-]
$p(uF)$	Wahrscheinlichkeit, dass die Fahrleitung unterbrochen ist und der Lokführer rechtzeitig gewarnt werden kann (s. Anhang C.5).	[-]

#### Wahrscheinlichkeit der einzelnen Schadenbilder Anprall<sup>1</sup>

Wahrscheinlichkeit Anprall bei Normalbetrieb ohne anschließende Entgleisung:

$$p(SAnp1)_j = (1 - p(vSp)) \cdot (1 - p(FaS)) \cdot p(EGL) \quad [-] \quad (17) \\ \cdot p(Anp) \cdot (1 - p(EAnp)_j)$$

Wahrscheinlichkeit Anprall bei Normalbetrieb mit nachfolgender Entgleisung ohne Kollision:

$$p(SAnp2)_j = (1 - p(vSp)) \cdot (1 - p(FaS)) \cdot p(EGL) \quad [-] \quad (18) \\ \cdot p(Anp) \cdot p(EAnp)_j \cdot (1 - p(Kol))$$

Wahrscheinlichkeit des gesamten Schadenbildes Anprall:

$$p(SAnp)_j = p(SAnp1)_j + p(SAnp2)_j \quad [-] \quad (19)$$

wobei

$p(SAnp_n)_j$	Wahrscheinlichkeit der einzelnen Schadenbilder Anprall in Szenario $j$ .	[-]
$p(SAnp)_j$	Wahrscheinlichkeit des Schadenbildes Anprall in Szenario $j$ als Summe der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Schadenbilder Anprall.	[-]
$p(vSp)$	Wahrscheinlichkeit vorsorgliche Sperrung (s. Anhang C.3.1).	[-]
$p(FaS)$	Wahrscheinlichkeit, dass Fahren auf Sicht angeordnet wird (s. Anhang C.3.2).	[-]
$p(EGl)$	Ereigniswahrscheinlichkeit im Gleisbereich (s. Anhang C.4).	[-]
$p(Anp)$	Wahrscheinlichkeit Anprall (s. Formel 15). <sup>1</sup>	[-]
$p(EAnp)_j$	Entgleisungswahrscheinlichkeit infolge Anpralls in Abhängigkeit des Prozesses, der Intensität und der Zuggeschwindigkeit (s. Anhang C.6).	[-]
$p(Kol)$	Wahrscheinlichkeit Kollision mit Gegenzug innerhalb von 4 Minuten nach Entgleisung (s. Formel 21 und Anhang C.7).	[-]

### 3.1.3 Kollision mit Gegenzug

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein entgleister Zug mit einem auf dem Gegengeleise entgegenkommenden Zug kollidiert, ist gegeben durch:

$$p(z) = \frac{Fz/N(Gl)}{1200} \quad [-] \quad (20)$$

$$p(Kol) = (0.75 + 0.45 + 0.2 + 0.1) \cdot p(VLp) \cdot p(z) = 0.6 \cdot p(z) \quad [-] \quad (21)$$

wobei

$p(z)$	Wahrscheinlichkeit, dass ein Gegenzug innerhalb einer Minute kommt. Der Faktor 1200 ergibt sich aus $20 \text{ h} \cdot 60 \text{ min}$ und ist zur Umrechnung von $[1/d]$ in $[1/min]$ . Ein Tag entspricht hier $20 \text{ h}$ und nicht $24 \text{ h}$ , da davon ausgegangen wird, dass während ca. $4 \text{ h}$ am frühen Morgen kein Zugverkehr stattfindet. <sup>6</sup>	[-]
--------	--	-----

$p(Kol)$	Wahrscheinlichkeit Kollision mit Gegenzug innerhalb von 4 Minuten nach Entgleisung (s. Anhang C.7). <sup>4,G</sup>	[-]
$Fz$	Durchschnittliche Anzahl Zugsdurchfahrten pro Tag. <sup>G</sup>	[1/d]
$N(Gl)$	Anzahl Geleise im gefährdeten Streckenabschnitt, wobei $N(Gl) \geq 2$ .	[-]
$p(VLp)$	Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug sein Lichtraumprofil verlässt und das Lichtraumprofil des Gegengeleises gelangt, $p(VLp) = 0.4$ (Quelle: BAV (2010)).	[-]

### Wahrscheinlichkeit der einzelnen Schadenbilder Kollision mit Gegenzug<sup>K</sup>

Wahrscheinlichkeit Direkttreffer bei Normalbetrieb mit nachfolgender Entgleisung und Kollision:

$$p(SKol1)_j = (1 - p(vSp)) \cdot (1 - p(FaS)) \cdot p(EGl) \cdot p(Dir)_j \cdot p(EDir)_j \cdot p(Kol) \quad [-] \quad (22)$$

Wahrscheinlichkeit Anprall bei Normalbetrieb mit nachfolgender Entgleisung und Kollision:

$$p(SKol2)_j = (1 - p(vSp)) \cdot (1 - p(FaS)) \cdot p(EGl) \cdot p(Anp) \cdot p(EAnp)_j \cdot p(Kol) \quad [-] \quad (23)$$

wobei

$p(SKol_n)_j$	Wahrscheinlichkeit der einzelnen Schadenbilder Kollision mit Gegenzug in Szenario $j$ . <sup>L</sup>	[-]
$p(vSp)$	Wahrscheinlichkeit vorsorgliche Sperrung (s. Anhang C.3.1).	[-]
$p(FaS)$	Wahrscheinlichkeit, dass Fahren auf Sicht angeordnet wird (s. Anhang C.3.2).	[-]
$p(EGl)$	Ereigniswahrscheinlichkeit im Gleisbereich (s. Anhang C.4).	[-]
$p(Dir)_j$	Wahrscheinlichkeit Direkttreffer in Szenario $j$ (s. Formel 9). <sup>G</sup>	[-]
$p(EDir)_j$	Entgleisungswahrscheinlichkeit infolge Direkttreffers in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität (s. Anhang C.6).	[-]

<sup>4</sup>Die Werte 0.75, 0.45, 0.2 und 0.1 entsprechen jeweils der Wahrscheinlichkeit in der ersten, zweiten, dritten bzw. vierten Minute nach der Entgleisung, dass der Lokführer *nicht* gewarnt werden kann (SBB SI - Sicherheitsmanagement, 2010).

$p(Kol)$	Wahrscheinlichkeit Kollision mit Gegenzug innerhalb von 4 Minuten nach Entgleisung (s. Formel 21 und Anhang C.7). <sup>G</sup>	[-]
$p(Anp)$	Wahrscheinlichkeit Anprall (s. Formel 15). <sup>I</sup>	[-]
$p(EAnp)_j$	Entgleisungswahrscheinlichkeit infolge Anpralls in Abhängigkeit des Prozesses, der Intensität und der Zuggeschwindigkeit (s. Anhang C.6).	[-]

## 3.2 Schadenausmass Personen

### 3.2.1 Direkttreffer

Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für Personen im Schienenverkehr infolge eines Direkttreffers ist gegeben durch:

$$Aw(PBDir)_j = p(SDir)_j \cdot \lambda(Dir)_j \cdot \frac{g_j}{g_{vM,j}} \cdot \beta(B) \quad [Tf] \quad (24)$$

wobei

$Aw(PBDir)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Direkttreffer im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$p(SDir)_j$	Wahrscheinlichkeit des Schadenbildes Direkttreffer in Szenario $j$ als Summe der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Schadenbilder Direkttreffer (s. Formel 14).	[-]
$\lambda(Dir)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Letalität Personen bei Direkttreffer im Schienenverkehr in Szenario $j$ in Abhängigkeit der Geländebeziehungen, Zuggeschwindigkeit und Prozessintensität (s. Formel 6 sowie Anhang C.9). <sup>B</sup>	[-]
$g_j$	Länge der gesamten gefährdeten Strecke in Szenario $j$ , berechnet als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher, mittlerer und starker Intensität. <sup>F</sup>	[m]
$g_{vM,j}$	Länge der gesamten ursprünglich gefährdeten Strecke (Situation vor Massnahme) in Szenario $j$ . <sup>M</sup>	[m]
$\beta(B)$	Durchschnittlicher Besetzungsgrad Zug.	[Pers.]

### 3.2.2 Anprall

Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für Personen im Schienenverkehr infolge eines Anpralls ist gegeben durch:

$$Aw(PBAnp)_j = p(SAnp)_j \cdot \lambda(Anp) \cdot \beta(B) \quad [Tf] \quad (25)$$

wobei

$Aw(PBAnp)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Anprall im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$\lambda(Anp)$	Letalität Personen bei Anprall im Schienenverkehr in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, Intensität und Geländebeziehungen (s. Anhang C.9). <sup>B</sup>	[-]
$\beta(B)$	Durchschnittlicher Besetzungsgrad Zug.	[Pers.]
$p(SAnp)_j$	Wahrscheinlichkeit des Schadenbildes Anprall in Szenario $j$ als Summe der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Schadenbilder Anprall (s. Formel 19).	[-]

### 3.2.3 Kollision mit Gegenzug

Das Schadenbild Kollision mit Gegenzug bedingt zuerst einen Direkttreffer oder einen Anprall auf abgelagertes Material. Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für Personen im Schienenverkehr infolge einer Kollision mit einem Gegenzug<sup>5</sup> ist folglich gegeben durch:

$$Aw(PBKolDir)_j = p(SKol1)_j \cdot \left( \lambda(Dir)_j \cdot \frac{g_j}{g_{vM,j}} \cdot \beta(B) \quad [Tf] \quad (26) \right. \\ \left. + \lambda(Kol) \cdot \beta(B) \cdot \left( 1 - \lambda(Dir)_j \cdot \frac{g_j}{g_{vM,j}} \right) \right. \\ \left. + \lambda(Kol) \cdot \beta(z) \right)$$

$$Aw(PBKolAnp)_j = p(SKol2)_j \cdot \left( \lambda(Anp) \cdot \beta(B) \quad [Tf] \quad (27) \right. \\ \left. + \lambda(Kol) \cdot \beta(B) \cdot (1 - \lambda(Anp)) \right. \\ \left. + \lambda(Kol) \cdot \beta(z) \right)$$

$$Aw(PBKol)_j = Aw(PBKolDir)_j + Aw(PBKolAnp)_j \quad [Tf] \quad (28)$$

wobei

<sup>5</sup>N.B. In EconoMe wird nur das Schadenausmass für Personen in Personenzügen berechnet. Der Schaden an Personen in Güterzügen, welche an einer Kollision beteiligt sind, wird nicht berücksichtigt.

$Aw(PBKolDir)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Kollision mit Gegenzug (Entgleisung infolge Direkttreffers) im Schienenverkehr in Szenario $j$ . <sup>L</sup>	[Tf]
$Aw(PBKolAnp)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Kollision mit Gegenzug (Entgleisung infolge Anpralls) im Schienenverkehr in Szenario $j$ . <sup>L</sup>	[Tf]
$Aw(PBKol)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Kollision mit Gegenzug im Schienenverkehr in Szenario $j$ . <sup>N</sup>	[Tf]
$p(SKol_n)_j$	Wahrscheinlichkeit der einzelnen Schadenbilder Kollision mit Gegenzug in Szenario $j$ (s. Formeln 22 und 23). <sup>L</sup>	[-]
$\lambda(Dir)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Letalität Personen bei Direkttreffer im Schienenverkehr in Szenario $j$ in Abhängigkeit der Geländeverhältnisse, Zuggeschwindigkeit und Prozessintensität (s. Formel 6 sowie Anhang C.9). <sup>B</sup>	[-]
$g_j$	Länge der gesamten gefährdeten Strecke in Szenario $j$ , berechnet als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher, mittlerer und starker Intensität. <sup>F</sup>	[m]
$g_{vM,j}$	Länge der gesamten ursprünglich gefährdeten Strecke (Situation <i>vor Massnahme</i> ) in Szenario $j$ . <sup>M</sup>	[m]
$\beta(B)$	Durchschnittlicher Besetzungsgrad Zug.	[Pers.]
$\lambda(Kol)$	Letalität Personen bei Kollision mit Gegenzug in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Gegenzugs und der Geländeverhältnisse. Die Werte entsprechen der Letalität bei Anprall auf abgelagertes Material bei starker Intensität, wobei für den Gegenzug derselbe Betrieb (Normalbetrieb oder Fahren auf Sicht) gilt wie für den verursachenden Zug (s. Anhang C.9). <sup>B</sup>	[-]
$\beta(z)$	Durchschnittlicher Besetzungsgrad Gegenzug.	[Pers.]
$\lambda(Anp)$	Letalität Personen bei Anprall im Schienenverkehr in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, Intensität und Geländeverhältnisse (s. Anhang C.9). <sup>B</sup>	[-]

### 3.3 Gesamtes Schadenausmass Personen

Das gesamte Schadenausmass für Personen im Schienenverkehr ist gegeben durch:

$$Aw(PB)_j = Aw(PBDir)_j + Aw(PBAnp)_j + Aw(PBKol)_j \quad [Tf] \quad (29)$$

$Aw(PB)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PBDir)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Direkttreffer im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PBAnp)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Anprall im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PBKol)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Kollision mit Gegenzug im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]

### 3.4 Schadenausmass mobile Sachwerte

#### 3.4.1 Direkttreffer

Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für mobile Sachwerte des Schienenverkehrs infolge eines Direkttreffers ist gegeben durch:

$$Aw(mBDir)_j = p(SDir)_j \cdot SE(Dir)_j \cdot \frac{g_j}{g_{vM,j}} \cdot W(mB) \quad [CHF] \quad (30)$$

wobei

$Aw(mBDir)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte bei Direkttreffer im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
$p(SDir)_j$	Wahrscheinlichkeit des Schadenbildes Direkttreffer in Szenario $j$ als Summe der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Schadenbilder Direkttreffer (s. Formel 14).	[-]
$SE(Dir)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte bei Direkttreffer im Schienenverkehr in Szenario $j$ in Abhängigkeit der Geländeverhältnisse, des Prozesses und der Intensität (s. Formel 8 sowie Anhang C.10). <sup>D</sup>	[-]

$g_j$	Länge der gesamten gefährdeten Strecke in Szenario $j$ , berechnet als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher, mittlerer und starker Intensität. <sup>F</sup>	[m]
$g_{vM,j}$	Länge der gesamten ursprünglich gefährdeten Strecke (Situation vor Massnahme) in Szenario $j$ . <sup>M</sup>	[m]
$W(mB)$	Sachwert Zug (s. Anhang C.11).	[CHF]

### 3.4.2 Anprall

Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für mobile Sachwerte des Schienenverkehrs infolge eines Anpralls ist gegeben durch:

$$Aw(mBAnp)_j = p(SAnp)_j \cdot SE(Anp) \cdot W(mB) \quad [CHF] \quad (31)$$

wobei

$Aw(mBAnp)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte bei Anprall im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
$SE(Anp)$	Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte bei Anprall im Schienenverkehr in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit und der Geländeverhältnisse (s. Anhang C.10). <sup>D</sup>	[-]
$W(mB)$	Sachwert Zug (s. Anhang C.11).	[CHF]
$p(SAnp)_j$	Wahrscheinlichkeit des Schadenbildes Anprall in Szenario $j$ als Summe der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Schadenbilder Anprall (s. Formel 19).	[-]

### 3.4.3 Kollision mit Gegenzug

Das Schadenbild Kollision mit Gegenzug bedingt zuerst einen Direkttreffer oder einen Anprall auf abgelagertes Material. Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für mobile Sachwerte des Schienenverkehrs infolge einer Kollision mit einem Gegenzug<sup>6</sup> ist folglich gegeben durch:

<sup>6</sup>N.B. In EconoMe wird nur das Schadenausmass von Personenzügen berechnet. Der Schaden an Güterzügen, welche an einer Kollision beteiligt sind, wird nicht berücksichtigt.

