



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

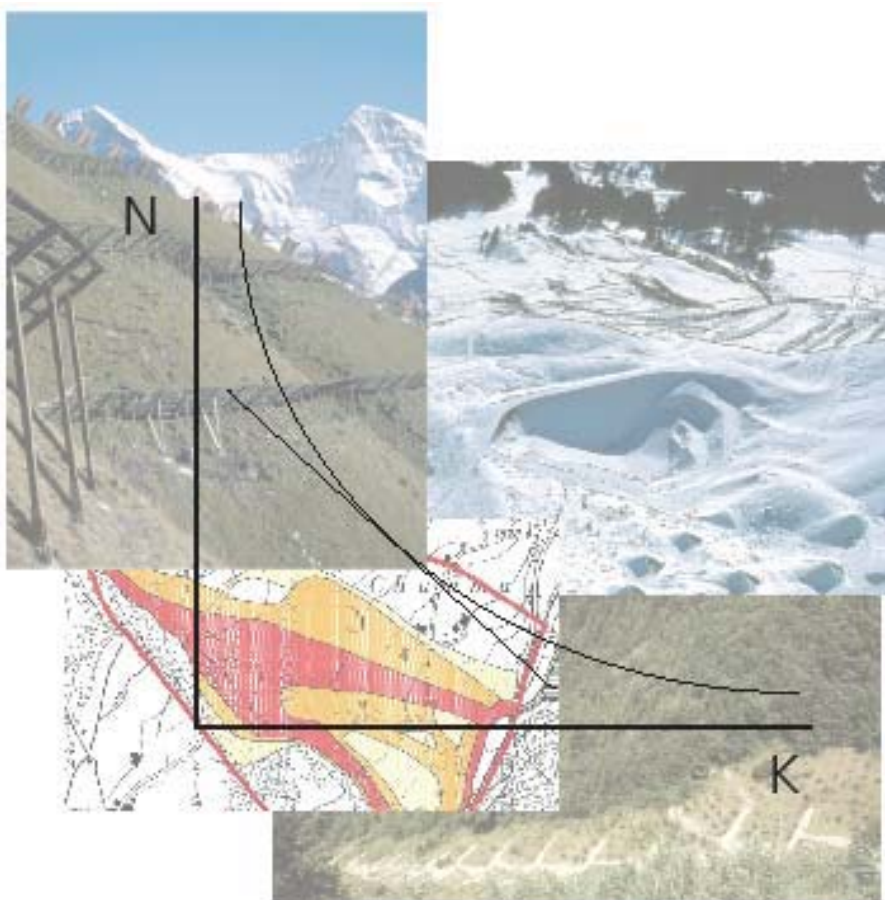
Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT
Plate-forme nationale «Dangers naturels»
Piattaforma nazionale «Pericoli naturali»
National Platform for Natural Hazards

Risikokzept für Naturgefahren - Leitfaden

TEIL A:

ALLGEMEINE DARSTELLUNG DES RISIKOKONZEPTS

Michael Bründl, Hans Romang, Niels Holthausen, Hans Merz, Nicole Bischof



Dieser Teilbericht ist integraler Bestandteil des Gesamtberichtes bestehend aus:

Teil A: Allgemeine Darstellung des Risikokonzepts

Teil B: Anwendung des Risikokonzepts

Prozess Lawine

Prozess Hochwasser

Prozess Murgang

Prozess Sturz

Prozess spontane Rutschung / Hangmuren

Prozess permanente Rutschung

Prozess Erdbeben

Prozess Sturm

Prozess Hagel

Prozess Hitzewelle

Kapitel 1

Zweck und Grundmodell des Risikokonzepts

Das Risikokonzept ist ein Modell für die Analyse und Bewertung anspruchsvoller Sicherheitsprobleme und der damit einhergehenden Massnahmenplanung. Wie jedes Modell gibt es die Realität nur beschränkt wieder. Es stellt somit eine Konvention dar, mit welcher – im Sinne einer bewusst gelebten Risikokultur – ein einheitlicher und damit auch vergleichbarer Umgang mit Sicherheitsproblemen möglich ist.

Als Risikokonzept wird ein allgemeingültiger methodischer Ansatz verstanden, welcher die Abläufe bei der Beurteilung von Sicherheitsproblemen strukturiert. Dieser Ablauf einer risikobasierenden Sicherheitsplanung wird in die Schritte Risikoanalyse, Risikobewertung sowie Massnahmenplanung und Massnahmenbewertung unterteilt.

Der Ursprung des Risikokonzepts liegt im technischen Bereich. In den sechziger Jahren ging es zunehmend darum, sehr komplexe technische Systeme in Bezug auf die Sicherheit zu beurteilen. Das Risikokonzept diente vor allem dazu, die komplexen Zusammenhänge bei der Planung solcher Systeme qualitativ und soweit möglich quantitativ fassbar zu machen. Darauf basierend wurden Aussagen über die Sicherheit solcher Systeme bzw. die Vertretbarkeit der durch sie erzeugten Risiken gemacht sowie die Zweckmässigkeit und Zuverlässigkeit von Sicherheitskonzepten nachgewiesen. Zunehmend wurde das Risikokonzept aber auch eingesetzt, um Aussagen über die Effektivität und Effizienz solcher Konzepte machen zu können.

Heute dient das Risikokonzept als Instrument für die transparente Darstellung von Abläufen innerhalb des komplexen Netzwerkes von beteiligten Fachleuten, Institutionen und Betroffenen sowie zur transparenten Begründung bzw. Rechtfertigung der Ausgaben für Sicherheit.

Das Risikokonzept für den Umgang mit Risiken infolge Naturgefahren bildet einen Grundraster für den Umgang mit Sicherheitsbeurteilungen in den verschiedensten Anwendungsbereichen. Damit erlaubt es auch einen Erfahrungsaustausch und eine beschränkte Vergleichbarkeit der Risiken infolge Naturgefahren mit Risiken aus anderen Bereichen.

Die Grundidee des Risikokonzepts besteht aus drei Teilen, die sich mit den Fragen «Was kann passieren?», «Was darf passieren?» und «Was ist zu tun?» umschreiben lassen. Um diese Fragen beantworten zu können, sind folgende Schritte notwendig:

Risikoanalyse: Die Risikoanalyse besteht aus Gefahrenanalyse, Expositionsanalyse, Konsequenzenanalyse sowie der eigentlichen Risikoermittlung. Anhand von definierten Szenarien wird bestimmt, welche Faktoren und Umstände zum Gesamtrisiko beitragen. Werden bestehende Sicherheitsmassnahmen berücksichtigt, dann dient eine Risikoanalyse auch zur Beurteilung der Wirksamkeit dieser Massnahmen.

Risikobewertung: Die Risikobewertung zeigt auf, ob die ermittelten Risiken über oder unterhalb von festgelegten Bewertungskriterien (Schutzziele) liegen und ob ein Schutzdefizit besteht. Die Überprüfung der Schutzziele für kollektive Risiken kann erst nach einer Massnahmenplanung erfolgen.

Integrale Massnahmenplanung: Die integrale Massnahmenplanung setzt dann ein, wenn die Risiken zu hoch sind. Sie zeigt auf, mit welchen Massnahmen und Mitteln, welche Risikoreduktion möglich ist und welches das optimale Massnahmenpaket ist, um die Schutzziele zu erreichen.

Das systematische Vorgehen einer Risikoanalyse ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Die im folgenden Text verwendeten Begriffe werden im Glossar erläutert.

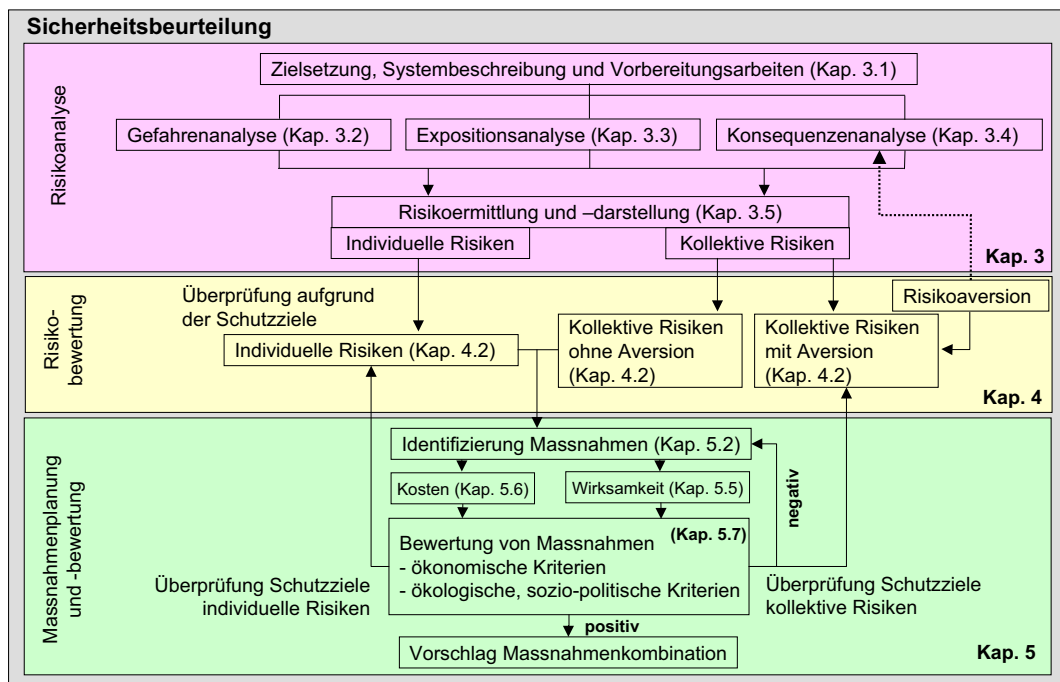


Abbildung 1.1: Elemente einer risikobasierten Planung von Sicherheitsmassnahmen.

Kapitel 2

Risikobegriff und Risikogrößen

2.1 Der Risikobegriff

Allgemein betrachtet bezeichnet das Risiko die Möglichkeit, dass eine unerwünschte Folge, d. h. im technischen-naturwissenschaftlichen Bereich ein Schaden, eintreten kann. Das Risiko kann daher als das Mass für den Umgang mit Sicherheit definiert werden, das an entsprechenden Risikogrößen gemessen und beurteilt wird. Das Risiko setzt sich zusammen aus:

- der **Häufigkeit** oder **Jährlichkeit** eines gefährlichen Ereignisses und
- dem **Schadenausmass**, das bestimmt wird durch die Anzahl Personen und die Sachwerte, die einem gefährlichen Ereignis zum Zeitpunkt seines tatsächlichen Eintrittes ausgesetzt sind sowie durch die Schadenempfindlichkeit der betroffenen Personen und Werte. Dabei können diese Werte ökonomische, ökologische oder soziale Dimensionen haben.

Zwischen den Begriffen Häufigkeit und Jährlichkeit besteht ein Zusammenhang, der in der Abbildung 2.1 dargestellt ist und der sich aus der Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion der Grösse eines Ereignisses ableitet [14]. Diese Funktion kann aus langjährigen Datenreihen abgeleitet werden. Die Jährlichkeit bezeichnet ein Zeitintervall, in dem ein bestimmter Wert, der einen Schaden verursacht, erreicht oder überschritten wird (z. B. Anrisshöhe bei Lawinen, Pegelstand bei Hochwasser, Blockgrösse bei Steinschlag). In Abbildung 2.1 (a) ist die Wahrscheinlichkeit dargestellt, dass ein Pegelstand einer bestimmten Jährlichkeit alle T^* Jahre erreicht oder überschritten wird.

In Abbildung 2.1 (b) ist die Häufigkeit eines Ereignisses dargestellt. In der Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion können Ereignisse mit einem Pegelstand T^* oder grösser in verschiedene Szenarien eingeteilt werden. Ein Szenario beinhaltet die Pegelständen zwischen T^* und T^1 , ein zweites diejenigen zwischen T^1 und T^2 sowie ein drittes die Pegelständen zwischen T^2 und T^{max} . Die Häufigkeiten dieser drei Szenarien entsprechen den jeweiligen unterschiedlich schraffierten Flächen in der Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion. Die Häufigkeit kann daher als Differenz der jeweils angrenzenden Jährlichkeiten approximiert werden. Entspricht in Abbildung 2.1 (b) $T^* = 30$ Jahre ($p_{30} = 0.033$) und $T^1 = 100$ Jahre ($p_{100} = 0.01$), so beträgt die Häufigkeit des Szenarios zwischen $T = 30$ Jahre und $T = 100$ Jahre, $p_{30} - p_{100} = 0.023$. Risiken infolge Naturgefahren werden als **Schadenerwartungswert** definiert. Das Risiko kann als Schadenerwartungswert pro Zeiteinheit (z. B. CHF pro Jahr) oder pro Ereignis ausgedrückt werden.

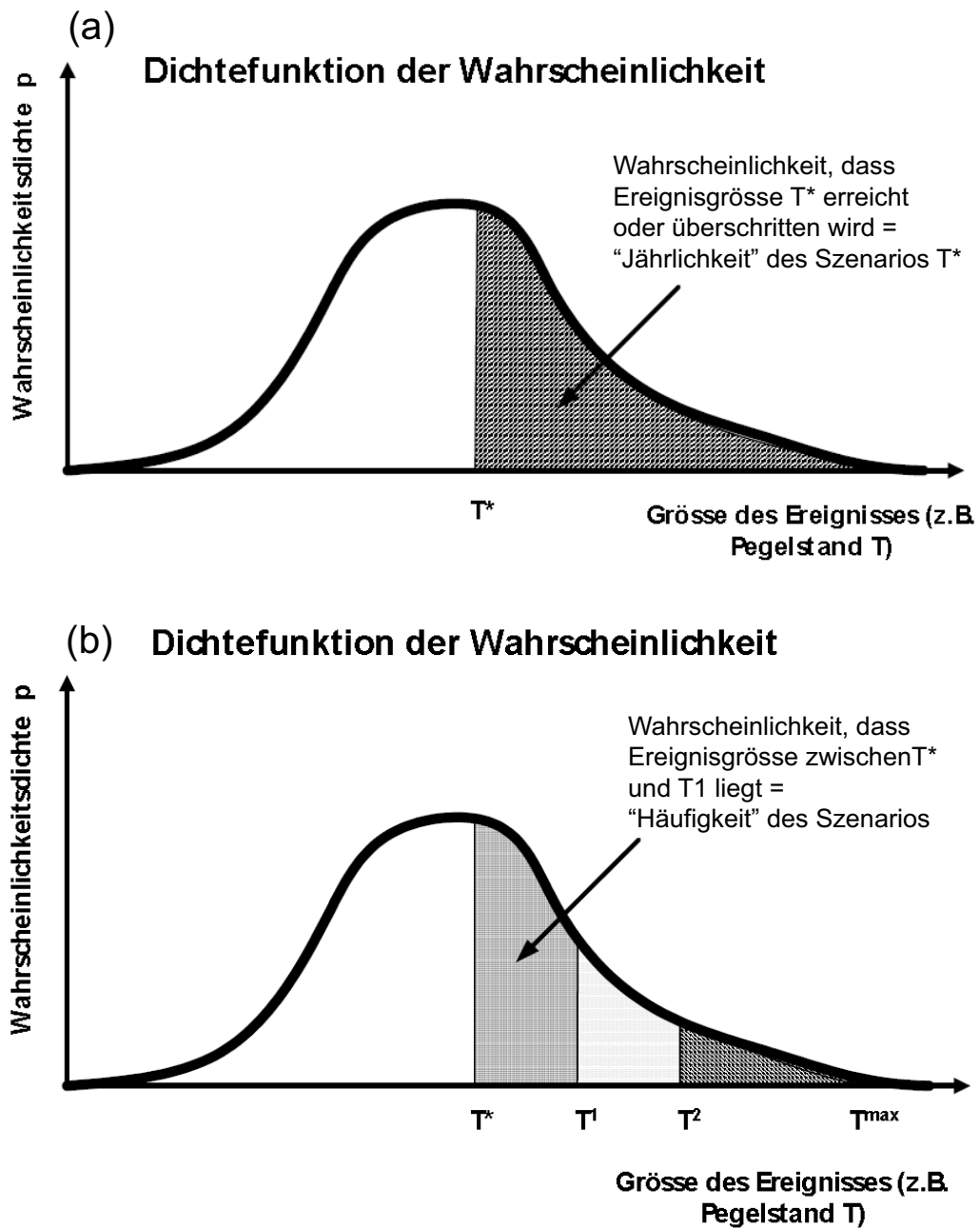


Abbildung 2.1: Darstellung von Jährlichkeit (a) und Häufigkeit (b) in einer Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion. (Grundlage: [14])

2.2 Die Risikoformel

Ein Risiko bzw. ein Schaden entsteht erst, wenn ein Objekt gefährlichen Wirkungen ausgesetzt ist und als Folge seiner Empfindlichkeit Schaden nehmen kann. Die Risikoformel zur Darstellung dieser Zusammenhänge lässt sich wie folgt formulieren:

$$R_{i,j} = p_j \cdot p_{i,j} \cdot A_i \cdot v_{i,j} \quad (2.1)$$

$$R_j = \sum_i R_{i,j} \quad (2.2)$$

$$R = \sum_j R_j \quad [\text{Tf/a oder CHF/a}] \quad (2.3)$$

- R = Kollektives Risiko als Summe über alle Szenarien j und Objekte i [CHF/a oder Tf/a].
 p_j = Wahrscheinlichkeit des Szenarios j [-].
 $p_{i,j}$ = Wahrscheinlichkeit, dass Objekt i dem Szenario j ausgesetzt ist [-].
 A_i = Wert des Objektes i [CHF].
 $v_{i,j}$ = Schadenempfindlichkeit des Objektes i in Abhängigkeit von Szenario j [-].

Die Formeln zeigen, dass bei gleicher Gefährdung aufgrund unterschiedlicher Schadenempfindlichkeiten unterschiedliche Risiken resultieren. Auch wenn diese Grössen je nach erforderlichem Detaillierungsgrad in der Anwendung des Risikokonzeptes nicht oder nur teilweise quantifiziert werden können, muss man sich dieser verschiedenen Faktoren und Zusammenhänge bei der Beurteilung von Risiken stets bewusst sein.

2.3 Gefährdete Personen und Objekte

Grundsätzlich sind in einer Risikoanalyse diejenigen Objekte zu berücksichtigen, welche für die Entscheidung über die notwendigen Sicherheitsmassnahmen im konkreten Fall massgebend sind. Einem Ereignis können entweder Personen oder Objekte oder aber beides ausgesetzt sein. Die Strategie der PLANAT «Sicherheit Naturgefahren Schweiz» [57] weist den Schutz von Menschenleben als prioritär aus, der Schutz von Sachwerten ist diesem Ziel nachgeordnet. In der Strategie der PLANAT wird aber auch auf Schutzbedürfnisse bei Infrastrukturen, Kulturgütern, politischen Gemeinwesen und sozio-ökonomischen Systemen hingewiesen.

Besondere Bedeutung haben daher Personen, die bei einem Naturereignis verletzt oder getötet werden können. Speziell zu behandeln sind Verletzte und die dabei entstehenden Folgekosten, die unter Umständen beträchtlich sein können. Grundsätzlich kann Personenschäden kein monetärer Wert zugeordnet werden. Um jedoch zusammen mit den Sachwerten ein Gesamtrisiko bestimmen zu können, wird den Personenschäden eine Geldeinheit zugeordnet, die sich aus der gesellschaftlichen Zahlungsbereitschaft zur Verhinderung von Todesfällen ableiten lässt (s.a. auch Abschnitt 4.2.3).

Gefährdete Objekte lassen sich in verschiedene Kategorien wie Gebäude (z. B. Wohnhäuser, Gewerbe- und Industriegebäude, Öffentliche Gebäude etc.), Sonderobjekte (z. B. Kraftwerk, Depone, Wasserreservoir etc.), Infrastruktur Strasse und Schiene, mechanische Aufstiegshilfen, Leitungen sowie Landwirtschaft, Grünanlagen und Wald einteilen. Der Schaden an Objekten kann

meist direkt in Geldeinheiten quantifiziert werden. Er entspricht dem Geldbetrag, der notwendig ist, um das Objekt wieder in den gleichen Zustand wie vor dem Ereignis zu versetzen. Dieser Wert wird auch als direkter Schaden bezeichnet.

Zusätzlich entstehen bei einem Naturereignis auch indirekte oder Folgeschäden. Dazu sind insbesondere Kosten infolge Betriebsunterbruch oder Verdiensteinbussen zu rechnen. Die Quantifizierung der indirekten Schäden kann sehr umfangreich, schwierig oder gar unmöglich sein. Problematisch kann auch die Abgrenzung zwischen betriebswirtschaftlichen und volkswirtschaftlichen Schäden sein. Aus den genannten Gründen werden indirekte Schäden häufig nicht oder nur unzureichend in Risikoanalysen einbezogen.

Neben den Schäden, die mehr oder weniger quantifiziert werden können, können auch Objekte betroffen sein, denen nicht ohne Weiteres ein ökonomischer Wert zugeordnet werden kann. Dazu sind vor allem Kulturobjekte zu zählen, die bei einem Schaden nicht oder unvollständig ersetzt werden können.

2.4 Risikogrößen für Todesopfer

2.4.1 Individuelles Risiko

Das individuelle Risiko bezeichnet das Risiko für den Einzelnen, d. h. es gibt die jährliche Wahrscheinlichkeit für eine Person an, in einer gegebenen Risikosituation zu Tode zu kommen. Das individuelle Risiko drückt damit die zusätzliche Wahrscheinlichkeit zur natürlichen Sterbewahrscheinlichkeit aus. Dargestellt in der Risikomatrix (Tabelle 3.5, Seite 36) ergibt sich das individuelle Risiko r_i einer Person aus der Summe von Risiken in allen möglichen Szenarien, in denen sich die Person befinden kann. Die Einheit des individuellen Risikos ist in der Regel die Sterbewahrscheinlichkeit pro Jahr oder auch pro Einheit einer bestimmten Tätigkeit (z. B. pro km Autofahren).

2.4.2 Kollektives Risiko

2.4.2.1 Personen

Das kollektive Risiko bezeichnet das Risiko für eine bestimmte Personengruppe oder Gemeinschaft. Übertragen auf die Risikomatrix (Tabelle 3.5, Seite 36) entspricht es dem Risiko R als Produkt der Häufigkeit eines Szenarios und dem wahrscheinlichen Schadenausmass.

Abbildung 2.2 verdeutlicht den Unterschied zwischen individuellem und kollektivem Risiko. In beiden Fällen ist das kollektive Risiko R gleich gross; der Erwartungswert an Todesopfern ist gleich gross. Im Fall (a) sind es drei Personen, die mit einem hohen, unter Umständen sogar sehr grossen (in diesem Fall aber gleichen) individuellen Risiko zum Gesamtrisiko R beitragen (z. B. Personen in einem besonders exponierten Wohnhaus). Im Fall (b) sind es viele Personen mit einem kleinen individuellen Risiko (z. B. Personen auf der Strasse). Im Fall (a) sind die potenziellen Opfer zudem in der Regel bekannt, im Fall (b) sind es zufällige Opfer aus einer grossen Anzahl von potenziell Betroffenen. Die Risikosituation ist somit immer durch das kollektive Risiko R und die Verteilung der individuellen Risiken bzw. die Form der resultierenden Risikofläche charakterisiert.

