



# **Weiterentwicklung des Bemessungskonzeptes für neue und bestehende Lawinengalerien**

**Développement du concept de dimensionnement pour des  
galeries pare-avalanche nouvelles et existantes**

**Further development of the design concept for new and  
existing avalanche protection galleries**

**Matrisk GmbH, Affoltern am Albis**  
**Dr. sc. ETH Katharina Fischer, Dipl.-Wirtsch.-Ing. (Bau)**  
**Dr. sc. ETH Matthias Schubert, Dipl.-Ing.**  
**Dr. sc. Rocco Custer, Dipl. Bauing. ETH**

**WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos**  
**Mark Schaer, Dipl. Bauing. ETH**  
**Stefan Margreth, Dipl. Bauing. ETH**

**Forschungsprojekt AGB 2015/001 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Brückenforschung (AGB)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# **Weiterentwicklung des Bemessungskonzeptes für neue und bestehende Lawinengalerien**

**Développement du concept de dimensionnement pour des  
galeries pare-avalanche nouvelles et existantes**

**Further development of the design concept for new and  
existing avalanche protection galleries**

**Matrisk GmbH, Affoltern am Albis**  
**Dr. sc. ETH Katharina Fischer, Dipl.-Wirtsch.-Ing. (Bau)**  
**Dr. sc. ETH Matthias Schubert, Dipl.-Ing.**  
**Dr. sc. Rocco Custer, Dipl. Bauing. ETH**

**WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos**  
**Mark Schaer, Dipl. Bauing. ETH**  
**Stefan Margreth, Dipl. Bauing. ETH**

**Forschungsprojekt AGB 2015/001 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Brückenforschung (AGB)**

# Impressum

## **Forschungsstelle und Projektteam**

### **Projektleitung**

Dr. Matthias Schubert

### **Mitglieder**

Dr. Katharina Fischer

Mark Schaer

Stefan Margreth

Dr. Rocco Custer

## **Begleitkommission**

### **Präsident**

Dr. Hans Rudolf Ganz

### **Mitglieder**

Dr. Eckart Hars

Fritz Ruchti

Dr. Armand Fürst

Thomas Lang

## **Antragsteller**

Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB)

## **Bezugsquelle**

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>11</b>
<b>Summary</b> .....	<b>15</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>19</b>
1.1 Ausgangslage.....	19
1.1.1 Bemessung von Lawinengalerien in der Schweiz.....	19
1.1.2 Versagensereignisse von Lawinengalerien in der Schweiz .....	20
1.1.3 Forschungsbedarf .....	22
1.2 Zielsetzung .....	24
1.3 Vorgehen.....	24
<b>2 Grundlagen der Normenkalibrierung</b> .....	<b>25</b>
2.1 Zuverlässigkeitsbasierte Normenkalibrierung .....	25
2.1.1 Zuverlässigkeit von Tragwerken .....	25
2.2 Festlegung der Ziel-Zuverlässigkeit .....	29
2.2.1 Ziel-Zuverlässigkeiten in Bemessungsvorschriften.....	29
2.2.2 Bestimmung optimaler Ziel-Zuverlässigkeiten .....	31
2.3 Grenzzustände und Bemessungsgleichungen .....	36
2.3.1 Betrachtete Grenzzustände .....	36
2.3.2 Definition einer allgemeinen Grenzzustandsfunktion.....	37
2.3.3 Definition einer allgemeinen Bemessungsgleichung .....	38
2.4 Probabilistische Modellierung der Basisvariablen.....	39
2.4.1 Modellierung des Tragwiderstandes .....	40
2.4.2 Modellierung der ständigen Einwirkung .....	41
2.4.3 Modellierung der veränderlichen Einwirkung .....	41
2.4.4 Berücksichtigung der Modellunsicherheit .....	42
<b>3 Beurteilung des Sicherheitsniveaus nach aktueller Normung</b> .....	<b>43</b>
3.1 Derzeitige Normung von Lawinengalerien in der Schweiz .....	43
3.2 Einwirkungskombinationen gemäss ASTRA-Richtlinie 12007.....	44
3.2.1 Fall 1: Fliesslawine auf schneefreiem Galeriedach.....	45
3.2.2 Fall 2: Fliesslawine über schneebedecktem Galeriedach.....	46
3.2.3 Fall 3: Fliesslawine über abgelagertem Lawinenschnee .....	46
3.2.4 Fall 4: Lawinenablagerung ruhend.....	47
3.3 Untersuchte Galeriestandorte .....	47
3.3.1 Galerie Salezer Davos .....	47
3.3.2 Galerie Oberalppass .....	48
3.3.3 Untersuchte Standortfaktoren .....	49
3.4 Zusammenfassung der Zuverlässigkeitsberechnung .....	51
3.4.1 Ergebnisse der Parameterstudien (theoretische Analyse) .....	51
3.4.2 Ergebnisse für die betrachteten Galeriestandorte .....	52
3.4.3 Vergleich mit dem beobachteten Sicherheitsniveau .....	53
3.5 Berechnung der Tragwerks-Zuverlässigkeit .....	55
3.5.1 Zuverlässigkeit in verschiedenen Bemessungssituationen .....	56
3.5.2 Variation der Lawineneinwirkung .....	57
3.5.3 Baumaterial der Galerie .....	58
3.5.4 Anteil der ständigen Einwirkung.....	61
3.6 Berechnung der Zuverlässigkeit in den Fällen 1 bis 4 .....	65
3.6.1 Fall 1: Fliesslawine auf schneefreiem Galeriedach.....	65
3.6.2 Fall 2: Fliesslawine über schneebedecktem Galeriedach.....	72
3.6.3 Fall 3: Fliesslawine über abgelagertem Lawinenschnee .....	74
3.6.4 Fall 4: Lawinenablagerung ruhend.....	77

<b>4</b>	<b>Modellierung der Unsicherheiten in den Lawineneinwirkungen .....</b>	<b>79</b>
4.1	Allgemeines Vorgehen zur Modellierung der Einwirkungen .....	79
4.1.1	Modellierung von Einwirkungsszenarien und ihrer Unsicherheit .....	79
4.1.2	Herleitung der jährlichen Extremwertverteilung für die Einwirkung .....	79
4.1.3	Bestimmung der charakteristischen Werte für die Bemessung .....	82
4.2	Dynamische Einwirkungen durch Fließlawinen (Fall 1) .....	83
4.2.1	Unsicherheiten bei der Beurteilung der dynamischen Einwirkungen .....	83
4.2.2	Vorgehen zur Modellierung der Unsicherheiten .....	85
4.2.3	Lawinendynamische Berechnungen .....	89
4.2.4	Berechnung der Einwirkungen auf die Galerie .....	91
4.2.5	Probabilistische Modellierung .....	94
4.2.6	Ergebnisse der Modellierung für Fall 1 .....	98
4.3	Ruhende Einwirkungen aus natürlich abgelagerter Schneedecke (Fall 2) .....	108
4.3.1	Grundlagen zur Ermittlung der Schneelast .....	108
4.3.2	Modellierung auf Basis von Daten zu ausgewählten Standorten .....	109
4.3.3	Kombination der ruhenden und dynamischen Einwirkungen .....	113
4.4	Ruhende und dynamische Einwirkungen bei Kombination von Ereignissen (Fall 3) .....	116
4.4.1	Unsicherheiten bei der Beurteilung der kombinierten Einwirkungen .....	116
4.4.2	Vorgehen zur Modellierung der Unsicherheiten .....	117
4.4.3	Lawinendynamische Berechnungen .....	120
4.4.4	Berechnung der Einwirkungen auf die Galerie .....	122
4.4.5	Probabilistische Modellierung .....	124
4.4.6	Ergebnisse der Modellierung für Fall 3 und Vergleich mit Fall 4 .....	126
4.5	Ruhende Einwirkungen aus abgelagertem Lawinenschnee (Fall 4) .....	131
4.5.1	Vorgehen zur Modellierung der Einwirkungen in Fall 4 .....	131
4.5.2	Ergebnisse der Modellierung für Fall 4 .....	131
<b>5</b>	<b>Berücksichtigung von Daten zu beobachteten Lawineneinwirkungen .....</b>	<b>135</b>
5.1	Ansätze zur Berücksichtigung von Daten .....	135
5.2	Beispiel Aktualisierung der Lawineneinwirkung .....	136
5.2.1	Parametrisierung .....	137
5.3	Erwartete Ergebnisse .....	138
5.4	Ergebnisse .....	139
5.4.1	Detaillierte Ergebnisse für den Fall einer konservativen Schätzung .....	139
5.4.2	Ergebnisse für weitere Parametrisierungen .....	141
5.4.3	Vereinfachung mit bekannter Varianz der Schneehöhenverteilungen .....	144
5.5	Potential der Aktualisierung von Lawineneinwirkungen .....	146
5.6	Empfehlungen zur Aktualisierung und Datensammlung .....	146
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen und Bemessungsempfehlungen für Lawinengalerien .....</b>	<b>147</b>
6.1	Schlussfolgerungen zum heutigen Bemessungskonzept .....	147
6.1.1	Sicherheitsniveau nach aktueller Normung .....	147
6.1.2	Einwirkungskombinationen nach ASTRA-Richtlinie 12007 .....	150
6.2	Empfehlungen für Anpassungen am bestehenden Konzept .....	150
6.2.1	Ansätze zur Reduktion der versteckten Sicherheiten .....	150
6.2.2	Festlegungen zum Bemessungswert der Lawineneinwirkungen .....	154
6.2.3	Berücksichtigung der Schätzunsicherheit im Bemessungskonzept .....	156
6.2.4	Risikobasiertes Bemessungskonzept für Galerieneubauten .....	158
6.2.5	Kombinationen von Lawineneinwirkungen .....	161
6.3	Umgang mit bestehenden Galerien .....	164
6.3.1	Risikobasierte Festlegung der Bemessungseinwirkungen .....	165
6.3.2	Aktualisierung mit Daten zu beobachteten Einwirkungen .....	166
6.3.3	Empfehlung zur Datensammlung für bestehende Galerien .....	167
6.4	Empfehlungen für zukünftige Forschung .....	169
	<b>Glossar .....</b>	<b>173</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>175</b>
	<b>Projektabschluss .....</b>	<b>177</b>

## Zusammenfassung

### Einleitung und Projektziele

Lawinenschutzgalerien leisten einen wesentlichen Beitrag zum Schutz von Personen und der Infrastruktur vor den Gefahren durch Lawinenabgänge. Ein Grossteil der Schweizer Schutzgalerien wurde in den 60er bis 80er Jahren gebaut. Die bestehenden Galerien müssen regelmässig unterhalten und ggf. ertüchtigt werden, um die Sicherheit im Verkehrsnetz zu erhalten.

Die Bemessung von Lawinenschutzgalerien in der Schweiz basiert grundsätzlich auf den SIA Normen (v.a. SIA 260 bis 262 [5]-[7]). Das Vorgehen zur Bestimmung der Lawineneinwirkungen ist in der ASTRA-Richtlinie 12007 „Einwirkung infolge Lawinen auf Schutzgalerien“ [1] definiert (Vorgängerversion: ASTRA/SBB 1994 [2]). Für bestehende Galerien gelten die Festlegungen der ASTRA-Richtlinie sinngemäss. Die ASTRA-Richtlinie 12007 gilt auch im Ausland als Standard für die Bemessung von Lawinengalerien (siehe z.B. die ONR 24806 [4]).

Schutzgalerien werden durch die bewegte Lawine in der Form von dynamischen Normallasten, Reibung und Umlenkkräften beansprucht. Zusätzlich treten statische Einwirkungen infolge der natürlich abgelagerten Schneedecke und abgelagertem Lawinenschnee sowie Staudrücke auf.

Im vorliegenden Bericht wird das bestehende Bemessungskonzept für Lawinengalerien basierend auf den Gefährdungsbildern gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] in Kombination mit dem Sicherheitskonzept SIA 260 [5] weiterentwickelt.

Daraus werden Empfehlungen für die Bemessung von neuen und für die Beurteilung der Tragfähigkeit von bestehenden Galerien abgeleitet.

Der Fokus liegt auf den risiko- und zuverlässigkeitstheoretischen Grundlagen der Tragwerksbemessung und ihrer Anwendung auf den Spezialfall der Bemessung von Lawinengalerien. Diese theoretische Ausrichtung hat das Ziel eine möglichst realitätsnahe praxistaugliche Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse zu ermöglichen, um im Rahmen des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes der SIA-Normen mit einfachen Werkzeugen eine risikooptimierte Bemessung unter Berücksichtigung der ortsspezifischen Charakteristiken der Lawineneinwirkungen zu erreichen.

Für bestehende Lawinengalerien wird eine Methode für die risikobasierte Festlegung der Zielzuverlässigkeit und der Bemessungswerte gemäss Anhang B/C der derzeit gültigen SIA 269 [10] vorgestellt.

Es wird untersucht und dargestellt, wie ortsspezifische Aufzeichnungen zu früheren Lawinenabgängen genutzt werden können, um die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Einwirkungen so weit wie möglich zu reduzieren.

### Inhalt

Nach einer Einleitung werden in Kapitel 2 zunächst die generellen Grundlagen der Normenkalibrierung vorgestellt. Das Ziel von Normenkalibrierung ist es, die Teilsicherheitsbeiwerte im semiprobabilistischen Normenkonzept der Normen möglichst optimal festzulegen und die geforderte Sicherheit (ausgedrückt als Zielversagenswahrscheinlichkeit) durch die Normen zu erreichen.

In Kapitel 3 wird das Sicherheitsniveau bestimmt, welches bei der Anwendung der derzeit gültigen ASTRA-Richtlinie 12007 und der SIA Normen erreicht wird. Es werden die Einwirkungskombinationen der ASTRA-Richtlinie «Fliesslawine auf schneefreiem Schneedach», «Fliesslawine auf schneebedecktem Schneedach», «Fliesslawine über abgelagertem Lawinenschnee» und «ruhender Lawinenschnee» betrachtet. Kapitel 3

schliesst mit einem Vergleich zwischen der berechneten und beobachteten Zuverlässigkeit.

Die Bemessung von Lawinenschutzgalerien wird wie bisher in das Konzept der SIA-Normen (SIA 260 [5]) integriert. Für die Berechnung der Tragwerks-Zuverlässigkeit werden alle Widerstände und Einwirkungen als Zufallsvariablen modelliert. Abgesehen von den Lawineneinwirkungen können hierfür Standardansätze aus der Literatur verwendet werden. Mit Hilfe einer FORM-Analyse wird zunächst das derzeitige Sicherheitsniveau (die jährliche Versagens-Wahrscheinlichkeit) bei Ermittlung der Bemessungswerte für die Lawineneinwirkungen gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 bestimmt. Im Anschluss werden Anpassungen des Sicherheitskonzepts zur Berücksichtigung der Besonderheiten von Lawineneinwirkungen untersucht.

Zur Berücksichtigung der Unsicherheiten (Kapitel 4) bei der Ermittlung von Lawineneinwirkungen kann der Sicherheitsbeiwert für die Einwirkungsseite in Abhängigkeit der Streuung der Einwirkung bestimmt werden. Hierbei werden zwei Typen von Unsicherheiten berücksichtigt: Unsicherheiten aus der natürlichen Variation der Lawineneinwirkungen und Modellunsicherheiten bei der Ermittlung der Einwirkungen. Die Abschätzung der Unsicherheiten erfolgt wie in der Praxis üblich auf Basis von Expertenschätzungen für die Einwirkungen in verschiedenen Szenarien mit unterschiedlichen Wiederkehrperioden. Da die Variation der Lawineneinwirkungen sehr standortspezifisch ist, werden repräsentative Standorte untersucht.

In Kapitel 5 wird untersucht, welche Daten zu Lawinen und Schneehöhen genutzt werden können, um die Modelle für eine spezifische Überprüfung einer Galerie oder für die Bemessung einer neuen Galerie zu aktualisieren. Hierfür werden Bayes'sche Verfahren verwendet.

Mit den Schlussfolgerungen und Empfehlungen in Kapitel 6 schliesst der Bericht. Diese werden im Folgenden zusammengefasst.

## **Folgerungen und Empfehlungen**

Im Folgenden werden die Empfehlungen, die sich aus den Ergebnissen des Projektes ergeben haben zusammengefasst.

### *Sicherheitsniveau*

Im Vergleich zu anderen Tragwerken sind bei Lawinengalerien der Beitrag und die Unsicherheit der ruhenden Einwirkung hoch. Für die Zuverlässigkeit der Galerietragwerke weniger bedeutend sind die Unsicherheiten auf der Widerstandsseite, evtl. mit Ausnahme von Galerien mit Zugankern, die in der Praxis mit einem entsprechend konservativen Ansatz behandelt werden.

Im Vergleich zum allgemeinen Sicherheitsniveau der SIA-Normen ist daher das nominelle Sicherheitsniveau von Lawinengalerien eher niedrig, aber durchaus noch im Rahmen der auch für andere Tragwerke üblichen Versagenswahrscheinlichkeiten. Ein Vergleich mit dem beobachteten Sicherheitsniveau der bestehenden Galeriebauwerke in der Schweiz legt nahe, dass die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalysen die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit realer Galeriebauwerke eher überschätzt. Aus der Analyse des bestehenden Sicherheitsniveaus ergibt sich jedoch kein offensichtlicher Bedarf an pauschalen Korrekturen am Bemessungskonzept der ASTRA-Richtlinie 12007. Verzichtet ein Bauherr auf die Berücksichtigung des 300-jährigen Ereignisses, was vor allem bei einem grossen Unterschied zum 30-jährigen Ereignis verlockend sein kann, kann dies zu sehr hohen rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeiten führen. Daraus ergibt sich, dass das grösste Schutzdefizit bei Lawinengalerien nicht im Bemessungskonzept liegt, sondern in der Wahl und Definition des Bemessungsereignisses.

### *Anpassungen am bestehenden Konzept*

Aus der Überprüfung des Sicherheitsniveau bestehender Galerien ergibt sich, dass die Bemessung auf das 300-jährige Lawineneignis als aussergewöhnliche Einwirkung nicht fakultativ dem Bauherrn überlassen werden sollte, sondern in jedem Fall verpflichtend zu berücksichtigen ist, solange am bestehenden Bemessungskonzept der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] festgehalten wird.

Die Lawinengutachten auf denen die Bemessungswerte basieren, streuen naturgemäss stark. Diese Unsicherheit hat einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und eine Erhöhung der Bemessungswerte für die Lawineneinwirkungen mit einem Beiwert zur Berücksichtigung der Schätzungenauigkeit sollte in Betracht gezogen werden, sofern die Mehrkosten durch die Risikoreduktion gerechtfertigt werden können. Ein Verfahren, wie die beurteilt werden kann, in welchen Fällen eine Schätzfaktor angewendet werden sollte, ist entwickelt worden.

Die Einführung eines risikobasierten Bemessungskonzeptes zur optimalen Wahl des Lastbeiwertes  $\gamma_Q$ , kann aus heutiger Sicht vor allem für Galeriestandorte mit hohem Verkehrsaufkommen und entsprechend grossen Konsequenzen eines Tragwerksversagens von Interesse sein. Risikobasierte Bemessungskonzepte können durch die Berücksichtigung ortsspezifischer Charakteristiken grosse Vorteile für den Bauherrn aufweisen.

Es hat sich gezeigt, dass viele versteckte Sicherheiten in den Lawinengalerien vorhanden sind. Um diese zu verringern, wird empfohlen, dass systematisch Lawinen erfasst werden, klare Vorgaben zur Krafteinleitung über die Schneedecke und das Erdreich sowie eine risikobasierte Festlegung der Bemessungswerte erfolgt. Damit kann eine deutlich differenziertere Bemessung in Abhängigkeit der Konsequenzklasse erreicht werden, die zu einer effizienteren und optimaleren Bemessung führt. Dies ist auch im Hinblick von begrenzten Budgets und im Hinblick auf die nachhaltige Verwendung von CO<sub>2</sub>-intensiven Baustoffen sinnvoll. Ein risikobasiertes Bemessungskonzept in der ASTRA-Richtlinie 12007 wird daher empfohlen.

Es wäre zudem wünschenswert, die Berechnungsformeln der bestehenden ASTRA-Richtlinie 12007 bzw. ihrer Anwendung mit den heute verwendeten 2d-Simulationsmodellen zu überprüfen.

### *Umgang mit bestehenden Galerien*

Die SIA 269 [10], Anhang B, erlaubt für bestehende Bauten bereits heute, die Ziel-Zuverlässigkeit eines Tragwerks risikobasiert festzulegen. Ein Problem bei der Anwendung dieses Vorgehens auf bestehende Lawinengalerien ist, dass das rechnerische, implizite Sicherheitsniveau der Bemessung auch bei Galerie-Neubauten schon relativ niedrig ist und damit das Potential gering sein dürfte. Angesichts der teils sehr hohen Kosten von Verstärkungsmassnahmen könnte es vor allem an Standorten mit geringem Verkehrsaufkommen durchaus optimal sein, für bestehende Galeriebauten auch ein niedrigeres Sicherheitsniveau zu akzeptieren. Ein möglicher Ansatz wäre, dem Bauherrn bzw. Galerieeigentümer die Möglichkeit zu geben, bei bestehenden Galerien auch höhere rechnerische Versagenswahrscheinlichkeiten zu akzeptieren, wenn dies aufgrund einer standortspezifischen Risikoanalyse gerechtfertigt werden kann.

Die Aktualisierung von Lawineneinwirkungen auf rein statistischer Basis erfordert lange Datenreihen und ist somit nicht als realistisch einzustufen. Denkbar ist höchstens eine Aktualisierung mit den Methoden des Bayes'schen Updating, indem eine Beurteilung der zu erwartenden Einwirkungen durch einen Lawinenexperten als «Prior» mit zusätzlichen Daten aus Beobachtungen im Feld aktualisiert wird.

### *Empfehlungen für die Forschung*

Es wird empfohlen die ASTRA-Richtlinie 12007 [1] basierend auf den Empfehlungen in diesem Bericht zu überarbeiten und ein Handbuch mit Erläuterungen und Hintergründen

zu entwickeln. In diesem sollten die Bedürfnisse der Ingenieure für die Umsetzung in der Praxis aufgenommen werden. Für den Lastfall Lawinenaufprall auf das Galeriedach sollten Methoden zur rechnerischen Ermittlung der Einwirkungen entwickelt werden. Zudem sollten Grundlagen für Lastkombinationen (Stützenanprall und Lawineneinwirkung) erarbeitet werden.

Des Weiteren ergibt sich auch Forschungsbedarf in Bezug auf das Monitoring von Lawineneinwirkung an bestehenden Galerien. Das vorliegende Projekt hat das Potential von Datensammlungen beleuchtet. Es wird empfohlen ein Pilotprojekt zur systematischen Datensammlung an bestehenden Galerien sowie ein Projekt für die systematische Aufnahme der Ablagerungshöhen nach Grossereignissen zu initiieren.

## Résumé

### Introduction et objectifs du projet

Les galeries de protection contre les avalanches contribuent de manière déterminante à la protection des personnes et des infrastructures face aux dangers des avalanches. La majorité des galeries suisses de protection contre les avalanches ont été construites entre les années 1960 et 1980. Les galeries existantes doivent être régulièrement entretenues et, si nécessaire, modernisées afin de maintenir la sécurité du réseau routier.

En Suisse, la conception des galeries de protection contre les avalanches se base essentiellement sur les normes SIA (notamment SIA 260 à 262 [5]-[7]). La procédure pour déterminer les actions des avalanches est définie dans la directive ASTRA 12007 "Actions des avalanches sur les galeries de protection" [1] (version précédente : ASTRA/SBB 1994 [2]). Pour les galeries existantes, les spécifications de la directive de l'OFROU s'appliquent par analogie. La directive ASTRA 12007 [1] est également utilisée à l'étranger comme norme pour la conception des galeries d'avalanche (voir par exemple ONR 24806 [4]).

Les galeries de protection sont sollicitées par l'avalanche en mouvement sous forme de charges normales dynamiques, de forces de frottement et de déviation. De plus, des actions statiques se produisent en raison de la couverture naturelle de neige, du dépôt de neige d'avalanche, ainsi qu'en raison des pressions dynamiques.

Dans le présent rapport, le concept de dimensionnement existant pour les galeries d'avalanche est développé sur la base de ASTRA 12007 [1] en combinaison avec le concept de sécurité SIA 260 [5].

On en déduit des recommandations pour la conception de nouvelles galeries et pour l'évaluation de la capacité de charge des galeries existantes.

Cette étude met l'accent sur les concepts théoriques de risque et de fiabilité structurelle et leur application au cas particulier de la conception des galeries d'avalanche. Cette approche théorique a pour objectif de permettre une mise en œuvre pratique des connaissances acquises, aussi proche que possible de la réalité, afin de parvenir à une conception optimisée du risque avec des outils simples dans le cadre du concept de sécurité semi-probabiliste des normes SIA, en tenant compte des caractéristiques spécifiques du site en termes d'actions des avalanches.

Pour les galeries d'avalanche existantes, une méthode est présentée, qui permet de déterminer, en fonction du risque, la fiabilité cible et les valeurs de calcul selon l'annexe B/C de la norme SIA 269 [10] actuellement en vigueur.

Il est analysé et montré comment les archives des avalanches antérieures, spécifiques à un site, peuvent être utilisées pour réduire autant que possible les incertitudes dans la détermination des actions.

### Contenu

Après une introduction, le chapitre 2 présente d'abord les principes généraux de la calibration des normes. L'objectif de la calibration des normes est de déterminer, de la manière la plus optimale possible, les facteurs de sécurité partiels dans le concept semi-probabiliste des normes et d'atteindre la sécurité requise (exprimée en probabilité de défaillance de la cible) par les normes.

Au chapitre 3, le niveau de sécurité est déterminé en appliquant la directive ASTRA 12007 actuellement en vigueur et les normes SIA. Les combinaisons des actions de la directive ASTRA 12007 «Avalanche coulante sur terrain nu», «Avalanche coulante sur un toit enneigé», «Avalanche coulante sur un dépôt de neige d'avalanches» et «Neige d'avalanches stationnaire» sont prises en compte. Le chapitre 3 se termine par une comparaison entre la fiabilité calculée et la fiabilité observée.

La conception des galeries de protection contre les avalanches est intégrée comme auparavant dans le concept des normes SIA (SIA 260 [5]). Pour le calcul de la fiabilité structurelle, toutes les résistances et actions sont modélisées avec des variables aléatoires. A l'exception des actions d'avalanches, des approches standard de la littérature peuvent être utilisées à cette fin. Une analyse FORM est d'abord utilisée pour déterminer le niveau de sécurité actuel (la probabilité de défaillance annuelle) lors de la détermination des valeurs de conception pour les actions en cas d'avalanche selon ASTRA 12007. Ensuite, les adaptations du concept de sécurité pour tenir compte des spécificités des actions d'avalanches sont étudiées.

Afin de tenir compte des incertitudes (chapitre 4) dans la détermination des actions d'avalanches, le facteur de sécurité du côté de l'action peut être déterminé en fonction de la dispersion de l'action. Ici, deux types d'incertitudes sont considérés : Incertitudes liées à la variation naturelle des actions des avalanches et incertitudes des modèles dans la détermination des actions. Pour les actions dans différents scénarios avec différentes périodes de retour, l'estimation des incertitudes est réalisée sur la base d'estimations d'experts, comme il est d'usage dans la pratique. Comme la variation des actions des avalanches est très spécifique au site, des sites représentatifs sont étudiés.

Le chapitre 5 étudie quelles données sur les avalanches et sur l'épaisseur de la neige peuvent être utilisées pour mettre à jour les modèles dans le cadre d'une révision spécifique d'une galerie ou pour la conception d'une nouvelle galerie. Des méthodes bayésiennes sont utilisées à cet effet.

Le rapport se termine par les conclusions et les recommandations du chapitre 6. Elles sont résumées ci-dessous.

## Conclusions et recommandations

Voici un résumé des recommandations qui ont émergé des conclusions du projet.

### *Niveau de sécurité*

Par rapport à d'autres structures de soutien, pour les galeries d'avalanche la contribution et l'incertitude de l'action statique sont élevées. Les incertitudes sur la résistance sont moins importantes pour la fiabilité des structures de galeries, à l'exception peut-être des galeries avec tirants, qui sont traitées dans la pratique avec une approche prudente.

Par rapport au niveau de sécurité général des normes SIA, le niveau de sécurité nominal des galeries d'avalanche est donc plutôt faible, mais reste tout à fait dans la limite des probabilités de défaillance habituelles d'autres structures. La comparaison avec le niveau de sécurité observé des structures de galeries existantes en Suisse suggère que les résultats des analyses de fiabilité ont tendance à surestimer la probabilité réelle de défaillance des structures de galeries existantes. Toutefois, l'analyse du niveau de sécurité existant ne fait pas ressortir la nécessité d'apporter des corrections globales au concept de conception de la directive ASTRA 12007. Si un maître d'œuvre renonce à prendre en compte l'événement de 300 ans, ce qui peut être tentant, surtout s'il y a une grande différence avec l'événement de 30 ans, cela peut conduire à des probabilités de défaillance calculées très élevées. Il s'ensuit que le plus grand déficit de protection dans les galeries d'avalanche ne réside pas dans le concept de dimensionnement, mais dans la définition de l'événement de conception.

### *Adaptations au concept existant*

L'examen du niveau de sécurité des galeries existantes montre que la conception pour l'avalanche tri centennale en tant qu'action exceptionnel ne devrait pas être laissée à la discrétion du maître d'ouvrage, mais devrait être impérative dans tous les cas, pour autant que le concept de dimensionnement existant de la directive ASTRA 12007 [1] soit respecté.

Les avis d'experts d'avalanche sur lesquels se fondent les valeurs de calcul sont naturellement très variables. Cette incertitude a un impact sur la fiabilité et une

augmentation des valeurs de conception pour les actions d'avalanche avec un «facteur d'estimation» de 1,5 devrait être envisagée, à condition que les coûts supplémentaires puissent être justifiés par la réduction du risque. Une procédure permettant d'évaluer dans quels cas un facteur d'estimation doit être appliqué, a été développée.

Aujourd'hui, l'introduction d'un concept de dimensionnement basé sur le risque pour le choix optimal du facteur de charge  $\gamma_Q$  peut se révéler intéressante, en particulier pour les galeries où le trafic est élevé et où les conséquences d'une défaillance structurelle sont importantes. Les concepts de dimensionnement basés sur le risque peuvent apporter de grands avantages au client en permettant de prendre en compte les caractéristiques spécifiques du site.

Il a été démontré que de nombreuses sécurités cachées sont présentes dans les galeries d'avalanche. Afin de les réduire, il est recommandé de procéder à un enregistrement systématique des avalanches, d'établir des spécifications claires pour l'introduction des forces par le biais du manteau neigeux et du sol, et de déterminer les valeurs de calcul en fonction des risques. De cette façon, il est possible d'obtenir une conception beaucoup plus différenciée en fonction de la classe de conséquences et donc un dimensionnement plus efficace et optimal. Ceci est également judicieux pour des budgets limités et l'utilisation durable de matériaux de construction à forte intensité de CO<sub>2</sub>. Il est donc recommandé d'adopter un concept de dimensionnement basé sur le risque dans la nouvelle directive OFROU.

Il serait également souhaitable de comparer les formules de calcul de la directive ASTRA 12007 et leur application avec des modèles de simulation 2D actuelles.

#### *Gestion des galeries existantes*

La norme SIA 269 [10], annexe B, permet déjà de déterminer la fiabilité cible d'une structure en fonction du risque pour les structures existantes. L'un des problèmes que pose l'application de cette approche aux galeries d'avalanche existantes est que le niveau de sécurité mathématique implicite du dimensionnement est déjà relativement faible, même pour la construction de nouvelles galeries, et que le potentiel est donc limité. Compte tenu des coûts parfois très élevés des mesures de renforcement, il pourrait être optimal, surtout aux endroits où le trafic est faible, d'accepter également un niveau de sécurité inférieur. Une approche possible serait de donner au maître d'œuvre ou au propriétaire de la galerie la possibilité d'accepter des probabilités de défaillance calculées plus élevées pour les galeries existantes si cela peut être justifié sur la base d'une analyse des risques spécifique au site.

La mise à jour des actions des avalanches sur une base purement statistique nécessite de longues séries de données et ne peut donc pas être considérée comme réaliste. Tout au plus peut-on imaginer une mise à jour utilisant les méthodes bayésiennes, c'est-à-dire qu'une évaluation des actions attendus par un expert en avalanche est mise à jour en tant que «prior» avec des données supplémentaires provenant d'observations sur le terrain.

#### *Recommandations pour la recherche*

Il est recommandé de réviser la directive ASTRA 12007 sur la base des recommandations du présent rapport et d'élaborer un manuel contenant des explications et le contexte. Les besoins des ingénieurs dans la pratique devraient être y inclus. Pour le cas de la charge provoquée par l'action d'une avalanche sur le toit de la galerie, il convient de développer des méthodes permettant de déterminer les actions par calcul. En plus, des principes de base pour les combinaisons de charges (choc de véhicules et action d'avalanche) devraient être développés.

Des recherches supplémentaires concernant la surveillance des actions des avalanches sur les galeries existantes seront nécessaires. Le présent projet a mis en évidence le potentiel de la collecte de données. Il est recommandé d'initier un projet pilote de collecte

systematique de données dans les galeries existantes ainsi qu'un projet d'enregistrement systematique des hauteurs de dépôt de neige après des événements majeurs.

## Summary

### Introduction and project objectives

Avalanche protection galleries make a significant contribution to the protection of people and infrastructure from the hazards of avalanches. The majority of Swiss avalanche protection galleries were built between the 1960s and 1980s. The existing galleries must be regularly maintained and, if necessary, upgraded in order to maintain the safety of the traffic network.

The design of avalanche protection galleries in Switzerland is basically based on the SIA standards (mainly SIA 260 to 262 [5]-[7]). The procedure for the determination of avalanche actions is defined in the FEDRO guideline 12007 «Actions due to avalanches on protective galleries» [1] (previous version: FEDRO/SBB 1994 [2]). For existing galleries, the specifications of the FEDRO-guideline apply analogously. The FEDRO-guideline 12007 [1] is also used abroad as a standard for the design of avalanche galleries (see e.g., ONR 24806 [4]).

Protection galleries are stressed by the moving avalanche in the form of dynamic normal loads, friction and deviation forces. In addition, static effects due to the naturally deposited snowpack and deposited avalanche snow, as well as pressure due to snow pack, occur.

In the present report, the existing design concept for avalanche galleries is further developed based on the hazard patterns according to FEDRO-guideline 12007 [1] in combination with the safety concept SIA 260 [5].

From this, recommendations for the design of new galleries and for the assessment of the load-bearing capacity of existing galleries are derived.

The focus is on the risk and reliability theoretical principles of structural design and their application to the special case of the design of avalanche galleries. This theoretical orientation aims at a practical implementation of the gained knowledge as close to reality as possible, in order to achieve a risk-optimized design within the semi-probabilistic safety concept of the SIA standards with simple tools, considering the site-specific characteristics of the avalanche actions.

For existing avalanche galleries, a method for risk-based determination of target reliability and design values according to Annex B/C of the currently valid SIA 269 [10] is presented.

It is investigated and presented how site-specific records of past avalanches can be used to reduce the uncertainties in the determination of actions as much as possible.

### Contents

After an introduction, Chapter 2 first presents the general principles of standards calibration. The objective of standards calibration is to determine the partial safety factors in the semi-probabilistic standards concept as optimally as possible and to achieve the required safety (expressed as the target failure probability) by means of the standards.

Chapter 3 determines the safety level that is achieved when applying the currently valid FEDRO guideline 12007 and the SIA standards. The action combinations of the FEDRO-guideline «flow avalanche on snow-free snow roof», «flow avalanche on snow-covered snow roof», «flow avalanche over deposited avalanche snow» and «stationary avalanche snow» are considered. Chapter 3 concludes with a comparison between calculated and observed reliability.

As before, the design of avalanche protection galleries is integrated into the concept of SIA standards (SIA 260 [5]). For the calculation of the structural reliability, all resistances and actions are modelled as random variables. Apart from the avalanche actions, standard approaches from the literature can be used for this purpose. A FORM analysis is first used

to determine the current safety level (the annual failure probability) when the design values for the avalanche actions are determined according to FEDRO-guideline 12007. Subsequently, adjustments to the safety concept to account for the specifics of avalanche actions are examined.

In order to consider the uncertainties (chapter 4) in the determination of avalanche actions, the safety factor for the action side can be determined as a function of the dispersion of the action. Two types of uncertainties are considered here: Uncertainties from the natural variation of avalanche actions and model uncertainties in the determination of actions. As is common practice, the estimation of uncertainties is based on expert estimates for the actions in different scenarios with different return periods. Because the variation in avalanche actions is highly site-specific, representative sites are examined.

Chapter 5 examines what avalanche and snow depth data can be used to update models for a specific review of a gallery or for the design of a new gallery. Bayesian methods are used for this purpose.

The report concludes with conclusions and recommendations in Chapter 6. These are summarized below.

## **Conclusions and recommendations**

The following is a summary of the recommendations that resulted from the project findings.

### *Safety level*

Compared to other supporting structures, the contribution and the uncertainty of the stationary action are high for avalanche galleries. Less important for the reliability of gallery structures are the uncertainties on the resistance side, possibly with the exception of galleries with ground anchors, which in practice are treated with a correspondingly conservative approach.

Compared to the general safety level of the SIA standards, the nominal safety level of avalanche galleries is therefore rather low, but still well within the usual failure probabilities for other structures. A comparison with the observed safety level of existing gallery structures in Switzerland suggests that the results of the reliability analyses tend to overestimate the actual failure probability of real gallery structures. However, from the analysis of the existing safety level, there is no obvious need for blanket corrections to the design concept of FEDRO Guideline 12007. If an owner or client renounces consideration of the 300-year event, which may be tempting especially if there is a large difference from the 30-year event, this can lead to very high calculated failure probabilities. It follows that the greatest protection deficit in avalanche galleries is not in the design concept, but in the choice and definition of the design event.

### *Adjustments to the existing concept*

The review of the safety level of existing galleries shows that the design for the 300-year avalanche event as an exceptional action should not be left to the builder-owner on an optional basis, but should be taken into account on a mandatory basis in any case, as long as the existing design concept of the FEDRO-guideline 12007 [1] is adhered to.

The avalanche expertise on which the design values are based are naturally very scattered. This uncertainty has an impact on the reliability and an increase of the design values for avalanche action with a coefficient to account for the estimation uncertainty should be considered, provided that the additional costs can be justified by the risk reduction. A procedure for assessing in which cases an estimation factor should be applied has been developed.

From today's point of view, the introduction of a risk-based design concept for the optimal choice of the load coefficient, may be of interest especially for gallery locations with high traffic volumes and correspondingly large consequences of a structural failure. Risk-based

design concepts can show great advantages for the client by taking site-specific characteristics into account.

It has been shown that many hidden safeties are present in avalanche galleries. To reduce these, it is recommended that avalanches be systematically recorded, clear specifications for the introduction of forces through the snowpack and soil, and a risk-based determination of design values. In this way, a much more differentiated design depending on the consequence class can be achieved, leading to a more efficient and optimal design. This also makes sense with regard to limited budgets and the sustainable use of CO<sub>2</sub>-intensive building materials. A risk-based design concept in the FEDRO-guideline 12007 is therefore recommended.

It would also be desirable to review the calculation formulas of the existing FEDRO-guideline 12007 or their application with the currently used 2d simulation models.

#### *Dealing with existing galleries*

SIA 269 [10], Annex B, already allows the target reliability of a structure to be determined on a risk basis for existing structures. One problem with applying this approach to existing avalanche galleries is that the computational, implicit safety level of the design is already relatively low, even for new gallery construction, and thus the potential is likely to be low. In view of the sometimes very high costs of strengthening measures, it might well be optimal, especially at locations with low traffic volumes, to also accept a lower safety level for existing gallery structures. One possible approach would be to allow the owner or client or gallery owner to accept higher calculated failure probabilities for existing galleries if this can be justified based on a site-specific risk analysis.

Updating avalanche actions on a purely statistical basis requires long data series and thus cannot be considered realistic. At most, an update using the methods of Bayesian updating is conceivable, in that an assessment of the expected actions by an avalanche expert is updated as a «prior» with additional data from observations in the field.

#### *Recommendations for research*

It is recommended that FEDRO-guideline 12007 [1] be revised based on the recommendations in this report and that a manual be developed with explanations and background. This should include the needs of engineers for implementation in practice. For the load case avalanche action on the gallery roof, methods for the computational determination of the actions should be developed. In addition, basic principles for load combinations (vehicle impact on columns and avalanche action) should be developed.

Furthermore, there is a need for research on the monitoring of avalanche actions on existing galleries. The present project has shed light on the potential of data collection. It is recommended to initiate a pilot project for systematic data collection at existing galleries as well as a project for systematic recording of snow deposition heights after major avalanche events.



# 1 Einleitung

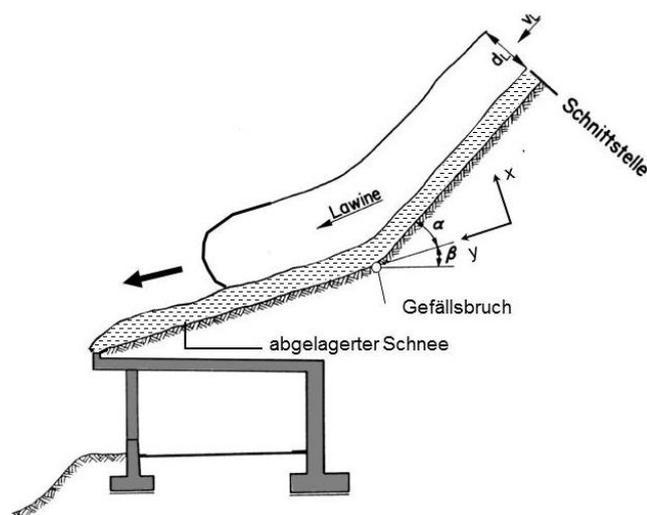
## 1.1 Ausgangslage

Lawingalerien zählen zu den bedeutendsten baulichen Massnahmen, um Verkehrsachsen vor Lawineneinwirkungen zu schützen. Ein Grossteil der Schweizer Schutzgalerien wurde in den 60er bis 80er Jahren gebaut. Die bestehenden Galerien müssen regelmässig unterhalten und ggf. ertüchtigt werden, um die Sicherheit im Verkehrsnetz zu erhalten und die Funktionalität des Verkehrsnetzes zu gewährleisten.

### 1.1.1 Bemessung von Lawingalerien in der Schweiz

Die Bemessung von Lawingalerien in der Schweiz basiert grundsätzlich auf den SIA Normen (v.a. SIA 260 bis 269 [5]-[10]). Das Vorgehen zur Bestimmung der Lawineneinwirkungen ist in der ASTRA-Richtlinie 12007 „Einwirkung infolge Lawinen auf Schutzgalerien“ [1] definiert (Vorgängerversion: ASTRA/SBB 1994 [2]). Für bestehende Galerien gelten die Festlegungen der ASTRA-Richtlinie sinngemäss. Die ASTRA-Richtlinie 12007 [1] gilt auch im Ausland als Standard für die Bemessung von Lawingalerien (siehe z.B. die ON 24806 von 2011 [4]).

Schutzgalerien werden durch die bewegte Lawine in der Form von dynamischen Normallasten, Reibung und Umlenkkraften beansprucht (Abb. 1). Zusätzlich treten statische Einwirkungen infolge der natürlich abgelagerten Schneedecke und abgelagertem Lawinenschnee auf. In der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] werden acht Fälle unterschieden, die die verschiedenen Einwirkungen und mögliche Kombinationen aufzeigen. Die Einwirkungen werden für ein normales Ereignis mit einer Wiederkehrdauer von 30 Jahren und ein aussergewöhnliches Ereignis mit einer Wiederkehrdauer von 300 Jahren festgelegt. Oft variieren beim normalen Ereignis die Einwirkungen rechtwinklig zur Galerie zwischen 10 und 60 kN/m<sup>2</sup> und parallel zur Galerie zwischen 2 und 14 kN/m<sup>2</sup>. Beim aussergewöhnlichen Ereignis können die Einwirkungen rechtwinklig zur Galerie, insbesondere durch abgelagerten Lawinenschnee, 90 kN/m<sup>2</sup> übersteigen (Abb. 2, Abb. 3). Im ASTRA Forschungsprojekt „Experimentelle Untersuchung der Lawinenkräfte auf Galeriedächern“ [36] wurden zwischen 2002 und 2006 mit zahlreichen Experimenten die Normal- und Schubkräfte vor und nach einem Geländeknick untersucht. Die Resultate bildeten eine wichtige Grundlage für die Erarbeitung der ASTRA-Richtlinie 12007 [1].



**Abb. 1** Eine Lawine überfließt ein schneebedecktes Galeriedach. Es entstehen Normallasten, Reibung und Umlenkkraften (Quelle: ASTRA-Richtlinie 12007 [1]).



**Abb. 2** Die Galerie „Rotlouwi“ im Februar 1999. Die Mächtigkeit der Ablagerung auf dem Galeriedach beträgt mehr als 15m (Foto: S. Margreth, SLF).



**Abb. 3** Jungbachlawine St. Niklaus, VS, 2018 (Foto: S. Margreth, SLF).

### 1.1.2 Versagensereignisse von Lawingalerien in der Schweiz

Die Lawingalerien in der Schweiz haben sich bisher im Wesentlichen bewährt – Versagensereignisse sind nur in einigen wenigen Ausnahmefällen bekannt und waren in der Regel nicht auf klassische Lawineneinwirkungen zurückzuführen.

Der einzige bekannte Fall, in dem das Versagen durch ein Lawineneignis verursacht wurde, ist in Abb. 4 dargestellt. Bei einer sehr alten (vermutlich älter als 50 Jahre) Lawingalerie an der Samnaunerstrasse ist im Frühjahr 2009 eine Lawine fast senkrecht auf das Galeriedach gestürzt, was zu einem Versagen der Decke und zu einem Auffüllen der Galerie mit Schnee geführt hat. Das Lawinen-Gefährdungsbild entspricht hier am ehesten dem Fall 8 der ASTRA-Richtlinie 12007 [1]. Selbst in der (im Vergleich zur Galerie) noch relativ jungen Vorgänger-Richtlinie von 1994 [2] ist dieses Gefährdungsbild aber noch nicht explizit aufgeführt.