$$\begin{aligned}
Aw(mBKolDir)_j &= p(SKol1)_j \cdot \left( SE(Dir)_j \cdot \frac{g_j}{g_{vM,j}} \cdot W(mB) \quad [CHF] \quad (32) \right. \\
&\quad + SE(Kol) \cdot W(mB) \cdot \left( 1 - SE(Dir)_j \cdot \frac{g_j}{g_{vM,j}} \right) \\
&\quad \left. + SE(Kol) \cdot W(z) \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Aw(mBKolAnp)_j &= p(SKol2)_j \cdot \left( SE(Anp) \cdot W(mB) \quad [CHF] \quad (33) \right. \\
&\quad + SE(Kol) \cdot W(mB) \cdot (1 - SE(Anp)) \\
&\quad \left. + SE(Kol) \cdot W(z) \right)
\end{aligned}$$

$$Aw(mBKol)_j = Aw(mBKolDir)_j + Aw(mBKolAnp)_j \quad [CHF] \quad (34)$$

wobei

$Aw(mBKolDir)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte bei Kollision mit Gegenzug (Entgleisung infolge Direkttreffers) im Schienenverkehr in Szenario $j$ . <sup>L</sup>	[CHF]
$Aw(mBKolAnp)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte bei Kollision mit Gegenzug (Entgleisung infolge Anpralls) im Schienenverkehr in Szenario $j$ . <sup>L</sup>	[CHF]
$Aw(mBKol)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte bei Kollision mit Gegenzug im Schienenverkehr in Szenario $j$ . <sup>N</sup>	[CHF]
$p(SKol_n)_j$	Wahrscheinlichkeit der einzelnen Schadenbilder Kollision mit Gegenzug in Szenario $j$ (s. Formeln 22 und 23). <sup>L</sup>	[-]
$SE(Dir)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte bei Direkttreffer im Schienenverkehr in Szenario $j$ in Abhängigkeit der Geländeverhältnisse, des Prozesses und der Intensität (s. Formel 8 sowie Anhang C.10). <sup>D</sup>	[-]

$g_j$	Länge der gesamten gefährdeten Strecke in Szenario $j$ , berechnet als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher, mittlerer und starker Intensität. <sup>F</sup>	[m]
$g_{vM,j}$	Länge der gesamten ursprünglich gefährdeten Strecke (Situation <i>vor Massnahme</i> ) in Szenario $j$ . <sup>M</sup>	[m]
$W(mB)$ $SE(Kol)$	Sachwert Zug (s. Anhang C.11). Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte bei Kollision mit Gegenzug in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Gegenzugs und der Gelände- verhältnisse. Die Werte entsprechen der Schadenempfindlichkeit bei Anprall auf abgelager- tes Material, wobei für den Gegenzug derselbe Betrieb (Normalbetrieb oder Fahren auf Sicht) gilt wie für den verursachenden Zug (s. An- hang C.10). <sup>D</sup>	[CHF] [-]
$W(z)$ $SE(Anp)$	Sachwert Gegenzug (s. Anhang C.11). Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte bei Anprall im Schienenverkehr in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit und der Gelände- verhältnisse (s. Anhang C.10). <sup>D</sup>	[CHF] [-]

### 3.4.4 Gesamtes Schadenausmass mobile Sachwerte

Das gesamte Schadenausmass für mobile Sachwerte des Schienenverkehrs ist gegeben durch:

$$Aw(mB)_j = Aw(mBDir)_j + Aw(mBAnp)_j + Aw(mBKol)_j \quad [CHF] \quad (35)$$

$Aw(mB)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sach- werte für den Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(mBDir)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sach- werte bei Direkttreffer im Schienenverkehr in Sze- nario $j$ .	[CHF]
$Aw(mBAnp)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sach- werte bei Anprall im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]

$Aw(mBKol)_j$  Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte bei Kollision mit Gegenzug im Schienenverkehr in Szenario  $j$ . [CHF]

### 3.5 Schadenausmass fixe Sachwerte (Infrastruktur)

#### 3.5.1 Punktobjekte (Schaltposten, Kabelanlagen, etc.)

Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für Punktobjekte des Schienenverkehrs ist gegeben durch:

$$Aw(BPO)_j = p(rA)_j \cdot SE(BPO) \cdot W(BPO) \quad [CHF] \quad (36)$$

wobei

$Aw(BPO)_j$  Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für Punktobjekte des Schienenverkehrs in Szenario  $j$ . [CHF]

$SE(BPO)$  Schadenempfindlichkeit Punktobjekt Schienenverkehr in Abhängigkeit der Prozessintensität (s. Anhang C.11).<sup>7,D</sup> [-]

$W(BPO)$  Sachschadenwert Punktobjekt Schienenverkehr (s. Anhang C.11). [CHF]

$p(rA)_j$  Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario  $j$  in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.1). [-]

#### 3.5.2 Linienobjekte (Einspur, Mehrspur, etc.)

Schäden an fixen, linienförmigen Sachwerten des Schienenverkehrs treten als Folge des Schadenbilds Gleisverschüttung (s. Abbildungen 2, 3 und 4) auf. Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für Linienobjekte des Schienenverkehrs ist gegeben durch:

$$Aw(BLO)_j = p(EGl) \cdot p(rA)_j \cdot SE(BLO)_j \cdot W(BLO) \cdot g_j \quad [CHF] \quad (37)$$

wobei

<sup>7</sup>**Notiz zur Anwendung im EconoMe-Tool** Falls mehrere Punktobjekte der selben Art (z.B. 5 Schaltposten) von verschiedenen Intensitäten betroffen sind, wird die Schadenempfindlichkeit über die Anzahl gefährdeter Objekte gemittelt (im Sinne von Formel 8). Entsprechend wird in diesem Fall das Schadenausmass im Sinne von Formel 7 berechnet.

$Aw(BLO)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für Linienobjekte des Schienenverkehrs in Szenario $j$ .	[CHF]
$SE(BLO)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Schadenempfindlichkeit Linienobjekt Schienenverkehr in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität (s. Formel 8). <sup>D</sup>	[-]
$W(BLO)$	Sachschadenwert Linienobjekt Schienenverkehr pro Laufmeter (s. Anhang C.11).	$[\frac{CHF}{m}]$
$g_j$	Länge der gesamten gefährdeten Strecke in Szenario $j$ , berechnet als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher, mittlerer und starker Intensität. <sup>F</sup>	[m]
$p(Egl)$	Ereigniswahrscheinlichkeit im Gleisbereich (s. Anhang C.4).	[-]
$p(rA)_j$	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.1).	[-]

### 3.5.3 Gesamtes Schadenausmass fixe Sachwerte

Das gesamte Schadenausmass für fixe Sachwerte des Schienenverkehrs ist gegeben durch:

$$Aw(fB)_j = Aw(BPO)_j + Aw(BLO)_j \quad [CHF] \quad (38)$$

$Aw(fB)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass fixe Sachwerte für den Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(BPO)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für Punktobjekte des Schienenverkehrs in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(BLO)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für Linienobjekte des Schienenverkehrs in Szenario $j$ .	[CHF]

### 3.6 Gesamtes Schadenausmass Sachwerte

Das gesamte Schadenausmass für Sachwerte des Schienenverkehrs ist gegeben durch:

$$Aw(B)_j = Aw(mB)_j + Aw(fB)_j \quad [CHF] \quad (39)$$

$Aw(B)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für den Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
-----------	---	-------

$Aw(mB)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte für den Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(fB)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass fixe Sachwerte für den Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]

## 4 Leitungen

### Schadenausmass Sachwerte

Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für Leitungen ist gegeben durch:

$$Aw(L)_j = p(rA)_j \cdot SE(L)_j \cdot W(L) \cdot g_j \quad [CHF] \quad (40)$$

wobei

$Aw(L)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für Leitungen in Szenario $j$ .	[CHF]
$SE(L)_j$	Über die gefährdete Strecke (bzw. über die Anzahl gefährdeter Masten) gemittelte Schadenempfindlichkeit Leitung in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität (s. Formel 8). <sup>D</sup>	[-]
$W(L)$	Sachschadenwert Leitung pro Laufmeter (s. Anhang C.11).	$[\frac{CHF}{m}]$
$g_j$	Länge der gesamten gefährdeten Strecke (bzw. Anzahl der gefährdeten Masten) in Szenario $j$ , berechnet als Summe der gefährdeten Abschnitte (bzw. der Anzahl Masten) in schwacher, mittlerer und starker Intensität. <sup>F</sup>	[m]
$p(rA)_j$	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.1).	[-]

## 5 Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen

### Schadenausmass Sachwerte

Das wahrscheinliche Schadenausmass<sup>A</sup> für Flächenobjekte wie Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen ist gegeben durch:

$$Aw(F)_j = p(rA)_j \cdot SE(F)_j \cdot W(F) \cdot F_j \quad [CHF] \quad (41)$$

wobei

$Aw(F)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für Flächenobjekte (z.B. Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen) in Szenario $j$ .	[CHF]
$SE(F)_j$	Über die gefährdete Fläche gemittelte Schadenempfindlichkeit Flächenobjekte (z.B. Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen) in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität (s. Formel 42). <sup>D</sup>	[-]
$W(F)$	Sachschadenwert Flächenobjekt (z.B. Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen) pro Are (s. Anhang C.11).	$[\frac{CHF}{Are}]$
$F_j$	Gesamte gefährdete Fläche in Szenario $j$ , berechnet als Summe der gefährdeten Flächen in schwacher, mittlerer und starker Intensität. <sup>8</sup>	[Are]
$p(rA)_j$	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.1).	[-]

Die über die gefährdete Fläche gemittelte Schadenempfindlichkeit Flächenobjekte ist gegeben durch:

$$SE(F)_j = \frac{(SE(F)_s \cdot F_s) + (SE(F)_m \cdot F_m) + (SE(F)_{st} \cdot F_{st})}{F_s + F_m + F_{st}} \quad [-] \quad (42)$$

wobei

$SE(F)_j$	Über die gefährdete Fläche gemittelte Schadenempfindlichkeit Flächenobjekte (z.B. Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen) in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität. <sup>9,D</sup>	[-]
$SE(F)_s,$ $SE(F)_m,$ $SE(F)_{st}$	Schadenempfindlichkeit Flächenobjekte (z.B. Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen) für schwache, mittlere bzw. starke Intensität in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.11). <sup>D</sup>	[-]
$F_s, F_m,$ $F_{st}$	Gefährdete Fläche im gegebenen Szenario in schwacher, mittlerer bzw. starker Intensität.	[Are]

<sup>8</sup>**Beispiel** Szenario 30 Jahre: 10 Are mittlere, 90 Are starke Intensität  
 $\Rightarrow F_{30} = 100$  Are

<sup>9</sup>**Beispiel** Szenario 30 Jahre:  $SE_m = 0.5$ ,  $SE_{st} = 1$ ,  $F_m = 10$  Are,  $F_{st} = 90$  Are  
 $\Rightarrow SE_{30} = 0.95$

## 6 Schadenausmass Szenario $j$

Das **monetarisierte** wahrscheinliche Schadenausmass Personen in Szenario  $j$  ist gegeben durch:

$$Aw(P)_j = GK \cdot (Aw(PG)_j + Aw(PS)_j + Aw(PB)_j) \quad [CHF] \quad (43)$$

Das wahrscheinliche Schadenausmass Sachwerte in Szenario  $j$  ist gegeben durch:

$$Aw(Sw)_j = Aw(G)_j + Aw(S)_j + Aw(B)_j + Aw(L)_j + Aw(F)_j \quad [CHF] \quad (44)$$

Daraus ergibt sich schliesslich das gesamte wahrscheinliche Schadenausmass in Szenario  $j$ :

$$Aw_j = Aw(Sw)_j + Aw(P)_j \quad [CHF] \quad (45)$$

wobei

$Aw(P)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen in Szenario $j$ . Das Personenschadenausmass ist monetarisiert mit 5 Mio. CHF pro verhinderten Todesfall.	[CHF]
$Aw(Sw)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw_j$	Gesamtes wahrscheinliches Schadenausmass in Szenario $j$ .	[CHF]
$GK$	Grenzkosten, standardmässig mit 5 Millionen CHF pro verhindertes Todesopfer festgelegt.	[1/Tf]
$Aw(PG)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen (Anzahl Todesfälle) für alle fixen Objekte (Gebäude, Sonderobjekte) in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PS)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen im Strassenverkehr bzw. in mechanischen Aufstiegshilfen in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PB)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(G)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für alle fixen Objekte (Gebäude, Sonderobjekte) in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(S)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass fixe Sachwerte für den Strassenverkehr und mechanische Aufstiegshilfen in Szenario $j$ .	[CHF]

$Aw(B)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für den Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(L)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für Leitungen in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(F)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für Flächenobjekte (z.B. Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen) in Szenario $j$ .	[CHF]

## 7 Kollektives Risiko

Das kollektive Risiko wird wie im Tool RiskPlan nach der Treppenfunktion berechnet. Die Grundlage ist die Darstellung des Risikos im komplementär-kumulativem Häufigkeits-Ausmass Diagramm (s. Abbildung 6 im Anhang).

In der Risikoermittlung wird das berechnete Schadenausmass mit der Häufigkeit der massgebenden Szenarien verknüpft:

$$R_j = p_j \cdot Aw_j \quad \left[ \frac{CHF}{a} \right] \quad (46)$$

$$R = \sum_j R_j \quad \left[ \frac{CHF}{a} \right] \quad (47)$$

wobei

$R_j$	Kollektives Risiko in Szenario $j$ .	$\left[ \frac{CHF}{a} \right]$
$R$	Gesamtes kollektives Risiko (s. Anhang C.8 für eine Beispielrechnung).	$\left[ \frac{CHF}{a} \right]$
$p_j$	Häufigkeit des Szenarios $j$ (s. Formeln 48 und 49).	$[1/a]$
$Aw_j$	Gesamtes wahrscheinliches Schadenausmass in Szenario $j$ .	[CHF]

$$p_j = P_j - P_{j+1} \quad [1/a] \quad (48)$$

$$P_j = \frac{1}{T_j} \quad [1/a] \quad (49)$$

wobei

$p_j$	Häufigkeit des Szenarios $j$	$[1/a]$
$P_j$	Überschreitenswahrscheinlichkeit des Szenarios $j$ .	$[1/a]$
$T_j$	Jährlichkeit des Szenarios $j$ .	$[a]$

Werden Szenarien mit einer Jährlichkeit von  $T < 1$  Jahr berücksichtigt, dann wird die Häufigkeit dieses Szenarios *nicht* als Differenz zum nächsten Szenario (d.h. nicht komplementär) bestimmt.

## 8 Durchschnittliches individuelles Risiko

### 8.1 Personen in fixen Objekten (Gebäude, Sonderobjekte)

Die individuelle Todesfallwahrscheinlichkeit für Personen in fixen Objekten ist gegeben durch:

$$p(PG)_{i,j} = Aw(PG)_{i,j} \cdot \frac{1}{N(P)_i} \quad [-] \quad (50)$$

wobei

$p(PG)_{i,j}$	Individuelle Todesfallwahrscheinlichkeit einer Person im fixen Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Szenario $j$ .	$[-]$
$Aw(PG)_{i,j}$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen (Anzahl Todesfälle) für das fixe Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Szenario $j$ .	$[Tf]$
$N(P)_i$	Anzahl durchschnittlich anwesender Personen im fixen Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt).	$[Pers.]$

### 8.2 Personen auf Strasse und in mechanischen Aufstiegs- hilfen

Die individuelle Todesfallwahrscheinlichkeit für Personen im Strassenverkehr und in mechanischen Aufstiegs-  
hilfen ist gegeben durch:

$$p(PS)_{i,j} = Aw(PS)_j \cdot \frac{z(S)}{DTV \cdot \beta(S)} \quad [-] \quad (51)$$

wobei

$p(PS)_{i,j}$	Individuelle Todesfallwahrscheinlichkeit einer Person $i$ auf der Strasse bzw. in einer mechanischen Aufstiegs- hilfe in Szenario $j$ .	$[-]$
$Aw(PS)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen im Strassenverkehr bzw. in mechanischen Aufstiegs- hilfen in Szenario $j$ .	$[Tf]$

$z(S)$	Anzahl Durchfahrten derselben Person. <sup>10</sup>	[1/d]
$DTV$	Durchschnittlicher täglicher Verkehr (Strassenverkehr bzw. mechanische Aufstiegshilfen). Bei mechanischen Aufstiegshilfen entspricht dies der durchschnittlichen Anzahl transportierter Personen pro Tag.	[1/d]
$\beta(S)$	Durchschnittlicher Besetzungsgrad Strassenfahrzeuge bzw. mechanischer Aufstiegshilfen. <sup>E</sup>	[Pers.]