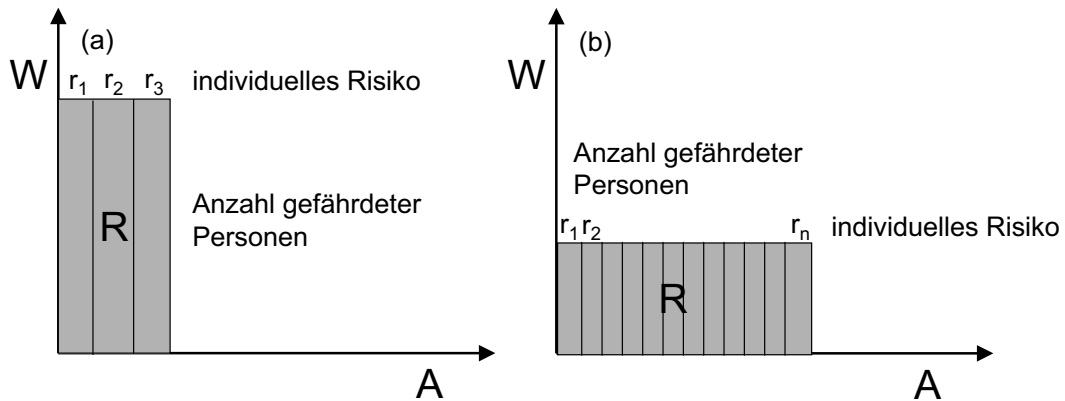


Abbildung 2.2: Unterschiedliches Ausmass von individuellen Risiken bei gleichem kollektivem Risiko R .

Für die Bewertung von Risiken ist dieser Unterschied ausschlaggebend. Die Risiken müssen daher immer aus diesen zwei Blickwinkeln ermittelt und beurteilt werden.

2.4.2.2 Sachwerte

Je nach Prozess haben nicht Personen sondern Sachwerte massgebenden Einfluss auf das Risiko (z. B. beim Prozess Hochwasser). Das kollektive Risiko in Bezug auf Sachwerte setzt sich zusammen aus der Summe des Schadenausmasses von jedem Objekt im Beurteilungsperimeter verknüpft mit der Häufigkeit des Szenarios. In der Risikomatrix lässt sich das Schadenausmass für jedes Objekt darstellen. Je nach Situation kann es sinnvoll sein, das Risiko für bestimmte, besonders bedeutsame Objekte gesondert darzustellen. Das Risiko in Bezug auf Sachwerte, ausgedrückt als Schadenerwartungswert, wird in Geldeinheiten pro Jahr (CHF pro Jahr) ausgedrückt.

Kapitel 3

Risikoanalyse

Das Ziel der Risikoanalyse ist die möglichst objektive Ermittlung der Risikogrößen für ein konkretes Schadenereignis, für ein spezifisches Objekt oder ein bestimmtes Gebiet. Dabei geht es sowohl um die Beurteilung der Ausgangssituation ohne Massnahmen, aber auch um die Beurteilung der Wirkung von Massnahmen. Letzteres ist insbesondere für die Massnahmenbewertung relevant (siehe Kapitel 5).

Eine Risikoanalyse wird in die folgenden Schritte unterteilt:

- **Zielsetzung, Abgrenzung und Vorbereitungsarbeiten:** Definition der Ziele einer Risikoanalyse, Abgrenzung des zu beurteilenden Gebietes sowie weitere Vorbereitungsarbeiten.
- **Gefahrenanalyse:** Ereignisanalyse (zur Festlegung der massgebenden Szenarien und ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit) und Wirkungsanalyse (zur Bestimmung der Intensitäten und des Ausmasses der Gefährdung).
- **Expositionsanalyse:** Identifikation von Art und Ort der gefährdeten Objekte (Personen und Sachwerte) sowie ihrer zeitlichen und örtlichen Präsenz (Expositionssituationen).
- **Konsequenzenanalyse:** Ermittlung des Schadenausmasses für die einzelnen Objekte (durch Verknüpfung von Anzahl und Wert der Objekte), der Schadenempfindlichkeit (Letalität), der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit des Prozesses, der Präsenzwahrscheinlichkeit von Personen und Objekten sowie dem Objektschutz. Bestimmung und Darstellung ungewichtetes und gewichtetes Schadenausmass (mit Risikoaversion).
- **Risikoermittlung und -darstellung:** Ermittlung und Darstellung der massgebenden Risikogrößen (individuelles und kollektives Risiko).

Die konkrete Ausgestaltung der Risikoanalyse, insbesondere des Detaillierungs- und Quantifizierungsgrades, hängen in hohem Masse von der Gefahrenart und der Gefahrensituation insgesamt ab. Aber auch das Ziel und die Ansprüchen an die Risikoanalyse sowie der Kenntnisstand des Analysen und die Datenlage spielen eine Rolle. Unabhängig von den Ansprüchen an eine Risikoanalyse ist stets der dargelegten Systematik zu folgen.

3.1 Zielsetzung, Abgrenzung und Vorbereitungsarbeiten

Bevor eine Risikoanalyse durchgeführt werden kann, muss der Beurteilungsumfang inhaltlich und geographisch abgegrenzt sowie das Ziel der Risikoanalyse definiert werden. Sodann gilt es die entsprechenden Grundlagen für die einzelnen Teilschritte zusammen zu tragen.

Vor Beginn der eigentlichen Sicherheitsbeurteilung sind mit der verantwortlichen Stelle (Auftraggeber) die Zielsetzung (inkl. dem Detaillierungsgrad) und die Abgrenzung des Beurteilungsumfanges festzulegen. Weitere Vorbereitungsarbeiten betreffen die Beschreibung des Beurteilungsumfanges sowie die Beschaffung und die Sichtung der verfügbaren Grundlagen. Festzulegen ist ferner die Projektorganisation (Beteiligte, Zuständigkeiten, Zusammenarbeit).

3.1.1 Zielsetzung

Das Ziel der Beurteilung hängt ab von der konkreten Problemlage und den erwarteten Resultaten. Wo steht das Problem im Entscheidungsprozess? Als wie kritisch wird die Situation beurteilt? Geht es vorerst nur um eine Grobbeurteilung als Entscheidungsgrundlage für die Beurteilung des Handlungsbedarfs und des weiteren Vorgehens, oder geht es bereits um eine möglichst detaillierte Planung und Beurteilung von Massnahmen? Welche Faktoren beeinflussen den Entscheidungsprozess? Aufgrund dieser Fragen ist das Ziel der Beurteilung zu präzisieren.

Aufgrund der Zielsetzung und der Situationsanalyse sind der notwendige und gerechtfertigte Detaillierungsgrad bzw. der Aufwand für die Beurteilung festzulegen. Es ist insbesondere zu beurteilen, ob der Aufwand für eine sorgfältige Beurteilung gemäss diesem Leitfaden die damit ermöglichte Kostenoptimierung für Massnahmen rechtfertigt. Der zweckmässige Detaillierungsgrad bzw. die nötige Sorgfalt der Analyse und Beurteilung hängen dabei auch von den rechtlichen Rahmenbedingungen ab (Sorgfaltspflicht).

3.1.2 Abgrenzung und Beschreibung des Beurteilungsumfanges

Die Abgrenzung und Beschreibung des Beurteilungsumfanges hängt ebenfalls wesentlich zusammen mit der Situationsanalyse und der Zielsetzung der Beurteilung. Sie ist

- geographisch (räumliche Ausdehnung des Beurteilungsumfanges) und
- inhaltlich (Gefahrenquellen, Objekte, Schadenarten, Nebeneffekte)

vorzunehmen.

3.1.3 Vorbereitungsarbeiten

3.1.3.1 Beschaffung und Sichtung der verfügbaren Grundlagen

Die Grundlagenbeschaffung für die Sicherheitsbeurteilung umfasst das verfügbare Kartenmaterial, Luftbilder, Ereigniskataster, technische Berichte und Gutachten (auch zu ähnlichen Situationen), Zeitungsberichte, mündliche Erfahrungsberichte, etc. Dazu gehören auch Daten zu menschlichen

Aktivitäten im Beurteilungsperimeter inkl. deren potenzielle zukünftige Entwicklung sowie Daten zu natürlichen Gegebenheiten inkl. Vegetation, meteorologische Daten, etc.

3.1.3.2 Projektorganisation und Zuständigkeiten

Jede Sicherheitsbeurteilung ist in einen Kontext eingebettet, welcher verschiedene Beteiligte aber auch Betroffene umfasst. Der Umgang mit dem organisatorischen Umfeld bzw. der Kontext der Beurteilung gehört ebenfalls zu den Vorabklärungen.

Insbesondere ist klarzustellen, wer für die nötigen Festlegungen und Entscheide betreffend die Beurteilung und das allgemeine Vorgehen zuständig ist. In der Regel ist dies der Auftraggeber. Ferner ist festzulegen, welche und in welcher Weise weitere Stellen und Personen einzubeziehen sind und an welche Adressen Informationen weiter gegeben werden dürfen bzw. müssen.

3.2 Gefahrenanalyse

Die in der Gefahrenanalyse ermittelten oder definierten Parameter bilden die Grundlage für die Berechnung der Risiken. Die Gefahrenanalyse lässt sich in Ereignisanalyse und Wirkungsanalyse unterteilen. Die Ereignisanalyse identifiziert die zu berücksichtigenden Gefahren und legt die massgebenden Szenarien fest. Die Wirkungsanalyse bestimmt Art, Ausdehnung und Intensität der gefährlichen Prozesse. Das Ergebnis der beiden Teilschritte und damit der Gefahrenanalyse sind Intensitätskarten für jedes der massgebenden Szenarien (Darstellung der Wirkungen je Szenario).

3.2.1 Ereignisanalyse

Zunächst werden in der **Ereignisanalyse** mit Hilfe verschiedener Datenquellen (z. B. Ereigniskataster, Luftbild- und Geländeanalyse) die relevanten Gefahren identifiziert. Die Auswertung der erwähnten Grundlagen erlaubt, zusammen mit weiteren Informationen und entsprechend dem aktuellen Stand des Wissens, die Festlegung der massgebenden Ereignisszenarien als Resultat der Ereignisanalyse. Grundsätzlich ist vom Ist-Zustand auszugehen. Mögliche veränderte Ereignisabläufe können einbezogen werden, müssen aber klar als solche gekennzeichnet werden. Ferner ist den Wechselwirkungen mit menschlicher Infrastruktur (z. B. Verklausung) Beachtung zu schenken. Die Szenarienbildung kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen (Abbildung 3.1):

- Aus Katasterdaten lässt sich die Wahrscheinlichkeit eines Szenarios ($p = 0.083$) über die Jährlichkeit T eines Prozesses bestimmen (z. B. Anzahl beobachteter Lawinen pro Zeitraum in einem Strassenabschnitt ergibt $T = 12$ Jahre) (Abbildung 3.1(a)).
- Die möglichen Ereignisgrößen werden mit Hilfe von Szenarien bestimmter Jährlichkeit kategorisiert. Aus Vergleichbarkeitsgründen werden in der Schweiz Klassen mit Jährlichkeiten von 0 bis 30 Jahre, 30 bis 100 Jahre, 100 bis 300 Jahre und 300 Jahre definiert. Für den Prozess Hochwasser wird auch noch jeweils ein Ereignis EHQ angenommen, das den Extremfall dargestellt. Die Jährlichkeit des EHQ liegt etwa im Bereich 500 bis 1000 Jahre (Abbildung 3.1(b)).

- Das komplexe Zusammenwirken verschiedener Ereignisabläufe wird mit Hilfe eines Ereignisbaumes modelliert (Abbildung 3.1(c)).
- Die Szenarien werden durch Expertenmeinungen festgelegt.

Letztere Möglichkeit ist vor allem beim pragmatischen Ansatz relevant, kommt jedoch auch bei der Überprüfung von modellierten Szenarien zur Anwendung. Der pragmatische Ansatz zum Umgang mit Naturgefahren bezeichnet ein Verfahren, in dem im Rahmen von Workshops zusammen mit Experten und Vertretern verschiedener Bereiche Grobabschätzungen über die Risikoverteilung in einer Region vorgenommen werden [14, 5].

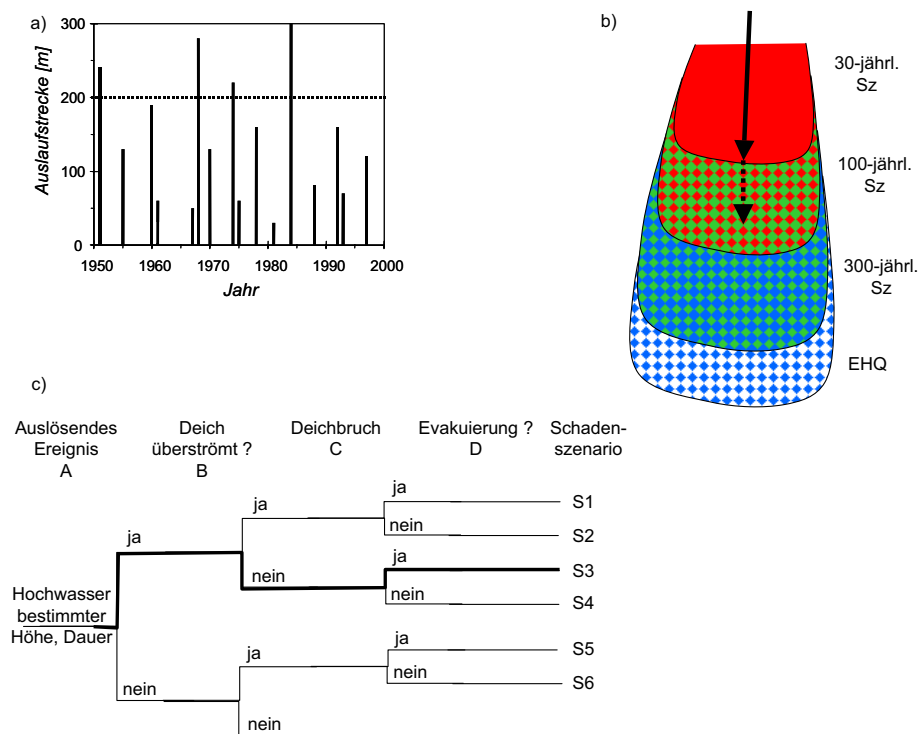


Abbildung 3.1: Möglichkeiten der Szenarienbildung. Im Fall (a) kann die Jährlichkeit eines Prozesses aus einer Beobachtungsperiode berechnet werden. Zum Beispiel wurden im Zeitraum von 48 Jahren verschiedene Lawinenergebnisse entlang einer beliebigen Verkehrsachse beobachtet. Dabei traten im Beobachtungszeitraum insgesamt 16 Lawinen auf, vier davon erreichten eine Auslaufslänge von 200 m. Daraus lässt sich eine Jährlichkeit von 12 Jahren errechnen (nach [84]). Im Fall (b) werden drei Szenarien mit einer Jährlichkeit von $T = 30$ Jahre, $T = 100$ Jahre und $T = 300$ Jahre gebildet. Der Raum jenseits des 300-jährlichen Ereignisses wird nicht mehr betrachtet. Im Fall (c) werden Szenarien mit Hilfe eines Ereignisbaumes gebildet.

3.2.2 Wirkungssanalyse

In der **Wirkungsanalyse** werden Art, Ausdehnung und Intensität der Gefährdung durch die festgelegten Szenarien bestimmt. Die Intensität entspricht der physikalischen Wirkung des Prozesses,

die je nach Prozesstyp unterschiedlich ist (z. B. die Überflutungshöhe oder das Produkt aus Überflutungshöhe und Fliessgeschwindigkeit bei Hochwasser).

Die Intensitäten in den Szenarien werden mit Angaben aus dem Kataster aber auch mit Hilfe von Modellrechnungen und Simulationen abgeschätzt, wobei ein vereinfachtes Bild des natürlichen Systems erstellt wird. Das Ergebnis sind Intensitätskarten. Intensitätskarten sind eine notwendige Voraussetzung für detaillierte Risikoanalysen und können nur sehr bedingt durch Gefahrenkarten ersetzt werden, da in einer Gefahrenkarte Intensität und Häufigkeit nicht getrennt dargestellt sind. Für eine Risikoanalyse ist es aber notwendig zu wissen, wo und wie oft mit welcher Intensität zu rechnen ist.

Aus Vereinfachungsgründen wird es in den meisten Fällen sinnvoll sein, die abgeschätzten bzw. berechneten Intensitäten in Klassen einzuteilen. Eine Möglichkeit der Abgrenzung dieser Klassen folgt den in der Naturgefahrenliteratur verankerten Konventionen (geringe, mittlere und starke Intensität). Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass mit einheitlichen Klassen gearbeitet wird, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Für die Prozesse Lawine, Hochwasser und Murgang, Sturz und Rutschung wurden die Abgrenzungskriterien für die Intensitätsklassen in Richtlinien und Empfehlungen des Bundes festgelegt [10, 47, 45].

Bei nicht-gravitativen Prozessen ist im Fall von Wind die Windgeschwindigkeit und deren Dauer von Bedeutung, bei Hagel die Korngrösse der Hagelkörner. Bei temperaturbedingten Prozessen (Hitze und Kälte) ist die Anzahl von Tagen über- bzw. unterhalb einer bestimmten Tagesdurchschnittstemperatur ein relevantes Abgrenzungskriterium für die Intensität.

3.3 Expositionsanalyse

In der Expositionsanalyse werden die potentiell gefährdeten Objekte im Beurteilungssperimeter identifiziert und hinsichtlich Lage, Anzahl, Art, Nutzung und Wert qualitativ bzw. quantitativ beschrieben. Eine Risikoanalyse geht grundsätzlich vom Ist-Zustand aus, das heisst, es werden nur diejenigen Objekte erfasst, die auch tatsächlich zum Zeitpunkt der Beurteilung vorhanden sind. Das Schadenpotential ist jedoch über die Zeit nicht konstant, sondern verändert sich. Eingezonte Gebiete im blauen Gebiet, die als Baugebiet ausgeschieden sind, können z. B. in fünf bis zehn Jahren nach einer Beurteilung bebaut sein, wodurch sich das Schadenpotential beträchtlich erhöhen kann, was wiederum das Risiko beeinflusst. Es bietet sich daher im Einzelfall an, diese Gebiete separat zum Ist-Zustand in die Planung einzubeziehen, um eine zukünftige Entwicklung des Risikos und ihr Einfluss auf die Massnahmenplanung beurteilen und gegebenenfalls berücksichtigen zu können. Die mögliche zukünftige Entwicklung muss jedoch in jedem Fall deutlich als solche gekennzeichnet sein.

Die Objekte und die zu beurteilenden Gebiete lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- Objekte, deren Zahl und Aufenthaltsort sich über die Zeit gesehen nicht verändert (ortsfest, fixe Objekte).
- Objekte, die zeitlich und örtlich variabel sind (Fahrzeuge, mobile Einrichtungen) und zum Beurteilungzeitpunkt als gegeben angenommen werden müssen.

- Personen mit einem Aufenthaltsort entweder in fixen oder variablen Objekten, die zum Zeitpunkt der Beurteilung angenommen werden.
- zukünftige Entwicklung (Zu- oder Abnahme) von ortsfesten Objekten und Personen als separate Eingangsgrößen für die Beurteilung einer Risikoentwicklung.

3.3.1 Identifizierung der ortsfesten Objekte

Für die potentiell gefährdeten, ortsfesten Objekte sind die in Tabelle 3.1 angegebenen Daten zu erheben. Diese Angaben sind Grundlage für die Ermittlung des Schadenausmasses, auf die in Abschnitt 3.4 eingegangen wird. Die so bestimmten Schäden entsprechen dem direkten Schaden, der in Folge der angenommenen Szenarien zu erwarten ist.

Tabelle 3.1: Direkte Grössen und Angaben zu potentiell gefährdeten Objekten.

Objektart	direkte Grössen
Gebäude, Sonderobjekte	Lage, Anzahl Gebäude, Anzahl Personen pro Gebäude, monetärer Wert
Infrastrukturen	Lage, Nutzung, Bauart, Objektschutz, monetärer Wert
Strasse, Schiene	Lage, Länge, Besetzungsgrad
mechanische Aufstieghilfe	Transportanlage, monetärer Wert, Objektschutz
Leitungen, Versorgung	Lage, Länge, monetärer Wert, Schutz
Landwirtschaft	Lage, Fläche, monetärer Wert
Wald	Lage, Fläche, monetärer Wert
Erholungsflächen	Lage, Fläche, monetärer Wert

Neben den direkten Schäden treten bei praktisch jedem Naturereignis auch indirekte Folgen auf. Diese entstehen durch die eingeschränkte Funktion von Objekten (z. B. beschädigter oder gesperrter Verkehrsweg, beschädigter Gewerbe- oder Industriebetrieb) für den Eigentümer oder Betreiber. Bei einigen Objekten stellen die indirekten Folgen den grösseren Anteil in Bezug auf die Schäden dar, als die direkten Schäden. Ein Beispiel dafür sind Bahnen mit einer gesetzlichen Fahrplanpflicht, da bei einem Unterbruch ein kostspieliger Ersatzbetrieb aufgebaut werden muss. Die direkten Schäden, wie z. B. leichte Schäden an Gleisanlagen bei einem Lawinenniedergang bzw. Räumungskosten fallen dagegen praktisch kaum ins Gewicht. Da indirekte Folgen jedoch meist schwer zu ermitteln sind, ist auf eine Dokumentation der gemachten Annahmen und eine sehr gute Nachvollziehbarkeit zu achten. Einige Beispiele für indirekte Folgen sind in Tabelle 3.2 angegeben.

3.3.2 Identifizierung von Personen und variablen Objekten

Für mobile Sachwerte wie Fahrzeuge, Zelte, Festeinrichtungen usw. ist zu bestimmen, ob sie in der Zeit, in der ein gefährlicher Prozess auftreten kann, tatsächlich im gefährdeten Gebiet vorhanden sind. Falls dies gegeben ist und ein beträchtlicher Schaden erwartet werden kann, sind diese in die Risikoanalyse einzubeziehen.

Tabelle 3.2: Indirekte Grössen und Angaben zu potentiell gefährdeten Objekten.

Objektart	indirekte Grössen
Gebäude, Sonderobjekte, Gewerbe, Industrie	Kosten Betriebsunterbruch
Infrastrukturen	Kosten Unterbruch
Strasse, Schiene, mechanische Aufstiegshilfe	Kosten Unterbruch (z. B. Staukosten)
Leitungen, Versorgung	Kosten Unterbruch
Landwirtschaft	Ertragsausfall
Wald	fehlender Schutz vor Naturgefahren
Erholungsflächen	Ertragsausfälle

Für den Umgang mit Personen ist zunächst zu entscheiden, ob diese für den untersuchten Prozess im Vordergrund stehen. Sodann ist zu entscheiden, ob die Annahme einer durchschnittlichen Belegung der Objekte eine ausreichende Genauigkeit liefert oder ob die Zahl der anwesenden Personen zu verschiedenen Zeiten stark schwankt.

Wenn von Durchschnittswerten ausgegangen wird, dann ist neben der durchschnittlichen Belegung der jeweiligen Objekten mit Personen ($N(P)$) auch die Präsenzwahrscheinlichkeit $p(pr)$ der Personen in den Objekten zu bestimmen. Darunter wird die Wahrscheinlichkeit verstanden, dass Personen bei Eintritt eines gefährlichen Prozesses in gefährdeten Objekten anwesend sind. Das Produkt aus der Belegung der Gebäude ($N(P)$) und der Präsenzwahrscheinlichkeit ($p(pr)$) ergibt die tatsächliche Belegung der Objekte mit Personen. Wird zum Beispiel angenommen, dass pro Wohnung im Mittel 2.24 Personen ($N(P) = 2.24$) wohnen, sich diese täglich im Mittel während 12 Stunden in ihren Häusern aufhalten und der Prozess während des ganzen Jahres auftreten kann, dann beträgt die Präsenzwahrscheinlichkeit $p(pr) = 0.5$ und damit die angenommene Anzahl der tatsächlich anwesenden Personen pro Wohnung 1.12 Personen ($N(P) \cdot p(pr) = 1.12$).