**Abb. 4** Lawingalerie an der Samnaunerstrasse nach einem Versagen aufgrund einer beinahe vertikal auf das Dach gefallenen Lawine (Bild: S. Margreth, 9.4.2009).

Ein Beispiel für ein Versagen durch Stützenanprall ist in Abb. 5 zu sehen. Eine Lokomotive ist hier im Januar 2007 durch eine Kollision mit einem Schuttkegel aus Erd- und Felsbrocken auf offener Strecke direkt vor der Einfahrt in die Galerie entgleist und zerstörte nach dem seitlichen Abirren der Lokomotive vier Galeriepfeiler, was zu einem Teilversagen der Galeriedecke führte. Zwei Drittel der Lawingalerien sind vor 1970 gebaut worden. Zu dieser Zeit wurden keine Anpralllasten auf die Stützen berücksichtigt [25].



**Abb. 5** Lawingalerie der Rhätischen Bahn in der Rheinschlucht nach einem Versagen aufgrund Stützenanprall (Galerie Valendas). Die Lokomotive war wegen eines Schuttkegels unmittelbar vor der Galerie entgleist und zerstörte vier Pfeiler. (Foto: Kantonspolizei Graubünden, 5.1.2007).

Das häufigste „Versagen“ hinsichtlich der erwarteten Schutzfunktion bei Lawingalerien ist jedoch nicht ein ungenügender Tragwiderstand, sondern eine zu kurze Länge der Galerie. Oft wurde die Länge einer Galerie kostenoptimiert bestimmt. In der extremen Lawinenperiode im Januar 2018 wurden beispielsweise in der Schweiz mindestens 50 Galerien von Lawinen überflossen. In 10 Fällen war die Länge ungenügend und die Schneemassen haben die Galerieportale überflossen [18] (Abb. 6).

Ein weiteres „Versagen“, das ähnlich häufig ist wie das Überfließen der Portale, ist das Hereinfließen von Lawinenschnee bei einer offenen Galeriefront (Abb. 7).



**Abb. 6** Lawingalerie Saastal, Überfließen der Galerie, 10 Januar 2018 (Foto: P. Stöbner).



**Abb. 7** Lawingalerie Galerie Raschitsch, Hereinfließen von Lawinenschnee von der Talseite, 5 April 2019 (Foto: P. Caviezel).

### 1.1.3 Forschungsbedarf

Im Zusammenspiel der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] mit dem Bemessungskonzept der SIA-Normen gibt es einige Lücken. Zur besseren Übersicht werden diese im Folgenden nach Bemessung von Neubauten und Überprüfung bestehender Galerien gegliedert und dargestellt. Des Weiteren wird diskutiert, welche Ursache die Unsicherheiten bei der Bestimmung von Lawineneinwirkungen haben und wie diese mit Hilfe von Daten zu beobachteten Lawineneinwirkungen reduziert werden können.

#### *Bemessung von Galerie-Neubauten*

Der Bemessungswert der Lawineneinwirkungen wird durch Multiplikation des charakteristischen Wertes gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] mit dem Lastbeiwert  $\gamma_0$  für veränderliche Einwirkungen gemäss SIA 260 [5] bestimmt. Sicherheitsbeiwerte berücksichtigen die Streuung und den Verteilungstyp der jeweiligen Bemessungsvariablen. Da die Unsicherheiten bei der Festlegung von Lawineneinwirkungen sehr gross sind, stellt sich die Frage, ob der Standard-Lastbeiwert gemäss SIA 260 die Varianz von Lawinenlasten angemessen abdeckt. Ein weiterer Aspekt ist die Kombination

unterschiedlicher (z.B. ruhender und dynamischer) Lawineneinwirkungen, die in der Regel nicht unabhängig voneinander sind. Unter anderem bestehen gegenseitige Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Einwirkungs-Komponenten, zum Beispiel wenn eine bestehende Lawinenablagerung zu einer Verkleinerung des Umlenkswinkels und damit zu einer Reduktion der dynamischen Lawineneinwirkungen führt.

#### *Überprüfung bestehender Galerien*

Die Grundlagen zur Festlegung der Lawineneinwirkungen wurden in den letzten Jahrzehnten ständig weiterentwickelt [36],[37],[38]. Bei einer Neubeurteilung der Lawinensituation für eine bestehende Galerie können die Bemessungswerte deshalb z.T. deutlich von den ursprünglichen Annahmen abweichen. Die Verstärkung eines bestehenden Bauwerks ist in der Regel wesentlich teurer als eine Erhöhung des Tragwiderstandes bei einem Neubau. Bei bestehenden Bauten stellt sich deshalb in der Praxis häufig die Frage, ob eine Verstärkung überhaupt verhältnismässig ist. Dies kann mit Hilfe der Norm SIA 269 [10] „Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken“ beurteilt werden. Sie erlaubt für bestehende Bauten eine risikobasierte Festlegung der Tragwerks-Zuverlässigkeit, mit der bauwerksspezifische Bemessungswerte für Einwirkungen und Widerstände festgelegt werden können. Die in den Bemessungswerten enthaltenen Sicherheitsbeiwerte steigen mit der Ziel-Zuverlässigkeit des Bauwerks. So lassen sich die verfügbaren Mittel für die Erhaltung von Lawinenschutzgalerien zielgerichtet dort einsetzen, wo der Sicherheitsgewinn am grössten ist. Als Voraussetzung für das risikobasierte Vorgehen muss allerdings die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lawineneinwirkungen bekannt sein, um die Bemessungswerte in Übereinstimmung mit einer zuverlässigkeitsbasierten Bemessung herzuleiten.

#### *Unsicherheit bei der Bestimmung von Lawineneinwirkungen*

Die Lawineneinwirkungen auf ein Schutzbauwerk sind im Allgemeinen unsicher und lassen sich nicht exakt vorhersagen. Zwar sind die heutigen Methoden der Lawindynamik für die meisten praktischen Probleme ausreichend entwickelt [32], die Ergebnisse hängen allerdings stark von den gewählten Eingabeparametern ab. Die Schwierigkeiten bei der gutachterlichen Festlegung dieser Eingabegrössen unterscheiden sich sehr stark je nach betrachtetem Standort [33]. So braucht zum Beispiel die Festlegung des Anrissgebietes zur Berechnung der Lawinengrösse viel Erfahrung, vor allem bei sehr grossen Einzugsgebieten mit Wechsell zwischen flacheren und steileren Gebieten oder mehreren Geländekammern. Gerade die direkte rechnerische Bestimmung der ruhenden Lawinenablagerungen auf einem Galeriedach ist zudem oft nicht möglich. Die heute verwendeten lawindynamischen Modelle wurden für die Ermittlung von extremen Auslaufstrecken resp. Geschwindigkeiten und nicht für die Berechnung von realistischen Ablagerungshöhen kalibriert. Zudem kann eine maximale Ablagerung auch aus mehreren Lawinenereignissen im selben Winter resultieren.

#### *Berücksichtigung von Daten zu beobachteten Lawineneinwirkungen*

Der gutachterliche Spielraum bei der Festlegung von Lawineneinwirkungen ist generell sehr ortsspezifisch. Die Unsicherheiten lassen sich vor allem bei unklaren Situationen am besten durch Dokumentationen von früheren Lawinenabgängen und –ablagerungen am Galeriestandort reduzieren. Bei Galerieneubauten liegen oft gute Aufzeichnungen vor, da diese für die Bestimmung der Häufigkeit und Intensität von Verschüttungen benötigt werden, die eine wesentliche Grundlage für Begründung von Schutzmassnahmen darstellen. Ein Lawinenkataster für durch Galerien geschützte Strassenabschnitte fehlt dagegen oft, oder die Kataster sind nicht detailliert genug, um Informationen zu den Einwirkungen auf Lawinengalerien abzuleiten. Für viele Galerien ist zudem das Gefährdungsbild der ruhenden Lawinenablagerung einer aussergewöhnlichen Lawine ohne dynamische Kräfte massgebend, welches im Lawinenkataster oft gar nicht quantitativ erfasst ist. Die Erfassung zusätzlicher Informationen, z.B. die Ablagerungsgeometrie und die Verteilung der Ablagerungshöhen, ist verhältnismässig einfach zu erreichen. Sie ist allerdings nur sinnvoll, wenn Methoden zur Nutzung dieser Daten bei der Planung von Erhaltungsmaßnahmen zur Verfügung stehen.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel des Projektes ist die Weiterentwicklung des bestehenden Bemessungskonzeptes für Lawingalerien basierend auf den Gefährdungsbildern gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] in Kombination mit dem Sicherheitskonzept SIA 260 [5], sowie die Ableitung von Empfehlungen für die Bemessung von neuen und für die Beurteilung der Tragsicherheit von bestehenden Galerien.

Der Fokus liegt auf den risiko- und zuverlässigkeitstheoretischen Grundlagen der Tragwerksbemessung und ihrer Anwendung auf den Spezialfall der Bemessung von Lawingalerien. Diese theoretische Ausrichtung hat zum Ziel eine möglichst realitätsnahe praxistaugliche Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse zu ermöglichen, um im Rahmen des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes der SIA-Normen mit einfachen Werkzeugen eine risikooptimierte Bemessung unter Berücksichtigung der ortsspezifischen Charakteristiken der Lawineneinwirkungen zu erreichen. Nur wenn die theoretischen Grundlagen ausreichend bekannt sind, können gute praxisnahe und sichere Methoden daraus abgeleitet und entwickelt werden. Die Ergebnisse der Untersuchung und die praxisnahe Umsetzung sollen dann kein vertieftes Wissen in der probabilistischen Modellierung erfordern.

## 1.3 Vorgehen

In einem ersten Schritt werden die Grundlagen zur Normenkalibrierung zusammengestellt. Sie stellen das Grundgerüst des vorliegenden Berichts dar. Sie sollen sicherstellen, dass die Empfehlungen aus diesem Bericht kompatibel mit den derzeitigen Grundlagen in der Normenerstellung sind (Kapitel 2.1). Auf den Grundlagen aufbauend wird die Ziel-Zuverlässigkeit für Lawingalerien in Abhängigkeit von den möglichen Konsequenzen für neue Lawingalerien festgelegt (Kapitel 2.2). Für die Normenkalibrierung wird die probabilistische Modellierung der Widerstände und der Einwirkungen benötigt. Die probabilistische Modellierung der Widerstände wird in Kapitel 2.3 und in Kapitel 2.4 zusammengestellt.

Durch die Anwendung der in Kapitel 2 beschriebenen Theorie wird in Kapitel 3 das Sicherheitsniveau, welches durch die Anwendung der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] erreicht wird, für ausgewählte Galeriestandorte bestimmt. Hervorzuheben ist, dass die Unsicherheiten, die aus unterschiedlichen Lawinengutachten resultieren, explizit berücksichtigt werden. Die probabilistische Modellierung der Lawineneinwirkung ist die Grundlage für die Analyse. Diese wird in Kapitel 4 für die verschiedenen Fälle detailliert beschrieben. Für die betrachteten Galeriestandorte liegt die rechnerische Versagenswahrscheinlichkeit nach derzeit gültiger Richtlinie etwa zwischen  $P_f = 10^{-4}$  und  $P_f = 10^{-3}$ . Das wesentliche Ergebnis von Kapitel 2-4 kann jedoch nicht in diesen relevanten Zahlen gesehen werden, als vielmehr in der Methode zur probabilistischen Modellierung der komplexen Lawineneinwirkung, die so bisher noch nicht verfügbar war und ein grosses Potential für die Bemessung neuer Galerien und für die Beurteilung bestehender Galerien hat.

In der Praxis werden fortlaufend Daten von Schneehöhen gesammelt. Für die Überprüfung bestehender Bauten erlaubt die SIA 269 [10] explizit, die Lawineneinwirkung standortspezifisch festzulegen und die Bemessungswerte zu aktualisieren. Eine Methode zur Aktualisierung sowie Erkenntnisse zum Potential von Aktualisierung sind in Kapitel 5 dargelegt.

In Kapitel 6 werden die wesentlichen Schlussfolgerungen aus der vorliegenden Untersuchung hinsichtlich der Zuverlässigkeit des bestehenden Bemessungskonzeptes für Lawingalerien zusammengefasst. Hieraus ergeben sich Empfehlungen für mögliche Anpassungen des Konzeptes und für die zukünftige Forschung. Insbesondere werden in Kapitel 6.2 Empfehlungen für Anpassungen zum bestehenden Konzept und in Kapitel 6.3 Empfehlungen für den Umgang mit bestehenden Galerien zusammengestellt. Die Empfehlungen für die zukünftige Forschung in Kapitel 6.4 bilden den Abschluss.

## 2 Grundlagen der Normenkalibrierung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der risiko- und zuverlässigkeitsbasierten Normenkalibrierung erläutert. Zentral für eine risikooptimierte Bemessung ist die Festlegung der Ziel-Zuverlässigkeit, die in Kapitel 2.2 diskutiert wird. Mit den in Kapitel 2.3 und 2.4 zusammengestellten Grundlagen für die in Kapitel 3 vorgestellten Zuverlässigkeitsanalysen wird der Bezug zum semiprobabilistischen Sicherheitskonzept der SIA-Normen hergestellt.

### 2.1 Zuverlässigkeitsbasierte Normenkalibrierung

#### 2.1.1 Zuverlässigkeit von Tragwerken

Ist die Einwirkung (bzw. Auswirkung) in einem Tragwerk grösser als der Widerstand, so versagt das Tragwerk. Die exakten Einwirkungen, die tatsächlich am Tragwerk während seiner Lebensdauer wirken, sind nicht exakt bekannt, die tatsächlichen Widerstände ebenfalls nicht. Sowohl die Einwirkungen als auch die Widerstände sind Zufallsgrößen. Die Zuverlässigkeit eines Tragwerks kann bestimmt werden, in dem die Wahrscheinlichkeit bestimmt wird, mit der die Einwirkung grösser ist als der Widerstand wird.

Der Widerstand und die Einwirkung können statistisch repräsentiert werden, um die vorhandene Zufälligkeit zu berücksichtigen und die Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung des Widerstandes durch die Einwirkung zu berechnen. Die statistische Repräsentation erfolgt über Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen wie z.B. Lognormalverteilungen für Widerstände und Gumbelverteilungen für Einwirkungen.

Der Widerstand und die Einwirkung sind meist Funktionen mit mehreren Eingangsparametern. Jeder dieser Eingangsparameter, die als Basisvariablen bezeichnet werden, kann unsicher sein und wird jeweils mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion, bzw. mit multivariaten Verteilungen, beschrieben.

Ein Teil der Zufälligkeit in den Basisvariablen ergibt sich aus der Zufälligkeit in der Natur. Dieser Teil der Zufälligkeit wird als aleatorische Unsicherheit bezeichnet [13]. Die aleatorische Unsicherheit ist natürlich vorhanden und ergibt sich aus dem Phänomen. Bei Lawineneinwirkungen ist dies beispielsweise eine Lawine, die im Mittel etwa alle 300 Jahre auftritt.

Für die Beschreibung der Einwirkung und des Widerstands werden physikalische Modelle verwendet. Diese physikalischen Modelle beruhen auf Vereinfachungen und sind daher auch unsicher. Gleiches gilt für die zuvor erwähnten Basisvariablen. Sie werden z.B. aus Daten geschätzt. Sind mehr Daten vorhanden, so ist die Schätzung besser und die Unsicherheit kann reduziert werden. Gleiches gilt auch für die Modelle. Sind bessere Modelle verfügbar, so kann auch hier die Unsicherheit reduziert werden. Dieser Teil der Unsicherheit wird als epistemische Unsicherheit bezeichnet und resultiert aus limitiertem bzw. fehlendem Wissen. Die epistemische Unsicherheit kann mit einem gewissen Aufwand reduziert werden, die aleatorische Unsicherheit verbleibt. In der Bestimmung der Last durch einen Experten, die aus der 300-jährigen Lawine resultiert, sind aleatorische aber auch epistemische Unsicherheiten enthalten.

Beide Typen der Unsicherheiten sollten in der Analyse berücksichtigt werden [13]. Nicht immer können die Unsicherheiten klar voneinander getrennt werden.

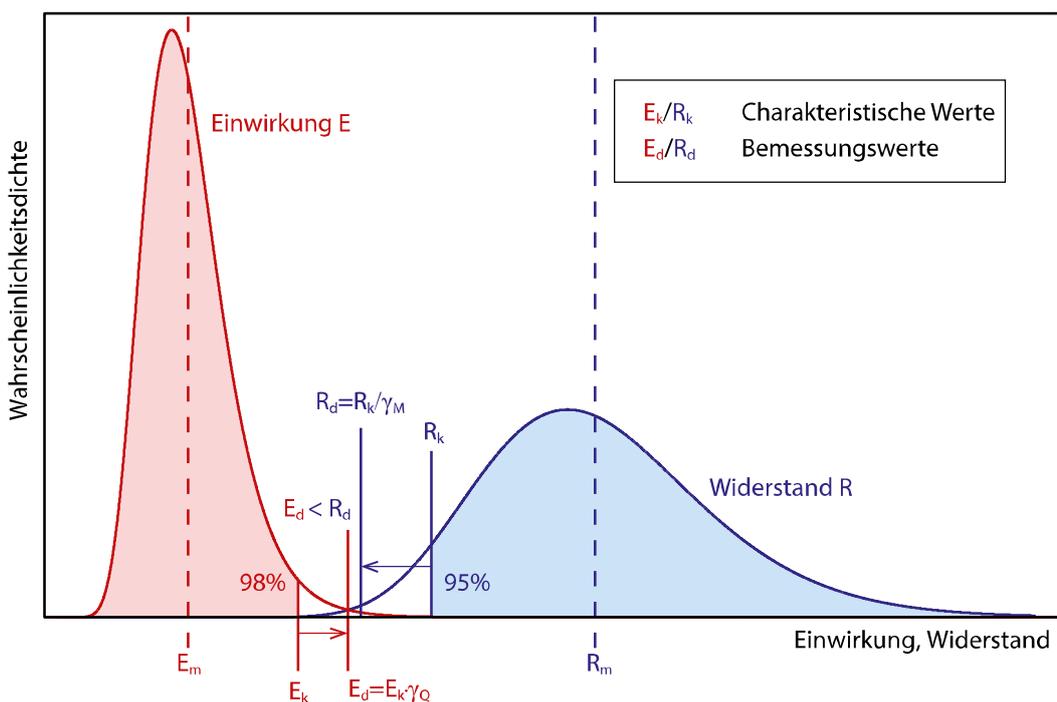
Da der Ingenieur in der Praxis nicht bei jedem Tragwerk die Widerstände und die Einwirkung statistisch modellieren kann, ist in den Normen (z.B. [5]) das semiprobabilistische Sicherheitskonzept eingeführt worden (siehe Abb. 8). Das erlaubt es dem Ingenieur, unter Verwendung von charakteristischen Werten der Einwirkungen und der Widerstände sowie den Sicherheitsteilbeiwerten, den Bemessungswert der Einwirkung und den Bemessungswert des Widerstandes zu berechnen. Ist der Bemessungswert des

Widerstands grösser als der Bemessungswert der Einwirkung, so ist die Anforderung der Norm in Bezug auf die Zuverlässigkeit (ausgedrückt als Zielversagenswahrscheinlichkeit) erfüllt.

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Einwirkung grösser ist, als der Widerstand ist hinreichend klein, wenn auch nie Null.

Die charakteristischen Werte der Einwirkung  $S_k$  (bzw.  $E_k$  in SIA Normen) sind in der Regel obere Fraktile der Wahrscheinlichkeitsverteilung, meist das 98% Fraktile. Dies bedeutet, dass in 2% der Fälle (bzw. der Zeit) die Einwirkung kleiner ist als dieser charakteristische Wert. Der charakteristische Wert der Einwirkung wird mit einem Sicherheitsteilbeiwert  $\gamma_Q$  multipliziert, um den Bemessungswert  $E_d$  zu erhalten. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Bemessungswert der Einwirkung überschritten wird, ist damit sehr klein. In der Bemessung treten immer mehrere Lasten gleichzeitig auf, z.B. das Eigengewicht und die Verkehrslasten. Diese werden in der Bemessung unter Verwendung von Kombinationswerten  $\psi$  berücksichtigt. Dabei wird berücksichtigt, dass die Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Auftretens von extremen Lasten unwahrscheinlich ist.

Der charakteristische Wert des Widerstandes  $R_k$  ist meist ein unterer Fraktile der Wahrscheinlichkeitsverteilung, in der Regel der 5% Fraktile. Das bedeutet, dass in 95% der Fälle der Widerstand grösser ist als der charakteristische Wert. Der charakteristische Wert des Widerstandes wird durch einen Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  geteilt und damit weiter reduziert, um den Bemessungswert  $R_d$  zu erhalten. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Widerstand tatsächlich unter dem Bemessungswert liegt ist damit ebenfalls sehr klein.



**Abb. 8** Darstellung des generellen semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes der Normen.

Die Wahrscheinlichkeit der Kombination eines sehr kleinen Widerstandes  $R_d$  mit einer sehr grossen Einwirkung  $E_d$  entspricht bei ordnungsgemässer Bemessung der Zielversagenswahrscheinlichkeit.

Die Versagenswahrscheinlichkeit entspricht damit formal der folgenden Wahrscheinlichkeit:

$$\Pr[R - S \leq 0] \quad (1.1)$$

Der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$ , der auch in den Normen definiert ist (z.B. [10]), ergibt sich direkt aus der Versagenswahrscheinlichkeit:

$$\beta = -\Phi^{-1}(\Pr[R - S \leq 0]) \quad (1.2)$$

Wobei  $\Phi^{-1}$  die Inverse der Standardnormalverteilung ist.

In dieser Formel wird der Term  $R - S$  als Grenzzustandsfunktion  $g(\mathbf{X})$  bezeichnet:

$$\beta = -\Phi^{-1}(\Pr[g(\mathbf{X}) \leq 0]) \quad (1.3)$$

Die Grenzzustandsfunktion trennt den Bereich in dem das Tragwerk versagt, von dem Bereich, in dem das Tragwerk sicher ist. Ist die Grenzzustandsfunktion  $g(\mathbf{X})$  kleiner als Null, so versagt das Tragwerk. Der Widerstand und die Einwirkungen werden, wie zuvor erwähnt, in der Regel mit physikalischen Modellen beschrieben, die einige Eingangsparameter haben. Diese unsicheren Eingangsparameter werden als Basisvariablen bezeichnet. In der Grenzzustandsfunktion wird die Abhängigkeit von diesen Basisvariablen durch den Vektor  $\mathbf{X}$  bezeichnet.

Die Schwierigkeit in der Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit liegt in der Bestimmung der Grenzzustandsfunktion und in der probabilistischen Modellierung der Basisvariablen.

Für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Hierzu zählen die First Order Reliability Method (FORM), Second-Order Reliability Method (SORM) sowie Simulationsverfahren (z.B. Monte-Carlo Simulation), [14] [15], [16].

Das Konzept von FORM basiert auf einer Linearisierung der Grenzzustandsfunktion im Bemessungspunkt. Der Bemessungspunkt ist der wahrscheinlichste Versagenszustand, d.h. die wahrscheinlichste Kombination von Widerstand und Einwirkung bei dem das Tragwerk versagt.

Es gibt unendlich viele Kombination von Wertepaaren von  $R$  und  $S$  die zum Versagen führen und FORM zielt darauf ab, die wahrscheinlichste Kombination von  $R$  und  $S$  zu suchen. Dazu werden zunächst alle Basisvariablen in den Standardnormalraum transferiert, d.h. aus den tatsächlichen Verteilungen von  $R$  und  $S$  wird eine bivariate Standardnormalverteilung gemacht.

Die gesuchte wahrscheinlichste Kombination von  $R$  und  $S$  entspricht dem Bemessungspunkt. Das heisst, dass die Werte von  $R$  und  $S$  im Bemessungspunkt den Bemessungswerten  $R_d$  und  $S_d$  (bzw.  $E_d$ ) der Norm entsprechen. In diesem Punkt wird die Grenzzustandsgleichung bei FORM linearisiert und so die Versagenswahrscheinlichkeit ermittelt.

Diese Suche der wahrscheinlichsten Kombination von  $R$  und  $S$  erfolgt über einen einfachen Algorithmus. FORM beinhaltet einige Vereinfachungen und Annahmen und das Ergebnis ist daher nur eine Approximation der Versagenswahrscheinlichkeit. Jedoch ist bei kleiner Versagenswahrscheinlichkeit und nahezu linearen Grenzzustandsfunktionen die Genauigkeit ausreichend.

Ist die Grenzzustandsfunktion stark nicht-linear, so kann SORM verwendet werden. SORM hat das gleiche Vorgehen wie bei FORM, mit dem Unterschied das eine quadratische Grenzzustandsfunktion im Bemessungspunkt angenommen wird (Second Order). Auch SORM ist ein approximatives Verfahren.

Eine exakte Methode zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit bietet die Monte-Carlo Simulation. Dazu wird ein Set aus Zufallszahlen erzeugt, welches den Verteilungen der Basisvariablen  $\mathbf{X}$  in der Grenzzustandsfunktion entspricht. Der Wert der Grenzzustandsfunktion kann mit diesem Set aus Werten bestimmt werden. Ist die Grenzzustandsfunktion kleiner als Null, so entspricht dies einem Versagensereignis. Dieses Vorgehen wird für eine grosse Anzahl Sets von Zufallszahlen wiederholt. Die Anzahl an Versagensereignissen wird durch die Gesamtanzahl der erzeugten Sets von Zufallszahlen geteilt. Dieses Verhältnis entspricht der Versagenswahrscheinlichkeit. Damit die Versagenswahrscheinlichkeit exakt bestimmt wird, muss die Anzahl an erzeugten Sets von Zufallszahlen gegen unendlich gehen, bzw. sehr gross sein. Damit ist die Monte-Carlo Simulation ein sehr rechenintensives Verfahren.

Zuvor wurde die Monte-Carlo Methode als exakte Methode zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit bezeichnet. Exakt ist sie jedoch nur in Bezug auf die gewählte Grenzzustandsgleichung und die getroffenen Annahmen. Vergleicht man die berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten (und auch die in der Norm festgelegten Zielversagenswahrscheinlichkeiten) mit den beobachteten Versagenswahrscheinlichkeiten von Tragwerken, so ergibt sich ein deutlicher Unterschied. Tragwerke versagen deutlich seltener, als sie es nach der Zielversagenswahrscheinlichkeit der Normen eigentlich sollten. Es gibt verschiedene Gründe hierfür. Zum einen ist die mathematische Repräsentation des Tragverhaltens ein Modell, welches konservativ ist. Zum anderen werden nach Norm immer Komponenten bemessen, das Tragwerk ist aber ein System in dem Lasten umgelagert werden können und somit Reserven im Tragverhalten bestehen. Es gibt zudem viele weitere konstruktive und funktionale Aspekte (z.B. auch Bauzustände), die es z.B. erfordern grössere Tragquerschnitte zu wählen. Dies sind nur einige Aspekte die dazu führen, dass die beobachtete Zuverlässigkeit grösser ist als die Zuverlässigkeit nach Norm. Es gibt so genannte versteckte Sicherheiten («hidden safeties»).

Um diesen Unterschied hervorzuheben, wird die Tragwerkszuverlässigkeit nach Norm auch als nominelle Zuverlässigkeit bezeichnet.

Die zurzeit gültigen Tragwerksnormen basieren auf einer semiprobabilistischen Bemessung. Der charakteristische Wert der Einwirkung wird dabei mit einem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_Q$  multipliziert. Dieser wird so gewählt, dass gilt:

$$E_d = E_k \cdot \gamma_Q \quad (1.4)$$

Mit dem Bemessungswert  $E_d$  wird das Tragwerk bemessen.

Wenn Normen erstellt werden, dann werden die Teilsicherheitsbeiwerte so festgelegt, dass die definierte Ziel-Zuverlässigkeit erfüllt ist [17], d.h. ein bestimmtes Sicherheitsniveau erreicht wird. Dieses wird zunächst basierend auf den zu erwartenden Konsequenzen im Falle eines Versagens festgelegt. Zusätzlich wird auch die Effizienz der Massnahmen berücksichtigt, mit der die Versagenswahrscheinlichkeit erhöht werden kann (siehe z.B. [10]).

Um die Normen auf dieses Sicherheitsniveau zu kalibrieren, wird ein repräsentatives Set aus Referenzstrukturen gewählt und Teilsicherheitsbeiwerte, Kombinationsfaktoren der Lasten und Grenzzustandsfunktionen festgelegt. Eine Bemessung des Tragwerks mit diesen Werten wird durchgeführt und die Zuverlässigkeit für diese Bemessung bestimmt (z.B. unter Verwendung von FORM). Dann wird über die Summe der kleinsten Fehlerquadrate versucht, den Abstand zwischen der Ziel-Zuverlässigkeit und der berechneten Zuverlässigkeit zu minimieren, indem die Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsfaktoren verändert werden. Dabei können die Beiträge der Referenzstrukturen in der Summe der kleinsten Fehlerquadrate gemäss ihrer Relevanz gewichtet werden. Dieses Vorgehen entspricht einer einfachen Optimierung, um die Teilsicherheitsbeiwerte für eine Norm zu bestimmen [21].

Ein anderes Vorgehen ist die Verwendung von standardisierten FORM-Koeffizienten. Dieser Ansatz wird auch in der SIA 269 [10] verwendet. Dabei wird angenommen, dass der Beitrag zur Versagenswahrscheinlichkeit der Einwirkung und des Widerstands bekannt ist. Dieser wird durch die  $\alpha$  Werte ausgedrückt. Damit vereinfacht sich das Problem und für Verteilungen wie die Normalverteilung, Gumbelverteilung und die Lognormalverteilungen stehen analytische Formeln zur Verfügung, mit denen die Teilsicherheitsbeiwerte für eine bestimmte Ziel-Zuverlässigkeit ermittelt werden können. Dieser Ansatz erfordert deutlich weniger Rechenaufwand.

Die Teilsicherheitsbeiwerte, die charakteristischen Werte und Lastkombinationsfaktoren gehen in die Bemessungsgleichung ein, die in der Norm definiert ist. Mit dieser Gleichung wird das Tragwerk bemessen. Sie spiegelt denselben Grenzzustand wider, der auch in der Grenzzustandsfunktion gegeben ist.

In der Grenzzustandsfunktion werden jedoch die Basisvariablen durch Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen repräsentiert und nicht durch Bemessungswerte.

## 2.2 Festlegung der Ziel-Zuverlässigkeit

Zur Festlegung einer angemessenen Ziel-Zuverlässigkeit lassen sich grundsätzlich zwei Verfahren unterscheiden (vgl. Faber und Sørensen [18]):

- Berechnung aus bewährten Bemessungsvorschriften
- Bestimmung eines optimalen Sicherheitsniveaus

Das erste Verfahren basiert auf der Annahme, dass das Sicherheitsniveau der bestehenden Vorschriften zumindest näherungsweise optimal ist und von der Gesellschaft akzeptiert wird. Bei einer Überarbeitung der Vorschriften orientiert man sich daher stets zumindest grob (auch) an den bisherigen Festlegungen. Das bestehende „implizite“ Sicherheitsniveau kann aus den Festlegungen zu den Sicherheitsbeiwerten bzw. Bemessungswerten berechnet werden. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass der Einfluss von Annahmen im Rahmen der Zuverlässigkeitsberechnungen reduziert wird; die Zielzuverlässigkeit ist lediglich ein „Rechenwert“, der einen direkten Vergleich unterschiedlicher Berechnungsvorschriften ermöglicht.

Das zweite Verfahren basiert auf einer wirtschaftlichen Optimierung des Sicherheitsniveaus. Das Ziel ist hierbei, die Summe der Kosten für die Tragwerkssicherheit aufgrund von Versagensereignissen zu minimieren. Auf diesem Wege können Kosten und Nutzen von Investitionen in die Tragwerkssicherheit explizit berücksichtigt werden, wodurch eine mögliche Differenzierung der Zielzuverlässigkeit, z.B. in Abhängigkeit der Konsequenzen eines Tragwerksversagens, transparent begründet werden kann.

Im Sinne einer risikoinformierten Entscheidungsfindung empfiehlt sich eine Kombination der beiden oben genannten Verfahren. Im Folgenden werden die Grundlagen der beiden Ansätze deshalb noch einmal detaillierter beschrieben.

### 2.2.1 Ziel-Zuverlässigkeiten in Bemessungsvorschriften

Das Sicherheitsniveau der bestehenden Bemessungsvorschriften für Lawinengalerien ist nicht bekannt. Mit Hilfe von probabilistischen Modellen für die relevanten Grenzzustände der Tragfähigkeit kann dieses jedoch rechnerisch ermittelt werden. Diese Nachrechnung des derzeitigen Sicherheitsniveaus wird in Kapitel 3 beschrieben. Um die Ergebnisse besser einordnen zu können, ist es sinnvoll, zunächst das allgemeine Sicherheitsniveau der SIA-Normen zu betrachten.

Die Tragwerksnormen des SIA kennen keine explizite Ziel-Zuverlässigkeit für Neubauten. Allerdings ist das Bemessungskonzept stark an die Eurocodes angelehnt, weshalb in der Schweiz von einem ähnlichen Sicherheitsniveau ausgegangen werden kann. Diese

Vermutung wird durch die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsberechnungen von Faber und Kübler [19] bestätigt.

Gemäss Eurocode 0 kann die Ziel-Zuverlässigkeit in Abhängigkeit der Konsequenzen im Falle eines Tragwerksversagens festgelegt werden (EN 1990 [11], Annex B), siehe Tab. 1. Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungs- und Widerstandsseite wurden für Tragwerke mit mittleren Konsequenzen im Versagensfall festgelegt. Die Eurocode-Ziel-Zuverlässigkeit ist somit  $\beta_f = 4.7$  bezogen auf eine Referenzperiode von einem Jahr. Dieser Wert entspricht einer jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit von ca.  $P_f \approx 10^{-6} / a$ .

**Tab. 1** Differenzierung der Eurocode-Zielzuverlässigkeit nach Schadensfolgeklasse gemäss EN 1990 [11], Anhang B.

Schadensfolge- bzw. Zuverlässigkeitsklasse	Beispiele	Mindestwert für $\beta$	
		1 Jahr	50 Jahre
CC 3 RC 3	Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr grosse wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	5.2	4.3
CC 2 RC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	4.7	3.8
CC 1 RC 1	Niedrige Folgen für Menschenleben und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	4.2	3.3

In der Praxis ist es nicht möglich, mit einer Handvoll fixer Teilsicherheitsbeiwerte allen denkbaren Bemessungssituationen gerecht zu werden. Das tatsächliche Sicherheitsniveau der Eurocode-Nachweise variiert über die verschiedenen Bemessungssituationen, weshalb die Ziel-Zuverlässigkeit nur als grober Richtwert zu verstehen ist. Dasselbe gilt für das Sicherheitsniveau der SIA-Normen [19]. Ein implizites Sicherheitsniveau von  $\beta = 3.1$  ( $P_f \approx 10^{-3} / a$ ) liegt hierbei ebenso im Rahmen wie ein Wert von  $\beta > 4.7$  ( $P_f < 10^{-6} / a$ ).

Für bestehende Bauten kann im Einzelfall ein anderes Sicherheitsniveau relevant sein als im Neubaubereich. Für die Schweiz wird dies in der SIA 269 für bestehende Bauten geregelt [10]. Anhang B dieser Norm enthält Anforderungen an die Tragsicherheit in Form von Ziel-Zuverlässigkeiten (siehe Tab. 2), sowie einem Grenzwert für das akzeptierbare Individualrisiko von  $10^{-5}$  pro Jahr.

**Tab. 2** Zielwert des Zuverlässigkeitsindex mit Referenzperiode 1 Jahr (SIA 269 [10])

Massnahmen-Effizienz $EF_M$	Konsequenzen eines Tragwerksversagens		
	gering: $\rho < 2$	moderat: $2 < \rho < 5$	gross: $5 < \rho < 10$
klein: $EF_M < 0.5$	$\beta = 3.1$ ( $P_f \approx 10^{-3}$ )	$\beta = 3.3$ ( $P_f \approx 5 \cdot 10^{-4}$ )	$\beta = 3.7$ ( $P_f \approx 10^{-4}$ )
mittel: $0.5 < EF_M < 2.0$	$\beta = 3.7$ ( $P_f \approx 10^{-4}$ )	$\beta = 4.2$ ( $P_f \approx 10^{-5}$ )	$\beta = 4.4$ ( $P_f \approx 5 \cdot 10^{-6}$ )
gross: $EF_M > 2.0$	$\beta = 4.2$ ( $P_f \approx 10^{-5}$ )	$\beta = 4.4$ ( $P_f \approx 5 \cdot 10^{-6}$ )	$\beta = 4.7$ ( $P_f \approx 10^{-6}$ )

Die Konsequenzen eines Tragwerksversagens werden mit Hilfe des Koeffizienten  $\rho = C_F / C_W$  abgeschätzt. Dieser bezeichnet das Verhältnis zwischen allen direkten Kosten bei Versagen,  $C_F$ , und den Kosten zur Wiederherstellung des Tragwerks nach einem Versagen,  $C_W$ .

Die Massnahmeneffizienz wird mit dem Koeffizienten  $EF_M = \Delta R_M / SC_M$  gemäss Ziffer 5.4 der SIA 269 beurteilt.  $\Delta R_M$  bezeichnet hierin die Risikoreduktion infolge von Erhaltungsmaßnahmen und  $SC_M$  die Sicherheitskosten, die der eigentlichen Sicherung des Tragwerks angelastet werden. Beide Werte berechnen sich als diskontierter, jährlicher

monetärer Wert über die Restnutzungsdauer, wobei für die Diskontierung ein Zinssatz von 2% angesetzt werden kann.

Zur Ermittlung der Kosten bei Versagen des Tragwerks  $C_F$  und der Risikoreduktion  $\Delta R_M$  können für ein gerettetes Menschenleben 3 bis 10 Mio. CHF angenommen werden, was der üblichen Spanne bei Anwendung des Grenzkostenprinzips entspricht (vgl. Custer et al. [28]). Das ASTRA verwendet derzeit für die Entscheidungsfindung einen Grenzwert der Grenzkosten, die vom Bundesamt für Raumentwicklung ARE veröffentlicht werden. Dieser als «Value of a Statistical Life, VOSL» bezeichnete Wert liegt derzeit bei 7 Mio. CHF (2021). Dabei ist zu beachten, dass die Bezeichnung «VOSL» nicht fehlinterpretiert werden sollte. Der Wert beziffert nicht den Wert eines Lebens, sondern gibt an, wieviel sich die Gesellschaft leisten sollte, einen Todesfall zu verhindern. Dieser Wert ist länderspezifisch und hängt neben vielen anderen Faktoren auch von der technologischen Entwicklung eines Landes ab. Dieser Wert ist veränderlich über die Zeit und kürzlich gestiegen. Im Bericht wird für die Berechnung noch ein älterer Wert von 5 Mio. CHF verwendet worden.

Die Festlegungen der SIA 269 zur Ziel-Zuverlässigkeit sind stark an die Vorgaben des JCSS Probabilistic Model Code [12] angelehnt. Die JCSS-Werte basieren auf einer wirtschaftlichen Optimierung unter Berücksichtigung der zuvor erwähnten Grenzkosten und werden deshalb im folgenden Absatz diskutiert.

## 2.2.2 Bestimmung optimaler Ziel-Zuverlässigkeiten

Für die Bestimmung des optimalen Sicherheitsniveaus sind nicht nur die Konsequenzen eines Tragwerksversagens von Interesse, sondern auch die Entwicklung der Baukosten in Abhängigkeit der Tragwerkszuverlässigkeit. Das Ziel der Optimierung ist, die Summe beider Kostenbestandteile zu minimieren. Das Personenrisiko kann entweder direkt im Rahmen der Optimierung berücksichtigt oder mit Hilfe eines Akzeptanzkriteriums beurteilt werden, vgl. Fischer und Faber [14].

Eine Optimierung der Tragwerkszuverlässigkeit im Einzelfall ist aufwändig und ist nur in Ausnahmefällen und für spezielle Fragestellungen sinnvoll. Eine gute Alternative für generelle Ableitungen, wie sie in diesem Projekt verfolgt werden, bietet hier der JCSS Probabilistic Model Code [12], in dem die Ziel-Zuverlässigkeit in Abhängigkeit der Konsequenzen im Versagensfall sowie der Sicherheitskosten gewählt wird; siehe Tab. 3. Die JCSS-Tabelle basiert auf einem generischen Ansatz zur Optimierung der Tragwerkszuverlässigkeit nach Rackwitz [21], siehe auch Fischer et. al [22], [23].

**Tab. 3** Zielwert des Zuverlässigkeitsindex mit Referenzperiode 1 Jahr (JCSS [12])

Relative cost of safety measure	Consequences of failure		
	minor: $\rho < 2$	moderate: $2 < \rho < 5$	large: $5 < \rho < 10$
large	$\beta = 3.1 (P_f \approx 10^{-3})$	$\beta = 3.3 (P_f \approx 5 \cdot 10^{-4})$	$\beta = 3.7 (P_f \approx 10^{-4})$
normal	$\beta = 3.7 (P_f \approx 10^{-4})$	$\beta = 4.2 (P_f \approx 10^{-5})$	$\beta = 4.4 (P_f \approx 5 \cdot 10^{-6})$
small	$\beta = 4.2 (P_f \approx 10^{-5})$	$\beta = 4.4 (P_f \approx 5 \cdot 10^{-6})$	$\beta = 4.7 (P_f \approx 10^{-6})$

Die Definition der Konsequenzklassen erfolgt analog zu den Festlegungen der SIA 269 [10] (siehe auch Tab. 2), d.h. in Abhängigkeit des Koeffizienten  $\rho = C_F / C_W$  (Verhältnis aller direkten Versagenskosten zu den Wiederherstellungskosten des Tragwerks). Die Kategorien der Sicherheitskosten berücksichtigen die Kosten zur Erhöhung der Tragwerkssicherheit, die durchschnittliche Lebensdauer des Tragwerks, den Zinssatz sowie die Unsicherheit der Bemessungsvariablen.

Um die JCSS-Zielzuverlässigkeiten gemäss Tab. 3 anwenden zu können, werden im Folgenden die Konsequenzen eines Tragwerksversagens sowie die Sicherheitskosten für Lawinengalerien beurteilt.

### Wahl der Konsequenzklasse

Im Falle eines Tragwerksversagens an einer Lawingalerie müssen die folgenden direkten Konsequenzen berücksichtigt werden:

- Wiederherstellungskosten der Galerie  $C_w$ , Aufräumkosten
- Todesfälle von Verkehrsteilnehmern, Erwartungswert  $E_T$

Indirekte Konsequenzen, zum Beispiel Kosten durch die Sperrung der Strasse im Ereignisfall, werden im vorliegenden Bericht nicht berücksichtigt. Einige ASTRA-Dokumente berücksichtigen diese zusätzlich zu den direkten Konsequenzen, z.B. RoadRisk [24]; andere verzichten hierauf, z.B. die ASTRA-Richtlinie 19004 [3]. In Anhang B der SIA 269 [10] werden ebenfalls nur die direkten Kosten eines Tragwerksversagens berücksichtigt. Eine Diskussion der Thematik ist in Schubert und Faber [25] zu finden.

Die Wiederherstellungskosten einer Galerie  $C_w$  sind in der Regel mit den Baukosten einer neuen Galerie gleichzusetzen. Für die Aufräumkosten kann vereinfacht ein prozentualer Aufschlag auf die Wiederherstellungskosten, z.B. 10%, angenommen werden.

Das Personenrisiko  $E_T$  (erwartete Anzahl Todesfälle in einem Versagensereignis) kann mit Hilfe des Grenzkostenprinzips monetarisiert werden. Hierbei wird ein Grenzwert für die Kosten zur Rettung eines Menschenlebens festgelegt, bis zu dem eine Risikoinvestition als sinnvoll erachtet wird. In der SIA 269 [10] werden Grenzkostenwerte zwischen 3 und 10 Mio. Schweizer Franken pro gerettetem Menschenleben zugelassen; dies entspricht der üblichen Bandbreite für Grenzkostenwerte in der Schweiz. Im Folgenden wird ein Grenzkosten-Ansatz von  $GK = 5\text{Mio.CHF}$  verwendet. Dies entspricht den Annahmen anderer ASTRA-Dokumente, z.B. [26], [27]. Ein guter Überblick über die verwendeten Grenzkosten-Ansätze ist in Custer et al. [28] gegeben.

Die erwartete Anzahl Todesfälle bei einem Galerieversagen berechnet sich wie folgt:

$$E_T = \frac{DTV \cdot b}{v \cdot 1000 \frac{m}{km} \cdot 24 \frac{h}{d}} \quad (1.5)$$

Hierin bezeichnet  $DTV$  den durchschnittlichen täglichen Verkehr in der Galerie,  $b$  den durchschnittlichen Besetzungsgrad der Fahrzeuge (i.d.R.  $b = 2\text{Pers./Fzg.}$ ) und  $v$  die (signalisierte oder durchschnittliche) Geschwindigkeit. Gleichung (1.5) berücksichtigt nur Todesfälle von Verkehrsteilnehmern, die sich zum Zeitpunkt des Tragwerksversagens direkt unter der Galerie befinden. Nicht berücksichtigt sind Stausituationen, die die Präsenzwahrscheinlichkeit im Ereignisfall erhöhen. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben Unfälle durch Auffahren auf eine einstürzende Galerie.

Mit den genannten Annahmen berechnet sich der Koeffizient  $\rho$  zur Ermittlung der Konsequenzklasse wie folgt:

$$\rho = \frac{C_T}{C_w} = \frac{C_w \cdot 1.1 + E_T \cdot GK}{C_w} = 1.1 + \frac{GK}{C_w} \cdot \frac{DTV \cdot b}{v \cdot 1000 \frac{m}{km} \cdot 24 \frac{h}{d}} \quad (1.6)$$

Die Kosten für den Bau einer zweispurigen Lawingalerie liegen etwa in der Grössenordnung von  $C_w = 30'000 \text{ CHF} / m$ . Mit diesem Wert lassen sich die JCSS-Konsequenzklassen beispielhaft in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit und des DTV definieren, siehe Tab. 4.