### 8.3 Personen im Schienenverkehr

Die individuelle Todesfallwahrscheinlichkeit für Personen im Schienenverkehr ist gegeben durch:

$$p(PB)_{i,j} = \left( Aw(PBAnp)_j + \frac{Aw(PBDir)_j + Aw(PBKol)_j}{Fz} \right) \cdot \frac{z(B)}{\beta(B)} \quad [-] \quad (52)$$

wobei

$p(PB)_{i,j}$	Individuelle Todesfallwahrscheinlichkeit einer Person $i$ im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[-]
$Aw(PBAnp)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Anprall im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PBDir)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Direkttreffer im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PBKol)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Kollision mit Gegenzug im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$Fz$	Durchschnittliche Anzahl Zugsdurchfahrten pro Tag.	[1/d]
$z(B)$	Anzahl Durchfahrten derselben Person. <sup>11</sup>	[1/d]
$\beta(B)$	Durchschnittlicher Besetzungsgrad Zug.	[Pers.]

N.B. Das wahrscheinliche Schadenausmass Personen bei Anprall  $Aw(PBAnp)$  ist im Gegensatz zu den wahrscheinlichen Schadenausmassen Personen bei Direkttreffer und Kollision,  $Aw(PBDir)$  und  $Aw(PBKol)$ , nicht abhängig von

<sup>10</sup>Standardmässig ist in EconoMe der Wert auf 4 Durchfahrten pro Tag festgelegt. Der Wert kann in den Schritten 6 und 9 des EconoMe-Tools geändert werden.

<sup>11</sup>Standardmässig ist in EconoMe der Wert auf 2 Durchfahrten pro Tag festgelegt. Der Wert kann in den Schritten 4, 6 und 9 des EconoMe-Tools geändert werden.

der durchschnittlichen Anzahl Zugsdurchfahrten pro Tag  $Fz$  und wird deshalb von Bruch ausgenommen.

## 8.4 Berechnen des durchschnittlichen individuellen Risikos

Das durchschnittliche individuelle Risiko einer Person  $i$  in einem Szenario  $j$  berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 r_{i,j} &= p_j \cdot p(PG)_{i,j} \\
 &\text{bzw.} \\
 r_{i,j} &= p_j \cdot p(Ps)_{i,j} && [1/a] && (53) \\
 &\text{bzw.} \\
 r_{i,j} &= p_j \cdot p(PB)_{i,j}
 \end{aligned}$$

Das durchschnittliche individuelle Risiko einer Person  $i$  über alle Szenarien ergibt sich aus der Summe über die verschiedenen Szenarien:

$$\begin{aligned}
 r_i &= \sum_j p_j \cdot p(PG)_{i,j} \\
 &\text{bzw.} \\
 r_i &= \sum_j p_j \cdot p(Ps)_{i,j} && [1/a] && (54) \\
 &\text{bzw.} \\
 r_i &= \sum_j p_j \cdot p(PB)_{i,j}
 \end{aligned}$$

wobei

$r_{i,j}$	Durchschnittliches individuelles Risiko einer Person $i$ in Szenario $j$ .	$[1/a]$
$r_i$	Durchschnittliches individuelles Risiko einer Person $i$ über alle Szenarien.	$[1/a]$
$p_j$	Häufigkeit des Szenarios $j$ (s. Formeln 48 und 49).	$[1/a]$
$p(PG)_{i,j}$	Individuelle Todesfallwahrscheinlichkeit einer Person $i$ in einem fixen Objekt (Gebäude, Sonderobjekt) in Szenario $j$ .	$[-]$

- $p(PS)_{i,j}$  Individuelle Todesfallwahrscheinlichkeit einer Person  $i$  [-]  
auf der Strasse bzw. in einer mechanischen Aufstiegs-  
hilfe in Szenario  $j$ .
- $p(PB)_{i,j}$  Individuelle Todesfallwahrscheinlichkeit einer Person  $i$  [-]  
im Schienenverkehr in Szenario  $j$ .

## 9 Nutzen/Kosten-Verhältnis

### 9.1 Bestimmen der Wirksamkeit (Risikoverminderung)

Das Risiko kann für jedes Szenario quantifiziert werden und heisst Ausgangsrisiko  $R(0)$ . Nach Ausführung einer Massnahme wird das verbleibende Restrisiko  $R(r)$  beurteilt. Die Differenz entspricht der Wirksamkeit der Massnahmen, d.h. der Risikoverminderung  $\Delta R$  bzw. der messbaren Schutzleistung. Da die Wirksamkeit von Massnahmen in EconoMe als alleiniger Nutzen quantifiziert wird, wird diese als Nutzen bezeichnet, welcher durch die Schutzmassnahmen entsteht.

### 9.2 Abschätzen der Kosten

Um das Ausgangsrisiko zu vermindern, sind Investitionskosten  $I(0)$  für die Realisierung der Massnahmen notwendig. Diese Kosten werden aufgrund von Erfahrungswerten abgeschätzt. Im Gegensatz zum reduzierten jährlichen Risiko  $\Delta R$  fallen die Investitionskosten  $I(0)$  hauptsächlich einmalig zu Baubeginn an. Damit die investierten Kosten  $I(0)$  und die jährlichen Betriebs-, Unterhalts- und Reparaturkosten mit der jährlichen Risikoverminderung  $\Delta R$  verglichen werden können, müssen beide über einen gleichen Untersuchungszeitraum beurteilt werden. Sie werden wie folgt in jährliche Kosten umgewandelt:

$$K(j) = K(b) + K(u) + \frac{I(0) - L(n)}{n} \left[ \frac{CHF}{a} \right] + \frac{I(0) + L(n)}{2} \cdot \frac{p}{100} \quad (55)$$

wobei

- $K(j)$  Jährliche Gesamtkosten.  $\left[ \frac{CHF}{a} \right]$   
 $K(b)$  Jährliche Betriebskosten (z.B. Beleuchtung, Lüftung, Sprengstoff etc.).  $\left[ \frac{CHF}{a} \right]$   
 $K(u)$  Jährliche Unterhalts- und Reparaturkosten.  $\left[ \frac{CHF}{a} \right]$   
 $I(0)$  Investitionskosten.  $[CHF]$

$L(n)$	Restwert der Schutzmassnahme nach $n$ Jahren Laufzeit (in der Regel $L(n) = 0$ ).	[CHF]
$n$	Laufzeit der Schutzmassnahme.	[a]
$p$	Zinssatz (2 %).	[%]

In EconoMe werden im Online-Tool als Hilfe Richtwerte für die Betriebs- und Unterhalts- und Reparaturkosten sowie die Laufzeit der jeweiligen Schutzmassnahmen vorgegeben.

### 9.3 Bestimmen des Nutzen/Kosten-Verhältnisses

Das Nutzen/Kosten-Verhältnis ist ein Mass für die Wirtschaftlichkeit der Investition. Massnahmen bzw. Massnahmenkombinationen, deren Quotient aus Nutzen zu Kosten  $\geq 1$  ist, sind als kostenwirksam einzustufen.

$$NKV = \frac{R(0) - R(r)}{K(j)} = \frac{\Delta R}{K(j)} \quad [-] \quad (56)$$

wobei

$NKV$	Nutzen/Kosten-Verhältnis der Massnahme(-nkombination). Wenn $NKV \geq 1$ , dann ist die Massnahme als kostenwirksam einzustufen.	[-]
$R(0)$	Ausgangsrisiko.	$\left[\frac{CHF}{a}\right]$
$R(r)$	Restrisiko.	$\left[\frac{CHF}{a}\right]$
$K(j)$	Jährliche Gesamtkosten.	$\left[\frac{CHF}{a}\right]$
$\Delta R$	Risikoverminderung.	$\left[\frac{CHF}{a}\right]$

## Anmerkungen

<sup>A</sup> In der Risikothorie (Bründl, 2009) wird zwischen *Schadenausmass* und *wahrscheinlichem Schadenausmass* unterschieden, damit ein klarer Unterschied gegeben ist zwischen dem Schadenausmass *im Ereignisfall* (Objekt wird tatsächlich getroffen) und dem Schadenausmass, welches *unter Annahme einer bestimmten räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit* zu erwarten ist (wahrscheinliches Schadenausmass). Ein allfälliger Aversionsfaktor ist jeweils auf das Schadenausmass (im Ereignisfall) anzuwenden. Darauf wird jedoch in EconoMe verzichtet, weshalb in dieser Formelsammlung jeweils nur das wahrscheinliche Schadenausmass erwähnt wird.

<sup>B</sup> Der Wert liegt zwischen 0 und 1. Der Wert 1 bedeutet, dass bezogen auf eine Person mit einem Todesfall zu rechnen ist.

<sup>C</sup> Der Wert liegt zwischen 0 und 1. Der Wert 1 bedeutet, dass das Objekt zu 100 % geschützt ist und kein Schaden erwartet werden muss.

<sup>D</sup> Der Wert liegt zwischen 0 und 1. Der Wert 1 bedeutet, dass das Objekt zu 100 % zerstört ist.

<sup>E</sup> Standardmässig ist in EconoMe der Wert auf 1.76 Personen/Personenwagen festgelegt. Bei mechanischen Aufstiegshilfen beträgt dieser Wert 1.0.

<sup>F</sup> Bsp. Szenario 30 Jahre: 10 m mittlere, 90 m starke Intensität  $\Rightarrow g_{30} = 100$  m

<sup>G</sup> Es wird zwischen Personen- und Güterzügen unterschieden.

<sup>H</sup> Beim Schadenbild *Direkttreffer bei Fahren auf Sicht* wird nicht zwischen Entgleisen und Nicht-Entgleisen unterschieden, da dies nur von Bedeutung ist im Hinblick auf eine mögliche Kollision mit einem Gegenzug. Bei Fahren auf Sicht ist eine Kollision allerdings unwahrscheinlich (s. auch Anmerkung **J**) und somit ist die Fallunterscheidung Entgleisen/nicht Entgleisen hinfällig.

<sup>I</sup> Im EconoMe-Tool wird die Wahrscheinlichkeit Anprall  $p(Anp)$  mit dem Verhältnis von Personen- bzw. Güterzugsdurchfahrten zur Gesamtanzahl Zugsdurchfahrten multipliziert, d.h. es wird beim Parameter  $p(Anp)$  zwischen Personen- und Güterzügen unterschieden. Dies dient zur Berücksichtigung der Fälle, in denen ein Güterzug auf abgelagertes Material auffährt und somit einen Personenzug vor diesem Schicksal bewahrt. Wie auch beim Schadenbild *Kollision mit Gegenzug* wird für das Schadenbild *Anprall auf abgelagertes Material* nur das Schadenausmass für Personenzüge berechnet. Das Schadenausmass bei Güterzügen wird

nicht berücksichtigt.

Im EconoMe-Tool wird die Anprallwahrscheinlichkeit von Personenzügen berechnet als:

$$p(Anp)_{Personenzug} = (1 - \overline{p(Anp)}) \cdot \frac{\text{Personenzugsdurchfahrten}}{\text{Zugsdurchfahrten gesamt}}$$

Die Anprallwahrscheinlichkeit von Güterzügen berechnet sich entsprechend:

$$p(Anp)_{Güterzug} = (1 - \overline{p(Anp)}) \cdot \frac{\text{Güterzugsdurchfahrten}}{\text{Zugsdurchfahrten gesamt}}$$

<sup>J</sup> Bei Fahren auf Sicht ist die Zuggeschwindigkeit gedrosselt, sodass ein Anprall durch frühzeitiges Abbremsen verhindert werden kann, falls die Schiene durch Ablagerungen blockiert sein sollte. Somit ist das Schadenbild *Anprall bei Fahren auf Sicht* unwahrscheinlich und wird vernachlässigt.

<sup>K</sup> Bei Fahren auf Sicht ist die Zuggeschwindigkeit gedrosselt, sodass eine Kollision durch frühzeitiges Abbremsen verhindert werden kann, falls die Schiene durch einen entgleisten Gegenzug blockiert sein sollte. Somit ist das Schadenbild *Kollision bei Fahren auf Sicht* unwahrscheinlich und wird vernachlässigt.

<sup>L</sup> Es wird jeweils zwischen drei Kollisionsfällen unterschieden: *Personenzug kollidiert mit Personenzug*, *Personenzug kollidiert mit Güterzug* und *Güterzug kollidiert mit Personenzug*. Für Güterzüge sind Besetzung  $\beta(B) = 0$  und Sachwert  $W(B) = 0$ , da Schäden bei Güterzügen in EconoMe zurzeit nicht berücksichtigt werden.

<sup>M</sup> Der Faktor  $\frac{g_j}{g_{vM,j}}$  gewährleistet, dass die Situation *vor Massnahme* und *nach Massnahme* sich auf dieselbe gefährdete Strecke beziehen (nämlich die ursprüngliche in der Situation *vor Massnahme*) und somit die berechneten wahrscheinlichen Schadenausmasse verglichen werden können. Der Faktor hat in der Situation *vor Massnahme* keinen Einfluss, da  $\frac{g_j}{g_{vM,j}} = \frac{g_j}{g_j} = 1$ . Der Einbezug von  $\frac{g_j}{g_{vM,j}}$  ist nur für Linienobjekte des Schienenverkehrs bei Direkttreffer nötig, da bei allen anderen Linien- bzw. Flächenobjekten der gefährdete Abschnitt bzw. die gefährdete Fläche bei der Berechnung des wahrscheinlichen Schadenausmasses direkt einfließt. Beim Schienenverkehr ist die gefährdete Strecke zwar im wahrscheinlichen Schadenausmass über die Wahrscheinlichkeit Direkttreffer  $p(Dir)$  enthalten, allerdings als Summand und nicht als Faktor.

**Beispiel** 30-jährliche Lawine

*Situation vor Massnahme*: 50 m schwache, 30 mittlere und 20 m starke Intensität

$$\Rightarrow \frac{g_{30}}{g_{vM,30}} = \frac{50 + 30 + 20}{50 + 30 + 20} = \frac{100}{100} = 1$$

*Situation nach Massnahme: 10 m schwache, 10 m mittlere Intensität*

$$\Rightarrow \frac{g_{30}}{g_{vM,30}} = \frac{10 + 10}{50 + 30 + 20} = \frac{20}{100} = \frac{1}{5}$$

<sup>N</sup> Beim gesamten wahrscheinlichen Schadenausmass Personen bzw. Sachwerte bei Kollision mit Gegenzug wird nicht mehr zwischen den drei Kollisionsfällen *Personenzug kollidiert mit Personenzug*, *Personenzug kollidiert mit Güterzug* und *Güterzug kollidiert mit Personenzug* unterschieden. Stattdessen werden alle wahrscheinlichen Schadenausmassen Personen bzw. Sachwerte Kollision mit Gegenzug, sowohl bei Entgleisung infolge eines Direkttreffers wie auch bei Entgleisung infolge eines Anpralls, zusammengezählt.