3.3.3 Unterscheidung von Expositionssituationen

Wenn die Anzahl der potentiell exponierten Personen über einen betrachteten Zeitraum stark schwankt und das Personenrisiko im Vordergrund der Betrachtungen liegt (z. B. bei den Prozessen Lawine, Murgang, Sturz), dann bietet sich die Modellierung dieser variierenden Personenzahl anhand so genannten Expositionssituationen an. In allen übrigen Fällen kann mit einer durchschnittlichen Anzahl von Personen in den Objekten gearbeitet werden.

Unter einer Expositionssituation wird eine gleich bleibende Verteilung von Personen im Gefahrenbereich während einer gewissen Dauer verstanden¹. Charakterisiert wird eine Expositionssituation durch eine bestimmte Dauer und durch die effektive Anzahl von Personen ($N(P_{eff})$) bei oder in einem Objekt. Typischerweise werden Expositionssituationen in eine **Grundsituation** und eine oder mehrere **Sondersituationen** unterteilt.

¹Ein einfaches Bild einer Expositionssituation ist ein Schnappschuss, wobei die Belichtungszeit der Situationsdauer entspricht.

Eine **Grundsituation** umschreibt eine konstante Anzahl von Personen über einen längeren Zeitraum, z. B. in Wohnhäusern. Die Grundsituation deckt den Grossteil der Zeit ab; ihr Anteil ist daher relativ hoch, z. B. 75 % der Gesamtzeit.

Mit **Sondersituationen** werden Fälle beschrieben, in denen während vergleichsweise kurzer Zeit grosse Personengruppen exponiert sind. Beispiele für Sondersituationen sind Zugsdurchfahrten, Durchfahrten von voll besetzten Reisebussen auf der Strasse, Verkehrsstau auf der Strasse, Durchmarsch grösserer Wandergruppen, eine Open-Air Veranstaltung mit Hunderten oder gar Tausenden von anwesenden Personen, ein vollbesetztes Schulhaus, Ferienheim oder Hotel, eine Hochzeit in einer Kirche usw. Trifft ein Ereignis mit einer Sondersituation zeitlich und räumlich zusammen, dann ist unter Umständen mit einer grossen Anzahl von Opfern zu rechnen. Das damit verbundene hohe Schadenausmass wird mit dem reinen Schadenerwartungswert nur unzureichend ausgedrückt, da solche Ereignisse für die verantwortliche Institution und Gemeinschaft ein überproportionales schweres Ereignis bedeutet.

Ein Einbezug solcher Situationen mit einer durchschnittlichen Anzahl von anwesenden Personen würde daher zu verzerrten Ergebnissen führen. Zudem liefert der Beitrag der Risiken aus Expositionssituationen wichtige Hinweise für die Massnahmenplanung. Trägt z. B. eine Expositionssituation in beträchtlichen Umfang zum Gesamtrisiko bei, dann muss einer Risikoreduktion dieser Expositionssituation vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Die Überlagerung verschiedener Sondersituationen mit den Grundsituationen führt zur Ausscheidung von verschiedenen Expositionssituationen, die durch die Anzahl der anwesenden Personen und ihre Dauer gekennzeichnet sind. Die Dauer der Expositionssituationen ergibt sich aus der Kombination der Sondersituationen mit den Grundsituationen.

Graphisch lassen sich Expositionssituationen und die zeitlichen Anteile der einzelnen Expositionssituationen im Verhältnis zur Gesamtzeit mit einem Ereignisbaum ableiten und darstellen (Abbildung 3.2).

Die Abbildung 3.2 zeigt anhand eines willkürlichen Beispiels die verschiedenen resultierenden Kombinationen. Sie unterscheiden sich durch die Anzahl der während der Zeitabschnitte anwesenden Personen in den verschiedenen Objekten und der Länge der Zeitabschnitte. Das Beispiel lässt auch vermuten, dass bei Annahme mehrerer Sondersituationen die Gesamtzahl der Expositionssituationen rasch gross werden kann. In den meisten Fällen wird es daher sinnvoll sein, mit einer Grund- und wenigen Sondersituationen die Realität abzubilden. So dürften meist eine bis drei Sondersituationen ausreichend sein, um die Realität mit einem verhältnismässigen Aufwand abzubilden². Der Entscheid, wie viele Sondersituationen unterschieden werden, muss pro Fallbeispiel gefällt werden. Für viele Fälle dürfte die Ausscheidung von folgenden Situationen sinnvoll sein:

1. Normale Belegung der Häuser mit anwesender Wohnbevölkerung, normale Verkehrsfrequenz, wenig Personen im Freien (hoher Zeitanteil, z. B. Situationsdauer_k (SD_k) = 0.75, d. h. an 75 von 100 Tagen ist diese Situation massgebend).

²Durch Unterstützung mit einer geeigneten Software kann der Umgang mit mehreren Expositionssituationen erheblich vereinfacht werden. Beispiele hierfür gibt es aus dem Bereich Umgang mit der Munitionslagerung (Software RIMANA Version 4).

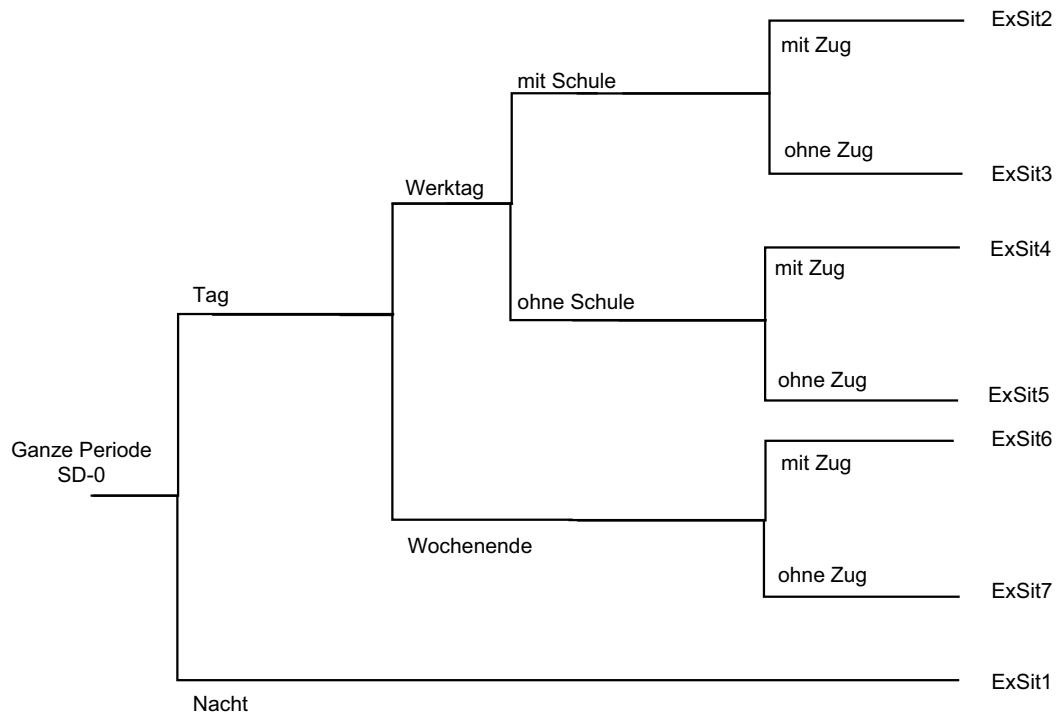


Abbildung 3.2: Darstellung von Expositionssituationen als Ereignisbaum.

2. Erhöhte Präsenz von Personen in Häusern, auf der Strasse (höherer durchschnittlicher Tagesverkehr (DTV)) und im Freien an Wochenenden oder in der Nacht bzw. in der Ferienzeit in Tourismusgebieten (mittlerer bis kleiner Zeitanteil, z. B. $SD_k = 0.23$, d. h. an 23 von 100 Tagen ist diese Situation massgebend).
3. Sondersituation. Beispiel: Durchfahrt von Zügen oder stark besetzten Reise- oder Linienbussen durch den gefährdeten Bereich. Ein Zug bzw. ein Bus halten sich nur während einer vergleichsweise kurzen Durchfahrtszeit im gefährdeten Bereich auf, gleichzeitig befindet sich aber eine grosse Anzahl von Personen im gefährdeten Bereich. Es entsteht eine Risikospitze. Weitere denkbare Sondersituationen sind auch ein Stau auf einer Strasse oder eine Open-Air Veranstaltung mit zahlreichen Besucherinnen und Besucher während einigen Stunden (sehr kleiner Zeitanteil, z. B. $SD_k = 0.02$, d. h. an 2 von 100 Tagen liegt diese Situation vor).

Nach Festlegung der verschiedenen Situationen werden für die einzelnen Objekte diejenigen Werte ermittelt, die für die verschiedenen Situationen charakteristisch sind:

Gebäude: Anzahl der in den einzelnen Situationen effektiv anwesenden Personen $N(Peff)$.

Strasse: Verkehrsfrequenz DTV_k , Besetzungsgrad der Fahrzeuge β_k , Geschwindigkeit der Fahrzeuge im gefährdeten Streckenabschnitt v in den einzelnen Situationen.

Bahn: Frequenz der Züge Fz_k , Zuglängen $l(z)$, Besetzungsgrad β_k , und Geschwindigkeit des Zuges v im gefährdeten Streckenabschnitt in den einzelnen Situationen.

Personen im Freien oder anderen Anlagen: Anzahl der in den einzelnen Situationen effektiv anwesenden Personen $N(Peff)$.

Wie in Abbildung 3.2 gezeigt, ergeben sich aus den Kombinationen dieser Situationen verschiedene Expositionssituationen. Die Dauer sämtlicher Expositionssituationen ergibt die volle Zeitspanne, das heisst die Summe der Zeitanteile der einzelnen Expositionssituationen ergibt den Wert 1 oder 100 %.

Der Zeitanteil von Expositionssituationen (SD_k) für Personen in nicht bewegten Objekten (Gebäude, fest Aufenthaltsorte im Freien) errechnet sich als Verhältnis der betrachteten Stunden, Tage oder Wochen zum gesamten betrachteten Zeitraum (z. B. Sommerhalbjahr) nach folgender Formel:

$$SD_k = \frac{t(pr)_k}{t(ha)} \quad [-] \quad (3.1)$$

wobei:

- SD_k = Zeitanteil einer Expositionssituation k .
 $t(pr)_k$ = Aufenthalt in Stunden, Tagen oder Wochen in Expositionssituation k .
 $t(ha)$ = Zeitdauer (Stunden, Tage, Wochen), in der sich ein Prozess ereignen kann.
 Die potentielle Gefahrenzeit unterscheidet sich je nach Prozess. Beim Prozess Lawinen kann z. B. vereinfacht nur das Winterhalbjahr angenommen werden, beim Prozess Murgang z. B. vor allem die Sommermonate.

Bei Situationen in denen Personen sich in bewegten Objekten aufhalten, ergibt sich die Dauer einer Situation aus der Häufigkeit der Durchfahrt, der Länge des gefährdeten Abschnitts und der gefahrenen Geschwindigkeit. Für die Sondersituation «Durchfahrt eines Zuges» errechnet sich die Dauer der Sondersituation nach folgender Formel:

$$SD(B)_k = \frac{Fz_k \cdot (g + l(z))}{v} \cdot \frac{t(pr)_k}{t(ha)} \quad [-] \quad (3.2)$$

wobei:

- $SD(B)_k$ = Zeitanteil der Sondersituation Zugdurchfahrt während einer Situation k .
 Fz_k = Frequenz der Züge während eines Tages.
 g = Länge der gefährdeten Strecke [m].
 $l(z)$ = Länge des Zuges [m].
 v = Durchschnittsgeschwindigkeit des Zuges [km/h].
 $t(pr)_k$ = Präsenzzeit in Stunden, Tagen oder Wochen in Expositionssituation k .
 $t(ha)$ = Zeitdauer (Stunden, Tage, Wochen), in der sich ein Prozess ereignen kann.

Für Autos oder Reisebusse darf man vereinfacht von Punktobjekten ausgehen, weshalb die Zuglänge $l(z)$ nicht berücksichtigt werden muss. Die Bestimmung des Zeitanteils SD_k funktioniert jedoch nach dem gleichen Prinzip.

3.3.4 Entwicklung des Schadenpotentials

Wie bereits eingangs dieses Abschnitts erwähnt, ist das Schadenpotential keine statische Grösse, sondern sie verändert sich mit der Zeit. Um die Entwicklung des Risikos in einem Gebiet in die

Massnahmenplanung einzubeziehen, kann es je nach Projekt sinnvoll sein, zusätzlich zur Erhebung des Ist-Zustandes Annahmen zur Entwicklung des Schadenpotentials zu machen. Folgende Grössen sollten in die Betrachtung einbezogen werden:

- Veränderung der Anzahl Gebäude und Sonderobjekte;
- Veränderung der Infrastruktur;
- Veränderung der Anzahl und der Länge von Verkehrswegen (Strasse und Schiene);
- Veränderung von Leitungen zur Energieversorgung, Telekommunikation, Wasser und Abwasser;
- Veränderung der Frequenz von Fahrzeugen auf Strasse und Schiene;
- Veränderung der Anzahl von durchschnittlich anwesenden Personen in Gebäuden und auf Verkehrswegen;
- Zeitraum der erwarteten Zunahme.

3.4 Konsequenzenanalyse

In der Konsequenzenanalyse³ wird durch Überlagerung der Intensitätskarten und der potentiell gefährdeten Objekte unter Einbezug von Schadenempfindlichkeit (bei Personen zusätzlich der Einbezug der Letalität), der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit und der Präsenzwahrscheinlichkeit das Schadenausmass im Ereignisfall für jedes Objekt einschliesslich anwesender Personen für alle betrachteten Ereignisszenarien und Expositionssituationen bestimmt.

3.4.1 Berechnungsfaktoren in der Konsequenzenanalyse

3.4.1.1 Schadenempfindlichkeit

Der Begriff **Schadenempfindlichkeit** wird in diesem Leitfaden als Charakterisierung des Ausmasses einer Beeinträchtigung verstanden, welche ein Objekt (wie z. B. Gebäude oder Infrastruktur) unter einer bestimmten Prozesseinwirkung erfährt. Die Schadenempfindlichkeit (*SE*) ist je nach Prozessart und Intensität verschieden und wird mit einem Wert zwischen 0 (keine Beeinträchtigung) und 1 (totale Beeinträchtigung = Totalschaden) quantifiziert. Der Begriff Schadenempfindlichkeit wird häufig als Synonym für den Begriff Verletzlichkeit verwendet.

Der Begriff Verletzlichkeit ist jedoch weiter gefasst und schliesst neben der negativen Beeinträchtigung von Objekten auch die von technischen oder gesellschaftlichen Systemen ein [38]. Verletzlichkeit kann daher in eine «technische» oder «soziale» Verletzlichkeit unterteilt werden [48]. Der Begriff «technische Verletzlichkeit» wird vor allem für die Beeinträchtigung von technischen Systemen verwendet.

Unter Verletzlichkeit von technischen Systemen wird die Beeinträchtigung von Systemen wie z. B. Warnsystemen, Elektrizitäts- bzw. Energieversorgung, Wasserversorgung, Kommunikationsnetzen

³auch Folgenanalyse oder in den Technischen Vorschriften zur Munitionslagerung (TLM) als Analyse der Auswirkungen bezeichnet.

oder Verkehrsnetzen verstanden. Die Beeinträchtigung kann ebenfalls als Bruchteil im Verhältnis zum funktionstüchtigen System umschrieben werden. Dabei ist auch eine zeitliche Komponente einzubeziehen, die aussagt, wie schnell das System wieder in den voll funktionsfähigen Zustand gebracht werden kann (Resilienz des Systems).

Unter Verletzlichkeit von sozialen Systemen wird die Beeinträchtigung einer Gesellschaft bzw. des Teils einer Gesellschaft verstanden (z. B. Bewohner einer Region oder Talschaft oder einer Gemeinde). Die Verletzlichkeit bestimmt hier den Grad der Abweichung von einem definierten Normalzustand. Die Beeinträchtigung kann z. B. darin bestehen, dass nach wiederholten Naturereignissen ein Gebiet einen starken Imageschaden erleidet oder an Attraktivität verliert und die Bewohnerinnen und Bewohner dieses Gebiet verlassen. Die Resilienz einer Gemeinschaft (z. B. Talgemeinschaft) spielt für den Grad der Verletzlichkeit eine bedeutende Rolle.

Im Idealfall sind für alle potentiell betroffenen Objekte bzw. Systeme Konventionen vorhanden, die eine Zuordnung von Verletzlichkeitswerten bzw. -funktionen entsprechend der zu erwartenden Intensität zulassen. In der gegenwärtigen Naturgefahrenpraxis ist dies leider nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich. So wird man in den meisten Fällen auf Annahmen angewiesen sein, die aber im Sinne der Nachvollziehbarkeit klar definiert werden müssen. Im Rahmen des Projektes EconoMe [8] wurden auf Basis des vorhandenen Wissens Werte für die Schadenempfindlichkeit von Objekten definiert. Im Anhang zu jedem Prozess sind die entsprechenden Werte aufgeführt (s.a. Teil B).

Der Begriff **Letalität** bezeichnet die Schadenempfindlichkeit von Personen und beziffert die Wahrscheinlichkeit der Todesfolge einer Person unter Einwirkung einer bestimmten Prozessintensität. Sie wird mit Werten zwischen 0 und 1 quantifiziert. Die Letalität (λ) ist abhängig von der Exposition der Person (Person im Freien, in Gebäuden, in Fahrzeugen, usw.). Befindet sich eine Person zum Zeitpunkt eines Ereignisses in einem Objekt, errechnet sich die Wahrscheinlichkeit der Todesfolge (Letalität) aus dem Produkt von Schadenempfindlichkeit des entsprechenden Objektes und dem Letalitätsfaktor in diesem Objekt.⁴

3.4.1.2 Objektschutz

Die Schadenempfindlichkeit eines Objekts wird massgeblich durch bauliche Massnahmen beeinflusst, die direkt am Objekt angebracht wurden, um bei Eintreten eines Ereignisses Schaden abzuwenden. Die Wirkung dieser Massnahmen wird bei der Bestimmung des Schadenausmasses durch den Objektschutzfaktor (ε) berücksichtigt. Hat ε den Wert «0» ist kein Schutz vorhanden; ist $\varepsilon = 1$, bedeutet dies einen vollständigen Schutz.

3.4.1.3 Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit

Dies ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Punkt im Beurteilungsperimeter bei Eintritt eines Gefahrenprozesses erreicht wird. Der Einbezug einer räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit trägt der Sachlage Rechnung, dass oft nicht die gesamte gefährdete Fläche von einem Gefahrenprozess betroffen ist. Diese Wahrscheinlichkeit kann auf verschiedene Weise abgeschätzt werden:

⁴In der Objektparametertabelle «EconoMe» sind Schadenempfindlichkeit und Letalitätsfaktor getrennt dargestellt.

1. Durch Festlegung eines Faktors $p(rA)$ zwischen 0 und 1, der festlegt, welcher Anteil eines Bereichs im Mittel betroffen wird. Dieser Faktor ist für jeden Prozess und jedes Szenario unterschiedlich.
2. Durch Abschätzung mit Hilfe eines Ereignisbaumes. Damit ist es möglich, ortsspezifisch Eigenschaften des Geländes und die Lage eines Objekts in die Betrachtung einzubeziehen.

3.4.1.4 Präsenzwahrscheinlichkeit

Wie in Abschnitt 3.3.3 dargelegt, ergibt sich die Präsenzwahrscheinlichkeit $p(pr)$ aus der durchschnittlichen Dauer der Anwesenheit einer Person oder eines Objektes im gefährdeten Bereich. Da Personen nicht während der gesamten betrachteten Zeit in einem Gebiet anwesend sind, bzw. sich nur sehr kurzzeitig darin aufhalten (z. B. Durchfahrt in einem Auto oder einem Zug), wirkt die Präsenzwahrscheinlichkeit reduzierend auf die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Schadens.

Wenn Expositionssituationen unterschieden werden, so muss der Zeitanteil der Situationsdauer SD_k bei der Bestimmung des Schadenausmass berücksichtigt werden. Da bei der Unterscheidung von Expositionssituationen ein grosses Schadenausmass entstehen kann, wirkt der Zeitanteil stark reduzierend auf die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Schadens.

3.4.1.5 Verknüpfung der Faktoren

Zur Bestimmung des Schadenausmasses werden die obigen Faktoren mit den exponierten Objekten verknüpft. Für jede Expositionssituation wird überprüft:

- ob ein Objekt betroffen ist (räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit $p(rA)$) und
- in welcher Intensitätszone es liegt.

Basierend auf diesen Angaben wird für jedes Objekt gemäss den folgenden Berechnungsformeln (Abschnitt 3.4.3) das Schadenausmass und das wahrscheinliche Schadenausmass bestimmt. Die Ergebnisse der Berechnung lassen sich dann in eine Matrix des Schadenausmasses übertragen (Tabelle 3.5).

Für technische und soziale Systeme sind gegenwärtig keine Verletzlichkeitsfunktionen vorhanden. Sind solche Systeme betroffen, so müssen mit Hilfe von Experteneinschätzungen geeignete Verletzlichkeitsfunktionen definiert werden.

3.4.2 Gewichtung des Schadenausmasses (Risikoaversion)

Ein weiterer Faktor, der an dieser Stelle aus methodischen Gründen erwähnt werden muss, ist die Gewichtung eines grossen Schadenausmasses (Einbezug einer Risikoaversionsfunktion). Gemäss der Strategie der PLANAT wird bereits ein Schadenausmass grösser einem Todesfall gewichtet. Die Gewichtung des Schadenausmasses ist ein Teil der Risikobewertung, die von der Gesellschaft bzw. einem Unternehmen getroffen wird. Da jedoch nicht das Risiko, sondern das Schadenausmass gewichtet wird, muss diese Überlegung aus Verständnisgründen hier schon erwähnt werden.

Die genaueren Gründe, die für eine Gewichtung des Schadenausmass sprechen, werden in Abschnitt 4.4 erläutert. In einer Risikoanalyse sollte immer das tatsächliche (ungewichtete) und das empfundene (gewichtete) Schadenausmass bestimmt und dargestellt werden. Gewichtet wird dabei stets das «Schadenausmass im Ereignisfall» (Abschnitt 3.4.3).

3.4.3 Bestimmung direktes Schadenausmass

Bei der Berechnung des Schadenausmasses können zwei Unterscheidungen getroffen werden:

1. Das «Schadenausmass im Ereignisfall» bezeichnet das Schadenausmass, wenn das Objekt tatsächlich getroffen wird. Das Schadenausmass im Ereignisfall wird im Folgenden vereinfacht als Schadenausmass bezeichnet.
2. Das «wahrscheinliche Schadenausmass» bezeichnet das «Schadenausmass im Ereignisfall» unter Einbezug der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit und der Präsenzwahrscheinlichkeit eines Objektes oder einer Person. Es kann auch gleich dem «Schadenausmass im Ereignisfall» sein, wenn die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit und die Präsenzwahrscheinlichkeit den Wert «1» haben.

Das «Schadenausmass im Ereignisfall» ist daher grösser oder gleich dem «wahrscheinlichen Schadenausmass» und ist derjenige Wert, der bei Einbezug der Risikoaversion gewichtet wird.

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Schritte bei der Bestimmung des Schadenausmasses mit den entsprechenden Berechnungsformeln dargestellt. Die Grundlage dafür stellt die BUWAL Publikation 107 dar [12], welche für alle Prozesse angewendet werden kann.