**Tab. 4** Durchschnittlicher täglicher Verkehr DTV für verschiedene Konsequenzklassen nach JCSS [12] und SIA 269 [10] in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit  $v$  (Annahmen: Baukosten  $C_w = 30'000\text{CHF}/m$ , Grenzkosten  $GK = 5\text{Mio.CHF}$ , Besetzungsgrad  $b = 2\text{Pers./Fzg.}$ ), Ergebnisse gerundet auf 100 Fzg./Tag.

Fahrzeug-Geschwindigkeit	Konsequenzen eines Tragwerksversagens		
	gering: $\rho < 2$	moderat: $2 < \rho < 5$	gross: $5 < \rho < 10$
$v = 60\text{ km/h}$	$DTV < 3'900$	$3'900 < DTV < 16'800$	$16'800 < DTV < 38'400$
$v = 80\text{ km/h}$	$DTV < 5'200$	$5'200 < DTV < 22'500$	$22'500 < DTV < 51'300$
$v = 100\text{ km/h}$	$DTV < 6'500$	$6'500 < DTV < 28'100$	$28'100 < DTV < 64'100$
$v = 120\text{ km/h}$	$DTV < 7'800$	$7'800 < DTV < 33'700$	$33'700 < DTV < 76'900$

Die Konsequenzen im Versagensfall werden somit primär durch den durchschnittlichen täglichen Verkehr und die Fahrgeschwindigkeit in der Lawinengalerie bestimmt.

Ein etwas anderer Ansatz wurde in [29] verfolgt. Die Definition der Konsequenzklassen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des DTV erfolgte in diesem Forschungsprojekt zur Sicherheit von Steinschlag-Schutzgalerien zwar grundsätzlich nach denselben Prinzipien, allerdings wurden zusätzlich zu den „direkten Treffern“ (Einsturz der Galerie über einem Fahrzeug) auch so genannte „indirekte Treffer“ berücksichtigt (Unfälle durch Einsturz der Galerie im Bremsweg des Fahrzeugs). Die erwarteten Konsequenzen eines Galerieversagens werden hierdurch naturgemäss grösser. Des Weiteren ändert sich der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit, da Todesfälle durch „indirekte Treffer“ bei grossen Geschwindigkeiten wahrscheinlicher sind, während die Präsenzwahrscheinlichkeit und damit die Wahrscheinlichkeit eines „direkten Treffers“ mit der Geschwindigkeit abnimmt. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tab. 5 zusammengefasst, die Details der Modellierung sind im Bericht [29] beschrieben.

**Tab. 5** Durchschnittlicher täglicher Verkehr DTV für verschiedene Konsequenzklassen nach JCSS [12] und SIA 269 [10] unter Berücksichtigung von Unfällen durch Auffahren auf eine einstürzende Galerie (aus [29]).

Fahrzeug-Geschwindigkeit	Konsequenzen eines Tragwerksversagens		
	gering: $\rho < 2$	moderat: $2 < \rho < 5$	gross: $5 < \rho < 10$
$v = 60\text{ km/h}$	$DTV < 6'000$	$6'000 < DTV < 26'000$	$26'000 < DTV < 60'000$
$v = 80\text{ km/h}$	$DTV < 5'000$	$5'000 < DTV < 22'000$	$22'000 < DTV < 50'000$
$v = 100\text{ km/h}$	$DTV < 3'500$	$3'500 < DTV < 15'000$	$15'000 < DTV < 35'000$
$v = 120\text{ km/h}$	$DTV < 3'000$	$3'000 < DTV < 12'500$	$12'500 < DTV < 28'000$

Todesfälle durch „indirekte Treffer“ dürften bei Steinschlaggalerien eine grössere Rolle spielen als bei Lawinengalerien. Zum einen ist zu vermuten, dass ein Lawinenanriss aufgrund der Grossflächigkeit durch den Fahrzeuglenker eher wahrgenommen wird als die Ablösung eines Stein- oder Blockschlages. Vor allem aber ist die (direkte) Wirkung eines Steinschlagereignisses auf die Galerie stets lokal, während bei Lawinengalerien oft mit grösseren Lawinenbreiten gerechnet werden muss. Die Wahrscheinlichkeit eines „indirekten Treffers“ durch Auffahren eines Fahrzeugs auf die einstürzende Galerie ist unabhängig von der Einsturzlänge und fällt daher – bezogen auf den Laufmeter Galerie – bei den lokalen Steinschlag-Ereignissen deutlich stärker ins Gewicht als bei den eher flächige Lawinenereignissen.

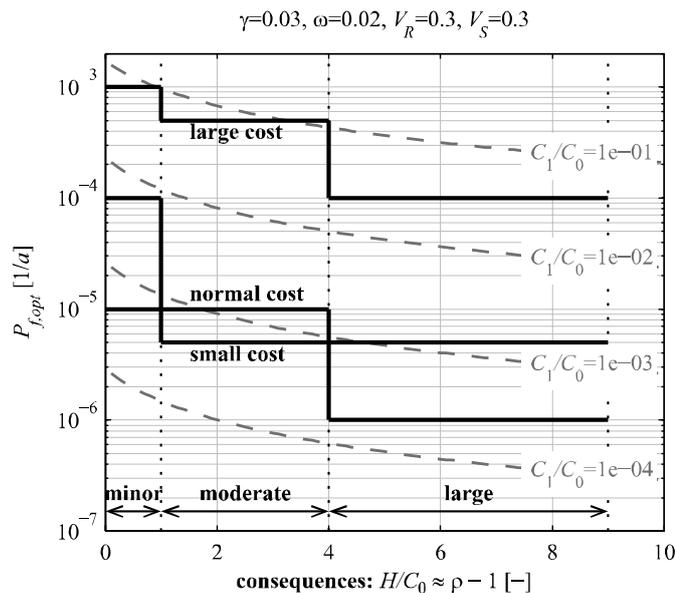
Dennoch ist die Methodik aus [29] grundsätzlich auch auf Lawinengalerien anwendbar. Der grösste Vorteil des hier beschriebenen Vorgehens (Vernachlässigung der indirekten Treffer) dürfte die einfache Nachvollziehbarkeit der Formeln und Ergebnisse sein. Falls eine einheitliche Regelung für Schutzgalerien (Steinschlag und Lawinen) angestrebt wird, wäre es eventuell denkbar, die Konsequenzklassen nur in Abhängigkeit des DTV zu definieren. Hierdurch könnte auch Verwirrung aufgrund des scheinbar widersprüchlichen Einflusses der Fahrgeschwindigkeit vermieden werden.

### Wahl der Kostenklasse

Die Sicherheitskosten beschreiben, wie teuer es ist, die Zuverlässigkeit eines Tragwerks zu erhöhen. Im Folgenden wird diskutiert, wie diese für Neubauten im Zusammenhang mit den Ziel-Zuverlässigkeiten nach JCSS [12] (vgl. Tab. 3) bestimmt werden können. Für bestehende Bauten werden die Sicherheitskosten gemäss Tab. 2 mit der «Massnahmeneffizienz» erfasst; diese kann einfach wie in SIA 269 [10] beschrieben berechnet werden.

Bei Neubauten werden die Sicherheitskosten vor allem dadurch bestimmt, welchen Einfluss die Tragwerksplanung auf die Baukosten hat. Zusätzlich spielen aber auch die Streuung der Bemessungsvariablen, die durchschnittliche Lebensdauer des Tragwerks und der Zinssatz für die Diskontierung zukünftiger Kosten eine Rolle, vgl. JCSS [12].

Eine quantitative Definition der „relativen Sicherheitskosten“ (relative cost of safety measure in Tab. 3) ist im JCSS Probabilistic Model Code [12] nicht gegeben. Allerdings lässt sich diese aus einer Nachrechnung der JCSS-Tabelle mit dem generischen Ansatz von Rackwitz [21] herleiten. Abb. 9 zeigt eine Berechnung der optimalen Versagenswahrscheinlichkeit  $P_{f,opt}$  in Abhängigkeit des Koeffizienten  $\rho$  zur Beschreibung der Konsequenzen im Versagensfall und des Quotienten  $C_1/C_0$ , der die Sicherheitskosten in Relation zu den übrigen Baukosten setzt (die genaue Definition wird weiter unten noch ausführlich diskutiert). Die übrigen Grössen wurden nach Rackwitz [21], Anhang B) festgelegt:  $\gamma = 0.03$  bezeichnet einen (gesellschaftlichen) Diskontierungszinssatz von 3%,  $\omega = 0.02$  die so genannte „obsolescence rate“ (Kehrwert der durchschnittlichen Lebensdauer, 50 Jahre),  $v_R$  und  $v_S$  den Variationskoeffizienten des Widerstandes  $R$  und der (totalen) Last bzw. Einwirkung  $S$ .



**Abb. 9** Nachrechnung der Ziel-Zuverlässigkeiten nach JCSS (Probabilistic Model Code [12]) mit dem generischen Ansatz von Rackwitz [21]; siehe Fischer et al. [23] für Details. Die Tabellenwerte sind als Treppenkurve dargestellt (siehe auch Tab. 3).

Aus Abb. 9 lässt sich folgende Definition der JCSS-Kostenklassen ableiten:

- Small cost:  $C_1/C_0$  zwischen ca.  $10^{-4}$  und  $10^{-3}$
- Normal cost:  $C_1/C_0$  zwischen ca.  $10^{-3}$  und  $10^{-2}$
- Large cost:  $C_1/C_0$  zwischen ca.  $10^{-2}$  und  $10^{-1}$

Diese Einteilung gilt unter den getroffenen Annahmen zu den übrigen Variablen (Zinssatz  $\gamma = 0.03$ , obsolescence rate  $\omega = 0.02$ , Variationskoeffizienten  $v_R = v_S = 0.3$ ). Grosse Abweichungen von diesen Annahmen können den Wechsel in eine andere Kostenklasse

begründen. Dies gilt insbesondere für die Variationskoeffizienten  $v_R$  und  $v_S$ , die einen ähnlichen Einfluss auf die optimale Versagenswahrscheinlichkeit haben wie die relativen Sicherheitskosten  $C_1/C_0$ : Je grösser die Streuung der Bemessungsvariablen, desto aufwendiger wird es, ein hohes Sicherheitsniveau zu erreichen.

Für eine quantitative Abschätzung der relativen Sicherheitskosten für Lawingalerien muss zunächst die genaue Definition des Quotienten  $C_1/C_0$  diskutiert werden. Diese ergibt sich aus der Modellierung der Versagenswahrscheinlichkeit in Rackwitz Optimierungsstudie [21], für die eine einfache Grenzzustandsfunktion unter Berücksichtigung des Widerstandes  $R$  und der Last  $S$  verwendet wurde:

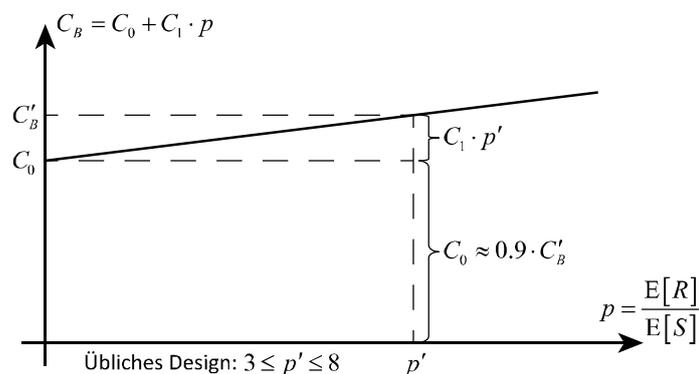
$$P_f(p) = P[R - S \leq 0] \text{ mit } p = E[R]/E[S] \quad (1.7)$$

Die „Bemessungsvariable“  $p$  entspricht hier einem globalen Sicherheitsbeiwert, allerdings bezogen auf den Mittelwert der Verteilungen und nicht auf die oberen bzw. unteren Fraktilwerte, die in Tragwerksnormen üblicherweise den charakteristischen Wert definieren. Für übliche Versagens-Wahrscheinlichkeiten zwischen  $P_f = 10^{-3}$  und  $P_f = 10^{-6}$  pro Jahr liegt der globale Sicherheitsbeiwert in etwa zwischen  $p' = 3$  und  $p' = 8$  (bei Annahme derselben probabilistischen Modelle wie in der Optimierungsstudie von Rackwitz [21]).

Zur Berücksichtigung der Sicherheitskosten nimmt Rackwitz an, dass die Baukosten linear mit dem globalen Sicherheitsbeiwert  $p$  zunehmen:

$$C_B = C_0 + C_1 \cdot p \quad (1.8)$$

Die Definition des Quotienten  $C_1/C_0$  ergibt sich aus dieser Annahme, seine Quantifizierung bleibt aber dennoch schwierig. Dies liegt vor allem daran, dass Gleichung (1.8) nur im Bereich der üblichen Versagenswahrscheinlichkeiten als sinnvolle Approximation gelten kann; insbesondere der „Achsenabschnitt“  $C_0$  ist schwer abzuschätzen, da ein Tragwerk mit  $p = 0$  nicht existieren kann. Dennoch ist klar, dass  $C_0$  vor allem davon abhängen wird, welcher Anteil der Gesamt-Baukosten nicht durch das Tragwerksdesign bzw. die verwendeten Sicherheitsbeiwerte beeinflusst werden kann (z.B. Baustelleneinrichtung, Erdarbeiten, Schalungskosten, sekundäre Bauteile). Nimmt man an, dass dieser Anteil für Lawingalerien oder andere Ingenieurbauten ca.  $C_0/C_B \approx 0.9$  beträgt, so ergibt sich für den Quotienten  $C_1/C_0$  in etwa eine Grössenordnung von  $10^{-2}$  bis  $10^{-1}$ , d.h. eine Erhöhung des globalen Sicherheitsfaktors  $p$  um Eins führt zu einer Erhöhung der totalen Baukosten von wenigen Prozent. Die Annahmen zur Abschätzung von  $C_1/C_0$  sind in Abb. 10 illustriert.



**Abb. 10** Illustration des Vorgehens zur Abschätzung der relativen Sicherheitskosten  $C_1/C_0$  aus dem Anteil der Baukosten (getroffene Annahme: ca. 90%), der von der Tragwerksbemessung nicht beeinflusst wird.

Die so ermittelte Grössenordnung von  $10^{-2}$  bis  $10^{-1}$  für den Quotienten  $C_1/C_0$  deckt sich mit den Annahmen von Rackwitz ([21], Anhang B), der für Strassenbrücken einen

„repräsentativen“ Wert von  $C_1/C_0 = 0.03$  nennt. Für Ingenieurbauten dürfte im Allgemeinen also die Kategorie „Large Cost“ in der JCSS-Tabelle relevant sein (Tab. 3).

Berücksichtigt man die Besonderheiten von Lawingalerien, so ist zu beachten, dass der Variationskoeffizient der Last in der Regel deutlich höher sein wird als  $v_s = 0.3$ . Der Effekt einer grösseren Streuung wurde in [29] näher betrachtet. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für Galeriebauwerke zum Teil sogar grössere Versagenswahrscheinlichkeiten optimal sein können als in der Kategorie „Large Cost“ der JCSS-Tabelle, die auf den Berechnungen von Rackwitz basiert. Der Effekt wird allerdings dadurch abgeschwächt, dass auch die Bestimmung des Quotienten  $C_1/C_0$  mit dem in Abb. 10 illustrierten Ansatz durch die grössere Streuung beeinflusst wird (der Wert  $p'$  für ein „übliches Design“ steigt mit dem Variationskoeffizienten der Last). Auch aufgrund der schwierigen Interpretation der sehr abstrakten Kostenmodellierung empfiehlt es sich daher, zumindest für Neubauten nicht von den JCSS-Vorgaben abzuweichen.

#### Optimale Versagenswahrscheinlichkeit

Aus den aufgeführten Überlegungen ergeben sich die folgenden optimalen Versagenswahrscheinlichkeiten für Lawinenschutzgalerien (Neubauten) in Abhängigkeit der Konsequenzklasse:

**Tab. 6** Optimale Versagenswahrscheinlichkeit für neue Lawinenschutzgalerien in Abhängigkeit der Konsequenzklasse (auf Basis von Tab. 3, Kategorie „Large cost“).

		Konsequenzen eines Tragwerksversagens		
		gering: $\rho < 2$	moderat: $2 < \rho < 5$	gross: $5 < \rho < 10$
Zuverlässigkeitsindex $\beta$	[-]	3.1	3.3	3.7
Versagenswahrscheinlichkeit $P_f$	[1/Jahr]	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$
Wiederkehrperiode	[Jahre]	1'000	2'000	10'000

Die Wahl der Konsequenzklasse basiert auf einer Berechnung des Sach- und Personenrisikos durch ein Versagen der Galerie im Ereignisfall. Das Personenrisiko ist hier als Kollektivrisiko zu verstehen (erwartete Anzahl Todesfälle). In [29] konnte gezeigt werden, dass das Kriterium des Individualrisikos für Schutzgalerien nicht massgebend wird: Selbst bei einer Versagenswahrscheinlichkeit von  $P_f = 0.1$  pro Jahr liegt das jährliche Individualrisiko für einen Postauto-Chauffeur (Annahme 8 Durchfahrten pro Tag) noch unter dem üblichen Grenzwert von  $10^{-5}$  pro Jahr (z.B. ASTRA-Dokumentation 89001 [26], SIA 269 [10]).

In Kapitel 3 wird gezeigt, dass das implizite Sicherheitsniveau der derzeitigen Bemessungsvorschriften tatsächlich in der Grössenordnung zwischen  $P_f = 10^{-4}$  und  $P_f = 10^{-3}$  pro Jahr liegt, die gemäss Tab. 6 als optimal gelten kann.

## 2.3 Grenzzustände und Bemessungsgleichungen

### 2.3.1 Betrachtete Grenzzustände

Im Fokus der Normenkalibrierung (siehe Kapitel 2) steht der Grenzzustand der Tragfähigkeit. Die SIA 260 unterscheidet vier Typen von Grenzzuständen:

- Typ 1: Gesamtstabilität des Tragwerks
- Typ 2: Erreichen des Tragwiderstands des Tragwerks oder eines seiner Teile
- Typ 3: Erreichen des Tragwiderstands des Baugrunds
- Typ 4: Erreichen der Ermüdungsfestigkeit des Tragwerks

Für die Bemessung von Lawingalerien bzw. die Festlegung der Lawineneinwirkungen sind vor allem Typ 1 bis Typ 3 relevant.

### 2.3.2 Definition einer allgemeinen Grenzzustandsfunktion

Für die Untersuchung der Tragwerkszuverlässigkeit wird die folgende Grenzzustandsfunktion  $g(\mathbf{X})$  verwendet:

$$g(\mathbf{X}) = X \cdot R - E = X \cdot R - X_E \cdot (G + Q) \quad (1.9)$$

Hierin bezeichnet  $R$  den Tragwiderstand,  $E$  die Ein- bzw. Auswirkung<sup>1</sup> (Summe aus ständiger Last  $G$  und variabler Last  $Q$ ) und  $X$  die Modellunsicherheit. Die Höhe des Widerstandes (d.h. der Mittelwert der Zufallsvariablen  $R$ ) wird durch den projektierenden Ingenieur während der Bemessung festgelegt, indem z.B. der Querschnitt der Bewehrung so gewählt wird, dass alle Nachweise der Tragsicherheit erfüllt sind.

Durch Verwendung der mit dem Erwartungswert  $\mu_R$  bzw.  $\mu_E$  normalisierten Variablen  $R' = R/\mu_R$  und  $E' = E/\mu_E$  lässt sich die Grenzzustandsfunktion wie folgt umformulieren:

$$g(\mathbf{X}) = \frac{\mu_R}{\mu_E} \cdot X \cdot R' - E' = z \cdot X \cdot R' - E' \quad (1.10)$$

Die Variable  $z = \mu_R/\mu_E$  bezeichnet das Verhältnis zwischen dem Mittelwert des Widerstandes  $\mu_R$  und der Last  $\mu_E$ . Sie ergibt sich aus der Bemessung: Je konservativer die Bemessung, desto grösser wird  $z$ , was zu einer hohen Tragwerkszuverlässigkeit führt.

Um die Grenzzustandsfunktion weiter zu verallgemeinern, können auch die Zufallsvariablen  $G$  und  $Q$  (ständige und variable Last) normalisiert werden:

$$\begin{aligned} g(\mathbf{X}) &= z \cdot X \cdot R' - \left\{ \frac{\mu_G}{\mu_E} \cdot G' + \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_E}\right) \cdot Q' \right\} \\ &= z \cdot X \cdot R' - \left\{ \alpha_G \cdot G' + (1 - \alpha_G) \cdot Q' \right\} \end{aligned} \quad (1.11)$$

Mit Hilfe der Variablen  $\alpha_G = \mu_G/\mu_E$  können auf einfache Weise verschiedene Bemessungssituationen untersucht werden: Hohe Werte für  $\alpha_G$  bezeichnen einen grossen Anteil der ruhenden Last an der Gesamteinwirkung und umgekehrt. Einwirkungskombinationen mit mehreren variablen Lasten werden ähnlich gehandhabt (mit  $\alpha_{Q_i} = \mu_{Q_i}/\mu_Q$ ):

$$g(\mathbf{X}) = z \cdot X \cdot R' - \left\{ \alpha_G \cdot G' + (1 - \alpha_G) \cdot \left( \alpha_{Q_1} \cdot Q'_1 + (1 - \alpha_{Q_1}) \cdot Q'_2 \right) \right\} \quad (1.12)$$

Eine Aufstellung aller in der Grenzzustandsfunktion verwendeter Variablen findet sich in Tab. 7.

<sup>1</sup> Die Norm SIA 260 unterscheidet grundsätzlich Einwirkungen auf ein Tragwerk von deren Auswirkungen (Antworten des Tragwerks auf die Einwirkungen, z.B. Schnittgrössen, Spannungen oder Verformungen). In der vorliegenden Untersuchung wird auf diese Unterscheidung verzichtet, da der Fokus auf der Modellierung der Einwirkungen liegt. Für die mathematische Formulierung der Grenzzustandsfunktionen und zugehörigen Bemessungsgleichungen wird vereinfacht ein linearer Zusammenhang zwischen Ein- und Auswirkungen angenommen.

**Tab. 7** Variablendefinition für die Grenzzustandsfunktion.

$X$	Modellunsicherheit	$Q$	Veränderliche Einwirkung, $Q = Q_1 + Q_2$
$R$	Tragwiderstand	$Q_1$	Leiteinwirkung
$E$	(Totale) Einwirkung, $E = G + Q$	$Q_2$	Begleiteinwirkung
$z$	Bemessungsvariable, $z = \mu_R / \mu_E$	$\alpha_G$	Anteil ständige Einwirkung, $\alpha_G = \mu_G / \mu_E$
$G$	Ständige Einwirkung	$\alpha_{Q_1}$	Anteil Leiteinwirkung, $\alpha_{Q_1} = \mu_{Q_1} / \mu_Q$

**Anmerkung:** Grossbuchstaben bezeichnen Zufallsvariablen, Kleinbuchstaben deterministische Grössen. Normalisierte Zufallsvariablen werden in Gleichung (1.10) bis (1.12) mit einem Strich bezeichnet, z.B.

$$R' = R / \mu_R.$$

### 2.3.3 Definition einer allgemeinen Bemessungsgleichung

Analog zum Vorgehen im vorherigen Abschnitt lässt sich auch die Bemessungsgleichung in allgemeiner Form definieren. Ausgangspunkt ist die folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} g_d(\mathbf{X}_d) &= R_d - E_d = R_d - \{G_d + Q_d\} \\ &= R_k / \gamma_M - \{G_k \cdot \gamma_G + Q_k \cdot \gamma_Q\} \\ &= \mu_R \rho_R / \gamma_M - \{\mu_G \rho_G \gamma_G + \mu_Q \rho_Q \gamma_Q\} \end{aligned} \quad (1.13)$$

Die Bemessungswerte  $R_d$  und  $E_d$  (bzw.  $G_d$  und  $Q_d$ ) werden im Bemessungskonzept der SIA-Normen durch Division bzw. Multiplikation der charakteristischen Werte  $R_k$ ,  $G_k$  und  $Q_k$  mit den Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_M$ ,  $\gamma_G$  und  $\gamma_Q$  bestimmt. Die charakteristischen Werte sind jeweils als untere bzw. obere Fraktilwerte der Zufallsvariablen  $R$ ,  $G$  und  $Q$  definiert. Bei bekanntem Verteilungstyp und Variationskoeffizient können die Fraktilwerte als Vielfaches der Mittelwerte  $\mu_R$ ,  $\mu_G$  und  $\mu_Q$  ausgedrückt werden. Die Faktoren  $\rho_R = R_k / \mu_R$ ,  $\rho_G = G_k / \mu_G$  und  $\rho_Q = Q_k / \mu_Q$  müssen hierfür für jede Variable individuell bestimmt werden (i.d.R. gilt  $\rho_R < 1.0$ ,  $\rho_G = 1.0$  und  $\rho_Q > 1.0$ ).

Durch Normierung mit dem Erwartungswert der Einwirkung,  $\mu_E = \mu_G + \mu_Q$  wird Gleichung (1.13) in dasselbe Format gebracht wie die Grenzzustandsfunktion in Gleichung (1.11):

$$g_d(\mathbf{X}_d) = z \cdot \rho_R / \gamma_M - \{\alpha_G \cdot \rho_G \gamma_G + (1 - \alpha_G) \cdot \rho_Q \gamma_Q\} \quad (1.14)$$

Bei zwei veränderlichen Einwirkungen wird die allgemeine Bemessungsgleichung analog zur Grenzzustandsfunktion in Gleichung (1.12) wie folgt definiert:

$$g_d(\mathbf{X}_d) = z \cdot \rho_R / \gamma_M - \left\{ \alpha_G \cdot \rho_G \gamma_G + (1 - \alpha_G) \cdot \left[ \alpha_{Q_1} \cdot \rho_{Q_1} \gamma_{Q_1} + (1 - \alpha_{Q_1}) \cdot \rho_{Q_2} \psi_{Q_2} \right] \right\} \quad (1.15)$$

Der charakteristische Wert der Begleiteinwirkung  $Q_2$  wird hier mit einem Reduktions- bzw. Kombinationsbeiwert  $\psi_{Q_2}$  multipliziert, der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{Q_2}$  wird nur für die Leiteinwirkung verwendet.

Gleichung (1.14) bzw. (1.15) wird im Rahmen der Normenkalibrierung genutzt, um die Bemessungsvariable  $z$  zu bestimmen. Hierfür wird angenommen, dass der projektierende Ingenieur optimal bemisst, d.h.  $R_d = E_d$  bzw.  $g_d(\mathbf{X}_d) = 0$ . Der aus dieser Annahme resultierende Wert für die Bemessungsvariable  $z$  dient als Input für die Berechnung der Tragwerkszuverlässigkeit mit Hilfe der Grenzzustandsfunktion (1.11) bzw. (1.12) in den verschiedenen Bemessungssituationen. Die Zuverlässigkeit kann so von einem konkreten

Tragwerk losgelöst betrachtet werden. Zur Beschreibung der verschiedenen Bemessungssituationen werden lediglich die folgenden Angaben benötigt:

- Definition der charakteristischen Werte sowie Verteilungstyp und Variationskoeffizient aller Zufallsvariablen zur Berechnung der Faktoren  $\rho_R$ ,  $\rho_G$  und  $\rho_Q$ .
- Teilsicherheitsbeiwerte für Materialien ( $\gamma_M$ ) sowie für die Einwirkungen ( $\gamma_G$ ,  $\gamma_Q$ ), Kombinationsbeiwerte für Begleiteinwirkungen ( $\psi_Q$ ).
- Verhältnis der ständigen und veränderlichen Einwirkungen bzw. der Leit- und Begleiteinwirkung zur Bestimmung von  $\alpha_G$  bzw.  $\alpha_Q$ .

Die Berechnung der Tragwerkszuverlässigkeit bzw. Versagenswahrscheinlichkeit erfolgt dann in zwei Schritten:

- Ermittlung der Bemessungsvariablen  $z$  mit Hilfe von Gleichung (1.14) oder (1.15) unter der Annahme einer optimalen Bemessung ( $g_d(\mathbf{X}_d) = 0$ ).
- Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f = P[g(\mathbf{X}) \leq 0]$  mit Hilfe der Grenzzustandsgleichung (1.11) oder (1.12), unter Verwendung der zuvor ermittelten «optimalen» Bemessungsvariablen  $z$ .

Das beschriebene Vorgehen erlaubt die Berechnung der Tragwerkszuverlässigkeit für verschiedene Bemessungssituationen in Abhängigkeit der Teilsicherheitsbeiwerte. Umgekehrt kann aber auch ein bestimmter Sicherheitsbeiwert (z.B.  $\gamma_Q$ ) so bestimmt werden, dass eine zuvor festgelegte Ziel-Zuverlässigkeit erreicht wird.

## 2.4 Probabilistische Modellierung der Basisvariablen

Tab. 8 enthält eine Übersicht über die probabilistischen Modelle der einzelnen Zufallsvariablen, die für die folgenden Berechnungen angenommen werden. Im Folgenden werden die getroffenen Annahmen kurz diskutiert. Als Grundlage für die gewählten Verteilungen und Variationskoeffizienten dient der JCSS Probabilistic Model Code [12].

**Tab. 8** Übersicht über die angenommenen probabilistischen Modelle für die in Tab. 7 aufgeführten Zufallsvariablen (Verteilungstyp, Variationskoeffizient  $v$ ) sowie Angaben zur Bestimmung des Bemessungswertes ( $p$ -Fraktile zur Festlegung der charakteristischen Werte, Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma$ ).

Zufallsvariable	Verteilung	$v$	$p$	$\gamma$
<i>Widerstand <math>R</math></i>				
Druckfestigkeit Beton	Lognormal	0.15	0.05	1.5
Fliessgrenze Bewehrungsstahl	Normal	0.07	0.05	1.15
Baugrund: niedrige Variabilität	Lognormal	0.1	0.05	1.2
Baugrund: hohe Variabilität	Lognormal	0.5	0.05	1.5
Fliessgrenze Baustahl	Lognormal	0.07	0.05	1.05
<i>Einwirkung <math>E = G + Q</math></i>				
Ständige Einwirkung $G$	Normal	0.15	0.5	1.35*
Veränderliche Einwirkung $Q$	Gamma	$v_Q = f(q_{300}/q_{30})$	1-1/30	1.5
Aussergewöhnliche Einwirkung $A$			s. Kapitel 3.5.2	1-1/300
* Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_Q$ und $\gamma_G$ entfallen in der aussergewöhnlichen Bemessungssituation				
<i>Modellunsicherheit <math>X</math></i>				
Modellunsicherheit $X$	Lognormal	0.1	–	–

## 2.4.1 Modellierung des Tragwiderstandes

Die Zufallsvariable  $R$  berücksichtigt die natürliche Variabilität des Tragwiderstandes aufgrund der Streuung der Materialeigenschaften. Der charakteristische Wert des Tragwiderstandes,  $R_k$ , wird in der Regel als 5%-Fraktile der jeweiligen Verteilung definiert.

### *Widerstand Beton und Bewehrungsstahl*

Für Stahlbetontragwerken ist vor allem die Druckfestigkeit des Betons sowie die Fließgrenze des Bewehrungsstahls relevant. Für die vorliegende Untersuchung wird angenommen, dass der Tragwiderstand beim Versagen jeweils von einer der beiden Materialeigenschaften dominiert wird.

Für ein Druckversagen des Betons in Stahlbetontragwerken wird  $R$  als lognormalverteilte Zufallsvariable mit einem Variationskoeffizienten von  $v_R = 0.15$  modelliert. Die Unsicherheiten in Bezug auf den Betonquerschnitt sind klein im Vergleich zur Streuung des Materials und können deshalb vernachlässigt werden.

Für ein Zugversagen des Bewehrungsstahls in Stahlbetontragwerken wird  $R$  als normalverteilte Zufallsvariable mit einem Variationskoeffizienten von  $v_R = 0.07$  modelliert. Dieser Wert beinhaltet bereits einen kleinen Aufschlag für geometrische Unsicherheiten (Querschnittsfläche und Anordnung der Bewehrung).

Als Teilsicherheitsbeiwert für die Materialseite wird für Stahlbetontragwerken gemäss SIA 262 [7] ein Wert von  $\gamma_M = 1.5$  (Betondruckfestigkeit) bzw.  $\gamma_M = 1.15$  (Fließgrenze Betonstahl) angesetzt.

### *Widerstand Stahlstützen - Baustahl*

Für Lawinengalerien mit Stahlstützen wird zusätzlich zu den oben genannten Eigenschaften auch die Festigkeit bzw. die Fließgrenze von Baustahl benötigt. In diesem Fall wird  $R$  als lognormalverteilte Zufallsvariable mit einem Variationskoeffizienten von  $v_R = 0.07$  modelliert. In diesem Wert ist bereits ein kleiner Aufschlag für geometrische Imperfektionen enthalten.

Für den Nachweis der Tragsicherheit von Stahlstützen wird gemäss SIA 263 [8] ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M = 1.05$  angesetzt.

### *Widerstand Baugrund*

Für Grenzzustände vom Typ 3 (Erreichen des Tragwiderstands des Baugrunds) spielen geotechnische Kenngrößen wie z.B. der Reibungswinkel bzw. die Scherfestigkeit des Baugrundes eine Rolle. Diese können in der Regel mit lognormalverteilten Zufallsvariablen modelliert werden.

Die Variabilität des Baugrund-Widerstandes muss im Einzelfall unter Berücksichtigung des vorliegenden Baugrundes (bzw. der relevanten Baugrund-Eigenschaft) sowie von Größeneffekten bestimmt werden. Auch epistemische Unsicherheiten aus der Baugrund-Erkundung spielen eine Rolle. Die Festlegung eines einheitlichen Wertes für den Variationskoeffizienten ist daher für die vorliegende Untersuchung nicht möglich. Aus den Angaben im JCSS Probabilistic Model Code [12] kann allerdings zumindest eine realistische Bandbreite für den Variationskoeffizienten  $v_R$  des Baugrund-Widerstandes abgeschätzt werden:  $0.1 \leq v_R \leq 0.5$ .

Auch die Teilsicherheitsbeiwerte gemäss SIA 267 [9] variieren in Abhängigkeit der betrachteten Baugrund-Eigenschaft. So gilt z.B. für den Tangens des inneren Reibungswinkels, dessen Variabilität vergleichsweise klein ist,  $\gamma_M = 1.2$ , während für andere Festigkeitsgrößen  $\gamma_M = 1.5$  angesetzt wird.

Für die vorliegende Untersuchung werden die folgenden beiden (Grenz-)Fälle betrachtet:

- Baugrund mit geringer Variabilität:  $v_R = 0.1$ ,  $\gamma_M = 1.2$

- Baugrund mit hoher Variabilität:  $\nu_R = 0.5$ ,  $\gamma_M = 1.5$

Neben dem Baugrund spielt bei einigen Galerien auch der Tragwiderstand der rückwärtigen Verankerung mit Zugankern eine wichtige Rolle. Die Unsicherheit der aufnehmbaren Anker-Zugkräfte (insbesondere des äusseren Widerstandes) dürfte in der Regel deutlich grösser sein als die Variabilität typischer geotechnischer Kenngrössen. Das übliche Verfahren zur Bemessung von Baugrundankern (Festlegung der Bemessungswerte, Durchführung von Ankerversuchen bzw. Zugproben) ist allerdings recht konservativ, wodurch den grossen Unsicherheiten Rechnung getragen wird. In der vorliegenden Untersuchung wird deshalb das mögliche Versagen von Baugrundankern nicht weiter (quantitativ) untersucht.

## 2.4.2 Modellierung der ständigen Einwirkung

Für Lawingalerien sind drei ständige Einwirkungen relevant: Das Eigengewicht des Tragwerks, die Erdauflast und der aus der Erdüberdeckung resultierende Erddruck. Für die vorliegende Untersuchung werden der Einfachheit halber alle ständigen Einwirkungen in einer einzigen Zufallsvariable  $G$  zusammengefasst.

Die Unsicherheit des Eigengewichts ist relativ klein. Der Variationskoeffizient liegt für Betontragwerke in der Grössenordnung von etwa 5% inklusive möglicher geometrischer Imperfektionen.

Bei der Berechnung der Erdlasten ist neben der Wichte des Bodens (Variationskoeffizient 5-10%) auch das Volumen der Erdüberdeckung unsicher. Insgesamt wird deshalb für die Erdlasten ein Variationskoeffizient von 20% angenommen. Bei bestehenden Bauten können die Unsicherheiten durch eine detaillierte Aufnahme der Erdüberdeckung reduziert werden.

Fasst man die Erdlast und das Eigengewicht zusammen, ergibt sich aufgrund der geringeren Unsicherheit des Eigengewichts ein etwas niedrigerer Variationskoeffizient. Für die vorliegende Untersuchung wird  $G$  deshalb als normalverteilte Zufallsvariable mit einem Variationskoeffizienten  $\nu_G = 0.15$  modelliert. Dieser Wert ist etwas höher als die üblicherweise zur Normenkalibrierung verwendete Annahme eines Variationskoeffizienten von 10% (z.B. Faber und Kübler [19]). Der Grund hierfür ist die Unsicherheit im Volumen der Erdüberdeckung.

Der charakteristische Wert der ständigen Einwirkung,  $G_k$ , entspricht dem Mittelwert der zugrundeliegenden Normalverteilung. Da die Normalverteilung symmetrisch ist, entspricht dieser dem Median (50%-Fraktile). Der Teilsicherheitsbeiwert für die ständige Einwirkung wird gemäss SIA 260 [5] auf  $\gamma_{G,sup} = 1.35$  festgelegt.

## 2.4.3 Modellierung der veränderlichen Einwirkung

Für die vorliegende Untersuchung werden veränderliche Einwirkungen aufgrund der folgenden Effekte betrachtet:

- Schneelasten (natürlich abgelagerte Schneedecke)
- Fliesslawinen (dynamische Lawineneinwirkungen)
- Lawinenablagerungen (ruhende Lawineneinwirkungen)

Eine Erhöhung des Erddrucks aufgrund der oben genannten Lawineneinwirkungen wird nicht explizit modelliert. Stattdessen wird angenommen, dass diese in der Schnee- und Lawineneinwirkung  $Q$  mit enthalten ist. Dies ist dadurch gerechtfertigt, dass die Erhöhung des Erddrucks direkt in Funktion der Lawineneinwirkungen ermittelt wird.

Die verschiedenen Einwirkungen werden gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] kombiniert, siehe auch Kapitel 3.2. Andere veränderliche oder aussergewöhnliche Einwirkungen (z.B.

Wasserdruck, Wind, Nutzlasten, Fahrzeuganprall) werden in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt.

Die Lawineneinwirkungen werden in Kapitel 4 näher untersucht. Für die Zuverlässigkeitsbetrachtung werden sie als gammaverteilte Zufallsvariable mit unbekanntem (d.h. variablem) Variationskoeffizienten  $v_Q$  modelliert.

Der charakteristische Wert der veränderlichen Einwirkung,  $Q_k$ , wird als  $p$ -Fraktilwert der Verteilung für das jährliche Maximum bestimmt. Die jährliche Unterschreitungswahrscheinlichkeit  $p=1-1/T$  berechnet sich in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode  $T$ . Diese wird gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] wie folgt festgelegt:

- $T = 30$  Jahre für das normale Ereignis
- $T = 300$  Jahre für das aussergewöhnliche Ereignis

Die Lawineneinwirkung im „normalen“ Ereignis gilt als allgemeine veränderliche Einwirkung gemäss SIA 260 [5]. Der Teilsicherheitsbeiwert beträgt  $\gamma_Q = 1.5$ . Das 300-jährige Ereignis wird als aussergewöhnliche Einwirkung berücksichtigt. Bei der aussergewöhnlichen Bemessungssituation entfallen die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungsseite (d.h.  $\gamma_G$  und  $\gamma_Q$ ).

#### 2.4.4 Berücksichtigung der Modellunsicherheit

Zusätzlich zu den Bemessungsgrössen  $R$ ,  $G$  und  $Q$  enthält die Grenzzustandsfunktion noch Modellunsicherheiten, die in der Zufallsvariable  $X$  zusammengefasst sind.

Auf der Widerstandsseite berücksichtigt die Modellunsicherheit Annahmen und Vereinfachungen bei der Berechnung der Widerstände auf Querschnittsebene bzw. im Rahmen von geotechnischen Berechnungen. Hierfür wird eine lognormalverteilte Zufallsvariable mit einem Mittelwert von  $\mu_X = 1.0$  und einem Variationskoeffizienten von  $v_X = 0.1$  angenommen. Auf eine Differenzierung, z.B. für unterschiedliche Grenzzustände, wird verzichtet; dies entspricht der üblichen Praxis im Bereich der Normenkalibrierung.

Neben den Modellunsicherheiten auf der Widerstandsseite spielen auch Annahmen und Vereinfachungen bei der Bestimmung der Ein- bzw. Auswirkungen eine Rolle für die Zuverlässigkeit des Tragwerks. Die Unsicherheit der Einwirkungen wird in der vorliegenden Untersuchung im Rahmen der Einwirkungsmodellierung explizit berücksichtigt, siehe Kapitel 4; sie sind also im probabilistischen Modell für die veränderliche Einwirkung  $Q$  enthalten.

Hinzu kommen Unsicherheiten und vereinfachende Annahmen bei der Berechnung der Schnittkräfte im Tragwerk, d.h. bei der Ermittlung der Auswirkungen. Der Probabilistic Model Code [12] enthält auch hierfür Vorschläge. Für die vorliegende Untersuchung wird aber angenommen, dass die Unsicherheiten bei der Ermittlung der Auswirkungen ebenfalls in der Zufallsvariable  $X$  enthalten sind. Dies entspricht dem Vorgehen in anderen Untersuchungen, z.B. zur Ermittlung des Sicherheitsniveaus der SIA Normen (Faber und Kübler [19]) und ist auch konsistent mit der Untersuchung von Röhlin et al. [29] zum Bemessungskonzept für Steinschlagschutzgalerien; letzteres berücksichtigt zwar eine Modellunsicherheit auf der Lastseite, diese beinhaltet aber nur Unsicherheiten bei der Bestimmung der Ein- und nicht der Auswirkungen.

In der Bemessungsgleichung sind die Modellunsicherheiten nicht explizit enthalten, ihr Einfluss ist allerdings in den Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_M$  und  $\gamma_G$  bzw.  $\gamma_Q$  berücksichtigt: diese enthalten Partialfaktoren  $\gamma_S$  für Modellunschärfen bezüglich der Ein- und Auswirkungen und  $\gamma_R$  für Unschärfen im Widerstandsmodell, vgl. SIA 260 [5] Absatz 4.4). Die Schätzunsicherheit der Lawineneinwirkung wird in diesem Bericht explizit untersucht und abschliessend in Kapitel 6.2.3 diskutiert.

## 3 Beurteilung des Sicherheitsniveaus nach aktueller Normung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse von Zuverlässigkeitsanalysen für Galerietragwerke bei Bemessung nach der aktuellen Normung zusammengefasst. Durch die Anwendung der in Kapitel 2 beschriebenen Theorie auf reale Galeriestandorte wird sichergestellt, dass die untersuchten Bemessungssituationen die Realität ausreichend gut repräsentieren. Die probabilistische Modellierung der standortspezifischen Einwirkungen ist in Kapitel 4 beschrieben.

### 3.1 Derzeitige Normung von Lawinengalerien in der Schweiz

Wie andere Tragwerke auch, werden Lawinengalerien in der Schweiz basierend auf den Tragwerksnormen des SIA bemessen. Relevant sind insbesondere SIA 260 [5] für die Grundlagen der Bemessung sowie SIA 269 [10] für bestehende Bauten, SIA 261 [6] für Einwirkungen auf Tragwerke sowie SIA 262 [7] (Betonbau), SIA 263 [8] (Stahlbau), SIA 267 [9] (Geotechnik) für die Berechnung der Widerstände des Tragwerks bzw. Baugrundes und die SIA 269 [10] für bestehende Bauwerke.

Die Besonderheit von Lawinengalerien besteht in ihrem Zweck, Einwirkungen aus Lawinenereignissen standzuhalten, um so wichtige Verkehrsachsen vor diesen Einwirkungen zu schützen. Da die Einwirkungen standortspezifisch unter Berücksichtigung der lokalen Lawinengefährdung festgelegt werden, bedarf es einheitlicher Regeln für die Schnittstelle zwischen dem Lawinenexperten, der die Lawineneinwirkungen bestimmt, und der Tragwerksplanerin, die die Galerie mit diesen Einwirkungen bemisst. Diese Schnittstelle wird mit der ASTRA-Richtlinie 12007 [1], die eine zuvor geltende Richtlinie des ASTRA und der Baudirektion der SBB von 1994 ersetzt [2].

Die ASTRA-Richtlinie 12007 [1] definiert:

- Welche Einwirkungen aus Schnee und Lawinen zu berücksichtigen sind
- Welche Festlegungen es hierfür vom Lawinenexperten benötigt werden
- Wie sich hieraus die Einwirkungen auf die Galerie berechnen lassen

Aus Sicht der Zuverlässigkeitsanalyse bzw. des Bemessungskonzeptes der SIA-Normen definiert die Richtlinie, wie die charakteristischen Werte der Einwirkungen aus Schnee und Lawinen in zwei Bemessungssituationen festgelegt werden: eine «normale» Bemessungssituation unter Verwendung eines 30-jährigen Lawinenereignisses, sowie eine «aussergewöhnliche» Bemessungssituation unter Verwendung eines 300-jährigen Ereignisses. Für beide Ereignisse werden vom Lawinenexperten verschiedene Lastfälle bzw. Einwirkungskombinationen betrachtet, die weiter unten in Kapitel 3.2 näher beschrieben werden. Die in der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] definierten Berechnungsformeln zur Bestimmung der vertikalen und horizontalen Einwirkungen aus den Angaben des Lawinenexperten basieren auf experimentellen Untersuchungen, die in [36] näher beschrieben sind.