## Literatur

- [Arbeitsgruppe EconoMe 2015] ARBEITSGRUPPE ECONOME: *Arbeitssitzung EconoMe vom 31.03.2015*. 2015
- [Arbeitsgruppe EconoMe-Railway 2010a] ARBEITSGRUPPE ECONOME-RAILWAY: *Arbeitssitzung EconoMe-Railway vom 01.06.2010*. 2010
- [Arbeitsgruppe EconoMe-Railway 2010b] ARBEITSGRUPPE ECONOME-RAILWAY: *Arbeitssitzung EconoMe-Railway vom 20.07.2010*. 2010
- [Arbeitsgruppe EconoMe-Railway 2010c] ARBEITSGRUPPE ECONOME-RAILWAY: *Arbeitssitzung EconoMe-Railway vom 25.03.2010*. 2010
- [Arbeitsgruppe EconoMe-Railway 2010d] ARBEITSGRUPPE ECONOME-RAILWAY: *Arbeitssitzung EconoMe-Railway vom 4.11.2010*. 2010
- [BAV 2010] BAV: *Rückmeldung BAV zu Bericht*. 2010. – Schaller, T.
- [Borter 1999] BORTER, P.: *Risikoanalysen bei gravitativen Naturgefahren. Methode*. Bern : Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, 1999 (Umwelt-Materialien Nr. 107/I)
- [Bründl 2009] BRÜNDL, M. (Hrsg.): *Risikokzept für Naturgefahren - Leitfaden*. Bern : Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, 2009. – 420 S.
- [Bründl et al. 2011] BRÜNDL, M. ; KRUMMENACHER, B. ; RHEINBERGER, C. ; WINKLER, C.: *Formeln zur Berechnung des Risikos bei Naturgefahren*. 2011. – Version 21. Dezember 2011
- [Liener und Schönthal 2014] LIENER, S. ; SCHÖNTHAL, E.: *Auswertung Ereigniskataster Bahnlinien / geo7*. 2014. – Forschungsbericht
- [SBB SI - Sicherheitsmanagement 2010] SBB SI - SICHERHEITSMANAGEMENT: *Erfahrungswerte*. 2010
- [Wilhelm 1997] WILHELM, C.: *Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz. Methodik und Erhebungen zur Beurteilung von Schutzmassnahmen mittels quantitativer Risikoanalyse und ökonomischer Bewertung / Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung*. Davos, 1997. – Forschungsbericht. SLF Mitteilungen 52
- [Wilhelm 1999] WILHELM, C.: *Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutz-Massnahmen an Verkehrsachsen. Vorgehen, Beispiele und Grundlagen der Projektevaluation / BUWAL*. Bern, 1999. – Forschungsbericht

[Winkler und Burkard 2005] WINKLER, C. ; BURKARD, A.: *Pflichtenheft Risikoanalysen Naturgefahren SBB. Interne Arbeitsgrundlage*. Version 20. Mai 2005. Brig: Schweizerischen Bundesbahnen SBB, wasser/schnee/lawinen (Veranst.), 2005

[Winkler et al. 2012] WINKLER, C. ; LAMBRIGGER, A. ; BRÜNDL, M.: *EconoMeRailway. Risikoanalysen Naturgefahren entlang von Bahnstrecken. Methodik*. 2012. – Version 25. Juni 2012

## A Glossar

<i>a</i>	Jahr (Einheit)
<i>Anp</i>	Anprall (Schienenverkehr)
<i>Aw</i>	ein wahrscheinliches Schadenausmass
<i>B</i>	betrifft Schienenverkehr
<i>BLO</i>	betrifft Linienobjekte des Schienenverkehrs
<i>BPO</i>	betrifft Punktobjekte des Schienenverkehrs
<i>CHF</i>	Schweizer Franken (Einheit)
<i>Dir</i>	Direkttreffer (Schienenverkehr)
<i>F</i>	betrifft Flächenobjekte (z.B. Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen)
<i>FaS</i>	Fahren auf Sicht (Schienenverkehr)
<i>fB</i>	betrifft fixe Sachwerte des Schienenverkehrs
<i>G</i>	betrifft fixe Objekte (Gebäude, Sonderobjekte)
$\cdot_i$	bezieht sich auf ein Objekt <i>i</i>
$\cdot_j$	bezieht sich auf das Szenario <i>j</i>
<i>Kol</i>	Kollision mit Gegenzug (Schienenverkehr)
<i>KolAnp</i>	Kollision mit Gegenzug infolge Entgleisung durch Anprall (Schienenverkehr)
<i>KolDir</i>	Kollision mit Gegenzug infolge Entgleisung durch Direkttreffer (Schienenverkehr)
<i>L</i>	betrifft Leitungen
$\cdot_m$	bezieht sich auf mittlere Intensität
<i>mB</i>	betrifft mobile Sachwerte des Schienenverkehrs
<i>N(·)</i>	eine Anzahl
<i>P</i>	betrifft Personen
<i>p(·)</i>	eine Wahrscheinlichkeit
<i>Pers.</i>	Personen (Einheit)
<i>S</i>	betrifft Strassenverkehr bzw. mechanische Aufstiegshilfen
$\cdot_s$	bezieht sich auf schwache Intensität
<i>SE(·)</i>	eine Schadenempfindlichkeit
$\cdot_{st}$	bezieht sich auf starke Intensität
<i>Tf</i>	Todesfälle (Einheit)

$v(\cdot)$	eine durchschnittliche Geschwindigkeit (Strassenverkehr, mechanische Aufstiegshilfen, Schienenverkehr)
$W(\cdot)$	ein Sach(schaden)wert
$z$	betrifft einen Gegenzug (Schienenverkehr)
$z(\cdot)$	eine Anzahl Durchfahrten derselben Person (Strassenverkehr, mechanische Aufstiegshilfen, Schienenverkehr)
$\beta(\cdot)$	ein durchschnittlicher Besetzungsgrad (Strassenverkehr, mechanische Aufstiegshilfen, Schienenverkehr)
$\lambda(\cdot)$	eine Letalität

## B Parameterverzeichnis

$Aw_j$	Gesamtes wahrscheinliches Schadenausmass in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(B)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für den Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(BLO)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für Linienobjekte des Schienenverkehrs in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(BPO)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für Punktobjekte des Schienenverkehrs in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(F)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für Flächenobjekte (z.B. Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen) in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(fB)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass fixe Sachwerte für den Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(G)_{i,j}$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für das fixe Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(G)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für alle fixen Objekte (Gebäude, Sonderobjekte) in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(L)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für Leitungen in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(mB)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte für den Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(mBAnp)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte bei Anprall im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(mBDir)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte bei Direkttreffer im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]

$Aw(mBKol)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte bei Kollision mit Gegenzug im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(mBKolAnp)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte bei Kollision mit Gegenzug (Entgleisung infolge Anpralls) im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(mBKolDir)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte bei Kollision mit Gegenzug (Entgleisung infolge Direkttreffers) im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[CHF]
$Aw(P)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen in Szenario $j$ . Das Personenschadenausmass ist monetarisiert mit 5 Mio. CHF pro verhinderten Todesfall.	[CHF]
$Aw(PB)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PBAnp)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Anprall im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PBDir)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Direkttreffer im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PBKol)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Kollision mit Gegenzug im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PBKolAnp)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Kollision mit Gegenzug (Entgleisung infolge Anpralls) im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PBKolDir)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Kollision mit Gegenzug (Entgleisung infolge Direkttreffers) im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[Tf]
$Aw(PG)_{i,j}$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen (Anzahl Todesfälle) für das fixe Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Szenario $j$ .	[Tf]

$Aw(PG)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen (Anzahl Todesfälle) für alle fixen Objekte (Gebäude, Sonderobjekte) in Szenario $j$ .	[ $Tf$ ]
$Aw(PS)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Personen im Strassenverkehr bzw. in mechanischen Aufstiegshilfen in Szenario $j$ .	[ $Tf$ ]
$Aw(S)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass fixe Sachwerte für den Strassenverkehr und mechanische Aufstiegshilfen in Szenario $j$ .	[ $CHF$ ]
$Aw(Sw)_j$	Wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte in Szenario $j$ .	[ $CHF$ ]
$DTV$	Durchschnittlicher täglicher Verkehr (Strassenverkehr bzw. mechanische Aufstiegshilfen). Bei mechanischen Aufstiegshilfen entspricht dies der durchschnittlichen Anzahl transportierter Personen pro Tag.	[ $1/d$ ]
$F_j$	Gesamte gefährdete Fläche in Szenario $j$ , berechnet als Summe der gefährdeten Flächen in schwacher, mittlerer und starker Intensität.	[ $Are$ ]
$F_s, F_m, F_{st}$	Gefährdete Fläche im gegebenen Szenario in schwacher, mittlerer bzw. starker Intensität.	[ $Are$ ]
$Fz$	Durchschnittliche Anzahl Zugsdurchfahrten pro Tag.	[ $1/d$ ]
$GK$	Grenzkosten, standardmässig mit 5 Millionen CHF pro verhindertes Todesopfer festgelegt.	[ $1/Tf$ ]
$g_j$	Länge der gesamten gefährdeten Strecke in Szenario $j$ , berechnet als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher, mittlerer und starker Intensität.	[ $m$ ]
$g_{s,j}, g_{m,j}, g_{st,j}$	Länge der gefährdeten Abschnitte in Szenario $j$ in schwacher, mittlerer bzw. starker Intensität.	[ $m$ ]
$g_{vM,j}$	Länge der gesamten ursprünglich gefährdeten Strecke (Situation vor <i>Massnahme</i> ) in Szenario $j$ . <sup>M</sup>	[ $m$ ]

$I(0)$	Investitionskosten.	[CHF]
$K(b)$	Jährliche Betriebskosten (z.B. Beleuchtung, Lüftung, Sprengstoff etc.).	$[\frac{CHF}{a}]$
$K(j)$	Jährliche Gesamtkosten.	$[\frac{CHF}{a}]$
$K(u)$	Jährliche Unterhalts- und Reparaturkosten.	$[\frac{CHF}{a}]$
$l(B)$	Durchschnittliche Zuglänge.	[m]
$L(n)$	Restwert der Schutzmassnahme nach $n$ Jahren Laufzeit (in der Regel $L(n) = 0$ ).	[CHF]
$n$	Laufzeit der Schutzmassnahme.	[a]
$N(Gl)$	Anzahl Geleise im gefährdeten Streckenabschnitt.	[-]
$NKV$	Nutzen/Kosten-Verhältnis der Massnahme(-kombination). Wenn $NKV \geq 1$ , dann ist die Massnahme als kostenwirksam einzustufen.	[-]
$N(P)_i$	Anzahl durchschnittlich anwesender Personen im fixen Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt).	[Pers.]
$p$	Zinssatz (2 %).	[%]
$P_j$	Überschreitenswahrscheinlichkeit des Szenarios $j$ .	$[1/a]$
$p_j$	Häufigkeit des Szenarios $j$ .	$[1/a]$
$p(Anp)$	Wahrscheinlichkeit Anprall.	[-]
$\overline{p(Anp)}$	Wahrscheinlichkeit, dass es nicht zu einem Anprall kommt.	[-]
$p(Dir)_j$	Wahrscheinlichkeit Direkttreffer in Szenario $j$ .	[-]
$p(Dir)FaS_j$	Wahrscheinlichkeit Direkttreffer in Szenario $j$ bei Fahren auf Sicht.	[-]
$p(EAnp)_j$	Entgleisungswahrscheinlichkeit infolge Anpralls in Abhängigkeit des Prozesses, der Intensität und der Zuggeschwindigkeit (s. Anhang C.6).	[-]
$p(EDir)_j$	Entgleisungswahrscheinlichkeit infolge Direkttreffers in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität (s. Anhang C.6).	[-]

$p(EGl)$	Ereigniswahrscheinlichkeit im Gleisbereich (s. Anhang C.4).	[-]
$p(FaS)$	Wahrscheinlichkeit, dass Fahren auf Sicht angeordnet wird (s. Anhang C.3.2).	[-]
$p(Kol)$	Wahrscheinlichkeit Kollision mit Gegenzug innerhalb von 4 Minuten nach Entgleisung (s. Anhang C.7).	[-]
$p(PB)_{i,j}$	Individuelle Todesfallwahrscheinlichkeit einer Person $i$ im Schienenverkehr in Szenario $j$ .	[-]
$p(PG)_{i,j}$	Individuelle Todesfallwahrscheinlichkeit einer Person im fixen Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Szenario $j$ .	[-]
$p(pr)_i$	Präsenzwahrscheinlichkeit einer Person im fixen Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt).	[-]
$p(PS)_{i,j}$	Individuelle Todesfallwahrscheinlichkeit einer Person $i$ auf der Strasse bzw. in einer mechanischen Aufstiegshilfe in Szenario $j$ .	[-]
$p(rA)_j$	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.1).	[-]
$p(SAnp)_j$	Wahrscheinlichkeit des Schadenbildes Anprall in Szenario $j$ als Summe der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Schadenbilder Anprall.	[-]
$p(SAnp_n)_j$	Wahrscheinlichkeit der einzelnen Schadenbilder Anprall in Szenario $j$ .	[-]
$p(SDir)_j$	Wahrscheinlichkeit des Schadenbildes Direkttreffer in Szenario $j$ als Summe der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Schadenbilder Direkttreffer.	[-]
$p(SDir_n)_j$	Wahrscheinlichkeit der einzelnen Schadenbilder Direkttreffer in Szenario $j$ .	[-]
$p(SKol_n)_j$	Wahrscheinlichkeit der einzelnen Schadenbilder Kollision mit Gegenzug in Szenario $j$ .	[-]

$p(uF)$	Wahrscheinlichkeit, dass die Fahrleitung unterbrochen ist und der Lokführer rechtzeitig gewarnt werden kann (s. Anhang C.5).	[-]
$p(VLp)$	Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug sein Lichtraumprofil verlässt und das Lichtraumprofil des Gegengeleises gelangt, $p(VLp) = 0.4$ (Quelle: BAV (2010)).	[-]
$p(vSp)$	Wahrscheinlichkeit vorsorgliche Sperrung (s. Anhang C.3.1).	[-]
$p(wa)$	Wahrscheinlichkeit, dass der Lokführer rechtzeitig gewarnt werden kann (s. Anhang C.5).	[-]
$p(z)$	Wahrscheinlichkeit, dass ein Gegenzug innerhalb einer Minute kommt.	[-]
$R$	Gesamtes kollektives Risiko (s. Anhang C.8 für eine Beispielrechnung).	$[\frac{CHF}{a}]$
$r_i$	Durchschnittliches individuelles Risiko einer Person $i$ über alle Szenarien.	$[1/a]$
$r_{i,j}$	Durchschnittliches individuelles Risiko einer Person $i$ in Szenario $j$ .	$[1/a]$
$R_j$	Kollektives Risiko in Szenario $j$ .	$[\frac{CHF}{a}]$
$R(r)$	Restrisiko.	$[\frac{CHF}{a}]$
$R(0)$	Ausgangsrisiko.	$[\frac{CHF}{a}]$
$\Delta R$	Risikoverminderung.	$[\frac{CHF}{a}]$
$SE(\cdot)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Schadenempfindlichkeit (Strassenverkehr, mechanische Aufstiegshilfen, Schienenverkehr bzw. Leitungen) in Szenario $j$ . <sup>D</sup>	[-]
$SE(\cdot)_s, SE(\cdot)_m, SE(\cdot)_st$	Schadenempfindlichkeit (Strassenverkehr, mechanische Aufstiegshilfen, Schienenverkehr bzw. Leitungen) für schwache, mittlere bzw. starke Intensität in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.11). <sup>D</sup>	[-]

$SE(Anp)$	Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte bei Anprall im Schienenverkehr in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit und der Geländeverhältnisse (s. Anhang C.10). <sup>D</sup>	[-]
$SE(BLO)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Schadenempfindlichkeit Linienobjekt Schienenverkehr in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität. <sup>D</sup>	[-]
$SE(BPO)$	Schadenempfindlichkeit Punktobjekt Schienenverkehr in Abhängigkeit der Prozessintensität (s. Anhang C.11). <sup>D</sup>	[-]
$SE(Dir)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte bei Direkttreffer im Schienenverkehr in Szenario $j$ in Abhängigkeit der Geländeverhältnisse, des Prozesses und der Intensität. <sup>D</sup>	[-]
$SE(F)_j$	Über die gefährdete Fläche gemittelte Schadenempfindlichkeit Flächenobjekte (z.B. Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen) in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität. <sup>D</sup>	[-]
$SE(F)_s,$ $SE(F)_m,$ $SE(F)_st$	Schadenempfindlichkeit Flächenobjekte (z.B. Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen) für schwache, mittlere bzw. starke Intensität in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.11). <sup>D</sup>	[-]
$SE(G)_{i,j}$	Schadenempfindlichkeit fixes Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität (s. Anhang C.11). <sup>D</sup>	[-]
$SE(Kol)$	Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte bei Kollision mit Gegenzug in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Gegenzugs und der Geländeverhältnisse. Die Werte entsprechen der Schadenempfindlichkeit bei Anprall auf abgelagertes Material, wobei für den Gegenzug derselbe Betrieb (Normalbetrieb oder Fahren auf Sicht) gilt wie für den verursachenden Zug (s. Anhang C.10). <sup>D</sup>	[-]