3.4.3.1 Schadenausmass Gebäude

$$A(G)_{i,j} = (1 - \varepsilon_i) \cdot W(G)_i \cdot SE(G)_{i,j} \quad [\text{CHF}] \quad (3.3)$$

Unter Einbezug der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit eines Prozesses erhält man das wahrscheinliche Schadenausmass für Gebäude

$$Aw(G)_{i,j} = p(rA)_j \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot W(G)_i \cdot SE(G)_{i,j} \quad [\text{CHF}] \quad (3.4)$$

3.4.3.2 Schadenausmass Personen in Gebäuden

$$A(PG)_{i,j,k} = (1 - \varepsilon_i) \cdot N(P)_{i,k} \cdot \lambda_{i,j} \quad [\text{Tf}] \quad (3.5)$$

Unter Einbezug der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit eines Prozesses erhält man das wahrscheinliche Schadenausmass für Personen

$$Aw(PG)_{i,j,k} = p(rA)_j \cdot p(pr)_{i,k} \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot N(P)_{i,k} \cdot \lambda_{i,j} \quad [\text{Tf}] \quad (3.6)$$

wobei:

$A(G)_{i,j}$	=	Schadenausmass Sachwerte im Ereignisfall für ein Gebäude i in einem Szenario j [CHF].
$Aw(G)_{i,j}$	=	wahrscheinliches Schadenausmass Sachwerte für ein Gebäude i in einem Szenario j [CHF].
$A(PG)_{i,j,k}$	=	Schadenausmass Personen im Ereignisfall (Anzahl Todesfälle) für ein Gebäude i in einem Szenario j und einer Expositionssituation k [Tf].
$Aw(PG)_{i,j,k}$	=	wahrscheinliches Schadenausmass Personen (Anzahl Todesfälle) für ein Gebäude i in einem Szenario j und einer Expositionssituation k [Tf].
ε_i	=	Objektschutzfaktor von Gebäude i in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität [-]. Der Wert liegt zwischen 0 und 1. Der Wert 1 bedeutet, dass das Gebäude zu 100 % geschützt ist und kein Schaden erwartet werden muss.
$W(G)_i$	=	Wert Gebäude i [CHF].
$SE(G)_{i,j}$	=	Schadenempfindlichkeit Gebäude i in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität [-]. Der Wert liegt zwischen 0 und 1. Der Wert 1 bedeutet, dass das Gebäude zu 100 % zerstört ist.
$N(P)_{i,k}$	=	Anzahl durchschnittlich anwesender Personen in einem Gebäude i in Expositionssituation k [-].
$\lambda_{i,j}$	=	Letalität Personen in einem Gebäude i in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität [-]. Der Wert liegt zwischen 0 und 1. Der Wert 1 bedeutet, dass bezogen auf eine Person mit einem Todesfall zu rechnen ist.
$p(rA)_j$	=	räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Prozesses und des gewählten Szenarios j am Ort [-].
$p(pr)_{i,k}$	=	Präsenzwahrscheinlichkeit einer Person i in Expositionssituation k [-].

Das gesamte wahrscheinliche Schadenausmass der Gebäude $Aw(G)_j$ in einem Szenario j berechnet sich mit:

$$Aw(G)_j = \sum_i Aw(G)_{i,j} \quad [\text{CHF}] \quad (3.7)$$

Das gesamte wahrscheinliche Schadenausmass von Personen in allen Gebäuden $Aw(P)_{j,k}$ in einem Szenario j und einer Expositionssituation k berechnet sich mit:

$$Aw(PG)_{j,k} = \sum_i Aw(PG)_{i,j,k} \quad [\text{Tf}] \quad (3.8)$$

Das Schadenausmass über alle Expositionssituationen ist die Summe der Schadenausmasse der einzelnen Expositionssituationen:

$$Aw(PG)_j = \sum_k Aw(PG)_{j,k} \quad [\text{Tf}] \quad (3.9)$$

3.4.3.3 Schadenausmass fixe Sachwerte entlang Strassen

Das Schadenausmass für fixe (ortsfeste) Sachwerte entlang von Strassen berechnet sich aus:

$$A(S)_j = SE(S)_j \cdot W(S) \cdot g_j \quad [\text{CHF}] \quad (3.10)$$

Unter Einbezug der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit ergibt sich das wahrscheinliche Schadenausmass $Aw(S)_j$:

$$Aw(S)_j = p(rA)_j \cdot SE(S)_j \cdot W(S) \cdot g_j \quad [\text{CHF}] \quad (3.11)$$

Die für die Berechnung massgebende Schadenempfindlichkeit entspricht einer über die Streckenlänge pro Intensität gemittelten Schadenempfindlichkeiten, gemäss:

$$SE(S)_j = \frac{(SE(S)_s \cdot g_s) + (SE(S)_m \cdot g_m) + (SE(S)_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.12)$$

wobei:

- $SE(S)_j$ = gemittelte Schadenempfindlichkeit Strasse in Abhängigkeit des Prozesses im Szenario j [-].
- $SE(S)_{s,m,st}$ = Schadenempfindlichkeit bei schwacher, mittlerer und starker Intensität.
- $W(S)$ = Sachwert Strasse pro Laufmeter [CHF].
- g_j = Länge des gesamten gefährdeten Abschnitts pro Szenario j als Summe der Streckenabschnitte unabhängig von der Intensität [m].
Sie berechnet sich als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher (g_s), mittlerer (g_m) und starker Intensität (g_{st}).

3.4.3.4 Schadenausmass Personen entlang von Strassen und mechanischen Aufstiegshilfen

Bei Unfällen auf Strassen infolge Naturereignissen können grundsätzlich zwei Schadenbilder unterschieden werden:

1. Das Fahrzeug wird von einem Prozess direkt getroffen. Dieses Schadenbild ist vor allem für gravitative und sogenannte «brutale» Prozesse massgebend. Die Wahrscheinlichkeit für einen Direkttreffer richtet sich nach der Frequenz der Fahrzeuge, der durchschnittlichen Geschwindigkeit der Fahrzeuge und der Länge des gefährdeten Streckenabschnitts.
2. Das Fahrzeug kann auf bereits abgelagertes Material auffahren (Fall «Anprall auf abgelagertes Material»).

Ob diese Unterscheidung getroffen werden muss, hängt ab von der Lage des gefährdeten Streckenabschnitts und der Übersichtlichkeit des Streckenverlaufs. Da Autos und Reisebusse sehr viel kürzere Bremswege haben als Züge, dürfte diese Unterscheidung nur in wenigen Fällen wirklich notwendig sein. Sie wird der Vollständigkeit halber hier jedoch erwähnt.

Direkttreffer: Beim Schadenbild «Direkttreffer» wird das Schadenausmass von Personen in Fahrzeugen entlang von Strassen und in mechanischen Aufstiegshilfen wie folgt bestimmt:

$$A(PS)_{j,k} = \lambda_j \cdot \beta_k \quad [\text{Tf}] \quad (3.13)$$

Unter Einbezug der räumlichen und zeitlichen Präsenzwahrscheinlichkeit ergibt sich das wahrscheinliche Schadenausmass $Aw(PS)_{j,k}$ für Personen auf Strassen und mechanischen Aufstiegshilfen:

$$Aw(PS)_{j,k} = p(rA)_j \cdot \frac{DTV_k \cdot g_j}{v} \cdot \lambda_j \cdot \beta_k \quad [\text{Tf}] \quad (3.14)$$

Die für die Berechnung massgebende Letalität entspricht einer über die Streckenlänge pro Intensität gemittelten Letalität, gemäss:

$$\lambda_j = \frac{(\lambda_s \cdot g_s) + (\lambda_m \cdot g_m) + (\lambda_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.15)$$

wobei:

- $A(PS)_{j,k}$ = Schadenausmass Personen auf Strasse und in mechanischer Aufstiegshilfe im Ereignisfall im Szenario j und Expositionssituation k [Tf].
- DTV_k = durchschnittlicher täglicher Verkehr in Expositionssituation k [1/d].
Bei mechanischen Aufstiegshilfen entspricht dies der durchschnittlichen Anzahl transportierter Personen pro Tag.
- λ_j = über die gefährdete Strecke gemittelte Letalität im Fahrzeug berechnet aus der Letalität in schwacher (λ_s), mittlerer (λ_m) und starker Intensität (λ_{st}) [-].
- β_k = durchschnittlicher Besetzungsgrad der Fahrzeuge in Expositionssituation k [-].
- $p(rA)_j$ = Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Abhängigkeit des Prozesses und des Szenarios j [-].
- g_j = Länge des gesamten gefährdeten Abschnitts pro Szenario als Summe der Streckenabschnitte unabhängig von der Intensität [m].
Sie berechnet sich als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher (g_s), mittlerer (g_m) und starker Intensität (g_{st}).
- v = durchschnittliche Geschwindigkeit Fahrzeuge resp. mechanischen Aufstiegshilfen im gefährdeten Streckenabschnitt [km/h].

Das gesamte Schadenausmass «Personen entlang von Strassen» ergibt sich aus der Summe der Schadenausmasse in den einzelnen Gefahrenabschnitten verschiedener Intensität und den verschiedenen Expositionssituationen k .

$$Aw(PS)_j = \sum_k Aw(PS)_{j,k} \quad [Tf] \quad (3.16)$$

3.4.3.5 Schadenausmass entlang von Bahnlinien

Es ist zu unterscheiden, ob ortsfeste oder mobile Objekte auf einer Bahnlinie getroffen werden. Zu den mobilen Objekten zählen auch die Zugkompositionen mit den sich darin befindlichen Personen.

Schadenausmass ortsfeste Sachwerte: Das Schadenausmass von fest installierten Sachwerten, die als Punktobjekte definiert werden, wie Schaltposten, Kabelanlagen etc. berechnet sich nach folgender Formel:

$$A(BPO)_{i,j} = SE(BPO)_{i,j} \cdot W(BPO)_i \quad [CHF] \quad (3.17)$$

Unter Einbezug der Wahrscheinlichkeit ergibt sich das wahrscheinliche Schadenausmass

$$Aw(BPO)_{i,j} = p(rA)_j \cdot SE(BPO)_{i,j} \cdot W(BPO)_i \quad [\text{CHF}] \quad (3.18)$$

Das Schadenausmass für Linienobjekte wie die Gleisanlage etc. berechnet sich aus:

$$A(BLO)_j = SE(BLO)_j \cdot W(BPO) \cdot g_j \quad [\text{CHF}] \quad (3.19)$$

Unter Einbezug der Wahrscheinlichkeit ergibt sich das wahrscheinliche Schadenausmass

$$Aw(BLO)_j = p(rA)_j \cdot SE(BLO)_j \cdot W(BLO) \cdot g_j \quad [\text{CHF}] \quad (3.20)$$

Die für die Berechnung massgebende Schadenempfindlichkeit entspricht einer über die Streckenlänge pro Intensität gemittelten Schadenempfindlichkeiten, gemäss:

$$SE(BLO)_j = \frac{(SE(BLO)_s \cdot g_s) + (SE(BLO)_m \cdot g_m) + (SE(BLO)_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.21)$$

wobei:

- $SE(BPO)_{i,j}$ = Schadenempfindlichkeit eines Punktobjektes i im Szenario j [-].
- $SE(BLO)_j$ = gemittelte Schadenempfindlichkeit des Linienobjektes über den gefährdeten Streckenabschnitt im Szenario j [-].
- $W(BPO)_i$ = Sachwert Bahn pro Objekt i [CHF].
- $W(BLO)$ = Sachwert Bahn pro Laufmeter [CHF].
- g_j = Länge des gesamten gefährdeten Abschnitts pro Szenario j als Summe der Streckenabschnitte unabhängig von der Intensität [m].
Sie berechnet sich als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher (g_s), mittlerer (g_m) und starker Intensität (g_{st}).
- $Aw(BPO)_{i,j}$ = wahrscheinliches Schadenausmass fixe Sachwerte für Punktobjekt i in Szenario j [CHF].
- $Aw(BLO)_j$ = wahrscheinliches Schadenausmass fixe Sachwerte für Linienobjekt in Szenario j [CHF].

Schadenausmass mobile Sachwerte: Das Schadenausmass von mobilen Sachwerten (Lokomotive und Rollmaterial) entlang von Bahnlinien wird mit den beiden Schadenbildern «Direkttreffer» und «Anprall auf abgelagertes Material» beschrieben (Abbildung 3.3).

Direkttreffer: Der Zug kann direkt von einem gefährlichen Prozess getroffen werden. Dieser Fall ist vor allem für gravitative und sogenannte «brutale» Prozesse, wie Lawine, Murgang, Stein Schlag und oberflächennahe Rutschung (Hangmure) relevant. Die Trefferwahrscheinlichkeit richtet sich nach der Frequenz der Züge, der durchschnittlichen Geschwindigkeit in der gefährdeten Zone, der Länge eines Zuges und der Länge des gefährdeten Gebietes. Ist der Prozess ausgelöst, wird die Wahrscheinlichkeit eines Direkttreffers nach folgender Formel berechnet:

$$p(DT)_{j,k} = p(rA)_j \cdot \frac{F_{zk} \cdot g_j}{v} \cdot \left(\frac{l(z)}{g} + 1 \right) \quad [-] \quad (3.22)$$

wobei $\left(\frac{g}{l(z)} \leq 1\right)$ und:

- $p(DT)_{j,k}$ = Wahrscheinlichkeit für einen Direkttreffer in Szenario j in der Expositionssituation k [-].
- $p(rA)_j$ = räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit am Ort in Szenario j [-].
- Fz_k = Anzahl der Zugsdurchfahrten pro Tag in Expositionssituation k [1/d].
- g_j = Länge des gesamten gefährdeten Abschnitts pro Szenario j als Summe der Streckenabschnitte unabhängig von der Intensität [m].
Sie berechnet sich als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher (g_s), mittlerer (g_m) und starker Intensität (g_{st}).
- v = durchschnittliche Geschwindigkeit der Züge im gefährdeten Streckenabschnitt [km/h].
- $l(z)$ = durchschnittliche Länge der Züge [m].

Das Schadenausmass für mobile Sachwerte bei einem Direkttreffer berechnet sich mit:

$$A(BDT)_j = SE(BDT)_j \cdot W(B) \quad [\text{CHF}] \quad (3.23)$$

Unter Einbezug der Wahrscheinlichkeit eines Direkttreffers ergibt sich das wahrscheinliche Schadenausmass $Aw(BDT)_{j,k}$:

$$Aw(BDT)_{j,k} = p(DT)_{j,k} \cdot SE(BDT)_j \cdot W(B) \quad [\text{CHF}] \quad (3.24)$$

Die für die Berechnung massgebende Schadenempfindlichkeit entspricht einer über die Streckenlänge pro Intensität gemittelten Schadenempfindlichkeiten, gemäss:

$$SE(BDT)_j = \frac{(SE(BDT)_s \cdot g_s) + (SE(BDT)_m \cdot g_m) + (SE(BDT)_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.25)$$

wobei:

- $A(BDT)_j$ = Schadenausmass mobile Sachwerte bei Direkttreffer auf einer Bahnlinie in Szenario j [CHF].
- $SE(BDT)_j$ = über den gefährdeten Streckenabschnitt gemittelte Schadenempfindlichkeit in Abhängigkeit des Prozesses und der Intensität infolge Direkttreffer [-].
- $SE(BDT)_{s,m,st}$ = Schadenempfindlichkeit bei schwacher, mittlerer und starker Intensität.
- $W(B)$ = Sachwert Bahn für mobile Sachwerte [CHF].
- $Aw(BDT)_{j,k}$ = wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte bei Direkttreffer auf Bahnlinie in Szenario j und Expositionssituation k [CHF].
- $g_{s,m,st}$ = Länge der gefährdeten Abschnitte in schwacher (g_s), mittlerer (g_m) und starker Intensität (g_{st}).

Anprall auf abgelagertes Material: Der Zug kann auf bereits abgelagertes Material auffahren bzw. anprallen. Dies stellt ein weiteres mögliches Schadenbild dar. Für das Schadenbild «Anprall auf abgelagertes Material» für mobile Sachwerte werden die verschiedenen Wahrscheinlichkeiten bestimmt mit [85]:

$$p(Anp)_{j,k} = (1 - p(DT)_{j,k}) \cdot (1 - \overline{p(Anp)}) \quad [-] \quad (3.26)$$

$$\overline{p(Anp)} = p(wa) \cdot (1 - p(uF)) + p(uF) \cdot (1 - p(wa)) + p(wa) \cdot p(uF) \quad [-] \quad (3.27)$$

mit:

$\overline{p(Anp)}$ = Wahrscheinlichkeit, dass der Zug nicht anprallt [-].

$p(wa)$ = Wahrscheinlichkeit, dass der Lokführer gewarnt wird [-].

$p(uF)$ = Wahrscheinlichkeit, dass die Fahrleitung unterbrochen ist [-].

Für die Warnwahrscheinlichkeit $p(wa)$ und die Wahrscheinlichkeit für eine unterbrochene Fahrleitung $p(uF)$ werden folgende Richtwerte vorgeschlagen:

Tabelle 3.3: Erfahrungswerte für Warnwahrscheinlichkeiten $p(wa)$ und Wahrscheinlichkeit für unterbrochene Fahrleitung $p(uF)$.

	Lawine	Stein- schlag	Hoch- wasser	Murgang	Sturz	Rutschung	Hangmure
$p(wa)$	0.3	0.1	0.3	0.2	0.05	0.2	0.2
$p(uF)$	0.5	0.1	0.5	0.2	0.5	0.2	0.2

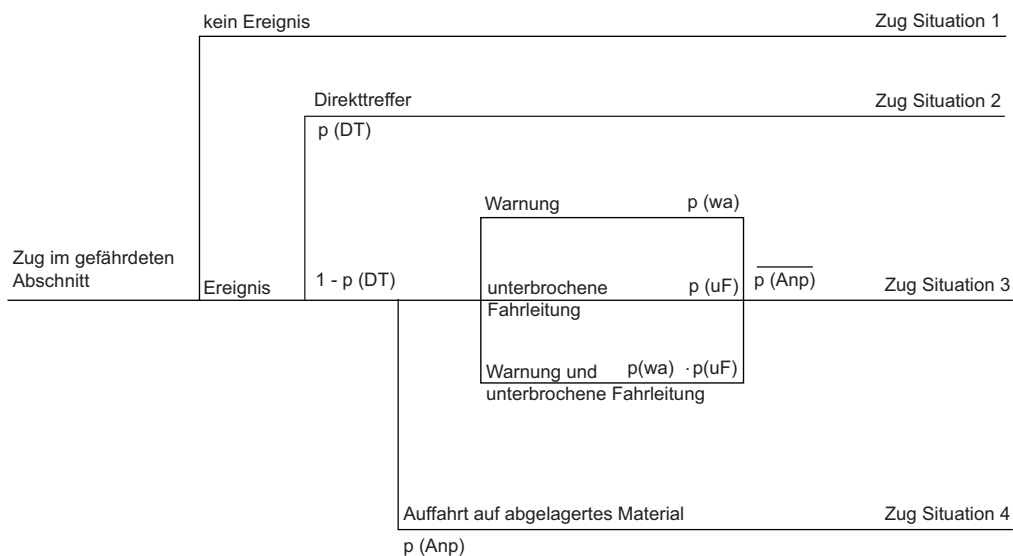


Abbildung 3.3: Darstellung verschiedener Schadenbilder mit einem Zug als Ereignisbaum.

Das Schadenausmass berechnet sich dann mit:

$$A(BAnp) = SE(BAnp) \cdot W(B) \cdot k \quad [\text{CHF}] \quad (3.28)$$

Unter Einbezug der Wahrscheinlichkeit eines Anpralls ergibt sich

$$Aw(BAnp)_{j,k} = p(Anp)_{j,k} \cdot SE(BAnp) \cdot W(B) \cdot k \quad [\text{CHF}] \quad (3.29)$$

wobei:

$A(BAnp)$	=	Schadenausmass mobile Sachwerte Anprall im Ereignisfall [CHF].
$SE(BAnp)$	=	Schadenempfindlichkeit mobile Sachwerte bei Anprall [-].
$W(B)$	=	Sachwert Bahn mobile Sachwerte [CHF].
k	=	Anprallfaktor in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit. Berücksichtigt, dass nur die vorderen Wagen betroffen sind. Die Werte sind in Tabelle 3.4 definiert [-].
$Aw(BAnp)_{j,k}$	=	wahrscheinliches Schadenausmass mobile Sachwerte bei einem Anprall in Szenario j und Expositionssituation k [CHF].

Tabelle 3.4: Faktor k , der berücksichtigt, dass bei einem Anprall auf abgelagertes Material nur die vorderen Wagen betroffen werden. Der Faktor setzt in Abhängigkeit der Geschwindigkeit die Anzahl der betroffenen Wagen bzw. Personen herunter.

Fahrgeschwindigkeit					
v [km/h]	30–50	50–80	80-100	100-120	> 120
k	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8

Das gesamte wahrscheinliche Schadenausmass bezüglich mobiler Sachwerte auf einer Bahnlinie $Aw(mB)_j$ berechnet sich als Summe der wahrscheinlichen Schadenausmasse infolge Direkttreffer und Anprall:

$$Aw(mB)_j = \sum_k Aw(BDT)_{j,k} + \sum_k Aw(BAnp)_{j,k} \quad [\text{CHF}] \quad (3.30)$$

Summenbildung Schadenausmass Sachwerte entlang von Bahnlinien: Das gesamte wahrscheinliche Schadenausmass bezüglich Sachwerte auf einer Bahnlinie berechnet sich als Summe des wahrscheinlichen Schadenausmasses infolge Direkttreffer und Anprall.

$$Aw(B)_j = Aw(mB)_j + Aw(BPO)_j + Aw(BLO)_j \quad [\text{CHF}] \quad (3.31)$$

wobei:

$Aw(B)_j$	=	wahrscheinliches Schadenausmass auf Bahnlinien in Szenario j .
$Aw(mB)_j$	=	wahrscheinliches Schadenausmass Direkttreffer und Anprall in Szenario j .
$Aw(BPO)_j$	=	wahrscheinliches Schadenausmass für Punktobjekte in einem Szenario j .
$Aw(BLO)_j$	=	wahrscheinliches Schadenausmass für Linienobjekte in einem Szenario j .

3.4.3.6 Schadenausmass Personen entlang von Bahnlinien

Direkttreffer: Das Schadenausmass für einen Direkttreffer für Personen in einem Zug in Szenario j wird bestimmt mit:

$$A(PBDT)_{j,k} = \lambda(DT)_j \cdot \beta_k \quad [\text{Tf}] \quad (3.32)$$

Unter Einbezug der Wahrscheinlichkeit eines Direkttreffers ergibt sich das wahrscheinliche Schadenausmass $Aw(PBDT)_{j,k}$:

$$Aw(PBDT)_{j,k} = p(DT)_{j,k} \cdot \lambda(DT)_j \cdot \beta_k \quad [\text{Tf}] \quad (3.33)$$

Zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines Direkttreffers siehe auch Gleichung 3.22.

Die für die Berechnung massgebende Letalität entspricht einer über die Streckenlänge pro Intensität gemittelten Letalität, gemäss:

$$\lambda(DT)_j = \frac{(\lambda(DT)_s \cdot g_s) + (\lambda(DT)_m \cdot g_m) + (\lambda(DT)_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.34)$$

wobei:

- $\lambda(DT)_j$ = über die Länge der gefährdeten Strecke gemittelte Letalität von Personen bei Direkttreffer [-].
- $\lambda(DT)_{s,m,st}$ = Letalität bei schwacher, mittlerer und starker Intensität.
- $g_{s,m,st}$ = gefährdete Abschnitte in schwacher (g_s), mittlerer (g_m) und starker Intensität (g_{st}).
- β_k = Besetzungsgrad Zug in Expositionssituation k , wobei $\frac{g}{l_z} \leq 1.0$.
- $Aw(PBDT)_{j,k}$ = wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Direkttreffer auf Bahnlinie in Szenario j und Expositionssituation k [Tf].