Die aktuelle Richtlinie ASTRA-Richtlinie 12007 [1] ist für Lawinengalerien der Nationalstrassen rechtlich bindend. Da für andere Verkehrsträger keine alternativen Bemessungsgrundlagen zur Verfügung stehen, kommt die Richtlinie auch für Lawinengalerien an Bahnstrecken sowie für untergeordnete Strassenachsen mit geringerem Verkehrsaufkommen zur Anwendung.

## 3.2 Einwirkungskombinationen gemäss ASTRA-Richtlinie 12007

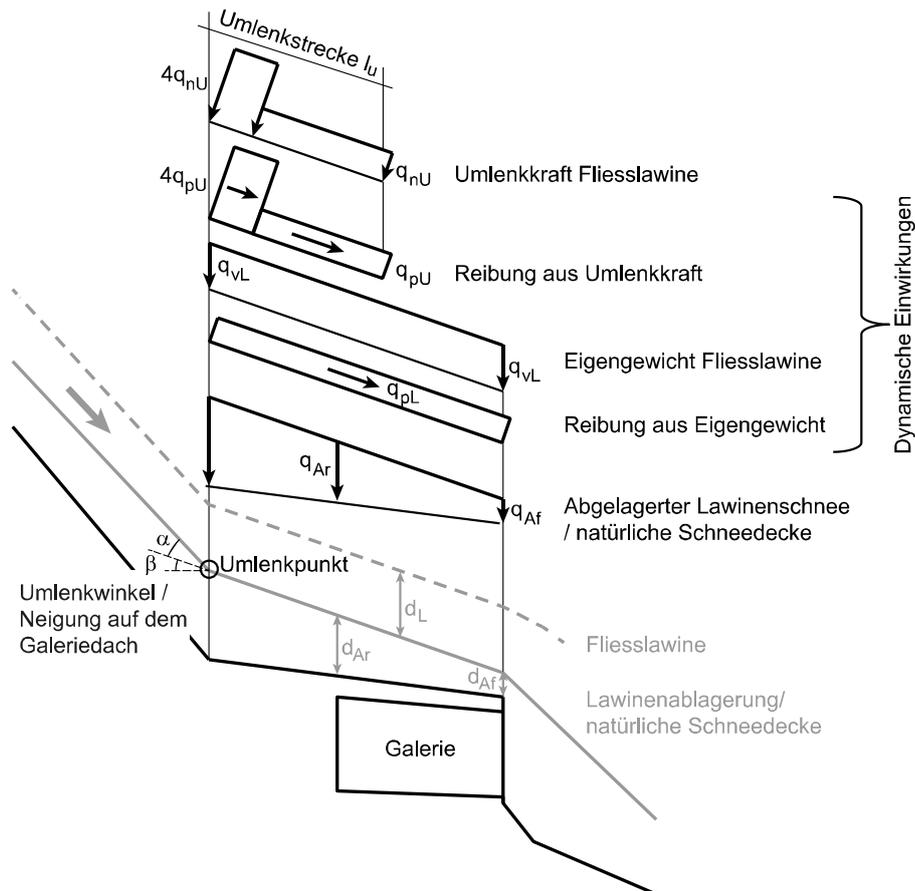
Für die Einwirkungen auf Lawinengalerien infolge von Schnee und Lawinen definiert die ASTRA-Richtlinie 12007 [1] acht typische Fälle:

- *Fall 1:* Fliesslawine auf schneefreiem Galeriedach.
- *Fall 2:* Fliesslawine über schneebedecktem Galeriedach.
- *Fall 3:* Fliesslawine über abgelagertem Lawinenschnee.
- *Fall 4:* Lawinenablagerung ruhend.
- *Fall 5:* Statischer Schneedruck auf die talseitige Galeriefront.
- *Fall 6:* Lawinendrucke auf die talseitige Galeriefront.
- *Fall 7:* Kriechdrücke auf das Galeriedach.
- *Fall 8:* Lawinenaufprall auf das Galeriedach.

Die vorliegende Untersuchung konzentriert sich auf die Fälle 1 bis 4, da in der Regel eine der in diesen Fällen beschriebenen Einwirkungskombinationen massgebend ist. Die Fälle 5 bis 8 treten nur in speziellen Situationen auf. Das Bemessungskonzept für die Fälle 5 bis 8 lässt sich grundsätzlich aus den Untersuchungen für die Fälle 1 bis 4 ableiten:

- Fall 5 und 7 beschreiben eine einzelne ruhende Einwirkung (ähnlich wie Fall 4)
- Fall 6 und 8 beschreiben eine einzelne dynamische Einwirkung (ähnlich wie Fall 1)

Im Folgenden werden die Einwirkungen in den vier wichtigsten Fälle 1 bis 4 noch einmal näher beschrieben und in Bezug zum Bemessungskonzept und zur Modellierung der Tragwerkszuverlässigkeit gesetzt.



**Abb. 11** Illustration der auf die Galerie wirkenden Kräfte gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1].

Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse in Kapitel 3.6 sowie die probabilistische Modellierung der Einwirkungen in Kapitel 4.2 bis 4.5 beziehen sich jeweils auf die vier im Folgenden beschriebenen Fälle.

### 3.2.1 Fall 1: Fließlawine auf schneefreiem Galeriedach

Im ersten Fall wird die Galerie durch eine Fließlawine auf dem Galeriedach belastet. Hieraus ergeben sich die folgenden Kräfte:

- Vertikal: Eigengewicht der Fließlawine  $q_{vL}$
- Rechtwinklig zum Gelände: Umlenkkraft  $q_{nU}$
- Parallel zum Gelände: Reibung aus Fließlawine  $q_{pL}$  und Umlenkkraft  $q_{pU}$

Eine Erhöhung des Erddrucks aufgrund von dynamischen Einwirkungen wird nicht berücksichtigt. Da alle oben genannten Kräfte aus demselben Lawinenereignis resultieren, werden sie für die Zuverlässigkeitsbetrachtung zu einer einzigen veränderlichen Einwirkung  $Q$  zusammengefasst.

Die «veränderliche Einwirkung  $Q$ » ist hier eine Zufallsvariable. In der Norm SIA 260 wird der Begriff anders gebraucht: Das 50-jährliche Fraktile von  $Q$  wird als «veränderliche Einwirkung» und die 300-jährliche Fraktile von  $Q$  als «aussergewöhnliche Einwirkung» bezeichnet.

### 3.2.2 Fall 2: Fliesslawine über schneebedecktem Galeriedach

Für den zweiten Fall wird die oben beschriebene dynamische Einwirkung aus einer Fliesslawine über dem Galeriedach mit der Schneelast einer natürlich abgelagerten Schneedecke (keine Lawinenablagerung) kombiniert. Zusätzlich zu den oben aufgelisteten Kräften, die in Fall 1 wirken, ist also noch das Eigengewicht  $q_A$  der natürlich abgelagerten Schneedecke als vertikal wirkende Auflast zu berücksichtigen.

Gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] werden die dynamischen und ruhenden Einwirkungen aus Lawinen und natürlich abgelagerter Schneedecke gemeinsam als Leit- oder Begleiteinwirkung berücksichtigt. Das bedeutet, dass auch in Fall 2 in der Regel nur eine veränderliche (Leit-)Einwirkung  $Q$  zu betrachten ist, die alle in Abb. 11 dargestellten Kräfte zusammenfasst. Wie in Kapitel 4.3 noch näher diskutiert wird, sind die dynamischen Lawineneinwirkungen und die natürlich abgelagerte Schneelast zum Lawinenzeitpunkt aber weitestgehend unabhängig bzw. allenfalls schwach korreliert. Es ist deshalb nicht nötig, z.B. das 30-jährige Ereignis einer Fliesslawine noch mit dem 30-jährigen Ereignis der natürlich abgelagerten Schneedecke zu kombinieren. Um den Einfluss unterschiedlicher Bemessungsannahmen auf die Zuverlässigkeit des Galerietragwerks zu untersuchen, werden deshalb in Kapitel 3.6.2 die beiden Einwirkungs-Komponenten dennoch als unabhängige Zufallsvariablen berücksichtigt. In der Bemessungsgleichung werden aber entsprechend der Vorgaben aus der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] alle Einwirkungen aus Schnee und Lawinen gleichbehandelt und voll (d.h. ohne die Berücksichtigung von Kombinationsbeiwerten) für die Bemessung berücksichtigt.

### 3.2.3 Fall 3: Fliesslawine über abgelagertem Lawinenschnee

Der dritte Fall ist ähnlich wie Fall 2, allerdings wird als ruhende Einwirkung zusätzlich die Schneelast aus Lawinenablagerungen auf dem Galeriedach berücksichtigt. Die Höhe der natürlich abgelagerten Schneedecke wird in die ruhende Einwirkung der Lawinenablagerung integriert.

Gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] gelten entweder die dynamischen Einwirkungen (Fliesslawine) oder die ruhenden Einwirkungen (Lawinenablagerung) als Leiteinwirkung, d.h. die beiden Einwirkungs-Komponenten wären eigentlich als zwei separate veränderliche Einwirkungen  $Q_1$  und  $Q_2$  zu betrachten. Allerdings wird aus der Richtlinie nicht klar, wie die beiden Einwirkungen für die Bemessung kombiniert werden sollen.

Komplexe Abhängigkeiten zwischen den ruhenden und dynamischen Einwirkungen erschweren die Analyse zusätzlich. So kann es zum Beispiel sein, dass eine grosse bestehende Lawinenablagerung die Hanggeometrie günstig beeinflusst, weil ein Geländeknick durch den Lawinenschnee «aufgefüllt» wird und keine Umlenkkräfte mehr auftreten. Auch das Gegenteil einer ungünstigen Beeinflussung der Hanggeometrie ist aber durchaus denkbar. In jedem Fall sind die ruhenden und dynamischen Einwirkungen alles andere als unabhängig, was die Herleitung von einfachen Bemessungsregeln, z.B. mit Kombinationsbeiwerten, erschwert (die Theorie zur Herleitung von Kombinationsbeiwerten basiert auf der Unabhängigkeit verschiedener Einwirkungen, z.B. bei Betrachtung von Nutzlasten, Schnee und Wind).

Im Rahmen der probabilistischen Analyse in Kapitel 4.4 werden die ruhenden und dynamischen Einwirkungen in Fall 3 gemeinsam ermittelt und dann für die Zuverlässigkeitsanalyse gemäss Kapitel 3.2.3 zu einer einzelnen veränderlichen Einwirkung  $Q$  zusammengefasst. Mit diesem Vorgehen können die komplexen Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Komponenten konsistent berücksichtigt werden.

Die für Fall 3 modellierte Lawinenablagerung entspricht trotzdem nicht dem Maximalwert der ruhenden Einwirkung aus abgelagertem Lawinenschnee. Diese ist erst nach dem letzten Lawinenabgang zu erwarten und wird für die im Folgenden beschriebene Modellierung von Fall 4 verwendet.

### 3.2.4 Fall 4: Lawinenablagerung ruhend

Im vierten Fall wird keine dynamische Lawineneinwirkung berücksichtigt, sondern lediglich die ruhende Einwirkung aus abgelagertem Lawinenschnee. Die Höhe der natürlich abgelagerten Schneedecke wird in die ruhende Einwirkung integriert, so dass in Fall 4 nur eine einzige veränderliche Einwirkung  $Q$  berücksichtigt wird.

Maximale Lawinenablagerungen sind an vielen Standorten vor allem dann zu erwarten, wenn sich die Ablagerungen aus mehreren Lawinenereignissen auf der Galerie kumulieren. Die Modellierung der Einwirkungen in Fall 4 basiert deshalb auf derselben Szenario-Definition wie in Fall 3, bei dem ebenfalls mehrere Lawinenereignisse kombiniert werden, siehe Kapitel 4.4 und 4.5 für Details. Der einzige Unterschied besteht darin, dass in Fall 4 alle Lawinen im Einwirkungsszenario zur Ablagerung auf dem Galeriedach beitragen. Es wird also die kumulierte Ablagerung am Ende des Lawinenszenarios betrachtet und nicht die Situation während dem massgebenden Lawinenabgang wie in Fall 3.

## 3.3 Untersuchte Galeriestandorte

Wichtige Standortfaktoren bei Lawinengalerien sind:

- Anzahl und Exposition der Lawinenanrissgebiete, Höhenlage der Galerie
- Querschnitt (z.B. Kanalisierung) der Lawinenzüge in der Sturzbahn und beim Galeriestandort
- Längsprofil der Lawinenzüge oberhalb und beim Galeriestandort
- Standort in der Sturzbahn, am Hangfuss, im Auslaufbereich
- Aktivität der Lawinenzüge, Wahrscheinlichkeit von mehreren Ereignissen im Winterverlauf
- Lokaltopographie (Einbettung, Geländeknick)

Im Folgenden werden die beiden im Rahmen dieser Untersuchung betrachteten Galeriestandorte beschrieben. Kapitel 3.3.3 enthält eine Diskussion, welche der oben genannten Standortfaktoren mit den beiden Galerien abgedeckt sind.

### 3.3.1 Galerie Salezer Davos

Das Einzugsgebiet des Lawinenzuges ‚Salezer‘ in Davos (CH) beträgt rund 600'000 m<sup>2</sup>. Es reicht von 1558 bis auf 2536 m über Meereshöhe. Oberhalb von 1700 m ist etwa 60 % des Gebietes steiler als 30° und somit potentielles Anrissgebiet. Das Gelände ist inhomogen. Geländestufen mit einer Neigung von deutlich mehr als 30° wechseln sich ab mit Abschnitten, die flacher als 20° sind und mit Bereichen in denen sich die Neigung kleinräumig zwischen steilen und flachen Gebieten ändert. Die Abgrenzung von Lawinenanrissgebieten ist im Falle dieses Lawinenzuges daher nicht einfach, da mehrere Teilanrissgebiete gleichzeitig anbrechen können.

Die meisten Lawinen aus dem Einzugsgebiet Salezer werden in der V-förmigen Bachrinne des Salezertobels kanalisiert. Bei 1700 m mündet die Bachrinne in einen 15° geneigten Schwemmkegel. Die Hauptzufahrtsstrasse nach Davos kreuzt diesen Schwemmkegel auf 1510 m Meereshöhe. Sie wird durch eine 400 m lange Lawinengalerie geschützt, siehe Abb. 12.



**Abb. 12** Der Lawinenzug Salezer am 16. Januar 2019. Eine gesprengte Lawine ist über die Galerie und bis in den Davosersee geflossen. (Foto: Lukas Dürr, SLF)

Im Raum Davos und daher auch im Lawinenzug Salezer wird die Lawinenaktivität seit 1955 vom SLF systematisch aufgezeichnet, und die effektive Lawinenaktivität ist daher hier viel besser dokumentiert als andernorts. Der heutige Galeriestandort wurde zwischen 1951 und 2020 zehnmal von Lawinen erreicht.

Um zu verhindern, dass im vorliegenden Bericht die im Normalfall auftretenden Unsicherheiten unterschätzt werden, erfolgt die Bestimmung der Lawineneinwirkungen ohne Berücksichtigung des bei dieser Galerie vorhandenen empirischen Wissens.

### 3.3.2 Galerie Oberalppass

Das Einzugsgebiet 'hert Plangge' nördlich des Oberalpsees hat eine Fläche von 300'000 m<sup>2</sup>. Es reicht von 2040 bis auf 2400 m über Meereshöhe. Im oberen Teil des Lawineneinzugsgebiets wechseln Felsstufen mit weniger als 30° steilen Geländeabschnitten ab. Der unter 2200 m liegende Teil des Einzugsgebiets ist eine flächige, 40 bis 45° steile Bergflanke, welche durch einige eher schwach ausgeprägte Mulden und Rücken gegliedert ist.

Die Lawine aus den drei Lawinenzügen fließen nicht, sehr wenig resp. mässig kanalisiert ab. Im sehr steilen und südlich exponierten Gelände treten sehr oft Nassschnee- und Gleitschneelawinen auf.

Direkt am Hangfuss verlaufen die Passstrasse und das MGB-Bahntrasse direkt nebeneinander. Diese Verkehrsachsen werden durch eine 740 m lange und rund 13 m breite Lawingalerie geschützt, siehe Abb. 13.



**Abb. 13** Die Galerie Oberalppass mit den ungefähren Umrissen der drei untersuchten Lawinen im Februar 2012 (Foto: Schweizer Luftwaffe).

Die Galerie am Oberalppass wird alljährlich von mehreren Lawinen erreicht bzw. überflossen. Allerdings wurde die Lawinenaktivität bisher nicht systematisch dokumentiert. Aussergewöhnlich hohe Lawinenablagerungen wurden aber in den Wintern 1951 und 2018 beobachtet und in beiden Wintern erfolgten Messungen der Schneehöhen auf dem Galeriedach, siehe Abb. 14. Es erscheint plausibel, dass seit dem Bau der Galerie (1942) 1951 und 2018 die grössten Schneehöhen aufgetreten sind.

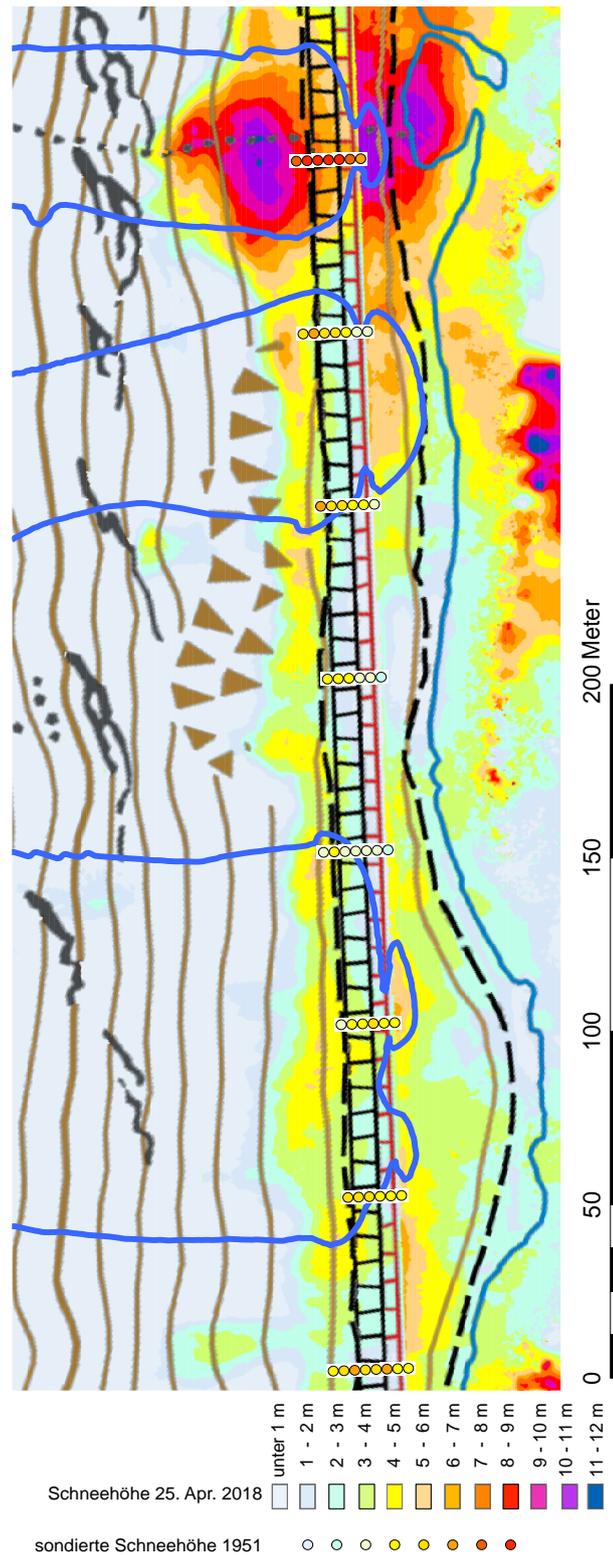
### 3.3.3 Untersuchte Standortfaktoren

Die betrachteten Galeriestandorte haben gewisse Gemeinsamkeiten und decken darum nicht alle der am Anfang von Kapitel 3.3 aufgeführten Standortfaktoren ab. Beide Galerien und die massgebenden Anrissgebiete liegen in mittlerer Höhenlage und der Galeriestandort liegt am Beginn oder innerhalb der Auslaufstrecke der Lawine am Hangfuss. Die untersuchten Lawinen überfliessen die Galerie in einem Bereich ohne Lawinenleitdämme.

Mit der Untersuchung der beiden Galerien werden Lawinenzüge mit mittlerer bis grosser Aktivität, kleiner bis grosser Lawinengrösse, kanalisierte und nicht kanalisierte Lawinenbahnen sowie Standorte mit und ohne Umlenkung des Lawinenschnees auf dem Galeriedach abgedeckt.

Bei Vorarbeiten zu diesem Projekt konnte auch ein Galeriestandort im Hang und in der Sturzbahn (die Galerie Scopi an der Nordseite des Lukmanierpasses) untersucht werden, siehe [30], [31] für Details.

Zu den nicht analysierten Situationen gehören Standorte, die von extrem grossen Lawinen (z.B. extreme Staublawinen) oder extreme Lawinen aus sehr grossen, hochalpinen Anrissgebieten erfasst werden. Auch Standorte in tiefen Lagen (wo der Fall 3 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] eher selten auftritt) oder sehr steilen Sturzbahnen wurden nicht untersucht.



**Abb. 14** 1951 und 2018 gemessene Gesamtschneehöhe auf dem Galeriedach. Am 10. April 1951 wurde alle 40 bis 60 m die Ablagerungshöhe zwischen der Galeriefront und dem Hangfuss im Abstand von 3 m manuell sondiert. 2018 erfolgten am 25. April sowie nach der Schneeschmelze am 27. September Befliegungen mit einer Drohne. Die Schneehöhe wurde mittels Stereometrie ermittelt. Zur Orientierung zeigen die drei blauen Umrisslinien den minimalen Perimeter der drei Lawenzüge I1, I2 und I3 (von links nach rechts), in dem bei sämtlichen Berechnungen eine Ablagerungshöhe von mindestens 1 m resultierte. Die höchsten Lawinenablagerungen auf dem Galeriedach wurden im Lawinenzug rechts gemessen und betrugen 1951 8.2 m und 2018 7.9 m.

## 3.4 Zusammenfassung der Zuverlässigkeitsberechnung

Kapitel 3.5 und 3.6 beschreiben die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalysen für Galerietragwerke, die nach den aktuellen Vorschriften bemessen wurden. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zunächst kurz zusammengefasst und beurteilt:

- Beurteilung der wesentlichen Einflüsse auf die Tragwerkszuverlässigkeit und die Bemessung (Parameterstudien, Kapitel 3.5)
- Ergebnisse zur Zuverlässigkeit der betrachteten Galeriebauwerke (Kapitel 3.6) unter Verwendung der standortspezifischen Einwirkungsmodelle gemäss Kapitel 4
- Einordnung der Ergebnisse durch Vergleich der rechnerischen Zuverlässigkeit mit dem beobachteten Sicherheitsniveau

### 3.4.1 Ergebnisse der Parameterstudien (theoretische Analyse)

Mit den Parameterstudien in Kapitel 3.5 wird untersucht, wie sich die Zuverlässigkeit von Galerietragwerken bei einer Bemessung nach den aktuellen Vorschriften ändert, wenn wesentliche Annahmen variieren. Durch die Variation der Eingabeparameter werden verschiedene theoretische, aber möglichst realitätsnahe Bemessungssituation untersucht.

Diese theoretische Analyse lässt die folgenden Schlussfolgerungen zu:

- Von zentraler Bedeutung für die Bemessung und die Zuverlässigkeit der Galerie ist die Streuung der Lawineneinwirkung, ausgedrückt über den Variationskoeffizienten  $v_Q$  oder – praxistauglicher – durch das Verhältnis der Fraktilwerte  $q_{300}/q_{30}$
- Eine Bemessung nur auf das 30-jährige Ereignis ist vergleichsweise zuverlässig, wenn die Lawineneinwirkung wenig streut. Eine grosse Streuung (grosses Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$ ) führt aber zu hohen Versagenswahrscheinlichkeiten bis hin zu einer Grössenordnung von  $P_f = 10^{-2}$ , also ein Versagen etwa alle 100 Jahre
- Die zusätzliche Berücksichtigung des 300-jährigen Ereignisses erhöht bei grosser Streuung der Lawineneinwirkung die Zuverlässigkeit der Galerie und führt dort zu Versagenswahrscheinlichkeiten in der Grössenordnung von  $P_f = 10^{-3}$ , also ein Versagen etwa alle 1000 Jahre.
- Bei niedriger Streuung ist die Bemessung auf das 30-jährige Ereignis massgebend, weil die Bemessungseinwirkung durch die Teilsicherheitsbeiwerte im normalen Ereignis grösser ist als die aussergewöhnliche Einwirkung im 300-jährigen Ereignis.
- Vor allem bei der Bemessung auf das 30-jährige Ereignis spielt auch der Beitrag der ruhenden Einwirkung eine wichtige Rolle. Ein hoher Anteil der ruhenden Last erhöht in der Regel die Zuverlässigkeit, weil sie weniger streut als die der Lawineneinwirkung.
- Die Unsicherheit des Tragwerkswiderstandes ist weniger bedeutend für die Zuverlässigkeit der Bemessung. Die Ergebnisse für verschiedene Bauweisen liegen grob in einer ähnlichen Grössenordnung
- Weil der Fokus der Forschungsarbeit auf der Modellierung der Lawineneinwirkung liegt, wird für die folgenden Untersuchungen angenommen, dass das Tragwerksversagen zunächst durch ein Zugversagen der Bewehrung ausgelöst wird. Die Tragwerksnormen sind so kalibriert, dass ein Druckversagen des Betons weniger wahrscheinlich ist.
- Bei Galerien, welche vor etwa 1990 erstellt wurden, wurde die Wiederkehrdauer des Bemessungsereignisses nur selten ausgewiesen. In vielen Fällen dürfte sie auf Lawinen mit 50 jährlicher Wiederkehrperiode als Leiteinwirkung erfolgt sein.

### 3.4.2 Ergebnisse für die betrachteten Galeriestandorte

Die Betrachtung realer Galeriestandorte in Kapitel 3.6 zielt darauf, realistische Bemessungssituationen zu definieren und die Zuverlässigkeit für diese Situationen zu berechnen. Als Grundlage dient die standortspezifische probabilistische Modellierung der Lawineneinwirkungen, die in Kapitel 4 beschrieben wird. Das Einwirkungsmodell bestimmt die Unsicherheit der Lawineneinwirkung (Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$ ) und den Beitrag der ruhenden Einwirkung  $\alpha_G$ .

Die Bemessung des Tragwerks ergibt sich aus der in Kapitel 2.3.3 hergeleiteten Bemessungsgleichung, d.h. unter Annahme eines Erfüllungsgrades von  $R_d/E_d = 1.0$ . Die Bemessung und damit auch die rechnerische Zuverlässigkeit der Galerietragwerke bleibt insofern theoretisch, da die realen Abmessungen der Bauteile bzw. der Bewehrung für eine generelle Beurteilung nicht berücksichtigt werden können. Die Berechnungen geben also das theoretische Sicherheitsniveau der aktuellen Normung in realistischen Bemessungssituationen an, und nicht das tatsächliche Sicherheitsniveau der betrachteten realen Bauwerke.

Für die Analyse werden Einwirkungen in den Fälle 1 bis 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] betrachtet. Jeder Fall wird separat analysiert, d.h. es werden vier verschiedene Bemessungen der Galerie mit einem Erfüllungsgrad von  $R_d/E_d = 1.0$  betrachtet. In der Realität ist natürlich immer nur einer der vier Fälle für die Bemessung auf eine bestimmte Schnittgrösse massgebend. Für die übrigen Fälle ergibt sich ein Erfüllungsgrad grösser als Eins, was sich auf die Zuverlässigkeit günstig auswirkt. Ähnliche Überlegungen gelten für die Bemessung unterschiedlicher Galerieabschnitte entlang der Strassenachse, die in der Analyse ebenfalls separat betrachtet werden, siehe Kapitel 3.6.1 für Details.

Die Ergebnisse für die beiden Galeriestandorte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die rechnerische Versagenswahrscheinlichkeit liegt in den meisten Galerieabschnitten und Einwirkungskombinationen etwa zwischen  $P_f = 10^{-4}$  und  $P_f = 10^{-3}$
- Berücksichtigt man ungünstige (nicht konservative) Effekte bei der Festlegung der Lawineneinwirkung, kann dies zu Versagenswahrscheinlichkeiten  $P_f > 10^{-3}$  führen, wie an den folgenden detaillierten Untersuchungen für Fall 1 erkennbar ist:
  - Fehlende Berücksichtigung der Schätzunsicherheit bei der Beurteilung der Einwirkungen im 30-jährigen bzw. 300-jährigen Ereignis
  - Beurteilung der Einwirkungen durch einen «optimistischen» Lawinenexperten, der die realen Einwirkungen ggf. unterschätzt
- Für die betrachteten Galeriestandorte sind vor allem die Einwirkungen in Fall 3 und ggf. Fall 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] massgebend, bei denen Lawinenablagerungen auf dem Galeriedach eine Rolle spielen.
- In Fall 2 (Flieslawine über natürlich abgelagerter Schneedecke) wird die Zuverlässigkeit hauptsächlich durch die stärker streuenden dynamischen Einwirkungen bestimmt. Die Festlegung zum charakteristischen Wert der ruhenden Schneelast hat nur einen geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Bemessung.
- In allen Fällen steigt die Streuung der Lawineneinwirkung in den weniger stark belasteten Galerieabschnitten, im Gegenzug ist dort das Verhältnis zwischen ständiger und variabler Einwirkung aber vergleichsweise günstig. Ebenfalls positiv wirkt in Bezug auf die Zuverlässigkeit, dass die Bemessung in der Praxis vermutlich oft mit den maximalen Einwirkungen eines Lawinenzugs erfolgt.
- In den Galerieabschnitten mit den massgebenden Einwirkungen erreicht das Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$  (in den meisten Fällen) Werte bis maximal etwa 2.5; in den übrigen Abschnitten können sich Werte bis  $q_{300}/q_{30} = 5.0$  oder höher ergeben, was die hohe Streuung der Lawineneinwirkung z.B. in Randbereichen eines Lawinenzugs verdeutlicht.

Zusammengefasst lässt sich schlussfolgern, dass das heutige Bemessungskonzept vergleichsweise «robust» auf die verschiedenen Bemessungssituationen reagiert und die rechnerische Zuverlässigkeit stets in einer ähnlichen Grössenordnung liegt. Im Vergleich zu üblichen nominellen Zuverlässigkeiten im Tragwerksbereich ist das Sicherheitsniveau allerdings eher niedrig und erfüllt je nach Konsequenzklasse der Galerie ggf. auch nicht die Anforderungen an die Zielzuverlässigkeit gemäss Kapitel 2.2. Besonders hoch wird die rechnerische Versagenswahrscheinlichkeit, wenn man annimmt, dass die Festlegung zum 30-jährigen bzw. zum 300-jährigen Ereignis den zugehörigen charakteristischen Wert der entsprechenden Verteilung eher unterschätzt, z.B. weil die Schätzunsicherheit bei der Beurteilung der Ereignisse durch den Lawinenexperten in der Praxis nicht berücksichtigt wird. Auch die Bemessung aufgrund von Angaben unterschiedlicher Lawinenexperten kann einen grossen Einfluss auf die Tragwerkszuverlässigkeit haben.

Zu beachten ist bei all diesen Betrachtungen aber stets, dass die Berechnungen auf diversen Annahmen basieren und somit in vieler Hinsicht theoretisch sind; beurteilt wird das «nominelle» Sicherheitsniveau der Tragwerksnormen, und nicht das tatsächliche Sicherheitsniveau realer Bauwerke. Diese Einschränkung ist nicht grundsätzlich problematisch; das probabilistische Sicherheitskonzept der Tragwerksnormen und somit die Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte basiert ebenfalls auf Überlegungen zur nominellen Zuverlässigkeit der Tragwerke. Abgesehen von den spezifischen Annahmen zur Modellierung der Einwirkungen auf Lawinengalerien basieren die Berechnungen in diesem Bericht auf vergleichbaren Annahmen, siehe Kapitel 2 für Details. Dennoch lohnt ein Vergleich mit realen Beobachtungen zum Sicherheitsniveau von Lawinengalerien in der Schweiz, insbesondere da die rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeiten eher hoch sind.

### 3.4.3 Vergleich mit dem beobachteten Sicherheitsniveau

Ziel der im Folgenden diskutierten vereinfachten Betrachtungen ist ein Vergleich der in dieser Studie ermittelten rechnerischen Zuverlässigkeit von Galerietragwerken mit realen Beobachtungen. Wie oben beschrieben, zielen die Berechnungen auf das nominelle Sicherheitsniveau der heutigen Vorschriften und sind aufgrund der getroffenen Annahmen mit dem tatsächlichen Sicherheitsniveau realer Bauwerke nicht Eins zu Eins vergleichbar. Insofern geht es bei dem Vergleich vor allem um die Grössenordnung der rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeit und darum, ob diese anhand von Beobachtungen aus der Schweiz als realistisch eingestuft werden kann.

Ein Grossteil der geschätzt rund 150 Lawinengalerien in der Schweiz mit einer (ebenfalls geschätzten) Länge von insgesamt 45 km wurde in den 1960er bis 1980er Jahren gebaut und sind somit seit ca. 40-50 Jahren in Betrieb. Versagensereignisse durch Lawineneinwirkungen sind bei Schweizer Schutzgalerien praktisch nie beobachtet worden, siehe Kapitel 1.1.2 für Details. In den im Rahmen dieser Untersuchung betrachteten Fällen 1 bis 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] gab es bisher noch kein Versagensereignis.

Bei rund 150 Schweizer Galerien kann ein einfacher Vergleich der in Kapitel 3.4 und 3.6 zusammengestellten Resultate mit dem beobachteten Sicherheitsniveau helfen, die berechnete Tragwerks-Zuverlässigkeit besser einzuordnen. Als Ausgangslage dient hierbei die rechnerische Versagenswahrscheinlichkeit, die in den meisten betrachteten Fällen etwa in der Grössenordnung von  $10^{-4}$  bis  $10^{-3}$  pro Jahr liegt. Hieraus lässt sich berechnen, wie viele Versagensereignisse im Laufe von 40 bis 50 Jahren (im Mittel) zu erwarten sind, siehe Tab. 9.

**Tab. 9** Erwartete Anzahl Versagens-Ereignisse in Abhängigkeit der Standzeit (durchschnittliches Alter der Galerien), der jährlichen Versagens-Wahrscheinlichkeit und der Anzahl Galerien.

Anzahl Galerien	Jährliche Versagens-Wahrscheinlichkeit $P_f$			
	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$
<i>Mittleres Galeriealter: 40 Jahre</i>				
100	4.0	2.0	0.8	0.4
200	8.0	4.0	1.6	0.8
<i>Mittleres Galeriealter: 50 Jahre</i>				
100	5.0	2.5	1.0	0.5
200	10.0	5.0	2.0	1.0

Der Vergleich der Ergebnisse in Tab. 9 mit den beobachteten Versagensereignissen (keine) zeigt bereits, dass eine rechnerische Versagens-Wahrscheinlichkeit von  $10^{-4}$  pro Jahr grundsätzlich noch plausibel erscheint. Eine jährliche Versagens-Wahrscheinlichkeit von  $10^{-3}$  wird in der Praxis jedoch wohl eher nicht – zumindest nicht flächendeckend für viele Bauwerke – erreicht, da man sonst bereits erste Versagensereignisse beobachtet haben müsste. Dies wird noch deutlicher, wenn man anstelle der erwarteten Anzahl Ereignisse die Wahrscheinlichkeit berechnet, innerhalb von 40 bzw. 50 Jahren in einem Portfolio von 100 bis 200 Galerien kein Versagensereignis zu beobachten. Dies ist in Tab. 10 dargestellt.

**Tab. 10** Wahrscheinlichkeit, in einem Galerieportfolio über 40 bzw. 50 Jahre kein Versagensereignis zu beobachten, in Abhängigkeit des rechnerischen Sicherheitsniveaus und der Anzahl Galerien.

Anzahl Galerien	Jährliche Versagens-Wahrscheinlichkeit $P_f$			
	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$
<i>Mittleres Galeriealter: 40 Jahre</i>				
100	2%	14%	45%	67%
200	0%	2%	20%	45%
<i>Mittleres Galeriealter: 50 Jahre</i>				
100	1%	8%	37%	61%
200	0%	1%	14%	37%

Tab. 10 wurde unter der Annahme berechnet, dass das Auftreten von Versagensereignissen mit einem homogenen Poissonprozess beschrieben werden kann und verschiedene Galerien unabhängig voneinander versagen. In Wirklichkeit variiert die Versagenswahrscheinlichkeit mit der Schneesituation und extreme Einwirkungen innerhalb einer geografischen Region sind zumindest teilweise korreliert. Die Wahrscheinlichkeit, in 50 Jahren in den Schweizer Alpen noch keinen (für Galerietragwerke) kritischen Lawinenwinter beobachtet zu haben, ist also vermutlich grösser als die Wahrscheinlichkeit, in 50x300 unabhängigen „Galeriejahren“ kein Versagen zu sehen. Insofern sind die Wahrscheinlichkeiten in Tab. 10 wohl eher als untere Grenzwerte zu verstehen, und Versagenswahrscheinlichkeiten in der Grössenordnung von  $10^{-4}$  pro Jahr erscheinen durchaus noch als plausibel (niedrigere Werte natürlich ebenfalls).

Dennoch ist festzuhalten, dass die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit in der Berechnung wohl kaum unter-, sondern eher überschätzt wird; die realen Tragwerke sind zuverlässiger als in der Berechnung angenommen. Ein möglicher Grund hierfür sind die so genannten „hidden safeties“, versteckte Sicherheiten, die sich durch die gesamte

Bemessung von der Gefahrenbeurteilung bis zur Wahl der Querschnitte ziehen. Hierzu zählen unter anderem:

- Annahmen zu den Eingangsgrößen für die Gefahrenbeurteilung durch den Lawinenexperten: Insbesondere bei unklaren Lawinensituationen mit einer schlechten Datenlage werden in der Regel konservativere Annahmen getroffen als in klar definierten Lawinensituationen mit zahlreichen Beobachtungen.
- Interpretation des Lawinengutachtens und Annahme bzw. Verwendung der Lawineneinwirkungen durch den projektierenden Ingenieur bei der Bemessung der Galerie (inkl. Anwendung der ASTRA-Richtlinie 12007 [1])
- Verwendung von vereinfachten Tragwerks-Modellen und konservative Annahmen im Rahmen der statischen Nachweise (z.B. Berechnung im Schnitt mit einem Rahmenmodell anstelle von 3-D Modellen).
- Bemessung der Querschnitte und Bewehrung auf einen Erfüllungsgrad  $R_d / E_d \geq 1.0$

Im Gegensatz hierzu wurde in den Zuverlässigkeitsberechnungen angenommen, dass die Einwirkungen und Widerstände „im Mittel korrekt“ eingeschätzt wurden (d.h. zwar mit Unsicherheiten, aber ohne „bias“ oder konservative Annahmen) und, dass abgesehen von den Teilsicherheitsfaktoren keine zusätzlichen Sicherheiten in der Bemessung eingeführt wurden (Erfüllungsgrad 1.0, d.h.  $R_d = E_d$ ).

Eine quantitative Berücksichtigung der „hidden safeties“ in der Zuverlässigkeitsberechnung ist schwierig; zudem erlauben die Tragwerksnormen grundsätzlich, „genau“ zu rechnen und die getroffenen konservative Annahmen liegen im Ermessen der beteiligten Ingenieure und Experten. Der Vergleich mit dem beobachteten Sicherheitsniveau zeigt aber zumindest, dass es vermutlich nennenswerte versteckte Sicherheiten gibt und die vergleichsweise hohen rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeiten bis zu einer Größenordnung von  $P_f = 10^{-3}$  oder höher nicht unbedingt ein Grund zur Sorge sind.

Insgesamt erscheinen die Ergebnisse der Modellierung somit ausreichend plausibel. Die Abweichungen vom beobachteten Sicherheitsniveau sind konservativ und können durch versteckte Sicherheiten im Bemessungsprozess erklärt werden. In der Praxis bedeutet dies, dass die realen Tragwerke in der Regel sicherer sein werden als das nominelle Sicherheitsniveau, das mit der rechnerischen Zuverlässigkeit quantifiziert wird. Auch im Sinne einer wirtschaftlichen Optimierung ist eine solche Überschreitung der Ziel-Zuverlässigkeit klar besser als eine nicht konservative Abweichung, die zu deutlich höheren Versagenskosten führen würde<sup>2</sup>.

### 3.5 Berechnung der Tragwerks-Zuverlässigkeit

Die Berechnung der Tragwerks-Zuverlässigkeit von Galeriebauwerken erfolgt im Folgenden zunächst theoretisch auf Basis der in Kapitel 2.3 beschriebenen Grundlagen zu den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und zugehörigen Bemessungsgleichungen. Verschiedene Bemessungssituationen werden durch Parametervariationen unter Berücksichtigung der relevanten Eingangsgrößen erfasst.

Der Bezug zu den in Kapitel 3.3 beschriebenen Galeriestandorten wird anschliessend in Kapitel 3.6 hergestellt. Die Parameter zur Beschreibung der jeweiligen Bemessungssituation ergeben sich dort aus der Modellierung der Einwirkungen auf die betrachteten Galeriestandorte in den Fällen 1 bis 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1].

<sup>2</sup> Bei einer Optimierung der Zuverlässigkeit ist die Zielfunktion auf der „sicheren“ Seite in der Regel deutlich flacher als auf der „unsicheren“ Seite.

### 3.5.1 Zuverlässigkeit in verschiedenen Bemessungssituationen

In Abschnitt 2.3.2 wurde eine allgemeine Grenzzustandsfunktion hergeleitet (Gleichung (1.11)), mit der die Zuverlässigkeit einer Lawingalerie berechnet werden kann. Die probabilistischen Modelle der Zufallsvariablen sind in Tab. 8 zusammengefasst.

Die Zuverlässigkeit wird einerseits durch die Streuung sowie den Verteilungstyp der verschiedenen Zufallsvariablen bestimmt, andererseits aber natürlich auch durch die Bemessung. Letztere bestimmt, wie weit die Verteilung von Widerstand und Einwirkung auseinanderliegen und somit auch, wie stark sie sich im Schwanzbereich der Verteilungskurven überschneiden. Um den Einfluss der Bemessung zu berücksichtigen, wurde in Abschnitt 2.3.3 eine allgemeine Bemessungsgleichung definiert, mit der das Verhältnis  $z = \mu_R / \mu_E$  zwischen den Mittelwerten des Widerstands und der Einwirkung bestimmt wird.

Die konkrete Bemessungssituation wird durch die folgenden Einflussgrößen beschrieben:

- Lawineneinwirkung  $Q$  : Von Bedeutung ist insbesondere die Variation der Lawineneinwirkung, aber auch ihr Verteilungstyp
- Widerstand  $R$  : Das Baumaterial, das bei einem Ereignis zuerst versagt, bestimmt den Verteilungstyp sowie den Variationskoeffizienten  $v_R$  des Widerstands
- Ständige Einwirkung  $G$  : Der Anteil der ständigen Einwirkung,  $\alpha_G = \mu_G / (\mu_G + \mu_E)$ , bestimmt, welchen Beitrag diese zur gesamten Einwirkung hat.

Tab. 11 fasst zusammen, welchen (rechnerischen) Einfluss diese drei Faktoren in der Grenzzustandsfunktion und der Bemessungsgleichung haben; der Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Galerietragwerks wird im Anschluss für jeden der drei Punkte separat diskutiert.

Für alle Bemessungssituationen wird angenommen, dass die Galerie zusätzlich zur Bemessung auf das 30-jährige Ereignis (als veränderliche Einwirkung) auch auf das 300-jährige Ereignis bemessen wird (aussergewöhnliche Bemessungssituation). Auf die Grenzzustandsfunktion hat dies keinen Einfluss, da es sich bei den beiden Ereignissen letztlich nur um unterschiedliche Ausprägungen bzw. Fraktilwerte derselben Verteilung (für die Zufallsvariable  $Q$ ) handelt. Allerdings ändert sich die Bemessungsgleichung, was indirekt – über die Bemessungsvariable  $z = \mu_R / \mu_E$  – auch die Zuverlässigkeitsanalyse mit Hilfe der Grenzzustandsfunktion beeinflusst. In der Praxis wird allerdings nur eine der beiden Bemessungssituationen massgebend sein und die Zuverlässigkeit der Galerie bestimmen. Relevant sind daher jeweils die Ergebnisse für die beiden Bemessungssituationen (T=30 bzw. T=300), bei denen die rechnerische Zuverlässigkeit höher bzw. die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit niedriger ist.

**Tab. 11** Einfluss der Bemessungssituation in der Grenzzustandsfunktion (Gleichung (1.11)) sowie in der Bemessungsgleichung (Gleichung (1.14)) bei Bemessung auf das 30-jährige bzw. 300-jährige Ereignis.