$SE(L)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Schadenempfindlichkeit Leitung in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität. <sup>D</sup>	$[-]$
$SE(S)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Schadenempfindlichkeit Strasse bzw. mechanische Aufstiegshilfe in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität. <sup>D</sup>	$[-]$
$T_j$	Jährlichkeit des Szenarios $j$ .	$[a]$
$v(B)$	Durchschnittliche Geschwindigkeit der Züge im gefährdeten Streckenabschnitt.	$[\frac{km}{h}]$
$v(B)_{FaS}$	Durchschnittliche Geschwindigkeit der Züge im gefährdeten Streckenabschnitt während Fahren auf Sicht.	$[\frac{km}{h}]$
$v(S)$	Durchschnittliche Geschwindigkeit Strassenfahrzeuge bzw. mechanischer Aufstiegshilfen im gefährdeten Streckenabschnitt.	$[\frac{km}{h}]$
$W(BLO)$	Sachschadenwert Linienobjekt Schienenverkehr pro Laufmeter (s. Anhang C.11).	$[\frac{CHF}{m}]$
$W(BPO)$	Sachschadenwert Punktobjekt Schienenverkehr (s. Anhang C.11).	$[CHF]$
$W(F)$	Sachschadenwert Flächenobjekt (z.B. Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen) pro Are (s. Anhang C.11).	$[\frac{CHF}{Are}]$
$W(G)_i$	Sachwert fixes Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt, s. Anhang C.11).	$[CHF]$
$W(L)$	Sachschadenwert Leitung pro Laufmeter (s. Anhang C.11).	$[\frac{CHF}{m}]$
$W(mB)$	Sachwert Zug (s. Anhang C.11).	$[CHF]$
$W(S)$	Sachschadenwert Strasse bzw. mechanische Aufstiegshilfe pro Laufmeter (s. Anhang C.11).	$[\frac{CHF}{m}]$
$W(z)$	Sachwert Gegenzug (s. Anhang C.11).	$[CHF]$

$z(B)$	Anzahl Durchfahrten derselben Person (Schienenverkehr). Standardmässig ist in EconoMe der Wert auf 2 Durchfahrten pro Tag festgelegt. Der Wert kann geändert werden.	[1/d]
$z(S)$	Anzahl Durchfahrten derselben Person (Strassenverkehr bzw. mechanische Aufstiegshilfen). Standardmässig ist in EconoMe der Wert auf 4 Durchfahrten pro Tag festgelegt. Der Wert kann geändert werden.	[1/d]
$\beta(B)$	Durchschnittlicher Besetzungsgrad Zug.	[Pers.]
$\beta(S)$	Durchschnittlicher Besetzungsgrad Strassenfahrzeuge bzw. mechanischer Aufstiegshilfen. Standardmässig ist in EconoMe der Wert auf 1.76 Personen/Personenwagen festgelegt. Bei mechanischen Aufstiegshilfen beträgt dieser Wert 1.0.	[Pers.]
$\beta(z)$	Durchschnittlicher Besetzungsgrad Gegenzug.	[Pers.]
$\epsilon_i$	Objektschutzfaktor fixes Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität. <sup>C</sup>	[-]
$\lambda(\cdot)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Letalität Personen (im Strassenverkehr, in mechanischen Aufstiegshilfen bzw. im Schienenverkehr) in Szenario $j$ . <sup>B</sup>	[-]
$\lambda(\cdot)_s, \lambda(\cdot)_m, \lambda(\cdot)_{st}$	Letalität Personen (im Strassenverkehr, in mechanischen Aufstiegshilfen bzw. im Schienenverkehr) für schwache, mittlere bzw. starke Intensität in Abhängigkeit des Prozesses (s. Anhang C.11). <sup>B</sup>	[-]
$\lambda(Anp)$	Letalität Personen bei Anprall im Schienenverkehr in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, Intensität und Geländeverhältnisse (s. Anhang C.9). <sup>B</sup>	[-]
$\lambda(Dir)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Letalität Personen bei Direkttreffer im Schienenverkehr in Szenario $j$ in Abhängigkeit der Geländeverhältnisse, Zuggeschwindigkeit und Prozessintensität (s. Anhang C.9). <sup>B</sup>	[-]

$\lambda(G)_{i,j}$	Letalität Personen im fixen Objekt $i$ (Gebäude, Sonderobjekt) in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität (s. Anhang C.11). <sup>B</sup>	[-]
$\lambda(Kol)$	Letalität Personen bei Kollision mit Gegenzug in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Gegenzugs und der Geländeverhältnisse. Die Werte entsprechen der Letalität bei Anprall auf abgelagertes Material bei starker Intensität, wobei für den Gegenzug derselbe Betrieb (Normalbetrieb oder Fahren auf Sicht) gilt wie für den verursachenden Zug (s. Anhang C.9). <sup>B</sup>	[-]
$\lambda(S)_j$	Über die gefährdete Strecke gemittelte Letalität Personen im Strassenverkehr bzw. in mechanischen Aufstiegshilfen in Szenario $j$ in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität. <sup>B</sup>	[-]

## C Anhang

### C.1 Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit

Die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit  $p(rA)$  bezeichnet den Flächenanteil des Prozesses bezüglich des potenziell möglichen Prozessraumes für eine bestimmte Jährlichkeit, d.h. innerhalb des entsprechenden Szenarios. Richtwerte für die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit sind in Tabelle 1 enthalten. Vor allem für den Prozess *Hangmure/Rutschung spontan* wird allerdings empfohlen, die  $p(rA)$ -Werte im Einzelfall zu beurteilen.

Abbildung 1: Herleitung der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit  $p(rA)$  für flächige Betrachtungsräume (z.B. Siedlungsraum) und für Linienförmige Elemente (z.B. Verkehrsachsen) in Bezug auf die Umhüllende des entsprechenden Szenarios.

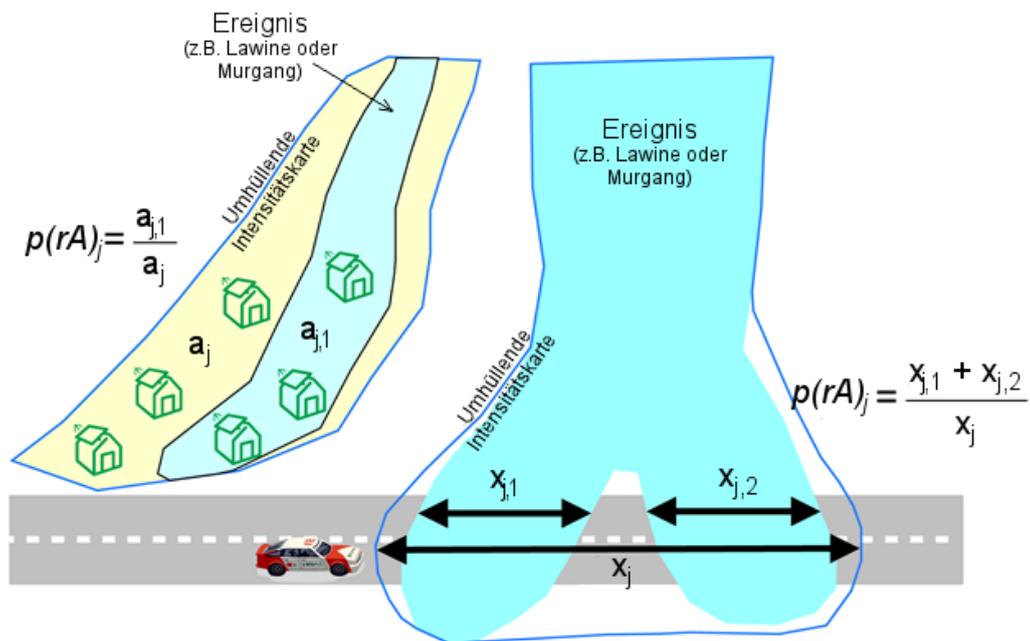


Tabelle 1: Richtwerte für die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit  $p(rA)$ .

<b>Prozess</b>	<b>Szenario frei &lt; 30</b>	<b>Szenario 30</b>	<b>Szenario 100</b>	<b>Szenario 300</b>	<b>Szenario extrem</b>
Lawine	0.8	0.7	0.6	0.8	1
Stein-Blockschlag	0.005	0.01	0.03	0.05	0.1
Felssturz	0.8	0.8	0.7	0.9	1
Rutschung permanent	1	1	1	1	1
Hangmure/ Rutschung spontan	0.05	0.1	0.3	0.5	1
Murgang/ Wasser aus Murgang	1	0.8	0.6	0.8	1
Überschwemmung statisch	1	1	1	1	1
Überschwemmung dynamisch	1	0.9	0.7	0.9	0.9

*Quelle: Arbeitsgruppe EconoMe (s. Impressum)*

## C.2 Übersicht aller möglichen Schadenbilder im Schienenverkehr

Abbildung 2: Ereignisbaum aller möglichen Schadenbilder im Schienenverkehr

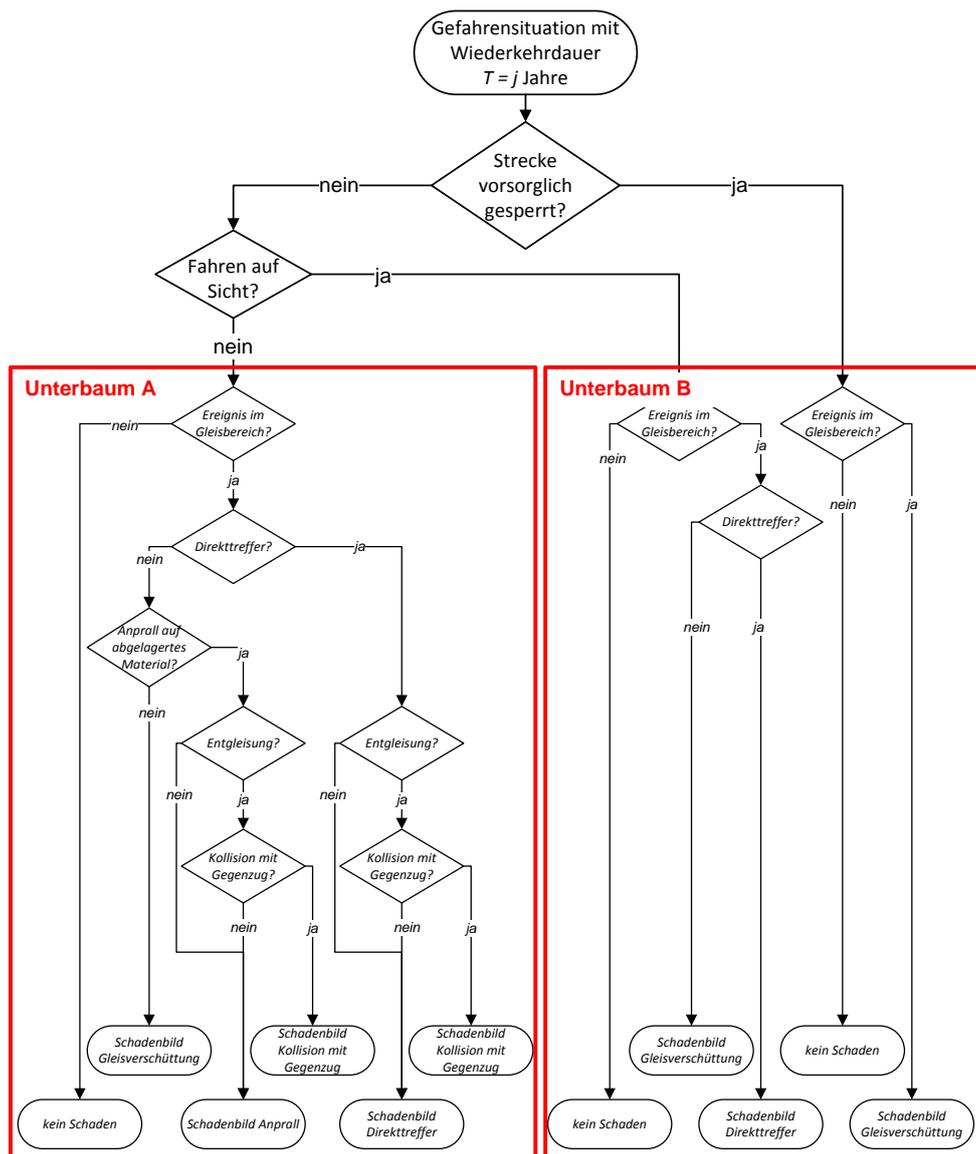


Abbildung 3: Ereignisunterbaum A der möglichen Schadenbilder im Schienenverkehr

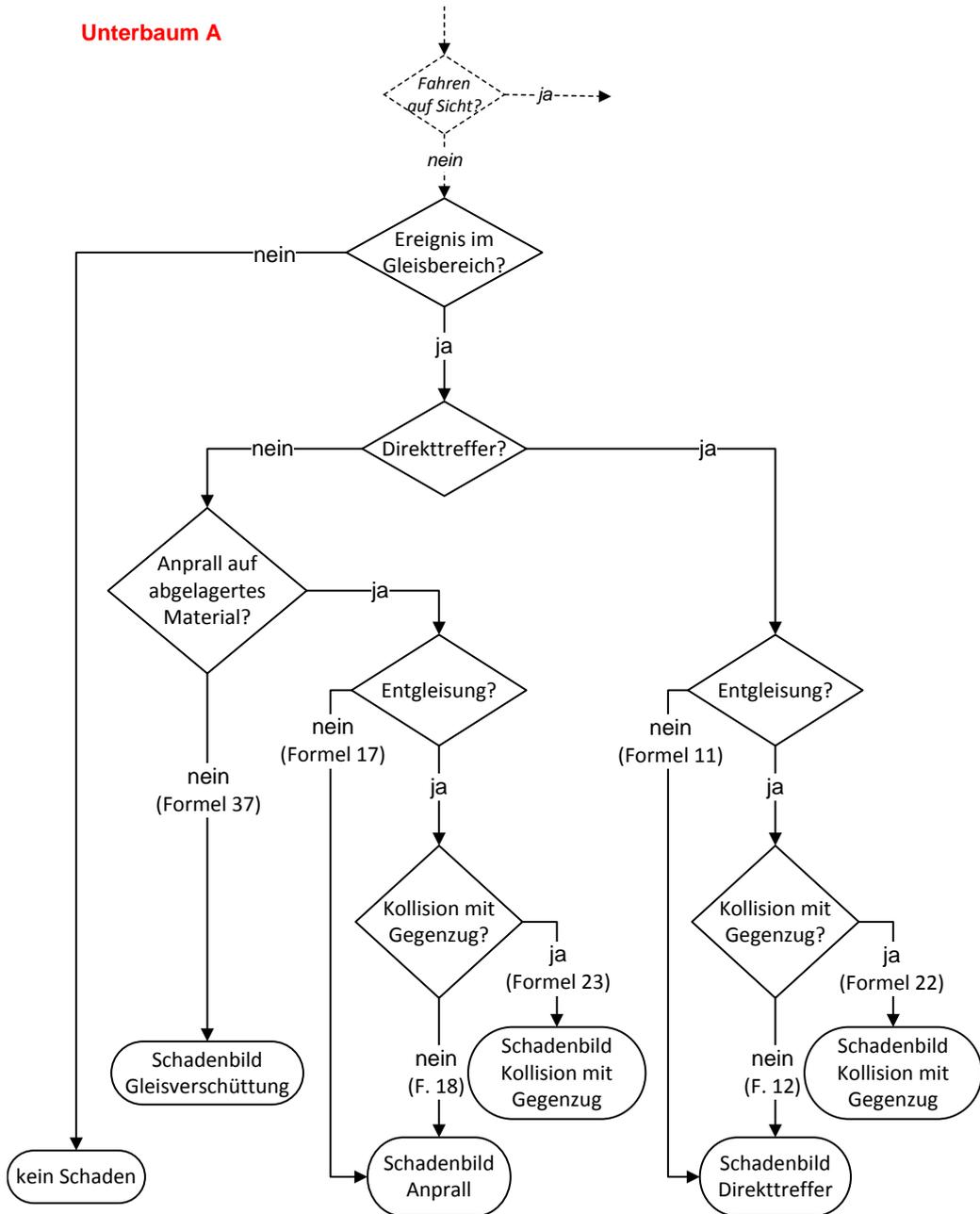
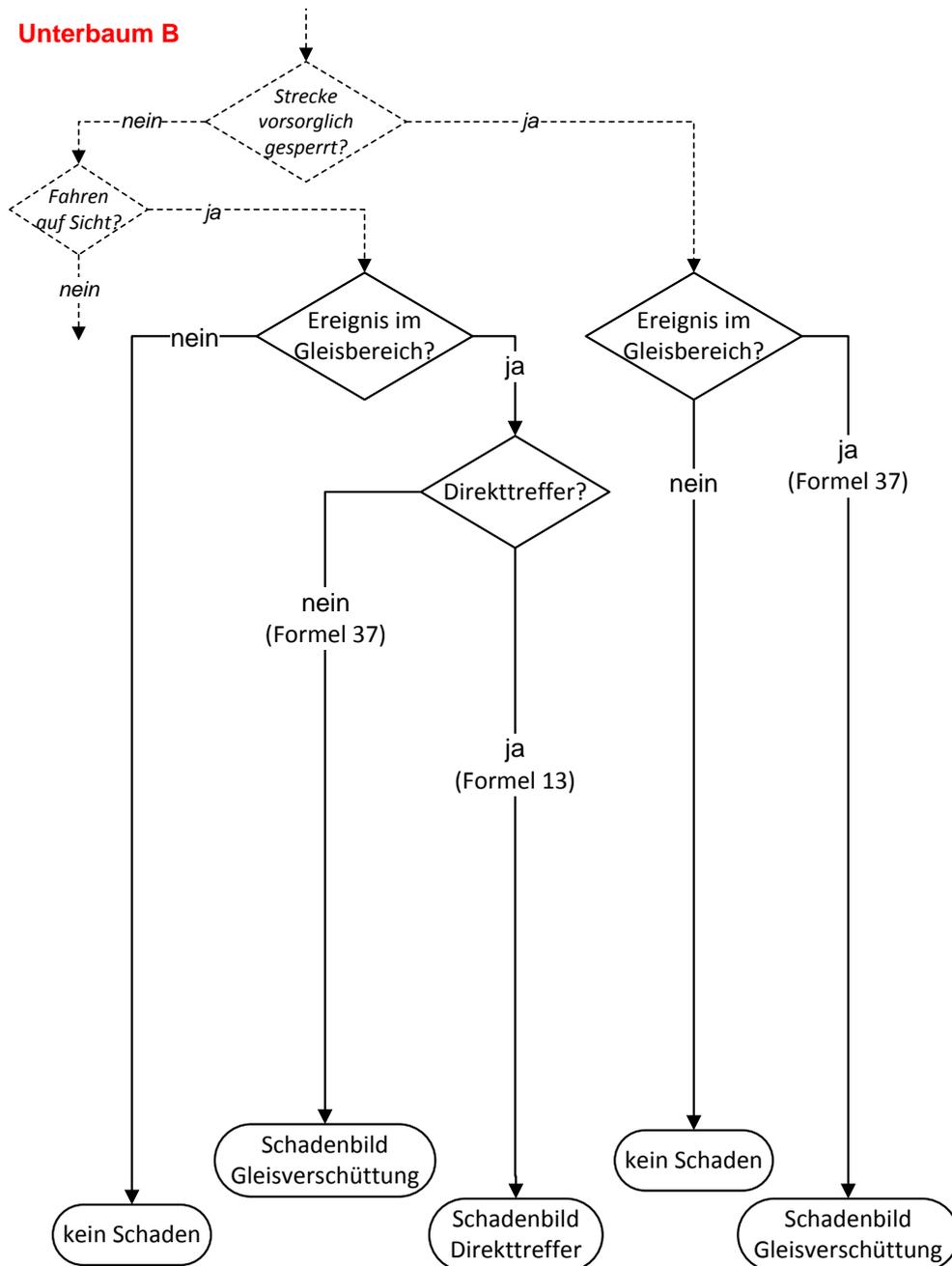