Schadenausmass Personen Anprall im Ereignisfall: Das Schadenausmass für das Schadenbild «Anprall im Ereignisfall» berechnet sich mit:

$$A(PBAnp)_k = \lambda(Anp) \cdot \beta_k \cdot k \quad [\text{Tf}] \quad (3.35)$$

Unter Einbezug der Wahrscheinlichkeit eines Anpralls ergibt sich das wahrscheinliche Schadenausmass bei Anprall auf abgelagertes Material $Aw(PBAnp)_{j,k}$:

$$Aw(PBAnp)_{j,k} = p(Anp)_{j,k} \cdot \lambda(Anp) \cdot \beta_k \cdot k \quad [\text{Tf}] \quad (3.36)$$

wobei:

- $p(Anp)_{j,k}$ = Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug in eine Ablagerung auf den Schienen fährt (Anprall) [-].
- $\lambda(Anp)$ = Letalität von Personen im Zug bei einem Anprall auf abgelagertes Material [-]. Es wird ein Wert von 0.02 vorgeschlagen.
- k = Faktor k , bei Anprall auf abgelagertes Material, der berücksichtigt, dass nur die vorderen Wagen betroffen sind. Die Werte sind in Tabelle 3.4 definiert [-].

Das wahrscheinliche Schadenausmass für eine Expositionssituation k bezüglich Personen auf einer Bahnlinie berechnet sich als Summe des wahrscheinlichen Schadenausmasses infolge Direkttreffer und Anprall:

$$Aw(PB)_{j,k} = Aw(PBDT)_{j,k} + Aw(PBAnp)_{j,k} \quad [\text{Tf}] \quad (3.37)$$

Das gesamte Schadenausmass berechnet sich als Summe der Schadenausmasse der verschiedenen Expositionssituationen:

$$Aw(PB)_j = \sum_k Aw(PB)_{j,k} \quad [\text{Tf}] \quad (3.38)$$

wobei:

- $Aw(PB)_{j,k}$ = wahrscheinliches Schadenausmass Personen auf Bahnlinie in Szenario j und Expositionssituation k .
- $Aw(PB)_j$ = wahrscheinliches Schadenausmass Personen auf Bahnlinie in Szenario j .
- $Aw(PBDT)_{j,k}$ = wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei Direkttreffer auf Bahnlinie in Szenario j und Expositionssituation k .
- $Aw(PBAnp)_{j,k}$ = wahrscheinliches Schadenausmass Personen bei einem Anprall in Szenario j und Expositionssituation k .

3.4.3.7 Schadenausmass Leitungen

Für fixe (ortsfeste) Sachwerte, die ein Linienobjekt darstellen, berechnet sich das Schadenausmass aus:

$$A(L)_j = SE(L)_j \cdot W(L) \cdot g_j \quad [\text{CHF}] \quad (3.39)$$

Unter Einbezug der Wahrscheinlichkeit ergibt sich das wahrscheinliche Schadenausmass:

$$Aw(L)_j = p(rA)_j \cdot SE(L)_j \cdot W(L) \cdot g_j \quad [\text{CHF}] \quad (3.40)$$

Die für die Berechnung massgebende Schadenempfindlichkeit entspricht einer über die gefährdete Länge pro Intensität gemittelten Schadenempfindlichkeit, gemäss:

$$SE(L)_j = \frac{(SE(L)_s \cdot g_s) + (SE(L)_m \cdot g_m) + (SE(L)_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.41)$$

wobei:

- $SE(L)_j$ = über die gefährdete Länge gemittelte Schadenempfindlichkeit der Leitung [-].
- $SE(L)_{s,m,st}$ = Schadenempfindlichkeit bei schwacher, mittlerer und starker Intensität.
- $W(L)$ = Sachwert Leitungen pro Laufmeter [CHF].
- g_j = Länge des gesamten gefährdeten Abschnitts pro Szenario j als Summe der Streckenabschnitte unabhängig von der Intensität [m].
Sie berechnet sich als Summe der gefährdeten Abschnitte in schwacher (g_s), mittlerer (g_m) und starker Intensität (g_{st}).
- $Aw(L)_j$ = wahrscheinliches Schadenausmass für Leitungen in Szenario j [CHF].

3.4.3.8 Schadenausmass Landwirtschaft, Wald und Grünanlagen

Für landwirtschaftliche Flächen, Wald und Grünanlagen berechnet sich das Schadenausmass aus:

$$A(F)_j = SE(F)_j \cdot W(F) \cdot F_j \quad [\text{CHF}] \quad (3.42)$$

Unter Einbezug der Wahrscheinlichkeit ergibt sich das wahrscheinliche Schadenausmass für Flächenobjekte $Aw(F)_j$:

$$Aw(F)_j = p(rA)_j \cdot SE(F)_j \cdot W(F) \cdot F_j \quad [\text{CHF}] \quad (3.43)$$

Die für die Berechnung massgebende Schadenempfindlichkeit entspricht einer über die Fläche pro Intensität gemittelten Schadenempfindlichkeit, gemäss:

$$SE(F)_j = \frac{(SE(F)_s \cdot F_s) + (SE(F)_m \cdot F_m) + (SE(F)_{st} \cdot F_{st})}{F_s + F_m + F_{st}} \quad [-] \quad (3.44)$$

wobei:

- $SE(F)_j$ = über die gesamte Fläche gemittelte Schadenempfindlichkeit des Flächenobjektes in Szenario j [-].
- $SE(F)_{s,m,st}$ = Schadenempfindlichkeit bei schwacher, mittlerer und starker Intensität.
- $W(F)$ = Sachwert Landwirtschaftsfläche [CHF/are].
- F_j = gesamte gefährdete Fläche in Szenario j aus Summe der Teilflächen in den Intensitätszonen [are]. Sie berechnet sich als Summe der gefährdeten Flächen in schwacher (F_s), mittlerer (F_m) und starker Intensität (F_{st})

3.4.3.9 Gesamtes Schadenausmass direkte Schäden Szenario j

Das Schadenausmass für Sachwerte ausgedrückt in Geldeinheiten (CHF oder EUR) kann nicht direkt mit dem Schadenausmass in Bezug auf Personen aufaddiert werden. Dieser Schritt ist nur dann möglich, wenn das Schadenausmass Personen ausgedrückt in Anzahl Todesfälle mit einem bestimmten Geldbetrag monetarisiert wird. Als Ansatz für die Monetarisierung bietet sich die gesellschaftliche Zahlungsbereitschaft zur Verhinderung eines Todesfalls an. In der Schweiz wird gemäss PLANAT-Strategie und den anderen verfügbaren Software-Tools [8, 5] der Wert von 5 Mio CHF pro verhindertem Todesfall vorgeschlagen. Das direkte Schadenausmass bezüglich Sachwerte und Personen wird nach folgender Formel berechnet:

$$Aw_j = Aw(G)_j + Aw(S)_j + Aw(B)_j + Aw(L)_j + Aw(F)_j \quad [\text{CHF}] \quad (3.45)$$

$$Aw(P)_j = 5 \cdot 10^6 \cdot (Aw(PG)_j + Aw(PS)_j + Aw(PB)_j) \quad [\text{CHF}] \quad (3.46)$$

3.4.4 Bestimmung indirektes Schadenausmass

Wie in Abschnitt 3.3.1 erwähnt und in Tabelle 3.2 dargestellt, können bei der Einwirkung gefährlicher Naturprozesse auf verschiedene Objekte neben den direkten, messbaren oder beobachtbaren Schäden auch indirekte Folgen entstehen, die meist auch Kosten verursachen und daher auch als Folgekosten bezeichnet werden können. Bei einigen Objekten sind die Folgekosten sogar bedeutender als die direkt sichtbaren Sachschäden.

Insbesondere für Bahngesellschaften, die eine Fahrplanpflicht zu erfüllen haben, entstehen bei Streckenunterbrüchen Folgekosten durch den Aufbau von Bahnersatzdiensten und Umleitungen. Diese Zusatzaufwendungen, die ohne ein Ereignis nicht entstanden wären, sind in diesem Zusammenhang als indirekte Schäden einzubeziehen.

Längere Betriebsunterbrüche in einem kompetitiven Umfeld können sogar dazu führen, dass Unternehmen bestimmten Lieferverpflichtungen nicht mehr nachkommen können und dadurch einen starken Imageschaden erleiden, der im schlimmsten Fall auch zu einer Betriebsaufgabe führen kann. Dies gilt in erster Linie für kleinere bis mittlere Unternehmen, die einen Betriebsunterbruch weniger gut verkraften können.

Im Sinne einer vollständigen Ermittlung des Schadens infolge Naturereignissen sollten indirekte Folgen (oder Kosten), die sich aus Betriebsunterbrüchen ergeben, getrennt von den direkten Schäden in die Bestimmung des Schadenausmass eingehen. Für die Bestimmung des indirekten Schadenausmasses ist in der Regel die Dauer des Unterbruchs entscheidend. In jedem Fall muss klar dokumentiert werden, welche Grundlagen für die Ermittlung des indirekten Schadens verwendet wurden. Der indirekte Schaden kann vereinfacht mit folgender Rechnung bestimmt werden:

$$A(id)_j = K(ub) \cdot d_j \quad [\text{CHF}] \quad (3.47)$$

wobei:

- $A(id)_j$ = Schadenausmass indirekte Schäden im Szenario j [CHF].
 $K(ub)$ = Kosten Betriebsunterbruch pro Tag [CHF].
 d_j = Dauer des Betriebsunterbruchs im Szenario j [d].

Dabei ist zu beachten, dass das Schadenausmass mit zunehmender Dauer des Unterbruchs nicht linear zunimmt. Die Kosten Betriebsunterbruch pro Tag dürften in der Regel mit zunehmender Dauer des Unterbruchs zuerst zu- und dann wieder abnehmen. Das indirekte Schadenausmass spielt für folgende Bereiche eine wichtige Rolle:

- Bahnbetreiber mit Fahrbahnpflicht;
- Energieversorgung;
- Telekommunikation;
- Gewerbe- und Industrieunternehmen mit regelmässigen Lieferverpflichtungen;
- Talschaften mit nur einer Zufahrtsmöglichkeit;
- Landwirtschaft.

Die indirekten Schäden müssen für die einzelnen Szenarien separat ermittelt werden und können dann mit dem direkten Schadenausmass aufaddiert werden. Es empfiehlt sich, das direkte, das indirekte Schadenausmass und die Summe beider getrennt voneinander in der Rechnung aufzuführen und darzustellen.

3.4.5 Gesamtes Schadenausmass Szenario j

Das gesamte Schadenausmass aus direkten Sachschäden, indirekten Schäden und Personen berechnet sich aus:

$$A_j = Aw_j + A(id)_j + Aw(P)_j \quad [\text{CHF}] \quad (3.48)$$

wobei:

- A_j = Schadenausmass direkte und indirekte Schäden im Szenario j .
- Aw_j = Schadenausmass direkte Sachschäden im Szenario j .
- $A(id)_j$ = Schadenausmass indirekte Schäden im Szenario j .
- $Aw(P)_j$ = Schadenausmass Personen monetarisiert im Szenario j .

3.5 Risikoermittlung und Risikodarstellung

Im letzten Teil der Risikoanalyse werden die massgebenden Risikogrössen bestimmt. Neben den Personenrisiken müssen die Sachrisiken bestimmt werden. Der Anteil von Personenrisiken zu dem von Sachrisiken ist je nach betrachtetem Prozess unterschiedlich, es müssen daher immer beide Komponenten dargestellt werden.

Bei den Personenrisiken wird zwischen den kollektiven und individuellen Risiken unterschieden, die auch getrennt dargestellt werden müssen. Obwohl für die Planung von Schutzmassnahmen die kollektiven Risiken im Beurteilungssperimeter entscheidend sind, empfiehlt es sich, auch den Beitrag der einzelnen Ereignisszenarien und Expositionssituationen darzustellen, da diese wichtige Rückschlüsse auf die Massnahmenplanung zulassen. Der Beitrag der einzelnen Ereignisszenarien und Expositionssituationen wird in einer Risikomatrix dargestellt.

Für die Bestimmung der individuellen Risiken sind vor allem Personen herauszugreifen, die in einem Gefährdungsgebiet permanent anwesend und besonders exponiert sind. Bei den individuellen Risiken kann bestimmt werden, ob die Risiken über den festgelegten Grenzwerten liegen und damit «massgebend» sind.

3.5.1 Kollektive Risiken

In der Risikoermittlung wird das berechnete Schadenausmass der verschiedenen Objekte mit der Häufigkeit der massgebenden Szenarien gemäss Gleichung 3.49 verknüpft.

$$R_j = p_j \cdot A_j \quad (3.49)$$

$$p_j = P_j - P_{j+1} \quad (3.50)$$

$$R = \sum_j R_j \quad [\text{CHF/a}] \quad (3.51)$$

wobei:

R_j = kollektives Risiko im Szenario j [CHF/a].

p_j = Häufigkeit Szenario j , angenähert als Differenz der Überschreitenswahrscheinlichkeit zweier benachbarter Szenarien P_j und P_{j+1} [-].

R = kollektives Risiko [CHF/a].

Die grundlegende Darstellung ist die Matrix des Schadenausmasses der verschiedenen Objekte in den verschiedenen Ereignisszenarien und Expositionssituationen. Aus dieser Darstellung lässt sich die Bestimmung des kollektiven Risikos besonders gut nachvollziehen und der Beitrag des Schadenausmasses bestimmter Objekte zum Gesamtschadenausmass kann einfach abgelesen werden (Tabelle 3.5).

Die Zeilen dieser Matrix zeigen das Schadenausmass für die einzelnen Objekte bzw. Objektgruppen in den Ereignisszenarien j und zugehörigen Expositionssituationen k sowie die zugehörige Summe. In den Spalten wird die Summe über die Expositionssituationen und Ereignisszenarien dargestellt. Mit dieser Darstellung kann der Beitrag der Objekte sowie Objektkategorien zum Schadenausmass eines Ereignisszenarios j beurteilt werden. Schliesslich erlaubt die Darstellung auch den Vergleich zum Schadenpotential im Beurteilungsperimeter.

Tabelle 3.5: Matrix mit Darstellung des Schadenausmasses aller Ereignisszenarien und Expositionssituationen. Wenn das Schadenausmass gewichtet wird, dann ist zusätzlich eine Matrix mit dem gewichteten Schadenausmass zu bestimmen.

Schadenausmass	SZ30				SZ100				SZ300				Summe
	ExSit1	ExSit2	ExSit3	ExSit4	ExSit1	ExSit2	ExSit3	ExSit4	ExSit1	ExSit2	ExSit3	ExSit4	
ohne / mit Aversion													
$Aw(PGm)_{j,k}^a$													$\sum_{j,k} Aw(PGm)_{j,k}$
$Aw(G)_j^b$													$\sum_j Aw(G)_j$
$Aw(PSm)_{j,k}^c$													$\sum_{j,k} Aw(PSm)_{j,k}$
$Aw(S)_j^d$													$\sum_j Aw(S)_j$
$Aw(PBm)_{j,k}^e$													$\sum_{j,k} Aw(PBm)_{j,k}$
$Aw(BPO)_j^f$													$\sum_j Aw(BPO)_j$
$Aw(BLO)_j^g$													$\sum_j Aw(BLO)_j$
$Aw(B)_j^h$													$\sum_j Aw(B)_j$
$Aw(L)_j^i$													$\sum_j Aw(L)_j$
$Aw(F)_j^j$													$\sum_j Aw(F)_j$
Summe ExSit ^k													
Summe Szenarien ^l	Asz30				Asz100				Asz300				
Schadenpotential													

^a Schadenausmass Personen in Gebäuden (monetarisiert) in Szenario j und Expositionssituation k ;

^b Schadenausmass Gebäude in Szenario j ;

^c Schadenausmass Personen Strasse (monetarisiert) in Szenario j und Expositionssituation k ;

^d Schadenausmass Sachwerte in Szenario j ;

^e Schadenausmass Personen Bahnlinie (monetarisiert) in Szenario j Expositionssituation k ;

^f Schadenausmass Punktobjekte entlang Bahnlinie in Szenario j ;

^g Schadenausmass Liniobjekte in Szenario j ;

^h Schadenausmass Sachwerte in Szenario j ;

ⁱ Schadenausmass Energie- und Wasserversorgung, Kommunikation in Szenario j ;

^j Schadenausmass Landwirtschaft und Wald in Szenario j ;

^k Schadenausmass in Expositionssituationen k ;

^l Schadenausmass Szenarien j .

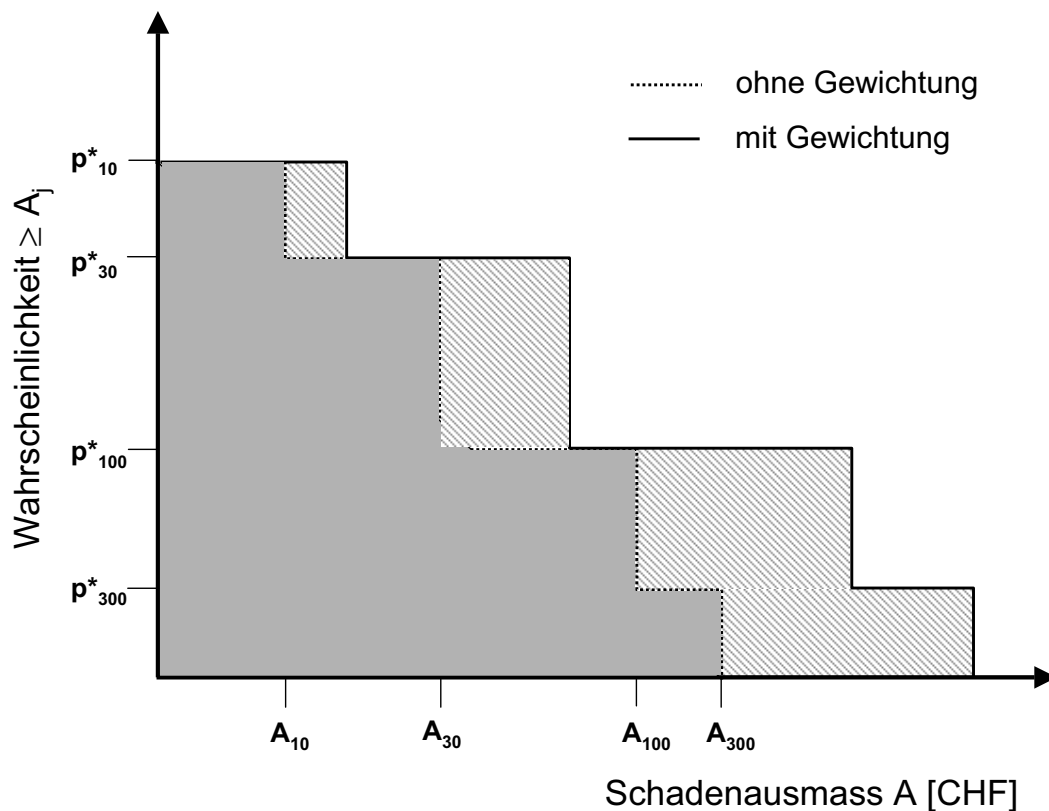


Abbildung 3.4: Beispiel für ein Wahrscheinlichkeits-Ausmass Diagramm ohne und mit Gewichtung (Aversion). Die graue Fläche unter der Treppenfunktion entspricht dem tatsächlichen (ungewichteten) Risiko, die graue und die schraffierte Fläche dem gewichteten Risiko [48].

Das Risiko aus verschiedenen Szenarien lässt sich mit einem Wahrscheinlichkeits-Ausmass Diagramm (WA-Diagramm) darstellen (Abbildung 3.4). Dies wird erstellt, indem die betrachteten Schadensszenarien der Grösse nach geordnet mit ihrer Wahrscheinlichkeit und dem zugehörigen Schadenausmass in ein Diagramm eingetragen werden. Die Darstellung der Summe der Wahrscheinlichkeiten der Szenarien (kumulative Wahrscheinlichkeit) mit dem dazugehörigen Schadenausmass ergibt eine Treppenfunktion. Daraus lässt sich die Wahrscheinlichkeit ablesen, mit der ein bestimmtes Schadenausmass erreicht oder überschritten wird.

Das kollektive Risiko entspricht dabei der Fläche unter der Treppe. Die Form der Treppenkurve zeigt den Beitrag der gewählten Szenarien zum gesamten Risiko. Neben dem kumulierten Einzelwert für das kollektive Risiko sollte das Risiko auch immer im WA-Diagramm dargestellt werden [48].

3.5.2 Individuelle Risiken

Für die Berechnung der individuellen Risiken sind diejenigen Personen zu identifizieren, welche insgesamt am längsten und gleichzeitig am intensivsten gefährdet sind. Es müssen also nicht a priori die individuellen Risiken aller Personen ermittelt werden, sondern nur diejenigen von relevanter, allenfalls kritischer Grösse. In der Regel betrifft dies vor allem ständige Einwohner im

Gefahrenbereich, die in besonders exponierten Häusern wohnen. Weitere Personen, die einem hohen individuellen Risiko ausgesetzt sein können, sind Personen auf Verkehrswegen, die den gefährdeten Bereich mehrmals täglich passieren oder Personen im Freien.

Das individuelle Risiko für Personen in Gebäuden wird bestimmt mit:

$$A(PG)_{i,j} = p(rA)_j \cdot p(pr)_i \cdot (1 - \varepsilon_i) \cdot \lambda_j \quad [-] \quad (3.52)$$

$$r_{i,j} = p_j \cdot A(PG)_{i,j} \quad (3.53)$$

$$r_i = \sum_j r_{i,j} \quad (3.54)$$

Das individuelle Risiko von Personen auf Verkehrswegen wird bestimmt mit:

$$A(PS)_{i,j} = p(rA)_j \cdot \frac{g_j \cdot z_i}{v} \cdot \lambda_j \quad [-] \quad (3.55)$$

$$r_{i,j} = p_j \cdot A(PS)_{i,j} \quad (3.56)$$

$$r_i = \sum_j r_{i,j} \quad (3.57)$$

Die für die Berechnung massgebende Letalität entspricht einer über die Streckenlänge pro Intensität gemittelten Letalität, gemäss:

$$\lambda_j = \frac{(\lambda_s \cdot g_s) + (\lambda_m \cdot g_m) + (\lambda_{st} \cdot g_{st})}{g_s + g_m + g_{st}} \quad [-] \quad (3.58)$$

wobei:

$A(PG)_{i,j}$	=	individuelles Schadenausmass einer Person i in einem Gebäude im Szenario j .
$p(rA)_j$	=	räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit des Prozesses im Szenario j .
ε_i	=	Objektschutzfaktor des Gebäudes i .
$A(PS)_{i,j}$	=	individuelles Schadenausmass einer Person i auf einem Verkehrsweg im Szenario j .
g_j	=	Länge gefährdeter Streckenabschnitt im Szenario j [m].
z_i	=	Anzahl der Durchfahrten pro Tag der meisten exponierten Personen i .
v	=	durchschnittliche Geschwindigkeit im gefährdeten Streckenabschnitt [km/h].
λ_j	=	über die gefährdete Strecke gemittelte Letalität einer Person im Fahrzeug berechnet aus der Letalität in schwacher (λ_s), mittlerer (λ_m) und starker Intensität (λ_{st}).
$r_{i,j}$	=	individuelles Risiko einer Person i im Szenario j .
p_j	=	Häufigkeit des Szenarios j .
r_i	=	individuelles Risiko einer Person i .

Kapitel 4

Risikobewertung und Schutzziele

Dieses Kapitel ist in der jetzigen Version noch an die PLANAT-Strategie in der Version von 2005 angelehnt [57]. Im Projekt B2.1 «Schutzziele» [25] wurde ein Konzept vorgeschlagen, das sich aber bei Drucklegung dieses Bericht noch im Entwurf befand. Daher wurden die Ergebnisse dieses Projekts noch nicht integriert.