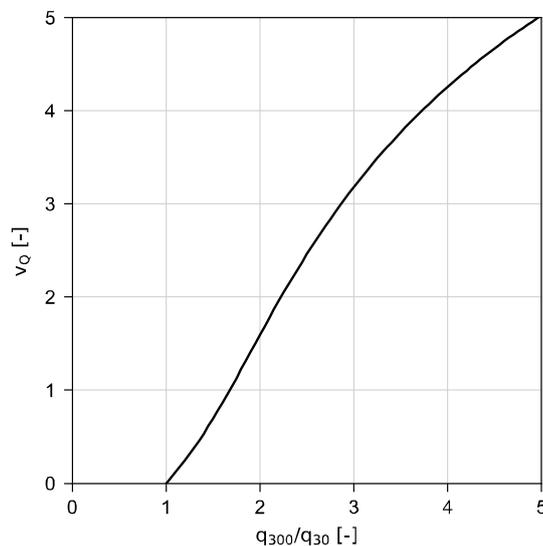
Einflussgrösse	Einfluss in der Grenzzustandsfunktion	Einfluss in der Bemessungsgleichung	
		Bemessung T=30	Bemessung T=300
Variation der Lawineneinwirkung	Verteilungstyp, $v_Q = f(q_{300}/q_{30})$	$\rho_Q = Q_k / \mu_Q = q_{30} / \mu_Q$ $\gamma_Q = 1.5$ (und $\gamma_G = 1.35$ )	$\rho_Q = Q_k / \mu_Q = q_{30} / \mu_Q$ $\gamma_Q, \gamma_G$ entfallen
Baumaterial der Galerie	Widerstand $R$ : Verteilungstyp, $v_R$	$\rho_R = R_k / \mu_R$ $\gamma_M$ je nach Material	
Anteil der ständigen Einwirkung	$\alpha_G = \frac{\mu_G}{\mu_G + \mu_Q}$	$\chi_{30} = \frac{G_k}{G_k + q_{30}} = f(\alpha_G)$	$\chi_{300} = \frac{G_k}{G_k + q_{300}} = f(\alpha_G)$

### 3.5.2 Variation der Lawineneinwirkung

Einen wesentlichen Beitrag zur Versagenswahrscheinlichkeit von Lawinengalerien hat die grosse Unsicherheit der Lawineneinwirkung, die durch den Variationskoeffizienten  $v_Q$  bestimmt wird. Die Variation der Lawineneinwirkung wird hier bezogen auf den Mittelwert  $\mu_Q$  der Verteilung für das jährliche Maximum. Wegen der grossen Streuung der Lawineneinwirkung ist der Mittelwert der Verteilung allerdings ein theoretischer Wert, ein «Verteilungsparameter» ohne direkte praktische Relevanz. Dies erschwert die Interpretation des Variationskoeffizienten  $v_Q$ , der als Standardabweichung der Verteilung bezogen auf den Mittelwert definiert ist.

Für die Praxis spielt der Mittelwert der Lawineneinwirkung ohnehin keine Rolle, sondern lediglich der obere Schwanz der Verteilung; insbesondere die Fraktilwerte  $q_{30}$  und  $q_{300}$ , die dem 30-jährigen und dem 300-jährigen Ereignis entsprechen. Um die Interpretation der Ergebnisse zu erleichtern, wird deshalb die Streuung der Lawineneinwirkung in der vorliegenden Untersuchung über das Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$  dieser beiden Ereignisse ausgedrückt. Für einen gegebenen Verteilungstyp besteht ein direkter Zusammenhang zum Variationskoeffizienten  $v_Q$ .

In Abb. 15 ist dieser Zusammenhang am Beispiel der Gammaverteilung dargestellt. Diese Verteilung wird in Kapitel 4 für die Modellierung der Lawineneinwirkungen verwendet; sie ist gut geeignet, um die Einwirkungs-Verteilung unter Berücksichtigung der Schätzunsicherheit (prädiktive Verteilung) zu repräsentieren. Für andere Verteilungstypen lassen sich ähnliche Kurven herleiten. Da abgesehen von den Analysen in Kapitel 4 kaum Grundlagen für die Wahl des Verteilungsmodells zur Verfügung stehen, wird in dieser Untersuchung aber stets die Gamma-Verteilung als Grundlage für die probabilistische Modellierung der Lawineneinwirkungen verwendet. Durch die Verwendung des Verhältnisses  $q_{300}/q_{30}$  anstelle des Variationskoeffizienten  $v_Q$  wird garantiert, dass der Schwanzbereich der Verteilung die Einschätzung der Lawinenexperten möglichst gut repräsentiert.



**Abb. 15** Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Fraktilwerte  $q_{300}/q_{30}$  (Verhältnis der 300- zur 30-jährigen Lawineneinwirkung) und dem Variationskoeffizienten  $v_Q$  der veränderlichen Einwirkung bei Annahme einer Gamma-Verteilung für  $Q$ .

Die Variation der Lawineneinwirkung beeinflusst die Zuverlässigkeitsanalyse einerseits direkt (Verteilung der Zufallsvariablen  $Q$ ), andererseits aber auch indirekt über die Bemessung: Bei grösserer Streuung steigt nicht nur das Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$ , sondern auch das Verhältnis der beiden Fraktilwerte zum Mittelwert der Verteilung. Da die Fraktilwerte als charakteristische Werte verwendet werden, führt dies insbesondere bei der Bemessung auf das 300-jährige Ereignis zu deutlich grösseren Bemessungseinwirkungen und damit

zu einer höheren Zuverlässigkeit der Bemessung. Die konservative Wahl der charakteristischen Werte wirkt dem negativen Effekt einer grösseren Streuung entgegen.

Die im Folgenden zusammengestellten Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse werden stets grafisch in Abhängigkeit des Verhältnisses  $q_{300}/q_{30}$  dargestellt, das als Mass für die Variation bzw. Unsicherheit der Lawineneinwirkungen dient.

### 3.5.3 Baumaterial der Galerie

Die meisten Lawingalerien werden in Stahlbetonbauweise erstellt. Auf der Widerstandsseite werden für die Zuverlässigkeitsanalyse die folgenden Fälle unterschieden:

- Versagen des Tragwerks (Grenzzustand Typ 2):
  - Betonstahl: Zugversagen der Bewehrung dominiert bzw. initiiert das Versagen
  - Beton: Druckversagen des Betons dominiert bzw. initiiert das Versagen
- Versagen des Baugrunds (Grenzzustand Typ 3):
  - Baugrundeigenschaft mit geringer Variabilität dominiert bzw. initiiert das Versagen
  - Baugrundeigenschaft mit hoher Variabilität dominiert bzw. initiiert das Versagen

Ergebnisse für die Zuverlässigkeit des Tragwerks bzw. des Baugrunds sind in Abb. 16 und Abb. 17 dargestellt, jeweils für die Bemessung auf das 30-jährige sowie das 300-jährige Ereignis. Am linken Rand der beiden Abbildungen ist die Streuung der Lawineneinwirkung klein und die Bemessung auf das 30-jährige Ereignis mit Berücksichtigung der Lastbeiwerte  $\gamma_Q$  und  $\gamma_G$  ist zuverlässiger, als die Bemessung auf das 300-jährige Ereignis. Mit steigendem Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$  wird insbesondere das 300-jährige Ereignis deutlich grösser, was den Verzicht auf Lastbeiwerte in der aussergewöhnlichen Bemessung schliesslich kompensiert; im rechten Teil der Abbildungen ist deshalb das 300-jährige Ereignis massgebend.

Der Einfluss der ruhenden Einwirkung (Anteil  $\alpha_G = \mu_G/\mu_E$ ) wird weiter unten noch im Detail diskutiert, siehe Kapitel 3.5.4 für Details.

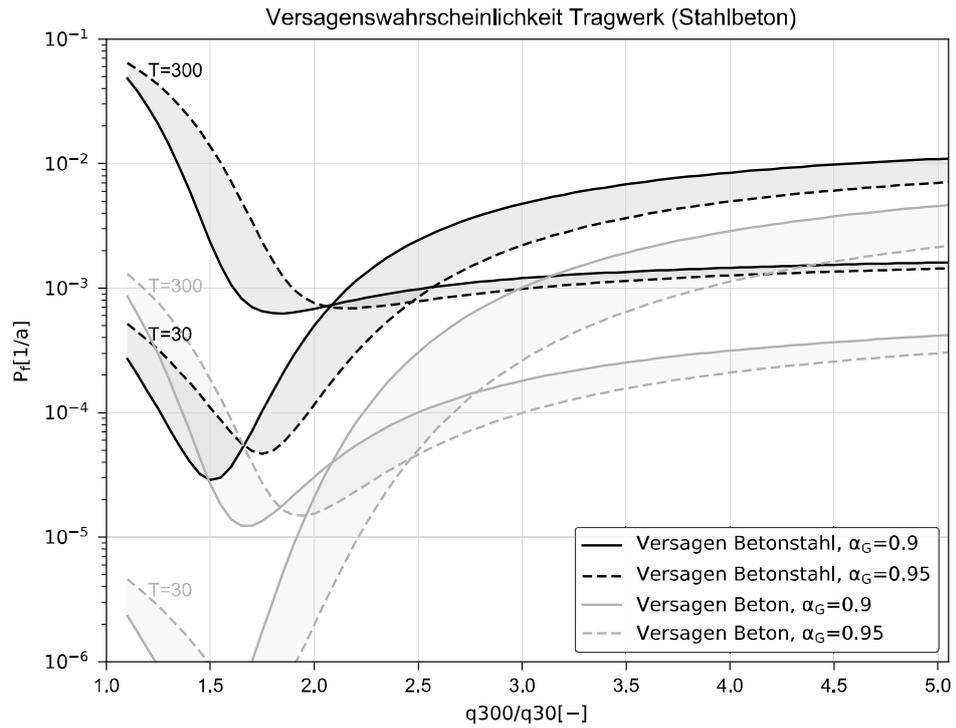
Für die Zuverlässigkeit des Tragwerks massgebend ist beim Grenzzustand Typ 2 das «schwächste Glied», also das Baumaterial mit der höheren Versagenswahrscheinlichkeit. Abb. 16 zeigt klar, dass dies der Betonstahl ist, ein Druckversagen des Betons ist deutlich weniger wahrscheinlich. Dieses Verhalten ist kein Zufall, sondern auf eine gezielte Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$  zurückzuführen: um ein sprödes Versagen durch Überschreitung der Betondruckfestigkeit zu vermeiden, zielt die Kalibrierung der Tragwerksnormen darauf, eher ein Bewehrungsversagen zuzulassen.

Diese Überlegungen trifft zu für alle Bauteile bei denen man duktilen Versagen erwartet, bzw. für alle Bauteile, die man so bemisst, dass duktilen Tragwerksversagen massgebend wird. Hier steht die Modellierung der Einwirkung im Fokus und das globale Tragwerksversagen. Lokales Versagen und Stabilitätsprobleme sind hier nicht explizit betrachtet.

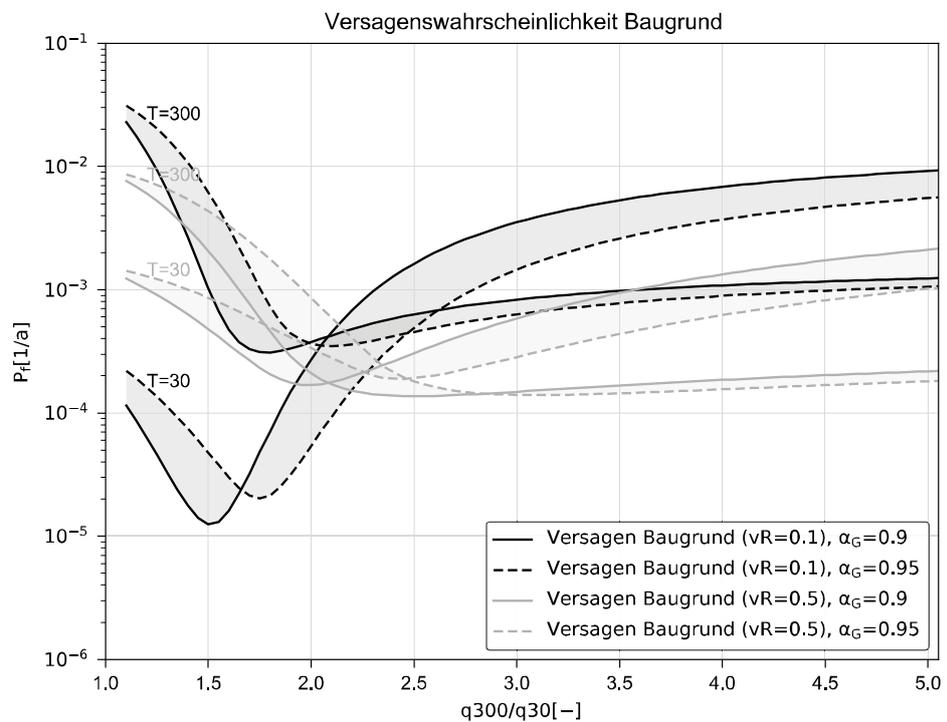
In Abb. 16 nicht dargestellt ist die Versagenswahrscheinlichkeit von Baustahl unter Lawineneinwirkung. Dieser verhält sich grundsätzlich ähnlich wie der Bewehrungsstahl: der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  ist zwar kleiner als beim Bewehrungsstahl (bei gleichem Variationskoeffizienten  $v_R$ ), aus Zuverlässigkeitssicht günstig wirkt aber der sehr kurze Schwanz der Lognormalverteilung für untere Fraktile, die auf der Widerstandsseite das Versagen bestimmen (im Gegensatz zur Normalverteilung für Bewehrungsstahl, die auf beiden Seiten einen nennenswerten Schwanz hat). Dennoch ist bei einer Lawingalerie mit Stahlstützen im Ereignisfall möglicherweise eher mit einem Versagen der Stütze zu rechnen als mit einem Versagen der Stahlbetonbauteile. Dies ist aber natürlich auch abhängig vom statischen System und der konkreten Bemessung.

Abb. 17 zeigt die Wahrscheinlichkeit eines Baugrundversagens unter Lawineneinwirkung, z.B. Böschungsversagen bzw. statischer Grundbruch. Da die probabilistische Modellierung des Baugrunds für den Grenzzustand Typ 3 sehr standortspezifisch ist, sind die beiden Fälle mit unterschiedlicher Variabilität (in der Abbildung schwarz und grau dargestellt) als Grenzfälle zu verstehen, die unabhängig von der jeweiligen Versagenswahrscheinlichkeit an einem bestimmten Standort massgebend sein können. Entgegen der Intuition ist die Versagenswahrscheinlichkeit beim Grenzfall mit niedriger Variabilität höher; dies lässt sich allerdings dadurch erklären, dass hier auch ein niedrigerer Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  verwendet wurde als in dem Grenzfall mit hoher Variabilität.

In den folgenden Abschnitten wird auf eine Differenzierung nach Baumaterialien verzichtet; die Berechnungen beziehen sich stets auf den Fall eines Tragwerksversagens durch Zugversagen der Bewehrung. Auch ein mögliches Versagen des Baugrunds wird nicht mehr weiter betrachtet. Diese Vereinfachung ist durch den Fokus der vorliegenden Untersuchung begründet, der auf der Modellierung der Einwirkungen liegt. Die Ergebnisse in Abb. 16 und Abb. 17 zeigen, dass ein anderes Widerstandsmodell zumindest nicht zu deutlich grösseren Versagenswahrscheinlichkeiten führen würde.



**Abb. 16** Versagenswahrscheinlichkeit von Galerietragwerken aus Stahlbeton durch Zugversagen der Bewehrung (schwarz) bzw. Druckversagen des Betons (grau). Die Bewehrung bestimmt als «schwächstes Glied» die Zuverlässigkeit.



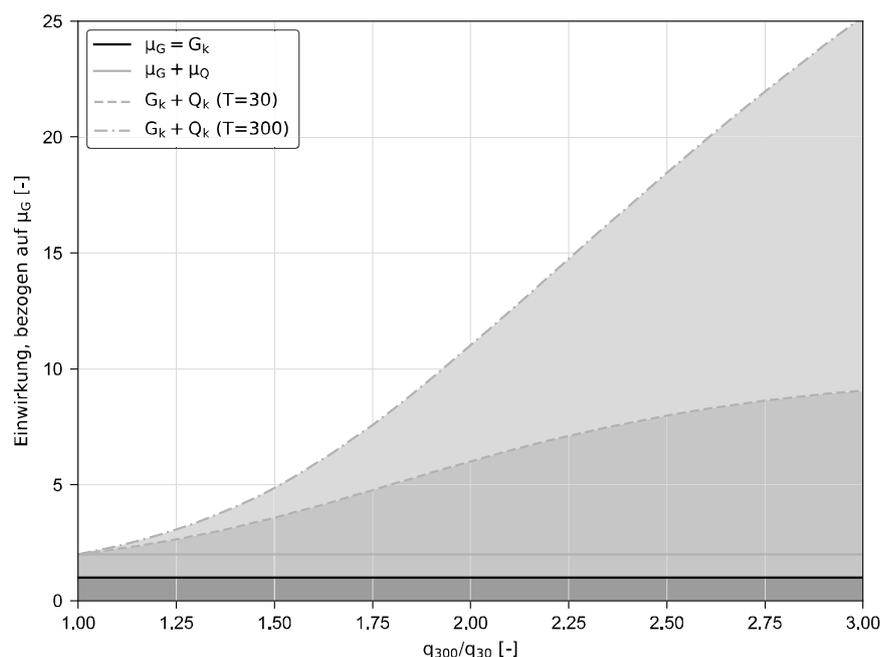
**Abb. 17** Versagenswahrscheinlichkeit des Baugrunds mit geringer ( $v_R=0.1$ ,  $\gamma_M=1.2$ ) bzw. hoher ( $v_R=0.5$ ,  $\gamma_M=1.5$ ) Variabilität als Grenzfälle oder Beispiele für denkbare, standortspezifische Bemessungssituationen.

### 3.5.4 Anteil der ständigen Einwirkung

Zusätzlich zur Lawineneinwirkung als veränderliche bzw. aussergewöhnliche Einwirkung wirken auch bedeutende ständige Einwirkungen auf das Tragwerk einer Lawingalerie: das Eigengewicht der Struktur und vor allem die Erdauflast, die aufgebracht wird, um die Lawine über die Galerie hinwegzuleiten oder auch, um die Galerie vor einer Beschädigung durch mögliche Steinschläge zu schützen.

Wie gross der Beitrag der ständigen Einwirkung ist, hängt von der konkreten Bemessungssituation ab. In der allgemeinen Grenzzustandsfunktion sowie in der zugehörigen Bemessungsgleichung wird der Anteil der ständigen Einwirkung über das Verhältnis  $\alpha_G = \mu_G / \mu_E = \mu_G / (\mu_G + \mu_Q)$  modelliert. Weil sich dieses Verhältnis auf den Mittelwert der Einwirkungen bezieht, ist die Interpretation dieser Grösse leider nicht besonders intuitiv. Das liegt daran, dass der Mittelwert  $\mu_Q$  der Lawineneinwirkung eine rein theoretische Grösse ist, die aber in einem direkten Zusammenhang mit den charakteristischen Werten  $Q_k = q_{30}$  bzw.  $q_{300}$  steht.

In Abb. 18 ist dieser Zusammenhang für das theoretische Beispiel  $\alpha_G = 0.5$  (d.h.  $\mu_G = \mu_Q$ ) dargestellt. Der charakteristische Wert  $G_k$  ist als Median der normalverteilten ständigen Einwirkung definiert und entspricht somit dem Mittelwert  $\mu_G$ . Für die veränderliche Einwirkung gilt dieser Zusammenhang nicht bzw. nur im unrealistischen Grenzfall  $q_{300}/q_{30} = 1.0$  (Variationskoeffizient  $v_Q = 0$ ) am linken Ende der Grafik. Mit zunehmender Streuung der Lawineneinwirkung nehmen die charakteristischen Werte schnell zu, vor allem für das 300-jährige Ereignis, das als oberer Fraktilwert der Verteilung mit einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $1/300$  definiert ist.



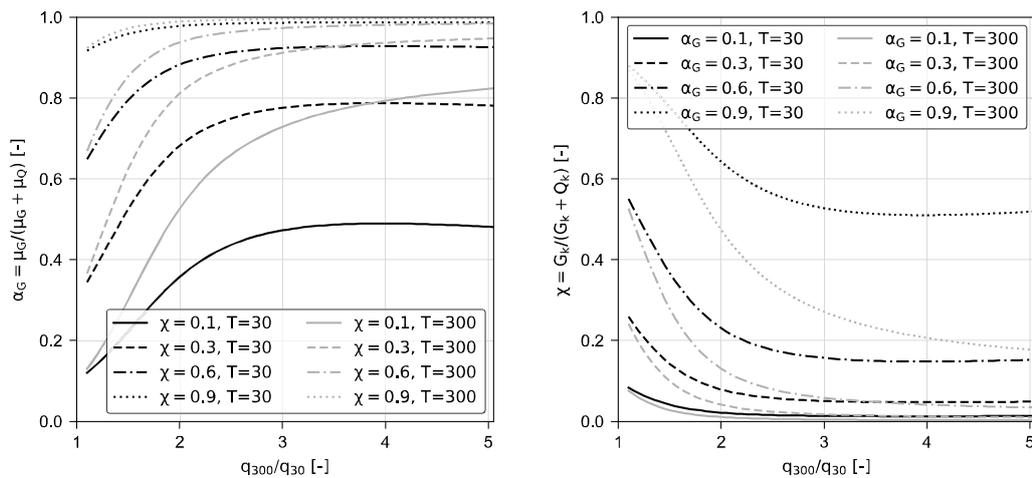
**Abb. 18** Illustration des Zusammenhangs zwischen den Mittelwerten  $\mu_G$  und  $\mu_Q$  der ständigen und veränderlichen Einwirkung sowie ihren charakteristischen Werten  $G_k$  und  $Q_k$  unter Annahme von  $\alpha_G = \mu_G / (\mu_G + \mu_Q) = 0.5$  und den folgenden Verteilungsannahmen:  $G \square Normal(v_G = 0.15)$ ,  $Q \square Gamma(v_Q = f(q_{300}/q_{30}))$ .

Etwas einfacher zu interpretieren als das Verhältnis der Mittelwerte,  $\alpha_G$ , ist das folgende Verhältnis, das über die charakteristischen Werte der beiden Einwirkungen definiert wird:

$$\chi = \frac{G_k}{G_k + Q_k} = f(\alpha_G, q_{300}/q_{30}) \quad (2.1)$$

Zum Verhältnis der Mittelwerte  $\alpha_G$  besteht ein direkter Zusammenhang, allerdings fließt hier auch die Verteilung (insbesondere die Streuung) der veränderlichen Einwirkung ein, ebenso wie die Definition der charakteristischen Lawineneinwirkung  $Q_k$  als 30-jähriges oder 300-jähriges Ereignis.

Der Zusammenhang zwischen den Verhältnissen  $\alpha_G$  und  $\chi$  ist in Abb. 19 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass der Beitrag der ständigen Einwirkung bezogen auf den Mittelwert (Verhältnis  $\alpha_G$ ) auch bei niedrigen Werten für das Verhältnis  $\chi$  bezogen auf die charakteristischen Werte schnell auf Werte von 0.5 oder höher ansteigt. Umgekehrt bedeuten sehr hohe Werte für  $\alpha_G$  nicht unbedingt, dass die ständige Einwirkung auch in einer realen Bemessung den grössten Beitrag zum charakteristischen Wert der gesamten Einwirkung hat. Dies sollte bei der Interpretation der Ergebnisse für die Zuverlässigkeit in Abhängigkeit von  $\alpha_G$  berücksichtigt werden.



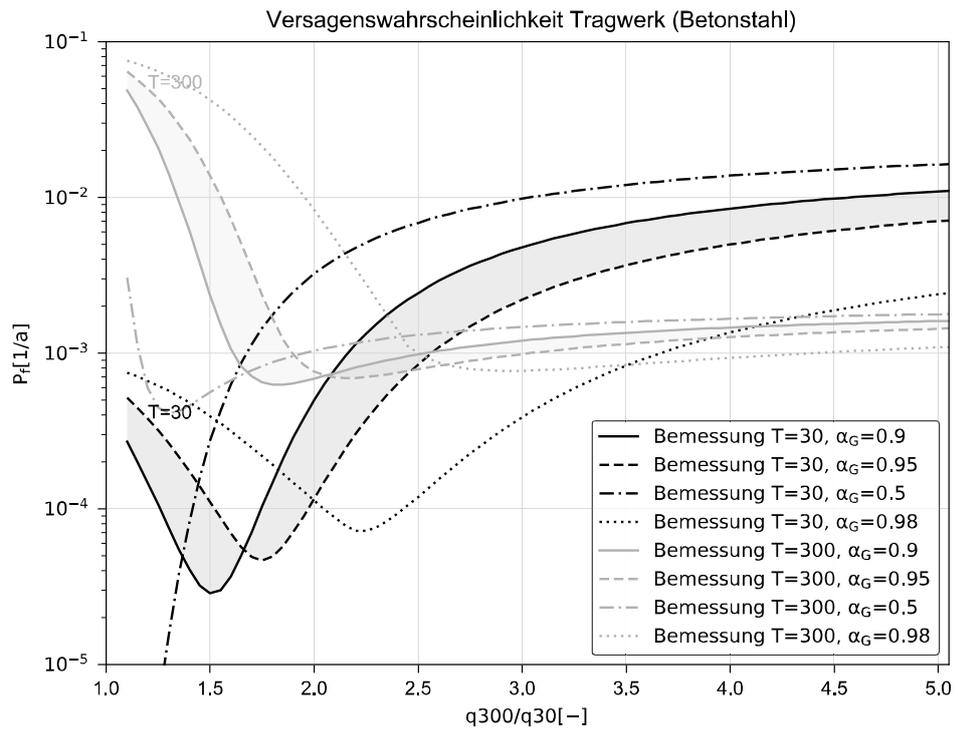
**Abb. 19** Zusammenhang der Verhältnisse  $\alpha_G$  und  $\chi$  (Gleichung (2.1)) bei Bemessung auf das 30-jährige (schwarz) sowie das 300-jährige Ereignis.

Für die in den folgenden Abschnitten zusammengestellten Zuverlässigkeitsberechnungen wird das Verhältnis der Mittelwerte  $\alpha_G$  verwendet; durch die in Abb. 19 dargestellten komplexen Abhängigkeiten würde die Zuverlässigkeitsanalyse sonst unnötig verkompliziert. Bei Betrachtung konkreter Galerieabschnitte werden im Sinne einer leichteren Interpretierbarkeit der Ergebnisse aber auch Angaben zum zugehörigen Verhältnis der charakteristischen Werte  $\chi$  gemacht.

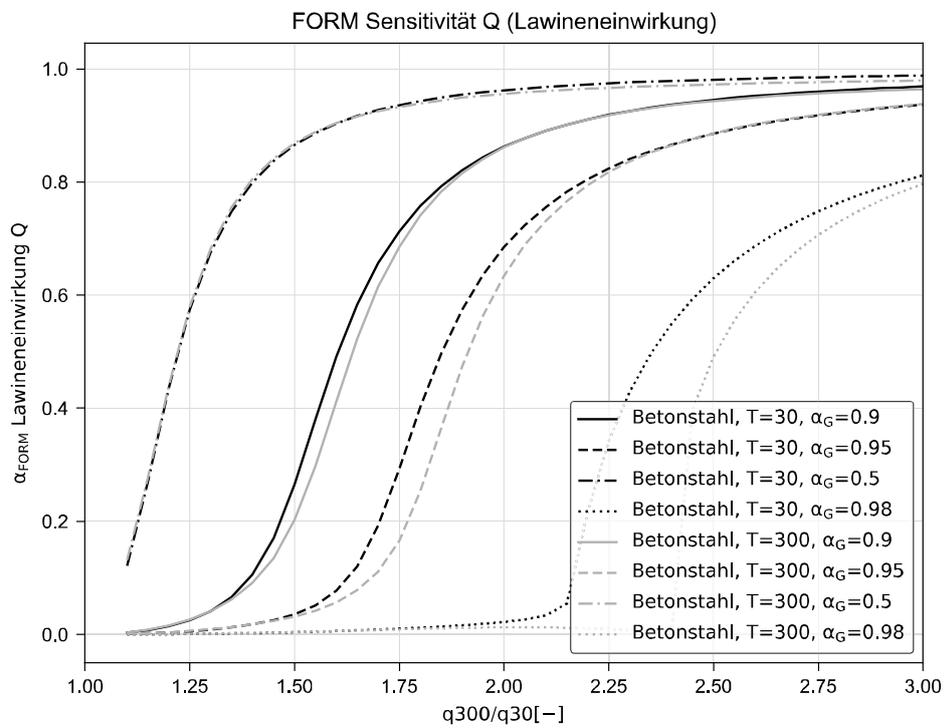
Die Sensitivität der Zuverlässigkeit bei Variation des Verhältnisses  $\alpha_G$  wird in Abb. 20 aufgezeigt. Wie oben diskutiert wurde, sind vor allem Werte von  $\alpha_G = 0.5$  oder grösser von Interesse. Der grau schattierte Bereich entspricht z.B. grob der Bandbreite, die für die Modellierung von Fall 1 und an den stärksten belasteten Abschnitten der in Kapitel 3.6 betrachteten Galeriebauwerke relevant ist. In den Fällen 2 bis 4 sind die Lawineneinwirkungen etwas höher und der Anteil der ständigen Einwirkung  $\alpha_G$  an den stärksten belasteten Abschnitten auf Werte in der Grössenordnung von  $\alpha_G = 0.85$  bzw. etwas höher.

Allgemein gilt, dass ein grosser Anteil der ständigen Einwirkung günstig wirkt, wenn die Streuung der Lawineneinwirkung gross ist (grosse Werte für  $q_{300}/q_{30}$ ) und die Zuverlässigkeit des Tragwerks durch die Streuung der Lawineneinwirkung dominiert wird. Die Variable  $\alpha_G$  beeinflusst aber auch das Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$ , ab dem die Bemessung auf das 300-jährige Ereignis massgebend wird: Je grösser der Anteil der ständigen Einwirkung  $\alpha_G$ , desto grösser die Streuung, ab der die Bemessung auf das aussergewöhnliche Ereignis sicherer wird. Für den theoretischen Grenzfall  $\alpha_G = 0$  (Lawineneinwirkung als einzige Last) ist dies bereits ab einem Verhältnis  $q_{300}/q_{30} = 1.5$  der Fall; dies entspricht dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_Q$  bei Bemessung auf das 30-jährige Ereignis.

In Abb. 21 ist der FORM-Sensitivitätsfaktor der Lawineneinwirkung  $Q$  in Abhängigkeit von  $q_{300}/q_{30}$  und  $\alpha_G$  dargestellt (FORM steht hier für «First Order Reliability Method»). Grosse Sensitivitätsfaktoren  $\alpha_{FORM} \rightarrow 1.0$  bedeuten, dass die Zuverlässigkeitsanalyse durch die Lawineneinwirkung dominiert wird. Dies ist vor allem für grosse  $q_{300}/q_{30}$  der Fall. Je grösser der Anteil der ständigen Last  $\alpha_G$ , desto später kommt es allerdings zu einem Anstieg des Sensitivitätsfaktors, d.h. die Lawineneinwirkung spielt nur dann eine grosse Rolle, wenn ihre Streuung sehr gross wird.



**Abb. 20** Versagenswahrscheinlichkeit des Bewehrungsstahls unter Lawineneinwirkung bei Bemessung auf das 30-jährige (schwarz) bzw. 300-jährige Ereignis (grau) für verschiedene Anteile der ständigen Last,  $\alpha_G = \mu_G / (\mu_G + \mu_Q)$ .



**Abb. 21** FORM-Sensitivitätsfaktor der Lawineneinwirkung  $Q$  für verschiedene Anteile  $\alpha_G$  der ständigen Einwirkung als Indikator für den Beitrag der Zufallsvariablen  $Q$  zum Grenzzustand «Zugversagen der Bewehrung».

## 3.6 Berechnung der Zuverlässigkeit in den Fällen 1 bis 4

In Kapitel 3.4 wurde der Einfluss verschiedener Parameter auf die Zuverlässigkeit einer Lawinengalerie theoretisch untersucht. Um die Zuverlässigkeit der bestehenden Vorschriften weiter einzugrenzen, werden im Folgenden die in Kapitel 3.3 beschriebenen Galeriestandorte, die Galerie Salezer Davos und die Galerie am Oberalppass, untersucht. Hierfür werden die folgenden Annahmen getroffen:

- **Materialversagen:** Zugversagen der Bewehrung dominiert die Zuverlässigkeit
- **Bemessungssituation:** Bemessung auf das 30-jährige und das 300-jährige Ereignis; massgebend ist jeweils der Fall, der zu einer höheren Zuverlässigkeit der Galerie führt
- **Variation der Lawineneinwirkung:** Festlegung gemäss der probabilistischen Modellierung in Kapitel 4, inklusive Schätzunsicherheit
- **Anteil der ständigen Einwirkung:** Lawineneinwirkung gemäss Kapitel 4, zusätzliche Annahmen zu Eigengewicht und Erdauflast

Die Unsicherheit bzw. Streuung der Lawineneinwirkung wird durch das Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$  quantifiziert. Die beiden Fraktile für das 30-jährige sowie das 300-jährige Ereignis werden hierfür unter Berücksichtigung der Schätzungenauigkeit festgelegt, siehe Kapitel 4 für Details. Dies bedeutet, dass sowohl die natürliche Streuung der Lawineneinwirkung berücksichtigt ist als auch die Unsicherheit bei der Beurteilung der Lawineneinwirkung. Der Einfluss der Schätzunsicherheit auf die Festlegung der charakteristischen Werte und damit auf die Bemessung wird in Kapitel 3.2.1 noch explizit diskutiert.

Von den Einwirkungskombinationen gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] werden die Fälle 1 bis 4 untersucht, siehe Kapitel 3.2 für Details.

### 3.6.1 Fall 1: Fliesslawine auf schneefreiem Galeriedach

Fall 1 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] wird für beide Galerien, Salezer und Oberalp, mit demselben Ansatz modelliert. Die Galeriestandorte sind in Kapitel 3.3 beschrieben, die probabilistische Modellierung der Einwirkungen in Kapitel 4.2. Die Lawinensituation an den beiden Standorten lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Galerie Salezer:
  - Lawinenanriss aus schwer abgrenzbaren (Teil-)Anrissgebieten
  - Kanalisierung der Lawine im Salezertobel
  - Kein nennenswerter Geländeknick oberhalb der Galerie (keine Umlenkkraft)
- Galerie Oberalp:
  - Drei Lawinenzüge mit 9 Anrissgebieten
  - Mehrheitlich Flächenlawinen, d.h. keine oder nur mässige Kanalisierung
  - Mehrheitlich Nass- oder Gleitschneelawinen

Die Variation und Schätzunsicherheit der Lawineneinwirkungen auf die beiden Galerien wird in Kapitel 4.2.6 diskutiert. Bei der Salezer Galerie ist die Schätzunsicherheit für die Einwirkungen im 30- und 300-jährigen Szenario etwas höher als am Oberalppass.

Im Folgenden wird zunächst erklärt, wie der Anteil der ständigen Einwirkungen auf die beiden Galerien ermittelt wird und wie die Schätzunsicherheit der Lawineneinwirkungen in die Berechnungen einfließt. Im Anschluss folgt eine Diskussion der Ergebnisse aus der Zuverlässigkeitsanalyse.

*Anteil der ständigen Einwirkung aus Eigengewicht und Erdauflast*

Der Anteil der ständigen Einwirkung,  $\alpha_G = \mu_G / (\mu_G + \mu_Q)$ , wird wie folgt bestimmt:

- Abschätzung der ständigen Einwirkung  $\mu_G$  aus Eigengewicht und (Erd-)Auflast; der Mittelwert der Einwirkung entspricht hier dem charakteristischen Wert  $G_k$ .
  - Salezer: Annahme einer Auflast von im Mittel ca. 2m (Galeriedecke und Erdauflast) mit einer durchschnittlichen Wichte von 20kN/m<sup>3</sup>
  - Oberalp: Annahme einer Auflast von im Mittel ca. 3m (Galeriedecke und Erdauflast) mit einer durchschnittlichen Wichte von 20kN/m<sup>3</sup>
- Bestimmung der variablen Einwirkung  $\mu_Q$  als Mittelwert der prädiktiven Verteilung  $Q$  (Kapitel 4.2.6); der Mittelwert der Lawineneinwirkung ist ein theoretischer Wert.
- Zur einfacheren Interpretation: Ableitung des Verhältnisses  $\chi = G_k / (G_k + Q_k)$  für die Bemessung auf das 30-jährige sowie auf das 300-jährige Ereignis. Der Zusammenhang zwischen  $\alpha_G$  und  $\chi$  wird in Kapitel 3.5.4 diskutiert.

Die Ergebnisse sind in Tab. 12 und Tab. 13 zusammengefasst. In der Mitte der Galerie Salezer bzw. in den für die drei Lawinenzüge am Oberalppass massgebenden Abschnitten (fett gedruckt in den beiden Tabellen) sind die Lawineneinwirkungen am höchsten und der Anteil der ständigen Einwirkungen vergleichsweise gering. Die Erdauflast führt allerdings allgemein zu einem recht hohen Anteil der ruhenden Lasten.

**Tab. 12** Anteil der ständigen Einwirkung  $\alpha_G = \mu_G / (\mu_G + \mu_Q)$  bzw.  $\chi = G_k / (G_k + Q_k)$  für die Galerie Salezer (Fall 1). Die Fraktilwerte der Lawineneinwirkung entstammen der prädiktiven Verteilung (inkl. Schätzunsicherheit), siehe Tab. 25.

Salezer Abschnitt	Mittelwerte		Fraktilwerte			Anteil ruhender Last		
	$\mu_G$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\mu_Q$ [kN/m <sup>2</sup> ]	q30 [kN/m <sup>2</sup> ]	q300 [kN/m <sup>2</sup> ]	300/30 [-]	$\alpha_G$ [-]	$\chi$ (T30) [-]	$\chi$ (T300) [-]
Zone 1	40	0.59	4.94	16.50	3.34	0.986	0.89	0.71
Zone 2	40	0.75	6.24	20.01	3.21	0.982	0.87	0.67
Zone 3	40	2.12	12.98	29.23	2.25	0.950	0.75	0.58
Zone 4	<b>40</b>	<b>2.70</b>	<b>17.51</b>	<b>41.15</b>	<b>2.35</b>	<b>0.937</b>	<b>0.70</b>	<b>0.49</b>
Zone 5	40	1.45	11.71	35.38	3.02	0.965	0.77	0.53
Zone 6	40	0.91	7.74	36.08	4.66	0.978	0.84	0.53
Zone 7	40	0.25	1.75	13.70	7.84	0.994	0.96	0.74

**Tab. 13** Anteil der ständigen Einwirkung  $\alpha_G = \mu_G / (\mu_G + \mu_Q)$  bzw.  $\chi = G_k / (G_k + Q_k)$  für die Galerie am Oberalppass (Fall 1). Die Fraktilwerte der Lawineneinwirkung entstammen der prädiktiven Verteilung (inkl. Schätzunsicherheit), siehe Tab. 26. Modelliert hier als Resultierende aller Kräfte pro Laufmeter Galerie.

Oberalp Abschnitt	km	Mittelwerte		Fraktilwerte			Anteil ruhender Last		
		$\mu_G$ [kN/m]	$\mu_Q$ [kN/m]	q30 [kN/m]	q300 [kN/m]	300/30 [-]	$\alpha_G$ [-]	$\chi$ (T30) [-]	$\chi$ (T300) [-]
I1	76790	720	8.8	73.8	356.6	4.8	0.988	0.91	0.67
	76810	720	20.2	158.8	455.5	2.9	0.973	0.82	0.61
	76830	720	24.0	176.4	464.6	2.6	0.968	0.80	0.61
	76850	<b>720</b>	<b>45.0</b>	<b>280.2</b>	<b>639.2</b>	<b>2.3</b>	<b>0.941</b>	<b>0.72</b>	<b>0.53</b>
	76870	720	27.8	236.4	817.1	3.5	0.963	0.75	0.47
	76890	720	18.7	161.7	623.8	3.9	0.975	0.82	0.54
I2	76990	720	22.8	126.7	268.6	2.1	0.969	0.85	0.73
	77010	720	23.8	132.5	281.2	2.1	0.968	0.84	0.72
	77030	<b>720</b>	<b>72.3</b>	<b>234.7</b>	<b>386.0</b>	<b>1.6</b>	<b>0.909</b>	<b>0.75</b>	<b>0.65</b>
I3	77090	<b>720</b>	<b>31.3</b>	<b>175.7</b>	<b>374.3</b>	<b>2.1</b>	<b>0.958</b>	<b>0.80</b>	<b>0.66</b>
	77110	720	42.5	162.9	287.4	1.8	0.944	0.82	0.71

### Berücksichtigung der Schätzunsicherheit und Wahl der charakteristischen Werte

Die Angaben in Tab. 12 und Tab. 13 – insbesondere die Fraktilwerte  $q_{300}$  und  $q_{30}$  sowie ihr Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$  – beziehen sich auf die so genannte prädiktive Verteilung, d.h. zusätzlich zur natürlichen Streuung der Lawineneinwirkung ist auch die Schätzunsicherheit bei der Beurteilung der Szenarien durch Lawinenexperten enthalten. In der Zuverlässigkeitsanalyse, d.h. in der Grenzzustandsfunktion (Gleichung (1.11) in Kapitel 2.3.2), werden beide Unsicherheiten berücksichtigt.

Für die Zuverlässigkeit der Galerie ist aber auch relevant, wie der charakteristische Wert der Lawineneinwirkung für die Bemessung auf das 30-jährige bzw. 300-jährige Ereignis festgelegt wird, da dieser bestimmt, wie «sicher» die Bemessung ist. Hierfür werden in Bezug auf die Schätzunsicherheit zwei verschiedene Annahmen untersucht:

- **«Prädiktive Fraktile»:** Die Fraktilwerte für die beiden Ereignisse (T=30 bzw. 300 Jahre) werden der prädiktiven Verteilung entnommen, d.h. der charakteristische Wert enthält bereits einen Aufschlag zur Berücksichtigung der Schätzunsicherheit. Dieser Ansatz entspricht der Theorie zur Festlegung von charakteristischen Werten in zuverlässigkeitsbasierten Tragwerksnormen.
- **«Beste Schätzung»:** Die charakteristischen Werte werden als «beste Schätzung» für die beiden Ereignisse (T=30 bzw. 300 Jahre) definiert, d.h. ohne Berücksichtigung der Schätzunsicherheit. Dieser Ansatz entspricht in etwa der heutigen Praxis zur Festlegung von Lawineneinwirkungen – zumindest, wenn man davon ausgeht, dass der Lawinenexperte für sein Gutachten keinen impliziten Sicherheitsaufschlag einkalkuliert.

In Kapitel 4.2.6 ist erklärt, wie die beiden Werte zusammenhängen (siehe z.B. Abb. 38) und wie sie hergeleitet bzw. definiert werden. Für die Interpretation der im Folgenden dargestellten Ergebnisse ist wichtig, dass die «prädiktiven Fraktile» in der Regel höher, d.h. konservativer, sind als die «beste Schätzung». Um den Unterschied zu beziffern, wird ein Schätzfaktor  $SF$  eingeführt, mit dem die «Beste Schätzung» multipliziert werden müsste, um die Unsicherheiten in der Schätzung zu berücksichtigen:

$$Q_{k, predictive} = Q_{k, best estimate} \cdot SF \quad (2.2)$$

Für die theoretisch korrekte Bemessung mit dem prädiktiven Fraktilwert gilt  $SF = 1.0$ , da die Schätzunsicherheit bei diesem Ansatz bereits enthalten ist. Anders verhält es sich bei der in der Praxis üblichen Bemessung mit einer «besten Schätzung», für die der Schätzfaktor in den meisten Fällen grösser ist als Eins. Da der so quantifizierte Aufschlag für die Schätzunsicherheit in der Bemessung «fehlt», wirkt ein Schätzfaktor  $SF > 1.0$  für die Zuverlässigkeit des Tragwerks ungünstig. Der charakteristische Wert  $Q_k$  und somit der Schätzfaktor  $SF$  fließen in die Bemessungsgleichung ein, die in Gleichung (1.14) in Kapitel 2.3.3 allgemein definiert ist.

### Ergebnisse der Zuverlässigkeitsberechnung für Fall 1

Mit den Angaben zur Variation und Unsicherheit der Lawineneinwirkung sowie zum Anteil der ständigen Einwirkung kann die Zuverlässigkeit der beiden Galerietragwerke in den einzelnen Abschnitten entlang der Strassenachse berechnet werden.

Abb. 22 zeigt die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse für die Galerie Salezer. Nicht dargestellt sind die Ergebnisse für Zone 7 am Rand der Galerie, in denen nur sehr selten (und vergleichsweise kleine) Lawineneinwirkungen erwartet werden. Schwarze Symbole bezeichnen die Bemessung auf das 30-jährige Ereignis, graue Symbole die Bemessung auf das 300-jährige Ereignis.

Die Ergebnisse für die Bemessung mit den «prädiktiven Fraktilwerten», d.h. bei vollständiger Berücksichtigung der Schätzunsicherheit in der Bemessung, sind als schwarze und graue Kreuze dargestellt. Je grösser die Variabilität der Lawineneinwirkung (Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$  auf der x-Achse), desto eher wird die 300-jährige Bemessung

massgebend und führt zu einer höheren Zuverlässigkeit auf das 30-jährige Ereignis. Die höhere Sicherheit der 30-jährigen Bemessung in den Zonen 1 und 2 ist auf den grossen Beitrag der ruhenden Einwirkungen im Randbereich der Galerie zurückzuführen (hohe Werte für  $\alpha_G$ , siehe Tab. 12): in der aussergewöhnlichen Bemessungssituation ( $T=300$  Jahre) entfällt auch der Teilsicherheitsbeiwert für die ständige Einwirkungen, was in diesen Zonen sehr ungünstig wirkt. Der unterschiedliche Beitrag der ständigen Last  $\alpha_G$  in verschiedenen Zonen entlang der Galerie erklärt auch, warum die schwarzen und grauen Kreuze i.d.R. nicht auf den durchgezogenen Linien für  $SF=1.0$  und  $\alpha_G=0.95$  liegen.