Abbildung 4: Ereignisunterbaum B der möglichen Schadenbilder im Schienenverkehr



### C.3 Temporäre, organisatorische Massnahmen im Schienenverkehr

Bahnunternehmen können bei erkennbaren Gefahrensituationen durch vorsorgliche Sperrung ihrer Bahnlinien, durch das zusätzliche Aufstellen von Warnposten und Fahren auf Sicht das Risiko eines Unfalls wesentlich reduzieren. Dabei ist während einer akuten Gefahrensituation die Massnahme nur vorübergehend und von kurzer Dauer. Diese Massnahme setzt die Erkennbarkeit der Gefahren voraus. Deshalb sind temporäre, organisatorische Massnahmen nur für von Niederschlägen abhängige Gefahren wie Lawinen, Überschwemmungen, Murgänge und Hangmuren oder von sich durch vorherige Aktivität abzeichnende Gefahren wie Felssturz geeignet.

#### C.3.1 Vorsorgliche Sperrung

Sicherungsdienste von Bahnunternehmen haben die Aufgabe, sich abzeichnende Naturgefahren zu erkennen und vorsorgliche Sperrungen der Bahnlinie rechtzeitig, das heisst vor einem ersten Ereignis, anzuordnen. Diese Massnahme ist sehr wirksam und verursacht in den meisten Fällen geringe direkte Kosten. Die Schwierigkeit dieser temporären Massnahme liegt in der möglichen Fehleinschätzung des Sicherungsdienstes.

Die Dauer eines durchschnittlichen Betriebsunterbruchs infolge vorsorglicher Sperrung kann aufgrund der durchschnittlichen jährlichen Sperrtage abgeschätzt werden. Dabei ist der Bedeutung des einzelnen Gefahrenabschnittes für die vorsorgliche Sperrung ebenfalls Rechnung zu tragen. Es gibt Gefahrenstellen, die aufgrund ihrer schwierigen Einschätzbarkeit und der damit verbundenen Unsicherheit immer wieder für vorsorgliche Sperrungen verantwortlich sind, obwohl nicht jedes Mal ein Ereignis auftritt.

Die Wahrscheinlichkeit einer vorsorglichen Sperrung ist jeweils mit dem zuständigen Streckenchef abzuschätzen<sup>12</sup>. Defaultmässig gilt  $p(vSp) = 0$ .

#### C.3.2 Fahren auf Sicht

Als weitere mögliche organisatorische Massnahme ordnen Bahnunternehmen oft Fahren auf Sicht an. Dabei wird die Fahrgeschwindigkeiten derart gedrosselt, dass der Lokführer jederzeit vor einer allfälligen Ablagerung im Geleisebereich

<sup>12</sup>**Beispiel** Lawinen – SBB Gotthard Nordrampe

Die Datenauswertung (Lawinen) zeigt, dass in den letzten 30 Jahren 1-mal vorsorglich gesperrt wurde und zwar 1981. In den letzten 30 Jahren sind 6 potenzielle Gefahrensituationen bekannt (1975, 1978, 1981, 1984, 1986 und 1999). Die Wahrscheinlichkeit der dokumentierten vorbeugenden Sperrung  $p(vSp)$  liegt in diesem Fall bei rund 15 % (10–30 %).

anhalten kann und so ein Anprall verhindert werden kann, das heisst, die Wahrscheinlichkeit für einen Anprall  $p(Anp)FaS_j = 0$ .

Die Wahrscheinlichkeit, dass die temporäre Schutzmassnahme Fahren auf Sicht angeordnet wird ist jeweils mit dem zuständigen Streckenchef abzuschätzen. Defaultmässig gilt  $p(FaS) = 0$ .

## C.4 Ereigniswahrscheinlichkeit im Gleisbereich

Mit der Ereigniswahrscheinlichkeit im Gleisbereich  $p(EGl)$  wird berücksichtigt, dass nicht alle Ereignisse in jedem Fall zu einem Schadenereignis führen. Im Folgenden sind die prozessabhängigen Überlegungen dargestellt.

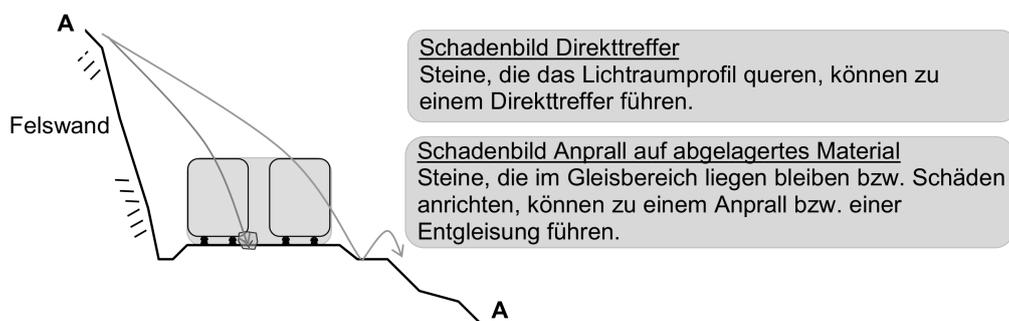
### C.4.1 Stein-/Blockschlag

Stein- und Blockschlag stellen eine linienförmige Gefahr dar, das heisst die Steine queren das Gelände entlang einer Trajektorie und vermögen die Bahnanlage manchmal zu überspringen, ohne Schaden anzurichten. Die Ereignis- bzw. Ablagerungswahrscheinlichkeit im Gleisbereich  $p(EGl)$  berücksichtigt, ob ein Stein auf einem Gleise oder ausserhalb davon liegen bleibt bzw. ob er das Gleis überspringen kann.  $p(EGl) = 0.6$  bedeutet, dass 60 % der Blöcke auf dem Gleiskörper liegen bleiben, bzw. dass 40 % das Geleise überspringen, ohne Schaden zu verursachen. Bei doppelspurigen Geleiseführungen liegt  $p(EGl)$  bei  $\leq 0.5$ . Diese Wahrscheinlichkeit  $p(EGl)$  wird aufgrund der Sprunghöhen und -weiten abgeschätzt und im Gelände verifiziert. Dabei sollte v.a. die Möglichkeit eines Direkttreffers betrachtet werden, da das Lichtraumprofil eines Zuges wesentlich grösser ist als die Schienenfläche, welche für das Schadenbild Anprall von Bedeutung ist. In der Abbildung 5 ist die Ereigniswahrscheinlichkeit im Gleisbereich  $p(EGl)$  im Schnitt A-A schematisch dargestellt.

### C.4.2 Lawine, Überschwemmung dynamisch und statisch, Murgang/Wasser aus Murgang, Hangmure sowie Rutschung spontan

Meteorologische Gefahrenprozesse wie *Lawine, Überschwemmung dynamisch und statisch, Murgang/Wasser aus Murgang, Hangmure sowie Rutschung spontan* haben die Besonderheit, dass es vorgängig immer grössere Niederschlagsperioden braucht, damit diese Prozesse überhaupt auftreten können. Hingegen sind Grossniederschläge kein Garant auf ein Ereignis, weil die Zusammenhänge wesentlich komplexer sind. Mit der Ereigniswahrscheinlichkeit im Gleisbereich  $p(EGl)$  wird bei meteorologischen Gefahrenprozessen berücksichtigt, dass es nicht bei jeder 30-jährlichen Niederschlagssituation auch effektiv zu einem Ereignis bis in den Geleisebereich kommt. Zur Abschätzung dieser Wahrscheinlichkeit müssen die

Abbildung 5: Schematische Darstellung der Ereigniswahrscheinlichkeit im Gleisbereich  $p(EGl)$  (Schnitt A-A). Wird für die Beurteilung von Stein- und Blockschlag berücksichtigt.



Niederschlagsdaten bzw. Grosswetterlagen und Ereigniskatasterangaben analysiert und ausgewertet werden.

### C.4.3 Übrige Gefahrenprozesse

Für die übrigen Gefahrenprozesse wie *Felssturz* und *Rutschung permanent* ist die Ereigniswahrscheinlichkeit im Gleisbereich  $p(EGl) = 1.0$ , das heisst, jedes Ereignis kommt bis in den Geleisebereich.

## C.5 Wahrscheinlichkeiten unterbrochene Fahrleitung und Warnung des Lokführers

Tabelle 2: Standardwerte für die Wahrscheinlichkeit einer unterbrochenen Fahrleitung  $p(uF)$ , die rechtzeitige Warnung des Lokführers  $p(wa)$  und die Wahrscheinlichkeit eines Anpralls  $p(Anp)$ .

Prozess	$p(uF)$	$p(wa)$	$p(Anp)$
Lawine	-	-	0.04
Stein-Blockschlag	-	-	0.25
Felssturz	0.9	0.3	0.07
Rutschung permanent	0.05	1	0
Hangmure/Rutschung spontan	-	-	0.12
Murgang/Wasser aus Murgang	-	-	0.03
Überschwemmung statisch	-	-	0.01
Überschwemmung dynamisch	-	-	0.01

Quelle: Liener und Schönthal (2014). Die Werte für  $p(Anp)$  konnten aus dem Ereigniskataster der Bahnen, auf welchem die Analyse von Liener und Schönthal (2014) basiert, abgeleitet werden. Für die Prozesse Felssturz und Rutschung permanent wurde aufgrund fehlender Daten auf die Werte aus Winkler et al. (2012) zurückgegriffen, wobei  $p(Anp)$  aus den geschätzten Werten  $p(uF)$  und  $p(wa)$  gemäss Formeln 15 und 16 berechnet wird. Der für Überschwemmung statisch geschätzte  $p(Anp)$ -Wert aus Winkler et al. (2012) liegt mit 0.7 deutlich über dem  $p(Anp)$ -Wert für Überschwemmung dynamisch, welcher aus dem Ereigniskataster abgeleitet wurde. Dieses Missverhältnis wurde korrigiert, in dem - aufgrund fehlender Daten - der  $p(Anp)$ -Wert für Überschwemmung statisch dem  $p(Anp)$ -Wert von Überschwemmung dynamisch gleichgesetzt wurde.

## C.6 Entgleisungswahrscheinlichkeit infolge Direkttreffers und Anpralls

In Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität (und der Zuggeschwindigkeit beim Anprall) wird entschieden, ob bei einem Direkttreffer bzw. einem Anprall auf abgelagertes Material mit einer Entgleisung zu rechnen ist oder nicht (s. Tabellen 3 und 4). Es handelt sich dabei um ja/nein-Entscheidungen: Der Wert 1 bedeutet, dass der Fall *Entgleisung* zu erwarten ist, während der Wert 0 für den

Fall *keine Entgleisung* steht.

**Entgleisungswahrscheinlichkeit infolge Direkttreffers** Tabelle 3 gibt eine Übersicht der Entgleisungswahrscheinlichkeiten infolge Direkttreffers pro Prozess und Intensität. Diese Entgleisungswahrscheinlichkeiten werden über die betroffene Strecke unter Berücksichtigung der ursprünglich gefährdeten Strecke (Situation *vor Massnahme*)<sup>M</sup> gemittelt:

$$\begin{aligned}
 p(EDir)_j &= \frac{p(EDir)_s \cdot g_{s,j} + p(EDir)_m \cdot g_{m,j} + p(EDir)_{st} \cdot g_{st,j}}{g_{s,j} + g_{m,j} + g_{st,j}} \cdot \frac{g_j}{g_{vM,j}} \\
 &= \frac{p(EDir)_s \cdot g_{s,j} + p(EDir)_m \cdot g_{m,j} + p(EDir)_{st} \cdot g_{st,j}}{g_j} \cdot \frac{g_j}{g_{vM,j}} \\
 &= \frac{p(EDir)_s \cdot g_{s,j} + p(EDir)_m \cdot g_{m,j} + p(EDir)_{st} \cdot g_{st,j}}{g_{vM,j}} \quad [-]
 \end{aligned}$$

$p(EDir)_j$  Über die gefährdete Strecke gemittelte Entgleisungswahrscheinlichkeit infolge Direkttreffers in Szenario  $j$ . [-]

$p(EDir)_s$ ,  
 $p(EDir)_m$ ,  
 $p(EDir)_{st}$  Entgleisungswahrscheinlichkeit infolge Direkttreffers für schwache, mittlere bzw. starke Intensität in Abhängigkeit des Prozesses (s. Tabelle 3). [-]

$g_{s,j}$ ,  $g_{m,j}$ ,  
 $g_{st,j}$  Länge der gefährdeten Abschnitte in Szenario  $j$  in schwacher, mittlerer bzw. starker Intensität. [ $m$ ]

$g_j$  Länge der gesamten gefährdeten Strecke in Szenario  $j$ , berechnet als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher, mittlerer und starker Intensität.<sup>F</sup> [ $m$ ]

$g_{vM,j}$  Länge der gesamten ursprünglich gefährdeten Strecke (Situation *vor Massnahme*) in Szenario  $j$ .<sup>M</sup> [ $m$ ]

Tabelle 3: Entgleisungswahrscheinlichkeit nach Direkttreffer  $p(EDir)$ , wobei  $p(EDir) = 1$  für *Entgleisung* und  $p(EDir) = 0$  für *keine Entgleisung* steht.