4.1 Grundsätzliches

Nach der objektiven, systematischen und transparenten Beurteilung der vorhandenen Risiken in der Risikoanalyse wird in der Risikobewertung überprüft, ob diese von der Gesellschaft getragen werden können oder ob diese reduziert werden müssen. Diese Bewertung ist einerseits Grundlage für die Massnahmenplanung. Andererseits kann erst mit einer Massnahmenplanung gezeigt werden, ob die Risiken mit einem verhältnismässigen Aufwand reduziert und damit die Schutzziele erreicht werden können. Als Schutzziel wird in diesem Zusammenhang ein Mass für die Grenze von Schutzanstrengungen für das Individuum und das Kollektiv definiert.

Es geht daher in der Risikobewertung darum, nachvollziehbare und klare Kriterien für den Umgang mit individuellen und kollektiven Personenrisiken einerseits sowie ein Vorgehen für den Umgang mit grossen aber seltenen Risiken andererseits zu finden.

Da die Risikobewertung auf einer Wertung durch die Gesellschaft basiert, stellt sich die Frage, wer diese Wertung vornehmen kann: Können Wertungskriterien auf Experteneinschätzungen begründet werden oder muss die Risikowahrnehmung der Öffentlichkeit als Grundlage genommen werden? Die Risikobewertung bewegt sich damit im Spannungsfeld zwischen den Natur- und Ingenieurwissenschaften auf der einen Seite und den Sozialwissenschaften auf der anderen Seite.

Ein pragmatisches Vorgehen mag daher darin liegen, naturwissenschaftlich-technisches Vorgehen mit intuitiver Risikowahrnehmung zu ergänzen, um damit sinnvolle Kriterien für die Bewertung von Risiken abzuleiten [48]. Diese Kriterien werden oftmals nicht explizit sondern implizit durch faktisches Handeln definiert.

Das im Folgenden vorgestellte Vorgehen für eine übergeordnete Risikobewertung mit allgemein gültigen Schutzziele beruht einerseits auf einem logischen Grundmodell, andererseits auf Erfah-

rungswerten, welche sich aus dem bisherigen, von der Gesellschaft getragenen Handeln ableiten lassen. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese Überlegungen für die Mehrheit der Risiken Gültigkeit haben, also insbesondere auch für die Risiken infolge Naturgefahren gelten [67]. Da ein impliziter, nicht transparenter Entscheid aber naturgemäss nicht kohärent sein kann, ist eine Interpretation dieser Erfahrungsbasis unumgänglich.

4.2 Schutzziele für Personenrisiken

Sowohl bei den Naturgefahren als auch im Bereich der technischen Gefahren kommt dem Schutz von Menschenleben besondere Bedeutung zu, da es sich hierbei um ein hohes und schwer zu bewertendes Schutzgut handelt.

4.2.1 Methodischer Ansatz für die Schutzzielkriterien

Grundsätzlich muss sich die Bewertung an den Risikogrössen des individuellen und des kollektiven Risikos orientieren. Es ist von entscheidender Bedeutung, dass es bei diesen beiden Grössen um zwei völlig unterschiedliche Anliegen an die Sicherheit geht.

1. **Sicherheitsbedürfnis des Individuums:** Das individuelle Risiko beschreibt die Grösse des Risikos, dass ein Einzelner infolge einer Gefahr ums Leben kommt. Die Grösse r_i des individuellen Risikos gibt darauf Antwort. Hier macht die Frage nach einem zulässigen Risiko Sinn und r_i ist damit die Grösse, die man beurteilen muss.
2. **Sicherheitsbedürfnis des Kollektivs:** Selbst wenn die individuellen Risiken aller gefährdeten Personen tief genug sind, kann für das Kollektiv immer noch ein hohes kollektives Risiko (sprich: Anzahl Opfer) entstehen, wenn viele Personen einem niedrigen individuellen Risiko ausgesetzt sind (vgl. auch Abbildung 2.2, S. 7). Daher ist das Bedürfnis nach Sicherheit nicht befriedigt, wenn alle Individuen ein genügend tiefes individuelles Risiko haben. Die Opfer sind dann quasi «zufällige und anonyme» Personen und nicht Personen, die infolge ihres hohen individuellen Risikos als Opfer «prädestiniert» waren.

Die Gesellschaft hat ein Interesse, die Gesamtzahl der Opfer niedrig zu halten, unabhängig davon, ob es sich um Personen mit hohem oder niedrigem individuellen Risiko handelt. Dabei geht es bei der Definition von Schutzziele für das Kollektiv nicht mehr um die Definition eines zulässigen Risikos für einzelne Risikosituationen, sondern um eine Minimierung der Anzahl Opfer im Gesamtsystem (z. B. einem Land) mit den insgesamt verfügbaren Mitteln. Dies ist eine Optimierungsaufgabe.

Diese Optimierung verlangt, dass in allen Risikosituationen Sicherheitsanstrengungen bis zu den gleichen Grenzkosten (bestimmter Betrag pro verhinderter Todesfall oder Wert eines statistischen Lebens¹) vorgenommen werden. Die Grenzkosten für die Sicherheitsanstrengungen können daher als das Kriterium für das Schutzziel beim kollektiven Risiko angesehen werden. Die Grenzkosten als Betrag bis zu welchem die Sicherheitsanstrengungen gehen müssen, darf nicht dahingehend interpretiert werden, dass damit einem Menschenleben ein Wert zugeordnet werde. Die Kosten, welche die Gesellschaft zur Verhinderung eines Todesfalles zu zahlen bereit ist (oder in der Lage

¹im Englischen als «value of statistical life (VSL)» bezeichnet.

ist), haben nichts mit dem Wert eines Menschenlebens zu tun. Auch wenn ein Menschenleben unendlich viel Wert ist, kann die Gesellschaft nicht unendlich viel für dessen Rettung ausgeben und tut dies auch nicht. Mit dem Grenzkostenkriterium werden aber im Rahmen der verfügbaren Ressourcen am meisten Todesfälle verhindert.

Dieser Aspekt ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn Personenrisiken im Rahmen der Massnahmenplanung in Geldeinheiten ausgedrückt werden müssen, um zusammen mit Sachrisiken die gleiche Einheit (Geldeinheiten, z. B. CHF) verwenden zu können. Die Monetarisierung ist daher in diesem Zusammenhang nicht als Bewertung des menschlichen Lebens sondern als Bewertung der Verhinderung eines Todesfalls zu interpretieren.

4.2.2 Unterscheidung Risikokategorien

Bevor auf die Quantifizierung der oben diskutierten Schutzziele eingegangen wird, ist ein weiteres Element einzuführen, welches die Festlegung von Schutzziele beeinflusst. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass nicht alle Risiken gleich behandelt werden können.

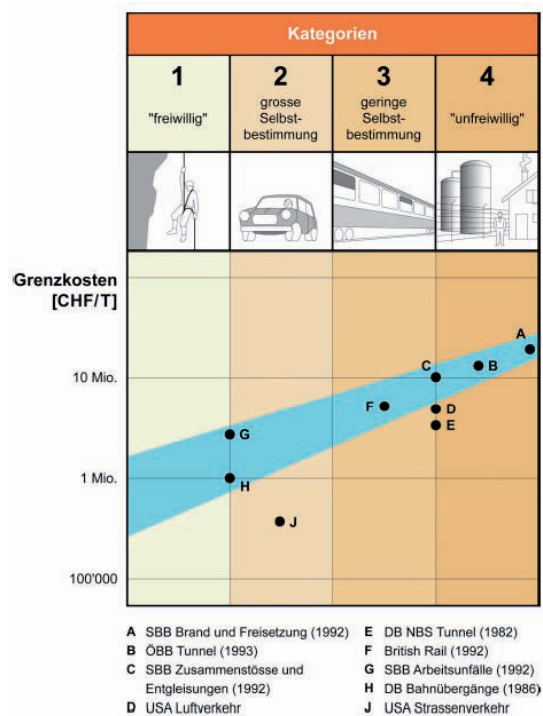


Abbildung 4.1: Risikokategorien und Festlegung der Grenzkosten für technische Risiken als Grundlage für das Bewertungssystem bei Naturgefahren [3].

Bereits in den sechziger Jahren wurde erstmals darauf hingewiesen, dass hinsichtlich der Akzeptanz von «freiwilligen» bzw. «unfreiwilligen» Risiken ein Unterschied in der Höhe des Faktors 1'000 festzustellen ist [75]. Dies betrifft die individuellen Risiken. Ausgehend von diesem ersten Ansatz, wurde in der Folge ein differenziertes Konzept von Risikokategorien entwickelt, das

die Risikoakzeptanz in Abhängigkeit vom Selbstbestimmungsgrad und der Unmittelbarkeit der Nutzenempfindung der Betroffenen darstellt.

In Abbildung 4.1 ist die Spanne von freiwillig bis unfreiwillig eingegangenen Risiken in vier Risikokategorien aufgeteilt, die sowohl für das individuelle wie auch für das kollektive Risiko angewendet werden können. Diese Risikokategorien implizieren auch ein differenziertes Verständnis für das Verhältnis von gesellschaftlicher und individueller Verantwortung in Risikosituationen, eine Problematik, die gerade auch bei Naturgefahren sehr wohl bekannt ist. Als Grundlage für die Differenzierung dieser Schutzziele bieten sich daher diese Risikokategorien an.

4.2.3 Vorschlag Schutzziele Personen

Während der qualitative bzw. methodische Ansatz für die Schutzziele noch keine Wertung darstellt, ist bei der Quantifizierung der Schutzziele eine Wertung unumgänglich. Der Vorschlag der PLANAT basiert auf Überlegungen und Grundlagen, die für den Umgang mit technischen Risiken entwickelt wurden [49]. Dieser Vorschlag gilt grundsätzlich für alle Arten von Risiken, da postuliert werden kann, dass es keinen triftigen Grund gibt, zwischen Schäden und Opfern, welche aus verschiedenen Gefahrenarten herrühren, zu unterscheiden.

Tabelle 4.1: Schutzziele der PLANAT für individuelle und kollektive Personenrisiken

Risikokategorie	Individuelles Todesfallrisiko Maximaler Wert der Todesfallwahrscheinlichkeit pro Jahr	Kollektives Risiko: Grenzkosten verhinderter Todesfall (Mio. CHF)	Beispiel
Kategorie 1 100 % freiwillig	$10^{-2} - 10^{-3}$	1 – 2	Personen, die Absperrungen bei erhöhter Gefahr bewusst missachten.
Kategorie 2 hohe Selbstverantwortung	$10^{-3} - 2 \cdot 10^{-4}$	2 – 5	Personen, die Gefahrensituation einschätzen können und die Gefahr bewusst eingehen.
Kategorie 3 niedrige Selbstverantwortung	$2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-5}$	5 – 10	Weitgehend bis gänzlich Unbeteiligte, die Risiken mehr oder minder unfreiwillig eingehen
Kategorie 4 100 % unfreiwillig	$3 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-6}$	10 – 20	

Die von der PLANAT vorgeschlagenen Grenzwerte bzw. Schutzziele für das individuelle Todesfallrisiko und für die Grenzkosten im Sinne des kollektiven Risikos sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt (PLANAT-Schutzziele).

Die in Tabelle 4.1 dargestellten Schutzziele müssen im Hinblick auf die praktische Umsetzung weiter vereinfacht werden. So kann die Kategorie 1 in Zusammenhang mit der Massnahmenplanung im Siedlungs- und Verkehrsachsenbereich vernachlässigt werden. Massgebend sind vor allem die Risikokategorien zwei bis vier, wobei zwischen Kategorie drei und vier kaum unterschieden werden kann. Faktisch können für individuelle Risiken also zwei Kategorien definiert werden (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Vereinfachter Vorschlag für Schutzziele für individuelle Risiken auf Grundlage der PLANAT-Schutzziele und gängiger Schutzziele in den Kantonen.

Risikokategorie	Individuelles Todesfallrisiko maximaler Wert pro Jahr	Beispiel
hohe Selbstverantwortung	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	Berufskraftfahrer, Schneeräumung, etc.
niedrige bis keine Selbstverantwortung	$\leq 1 \cdot 10^{-5}$	Anwohner, Strassenbenutzer, Bahnreisende etc.

Der Definition der Grenzwerte in Tabelle 4.2 begründet sich auf den Vorschlag der PLANAT (Tabelle 4.1) und Schutzziele, die in verschiedenen Kantonen festgelegt wurden (Kanton Bern², Kanton Tessin).

Bei der Behandlung der kollektiven Risiken ist eine Unterscheidung nach Risikokategorien erschwert, da der Schutz von Personen in einem Perimeter nach unterschiedlichen Schutzziele kaum praktikabel ist. Es wird daher vorgeschlagen, die in einem Beurteilungsperimeter potentiell betroffenen Menschen beim Umgang mit kollektiven Risiken einheitlich der Kategorie 3 gemäss PLANAT-Schutzziele zuzuordnen. **Die Grenzkosten für die Verhinderung eines Todesfalls in dieser Kategorie werden somit einheitlich auf 5 Millionen CHF festgelegt.**

Das Ziel einer systematischen Sicherheitsplanung muss deshalb sein, durch konsequente Anwendung einheitlicher Schutzziele sowohl den Mitteleinsatz zu optimieren, wie auch einheitliche Sicherheitsstandards zu gewährleisten. Dies entspricht den zwei Hauptzielen der Vision und Strategie der PLANAT [57]. Eine einheitliche Sicherheit kann durch Maximalwerte des individuellen Risikos sowie durch gleiche Sicherheitsanstrengungen gegenüber kollektiven Risiken (Einhaltung der Grenzkostenkriterien) gewährleistet werden [49].

²Risikostrategie Naturgefahren: Ergebnissicherung der Klausursitzung des Regierungsrates vom 10. August 2005.

4.3 Schutzziele für weitere Schadenarten

4.3.1 Sachwerte

Unter Sachwerten werden Gebäude, Infrastruktur, Verkehrsverbindungen und Fahrzeuge sowie landwirtschaftliche und forstwirtschaftliche Nutzflächen verstanden.

Grundsätzlich gilt für die Verhinderung von Sachschäden inklusive den Folgeschäden unter Einbezug von Versicherungsleistungen, dass zur Verhinderung eines Franken Schadens nicht mehr als ein Franken für Sicherheitsmassnahmen ausgegeben werden soll. In der Praxis stösst dieses Vorgehen an Probleme, da die berechneten Sachschäden oftmals indirekte, mitunter schwere Folgeschäden nicht einschliessen und mit den getroffenen Massnahmen beim vorgeschlagenen Verhältnis von 1:1 ein unzureichender Schutz vorhanden ist. Für die Fälle, in denen mit bedeutenden indirekten Folgeschäden zu rechnen ist, kann im Einzelfall auch proportional mehr investiert werden. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass

- sich indirekte Folgeschäden bei der Ermittlung der potentiellen Schäden oftmals schwer quantifizieren lassen, und dass
- bei bestimmten Situationen eine Präferenz vorliegt, einen Schaden zu verhindern, statt auf Schadenbehebung abzustellen.

In Anlehnung an die in der PLANAT-Strategie skizzierten Schutzziele wird für die Planung von Massnahmen ein Verhältnis von 1:1 von Massnahmenkosten zu Sachschäden vorgeschlagen. Sind hohe Folgeschäden zu erwarten, so wird vorgeschlagen, diese als indirekte Sachschäden klar zu deklarieren und in die Risikoanalyse und Massnahmenplanung einzubeziehen. Beispiele für Folgeschäden sind in Abschnitt 3.4.4 (Seite 33) erwähnt. Ein mögliches Vorgehen, um die indirekten Schäden mit Hilfe eines Schadenergänzungsfaktors einzubeziehen, wurde im Rahmen des Projekts A2 «Risikoaversion» skizziert [24].

4.3.2 Sonderrisiken

Bei besonderen Infrastrukturen und Kulturgütern hält bereits die PLANAT-Strategie fest, dass deren Schutz nach gesamtheitlichen Kriterien zu erfolgen hat. Schutzkonzepte haben ihrer Funktion und Bedeutung Rechnung zu tragen, im Speziellen bei lebensnotwendigen Anlagen wie Spitälern, der Wasserversorgung, Stromversorgung usw. In die jeweiligen Schutzkonzepte gehen die Naturgefahren nur als eine der möglichen Gefährdungen ein. Die entsprechenden Gefährdungsannahmen bei solchen Objekten sind nach einheitlichen Kriterien zu treffen. Je nach Bedeutung dieser Infrastrukturen kann es notwendig sein, mehr in Schutzmassnahmen zu investieren als dies dem reinen materiellen Schadenerwartungswert entsprechen würde. Die indirekten Folgewirkungen, die sich beim Ausfall von Versorgungseinrichtungen ergeben können, sollten daher soweit wie möglich quantifiziert werden. Wo dies nicht möglich ist, stellt der Einbezug eines Schadenergänzungsfaktors [24] ein mögliches Vorgehen dar.

Für Kulturgüter stellen die Naturgefahren ebenfalls nur eines unter vielen Gefährdungsszenarien dar. Gleiches gilt auch für ökologisch besonders wertvolle Schutzobjekte.

Der Schutz von politischen Gemeinwesen und sozio-ökonomischen Systemen, wie er in der Strategie aufgeführt ist, ist ein anspruchsvolles Spezialthema. Es ist zum Teil Gegenstand der bisherigen Überlegungen, welche unter dem Aspekt der Risikoaversion behandelt werden. Weitergehende Überlegungen wurden bis jetzt nicht dokumentiert. Grundlagen zur Quantifizierung liegen im Moment nicht vor. So bleibt nur ein qualitativer Einbezug und eine gesamtheitliche Beurteilung.

In jedem Fall ist es notwendig, die gewählten Annahmen klar zu definieren und zu kommunizieren, um damit eine transparente Sicherheitsplanung zu gewährleisten.

4.4 Risikoaversion

Unter dem Thema Risikoaversion wird die Gewichtung des Schadensausmasses verstanden. Darunter wurden bisher unterschiedliche Phänomene zusammengefasst. Nach neuem Verständnis [4] lassen sich drei Teileffekte unterscheiden, die im Folgenden näher beschrieben werden:

1. Qualitative Ausweitung und überproportionale Zunahme negativer indirekter Effekte von Schadereignissen, welche meist nicht durch Schadensindikatoren berücksichtigt werden (sozioökonomischer Gesamtschaden);
2. Unsicherheit der Abschätzung von Häufigkeit und Ausmass;
3. Intrinsische Risikoeinstellung: Ablehnende Haltung gegenüber der Möglichkeit von Ereignissen mit potenziell sehr grossen Schadensausmassen.

Die Gewichtung aufgrund des Aspektes 1 dient der Abschätzung von Schadensausmassen und wäre streng genommen unmittelbar Bestandteil der Risikoanalyse. Diese Gewichtung ist dann vorzunehmen, wenn nicht für jedes Szenario eine exakte Berechnung der direkten und indirekten Schäden möglich ist, sondern ausgehend von einzelnen Schadenindikatoren auf das gesamte Schadensausmass hochgerechnet wird.

Die Gewichtung aufgrund der Aspekte 2 und 3 lässt sich auch als «Risikoaversion» bezeichnen und ist ein Teil der Risikobewertung, die von der Gesellschaft bzw. dem Entscheidungsträger getroffen wird. Da jedoch das Risiko der einzelnen Szenarien gewichtet wird und damit rechnerisch in die Ermittlung des kollektiven Risikos einfließt, muss diese Überlegung bereits in der Risikoanalyse berücksichtigt werden.

4.4.1 Die drei Teileffekte der Risikoaversion

4.4.1.1 Qualitative Ausweitung und überproportionale Zunahme negativer indirekter Effekte von Schadenereignissen

Mit zunehmendem beobachteten Schadensausmass ziehen Katastrophen viel weitere Kreise und wirken sich auf immer komplexere Weise auf das sozioökonomische Netzwerk einer Gesellschaft aus. Zudem nehmen die Kosten für die Wiederherstellung und die Regeneration überproportional zu. Diese qualitative Ausweitung und überproportionale Zunahme des Schadens wird mit einem Schadenergänzungsfaktor f berücksichtigt, der damit eine Annäherung an den effektiven

Gesamtschaden darstellt. Seine Beurteilung kann theoretisch weitgehend objektiv auf technisch-ökonomischen Analysen abgestützt werden. Als Basis kann die Auswertung von Schäden bei effektiven Ereignissen beigezogen werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Erweiterung der Schadenskategorien grundsätzlich abhängig vom betrachteten System ist und der Schadenergänzungsfaktor daher theoretisch für verschiedene Systeme unterschiedlich ist.

Zunehmende Unsicherheit über die quantitative Einschätzung von Risiken. Mit abnehmender Häufigkeit und steigendem Schadensausmass nimmt die Unsicherheit bei der Quantifizierung von Risiken in der Regel zu. Konkrete Erfahrungswerte rücken rasch immer mehr in den Hintergrund und müssen analytischen Abschätzungen oder gar intuitiven Expertenschätzungen Platz machen. Systemverantwortliche aber auch politisch Verantwortliche und die Öffentlichkeit äussern daher oft Skepsis und mahnen zur Vorsicht. Dies entspricht dem im Recht verankerten Vorsorgeprinzip, welches besagt, dass bei grosser Unsicherheit gegenüber gravierenden Risiken besondere Vorsicht anzuwenden ist.

Um dieser Vorsicht nachzukommen ist es sinnvoll, bestmögliche Schätzungen mit einem einheitlichen oder der Kenntnis des betroffenen Systems angepassten Sicherheitsfaktor zu gewichten, statt bei der Abschätzung von Risiken an verschiedenen Stellen sog. «konservative» Schätzungen zu verwenden, sich also immer eher am schlechteren Fall zu orientieren. Ein Vorteil der Gewichtung mit einem Sicherheitsfaktor liegt darin, dass in der Analyse festgelegt werden kann, welches Konfidenzintervall verwendet wird, mit welcher Sicherheit das tatsächliche Risiko also nicht unterschätzt wird. Dabei handelt es sich um eine gesellschaftliche Wertung (Grad der Vorsicht [oder eben Aversion] gegenüber katastrophalen Ereignissen), die so transparent vorgenommen werden kann und nicht in der Verantwortung derjenigen liegt, welche die Risikoanalyse erstellen.

Zunehmende Unsicherheit bei der Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit. Falls es nicht möglich ist, das Schadensausmass potenziell grosser Schadenereignisse resp. Katastrophen durch Schutzmassnahmen genügend abzumindern, muss sichergestellt werden, dass sie genügend unwahrscheinlich sind. In den meisten Systemen verbleiben dabei letztlich immer potenzielle Ereignisse mit grossen - oder gar existenzbedrohenden - Schadensausmassen, die wegen ihrer Seltenheit als «genügend unwahrscheinlich» angesehen werden (z. B. Auslösung einer Katastrophe durch ein extremes Erdbeben). Oft werden diese dann gar nicht mehr in die Analyse einbezogen.

In der Regel nimmt die Zuverlässigkeit der Bestimmung von Ereignishäufigkeiten mit zunehmender Seltenheit ab. Während die Häufigkeit regelmässiger Ereignisse auf Statistiken abgestützt werden können, sind die Häufigkeiten sehr seltener Ereignisse nur mittels theoretischen Überlegungen oder gar durch Schätzungen von Experten abschätzbar – und dies gerade bei besonders kritischen, grossen Ereignissen.

4.4.1.2 Zunehmende Unsicherheit bei der Schadenprognose

Auch bei der Prognose des Schadensausmasses nimmt die Unsicherheit in der Regel mit der Ereignisgrösse zu. Insbesondere werden die Schadenbilder immer komplexer. Aber auch die Kenntnislücken auf technisch-wissenschaftlicher Ebene (z. B. Verletzlichkeiten) kumulieren sich und

wirken sich immer stärker aus. Auch hier kann immer weniger auf die Erfahrung und Auswertung bisheriger Ereignisse zurückgegriffen werden. Zum Teil sind Schadenwirkungen einzubeziehen, für welche noch keine anerkannten Berechnungsmodelle vorliegen. Vereinfachende Modellrechnungen sind nötig, welche sich zwangsläufig wieder auf Annahmen und Abschätzungen durch Experten stützen. Dabei sollten solche Abschätzungen, gemäss Konzept der Risikoanalyse nicht einfach als worst-case-Annahmen verstanden werden, sondern ein nach bestem Wissen und Gewissen ermitteltes, zu erwartendes Schadensausmass der jeweiligen Szenarios darstellen.