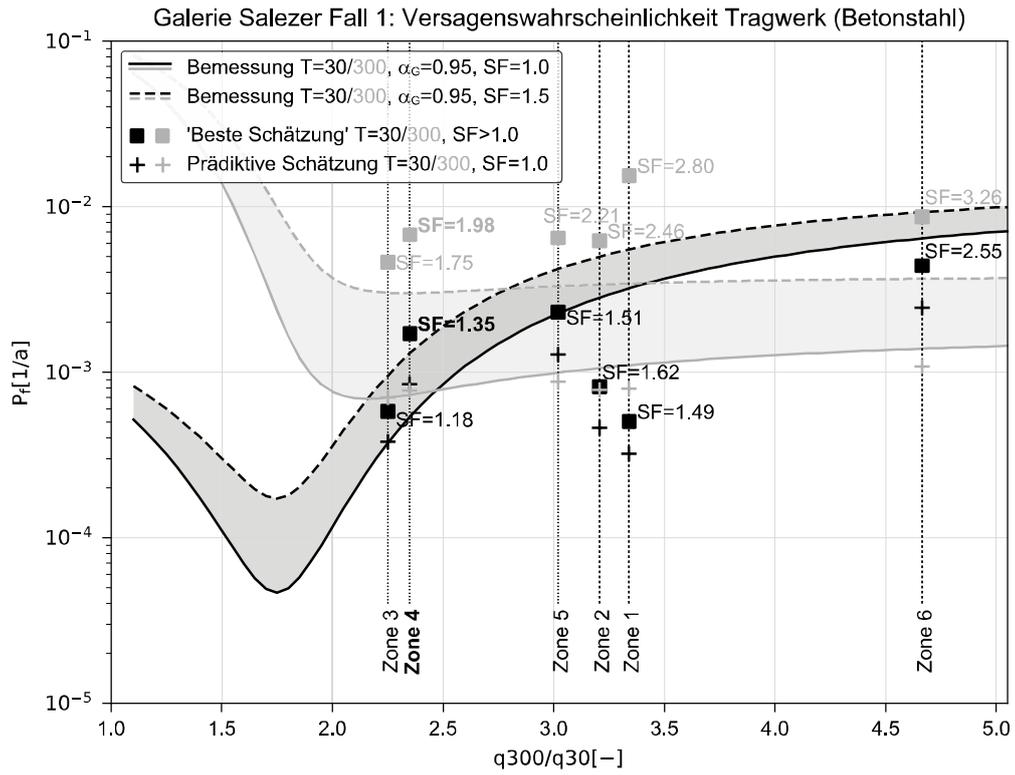
Die Ergebnisse für die Bemessung mit der «besten Schätzung» für das 30-jährige und das 300-jährige Ereignis sind als schwarze und graue Quadrate dargestellt. Die Schätzunsicherheit wurde in diesem Fall bei der Festlegung des charakteristischen Werts für die Lawineneinwirkung nicht berücksichtigt. Die Angaben zum Schätzfaktor  $SF$  zeigen an, wie gross der Unterschied zum prädiktiven Fraktilwert ist. Da der Schätzfaktor in der Bemessung «fehlt», wirkt ein hoher Schätzfaktor ungünstig, führt also zu höheren Versagenswahrscheinlichkeiten. Beim 300-jährigen Ereignis ist die Schätzunsicherheit grösser als beim 30-jährigen Ereignis, weshalb die Versagenswahrscheinlichkeit bei 300-jähriger Bemessung in allen Zonen höher ist als bei der 30-jährigen Bemessung.

Abb. 23 zeigt die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse für die Galerie an Oberalppass. Die Darstellung ist die gleiche wie in Abb. 22, allerdings wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit einige Beschriftungen weggelassen.

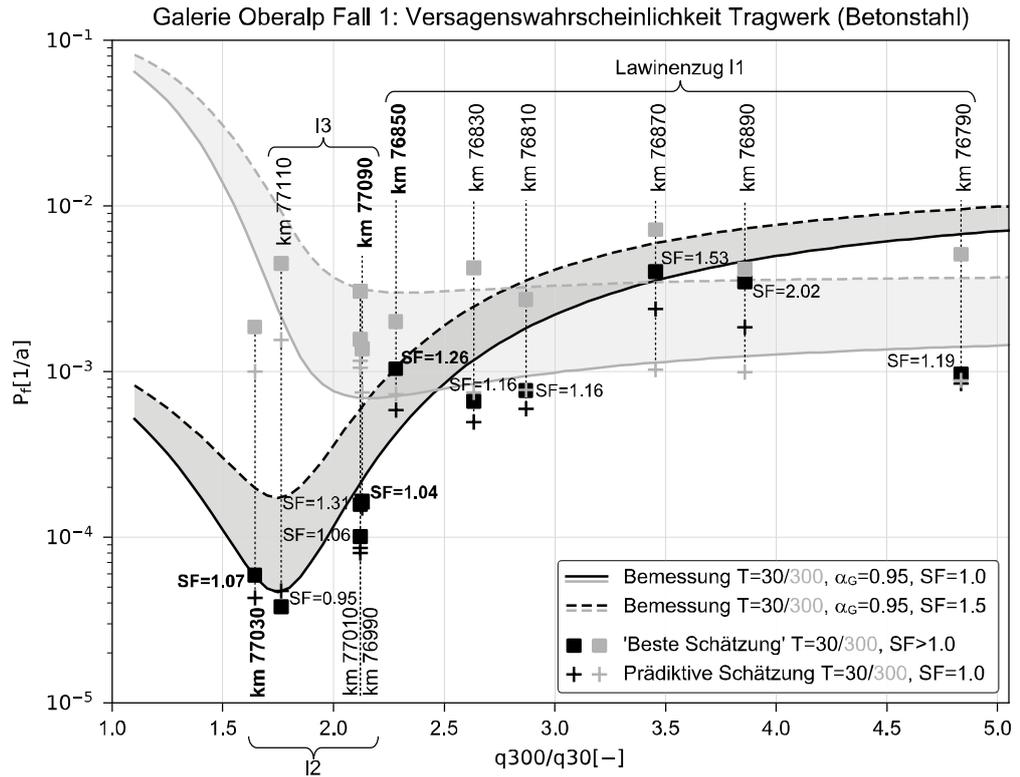
Die Ergebnisse für den Lawinenzug I1 am Oberalppass liegen etwa in einer ähnlichen Grössenordnung wie bei der Galerie Salezer. In den anderen beiden Lawinenzügen ist der Unterschied zwischen dem 30-jährigen und dem 300-jährigen Ereignis kleiner (geringere Streuung der Lawineneinwirkung), weshalb die 30-jährige Bemessung hier klar massgebend wird und zu deutlich höheren Sicherheiten führt. In allen drei Lawinenzügen wirken die (im Vergleich zur Galerie Salezer) geringeren Schätzunsicherheiten günstig, vor allem bei der Bemessung auf das 300-jährige Ereignis. Die Gründe für die unterschiedliche Einschätzung der Unsicherheiten bei den beiden Galerien werden in Kapitel 4.2.6 diskutiert; der Vergleich zwischen Abb. 22 und Abb. 23 zeigt lediglich den Effekt dieser Unterschiede in der Zuverlässigkeitsanalyse.

Für Abb. 22 und Abb. 23 wurde angenommen, dass in der Tragwerksbemessung jeweils die spezifisch für die einzelnen Zonen bzw. Kilometrierungen bestimmten Einwirkungen angesetzt werden. In der Praxis ist dies nicht unbedingt üblich; statt der «genauen» abschnittswisen Bemessung werden häufig konservativ die massgebenden, also höchsten, Einwirkungen für die gesamte Galerie oder – bei längeren Galeriebauwerken – abschnittsweise für einen Lawinenzug verwendet. Im Galerieabschnitt mit den massgebenden Einwirkungen ändert sich hierdurch nichts; in Abb. 22 und Abb. 23 sind diese Abschnitte deshalb fett gedruckt. In den übrigen Abschnitten ergibt sich eine zusätzliche Sicherheit und die Versagenswahrscheinlichkeit wird kleiner.

Der Vergleich zwischen einer spezifischen Bemessung «je Abschnitt» und einer konservativen Bemessung der ganzen Galerie (bzw. je Lawinenzug) auf die massgebenden Einwirkungen ist in Tab. 14 und Tab. 15 dargestellt. Ausserhalb der fettgedruckten massgebenden Abschnitte sind die Unsicherheiten der Lawineneinwirkungen generell grösser, und zwar sowohl in Bezug auf die natürliche Streuung (Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$ ) als auch hinsichtlich der Schätzunsicherheit (Schätzfaktor  $SF$ ). Durch konservative Bemessung auf die massgebenden Einwirkungen wird der ungünstige Effekt dieser beiden Unsicherheiten allerdings überkompensiert, d.h. die Versagenswahrscheinlichkeit ist kleiner als in dem Galerieabschnitt mit den massgebenden Einwirkungen. Besonders deutlich wird dies bei der Galerie Salezer, bei der eine «Zonen-spezifische» Bemessung in den Randbereichen zu sehr hohen Versagenswahrscheinlichkeiten führt. Die erwarteten Einwirkungen sind in diesen Zonen aber eher niedrig, weshalb eine Bemessung mit den massgebenden Einwirkungen aus Zone 4 in den Randzonen zu sehr geringen Versagenswahrscheinlichkeiten bzw. sehr hohen Sicherheiten führt.



**Abb. 22** Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse für die Galerie Salezer für Fall 1 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] in den Zonen 1 bis 6 entlang der Strassenachse (massgebende Einwirkungen in Zone 4).



**Abb. 23** Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse für die Galerie am Oberalppass für Fall 1 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] in den Lawinenzügen I1 bis I3 (massgebende Einwirkungen je Lawinenzug in km76850, km77030 und km77090).

**Tab. 14** Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  in Fall 1 für die Galerie Salezer bei Bemessung mit den Zonen-spezifischen Einwirkungen (Festlegung  $Q_k$  «je Abschnitt») bzw. bei Verwendung der massgebenden Einwirkungen (Zone 4, fett gedruckt) für die ganze Galerie.

Salezer Abschnitt	$q_{300}/q_{30}$	Festlegung von $Q_k$ (T=30)				Festlegung von $Q_k$ (T=300)			
		je Abschnitt		ganze Galerie		je Abschnitt		ganze Galerie	
	[-]	SF [-]	$P_f$ [1/a]	SF [-]	$P_f$ [1/a]	SF [-]	$P_f$ [1/a]	SF [-]	$P_f$ [1/a]
Zone 1	3.34	1.49	5.0E-04	0.38	4.0E-05	2.80	1.5E-02	0.79	3.6E-04
Zone 2	3.21	1.62	8.1E-04	0.48	1.0E-04	2.46	6.2E-03	0.96	6.9E-04
Zone 3	2.25	1.18	5.8E-04	1.00	3.8E-04	1.75	4.6E-03	1.41	2.5E-03
Zone 4	<b>2.35</b>	<b>1.35</b>	<b>1.7E-03</b>	<b>1.35</b>	<b>1.7E-03</b>	<b>1.98</b>	<b>6.8E-03</b>	<b>1.98</b>	<b>6.8E-03</b>
Zone 5	3.02	1.51	2.3E-03	0.90	1.1E-03	2.21	6.5E-03	1.70	3.8E-03
Zone 6	4.66	2.55	4.4E-03	0.60	1.3E-03	3.26	8.7E-03	1.74	3.6E-03
Zone 7	7.84		8.6E-04	0.13	5.5E-05		8.3E-02	0.66	3.1E-04

**Tab. 15** Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  in Fall 1 für die Galerie am Oberalppass bei Bemessung mit den km-spezifischen Einwirkungen (Festlegung  $Q_k$  «je Abschnitt») bzw. bei Verwendung der massgebenden Einwirkungen (km76850, km 77030, km77090) für den gesamten Lawinenzug.

Oberalp Abschnitt	$q_{300}/q_{30}$	Festlegung von $Q_k$ (T=30)				Festlegung von $Q_k$ (T=300)				
		je Abschnitt		je Lawinenzug		je Abschnitt		je Lawinenzug		
km	[-]	SF [-]	Pf [1/a]	SF [-]	Pf [1/a]	SF [-]	Pf [1/a]	SF [-]	Pf [1/a]	
I1	76790	4.83	1.19	9.6E-04	0.33	1.8E-04	2.61	5.1E-03	0.73	3.4E-04
	76810	2.87	1.16	7.6E-04	0.71	2.9E-04	1.53	2.7E-03	0.93	6.0E-04
	76830	2.63	1.16	6.6E-04	0.79	2.9E-04	1.80	4.2E-03	0.95	6.1E-04
	76850	<b>2.28</b>	<b>1.26</b>	<b>1.0E-03</b>	<b>1.26</b>	<b>1.0E-03</b>	<b>1.30</b>	<b>2.0E-03</b>	<b>1.30</b>	<b>2.0E-03</b>
	76870	3.46	1.53	4.0E-03	1.06	2.6E-03	2.32	7.2E-03	1.67	3.9E-03
	76890	3.86	2.02	3.5E-03	0.73	1.2E-03	1.85	4.2E-03	1.27	1.9E-03
I2	76990	2.12	1.31	1.6E-04	0.58	1.1E-05	1.28	3.0E-03	0.78	3.6E-04
	77010	2.12	1.06	1.0E-04	0.60	1.4E-05	1.10	1.6E-03	0.82	4.1E-04
	77030	<b>1.64</b>	<b>1.07</b>	<b>5.9E-05</b>	<b>1.07</b>	<b>5.9E-05</b>	<b>1.13</b>	<b>1.9E-03</b>	<b>1.13</b>	<b>1.9E-03</b>
I3	77090	<b>2.13</b>	<b>1.04</b>	<b>1.7E-04</b>	<b>1.04</b>	<b>1.7E-04</b>	<b>1.16</b>	<b>1.4E-03</b>	<b>1.16</b>	<b>1.4E-03</b>
	77110	1.76	0.95	3.8E-05	0.96	4.0E-05	1.29	4.5E-03	0.89	8.5E-04

#### Einfluss der Einschätzung durch verschiedene Experten

Für die Lawingalerie Salezer kann abschliessend noch der Effekt der Einschätzung durch verschiedene Experten untersucht werden. Die Lawineneinwirkungen wurden bei dieser Galerie unabhängig voneinander durch drei verschiedene Lawinenexperten bestimmt, siehe Kapitel 4.2.2 für Details. Die bisher diskutierten Zuverlässigkeitsanalysen basieren auf der Annahme, dass alle drei Experten die Lawinensituation mit der gleichen Wahrscheinlichkeit korrekt beurteilen, d.h. die Einschätzung der drei Experten wurde sowohl für die probabilistische Modellierung als auch für die Bemessung gleich gewichtet.

Im Folgenden wird diese Annahme für die probabilistische Modellierung beibehalten, d.h. die Zuverlässigkeitsanalyse basiert weiterhin auf der gemeinsamen Verteilung aller drei Experten (Gleichung (3.7) in Kapitel 4.2.5). Für die Bemessung wird aber angenommen, dass jeweils nur ein Experte für ein Lawinengutachten angefragt wurde; der charakteristische Wert entspricht dann seiner «besten Schätzung» für das 30-jährige bzw. das 300-jährige Ereignis. Im Vergleich zum probabilistischen Modell aller Experten ergibt sich so ein Schätzfaktor  $SF$ , der spezifisch für den jeweiligen Experten ist:

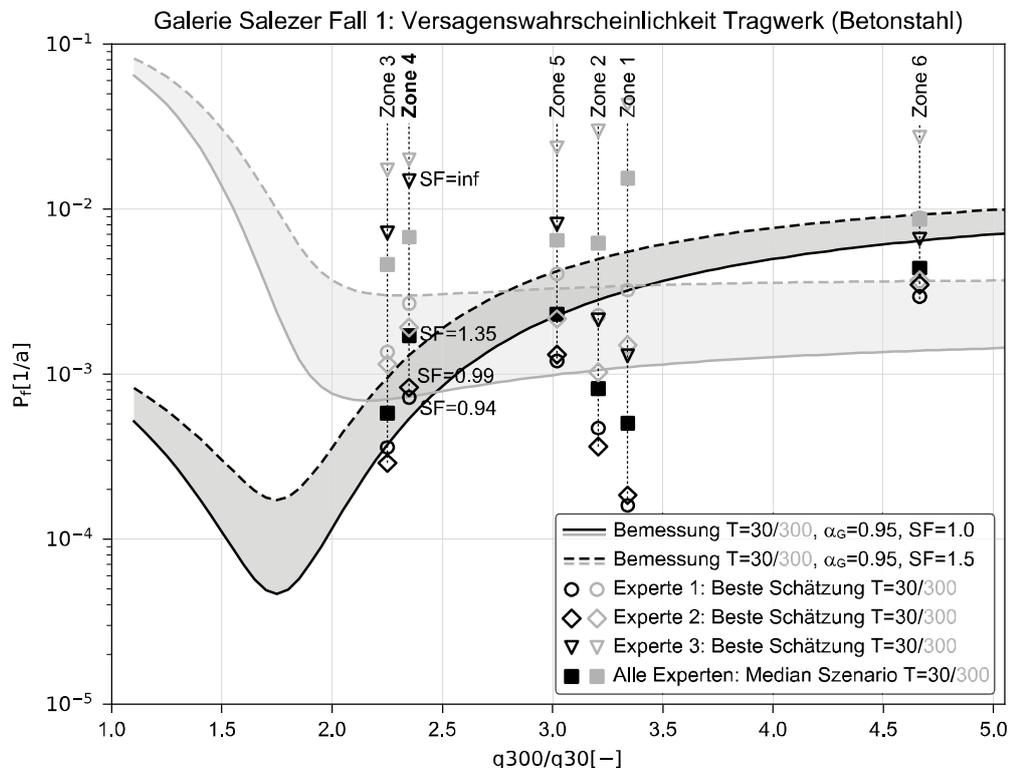
- $SF < 1.0$  bedeutet, dass der Experte die Situation «konservativ» beurteilt, d.h. die Bemessung basiert auf vergleichsweise hohen Lawineneinwirkungen
- $SF > 1.0$  bedeutet, dass der Experte die Situation «optimistisch» beurteilt, d.h. die Bemessung basiert auf vergleichsweise niedrigen Lawineneinwirkungen

Abb. 24 zeigt die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse bei Bemessung durch die drei Experten. Allgemein lässt sich festhalten, dass Experte 1 und 2 die Lawinensituation relativ ähnlich beurteilen, während Experte 3 deutlich optimistischere Angaben zu den Lawineneinwirkungen macht, siehe auch Kapitel 4.2.6. Die Unterschiede in der Bemessung führen zu einer Variation der jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit von bis zu einer Grössenordnung, was durch die stark unterschiedliche Einschätzung durch die drei Experten erklärt werden kann.

Zur Verdeutlichung sind in Abb. 24 für die massgebende Zone 4 und die Bemessung auf das 30-jährige Ereignis die jeweiligen Schätzfaktoren angegeben. Für die Experten 1 und 2 liegen diese knapp unter 1.0. Dies kann so interpretiert werden, dass die «beste Schätzung» dieser Experten eher konservativ ist, zumindest im Vergleich zu Experte 3. Der in der Schätzung enthaltene implizite Sicherheitsaufschlag liegt in etwa in einer ähnlichen Grössenordnung wie bei der expliziten Berücksichtigung der Schätzunsicherheit mit dem prädiktiven Fraktilewert des probabilistischen Modells ( $SF = 1.0$ , schwarze Kreuze in Abb. 22 – in Abb. 24 sind diese nicht dargestellt).

Für Experte 3 lässt sich der Schätzfaktor  $SF$  für das 30-jährige Ereignis nicht bestimmen, weil die Lawineneinwirkungen gemäss seiner «besten Schätzung» Null sind (die 30-jährige Lawine erreicht die Galerie gar nicht). Interessant ist, dass die daraus resultierende Bemessung nur auf ständige Einwirkungen (mit Sicherheitsbeiwert  $\gamma_G = 1.35$ ) trotzdem zu höheren Bemessungseinwirkungen und damit zu höheren Sicherheiten führt als die aussergewöhnliche Bemessungssituation (ohne Sicherheitsbeiwerte) mit der «besten Schätzung» des Experten 3 für das 300-jährige Ereignis. Der Vergleich der Fliesshöhen in Kapitel 4.2.6 zeigt jedoch, dass der Experte 3 auch das 300-jährige Ereignis deutlich optimistischer einschätzt als die anderen beiden Experten.

Die stark abweichende Einschätzung des Experten 3 lässt sich zum Teil durch das gewählte Verfahren zur Modellierung der Einwirkungen erklären, bei dem die Experten keine Gelegenheit zum Nachjustieren hatten, wenn die lawindynamischen Berechnungen unerwartete Ergebnisse ergaben; siehe Kapitel 4.2.6 für eine ausführliche Diskussion. Ob die Ergebnisse realistisch sind, lässt sich aber nur beurteilen, wenn gute Aufzeichnungen zu vergangenen Lawinenereignissen vorliegen. Bei der Galerie Salezer ist dies zwar der Fall, bei anderen Galeriestandorten sind die Aufzeichnungen aber häufig deutlich schlechter, wodurch ein grosser gutachterlicher Spielraum verbleibt.



**Abb. 24** Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse für die Galerie Salezer für Fall 1 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] bei Bemessung durch verschiedene Experten.

### 3.6.2 Fall 2: Fliesslawine über schneebedecktem Galeriedach

Basierend auf der probabilistischen Modellierung für die Fliesshöhe  $d_L$  einer Lawine im Fall 1 und der Datenanalyse zur natürlich abgelagerten Schneedecke in Kapitel 4.3 kann für die Galerie Salezer in Davos die Zuverlässigkeit für Fall 2 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] berechnet werden. Hierfür werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Dynamische Einwirkungen gleich wie in Fall 1 (siehe Kapitel 4.2)
- Ruhende Einwirkungen angenähert durch die Verteilung des jährlichen Schneehöhen-Maximums, ausgedrückt durch den Wasserwert der Schneedecke (siehe Kapitel 4.3)

Die erste Annahme ist selbst bei gleicher Lawinengrösse streng genommen nur für den vertikalen Lastanteil zutreffend und sollte lediglich als einfache Näherung verstanden werden. Die zweite Annahme basiert auf der Analyse in Kapitel 4.3: Dort wird gezeigt, dass die Verteilung des jährlichen Schneehöhenmaximums für die Galerie Salezer (und vermutlich auch für andere Standorte mit Hochwinterlawinen in Fall 2) als gute Näherung für die natürliche Schneedecke zum Lawinenzzeitpunkt verwendet werden kann.

Weil die ruhenden und dynamischen Einwirkungen in Fall 2 unabhängig voneinander modelliert werden, werden sie für die Zuverlässigkeitsanalyse mit zwei verschiedenen Zufallsvariablen modelliert. Allerdings gelten beide Einwirkungen gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] gemeinsam als Leiteinwirkung, d.h. es wird für beide Einwirkungen derselbe Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_Q$  angesetzt und auf die Verwendung von Kombinationsbeiwerten (wie in Gleichung (1.15) in Kapitel 2.3.3) wird verzichtet. Alternativ könnte man auch die beiden Zufallsvariablen  $D$  und  $S$  zu einer einzigen Einwirkung  $Q = D + S$  zusammenfassen und mit den Gleichungen für eine veränderliche Einwirkung arbeiten; dieser Ansatz wird für Fall 3 im folgenden Kapitel 3.2.3 verwendet.

Für die Zuverlässigkeitsanalyse in Fall 2 wird zudem anders als in Fall 3 angenommen, dass die dynamische Einwirkung  $D$  und die ruhende Einwirkung  $S$  voneinander unabhängig sind. Diese Annahme wird in Kapitel 4.3 näher diskutiert; sofern  $S$  die Verteilung der natürlich abgelagerten Schneedecke zum Lawinenzzeitpunkt repräsentiert, ist sie zumindest näherungsweise realistisch. Eine leichte positive Korrelation, z.B. bis zu einem Korrelationskoeffizienten von  $\rho = 0.5$ , ist zwar ebenfalls denkbar. Weil die Variation der veränderlichen Einwirkung  $Q = D + S$  von der deutlich stärker streuenden dynamischen Einwirkung  $D$  dominiert wird, dürfte der Einfluss einer leichten Korrelation auf die Versagenswahrscheinlichkeit der Galerie aber eher gering sein.

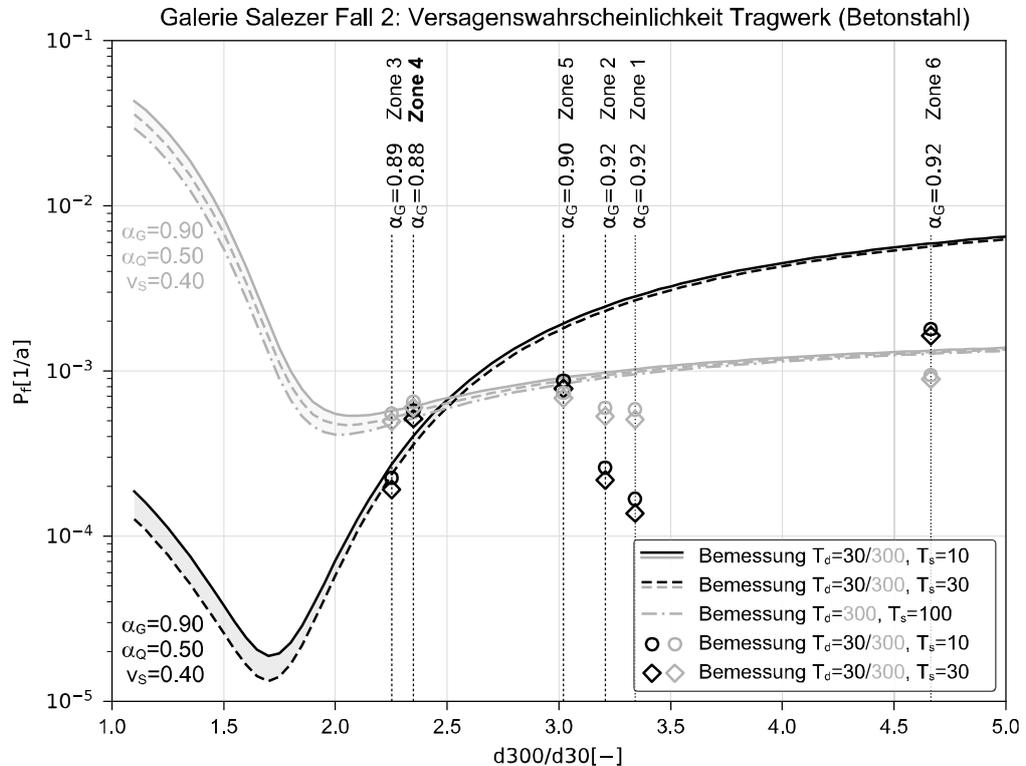
Für die Galerie Salezer sind die Einwirkungen in Fall 2 in Tab. 16 zusammengestellt. Da die natürlich abgelagerte Schneedecke entlang der Galerie konstant angenommen wird, ist der Anteil der dynamischen Einwirkung  $\alpha_Q = \mu_{Q_d} / \mu_Q$  in der Galerie Mitte am grössten; dort treten die höchsten dynamischen Einwirkungen auf. Die fett gedruckte Zone 4 ist somit auch für Fall 2 der massgebende Galerieabschnitt mit den höchsten Einwirkungen. Die Angaben basierend auf dem Wasserwert WW der natürlich abgelagerten Schneedecke dienen als Grundlage für die Zuverlässigkeitsanalyse in Abb. 25.

**Tab. 16** Kombinierte dynamische und ruhende Einwirkung auf die Galerie Salezer in Fall 2, basierend auf den dynamischen Einwirkungen gemäss Modellierung für Fall 1 (Tab. 25) und den Angaben zur natürlichen Schneedecke in Davos (Tab. 28).

Fall 2	Dyn. Einwirkung		Nat. abgelagerte Schneedecke				Verhältnis	
	$\mu_{Q_d}$	CoV	$\mu_{Q_s}$ [WW]	CoV	$\mu_{Q_s}$ [HS]	CoV	$\alpha_Q = \mu_{Q_d} / (\mu_{Q_d} + \mu_{Q_s})$	
Davos	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]	WW	HS
Zone 1	0.59	3.59	2.75	0.36	4.56	0.31	0.18	0.11
Zone 2	0.75	3.44	2.75	0.36	4.56	0.31	0.21	0.14
Zone 3	2.12	2.05	2.75	0.36	4.56	0.31	0.44	0.32
<b>Zone 4</b>	<b>2.70</b>	<b>2.21</b>	<b>2.75</b>	<b>0.36</b>	<b>4.56</b>	<b>0.31</b>	<b>0.50</b>	<b>0.37</b>
Zone 5	1.45	3.21	2.75	0.36	4.56	0.31	0.34	0.24
Zone 6	0.91	4.79	2.75	0.36	4.56	0.31	0.25	0.17
Zone 7	0.25	6.39	2.75	0.36	4.56	0.31	0.08	0.05

In Kapitel 4.3 wird diskutiert, wie der charakteristische Wert der beiden Einwirkungen festgelegt werden sollte. Für die dynamische Einwirkung  $D_k$  wird wie gehabt das 30-jährige bzw. das 300-jährige Ereignis verwendet; das Verhältnis der beiden Szenarien dient als Mass für die Streuung der dynamischen Einwirkung und ist auf der x-Achse in Abb. 25 aufgetragen. Für die ruhende Einwirkung  $S_k$  können niedrigere Wiederkehrperioden bzw. Fraktilwerte der Schneelast-Verteilung zum Lawinenzzeitpunkt verwendet werden, z.B. das 10-jährige Ereignis. Der Einfluss des verwendeten Fraktilwertes auf die Zuverlässigkeit der Bemessung ist ohnehin klein, wie in Abb. 25 gezeigt wird. Der Grund hierfür liegt in der vergleichsweise geringen Streuung der ruhenden Schneelast von  $v_s = 0.4$  (Annahme für die theoretische Berechnung, graue und schwarze Kurven in Abb. 25) bzw.  $v_s = 0.36$

(Annahme für die Galerie Salezer, Tab. 16). Zum Vergleich: Ein Verhältnis von  $d_{300}/d_{30} = 2.0$  auf der x-Achse von Abb. 25 entspricht bereits einem vierfach höheren Variationskoeffizienten von  $v_D = 1.6$  für die dynamische Einwirkung, siehe auch Abb. 15. Für die Berechnungen bedeutet dies, dass die dynamische Lawineneinwirkung sowohl die Bemessung als auch die Zuverlässigkeitsanalyse dominiert und die ruhende Einwirkung aus natürlich abgelagerter Schneedecke nur von untergeordneter Bedeutung ist.



**Abb. 25** Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse für Fall 2 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] in den Zonen 1 bis 6 entlang der Strassenachse (massgebende Einwirkungen in Zone 4). Siehe Tab. 16 für Details zu den Einwirkungen auf die Galerie.

### 3.6.3 Fall 3: Fliesslawine über abgelagertem Lawinenschnee

Die folgenden Tabellen und Grafiken enthalten die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse für Fall 3 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1]. Im Gegensatz zu dem vereinfachten Ansatz zur Kombination ruhender und dynamischer Einwirkungen in Fall 2 werden die dynamischen Einwirkungen in Fall 3 unter Berücksichtigung der veränderten Geländegeometrie betrachtet. Die probabilistische Modellierung der Einwirkungen ist in Kapitel 4.4 beschrieben; dort werden auch die komplexen Zusammenhänge zwischen den beiden Einwirkungs-Komponenten diskutiert. Die Zuverlässigkeitsanalyse basiert einfach auf der Summe aller ruhenden und dynamischen Einwirkungen auf die Galerie, die als eine einzelne veränderliche Einwirkung  $Q$  modelliert wird.

Die Standorte (Salezer Davos und Oberalppass) sind dieselben wie bei der Betrachtung von Fall 1 und 2, und auch die probabilistische Modellierung folgt grundsätzlich einem ähnlichen Vorgehen wie in Fall 1. Da sich die Einwirkungen im Fall 3 aus der Kombination mehrerer Lawinenereignisse ergeben, wurde das Vorgehen allerdings etwas vereinfacht und die Galerie Salezer wurde für Fall 3 auch nur von einem Lawinenexperten beurteilt.

Durch die Anpassungen gegenüber Fall 1 unterscheidet sich der Ansatz für die probabilistische Modellierung leicht zwischen den einzelnen Fällen und auch zwischen den Galeriestandorten, was den Vergleich der Schätzunsicherheiten erschwert. Der Einfluss

der Schätzunsicherheit auf die Bemessung wird deshalb im Folgenden nicht untersucht. Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse beziehen sich auf den Fall eines «Schätzfaktors» von 1.0, d.h. es wird angenommen, dass die Schätzunsicherheiten bezüglich des 30- und 300-jährigen Szenarios in den Bemessungswerten implizit oder explizit korrekt berücksichtigt wurden (siehe Kapitel 3.6.1 für Details).

Der Anteil der ständigen Einwirkung,  $\alpha_G = \mu_G / (\mu_G + \mu_Q)$ , ist in Tab. 17 und Tab. 18 zusammengefasst und dient als Grundlage für die Zuverlässigkeitsanalyse in Abb. 26 und Abb. 27. Die Darstellung der Ergebnisse ist die gleiche wie für Fall 1, allerdings wird anstelle des «Schätzfaktors» SF neu der Anteil der ständigen Einwirkung  $\alpha_G$  variiert.

Die berechnete Zuverlässigkeit für Einwirkungen gemäss Fall 3 ist bei der Galerie Salezer generell etwas höher (niedrigere Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$ ) als in Fall 1. Dies ist vor allem auf die etwas geringere Streuung der Lawineneinwirkung zurückzuführen. Bei den Zonen mit einem grossen  $q_{300}/q_{30}$  wirkt ausserdem der etwas höhere Anteil der ständigen Einwirkung  $\alpha_G$  günstig, vor allem bei der Bemessung auf das 30-jährige Ereignis.

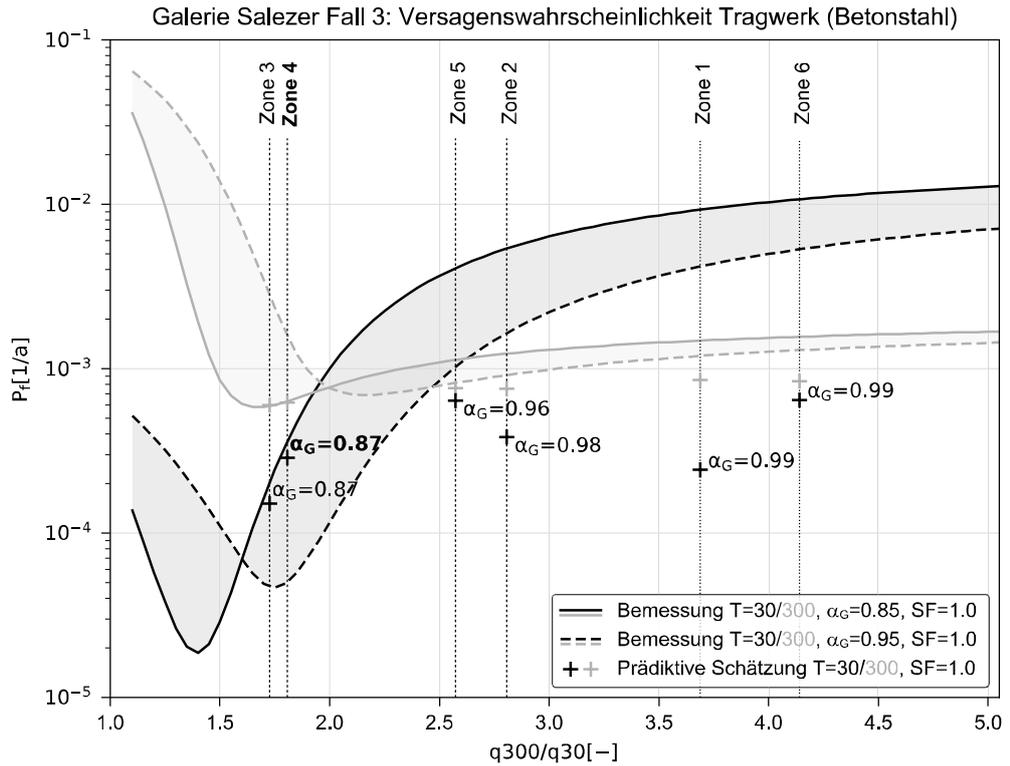
Bei der Galerie am Oberalppass liegt die Streuung der Einwirkung in Fall 3 in einer ähnlichen Grössenordnung wie bei Fall 1. Im Vergleich zur Galerie Salezer ist die Streuung der Lawineneinwirkung in Fall 3 grösser, was auf die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Umlenkraft zurückzuführen ist (siehe Kapitel 4.4.6). Die grössere Streuung führt zu höheren Versagenswahrscheinlichkeiten bei der Galerie am Oberalppass.

**Tab. 17** Anteil der ständigen Einwirkung  $\alpha_G = \mu_G / (\mu_G + \mu_Q)$  bzw.  $\chi = G_k / (G_k + Q_k)$  für die Galerie Salezer (Fall 3). Die Fraktilwerte der Lawineneinwirkung entstammen der prädiktiven Verteilung (inkl. Schätzunsicherheit), siehe Tab. 33.

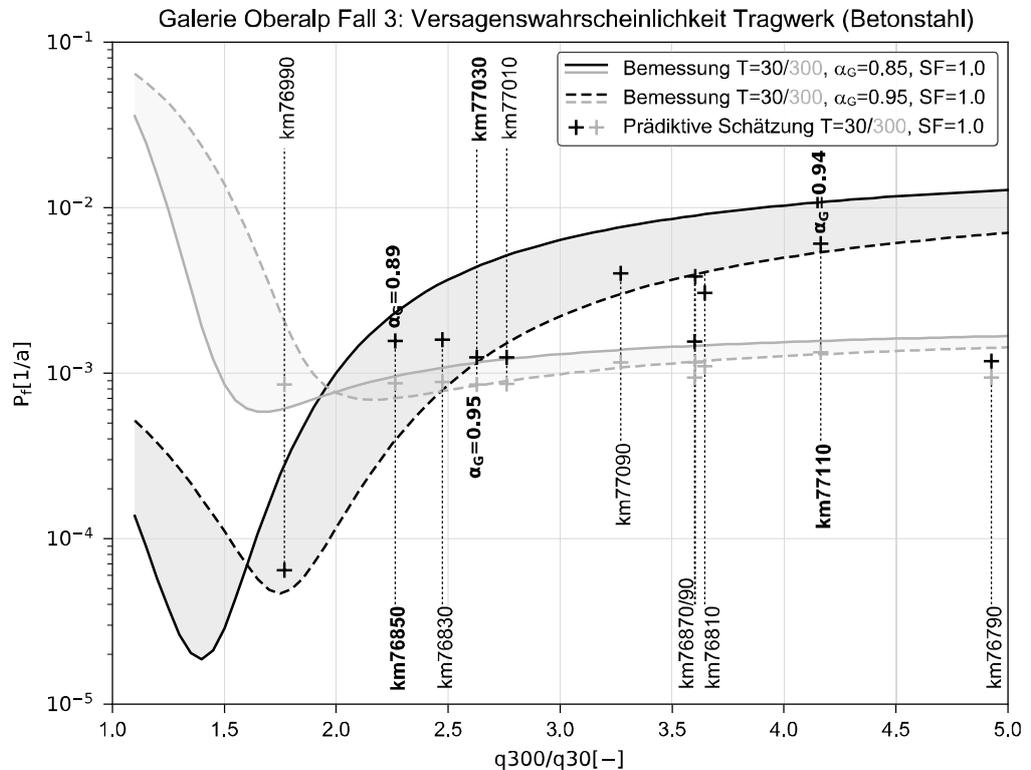
Salezer Fall 3	Mittelwerte		Fraktilwerte			Anteil ruhender Last		
	$\mu_G$	$\mu_Q$	q30	q300	300/30	$\alpha_G$	$\chi$ (T30)	$\chi$ (T300)
Abschnitt	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]
Zone 1	40	0.43	3.66	13.51	3.69	0.989	0.92	0.75
Zone 2	40	0.97	7.53	21.15	2.81	0.976	0.84	0.65
Zone 3	40	6.00	21.88	37.77	1.73	0.869	0.65	0.51
Zone 4	40	6.18	25.00	45.16	1.81	0.866	0.62	0.47
Zone 5	40	1.63	11.75	30.24	2.57	0.961	0.77	0.57
Zone 6	40	0.53	4.61	19.10	4.14	0.987	0.90	0.68
Zone 7	40	0.02	0.00	1.23	-	1.000	1.00	0.97

**Tab. 18** Anteil der ständigen Einwirkung  $\alpha_G = \mu_G / (\mu_G + \mu_Q)$  bzw.  $\chi = G_k / (G_k + Q_k)$  für die Galerie am Oberalppass (Fall 3). Die Fraktilwerte der Lawineneinwirkung entstammen der prädiktiven Verteilung (inkl. Schätzunsicherheit), siehe Tab. 34. Modelliert als Resultierende pro Laufmeter.

Oberalp Fall 3	Mittelwerte		Fraktilwerte			Anteil ruhender Last		
	$\mu_G$	$\mu_Q$	q30	q300	300/30	$\alpha_G$	$\chi$ (T30)	$\chi$ (T300)
km	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]	[-]	[-]	[-]
I1 76790	720	10.0	84.2	414.8	4.9	0.986	0.90	0.63
76810	720	29.6	254.3	926.9	3.6	0.961	0.74	0.44
76830	720	59.0	406.9	1007.1	2.5	0.924	0.64	0.42
76850	720	88.3	543.9	1230.7	2.3	0.891	0.57	0.37
76870	720	36.8	315.4	1136.6	3.6	0.951	0.70	0.39
76890	720	19.3	165.2	594.7	3.6	0.974	0.81	0.55
I2 76990	720	56.6	218.5	386.4	1.8	0.927	0.77	0.65
77010	720	33.5	256.0	707.2	2.8	0.956	0.74	0.50
77030	720	39.6	290.1	762.2	2.6	0.948	0.71	0.49
I3 77090	720	49.2	411.7	1346.8	3.3	0.936	0.64	0.35
77110	720	43.6	375.7	1564.8	4.2	0.943	0.66	0.32



**Abb. 26** Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse für die Galerie Salezer für Fall 3 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] in den Zonen 1 bis 6 entlang der Strassenachse (massgebende Einwirkungen in Zone 4).



**Abb. 27** Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse für die Galerie am Oberalppass für Fall 3 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] in den Lawenzügen I1 bis I3 (massgebende Einwirkungen je Lawenzug in km 76850, 77030 und 77110).

### 3.6.4 Fall 4: Lawinenablagerung ruhend

Die folgenden Tabellen und Grafiken enthalten die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse für Fall 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1]. Die Galeriestandorte sind in Kapitel 3.3 beschrieben, die probabilistische Modellierung der Einwirkungen in Kapitel 4.5. Die Modellierung ist identisch mit Fall 3, nur wird die «letzte» Lawine in jedem Einwirkungsszenario nicht als dynamische Einwirkung berücksichtigt, sondern über ihren Beitrag zur Lawinenablagerung auf dem Galeriedach.

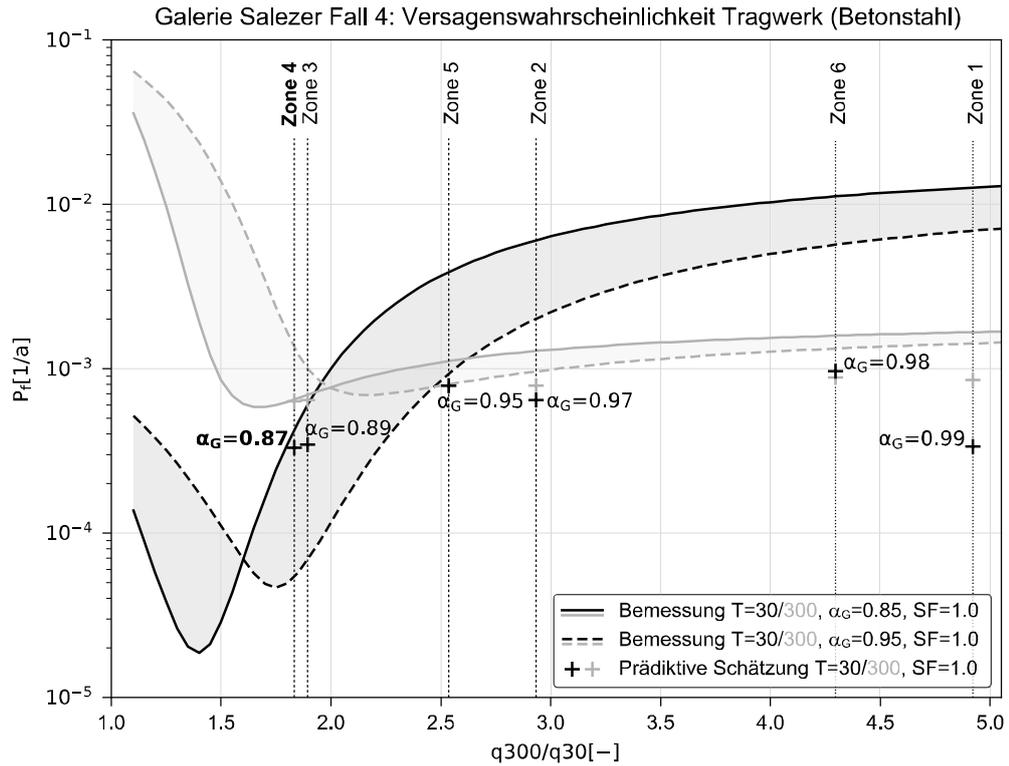
Für die Galerie Salezer liegen die Ergebnisse in einer ähnlichen Grössenordnung wie bei der Modellierung von Fall 3. Am Oberalppass ist die Streuung der Lawineneinwirkung in Fall 4 geringer als die der Einwirkungen in Fall 3, da die Unsicherheit bezüglich der Umlenkraft wegfällt, die bei den dynamischen Einwirkungen auf diese Galerie eine wesentliche Rolle spielt. Durch die geringere Streuung der Einwirkung sind auch die Versagenswahrscheinlichkeiten in Fall 4 niedriger als in Fall 3.

**Tab. 19** Anteil der ständigen Einwirkung  $\alpha_G = \mu_G / (\mu_G + \mu_Q)$  bzw.  $\chi = G_k / (G_k + Q_k)$  für die Galerie Salezer (Fall 4). Die Fraktilwerte der Lawineneinwirkung entstammen der prädiktiven Verteilung (inkl. Schätzunsicherheit), siehe Tab. 33.