Prozess	Intensität		
	<i>schwach</i>	<i>mittel</i>	<i>stark</i>
Lawine	0	1	1
Stein-Blockschlag	0	0	1
Felssturz	-	-	1
Rutschung permanent <sup>◇</sup>	0	0	0
Hangmure/Rutschung spontan	0	1	1
Murgang/Wasser aus Murgang	0	1	1
Überschwemmung statisch <sup>◇</sup>	0	0	0
Überschwemmung dynamisch	0	0	1

<sup>◇</sup>Bei diesen Prozessen ist das Schadenbild Direkttreffer nicht plausibel. (Zur Information. Berechnungsrelevant sind nur die angegebenen Werte.)

Quelle: Arbeitsgruppe *EconoMe-Railway* (2010a), angepasst durch Arbeitsgruppe *EconoMe* (2015).

**Entgleisungswahrscheinlichkeit infolge Anpralls** Tabelle 4 gibt eine Übersicht der Entgleisungswahrscheinlichkeiten infolge Anpralls pro Prozess und Intensität. Dabei jeweils mit dem Maximalwert (entweder 0 oder 1) gerechnet, der auf der betroffenen Strecke vorkommt<sup>13</sup>. Für Zuggeschwindigkeiten von  $30 \frac{km}{h}$  und darunter gilt  $p(EAnp) = 0$ .

<sup>13</sup>**Beispiel** Stein-Blockschlag mit schwacher und mittlerer Intensität  $\Rightarrow p(EAnp) = 0$   
Stein-Blockschlag mit schwacher, mittlerer und starker Intensität  $\Rightarrow p(EAnp) = 1$

Tabelle 4: Entgleisungswahrscheinlichkeit nach Anprall  $p(EAnp)$  für Zuggeschwindigkeiten über  $30 \frac{km}{h}$ , wobei  $p(EDir) = 1$  für *Entgleisung* und  $p(EDir) = 0$  für *keine Entgleisung* steht. Für Zuggeschwindigkeiten von  $30 \frac{km}{h}$  und darunter gilt  $p(EAnp) = 0$ .

<b>Prozess</b>	<b>Intensität</b>		
	<i>schwach</i>	<i>mittel</i>	<i>stark</i>
Lawine	0	1	1
Stein-Blockschlag	0	0	1
Felssturz	-	-	1
Rutschung permanent <sup>◇</sup>	0	0	0
Hangmure/Rutschung spontan	0	1	1
Murgang/Wasser aus Murgang	0	1	1
Überschwemmung statisch	0	0	1
Überschwemmung dynamisch	0	0	1

<sup>◇</sup>Bei diesem Prozess ist das Schadenbild Anprall nicht plausibel. (Zur Information. Berechnungsrelevant sind nur die angegebenen Werte.)

*Quelle: Arbeitsgruppe EconoMe (2015).*

## C.7 Beispielrechnung Wahrscheinlichkeit Kollision mit Gegenzug

Die Zugfrequenz auf der zweispurigen Gotthard Nordrampe beträgt 73 Personen- und 120 Güterzüge pro Tag, d.h. 37 Personenzüge und 60 Güterzüge pro Tag und pro Gleis. Verteilt auf rund 20 Stunden ergibt das alle 32 Minuten 1 Personenzug oder alle 20 Minuten 1 Güterzug bzw. alle 12 Minuten 1 Gegenzug. Pro Minute beträgt die Wahrscheinlichkeit eines Gegenzuges 8.04 % (s. Tabelle 5 zur Herleitung der Wahrscheinlichkeit eines Gegenzuges).

Befindet sich ein Gegenzug mehr als 4 Minuten vom Unfallort entfernt, kann er meistens gewarnt und angehalten werden, d.h. die Kollisionswahrscheinlichkeit liegt nahe bei 0 % (SBB SI - Sicherheitsmanagement, 2010). Befindet sich ein Zug weniger als 4 Minuten vom Unfallort entfernt, wird die Wahrscheinlichkeit einer Kollision gemäss Tabelle 6 geschätzt.

Aus den in den Tabellen 5 und 6 aufgezeigten Berechnungen ergibt sich, dass sich in 12 % der Entgleisungen ein Gegenzug in der Nähe der Entgleisungsstelle befindet. Es wird angenommen, dass in 60 % der Entgleisungen der Zug auf dem eigenen Geleisprofil bzw. im vom Gegengeleise entgegengesetzten Profil bleibt. Das bedeutet, dass in 40 % der Entgleisungen der Zug ins Lichtraumprofil des Gegengeleises gerät (Arbeitsgruppe EconoMe-Railway, 2010c).

$$\begin{aligned} p(Kol) &= p(VLp) \cdot (0.75 + 0.45 + 0.2 + 0.1) \cdot p(z) \\ &= 0.4 \cdot 0.12 \\ &= 0.048 \end{aligned}$$

Es kommt folglich in 4.8 % der Entgleisungen zu einer Kollision mit einem Gegenzug. Die Wahrscheinlichkeit einer Kollision mit einem Personenzug bzw. Güterzug lässt sich auf die gleiche Art und Weise ausrechnen und beträgt 1.84 % bzw. 3.04 %.

Tabelle 5: Herleitung der Wahrscheinlichkeit eines Gegenzuges

---

$N(Gl) = 2$	
<b>Personenzüge</b>	
$Fz(Pz)$	= 73 Personenzüge pro Tag
$\frac{Fz(Pz)}{N(Gl)}$	= 37 Personenzüge pro Tag und Gleis
$p(Pz) = \frac{Fz(Pz)/N(Gl)}{1200}$	= 0.0304 $\Rightarrow$ Pro Minute kommt mit 3.04 % Wahrscheinlichkeit ein Personen- zug.
$p(Pz)^{-1}$	= 32 $\Rightarrow$ Alle 32 Minuten ein Personenzug.
<b>Güterzüge</b>	
$Fz(Gz)$	= 120 Güterzüge pro Tag
$\frac{Fz(Gz)}{N(Gl)}$	= 60 Güterzüge pro Tag und Gleis
$p(Gz) = \frac{Fz(Gz)/N(Gl)}{1200}$	= 0.05 $\Rightarrow$ Pro Minute kommt mit 5.0 % Wahrscheinlichkeit ein Güterzug.
$p(Gz)^{-1}$	= 20 $\Rightarrow$ Alle 20 Minuten ein Güterzug.
<b>Gegenzug</b>	
$Fz = Fz(Pz) + Fz(Gz)$	= 193 Gegenzüge pro Tag
$\frac{Fz}{N(Gl)}$	= 97 Gegenzüge pro Tag und Gleis
$p(z) = \frac{Fz/N(Gl)}{1200}$	= 0.0804 $\Rightarrow$ Pro Minute kommt mit 8.04 % Wahrscheinlichkeit ein Gegenzug.
$p(z)^{-1}$	= 12 $\Rightarrow$ Alle 12 Minuten ein Gegenzug.

---

Tabelle 6: Herleitung der Wahrscheinlichkeit einer Kollision mit einem Gegenzug

$t$	$p(kW)_t$	$p(*z)$	$p(zE)_t$
		3.04 %	2.3 %
1 min:	75 %	· 5.0 % =	3.8 %
		8.04 %	6.0 %
		3.04 %	1.4 %
2 min:	45 %	· 5.0 % =	2.3 %
		8.04 %	3.6 %
		3.04 %	0.6 %
3 min:	20 %	· 5.0 % =	1.0 %
		8.04 %	1.6 %
		3.04 %	0.3 %
4 min:	10 %	· 5.0 % =	0.5 %
		8.04 %	0.8 %
Total:		Personenzug	4.6 %
		Güterzug	7.6 %
		Gegenzug	12.0 %

wobei

$t$	Zeit nach Entgleisung.	[min]
$p(kW)_t$	Wahrscheinlichkeit, dass ein allfälliger Gegenzug zum Zeitpunkt $t$ noch nicht gewarnt werden konnte (Quelle der Werte: SBB SI - Sicherheitsmanagement (2010)).	[-]
$p(*z)$	Wahrscheinlichkeit, dass ein Personen- bzw. Güter- bzw. Gegenzug innerhalb einer Minute kommt.	[-]
$p(zE)_t$	Wahrscheinlichkeit, dass ein Personen- bzw. Güter- bzw. Gegenzug zum Zeitpunkt $t$ bei der Entgleisungsstelle eintrifft.	[-]

## C.8 Beispielrechnung kollektives Risiko

Zu einem Naturgefahrenprozess sind folgende sechs Szenarien gegeben: ein  $1/2$ -jährliches, ein 10-jährliches, ein 30-jährliches, ein 100-jährliches, ein 300-jährliches und ein Extremszenario. Für das Extremszenario wird mit einer Jährlichkeit von 1000 Jahren gerechnet. Die Schadenausmasse der Szenarien sind in Tabelle 7 aufgelistet und die Szenarien-Häufigkeiten werden in Tabelle 8 hergeleitet. Somit lässt sich das kollektive Risiko berechnen:

$$\begin{aligned}
 R &= (p_{1/2} \cdot Aw_{1/2}) + (p_{10} \cdot Aw_{10}) + (p_{30} \cdot Aw_{30}) + (p_{100} \cdot Aw_{100}) + (p_{300} \cdot Aw_{300}) \\
 &\quad + (p_{1000} \cdot Aw_{1000}) \\
 &= (2 \cdot 1) + (0.067 \cdot 1) + (0.023 \cdot 1000) + (0.0067 \cdot 5000) + (0.0023 \cdot 2500) \\
 &\quad + (0.001 \cdot 125000) \\
 &= 242 \frac{CHF}{a}
 \end{aligned}$$

Eine graphische Darstellung der komplementär-kumulativen Berechnung des Risikos ist in Abbildung 6 gegeben.

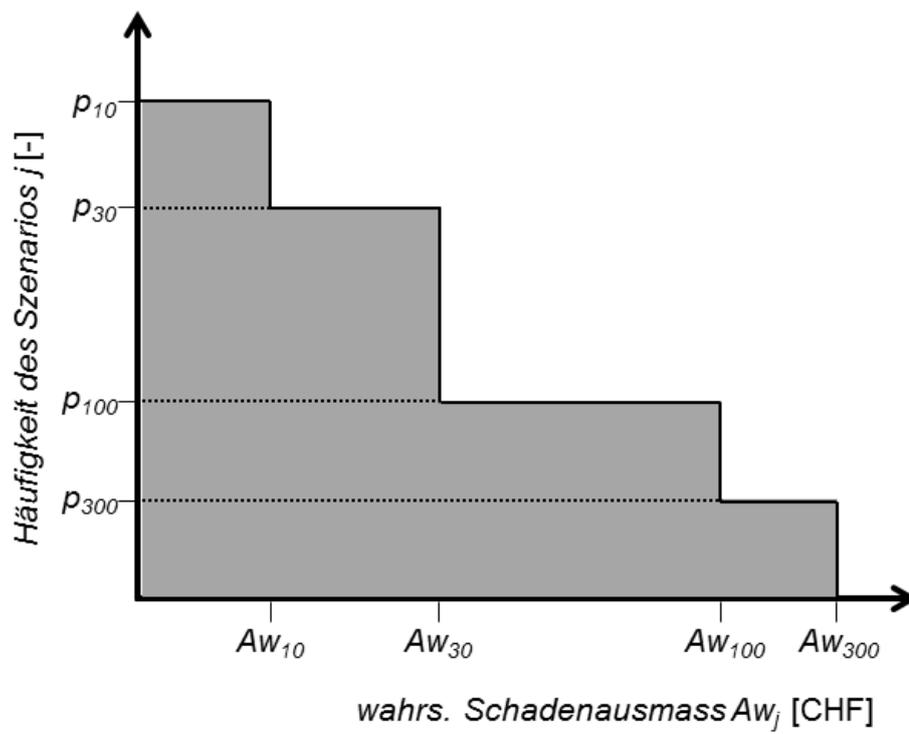
Tabelle 7: Schadenausmass in Szenario  $j$

$Aw_{1/2}$	$Aw_{10}$	$Aw_{30}$	$Aw_{100}$	$Aw_{300}$	$Aw_{1000}$	
1	1	1000	5000	25000	125000	[CHF]

Tabelle 8: Herleitung der Häufigkeit von Szenario  $j$

$T_j$ [a]	$P_j$ [ $1/a$ ]	$P_j - P_{j+1}$	=	$p_j$ [ $1/a$ ]
0.5	2			2
10	0.1	0.1 - 0.033	=	0.067
30	0.033	0.033 - 0.01	=	0.023
100	0.01	0.01 - 0.0033	=	0.0067
300	0.0033	0.0033 - 0.001	=	0.0023
1000	0.001			0.001

Abbildung 6: Beispiel für ein komplementär-kumulatives Häufigkeits-Ausmass Diagramm



## C.9 Letalität Personen im Schienenverkehr bei Direkttreffer und Anprall

Bei der Letalität von Personen im Schienenverkehr wird unterschieden zwischen Bahnlinien in günstigem Gelände (ebenes oder leicht abfallendes Terrain) und ungünstigem Gelände (steiles, absturzgefährdetes Terrain). Zur genaueren Erläuterung und Illustration dieser beiden Geländetypen sei auf das EconoMe-Benutzerhandbuch verwiesen. Brücken gelten aufgrund der Absturzgefahr als ungünstiges Gelände.

Alle Letalitätsfunktionen in diesem Kapitel wurden basierend auf einer Analyse von Zugsunglücken mit Entgleisungen in Industriestaaten durch Liener und Schönthal (2014) hergeleitet.

Beim Schadenbild Direkttreffer wird die Letalität über die betroffene Strecke gemittelt (s. Formel 6). Beim Schadenbild Anprall wird jeweils der maximale ermittelte Letalitätswert für die gesamte Strecke übernommen<sup>14</sup>.

**Letalität Personen im Schienenverkehr bei Direkttreffer für günstiges Gelände** Die Letalität von Personen im Schienenverkehr bei Direkttreffer für günstiges Gelände und starke Intensität ist gegeben in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit  $v$ :

$$\lambda_{st}(v) = 2.1 \cdot 10^{-6} \cdot v^2 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot v + 0.02$$

Die Letalitäten für schwache und mittlere Intensität sind gegeben durch  $\lambda_s(v) = 0.1 \cdot \lambda_{st}(v)$  und  $\lambda_m(v) = 0.6 \cdot \lambda_{st}(v)$ . Siehe Abbildung 7 für eine graphische Darstellung der Funktionen.

**Letalität Personen im Schienenverkehr bei Direkttreffer für ungünstiges Gelände bzw. für Brücken** Die Letalität von Personen im Schienenverkehr bei Direkttreffer für ungünstiges Gelände bzw. für Brücken und starke Intensität ist gegeben in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit  $v$ :

$$\lambda_{st}(v) = 7 \cdot 10^{-6} \cdot v^2 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot v + 0.05$$

Die Letalitäten für schwache und mittlere Intensität sind gegeben durch  $\lambda_s(v) = 0.1 \cdot \lambda_{st}(v)$  und  $\lambda_m(v) = 0.6 \cdot \lambda_{st}(v)$ . Siehe Abbildung 8 für eine graphische Darstellung der Funktionen.

<sup>14</sup>**Beispiel** Schienenverkehr ist betroffen von schwacher und mittlerer Intensität eines Naturgefahrenprozesses  $\Rightarrow \lambda(Anp) = \lambda_m$ .

### **Letalität Personen im Schienenverkehr bei Anprall für günstiges Gelände**

Die Letalität von Personen im Schienenverkehr bei Anprall für günstiges Gelände und starke Intensität ist gegeben in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit  $v$ :

$$\lambda_{st}(v) = 2.1 \cdot 10^{-6} \cdot v^2 + 9 \cdot 10^{-5} \cdot v$$

Die Letalitäten für schwache und mittlere Intensität sind gegeben durch  $\lambda_s(v) = 0.1 \cdot \lambda_{st}(v)$  und  $\lambda_m(v) = 0.6 \cdot \lambda_{st}(v)$ . Siehe Abbildung 9 für eine graphische Darstellung der Funktionen.