4.4.1.3 Verantwortung bei Ereignissen mit ausserordentlichem Schadensausmass

Bei diesem Effekt handelt es sich gemäss Entscheidungstheorie um die Aversion im engeren Sinn, auch als intrinsische Risikoeinstellung bezeichnet. Sie besagt, dass risikoaverse Personen einen geringen sicheren Verlust einer Risikosituation mit gleichem Erwartungswert vorziehen. Dies lässt sich so erklären, dass der meist geringe Erwartungswert seltener Grossereignisse als bewältigbar eingeschätzt wird, während bei der Möglichkeit, dass das Ereignis tatsächlich eintritt, eine potenziell nicht bewältigbares Schadensausmass droht. Die Präferenz für den sicheren, jedoch bewältigbaren Schaden stellt damit eine auch rational begründbare Absicherung dar. Ein Beispiel für eine solche Absicherung stellt die verbreitete Privathaftpflichtversicherung dar.

Die intrinsische Risikoeinstellung ist dann besonders gross, wenn man sich bei seltenen Ereignissen mit grossen - oder gar existenzbedrohenden - Schadensausmassen besonders weit weg vom statistischen Erfahrungsbereich bewegt und damit auch vom Gültigkeitsbereich statistischer Modelle, wie es der Erwartungswert $R = \sum p_j \cdot A$ bei sehr seltenen Ereignissen mit grossen Schadensausmass darstellt.

4.4.2 Vorschlag der Aversionsfaktoren

Die beschriebene Aufgliederung der Risikoaversion wurde im Rahmen des PLANAT-Aktionsplan-Projektes B 2.1 «Risikoaversion» entwickelt. Da die Umsetzung dieses Konzeptes in die Praxis noch nicht abschliessend diskutiert ist, wird im vorliegenden Leitfaden vorgeschlagen, zunächst weiterhin einen Faktor zu verwenden. Dieser entspricht der Quantifizierung im Projekt B 2.1. In Abbildung 4.2 ist dieser Vorschlag für die Funktion der Risikoaversion inkl. des Schadenergänzungsfaktors f dargestellt.

Mathematisch lassen sich diese Faktoren wie folgt ausdrücken:

Funktion für Teilfaktor f :

$$f = 10^{0.001 \log x^4 - 0.0119 \log x^3 + 0.0208 \log x^2 + 0.1931 \log x - 0.0001} \quad (4.1)$$

Funktion für alle Teilfaktoren f , ϕ_{1+2} und ϕ_3 :

$$y(f, \phi_{1+2}, \phi_3) = 10^{\frac{1}{\log(300)} \cdot \log(x)} \quad \text{für } 1 < x < 300 \quad (4.2)$$

$$y(f, \phi_{1+2}, \phi_3) = 10^{-0.0418 \log x^2 + 0.5515 \log x - 0.1064} \quad \text{für } 300 < x < 1'000'000 \quad (4.3)$$

Funktion für alle Teilfaktoren (eigentliche Aversionsbestandteile):

$$\phi(\phi_{1+2}, \phi_3) = 10^{-0.0036 \log x^3 + 0.02011 \log x^2 + 0.186 \log x} \quad (4.4)$$

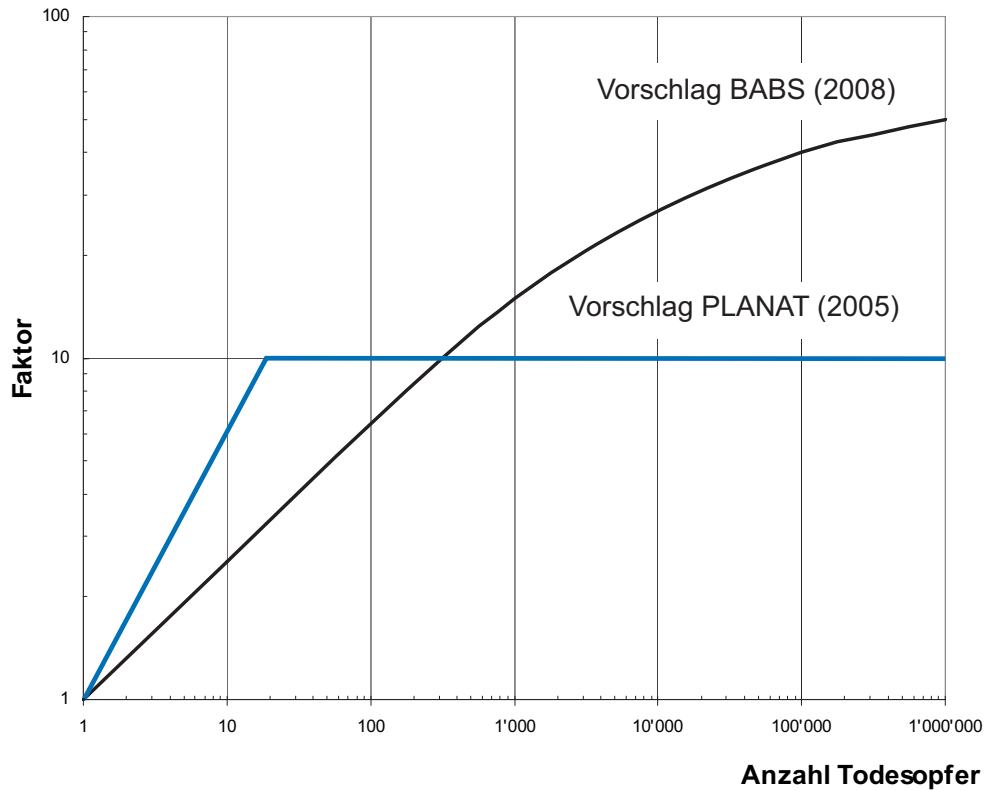


Abbildung 4.2: Vorschlag für eine neue Risikoaversion bestehend aus Teilfaktoren (nicht gezeigt, schwarze Linie) und die Funktion gemäss der PLANAT-Strategie (blaue Linie).

Die Aversionsfunktion bezieht sich derzeit auf den Schadenindikator Todesopfer. Es wird vorgeschlagen, die Funktion in dieser Form auch für andere Schäden anzuwenden, solange keine weitergehenden Kenntnisse in Bezug auf andere Schadenindikatoren vorliegen. Dazu muss die Anzahl der Todesopfer mit den jeweils adäquaten Grenzkosten multipliziert werden.

Kapitel 5

Massnahmenplanung und -bewertung

5.1 Zielsetzung

Die Resultate der Risikoanalyse und -bewertung bilden die Grundlage für den dritten Schritt des Risikokonzeptes, die Massnahmenplanung und -bewertung. Dabei werden mögliche Schutzmassnahmen beziehungsweise Kombinationen von Massnahmen entworfen und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit und ihren Kosten untersucht.

Das Ziel der Massnahmenplanung ist, jene Massnahmen oder Massnahmenpakete zu finden, welche

1. die kollektiven Risiken im Sinne der ökonomischen Effizienz nach dem Grenzkosten-Prinzip optimal reduzieren und
2. bei Bedarf die individuellen Risiken unter eine Todesfallwahrscheinlichkeit pro Jahr $1 \cdot 10^{-4}$ bzw. $1 \cdot 10^{-5}$ (vgl. Abschnitt 4.2.3) vermindern.

Zusätzlich sollen die in Betracht gezogenen Massnahmen bzw. Massnahmenkombination hinsichtlich weiterer Faktoren abgeklärt werden. So sollen

- die Massnahmen den Kriterien der Umweltverträglichkeit genügen (z. B. Landschaftsschutz),
- die Massnahmen Kosten nicht auf zukünftige Generationen verschieben (Prinzip der Nachhaltigkeit¹),
- Auflagen wie Vorgaben zu Evakuierungen oder Strassensperrungen zumutbar und verhältnismässig sein².

¹ Brundtland-Bericht, 1987: Nachhaltigkeit heisst «den Bedürfnissen der heutigen Generation zu entsprechen, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen».

² Zumutbarkeit und Verhältnismässigkeit sind diffuse Begriffe. Werden sie im konkreten Fall verwendet, um einen höheren Schutzbedarf zu begründen, müssen sie verbindlich formuliert werden. In der Risikostrategie des Kantons Bern wird beispielsweise vorgeschlagen, bei Verkehrswegen je nach ihrer Bedeutung so genannte Verfügbarkeitsanforderungen festzulegen. Eine solche kann etwa lauten: «... dass die Bahnstrecke höchstens alle zehn Jahre einige Stunden und höchstens alle dreissig Jahre eine Woche unterbrochen sein darf.»

Die Planung ist in hohem Masse ein kreativer Prozess, der nicht rein systematisch durchführbar ist. Dies äussert sich besonders in der Entwicklung von optimalen Kombinationen. Durch geeignete Kombination können bspw. Schwachpunkte der Massnahmen gegenseitig abgedeckt respektive Unsicherheiten dank redundanten Wirkungen vermindert, oder die Bemessung der Einzelmassnahmen reduziert und so geringere Kosten und verbesserte Akzeptanz erreicht werden.

Schliesslich kann die Massnahmenplanung immer nur so gut sein, wie die dazu aufbereitete Ausgangsbasis. Was nicht als Massnahme eingebracht wird, kann auch nicht in die Beurteilung einfließen. Deshalb ist eine breite Abstützung auf Expertenwissen, Erfahrungen und auch Inputs von Betroffenen wichtig.

5.2 Mögliche Schutzmassnahmen

Grundsätzlich werden alle denkbaren respektive sinnvollen Massnahmen aus Prävention und Intervention in die Massnahmenplanung einbezogen³. Dabei können die Massnahmen in vier Gruppen unterteilt werden:

- Raumplanerische Massnahmen: Durch raumplanerische Vorgaben wird eine der Gefahrensituation angepasste Raumnutzung gefördert.
- Bauliche Massnahmen: Zum einen kann mit Verbauungen die Entstehung, die Bewegung und Entwicklung sowie die Ausbreitung von Gefahrenprozessen verhindert oder eingedämmt werden. Zum andern erhöhen bauliche Eingriffe die Widerstandsfähigkeit potenziell betroffener Objekte.
- Biologische Massnahmen: Der stabilisierende Effekt von Pflanzen kann speziell bei gravitativen Gefahrenprozessen zur Verhinderung, Bremsung oder Eindämmung von Bewegungen genutzt werden. Auch die Wasser speichernde Funktion von Pflanzen kann zu den biologischen Massnahmen gezählt werden.
- Organisatorische Massnahmen: Schäden können durch Vorbereitung auf ein Ereignis, durch Warnung vor sowie durch einen Einsatz während kritischen Situationen und Ereignissen reduziert werden.

Raumplanerische Massnahmen spielen für die langfristige Risikosteuerung und -kontrolle eine zentrale Rolle. Ihnen kommt deshalb im integralen Naturgefahrenmanagement eine wichtige Funktion zu. Der vorliegende Leitfaden konzentriert sich aber auf die Analyse und Lösung akuter Sicherheitsprobleme. Hier stehen eher Massnahmen der übrigen drei Gruppen im Vordergrund, welche aktiv und vergleichsweise kurzfristig zur Risikoreduktion eingesetzt werden können. Als Spezialfall ist die Umsiedlung zu betrachten, welche den raumplanerischen Massnahmen zugeordnet wird und bei Bedarf in vergleichsweise kurzen Zeiträumen grosse Veränderungen ermöglicht. Objektschutz hingegen – obwohl rechtlich meist durch die Nutzungsplanung forciert – wird den baulichen Massnahmen zugerechnet. Eine weitere raumplanerische Massnahme ist eine Nutzungs-

³Die Wiederherstellung ist das dritte Element des Risikokreislaufs. Im Gegensatz zu Prävention und Intervention hat sie aber nicht die Vermeidung beziehungsweise Reduktion von potenziellen Schäden zum Ziel, sondern die Vorbereitung (Bsp. Versicherungen, Fonds) und die rasche und der (neuen) Situation angepassten Realisierung von Instandstellungsarbeiten nach Ereignissen.

beschränkung, die sicherstellt, dass Personen (oder Sachwerte) im Zeitraum einer potentiellen Gefährdung nicht anwesend sind.

Solange gemäss Risikobewertung die Risiken zu hoch sind respektive ökonomisch optimal vermindert werden können, ist die Realisierung von Schutzmassnahmen sinnvoll. Sind die individuellen Risiken genügend tief oder ist die ökonomische Verhältnismässigkeit nicht (mehr) gegeben, sei dies weil die optimale Massnahmenkombination gefunden wurde oder weil keine Schutzmassnahmen notwendig beziehungsweise effizient sind, bieten raumplanerische Massnahmen das Instrumentarium, weitere Raumnutzung zu ermöglichen ohne neue oder grössere Risiken zu schaffen. Sie bilden gewissermassen den Rahmen, in dem langfristig eine risikogerechte Raumnutzung erfolgen kann. Deshalb gehören raumplanerische Betrachtungen in jedem Fall zu einer integralen Massnahmenplanung dazu, können aber nicht in jedem Fall nach den für die übrigen Massnahmen gültigen Kriterien Grenzkosten und Schutzziel individuelle Risiken beurteilt werden.

5.3 Zeitliche Entwicklung

Risikoanalysen und Massnahmenplanungen sind zum Einen zwar eine Momentaufnahme, zum Andern haben sie aber eine starke zeitliche, in die Zukunft gerichtete Komponente. Dies wird besonders bei Massnahmen mit grossen zeitlichen Veränderungen wie den biologischen Eingriffen (z. B. Aufforstungen) oder der Steuerung der Raumnutzung über die Nutzungsplanung augenfällig.

Grundsätzlich erlaubt das Risikokzept auch zeitlich differenzierte Risikobetrachtungen anzustellen und beispielsweise Expositionssituationen (vgl. Abschnitt 3.3.3) mit Zukunftscharakter aufzustellen oder die (zunehmende oder abnehmende) Wirkung von Schutzmassnahmen differenziert zu beurteilen und so zukünftige Risiken quantitativ abzuschätzen. Diese Detailbetrachtung wird hier explizit nicht ausgeschlossen. Für den Normalfall werden aber die folgenden Vereinfachungen empfohlen:

- Bei Umsiedlungen als hier speziell berücksichtigte Möglichkeit raumplanerischer Massnahmen ist die Wirkung an sich nicht problematisch einzuschätzen. Vielmehr ist es aber die Realisierungszeit: Wie rasch werden die doch massiven Eingriffe durchgesetzt bzw. werden mit den Betroffenen Lösungen gefunden? Falls die Umsiedlung im konkreten Fall effektiv als mögliche Lösung in Betracht gezogen wird, was insbesondere Überlegungen zur Akzeptanz und zur Durchführbarkeit voraussetzt, soll die Massnahmenbewertung davon ausgehen, dass die Realisierung in ähnlichen Zeiträumen wie die anderen Massnahmenvarianten erfolgen kann.
- Kosten und Wirkung von baulichen Massnahmen fallen im Wesentlichen ab Realisierung an⁴. Die Beurteilung ist damit vergleichsweise unproblematisch. Später anfallende Kosten (z. B. Unterhalt) werden in der Kostenrechnung berücksichtigt.

⁴Zwischen dem Planungsprozess und der tatsächlichen Realisierung von Schutzbauten respektive ihrer Fertigstellung können aus verschiedenen Gründen einige Jahre liegen. In dieser Zeit verändern sich auch die Eingangsgrössen der Risikoanalyse, insbesondere das Schadenpotenzial. Es wird aber angenommen, diese Veränderungen liegen im Unsicherheitsbereich der Risikoabschätzung. Damit ist die statische Risikobetrachtung des Status quo nach wie vor für die Massnahmenbewertung zulässig.

- Bei biologischen Massnahmen fallen in der Regel die Kosten ab Projektbeginn an, während hinsichtlich der Wirkungen mit Verzögerungen (z. B. Entwicklung von Pflanzungen) zu rechnen ist. Deshalb darf bei der Wirksamkeit zunächst nur auf diejenigen Komponenten basiert werden, welche «sicher» von Beginn weg wirksam sind (z. B. technische Komponenten). Die «unsicheren» Massnahmen (z. B. zukünftige Vegetationsentwicklung) können je nach Situation nicht oder nur mit reduzierter Wirkung eingerechnet werden. Damit ergibt sich die Konsequenz, dass von Beginn weg Kosten anfallen, eine adäquate Wirkung aber erst mit Verzögerung eintritt. Dieser Effekt kann gegebenenfalls kostenseitig abgedämpft werden, in dem für biologische Massnahmen eine hohe Laufzeit eingesetzt wird.
- Bezüglich der organisatorischen Massnahmen gelten im Wesentlichen obige Bemerkungen zu den baulichen Massnahmen: Kosten und Wirksamkeit fallen innert der Aufbauphase von wenigen Jahren an. Deshalb kann häufig bereits kurzfristig ein Effekt erwartet werden, wobei dieser je nach Situation (z. B. vorhandene Grundlagen, Instrumente und Erfahrungen) sehr unterschiedlich ausfallen kann. Mit der Zeit können sich organisatorische Massnahmen insbesondere durch den wachsenden Erfahrungsschatz positiv entwickeln. Allerdings bleiben Unsicherheiten bezüglich der Erhaltung bestehen (langfristiger Bestand etwa eines Warn- und Rettungsdienstes).

Eine wesentliche Frage ist, ob ein allfälliger späterer «Mehrnutzen» von Schutzmassnahmen zur Gefahrenabwehr durch Intensivierung der Raumnutzung berücksichtigt werden soll. Solche Szenarien sind bei entsprechenden Annahmen in der Regel ökonomisch vorteilhaft, müssen aber im Vorfeld abgeklärt werden. Aus Sicht der Massnahmenbewertung müssen solche Überlegungen nicht à priori ausgeschlossen werden. Es ist aber zu bedenken, dass ein Szenario nur begründet ist, wenn (a) konkrete Bauabsichten vorliegen und insbesondere (b) keine günstigeren Alternativstandorte zur Verfügung stehen. Gerade Letzteres dürfte aus Sicht des Subventionsgebers eher selten der Fall sein. Auch wenn der konkrete Nutzniesser volkswirtschaftlich nicht relevant ist, stellt sich bei dieser Betrachtungsweise die Frage der Verteilungsgerechtigkeit: Ist es vertretbar, die betroffenen Grundeigentümer oder die Standortgemeinde in diesem Sinn zu bevorzugen?

Für den ökonomischen Massnahmenentscheid gilt, dass eine Schutzmassnahme bezüglich der aktuellen Situation ökonomisch verhältnismässig sein muss. Zukunftsszenarien können in begründeten Fällen – beispielsweise wenn die intensivere Raumnutzung am betreffenden Standort aus verschiedenen Gründen vorteilhaft wäre – als Zusatzinformationen einfließen und etwa bei ansonsten gleichwertigen Massnahmen den Entscheid beeinflussen.

5.4 Vorgehen

Grundsätzlich darf davon ausgegangen werden, dass die Massnahmenplanung im engeren (technischen) Sinn gemäss dem aktuellen Stand des Wissens durchgeführt wird und Fachgrundlagen berücksichtigt werden. Der Arbeitsablauf kann wie folgt gegliedert werden (Abbildung 5.1):

Auslöser: Die Massnahmenplanung wird durch die Resultate der Risikoanalyse und -bewertung initiiert, welche ihrerseits durch ein vermutetes Sicherheitsdefizit erst ausgelöst werden.

Massnahmenplanung: Ausgehend vom heutigen Risiko werden die möglichen Einzelmassnahmen und Massnahmenkombinationen entworfen. Damit die Planung in der notwendigen

Genauigkeit erfolgen kann, sind in der Regel weitere massnahmenspezifische Erhebungen notwendig. So müssen etwa bei Verbauungen der Werktyp, seine Bemessung und Ausdehnung aber auch die Rahmenbedingungen wie Baugrund oder Erschliessung bekannt sein und berücksichtigt werden. Solche Angaben werden sowohl für die Risikoanalyse nach Realisierung als auch für die Kostenberechnung benötigt.

Bestimmen von Wirksamkeit und Kosten: Die Wirksamkeit als Risikoreduktion sowie die Kosten dieser Massnahmen werden ermittelt. Zur Quantifizierung der Risikoreduktion muss die Risikoanalyse nochmals durchlaufen werden. Je nach Massnahme werden entweder angepasste Ereignisszenarien und Intensitätskarten erstellt oder neue Expositionssituationen entworfen sowie die Konsequenzen (Risiko nach Massnahmen) bestimmt.

Bewerten der Massnahmen: Die ökonomische Bewertung der entworfenen Massnahmen erfolgt nach dem Grenzkostenkriterium (vgl. Abbildung 5.1). Zur Massnahmenbewertung gehört weiter die Überprüfung der individuellen Risiken. Sie müssen mit der gewählte Variante unter dem vorgegebenen Grenzwert liegen.

Vorschlag Massnahmen: Aus den vorangehenden Analysen ergibt sich die für die Weiterbearbeitung empfehlenswerte Massnahmenvariante aus Sicht des vorliegenden Leitfadens.

Weiche Faktoren: Häufig spielen nicht nur technische und ökonomische Faktoren für den Massnahmenentscheid eine Rolle, sondern auch Aspekte wie Verhältnismässigkeit, Akzeptanz, ökologische Verträglichkeit, etc. Der systematische Einbezug solcher Punkte und insbesondere ihre Wertung fällt allerdings aufgrund fehlender Methoden und Grundlagen meist schwer und die Nachvollziehbarkeit ist nicht immer gegeben. Deshalb ist hier Transparenz sehr wichtig, insbesondere wenn der Massnahmenvorschlag aufgrund der weichen Faktoren noch abgeändert werden soll. Unter anderem sind folgende Fragen zu beantworten:

- Wird die gewählte Massnahme von der betroffenen Bevölkerung akzeptiert?
- Wird die gewählte Massnahme von den politischen Entscheidungsträgern akzeptiert?
- Ist die Massnahme aus ökologischen Gründen vertretbar?
- Steht die Massnahme im Widerspruch zu anderen Zielen der Raumplanung, die unter Umständen höher zu gewichten sind?
- Wird durch die Massnahme die Funktionalität einer Infrastruktur (z. B. Verfügbarkeit Verkehrsachse) stark beeinträchtigt?
- Sind Anliegen von Natur- und Landschaftsschutz berücksichtigt?

Zukunft: Wie bereits dargelegt ist die Raumnutzung und die damit verbundenen Risiken dynamisch zu betrachten. Deshalb gehören Überlegungen zur zukünftigen Risikoentwicklung zu einer integralen Massnahmenplanung dazu. Das Vorgehen kann sich dabei auf das methodische Grundgerüst des Risikokonzeptes stützen, welches künftige Situationen ebenso gut abbilden kann wie den Status quo. Allerdings ist noch ungeklärt, wie die Zukunftsszenarien konkret gebildet werden und – insbesondere – wie sie den Massnahmenentscheid beeinflussen sollen. Kritisch zu beleuchten sind in jedem Fall Situationen, wo in einem Zeitraum von Jahren bis wenigen Jahrzehnten nach der Realisierung der Massnahmen die Risiken erneut stark ansteigen. Möglicherweise liegen in diesen Situationen Defizite bei der Massnahmenplanung und speziell bei den langfristig relevanten raumplanerischen Massnahmen

vor. Zuweilen kann es sich aber auch um eine bewusst gewählte Strategie handeln, welche von einer beabsichtigten intensivierten Raumnutzung ausgeht.