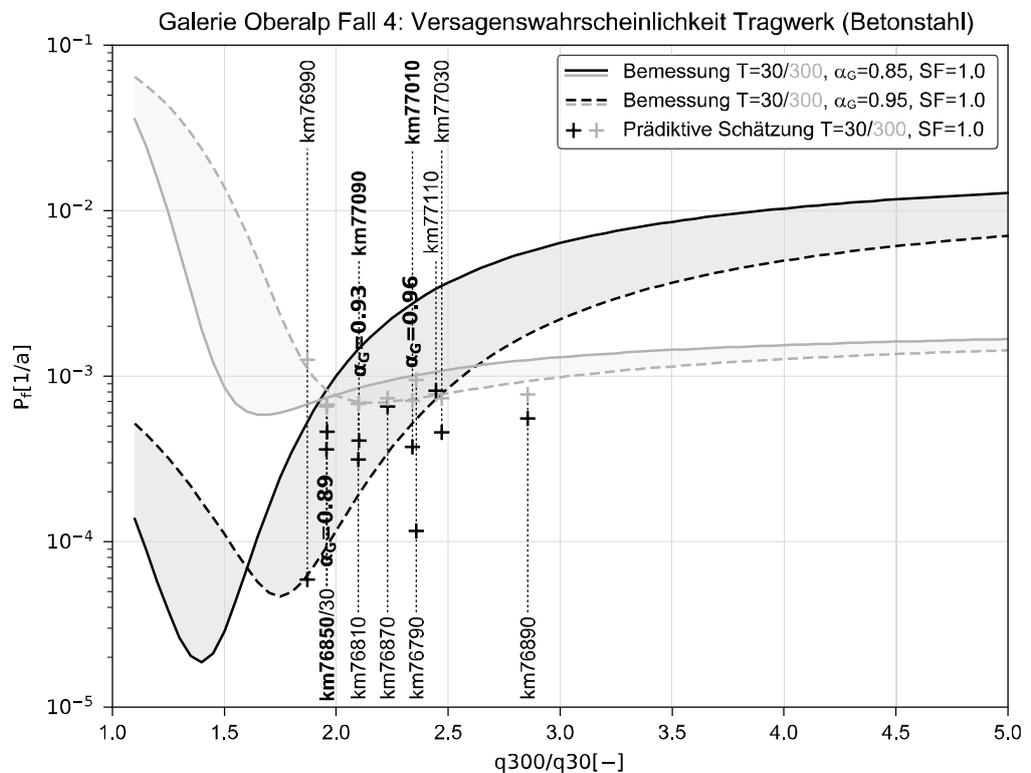
Salezer Fall 4	Mittelwerte		Fraktilwerte			Anteil ruhender Last		
	$\mu_G$	$\mu_Q$	q30	q300	300/30	$\alpha_G$	$\chi$ (T30)	$\chi$ (T300)
Abschnitt	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[-]	[-]	[-]
Zone 1	40	0.32	2.66	13.11	4.92	0.992	0.94	0.75
Zone 2	40	1.09	8.72	25.58	2.93	0.973	0.82	0.61
Zone 3	40	5.04	22.55	42.67	1.89	0.888	0.64	0.48
Zone 4	<b>40</b>	<b>6.04</b>	<b>25.28</b>	<b>46.36</b>	<b>1.83</b>	<b>0.869</b>	<b>0.61</b>	<b>0.46</b>
Zone 5	40	1.93	13.64	34.58	2.54	0.954	0.75	0.54
Zone 6	40	0.61	5.24	22.52	4.30	0.985	0.88	0.64
Zone 7	40	0.02	0.00	1.23	-	1.000	1.00	0.97

**Tab. 20** Anteil der ständigen Einwirkung  $\alpha_G = \mu_G / (\mu_G + \mu_Q)$  bzw.  $\chi = G_k / (G_k + Q_k)$  für die Galerie am Oberalppass (Fall 4). Die Fraktilwerte der Lawineneinwirkung entstammen der prädiktiven Verteilung (inkl. Schätzunsicherheit), siehe Tab. 34.

Oberalp Fall 4	Mittelwerte		Fraktilwerte			Anteil ruhender Last		
	$\mu_G$	$\mu_Q$	q30	q300	300/30	$\alpha_G$	$\chi$ (T30)	$\chi$ (T300)
km	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]	[-]	[-]	[-]
I1 76790	720	17.9	116.6	275.1	2.4	0.976	0.86	0.72
76810	720	48.4	264.2	554.1	2.1	0.937	0.73	0.57
76830	720	75.7	363.0	710.0	2.0	0.905	0.66	0.50
76850	<b>720</b>	<b>86.4</b>	<b>415.0</b>	<b>812.8</b>	<b>2.0</b>	<b>0.893</b>	<b>0.63</b>	<b>0.47</b>
76870	720	53.3	320.9	715.1	2.2	0.931	0.69	0.50
76890	720	19.8	154.8	442.3	2.9	0.973	0.82	0.62
I2 76990	720	35.7	156.1	292.2	1.9	0.953	0.82	0.71
77010	<b>720</b>	<b>32.2</b>	<b>207.4</b>	<b>485.3</b>	<b>2.3</b>	<b>0.957</b>	<b>0.78</b>	<b>0.60</b>
77030	720	28.8	198.6	490.8	2.5	0.962	0.78	0.59
I3 77090	<b>720</b>	<b>54.9</b>	<b>300.3</b>	<b>630.9</b>	<b>2.1</b>	<b>0.929</b>	<b>0.71</b>	<b>0.53</b>
77110	720	40.2	274.2	670.9	2.4	0.947	0.72	0.52



**Abb. 28** Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse für die Galerie Salezer für Fall 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] in den Zonen 1 bis 6 entlang der Strassenachse (massgebende Einwirkungen in Zone 4).



**Abb. 29** Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalyse für die Galerie am Oberalppass für Fall 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] in den Lawinenzügen I1 bis I3 (massgebende Einwirkungen je Lawinenzug in km76850, 77010 und 77090).

## 4 Modellierung der Unsicherheiten in den Lawineneinwirkungen

Die Beurteilung der Tragwerkszuverlässigkeit an den betrachteten Galeriebauwerken (Kapitel 3.6) basiert auf einer standortspezifischen Modellierung der Lawineneinwirkungen in den Fällen 1 bis 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1]. Im Vordergrund steht hierbei die probabilistische Modellierung aller Unsicherheiten, d.h. einerseits der erwarteten Variabilität bzw. Streuung der Einwirkung in unterschiedlichen Ereignissen, andererseits aber auch der Schätzunsicherheit bei der Beurteilung der Einwirkungen durch den Lawinenexperten.

### 4.1 Allgemeines Vorgehen zur Modellierung der Einwirkungen

Die Modellierung der Lawineneinwirkungen unterscheidet sich je nach betrachteter Einwirkungskombination und wird in den Abschnitten 4.2 bis 4.5 für die Fälle 1 bis 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] detailliert beschrieben. Das grundsätzliche Vorgehen ist aber in allen Fällen gleich und wird deshalb im Folgenden einmal kurz erläutert.

#### 4.1.1 Modellierung von Einwirkungsszenarien und ihrer Unsicherheit

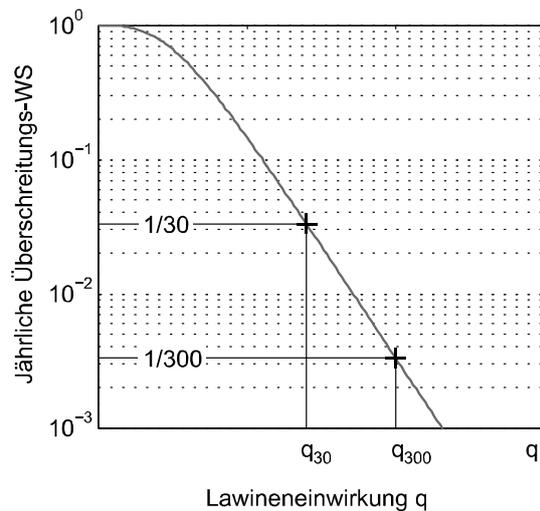
Bei der Bemessung von Galerietragwerken wird für die Lawineneinwirkung jeweils ein bestimmtes Szenario zugrunde gelegt, dessen Häufigkeit durch die zugehörige Wiederkehrperiode (30 oder 300 Jahre) definiert ist. Die Wahl der Wiederkehrperiode bestimmt, mit welcher jährlichen Wahrscheinlichkeit die Einwirkungen überschritten werden. Dieser Zusammenhang zwischen der Szenario-Wiederkehrperiode und der jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit wird genutzt, um mit dem in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Vorgehen die jährliche (Extremwert-)Verteilung der Lawineneinwirkung herzuleiten; diese Verteilung wird für die Zuverlässigkeitsanalyse benötigt. Die Wahl der charakteristischen Werte für die Bemessung ist in Abschnitt 4.1.3 beschrieben

Ein wesentliches Anliegen der vorliegenden Untersuchung ist es, die Einwirkungen durch Lawinen auf Schutzgalerien nicht nur zu beschreiben, sondern auch die Unsicherheiten in ihrer Beurteilung zu quantifizieren. Dies erfolgt in einem ersten Schritt auf Ebene der betrachteten Szenarien: So können zum Beispiel Unsicherheiten bei der Wahl des Anrisszenarios für eine 30-jährige Lawine zu einer beträchtlichen Variation der Fließhöhe und -geschwindigkeit und damit der dynamischen Lawineneinwirkungen führen. Die probabilistische Modellierung der Szenarien unterscheidet sich je nach betrachteter Einwirkung bzw. betrachtetem Fall und ist in den Abschnitten 4.2 bis 4.5 beschrieben. Das Ergebnis der dort beschriebenen Analysen ist jeweils die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lawineneinwirkung für verschiedene Szenarien mit bekannter bzw. festgelegter Wiederkehrperiode. Diese Szenario-Verteilungen beschreiben die Unsicherheit bei der Beurteilung der Lawineneinwirkungen und dienen als Input für die Herleitung der jährlichen Extremwertverteilung.

#### 4.1.2 Herleitung der jährlichen Extremwertverteilung für die Einwirkung

Für eine zuverlässigkeitsbasierte Betrachtung ist die Kenntnis von ein bis zwei Einwirkungsszenarien mit fester Wiederkehrperiode nicht ausreichend. Von Interesse ist vielmehr die gesamte Verteilung der jährlich zu erwartenden maximalen Lawineneinwirkungen. Wir sprechen hier vom «jährlichen Maximum», weil schon die zweitgrösste Lawine eines Winters in der Verteilung nicht enthalten ist, und weil sich die Extremwertverteilung – ebenso wie die in Kapitel 2.2 eingeführte Ziel-Zuverlässigkeit – auf einen Bezugszeitraum von einem Jahr bezieht. Für die Zuverlässigkeit ist insbesondere der obere Schwanzbereich der Verteilung von Interesse, also Einwirkungen mit einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10% und weniger, die im Mittel nur alle 10 Jahre oder seltener zu erwarten sind.

Da Szenarien mit bekannter Wiederkehrperiode rein mathematisch als Fraktile der jährlichen Extremwertverteilung gesehen werden können, sind sie gut geeignet, eben diesen Schwanzbereich der Verteilung zu charakterisieren. So wird zum Beispiel das 30-jährige Ereignis jährlich mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1/30 \approx 0.033$  überschritten bzw. mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1 - 1/30 \approx 0.967\%$  unterschritten. Die Lawineneinwirkung in diesem Szenario entspricht also dem 96.7%-Fraktile der Extremwertverteilung für das jährliche Maximum. In Abb. 30 ist dieser Zusammenhang am Beispiel einer Gumbel-Verteilung mit zwei oberen Fraktilewerten dargestellt, die durch das 30-jährige und das 300-jährige Ereignis definiert sind. Auf der y-Achse ist hierbei die jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit  $1 - F_{Q, \text{jährl. Max.}}(q)$  angegeben. Durch den logarithmischen Massstab liegt der Fokus auf dem oberen Schwanzbereich der Verteilung.



**Abb. 30** Illustration des Zusammenhangs zwischen der Extremwertverteilung für das jährliche Maximum der Lawineneinwirkung (Überschreitungswahrscheinlichkeit  $1 - F_{Q, \text{jährl. Max.}}(q)$ ) und Szenarien mit bekannter Wiederkehrperiode (hier  $T=30$  und  $T=300$ ), die als Fraktile der jährlichen Verteilung definiert sind.

Mathematisch lässt sich der Zusammenhang zwischen Einwirkungs-Szenarien und der Verteilung für das jährliche Maximum wie folgt formulieren:

$$F_{Q, \text{jährl. Max.}}(q_{\text{Szenario}, T}) = 1 - 1/T \quad (3.1)$$

Der Fokus liegt hierbei auf oberen Fraktilewerten (Wiederkehrperioden von 10, 30, 300 Jahren oder mehr -siehe  $q_{30}$  und  $q_{300}$  in Abb. 30) und somit auf dem «oberen Schwanz» der Verteilung mit grossen Ereignissen, die für die Zuverlässigkeitsanalyse relevant sind. Häufigere Ereignisse mit kleinen Wiederkehrperioden von weniger als 10 Jahren werden durch die so ermittelte Verteilung nicht automatisch gut abgebildet. Sie sind für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit aber auch nicht von Bedeutung.

Eine Wahrscheinlichkeitsverteilung mit zwei Parametern lässt sich prinzipiell anhand von zwei Szenarien mit bekannter Wiederkehrperiode definieren, das Modell reagiert dann allerdings sehr sensitiv auf Variationen der Szenario-Einwirkungen. Sind die Einwirkungen in mehr als zwei Szenarien bekannt (z.B. für Wiederkehrperioden von 10, 30 und 300 Jahren), so kann ein Zwei-Parameter-Modell in der Regel nicht mehr exakt durch die entsprechenden Fraktilewerte gelegt werden. Gesucht wird dann die Verteilungsfunktion, die die drei Szenarien zusammen so gut wie möglich repräsentieren kann, ähnlich wie bei einer Regressionsgeraden, die man an streuende Daten anpasst. Da jedes zusätzliche Einwirkungsszenario neue Informationen hinzufügt, wird die Modellierung tendenziell besser und in jedem Fall robuster, je mehr Szenarien man berücksichtigt.

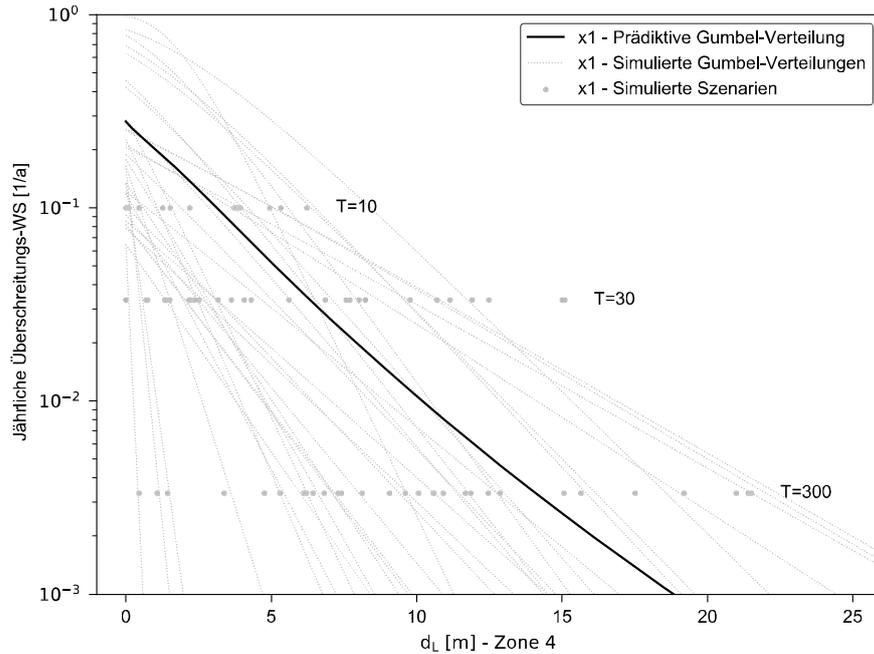
Wie bereits weiter oben in Abschnitt 4.1.1 diskutiert, sind die Szenario-Einwirkungen  $q_{\text{Szenario}, T}$  aber nicht exakt bekannt. Aus der in Abschnitt 4.2 bis 4.5 beschriebenen

Modellierung ergibt sich stattdessen eine Verteilung  $F_{Q, \text{Szenario}, T}(q_{\text{Szenario}, T})$ , die die Unsicherheiten in der Beurteilung der Szenarien beschreibt. Um diese Szenario-Unsicherheiten auch in der Modellierung der jährlichen Verteilung zu berücksichtigen, wird ein Simulationsansatz verwendet, der im Folgenden am Beispiel der dynamischen Lawineneinwirkungen im Fall 1 (vgl. Abschnitt 4.2) kurz erläutert werden soll:

- Ausgangspunkt ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung  $F_{Q, \text{Szenario}, T}(q_{\text{Szenario}, T})$  der Lawineneinwirkung je Szenario mit unterschiedlichen Wiederkehrperioden. In Abschnitt 4.2 für Fall 1 werden z.B. Ereignisse mit Wiederkehrperioden von 10, 30 und 300 Jahren betrachtet, das Vorgehen ist aber auch für beliebige Kombinationen anderer Wiederkehrperioden anwendbar (siehe z.B. Abschnitt 4.4 für Fall 3).
- Diese Szenario-Verteilungen werden verwendet, um zufällige (z.B. Dreier-)Gruppen von Szenario-Einwirkungen zu simulieren. Hierbei wird angenommen, dass die Verteilungen der Szenarien moderat korreliert sind (Korrelationskoeffizient  $\rho = 0.7$ ), da es zumindest wahrscheinlich ist, dass ein Experte, der das 30-jährige Szenario unterschätzt, auch das 300-jährige Ereignis unterschätzen wird. Als mathematisch notwendige Randbedingung wird zudem verlangt, dass in jeder Simulation z.B. das 300-jährige Ereignis grösser sein muss als das 30-jährige Ereignis, das wiederum grösser sein muss als das 10-jährige Ereignis.
- An jede simulierte Gruppe von Szenario-Einwirkungen (hier für die Wiederkehrperioden 10, 30 und 300 Jahren) wird eine Gumbel-Verteilung für das jährliche Maximum angepasst.
- Das Ergebnis dieser Anpassung ist ein Satz von simulierten Gumbel-Verteilungen für das jährliche Maximum der Lawineneinwirkungen.
- Durch Integration (bzw. Mittelwertbildung über alle Simulationen) ergibt sich die „prädiktive“ Extremwertverteilung für das jährliche Maximum der Lawineneinwirkung unter Berücksichtigung der Schätzunsicherheit. Diese kann gut durch eine Gammaverteilung angenähert werden.

Abb. 31 illustriert den beschriebenen Simulationsansatz am Beispiel der dynamischen Einwirkungen auf einen Abschnitt der Salezer Galerie im Fall 1, siehe Abschnitt 4.2. Dargestellt sind 30 Simulationen der drei Szenarien mit Wiederkehrperioden von 10, 30 und 300 Jahren, geschätzt durch den Experten x1. An jede Simulation wurde eine Gumbel-Verteilung angepasst. Gemittelt über alle Simulationen ergibt dies die «prädiktive» Gumbel-Verteilung, hier für den Experten x1. Die Approximation der prädiktiven Verteilung mit einer Gamma-Verteilung ist in der Abbildung nicht dargestellt.

Die geringe Anzahl Simulationen in Abb. 31 dient lediglich Illustrationszwecken. Für die in Abschnitt 4.2 bis 4.5 dargestellten Einwirkungsmodelle wurden jeweils mindestens 1000 Simulationen durchgeführt, um aus der Szenario-Verteilung die Extremwertverteilung des jährlichen Maximums herzuleiten.



**Abb. 31** Beispiel zur Anpassung der Extremwertverteilung an 30 Simulationen für die Fließhöhe  $d_L$  in den Szenarien  $T = 10, 30$  und  $300$  Jahre. Die Verteilung der Szenario-Einwirkungen sowie die «beste Schätzung» je Szenario wird in Abschnitt 4.2 hergeleitet (Galerie Salezer, Zone 4, Experte x1).

Für die Zuverlässigkeitsberechnung (Grenzzustandsfunktion, Abschnitt 2.3.2) werden die folgenden Informationen bzw. Kenngrößen der prädiaktiven Verteilung für das jährliche Maximum der Lawineneinwirkung verwendet:

- Der Verteilungstyp (Gammaverteilung als Approximation der prädiaktiven Verteilung)
- Mittelwert  $\mu_Q$  und Standardabweichung  $\sigma_Q$  der Verteilung
  - Der Variationskoeffizient  $v_Q = \sigma_Q / \mu_Q$  dient als Mass für die Streuung der Verteilung
  - Ein alternatives Mass für die Streuung ist das Verhältnis  $q_{300} / q_{30}$  der beiden (prädiaktiven) Fraktilwerten mit einer Wiederkehrperiode von 300 bzw. 30 Jahren.
  - Der Mittelwert  $\mu_Q$  wird zusätzlich benötigt, um den Anteil der variablen bzw. ständigen Einwirkung an der gesamten Einwirkung auf die Galerie zu bestimmen (Variable  $\alpha_G$  in Tab. 7).

#### 4.1.3 Bestimmung der charakteristischen Werte für die Bemessung

Für die Bemessungsgleichung (Abschnitt 2.3.3) werden die charakteristische Werte  $Q_k$  der Lawineneinwirkung für das 30-jährige und das 300-jährige Ereignis benötigt. Diese kann theoretisch einfach als Fraktilwert der für die Grenzzustandsfunktion definierten prädiaktiven Gammaverteilung bestimmt werden, siehe Abschnitt 2.4.3. In der Praxis wird allerdings weder die Verteilung des jährlichen Maximums bestimmt, noch die Unsicherheit der Szenario-Einwirkungen quantifiziert. Bei den im Lawinengutachten festgelegten Szenarien handelt es sich um eine «bestmögliche Schätzung» für das 30- bzw. 300-jährige Ereignis. Möglicherweise enthalten diese Szenarien einen gewissen (impliziten) Aufschlag für die Unsicherheiten in der Schätzung, dies liegt aber im Ermessen des Experten. Ziel ist an sich eine möglichst realitätsnahe Schätzung der zu erwartenden Einwirkungen auf die Galerie.

Ohne Aufschlag für die Schätzunsicherheit sind die so bestimmten charakteristischen Werte  $Q_k$  für das 30- und 300-jährige Ereignis in der Regel kleiner als die theoretisch korrekten Fraktilwerte der prädiaktiven Verteilung. Das liegt daran, dass die

Schätzunsicherheiten bei der Festlegung der charakteristischen Werte nicht berücksichtigt werden, während sie in der prädiktiven Verteilung bei korrekter Berücksichtigung die Streuung erhöhen. Für die Zuverlässigkeit der Galerie ist dies ungünstig. Allerdings hängt es faktisch von der Einschätzung des Experten ab, wie gross dieser Effekt ist. Eine detaillierte Analyse dieser Fragestellung wird am Beispiel der Galerie Salezer in Davos für den Fall 1 durchgeführt, da hier mehrere Lawinenexperten ihre Schätzung abgegeben haben (siehe Abschnitt 4.2). Für die übrigen Galerien und Fälle werden Fraktilwerte der prädiktiven Verteilung verwendet, um die charakteristischen Werte  $Q_k$  für die Bemessungsgleichung zu bestimmen.

## 4.2 Dynamische Einwirkungen durch Fliesslawinen (Fall 1)

Fall 1 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] beschreibt die Einwirkungen aus einer Fliesslawine über schneefreiem Galeriedach. Zur Bestimmung der Unsicherheiten in diesem Fall müssen die Fliesshöhe und -geschwindigkeit der Lawine probabilistisch modelliert werden. Im Gegensatz zu Fall 2 und Fall 3 ist aber die Hanggeometrie eine feste Grösse, da keine Schneeablagerungen aus Vorlawinen (oder natürlicher Ablagerung) berücksichtigt werden.

### 4.2.1 Unsicherheiten bei der Beurteilung der dynamischen Einwirkungen

Die dynamischen Einwirkungen auf eine Lawinengalerie werden vom projektierenden Ingenieur anhand von Angaben zur Fliesshöhe und zur Geschwindigkeit der 30- und 300-jährigen Lawine berechnet. Die Formeln zur Berechnung der Einwirkungen sind in ASTRA-Richtlinie 12007 [1] vorgegeben. Für die Fliesshöhe und Geschwindigkeit der Lawine wird in der Regel ein Gutachten bei einem anerkannten Lawinenexperten in Auftrag gegeben. Dieser stützt seine Einschätzung auf die vorhandenen Daten zur örtlichen Schneesituation und zur historischen Lawinenaktivität ab. Weiter beurteilt er die Charakteristik des Lawinenzuges, um die Eingangsgrössen für die lawinendynamischen Berechnungen festzulegen. Das numerische Simulationsmodell RAMMS [32] stellt heute den Stand der Technik dar.

Bei der Ermittlung der Einwirkungen sowie bei den zugrundeliegenden lawinendynamischen Berechnungen können grundsätzlich zwei Arten von Unsicherheiten unterschieden werden:

- Modellunsicherheiten ergeben sich allgemein aus der Annäherung eines komplexen Gefahrenprozesses durch ein vereinfachtes Rechenmodell
- Unsicherheiten in den Modell-Eingangsgrössen spielen vor allem bei der Festlegung der Lawineneinwirkungen an einer bestimmten Galerie eine grosse Rolle

Die Klassifizierung von Unsicherheiten bei der Ermittlung von Lawineneinwirkungen ist in Tab. 21 dargestellt. Die verschiedenen Unsicherheiten werden im Folgenden jeweils kurz diskutiert.

**Tab. 21** Klassifizierung der Unsicherheiten bei der Beurteilung von dynamischen Lawineneinwirkungen

Kategorie	Modellunsicherheiten	Unsichere Eingangsgrößen
<b>Unsicherheiten bei den lawinendynamischen Berechnungen</b>	Annahmen und Vereinfachungen in der Berechnungsmethodik, nicht oder nur vereinfacht berücksichtigte Faktoren (z.B. Mitreissen der Schneedecke, Schneeablagerungen in der Sturzbahn), nicht betrachtete Szenarien (z.B. Nassschneelawinen)	Gutachterliche Festlegung der Anrisszenarien (Anrissfläche, Anrissmächtigkeit, Windeinfluss) und der Reibungsparameter (in der Sturzbahn, im Auslaufgebiet)
<b>Unsicherheiten bei der Berechnung der Einwirkungen auf das Galeriedach</b>	Unsicherheiten, Annahmen und Vereinfachungen in den Berechnungsformeln gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1], nicht berücksichtigte Einwirkungen oder Kombinationen (z.B. Vernachlässigung von Kriechdrücken in Fall 4)	Festlegung der Raumlasten (Schneewichte) und der Reibungskoeffizienten gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] oder gemäss gutachterlicher Festlegung

### Unsicherheiten in den lawinendynamischen Berechnungen

Die Qualität der lawinendynamischen Berechnungen bei gegebenen Eingangsgrößen wird durch Forschung am SLF und anderen Forschungseinrichtungen stetig optimiert, zum Beispiel durch die Verbesserung bestehender Modelle mit Hilfe von Beobachtungen und Versuchsergebnissen oder durch die Entwicklung neuer Modelle für spezielle Lawinentypen und Fragestellungen. Weiter ist auch die Ausbildung in der Anwendung der Berechnungsmodelle von Bedeutung. Periodisch werden dazu Kurse und Workshops angeboten. Trotzdem verbleiben kleinere oder grössere Unsicherheiten bei der Bestimmung der Einwirkungen infolge von Schnee und Lawinen, die von Fall zu Fall variieren können. Relevant sind unter anderem die folgenden Aspekte:

- Die lawinendynamischen Modelle wurden insbesondere für das korrekte Erreichen von Auslaufstrecken und Geschwindigkeiten kalibriert. Demgegenüber ist die Berechnung der Fließhöhe mit grösseren Unsicherheiten behaftet.
- "Berechnung" der Lawinenablagerung: Ohne gute Beobachtungen ist eine rechnerische Ermittlung der Ablagerungshöhen sehr schwierig, die Modellierung stösst hier an ihre Grenzen. Die maximale Ablagerungshöhe entsteht, wenn die Schneemassen auf einer kurzen Strecke stoppen. Dies trifft z.B. für Nassschneelawinen mit einer grossen Reibung zu. Für Fall 1 (Fließlawine über schneefreiem Galeriedach) spielen diese Punkte jedoch keine Rolle.
- Die verfügbaren Rechenmodelle und das Vorgehen zur Festlegung der Eingangsgrößen wurden für trockene Fließlawinen entwickelt und kalibriert; die Beurteilung anderer Lawinenszenarien (z.B. Gleitschnee- oder Nassschneelawinen, Staublawinen) ist mit deutlich grösseren Unsicherheiten verbunden.

Für trockene Lawinen dürfte die gutachterliche Festlegung der Eingangsgrößen eine deutlich grössere Rolle spielen als die Unsicherheiten in der Berechnung. Die Schwierigkeiten bei der Wahl dieser Eingangsgrößen unterscheiden sich sehr stark je nach betrachtetem Standort, vgl. Margreth et al. [33]. Anders als bei den Unsicherheiten des Berechnungsmodells wird sich die Wahl der Eingangsgrößen von Experte zu Experte unterscheiden. Obwohl den Experten der grosse Spielraum bei der gutachterlichen Festlegung in der Regel bewusst ist, müssen sie doch am Ende für die Bemessung ein Szenario fixieren, da die lawinendynamischen Berechnungen ohne explizite Berücksichtigung der Unsicherheiten durchgeführt werden. Der Experte prüft aber die Plausibilität der Berechnungsergebnisse und führt bei Bedarf Korrekturen durch wie z.B. eine Erhöhung oder Reduktion der Reibung oder des Volumens, um die Sensitivität der Resultate zu prüfen.

Für die vorliegende Untersuchung wird angenommen, dass die Unsicherheiten bei der Wahl der Eingangsgrößen in der Regel deutlich grösser sind als die Unsicherheit des

Berechnungsmodells. Der Fokus von Abschnitt 3.3.2 liegt deshalb auf der Modellierung der Unsicherheit in den Eingangsgrössen. Die Abgrenzung zwischen den beiden Unsicherheitstypen ist allerdings weniger scharf, als es auf den ersten Blick erscheint, da einzelne Variablen (insbesondere die Reibungsparameter) durchaus auch als Modellparameter interpretiert werden können, die eine Kalibrierung des Berechnungstools, z.B. anhand von Beobachtungen aus dem Lawinenkataster, erlauben.

#### *Unsicherheiten in der Berechnung der Einwirkungen auf das Galeriedach*

Basierend auf den Ergebnissen der lawinendynamischen Berechnungen werden für die Bemessung die Einwirkungen auf das Galeriedach ermittelt. Die hierfür verwendeten Formeln z.T. aus ASTRA-Richtlinie 12007 [1] wurden in einem früheren Forschungsprojekt durch Versuche am SLF entwickelt, siehe Platzer und Margreth [36] für Details. Im Vergleich zu den oben diskutierten Unsicherheiten in den lawinendynamischen Berechnungen dürften die Modell- und Eingabeunsicherheiten bei der Berechnung der Einwirkungen eher klein sein und werden deshalb bei der im Folgenden beschriebenen Modellierung vernachlässigt.

Eine wichtige Unsicherheit besteht allerdings bezüglich einer möglichen Dämpfung der Umlenkraft durch die bestehende Schneedecke, insbesondere wenn Ablagerungen aus früheren Lawinenabgängen das Galeriedach bedecken (Fall 3 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1]). In Experimenten wurde teilweise überhaupt keine Umlenkraft gemessen, d.h. es kam offenbar zu einer vollständigen Dämpfung der dynamischen Kräfte aufgrund der kurzen Dauer der Einwirkung.

In den Fällen 1 und 2 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] ist die Veränderung der Geländegeometrie durch Schneeablagerung an der Lawinenfront, d.h. vor Erreichen der maximalen Einwirkungen, eine weitere grosse Unsicherheit. Mit dem derzeitigen Wissensstand ist es schwer, den Einfluss dieser Unsicherheiten bei der Berechnung der Lawineneinwirkungen zu quantifizieren. Die erwähnten Effekte können aber dazu führen, dass die Einwirkungen - ggf. stark - überschätzt werden.

Die grössten Unsicherheiten bei den Festlegungen gemäss ASTRA-Richtlinie liegen bei den folgenden Punkten:

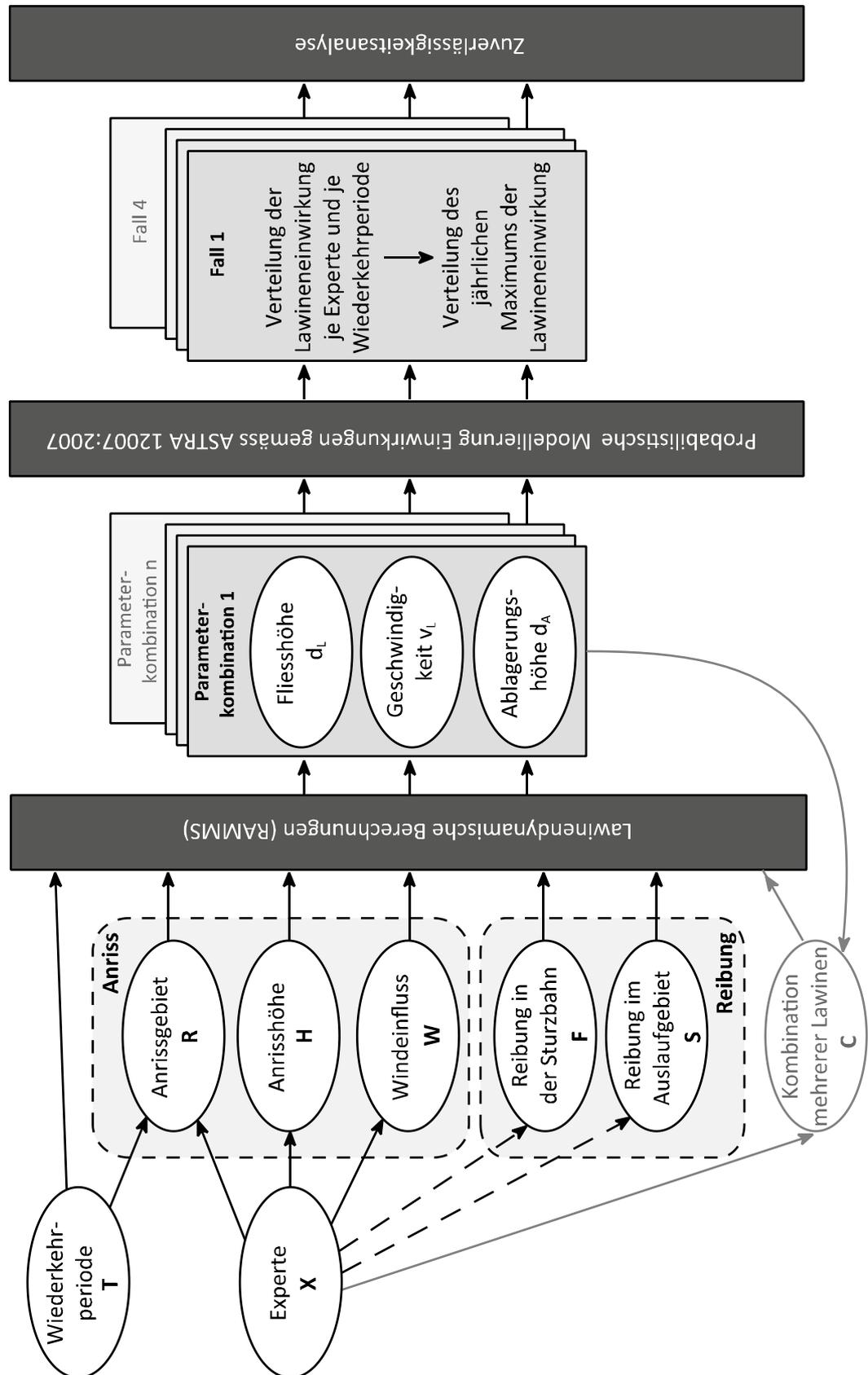
- Die Berechnungsformeln basieren auf Experimenten ohne Schneedecke oder Lawinenablagerungen. Wie stark z.B. die Umlenkraft oder die Reibung durch eine Schneedecke gedämpft wird, ist nicht bekannt.
- Das Lastverteilungsmodell der Umlenkraft (Länge Umlenkstrecke) wurde mit den Resultaten von Modell- oder kleinmassstäblichen Gleitbahnversuchen ermittelt. Dazu wurden nach der Umlenkung nur an zwei Positionen die Einwirkungen gemessen.
- Dasselbe gilt für den Einfluss von Schneeablagerungen an der Lawinenfront bei Fällen ohne Vorablagerungen durch frühere Lawinenereignisse.
- Beim Überfliessen der Dachkante einer Galerie können Randeffekte entstehen, die bisher nicht quantifiziert wurden.
- Die Ermittlung der Einwirkungen im Fall 8 „Lawinenaufprall auf das Galeriedach“ ist mit grossen Unsicherheiten behaftet, da dazu praktisch keine Forschungsergebnisse bestehen.

Weitere, eher weniger bedeutenden Unklarheiten bei der Anwendung der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] durch die bemessenden Ingenieure werden in Kapitel 6.2.1 diskutiert.

## **4.2.2 Vorgehen zur Modellierung der Unsicherheiten**

Um die Unsicherheiten aus der gutachterlichen Festlegung der Eingangsgrössen und ihren Einfluss auf das Berechnungsergebnis (Fliesshöhe  $d_L$ , Lawinengeschwindigkeit  $v_L$  und Ablagerungshöhe  $d_A$ ) quantitativ zu modellieren, wurde ein szenario-basierter Ansatz

unter Verwendung von RAMMS-Simulationen entwickelt. Das Vorgehen ist in Abb. 32 illustriert und wird im Folgenden kurz erläutert.



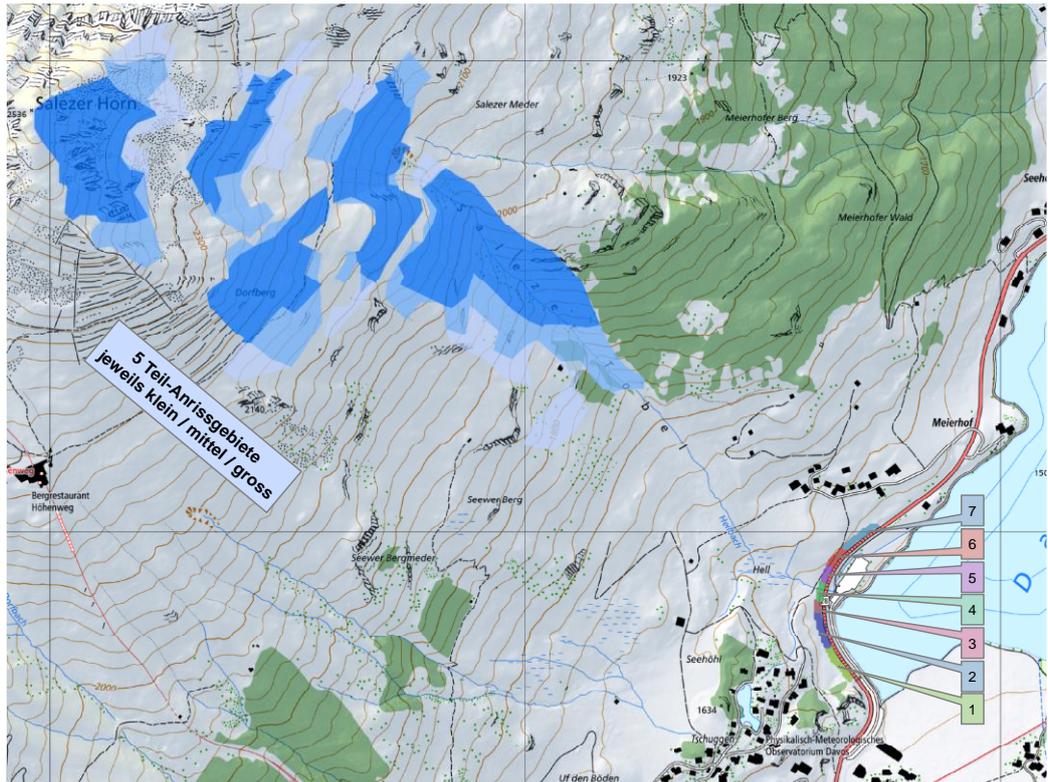
**Abb. 32** Illustration der Eingangsgrößen zur Modellierung der Unsicherheiten in lawinendynamischen Berechnungen (Fall 1).

Die gutachterliche Festlegung der Eingangsgrössen und zugehörigen Unsicherheiten erfolgt für jede **Wiederkehrperiode T** durch einen oder mehrere **Lawinenexperten X**:

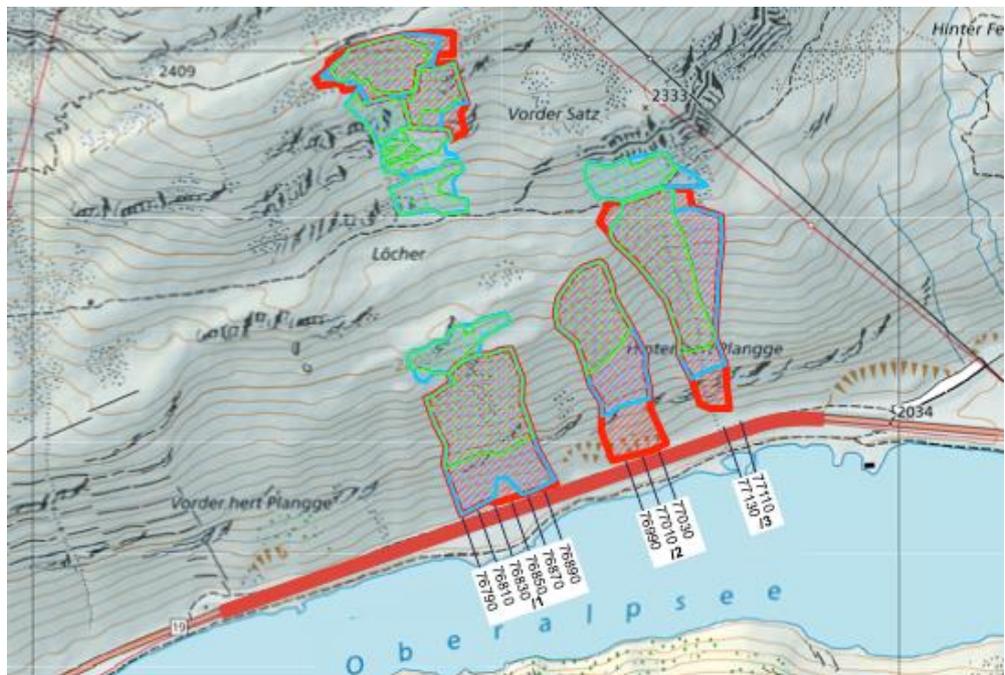
- **Anrissgebiet R:** Festlegung mehrerer Anriss-Szenarien für eine «optimistische», «realistische», «vorsichtige» und «pessimistische» Einschätzung eines Ereignisses mit Wiederkehrperiode T und Abschätzen der Wahrscheinlichkeiten, dass die so definierten Anriss-Szenarien überschritten werden (Anrissfläche grösser als geschätzt). Die Anriss-Szenarien definieren die Lage und Grösse des Anrissgebiets.
- (Ausgangswert der) **Anrisshöhe H:** Zusätzlich zu der Berechnung nach den Schweizer Richtlinien [34] wird noch eine zweite, etwas konservativere Berechnung mit ca. 10% grösseren Anrisshöhen durchgeführt (für beide Fälle variiert die Anrisshöhe in Abhängigkeit der Wiederkehrdauer, der Höhe über dem Meeresspiegel und der Geländeneigung des Anrissgebiets). Der Experte schätzt die Überschreitungs-Wahrscheinlichkeiten der Anrisshöhe ohne Windeinfluss für beide Fälle.
- **Windeinfluss W:** Zur Berücksichtigung eines möglichen Triebschneeeintrags in exponiertem Gelände wurden Simulationen ohne und mit Windeinfluss (durchschnittlich ca. 30% erhöhtes Lawinenvolumen) durchgeführt. Der Experte schätzt die Überschreitungs-Wahrscheinlichkeiten der beiden Windeintrags-Szenarien.
- **Reibung in der Sturzbahn F:** Die Reibungsparameter werden durch den Charakter der Sturzbahn, das Lawinenvolumen und die Schneeart bestimmt. Um die daraus resultierende Unsicherheit zu quantifizieren, werden verschiedene Fälle berechnet, deren Eintrittswahrscheinlichkeit durch den Lawinenexperten geschätzt wird. Die grösste Lawineneinwirkung tritt nicht zwingend bei geringer Reibung auf.
- **Reibung im Auslaufgebiet S:** Nasse oder feuchte Schneeverhältnisse im Auslauf können zu einem plötzlichen Anhalten der Lawine und zu hohen Lawinenablagerungen auf der Galerie führen. Um dies zu berücksichtigen, werden auch hier verschiedene Fälle berechnet, deren Eintrittswahrscheinlichkeit durch den Lawinenexperten geschätzt wird.
- **Kombination mehrerer Lawinen C:** Dieser Parameter gibt an, ob abgelagerter Lawinenschnee aus einer oder mehreren Vorlawinen die Fliesslawine beeinflusst. Bei Fall 1 (schneefreies Galeriedach) wird keine Vorablagerung berücksichtigt.

Die so zusammengestellten Informationen zu den Eingangsgrössen (Tab. 22) und ihrer Unsicherheit (Tab. 24) werden verwendet, um das probabilistische Modell für die Einwirkungen auf die Galerie zu erstellen. Der detaillierte Ablauf ist im Folgenden beschrieben.

Eine Darstellung der Anrissgebiete zur Festlegung der Anriss Szenarien (Parameter R) ist in Abb. 33 für die Galerie Salezer und in Abb. 34 für die Galerie am Oberalppass zu finden.



**Abb. 33** Übersicht des Lawineneinzugs Salzer mit den untersuchten Abschnitten der Strassengalerie (rote Linie, Zonen 1 bis 7). Zur Festlegung der Anrisszenarien  $R$  wurden fünf potenzielle Lawinenanrissgebiete (blaue Polygone) identifiziert und für die vorliegende Analyse wurde vorgegeben, dass Lawinen in einem kleinen (dunkelblauen), mittleren (blauen) oder grossen (hellblauen) Teil dieser Gebiete anreissen können.



**Abb. 34** Galerie Oberalppass mit den Lawinenzügen I1, I2 und I3 sowie den analysierten Querprofilen. Für die vorliegende Analyse wurde angenommen, dass Lawinen in einem kleinen (grün), mittleren (blau) oder grossen (rot) Teil dieser Gebiete (einzeln oder zum selben Zeitpunkt) anreissen können.