### **Letalität Personen im Schienenverkehr bei Anprall für ungünstiges Gelände bzw. für Brücken**

Die Letalität von Personen im Schienenverkehr bei Anprall für ungünstiges Gelände bzw. für Brücken und starke Intensität ist gegeben in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit  $v$ :

$$\lambda_{st}(v) = 7 \cdot 10^{-6} \cdot v^2 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot v$$

Die Letalitäten für schwache und mittlere Intensität sind gegeben durch  $\lambda_s(v) = 0.1 \cdot \lambda_{st}(v)$  und  $\lambda_m(v) = 0.6 \cdot \lambda_{st}(v)$ . Siehe Abbildung 10 für eine graphische Darstellung der Funktionen.

Abbildung 7: Letalität Personen im Schienenverkehr bei Direkttreffer  $\lambda(Dir)$  für günstiges Gelände.

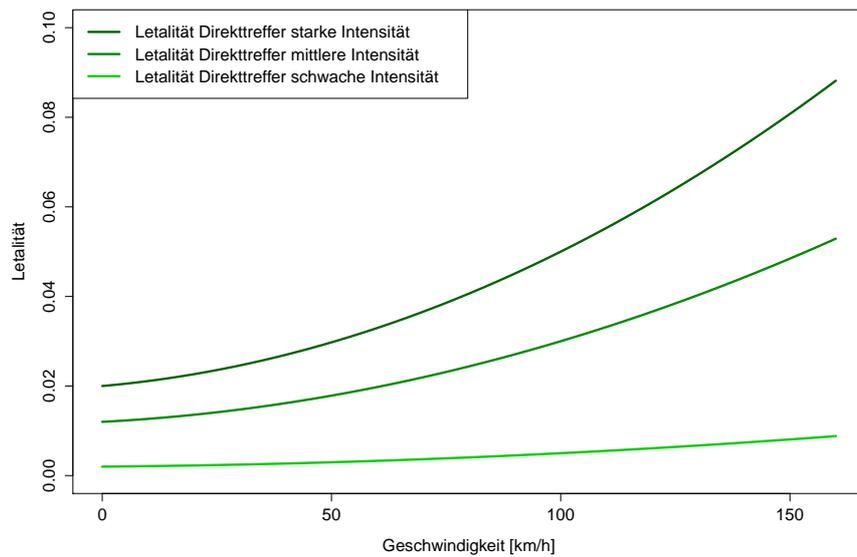
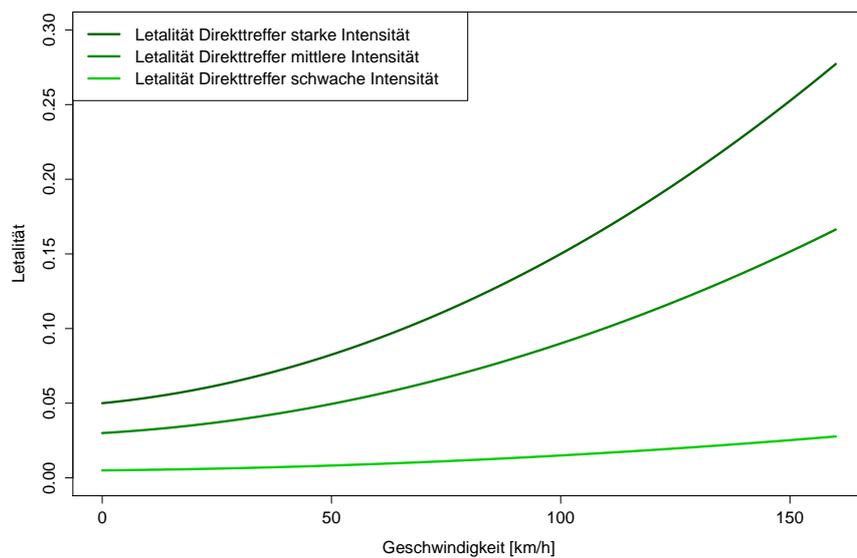


Abbildung 8: Letalität Personen im Schienenverkehr bei Direkttreffer  $\lambda(Dir)$  für ungünstiges Gelände bzw. für Brücken.



Quelle der Abbildungen 7 und 8: Liener und Schönthal (2014)

Abbildung 9: Letalität Personen im Schienenverkehr bei Anprall  $\lambda(Anp)$  für günstiges Gelände.

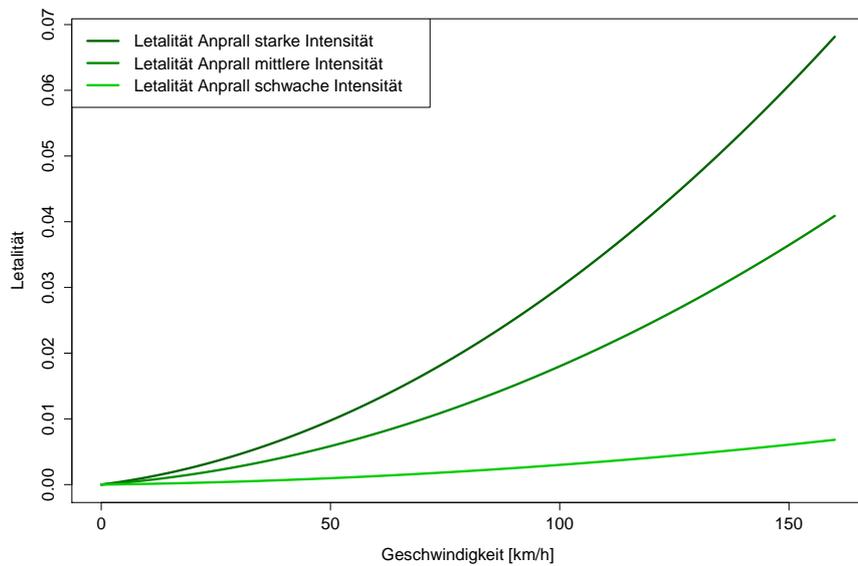
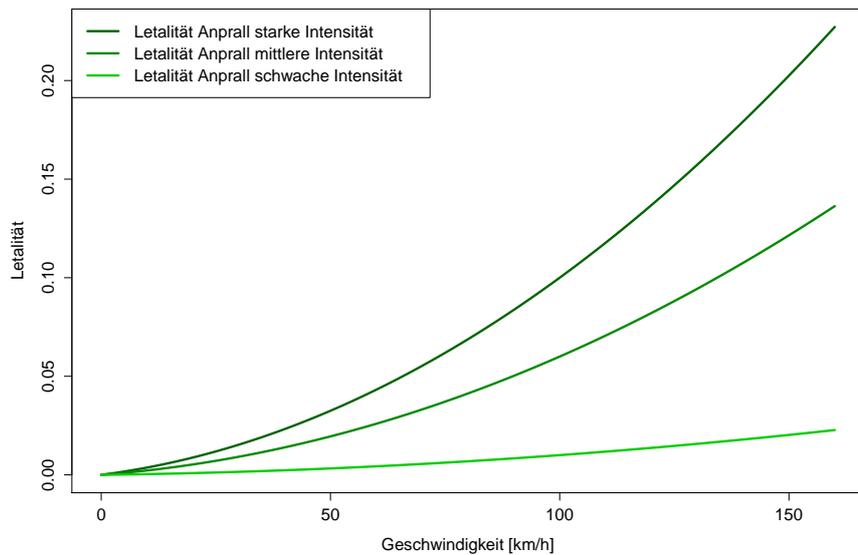


Abbildung 10: Letalität Personen im Schienenverkehr bei Anprall  $\lambda(Anp)$  für ungünstiges Gelände bzw. für Brücken.



Quelle der Abbildungen 9 und 10: Liener und Schönthal (2014)

## C.10 Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte Schienenverkehr

Bei der Schadenempfindlichkeit von mobilen Sachwerten des Schienenverkehrs wird unterschieden zwischen Bahnlinien in günstigem Gelände (ebenes oder leicht abfallendes Terrain) und ungünstigem Gelände (steiles, absturzgefährdetes Terrain). Zur genaueren Erläuterung und Illustration dieser beiden Geländetypen sei auf das EconoMe-Benutzerhandbuch verwiesen. Brücken gelten aufgrund der Absturzgefahr als ungünstiges Gelände.

**Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte Schienenverkehr bei Direkttreffer** Beim Schadenbild Direkttreffer wird die Schadenempfindlichkeit über die betroffene Strecke gemittelt (s. Formel 8). Die Schadenempfindlichkeitswerte werden nach Prozess, Intensität und Geländeverhältnis unterschieden und sind in Tabelle 9 zusammengetragen.

**Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte Schienenverkehr bei Anprall** Beim Schadenbild Anprall wird die Schadenempfindlichkeit in Abhängigkeit der Geländeverhältnisse und Zuggeschwindigkeit berechnet. Die Funktionen für Schadenempfindlichkeit bei Anprall sind quadratische Regressionen basierend auf den Schadenempfindlichkeitswerten bei Anprall, welche von der Arbeitsgruppe EconoMe-Railway (2010b,d) für mobile Sachwerte des Schienenverkehrs geschätzt wurden. Siehe Abbildung 11 für eine graphische Darstellung der Funktionen.

Die Schadenempfindlichkeit von mobilen Sachwerten des Schienenverkehrs bei Anprall für günstiges Gelände ist gegeben in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit  $v$ :

$$SE(Anp)(v) = 1.9 \cdot 10^{-5} \cdot v^2 - 5.0 \cdot 10^{-4} \cdot v - 2.0 \cdot 10^{-3}$$

wobei  $SE(Anp) = 0$  für Geschwindigkeiten unter  $30 \frac{km}{h}$ .

Die Schadenempfindlichkeit von mobilen Sachwerten des Schienenverkehrs bei Anprall für ungünstiges Gelände bzw. für Brücken ist gegeben in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit  $v$ :

$$SE(Anp)(v) = -4.1 \cdot 10^{-5} \cdot v^2 + 1.3 \cdot 10^{-2} \cdot v$$

wobei  $SE(Anp) = 1$  für Geschwindigkeiten über  $120 \frac{km}{h}$ .

Tabelle 9: Standardwerte für die Schadenempfindlichkeit  $SE(Dir)$  von mobilen Sachwerten des Schienenverkehrs für das Schadenbild Direkttreffer.

Prozess	Intensität	Schadenempfindlichkeit nach Geländeverhältnis	
		<i>günstiges Gelände</i>	<i>ungünstiges Gelände bzw. Brücken</i>
Lawine	schwach	0.01	0.01
	mittel	0.2*	1 <sup>†</sup>
	stark	0.5*	1 <sup>†</sup>
Stein-Blockschlag	schwach	0.01	0.01
	mittel	0.2	0.5
	stark	0.5*	1 <sup>†</sup>
Felssturz	schwach	-	-
	mittel	-	-
	stark	1*	1 <sup>†</sup>
Rutschung permanent <sup>◇</sup>	<i>alle</i>	0	0
Hangmure/Rutschung spontan	schwach	0.01	0.01
	mittel	0.2*	1 <sup>†</sup>
	stark	0.5*	1 <sup>†</sup>
Murgang/Wasser aus Murgang	schwach	0.01	0.01
	mittel	0.2*	1 <sup>†</sup>
	stark	0.5*	1 <sup>†</sup>
Überschwemmung statisch <sup>◇</sup>	<i>alle</i>	0	0
Überschwemmung dynamisch	schwach	0.01	0.01
	mittel	0.2	0.2
	stark	0.5*	1 <sup>†</sup>

\*Direkttreffer mit nachfolgender Entgleisung.

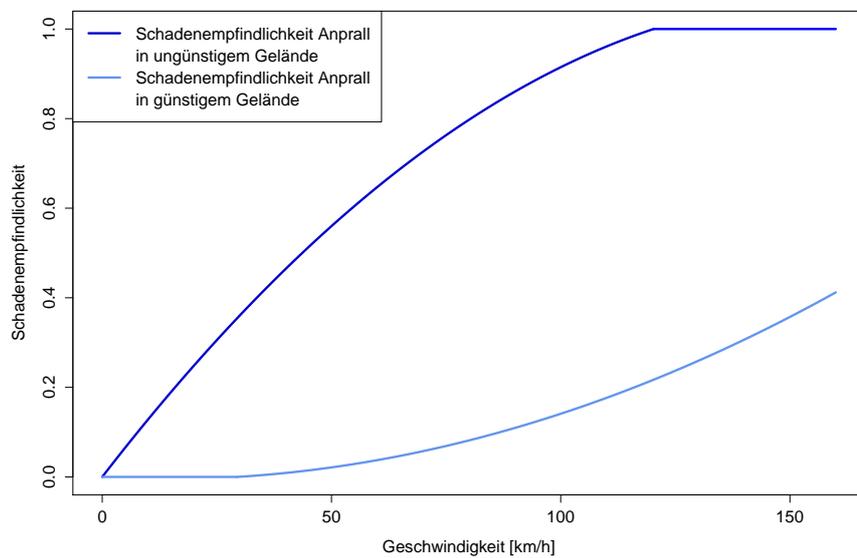
<sup>†</sup>Direkttreffer mit nachfolgender Entgleisung und Absturz.

<sup>◇</sup>Bei diesen Prozessen ist das Schadenbild Direkttreffer nicht plausibel.

(Zur Information. Berechnungsrelevant sind nur die angegebenen Werte.)

Quelle: Arbeitsgruppe EconoMe-Railway (2010b,d), angepasst durch Arbeitsgruppe EconoMe (2015). Werte gerundet auf eine signifikante Stelle.

Abbildung 11: Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte Schienenverkehr bei Anprall



Quelle: Die Funktionen sind quadratische Regressionen basierend auf den Schadenempfindlichkeitswerten bei Anprall, welche von der Arbeitsgruppe EconoMe-Railway (2010b,d) für mobile Sachwerte des Schienenverkehrs geschätzt wurden.

## C.11 Allgemeine Bemerkung zu Richtwerten für Einheitspreise sowie Standardwerten für Schadenempfindlichkeiten und Letalitäten

Im Downloadbereich von EconoMe befindet sich eine Objektparameter-Tabelle, welche für alle Objekte die Standardwerte für Einheitspreise sowie prozessspezifische Schadenempfindlichkeiten und Letalitäten enthält. Dabei bilden die Schienenverkehrsobjekte eine Ausnahme. Die Einheitspreise und Schadenempfindlichkeitswerte in der Objektparameter-Tabelle beziehen sich auf die fixen Sachwerte des Schienenverkehrs (z.B. Schienen, Schaltposten etc.). Die Schadenempfindlichkeitswerte für die mobilen Sachwerte des Schienenverkehrs (Zugkompositionen) sowie die Letalitätswerte für Personen in den mobilen Sachwerten sind in dieser Formelsammlung enthalten (s. Anhang C.10 und Anhang C.9), da sie nicht in die Struktur der Objektparameter-Tabelle passen. Einerseits wird bei den Schadenempfindlichkeits- und Letalitätswerten für mobile Sachwerte des Schienenverkehrs zwischen den Schadenbildern Direkttreffer und Anprall unterschieden, andererseits sind die Werte nicht bzw. nicht nur prozess- und intensitätsabhängig, wie dies bei anderen Objekten der Fall ist. Der Einheitspreis für mobile Sachwerte des Schienenverkehrs (1 Lokomotive mit 2 Wagen) beträgt gemäss EconoMe 2.1  $W(m.B) = 5$  Mio. CHF (s. auch Tabelle 10). Der Wert kann jedoch mit Begründung angepasst werden.

N.B. Für die Schadenempfindlichkeiten und Letalitäten aller Objekte wurden beim Prozess *Murgang/Wasser aus Murgang*, schwache Intensität die jeweiligen Werte des Prozesses *dynamische Überschwemmung*, schwache Intensität übernommen. Vorgängig war die schwache Intensität bei Murgang nicht definiert, da der Übergang zwischen dynamischer Überschwemmung und Murgang fließend ist.

Tabelle 10: Einheitspreis für mobile Sachwerte des Schienenverkehrs

Objekt	Einheitspreis [CHF]
1 Lokomotive mit 2 Wagen	5000000

Quelle: EconoMe 2.1