Entscheid und Umsetzung: Fällt das Gesamturteil über die geplanten Massnahmen auch nach der erweiterten Überprüfung positiv aus, wird der abschliessende Entscheid gefällt und die Umsetzung wird an die Hand genommen. Andernfalls wäre eine überarbeitete Planung angezeigt, da erhebliche Differenzen zwischen dem Status Quo und dem möglichen, zukünftigen Zustand bestehen würden.

5.5 Bestimmen der Wirksamkeit

Die Wirksamkeit einer Massnahme entspricht der resultierenden Risikoreduktion und lässt sich als Differenz von Ausgangsrisiko zu verbleibendem Risiko nach Massnahmen bestimmen. Damit das verbleibende Risiko berechnet werden kann, muss der Einfluss der Massnahmen auf die verschiedenen Parameter der Risikoformel bestimmt werden. Dabei lassen sich die verschiedenen Massnahmentypen hinsichtlich ihres Einflusses grob einordnen (Tabelle 5.1).

Generell bestehen bei der konkreten Bestimmung der Wirksamkeit grosse Unterschiede zwischen den verschiedenen Massnahmen. Zudem ist meist eine individuelle Betrachtung der konkreten Situation notwendig. Einige allgemeine Grundsätze können aber eine erste Einordnung erleichtern:

- **Umsiedlung (Spezialfall raumplanerische Massnahmen):** Gebäude im gefährdeten Gebiet werden abgerissen oder zumindest umgenutzt. Die Hauptnutzung wird in ein ungefährdetes Gebiet verlegt. Es handelt sich um Einzelfälle, welche individuell betrachtet werden müssen. Generell muss bekannt sein, welche Gebäude betroffen sind und wie die künftige Nutzung (z. B. Abbruch, Umnutzung) konkret aussehen soll. Während die Realisierung einer Umsiedlung auf grosse Schwierigkeiten stossen kann, ist die Einschätzung der Wirksamkeit grundsätzlich einfach. Es sind nur punktuelle Objekte (Gebäude) betroffen, wo mit vergleichsweise hoher Genauigkeit abgeschätzt werden kann, wie das Schadenpotenzial nach Realisierung aussehen wird.

Wie erwähnt, werden die übrigen raumplanerischen Massnahmen nicht nach dem Vorgehen des Leitfadens beurteilt. Ihre Wirkung wäre mittels Zukunftsszenarien zu bestimmen, indem Szenarien mit mehr oder weniger starker Einflussnahme durch die Raumplanung (z. B. Nutzungseinschränkungen oder angepasste Nutzungen) verglichen würden.

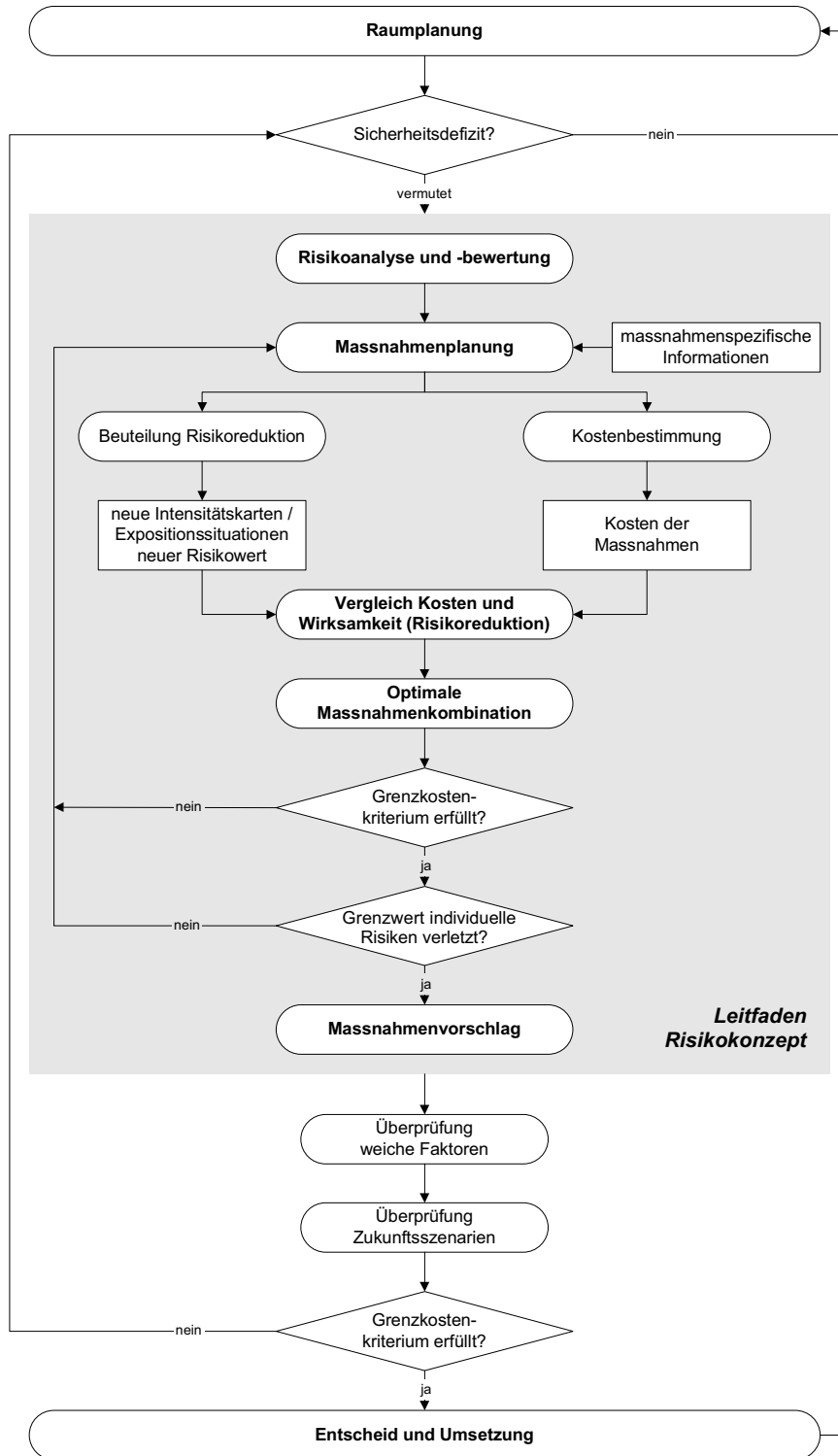


Abbildung 5.1: Übersicht Massnahmenplanung und -bewertung.

Tabelle 5.1: Wirkung verschiedener Schutzmassnahmen auf das Risiko.

		Wirkung auf ...			
	P_j Häufigkeit des Szenarios j	$P_{i,j}$ Wahrscheinlichkeit, dass Objekt i dem Szenario j ausgesetzt ist	A_i Wert des Objektes i	$SE_{i,j}$ Schadenempfindlichkeit des Objektes i in Anhängigkeit von Szenario j	
Raumplanerische Massnahmen	kein Einfluss	langfristige Reduktion möglich	sehr langfristige Reduktion möglich	indirekt bzw. durch Bauauflagen	
Spezialfall Umstiedelung	kein Einfluss	starke Reduktion bei Realisierung	starke Reduktion bei Realisierung	kein Einfluss	
Bauliche Massnahmen	zentrale Wirkung von Verbauungen	z. B. Bau eines sicheren Unterstandes, Objektschutz	kein Einfluss	reduzierte Einwirkungen einerseits, verstärkte Bauten andererseits	
Biologische Massnahmen	wie bauliche Massnahmen	kein Einfluss	kein Einfluss	reduzierte Einwirkungen	
Organisatorische Massnahmen	Einfluss, z. B. durch künstliche Auslösung oder Prozessumleitung	Einfluss durch Sperrung, Evakuierung	kein Einfluss	Einfluss, durch z. B. temporäre Verstärkung, erste Hilfe/ Rettung	

- **Bauliche Massnahmen:** Die Wirksamkeit von Schutzbauwerken – seien dies Massnahmen zur Gefahrenabwehr oder Massnahmen zur Verstärkung potenziell betroffener Objekte – wird grundsätzlich aus dem Vergleich der Prozesseinwirkungen mit dem Verhalten des Bauwerkes im Lastfall hergeleitet. Dieser Vergleich erlaubt die Abschätzung der Gefahrensituation nach Massnahmen (Prozessintensitäten und -wahrscheinlichkeiten) oder der verminderten Schadenempfindlichkeit von Objekten und somit die angepasste Risikoberechnung. Zu den Bauwerken stehen häufig Grundlagen wie Bemessungsvorgaben oder allgemeine Regeln (Normen, Richtlinien) zur Verfügung. Hingegen ist das Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Bauwerken und Prozessen unterschiedlich weit entwickelt. Für die wichtigsten Massnahmentypen im Bereich Lawinen, Sturzprozesse, Rutschungen, Wildbäche und Flüsse wurden im PLANAT Projekt A3 «Wirkung von Schutzmassnahmen» eine generelle Vorgehensweise und konkrete Arbeitshilfen entwickelt [61]. Diese Anleitung soll in der Regel verwendet werden, um die Wirksamkeit von baulichen Massnahmen zu bestimmen.
- **Biologische Massnahmen:** Im Wesentlichen kann ihre Wirksamkeit nach dem gleichen Prinzip wie bei den baulichen Massnahmen beurteilt werden. Somit gelten die obigen Ausführungen auch hier, insbesondere der Verweis auf den Bericht zum Projekt A3 «Wirkung von Schutzmassnahmen» [61].
- **Organisatorische Massnahmen:** Diese Gruppe von Massnahmen deckt ein weites Feld ab. So fallen Massnahmen zur Förderung der Risikowahrnehmung und von angepassten Verhaltensweisen ebenso darunter wie Frühwarnsysteme und die Umsetzung der Informationen in Massnahmen wie Sperrungen als auch Interventionsmassnahmen im Ereignisfall. Die Abschätzung der Wirksamkeit kann nur situations- und massnahmenspezifisch erfolgen, haben die verschiedenen Möglichkeiten doch eine unterschiedliche Zielsetzung. Die Beurteilungsgrundlagen sind allerdings sehr unterschiedlich und mehrheitlich wurde die Wirkung solcher Massnahmen noch nicht systematisch untersucht.

5.6 Bestimmen der Kosten

Die Kosten setzen sich aus den Investitionskosten (Kapitalkosten) und den laufenden Kosten (Betriebskosten) zusammen. Die reale Verteilung der Kostenströme über die Zeit ist unbekannt. Sie wird vereinfachend als konstant angenommen. Dies entspricht auch dem Nutzen der Schutzprojekte (Risikoverminderung), welcher ebenfalls jährlich als gleich hoch angenommen wird.

Zur Anwendung kommt eine statische Kostenrechnung [84], welche eine dynamische Diskontierung nicht berücksichtigt. Dies ist dadurch begründet, dass (a) auch der Nutzen, d. h. die Risikoverminderung nicht abdiskontiert wird und (b) die methodisch bedingten Fehler dieser Kostenrechnung innerhalb des Unsicherheitsbereiches der gesamten Analyse liegen.

$$K(j) = K(b) + K(u) + K(r) + K(a) + K(z) \quad (5.1)$$

mit

$$K(a) = \frac{I(0) - L(n)}{n} \quad (5.2)$$

und

$$K(z) = \left[L(n) + \frac{I(0) - L(n)}{2} \right] \cdot \frac{p}{100} \quad (5.3)$$

$$= \frac{I(0) + L(n)}{2} \cdot \frac{p}{100} \quad (5.4)$$

eingesetzt in die Grundgleichung berechnen sich die jährlichen Kosten mit:

$$K(J) = K(b) + K(u) + K(r) + \frac{I(0) - L(n)}{n} + \frac{I(0) + L(n)}{2} \cdot \frac{p}{100} \quad (5.5)$$

mit

$K(J)$	=	Jährliche Kosten	[CHF/Jahr]
$K(b)$	=	Betriebskosten (z. B. Munitionskosten)	[CHF/Jahr]
$K(u)$	=	Unterhaltskosten	[CHF/Jahr]
$K(r)$	=	Reparaturkosten	[CHF/Jahr]
$K(a)$	=	Abschreibungskosten	[CHF/Jahr]
$K(z)$	=	Zinskosten	[CHF/Jahr]
$I(0)$	=	Investitionsbetrag	[CHF]
$L(n)$	=	Restwert	[CHF]
n	=	Laufzeit	[Jahre]
p	=	Zinssatz	[%]

Diese Berechnung erlaubt den Vergleich verschiedener Projektvarianten hinsichtlich der Kosten⁵. Die einzelnen Parameter werden jeweils massnahmenspezifisch bestimmt (vgl. Teil B). Sie sind wie folgt zu verstehen:

- Die laufenden Kosten setzen sich zusammen aus den Betriebskosten (wie Personalkosten bei einem Warndienst), den Unterhaltskosten (wie jährliche Unterhaltsarbeiten an technischen Einrichtungen) und den Reparaturkosten (wie Wiederinstandstellung von Schutzbauwerken). Die laufenden Kosten müssen so abgeschätzt werden, dass über den gesamten betrachteten Zeitraum (a) die Funktionalität der Massnahme und (b) ihre Sicherheit gegeben ist. Sie werden entweder in absoluten Grössen abgeschätzt oder in Prozentanteilen des Investitionsbetrages bestimmt.
- Die Kapitalkosten umfassen die Abschreibungskosten und die Zinskosten. Die Investitionskosten werden dabei jeweils für den konkreten Fall bestimmt. Für den Zinssatz wird ein fixer Wert von 2 % empfohlen⁶. Die Laufzeit und indirekt der Restwert leitet sich aus der Lebensdauer der Massnahme oder der Anzahl Jahre ab, nach der sie abgeschrieben sein muss. Die Lebensdauer endet dann, wenn trotz Erhaltungsmassnahmen die Sicherheit und Funktionalität der Werke nicht mehr gegeben ist. So ist sie unter anderem von den Aufwendungen für

⁵In Abschnitt 5.4 wurde für die Massnahmenplanung der Detaillierungsgrad «Vorstudie» vorgegeben. Dies entspricht kostenseitig gemäss Kreisschreiben Nr. 7 des BUWAL einer Genauigkeit von +/- 25 %. Dieser Bereich ist massgebend für die Schätzung der Investitionskosten und der laufenden Kosten.

⁶Wilhelm [82] schlägt basierend auf den Renditen von Bundesobligationen von 1981-92 einen Zinssatz von 1.65 % vor. Werden die Zahlen von 1975-2001 verwendet, resultieren 1.9 %.

Unterhalt und Reparatur abhängig. Es sind hier nicht maximal mögliche Lebensdauern relevant, sondern Mindestzeiträume, während denen im Regelfall die Wirkung im erwähnten Sinn gegeben ist.

Für die Betriebs-, Unterhalts- und Reparaturkosten, die Laufzeit und den Restwert werden in Teil B aufgrund der bisherigen Erfahrungen Richtwerte vorgeschlagen. Für die konkreten Werte sind aber die lokalen Bedingungen ausschlaggebend.

Bei organisatorischen Massnahmen wie Sperrungen und Evakuierungen sind die indirekten, schwer quantifizierbare Kosten ein wichtiger Punkt. Sperrungskosten in Form einer beeinträchtigten Wirtschaftstätigkeit oder die psychische Belastung im Fall von Evakuierungen sind jedoch nicht verlässlich. Für Sperrungen hat Wilhelm [84] eine Vorgehensweise mittels eines Ersatzkostenansatzes entwickelt. Für die dargestellten Beispiele ergeben sich Sperrkosten in der Höhe zwischen rund 200'000 CHF und 650'000 CHF pro Tag.

Im Leitfaden des ASTRA wird für die Monetarisierung von unterbrochenen Nationalstrassen die Verwendung des Staukostenansatzes vorgeschlagen [2]. Gemäss den im Bericht dargestellten Annahmen ergeben sich z. B. für die Gotthard Nationalstrasse bei 20'000 Fahrzeugen Sperrkosten pro Tag in Höhe von rund 3.5 Mio CHF.

Da die Kosten für unterbrochene bzw. gesperrte Verkehrsverbindungen sehr unterschiedlich sind (z. B. Nationalstrasse vs. Kantons- bzw. Gemeindestrasse) wird ein pragmatisches Vorgehen vorgeschlagen:

- Sperrungen bis 2 Tage pro Jahr
- und Evakuierungen bis höchstens ein Mal pro 10 Jahre

werden ohne weitere Kostenfolge als tolerierbar erachtet. Wird mehr gesperrt beziehungsweise häufiger evakuiert, sind entweder die Kosten bestmöglichst anzunähern oder das Massnahmenkonzept ist zu überarbeiten.

5.7 Optimale Massnahmenkombinationen

Damit Sachrisiken und Personenrisiken gleichwertig in die Bewertung einbezogen werden können, werden letztere in Geldeinheiten umgewandelt. Bewertet wird dabei nicht das Leben an sich, sondern die gesellschaftliche Bereitschaft und finanzielle Möglichkeit Todesfälle zu verhindern. Dies entspricht dem Grenzkostenkonzept, nach dem Investitionen bis zu einem bestimmten Grenzbetrag als verhältnismässig angesehen werden. Der Grenzbetrag wurde auf 5 Mio. Franken pro verhinderten Todesfall (CHF/Tf) festgelegt (Abschnitt 4.2.3). Das Ausgangsrisiko und die durch die jeweilige Massnahme erzielte Risikoverminderung bezüglich Personenrisiken in Tf/a werden mit diesem Grenzbetrag multipliziert und so das Personenrisiko monetarisiert.

Ziel der Bewertung ist es, die aus gesamtwirtschaftlicher Sicht optimale Massnahme oder Massnahmenkombination zu finden. Dazu werden die Massnahmen im Risiko-Kosten Diagramm aufgezeichnet (Abbildung 5.2).

Die ökonomische Bewertung der entworfenen Massnahmen erfolgt nach dem Grenzkostenkriterium. Die Grenzkosten beschreiben die Kosteneinheit ΔK , welche zum Erzielen einer «Einheit

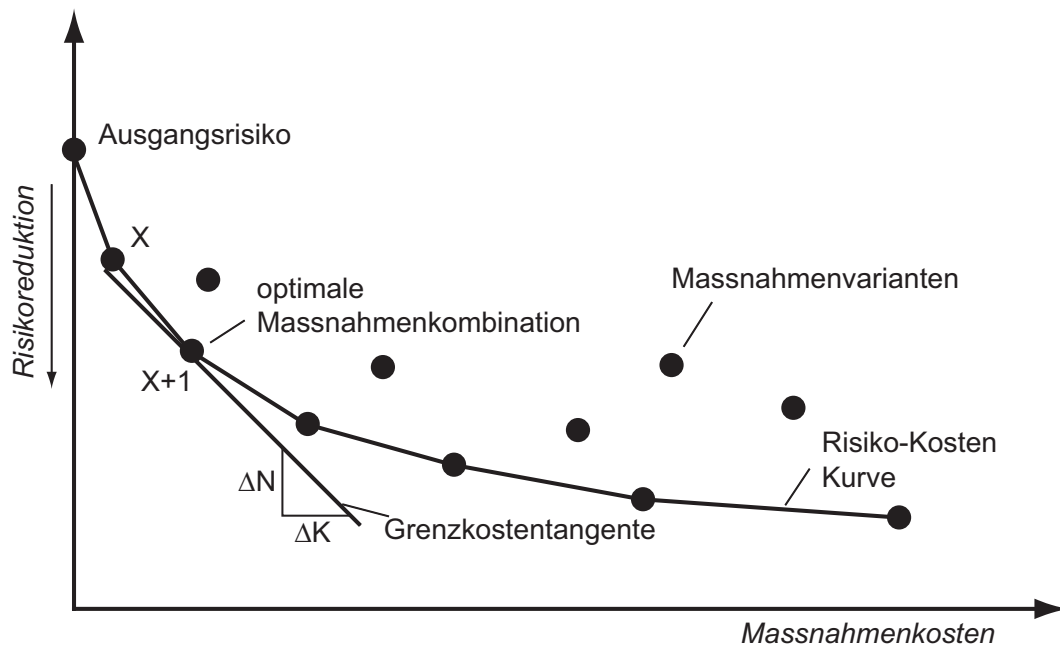


Abbildung 5.2: Ermitteln der optimalen Massnahmenkombination nach dem Grenzkostenkriterium.

Wirksamkeit» (Nutzen) ΔN eingesetzt werden muss. Grafisch entsprechen sie der Tangente an die Risiko-Kosten-Kurve⁷.

Als erste Massnahme wird jene mit dem höchsten Wirksamkeits-Kosten Verhältnis gewählt. Anschliessend folgen in absteigender Reihenfolge die übrigen Massnahmen. Optimal sind jene Massnahmenkombinationen, bei welchen die Verbindungslinie die untere Umhüllende der Punkteschar bilden. Die Sicherheitsmassnahmen müssen nun soweit gehen, bis die Grenzkosten erreicht sind. Grafisch betrachtet stellt dieser Punkt den Berührungspunkt der Tangente mit der Steigung -1 an die theoretische Kurve im Punkt X+1 respektive bei diskret verteilten Massnahmenpunkten dem Segment von Massnahme X zu Massnahme X+1 dar. Bei einer geringeren Steigung der Tangente würde pro Einheit Nutzengewinn (Wirksamkeit) mehr als eine Einheit Kosten ausgegeben. Folglich stellt die Tangente mit der Steigung -1 den massgebenden Grenzwert für die ökonomische Optimierung dar.

Zur Massnahmenbewertung gehört weiter die Überprüfung der individuellen Risiken. Sie müssen mit der gewählte Variante unter dem vorgegebenen Grenzwert liegen.

5.8 Schlussbemerkung

Die vorgeschlagene Massnahmenplanung und -bewertung nach dem Grenzkostenkriterium stellt eine Entscheidungsgrundlage basierend auf den Überlegungen zur Sicherheit und zum verhältnismässigen, d. h. wirtschaftlichen Einsatz der Mittel dar. Da gemäss diesem Vorschlag die Sicher-

⁷Die Kurve verläuft nach dem Gesetz des abnehmenden Ertragszuwachses. Dieses besagt, dass bei einem fortgesetzten Einsatz eines Inputs (z. B. Geld) auf einen andern fixen Produktionsfaktor (z. B. Lawinenzug) der zusätzlich zu erzielende Output abnimmt [64].

heitsanstrengungen immer bis zum gleichen Punkt gehen, kann im Rahmen der Ungenauigkeiten sichergestellt werden, dass mit den zur Verfügung stehenden Mitteln ein Maximum an Sicherheit erreicht wird.

Die Erfahrungen in der Praxis zeigen jedoch, dass die Anwendung des Grenzkostenkriteriums nicht immer möglich ist. In einigen Fällen stehen nicht genügend Massnahmenvarianten zur Auswahl. In diesen Fällen wird die Kosten-Wirksamkeit (Sekantenkriterium im Risiko-Kosten Diagramm) als ökonomisches Entscheidungskriterium herangezogen.

Das Grenzkostenkriterium stellt bezüglich einer integralen Massnahmenplanung jedoch nicht das alleinige Entscheidungskriterium dar. Sicherheit ist immer nur ein Aspekt bei einer Massnahmenplanung, wenn auch ein sehr wichtiger. Die Praxis hat sich jeweils wie dargestellt auch an übrigen Anforderungen, wie Verfügbarkeit von Verkehrsverbindungen, Umweltverträglichkeit von Massnahmen und der Akzeptanz von Massnahmen in der Gesellschaft zu orientieren. Ein Einbezug dieser Aspekte in die Massnahmenplanung ist notwendig, kann aber gegenwärtig wegen fehlender Grundlagen nicht in gleicher Weise vollzogen werden, wie dies hinsichtlich der ökonomischen Kriterien gezeigt wurde. Es ist jedoch wichtig, dass der Einbezug dieser Faktoren immer explizit und nachvollziehbar geschieht.