### 4.2.3 Lawinendynamische Berechnungen

Zunächst wird für alle Kombinationen von R (Anrissfläche), H (Anrisshöhe), W (Windeinfluss), F (Reibung Sturzbahn) und S (Reibung Auslauf) jeweils eine RAMMS-Berechnung durchgeführt. Hieraus ergibt sich für jede Wiederkehrperiode T und jeden Experten X ein Satz von Berechnungsergebnissen, mit Angaben zur Fließhöhe  $d_L$ , zur Fließgeschwindigkeit  $v_L$  und zur Ablagerungshöhe  $d_A$ .

Die verschiedenen RAMMS-Eingangsgrößen und möglichen Ausprägungen bzw. Szenarien sind in Tab. 22 definiert.

**Tab. 22** Definition der Eingangsgrößen und Ausprägungen bzw. Szenarien für die Simulation mit RAMMS

<b>Wiederkehrperiode T</b> des betrachteten Ereignisses und <b>Experte X</b> , der die Beurteilung durchführt	
t <sub>1</sub> 10-jähriges Ereignis	x <sub>1</sub> Experte 1
t <sub>2</sub> 30-jähriges Ereignis	x <sub>2</sub> Experte 2 (nur Galerie Salezer)
t <sub>3</sub> 300-jähriges Ereignis	x <sub>3</sub> Experte 3 (nur Galerie Salezer)
<b>Anriss-Szenario R</b> (Wahl der Anrissgebiete), <b>Anrisshöhe H</b> (relativ zu [34]) und <b>Windeintrag W</b>	
r <sub>1</sub> Optimistische Einschätzung	h <sub>1</sub> Anrisshöhe bzw. – Mächtigkeit gemäss [34]
r <sub>2</sub> Realistische Einschätzung	h <sub>2</sub> Etwas grössere Anrisshöhe bzw. -Mächtigkeit
r <sub>3</sub> Vorsichtige Einschätzung	w <sub>1</sub> Kein Windeintrag im Anrissgebiet
r <sub>4</sub> Pessimistische Einschätzung	w <sub>2</sub> Triebsschnee erhöht die Anrisshöhe
<b>Reibung in der Sturzbahn F</b> (relativ zur RAMMS-Richtlinie)	
Annahmen Galerie Salezer Davos	
f <sub>1</sub> Reibung viel kleiner als gemäss Richtlinie	f <sub>1</sub> Reibung viel kleiner als nach Richtlinie
f <sub>2</sub> Reibung kleiner als gemäss Richtlinie	f <sub>2</sub> Reibung gemäss Richtlinie
f <sub>3</sub> Reibung gemäss Richtlinie	f <sub>3</sub> Reibung grösser als nach Richtlinie
f <sub>4</sub> Reibung grösser als gemäss Richtlinie	f <sub>4</sub> Reibung Nassschneelawinen ganze Sturzbahn
Annahmen Galerie Oberalppass	
<b>Reibung im Auslaufgebiet S</b> (in der Nähe des Galeriedachs)	
Annahmen Galerie Salezer Davos	
s <sub>1</sub> Reibung im Vergleich zur Reibung in der Sturzbahn grossflächig erhöht	s <sub>0</sub> Keine erhöhte Reibung
	s <sub>1</sub> Erhöhte Reibung auf Galeriedach
s <sub>2</sub> Kurz oberhalb der Galerie erhöhte Reibung	s <sub>2</sub> Erhöhte Reibung am Geländeknick
s <sub>3</sub> Erst auf dem Galeriedach erhöhte Reibung	s <sub>3</sub> Erhöht 6Hm oberhalb vom Knick
	s <sub>4</sub> Erhöht 20Hm oberhalb vom Knick
	s <sub>5</sub> Stark erhöht 20Hm oberhalb
	s <sub>6</sub> Extrem erhöht 20Hm oberhalb

Für jeden Experten und jede Wiederkehrdauer ergeben sich am Beispiel der Galerie Salezer  $4 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 3 = 192$  Variationen der Eingangsgrößen R, H, W, F und S, die mit RAMMS [32] berechnet wurden. Bei der Galerie am Oberalppass sind es sogar  $4 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 7 = 448$  Variationen. Die Unterschiede zwischen den beiden Galerien in der Modellierung der Reibungsparameter F und S ergeben sich aus der Topographie: Bei der Salezer Galerie ist das Gelände gleichförmiger, weshalb eine Variation der Reibungsparameter weniger Einfluss auf die Verteilung der Einwirkungen auf dem Galeriedach hat.

Der Einfluss der verschiedenen Eingangsgrößen auf die Grösse der (berechneten) Einwirkungen im Galeriebereich lässt sich nicht immer perfekt vorhersehen. Grundsätzlich kann man aber das folgende Verhalten erwarten:

- Je grösser das Anriss-Szenario **R** (analog **H** und **W**), desto grösser die Einwirkungen, d.h. die Einwirkung steigt von  $r_1$  bis  $r_4$ .
- Für die Reibungsparametern **F** und **S** gilt Folgendes:
  - Eine grössere Reibung in der Sturzbahn **F** bedeutet nicht immer kleinere Einwirkungen, d.h. die Einwirkung steigt nicht unbedingt von  $f_1$  bis  $f_4$ .
  - Bei der Galerie Salezer verursacht eine grosse Reibung im Galeriebereich **S** deutlich höhere Einwirkungen als Ereignisse mit geringer Reibung, z.B. infolge einer grösseren Fliesshöhe. Am Oberalppass verändert sich vor allem die Verteilung der Ablagerungen auf dem Galeriedach.

Für die Berechnungen wurde die RAMMS Version 1.6 verwendet. Diese Version ermöglicht es, Batch-Berechnungen durchzuführen und das Anreissen von Sekundärlawinen zu berechnen. Die Input-Files für die Batch-Berechnungen wurden mit dem Bash-Shellskript erstellt, für die Nachbereitung haben wir ArcGIS, Bash-Shellscripte und Python verwendet. Das verwendete Rechengitter basiert auf dem Geländemodell swissALTI3D. Im Falle der Galerie Salezer betrug die Gitterweite 5m, bei der Oberalp-Galerie 2m.

Die Ergebnisse der RAMMS-Berechnungen für die insgesamt mehr als 3000 Variationen der Eingangsgrössen (Salezer und Oberalp, alle Szenarien und Experten) wurden mit Hilfe von verschiedenen Auswertungen und Vergleichen zwischen den verschiedenen Variationen plausibilisiert, um mögliche Fehler, z.B. durch abgebrochene Rechenabläufe oder Eingabefehler, aufzudecken. Es wurden jedoch keine Anpassungen bei den getroffenen Annahmen vorgenommen, was die Variation der Ergebnisse tendenziell erhöht: in der Praxis würde ein Lawinenexperte die Berechnungen auch anhand von verfügbaren Aufzeichnungen zu früheren Lawinenabgängen überprüfen und ggf. anpassen.

#### *Angaben zur «besten Schätzung» durch die Lawinenexperten*

Zusätzlich zu den Angaben für die einzelnen Eingangsgrössen haben die drei beteiligten Lawinenexperten für die Salezer Galerie in Davos auch festgelegt, welche Kombination der Eingangsgrössen sie für eine «bestmögliche Schätzung» der Ereignisse mit verschiedenen Wiederkehrperioden verwenden würden. Eine Plausibilisierung mit historischen Lawinendaten fand auch hierfür nicht statt. Dies entspricht in etwa der Situation, wenn ein Gutachten für ein Gebiet ohne jegliche Lawinenaufzeichnungen erstellt werden muss.

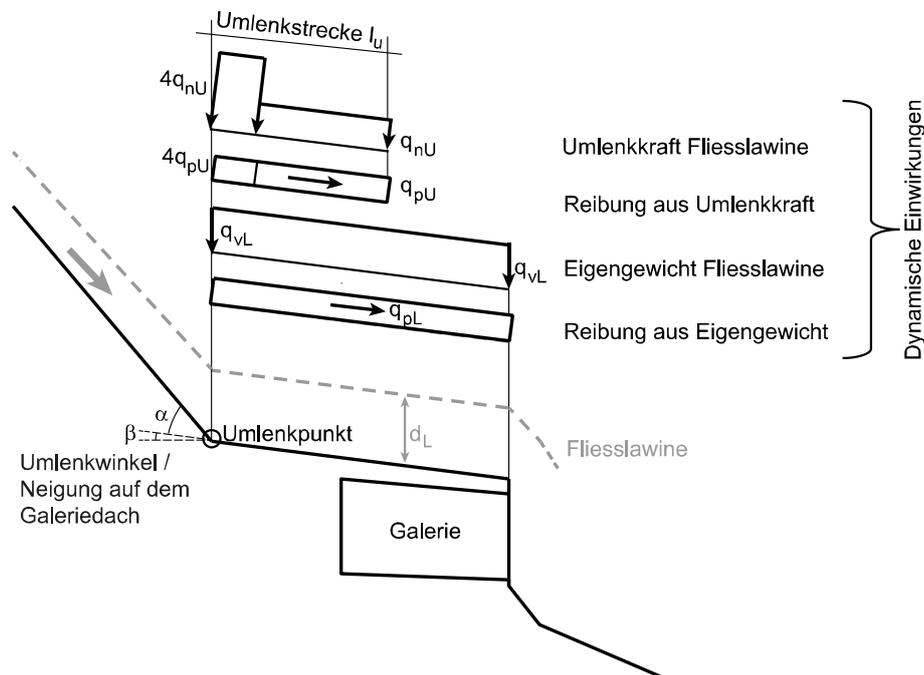
Für die dynamischen Lawineneinwirkungen auf die Salezer Galerie wird die «beste Schätzung» der Experten wie folgt bestimmt:

- Für die Eingangsgrössen **R**, **H** und **W** legt jeder Experte fest, welchen Wert er als «beste Schätzung» verwenden würde. In der Regel handelt es sich hierbei um den Median (50% Überschreitungswahrscheinlichkeit). Der gewählte Wert kann entweder einer der Ausprägungen gemäss Tab. 22 entsprechen oder einen anderen, z.B. interpolierten Wert annehmen.
- Da eine Festlegung der Reibungsparameter **F** und **S** ohne Kenntnis der Rechenergebnisse schwierig ist, werde diese auch für die «beste Schätzung» variiert und mit ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit gemäss Tab. 24 gewichtet.
- Die «beste Schätzung» eines einzelnen Experten wird durch die so festgelegten Eingangsgrössen bzw. Variationen ermittelt. Es handelt sich um einen Wert im mittleren Bereich der Einwirkungsverteilung je Szenario, dieser ist jedoch nicht exakt gleichzusetzen mit einer statistischen Kenngrösse wie z.B. Median, Modus oder Mittelwert der Verteilung.
- Bei Berücksichtigung der Schätzungen durch alle Experten wird der Median der Einwirkungsverteilung je Szenario als «beste gemeinsame Schätzung» aller Experten verwendet.

Bei der Oberalp-Galerie wurde die Schätzung nur durch einen Experten (x1) durchgeführt. Zum Vergleich mit der Salezer Galerie (Schätzung durch alle Experten) wurde hier ebenfalls der Median der Szenario-Verteilung als «beste Schätzung» verwendet.

#### 4.2.4 Berechnung der Einwirkungen auf die Galerie

Für jede Kombination der Eingangsgrößen (inklusive der «besten Schätzung») wurden schliesslich die dynamischen Einwirkungen auf die Galerie bestimmt. Diese basieren auf den Rechenformeln gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] und berücksichtigen für Fall 1 die Hanggeometrie ohne Schneeablagerung im Auslaufbereich bei der Galerie. Abb. 35 zeigt eine schematische Darstellung aller Einwirkungen, die in dieser Einwirkungskombination auf die Galerie wirken. Die hangparallelen Reibungskräfte ergeben sich aus den zugehörigen vertikalen (lotrecht wirkend) bzw. senkrecht zum Hang wirkenden Kräften.



**Abb. 35** Illustration der auf die Galerie wirkenden Kräfte im Fall 1 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] (Fließlawine über schneefreiem Galeriegedäch).

Im Folgenden wird die Modellierung der dynamischen Einwirkungen im Fall 1 für die in der vorliegenden Untersuchung betrachteten Galerien beschrieben.

##### Einwirkung infolge Gewichts der Fließlawine (Galerie Salezer)

Bei der Galerie Salezer in Davos gibt es keinen nennenswerten Geländeknick oberhalb der Galerie, weshalb keine Umlenkkräfte bei der Festlegung der Einwirkungen berücksichtigt werden müssen. Die dynamische Einwirkung auf die Galerie ist dominiert durch die vertikale Kraft aus dem Eigengewicht der Fließlawine und somit proportional zur Fließhöhe  $d_L$ . Zum Vergleich mit der ständigen Einwirkung (Eigengewicht Galeriegedäch und Auflast aus Erdüberdeckung, siehe Kapitel 3.6.1) wird die Fließhöhe mit der Raumlast  $\gamma_L = 3.0 \text{ kN/m}^3$  multipliziert. Dies ist der Richtwert, der in der Richtlinie ASTRA-Richtlinie 12007 [1] für trockene Fließlawinen vorgeschlagen wird, die bei der Salezer Galerie primär zu erwarten sind. Die Unsicherheiten in der Annahme zur Raumlast werden vernachlässigt (siehe Diskussion in Abschnitt 4.2.1). Im Galerie-Querschnitt ergibt sich die folgende Flächenlast als vertikale Einwirkung auf das Galeriegedäch:

$$q_{vL} = \gamma_L \cdot d_L \quad (3.2)$$

Ebenfalls vernachlässigt werden die Unsicherheiten in der Festlegung des Reibungskoeffizienten gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1], der für die Ermittlung der hangparallelen Reibungskraft benötigt wird. Es wird angenommen, dass die Streuung der Fließhöhe  $d_L$  die Unsicherheit in den dynamischen Lawineneinwirkungen dominiert. Unter dieser Annahme sind die hangparallelen Reibungskräfte proportional zur vertikalen Gewichtskraft und haben keinen Einfluss auf die Modellierung der Unsicherheiten, weshalb sie in der vorliegenden Untersuchung für die Salezer Galerie vernachlässigt werden<sup>3</sup>.

#### *Kombination mit Umlenkkraft (Galerie Oberalppass)*

Bei der Galerie am Oberalppass müssen zusätzlich zum Eigengewicht der Fließlawine auch noch Umlenkkräfte berücksichtigt werden, sofern diese auf das Galeriedach einwirken. Um die Umlenkkräfte zu bestimmen, werden aus der Hanggeometrie ohne Schnee zunächst die folgenden geometrischen Grössen ermittelt (siehe auch Abb. 35):

- Galeriewinkel  $\beta$  (Neigung der Erdüberdeckung auf dem Galeriedach)
- Hangwinkel  $\varphi$  (Neigung des Hangs im steilen Bereich oberhalb der Galerie)
- Umlenkwinkel  $\alpha_U = \varphi - \beta$  zur Berechnung der Umlenkkraft
- Abstand des Umlenkpunktes von der Galerierückseite

Der Umlenkpunkt ist hier definiert als der Schnittpunkt zweier Geraden, mit denen die Hanggeometrie angenähert wird: eine flache Gerade mit Steigungswinkel  $\beta$  auf dem Galeriedach und eine steile Gerade mit Steigungswinkel  $\varphi$  im Hang oberhalb der Galerie.

Die geometrischen Grössen variieren mit der Hanggeometrie entlang der Galerie, d.h. sie sind abhängig von der Kilometrierung. Für einen bestimmten Galerieabschnitt ist die Hanggeometrie deterministisch, da im Fall 1 keine Schnee- oder Lawinenablagerungen in der Sturzbahn berücksichtigt werden müssen. In Tab. 23 sind die verschiedenen Winkel sowie der (horizontale) Abstand des Umlenkpunktes zur Galerierückseite für die betrachteten Galerieabschnitte zusammengestellt. Die Galerieabschnitte wurden so ausgewählt, dass die massgebenden Lasten je Lawinenzug enthalten sein sollten.

**Tab. 23** Hanggeometrie und Abstand des Umlenkpunktes zur Galerierückseite am Oberalppass ohne Schnee (Fall 1).

Lawinenzug	Kilometer (Zone)	Hangwinkel $\varphi$ [°]	Galeriewinkel $\beta$ [°]	Umlenkwinkel $\alpha_U$ [°]	Abstand [m] zur Galerie
1	76790	38.7	10.5	28.2	11.2
	76810	40.7	10.8	29.9	14.7
	76830	41.9	10.5	31.4	13.5
	76850	38.4	9.2	29.2	9.1
	76870	38.1	9.4	28.7	6.1
	76890	40.9	9.4	31.4	6.5
2	76990	40.3	7.6	32.7	7.7
	77010	40.4	8.7	31.7	7.7
	77030	38.9	10.7	28.2	6.9
3	77090	34.1	11.6	22.5	15.6
	77110	43.5	11.5	32.0	23.0

Mit der bekannten Geometrie kann nun die Umlenkkraft einer beliebigen (zufälligen) Fließlawine bestimmt werden. Die hierfür benötigte Fließhöhe  $d_L$  und -geschwindigkeit

<sup>3</sup> Diese Vereinfachung ist nur deshalb zulässig, weil der Fokus auf der Variation bzw. Unsicherheit der Lawineneinwirkung liegt, nicht auf ihrem absoluten Wert wie im Falle einer realen Bemessung.

$v_L$  werden den Ergebnissen der RAMMS-Simulationen entnommen. Die Umlenkkräfte berechnet sich mit der folgenden Formel:

$$q_{nU} = \frac{\gamma_L \cdot d_L \cdot v_L^2 \cdot \sin \alpha}{6 \cdot d_L \cdot 9.81 \text{ m/s}^2} \quad (3.3)$$

Der Galeriestandort am Oberalppass ist ein typisches Gebiet für Nass- und Gleitschneelawinen. Für die Raumlast der Fließlawine wird deshalb der Richtwert für Nassschneelawinen gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] verwendet, d.h.  $\gamma_L = 4.5 \text{ kN/m}^3$ . Die Unsicherheit in dieser Annahme wird auch hier vernachlässigt.

Die Umlenkkräfte wirken als Flächenlast auf der Umlenkstrecke  $l_u$  (gemessen ab dem Geländeknick bzw. Umlenkpunkt), die abhängig von der Fließhöhe  $d_L$  bestimmt wird:

- Einfache Umlenkkräfte  $q_{nU}$  auf der normalen Umlenkstrecke  $l_u = 6 \cdot d_L$
- Vierfache Umlenkkräfte  $4 \cdot q_{nU}$  auf einer verkürzten Umlenkstrecke  $l_u/4 = 1.5 \cdot d_L$

Es wird angenommen, dass Kräfte, die hinter der Galerierückseite wirken, vollständig vom Erdreich aufgenommen werden können (keine Erhöhung des Erddrucks durch dynamische Einwirkungen, vgl. ASTRA-Richtlinie 12007 [1]). Nur der Teil der Umlenkstrecke, der auf dem Galeriedach liegt, wird bei der Berechnung der Einwirkungen auf die Galerie berücksichtigt. Es hängt also sowohl von der Lage des Umlenkpunktes als auch von der (zufälligen) Fließhöhe  $d_L$  ab, ob bzw. in welchem Umfang die verschiedenen Komponenten der Umlenkkräfte in die Berechnung der dynamischen Einwirkungen einfließen. Je grösser die Fließhöhe der Lawine ist, desto eher wird die Umlenkkräfte – oder sogar die vierfache Umlenkkräfte – eine Rolle spielen.

Die Modellunsicherheiten in der Berechnung der Umlenkkräfte gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] sind nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung; es wird angenommen, dass das beschriebene Modell die Abnahme der Umlenkkräfte mit zunehmendem Abstand vom Geländeknick bzw. Umlenkpunkt ausreichend genau repräsentiert. Im Fokus liegt vielmehr der Einfluss der Rechenformeln auf die Unsicherheiten der Lawineneinwirkungen in Abhängigkeit der getroffenen Annahmen für die lawinendynamischen Berechnungen (Tab. 22). Dies wird insbesondere bei der Modellierung der Lawineneinwirkung im Fall 3 interessant, da hier die Hanggeometrie durch Ablagerungen früherer Lawinenabgänge verändert wird und nicht mehr eindeutig bekannt ist (siehe Abschnitt 4.4).

Um die Tragwerks-Zuverlässigkeit der Galerie am Oberalppass analysieren zu können, müssen die verschiedenen Komponenten der Umlenkkräfte mit der Gewichtskraft der Fließlawine kombiniert werden. Da beide Kräfte aus derselben Fließlawine resultieren, muss dieser Schritt noch vor der probabilistischen Analyse erfolgen. Als einfaches Mass für die kombinierte Einwirkung wird die vertikale Resultierende aller Streckenlasten im Bereich oberhalb der Galerie verwendet:

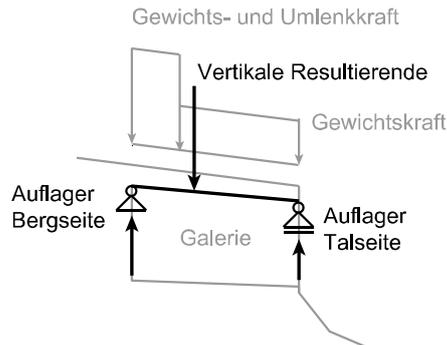
- Eigengewicht Fließlawine als Streckenlast  $q_{vL}$  über die gesamte Galeriebreite
- Vertikaler Anteil (lotrecht) der Umlenkkräfte  $q_{vU}$  von der Galerierückseite bis zum Ende der Umlenkstrecke  $l_u$ ; vierfache Umlenkkräfte auf dem ersten Viertel der Umlenkstrecke (sofern diese auf dem Galeriedach liegen).
- Vertikaler Anteil der Reibungskräfte aus Eigengewicht Fließlawine und Umlenkkräfte

Der Beitrag der Reibungskräfte zur vertikalen Resultierenden ist klein und könnte auch vernachlässigt werden wie bei der oben beschriebenen Modellierung der Einwirkungen auf die Galerie Salezer. Aus den dort diskutierten Gründen ist die horizontale Resultierende proportional zur vertikalen Kraft und wird im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Ohnehin ist es schwierig, eine einheitliche Aussage dazu zu machen, welchen Einfluss die verschiedenen Kräfte in der Bemessung haben, da dies von der spezifischen Bemessungssituation – d.h. unter anderem vom statischen System, dem betrachteten

Bauteil und der bemessungsrelevanten Schnittgrösse – abhängt. Zu beachten ist auch hier, dass für die vorliegende Untersuchung nicht die absolute Grösse der Einwirkung von Interesse ist, sondern lediglich ihre Streuung.

Um den Einfluss der Bemessungssituation auf die Unsicherheit der dynamischen Ein- bzw. Auswirkungen zu untersuchen, wurden Vergleichsrechnungen für den hypothetische Fall eines Einfeldträgers als Galeriedach (in 2D, siehe Schnitt in Abb. 36) durchgeführt. Bei realen Galeriebauwerken handelt es sich meist um Rahmentragwerke mit einer biegesteifen Ecke an der Galerierückwand und Pendelstützen an der talseitigen Galeriefront; das Beispiel eines Einfeldträgers wurde lediglich gewählt, weil ein möglichst einfaches statisches System die Interpretation der Ergebnisse erleichtert.



**Abb. 36** Vereinfachtes statisches System zur Untersuchung der Streuung verschiedener Auswirkungen (hier: berg- und talseitiges Auflager) im Vergleich mit der vertikalen Resultierenden der Lawineneinwirkungen.

Beim Vergleich der berg- und talseitigen Auflagerkräfte an dem in Abb. 36 dargestellten Einfeldträger wurde deutlich, dass die Streuung der bergseitigen Auswirkung (hier: Auflagerkraft) in den meisten Galerieabschnitten etwas grösser ist als auf der Talseite; die Streuung der vertikalen Resultierenden als Mass für die Einwirkung liegt jeweils dazwischen. Der Grund hierfür ist vermutlich, dass die Umlenkkräfte eher bergseitig auftreten und abgetragen werden; diese haben zum Teil einen wesentlichen Beitrag zur Unsicherheit der gesamten Einwirkung. Analoge Überlegungen können auch für andere statische Systeme gemacht werden.

Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse der probabilistischen Modellierung für die Galerie am Oberalppass beziehen sich aufgrund der einfachen Interpretierbarkeit auf die vertikale Resultierende der dynamischen Lawineneinwirkung.

#### 4.2.5 Probabilistische Modellierung

Die Ergebnisse der RAMMS-Berechnungen wurden im nächsten Schritt mit der Wahrscheinlichkeitsschätzung der Lawinenexperten für die einzelnen Eingangsgrössen kombiniert. Tab. 24 zeigt die angenommenen Wahrscheinlichkeiten. Da keine Informationen zu gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Eingangsgrössen vorliegen, wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass sie unkorreliert sind.

**Tab. 24** Wahrscheinlichkeitsschätzung für die Verteilung der Eingangsgrössen für die RAMMS-Simulationen (Annahme: alle Eingangsgrössen sind unkorreliert).

		Galerie Salezer Davos			Oberalp		
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1$		
<b>Schätzung durch Experte</b>							
Gewichtung		1/3	1/3	1/3	1.0		
Bedingte Überschreitungs- Wahrscheinlichkeit je Szenario mit Wiederkehrperiode $t_0, t_1, t_2$	<b>Anriss-Szenario R</b>						
	Optimistisch	$r_1$	0.65	0.70	0.40	0.65	
	Realistisch	$r_2$	0.50	0.50	0.30	0.50	
	Vorsichtig	$r_3$	0.25	0.20	0.20	0.25	
	Pessimistisch	$r_4$	0.10	0.10	0.10	0.10	
	<b>Anrisshöhe H</b>						
	Gemäss Anleitung	$h_1$	0.60	0.50	0.30	0.60	
	Leicht erhöht	$h_2$	0.50	0.40	0.10	0.50	
	<b>Windeinfluss W</b>						
	Kein Windeinfluss	$w_1$	0.70	0.70	0.80	0.70	
Triebschneeeintrag	$w_2$	0.40	0.30	0.20	0.40		
Bedingte Eintritts-Wahrscheinlichkeit je Szenario mit Wiederkehrperiode $t_0, t_1, t_2$	<b>Reibung in der Sturzbahn F</b>		<i>(Gleiche Annahmen für alle Experten)</i>				
	Salezer	Viel kleinere Reibung	$f_1$	0.28	0.28	0.28	
		Kleinere Reibung	$f_2$	0.28	0.28	0.28	
		Gemäss Richtlinie	$f_3$	0.28	0.28	0.28	
		Grössere Reibung	$f_4$	0.16	0.16	0.16	
	Oberalp	Viel kleinere Reibung	$f_1$				0.05
		Gemäss Richtlinie	$f_2$				0.15
		Grössere Reibung	$f_3$				0.30
		Reibung Nassschneelawinen	$f_4$				0.50
	<b>Reibung im Auslaufgebiet S</b>		<i>(Gleiche Annahmen für alle Experten)</i>				
	Salezer	Grossflächig erhöht	$s_1$	0.34	0.34	0.34	---
		Kurz oberhalb Galerie erhöht	$s_2$	0.33	0.33	0.33	---
		Auf Galeriedach erhöht	$s_3$	0.33	0.33	0.33	---
	Oberalp	Keine erhöhte Reibung	$s_0$	---	---	---	0.17
		Erhöhte Reibung auf Galeriedach	$s_1$	---	---	---	0.17
Erhöhte Reibung am Geländeknick		$s_2$	---	---	---	0.17	
Erhöht 6Hm oberhalb vom Knick		$s_3$	---	---	---	0.17	
Erhöht 20Hm oberhalb vom Knick		$s_4$	---	---	---	0.17	
Stark erhöht 20Hm oberhalb		$s_5$	---	---	---	0.10	
Extrem erhöht 20Hm oberhalb		$s_6$	---	---	---	0.05	

Im Folgenden wird beschrieben, wie die Wahrscheinlichkeitsannahmen in Tab. 24 mit den Ergebnissen der RAMMS-Simulationen kombiniert werden, um für jeden Experten die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Einwirkung in den drei Szenarien  $t_0$ ,  $t_1$  und  $t_2$  zu bestimmen.

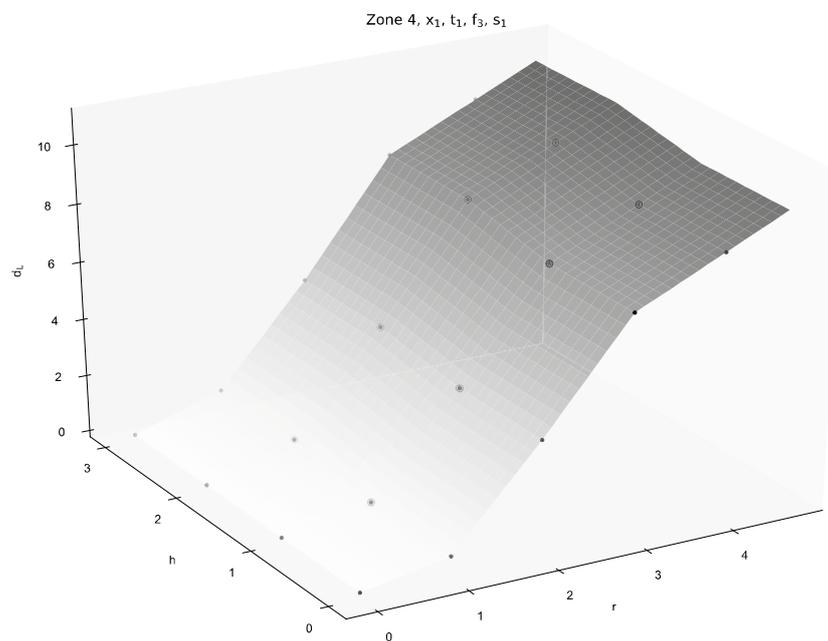
#### Antwortfläche für die RAMMS-Simulationen

Das in Abschnitt 4.2.4 beschriebene Vorgehen erlaubt die Bestimmung der Lawineneinwirkungen für alle mit RAMMS berechneten Variationen (Kombinationen der Eingangsgrössen R, H, W, F und S). Bei den Reibungsparametern F und S handelt es sich um diskrete Eingangsgrössen, die verschiedene Reibungs-Szenarien in der Sturzbahn und im Auslaufgebiet der Lawine definieren. Im Gegensatz hierzu wird das Anriss-Szenario durch die drei kontinuierlichen Grössen R, H und W definiert; die Ausprägungen in Tab. 22 sind lediglich als Stützstellen für die Simulation zu verstehen.

Um die drei kontinuierlichen Eingangsgrössen im Rahmen der probabilistischen Analyse korrekt berücksichtigen zu können, wird eine Antwortfläche  $q_{RAMMS}(r, h, w|x, t, f, s)$  an die RAMMS-Simulationen angepasst. Mit dieser Funktion kann die Einwirkung  $q$  für jede

beliebige Kombination der Eingangsgrößen berechnet werden. Da die Funktion bedingt auf die Reibungsparameter  $F$  und  $S$  ist, gibt es für jede mögliche Kombination dieser beiden diskreten Eingangsgrößen eine eigene Antwortfläche. Dasselbe gilt für verschiedene Experten  $X$  und Wiederkehrperioden  $T$ .

Ein Beispiel für eine Antwortfläche zur Bestimmung der Fließhöhe  $d_L$  als Grundlage für die Modellierung der Einwirkung auf die Salezer Galerie ist in Abb. 37 gegeben. Der Einfluss der hier nicht dargestellten Eingangsgröße  $W$  (Windeinfluss) ist mit dem Einfluss von  $H$  (Anrisshöhe) vergleichbar. Bei der Salezer Galerie hat das Anrissflächen-Szenario  $R$  den grössten Einfluss auf die Lawineneinwirkung, auch im Vergleich zu den diskreten Eingangsgrößen  $F$  und  $S$ . Der Grund für die grosse Sensitivität auf die Anrissfläche ist die Kanalisierung der Lawine im Salezertobel, wo grössere Schneemengen im Anrissgebiet naturgemäss zu einem starken Anstieg der Fließhöhe  $d_L$  führen. Bei der Galerie am Oberalppass, bei der grössere Lawinen als Flächenlawinen einfach über einem längeren Abschnitt der Galerie abfliessen, ist der Einfluss der Anrissfläche  $R$  deutlich weniger ausgeprägt.



**Abb. 37** Beispiel einer Antwortfläche zur Interpolation der RAMMS-Ergebnisse für die Fließhöhe  $d_L$  in Abhängigkeit des Anrisszenarios  $R$  und der Anrisshöhe  $H$ . Die eingekreisten Stützstellen sind in Tab. 22 definiert.

In dem durch die Szenarien gemäss Tab. 22 aufgespannten Bereich entspricht die in Abb. 37 dargestellte Antwortfläche einer (tri-)linearen Interpolation der aus den RAMMS-Simulationen ermittelten Einwirkungen. Im Extrapolationsbereich werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Anrisszenario  $R$ : Lineare Extrapolation der Antwortfläche für  $r > r_4$  (sehr grosse Anrisse mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit). Für den Bereich  $r < r_1$  wird ein zusätzliches, theoretisches Szenario  $r_0$  eingeführt, bei dem die Lawineneinwirkung Null ist. Zwischen  $r_0$  und  $r_1$  wird linear extrapoliert.
- Anrisshöhe  $H$  und Windeinfluss  $W$ : Aufgrund des geringen Einflusses dieser beiden Eingangsgrößen wird die Antwortfläche im Extrapolationsbereich konstant gehalten. Um die lineare Interpolation für  $R$  beizubehalten, wurden zusätzliche Stützstellen  $h_0, h_3$  (bzw.  $w_0, w_3$ ) mit derselben Einwirkung wie im benachbarten Wert eingeführt.

In der Realität wurden schon Anrisshöhen beobachtet, welche sehr viel grösser sind als die berechneten Fälle. Da RAMMS nicht für solche Ereignisse geeicht wurde, lassen sie

sich aber nicht realistisch modellieren: Berechnungen mit den empfohlenen Rechenparametern und sehr grosser Anrisshöhe ergeben keine plausiblen Resultate. Um solche Fälle zu erfassen, müssten andere lawindynamische Modelle verwendet werden, welche z.B. gemischte Fließ-/Staublawinen berechnen können. Bei einer Berechnung mit RAMMS und dem in der Praxis üblichen Vorgehen zu Festlegung der Anrisshöhen sind diese deshalb eher als Rechengrößen zu verstehen denn als reale, in der Schneedecke messbare Grösse. Bisherige Beurteilungen führen dennoch in der Regel nicht zu einer groben Unterschätzung der Lawineneinwirkung (resp. der Auslauflänge), weshalb die geringe Variation der Anrisshöhe  $H$  und des Windeinflusses  $W$  mit «konstanter» Extrapolation aus Modellierungssicht vertretbar ist.

#### *Verteilung der Eingangsgrößen*

Zur kombinierten Betrachtung aller Unsicherheiten in den Eingangsgrößen werden zunächst die Überschreitungs-Wahrscheinlichkeiten für die kontinuierlichen Größen  $R$  (Anriss-Szenario),  $H$  (Anrisshöhe) und  $W$  (Windeinfluss) kombiniert. Die Annahmen in Tab. 24 definieren Stützstellen für die marginalen Wahrscheinlichkeitsverteilungen dieser drei Variablen. Zwischen diesen Stützstellen werden die Verteilungsfunktionen  $F_R(r)$ ,  $F_H(h)$  und  $F_W(w)$  linear interpoliert. Im Extrapolationsbereich werden für das Anriss-Szenario  $R$  die folgenden Annahmen getroffen:

- Anrisszenario  $r < r_1$ : Annahme einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1.0 für den theoretischen Wert  $r_0$ , bei dem die Lawineneinwirkung Null ist.
- Anrisszenario  $r > r_4$ : Lineare Extrapolation der Verteilungsfunktion bis  $F_R(r_{\max}) = 1.0$ .

Die resultierende Verteilungsfunktion  $F_R(r)$  ist somit definiert als eine multilineare Funktion im Bereich  $r_0$  bis  $r_{\max} > r_4$ . Die Dichtefunktion  $f_R(r)$  ergibt sich direkt aus dieser Verteilungsfunktion; ausserhalb des Definitionsbereichs ist  $f_R(r) = 0$ .

Die Verteilungen der Eingangsgrößen  $H$  und  $W$  werden auf ähnlichem Wege hergeleitet. Für den Extrapolationsbereich der Verteilungen werden hier ebenfalls Annahmen getroffen. Aufgrund der weiter oben beschriebenen Annahme, dass die RAMMS-Antwortfläche ausserhalb der in Tab. 22 definierten Stützstellen konstant bleibt, haben diese aber keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Im dreidimensionalen Raum ( $R$ ,  $H$  und  $W$ ) wird bei unkorrelierten Variablen die multivariate Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wie folgt bestimmt:

$$f_{RHW}(r, h, w) = f_R(r) \cdot f_H(h) \cdot f_W(w) \quad (3.4)$$

Die Kombination dieser multivariaten Verteilung mit den Unsicherheiten in den Reibungsparametern  $F$  und  $S$  wird weiter unten beschrieben (Gleichung (3.6)).

#### *Berechnung der Verteilung für die Einwirkung je Szenario*

Aus der multivariaten Verteilung der Eingangsgrößen und den Ergebnissen der RAMMS-Simulationen kann nun die Verteilung der Einwirkung je Szenario  $T$  bestimmt werden.

Mit der Antwortfläche  $q_{RAMMS}(r, h, w | x, t, f, s)$  ergibt sich für jeden Experten  $x$  und jede Wiederkehrperiode  $t$  die folgende bedingte Verteilung für die Lawineneinwirkung  $Q$ , zunächst noch bedingt auf die Reibungsparameter  $f$  und  $s$ :

$$f_Q(q | x, t, f, s) = \iiint_{r, h, w} q_{RAMMS}(r, h, w | x, t, f, s) \cdot f_{RHW}(r, h, w) dr dh dw \quad (3.5)$$

Im nächsten Schritt werden die verschiedenen Ausprägungen der Reibungsparameter  $f$  und  $s$  mit ihren jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten gewichtet:

$$f_Q(q|x,t) = \sum_{f_i} \sum_{s_j} p(f_i) \cdot p(s_j) \cdot f_Q(q|x,t,f_i,s_j) \quad (3.6)$$

Um die gemeinsame Verteilung für alle Experten zu bestimmen, werden bei der Salezer Galerie die drei Verteilungen schliesslich noch gemittelt (alle Experten gleich gewichtet):

$$f_Q(q|t) = \frac{1}{n_{\text{Experten}}} \sum_{x_i} f_Q(q|x_i,t) \quad (3.7)$$

#### *Bestimmung der Extremwertverteilung für das jährliche Maximum der Einwirkung*

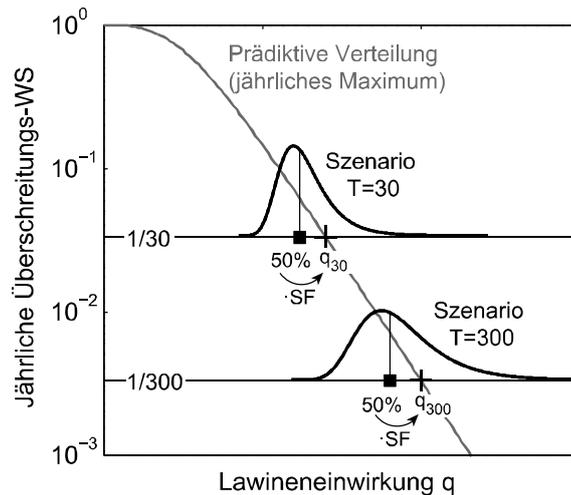
Gleichung (3.7) liefert die Verteilungen der dynamischen Einwirkungen in Abhängigkeit des Szenarios, d.h. für das 10-, 30- und 300-jährige Ereignis. Im nächsten Schritt werden diese drei Szenario-Verteilungen zu einer gemeinsamen Verteilung für das jährliche Maximum der Lawineneinwirkung kombiniert. Das Vorgehen für diesen Schritt ist in Abschnitt 4.1.2 beschrieben.

## 4.2.6 Ergebnisse der Modellierung für Fall 1

Mit dem oben beschriebenen Vorgehen können die dynamischen Einwirkungen auf das Galeriebauwerk probabilistisch modelliert werden. Die Ergebnisse dieser Modellierung für die beiden Galerien Salezer und Oberalp sind in Tab. 25 und Tab. 26 zusammengefasst. Die beiden Tabellen enthalten Angaben zu den folgenden Kenngrössen:

- **Median der Szenario-Verteilungen** als robusten Schätzer für die bemessungsrelevanten Einwirkungen mit Wiederkehrperioden  $T=30$  und  $T=300$  Jahren
- **Angaben zur Schätzunsicherheit je Szenario:** «Schätzfaktor» SF zur Erhöhung des Medians aus dem Vergleich mit dem Fraktilwert  $q_{30}$  bzw.  $q_{300}$  der prädiktiven Verteilung, sowie Variationskoeffizient CoV der Szenario-Verteilung
- **Fraktilwerte der prädiktiven Verteilung** für das jährliche Maximum der Einwirkung, d.h. der Werte, die – unter Berücksichtigung der Schätzunsicherheit – mit einer jährlichen Wahrscheinlichkeit von  $1/30$  bzw.  $1/300$  überschritten werden
- **Verhältnis der Fraktilwerte  $q_{300}/q_{30}$**  als einfaches Mass für die Streuung (natürliche Variabilität und Schätzunsicherheit) der prädiktiven Verteilung
- **Kenngrössen (Momente) der prädiktiven Verteilung** als Input für die Modellierung der Einwirkung im Rahmen der Zuverlässigkeitsanalyse (Approximation der Prädiktiven durch eine Gamma-Verteilung mit Mittelwert  $\mu_Q$  und Variationskoeffizient CoV)

Der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Verteilungen und Grössen ist in Abb. 38 illustriert. Die Darstellung der prädiktiven Verteilung erfolgt hier analog zu Abb. 30 und Abb. 31 mit Hilfe der komplementären Verteilungsfunktion (jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeiten) mit Fokus auf den oberen Schwanz der Verteilung.



**Abb. 38** Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen den Szenario-Verteilungen (schwarz) und ihrem Median (50%) sowie der prädiktiven Verteilung für das jährliche Maximum (grau) mit Fraktilwerten  $q_{30}$  und  $q_{300}$ . Der Schätzfaktor  $SF$  zeigt an, wie stark der Szenario-Median erhöht werden muss, um den prädiktiven Fraktilwert zu erhalten.

Bei der Galerie Salezer (Tab. 25) beziehen sich die Angaben auf die Fließhöhe  $d_L$  als zentrale Zufallsvariable für die Modellierung der auf die Galerie wirkenden Gewichtskraft. Da beim Oberalpass zusätzlich noch die Umlenkkraft berücksichtigt werden muss, bezieht sich Tab. 26 auf die vertikale Resultierende aller auf die Galerie wirkenden Kräfte im Galerie-Querschnitt, d.h. pro Laufmeter Strassenlänge. Die absoluten Grössen in Tab. 25 und Tab. 26 (mit Einheit [m] bzw. [kN/m]) sind somit nicht direkt vergleichbar.

Für die Zuverlässigkeitsberechnung sind diese absoluten Grössen allerdings ohnehin nur insofern relevant, dass sie im Rahmen der Bemessung korrekt berücksichtigt werden müssen; konkret bestimmen sie das Verhältnis zwischen variabler und ständiger Einwirkung, siehe Kapitel 3.6.1 für Details. Dies ist auch die einzige Verwendung für den Mittelwert  $\mu_Q$  der prädiktiven Verteilung, der im Folgenden aufgrund seiner schwierigen Interpretierbarkeit nicht weiter diskutiert wird.

Gut vergleichbar sind aber alle relativen Grössen (ohne Einheit [-]) in Tab. 25 und Tab. 26, durch die die Unsicherheiten in den Einwirkungen vollständig charakterisiert werden. Dies wird im Folgenden für beide Galerien ausführlich diskutiert. Für die Galerie Salezer wird hierfür das Modell bei gleicher Gewichtung aller Experten verwendet (Angaben in Tab. 25). Die Variation zwischen verschiedenen Experten wird weiter unten separat diskutiert.

**Tab. 25** Zusammenfassung der Einwirkungs-Modellierung auf die Galerie Salezer in Fall 1 bei gleicher Gewichtung aller Experten. Die beiden Szenario-Mediane und Fraktilwerte der dynamischen Einwirkung werden hier ausgedrückt über die Fließhöhe  $d_L$ , durch die das Gewicht der Fließlawine bestimmt wird.

Salezer	T = 30 Jahre			T = 300 Jahre			Jährliches Maximum (Prädiktive)					
	Abschnitt	Median	Unsicherheit		Median	Unsicherheit		Fraktilwerte			Momente	
			SF	CoV		SF	CoV	q30	q300	300/30	$\mu Q$	CoV
	[m]	[-]	[-]	[m]	[-]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[-]	
Zone 1	1.10	1.49	1.12	1.96	2.80	0.96	1.65	5.50	3.34	0.20	3.59	
Zone 2	1.28	1.62	1.07	2.71	2.46	0.97	2.08	6.67	3.21	0.25	3.44	
Zone 3	3.68	1.18	0.86	5.58	1.75	0.71	4.33	9.74	2.25	0.71	2.05	
Zone 4	<b>4.33</b>	<b>1.35</b>	<b>0.89</b>	<b>6.92</b>	<b>1.98</b>	<b>0.77</b>	<b>5.84</b>	<b>13.72</b>	<b>2.35</b>	<b>0.90</b>	<b>2.21</b>	
Zone 5	2.59	1.51	1.04	5.33	2.21	0.86	3.90	11.79	3.02	0.48	3.21	
Zone 6	1.01	2.55	1.39	3.69	3.26	1.12	2.58	12.03	4.66	0.30	4.79	
Zone 7	0.00		2.06	0.00		1.97	0.58	4.57	7.84	0.08	6.39	

**Tab. 26** Zusammenfassung der Einwirkungs-Modellierung auf die Galerie am Oberalppass in Fall 1. Die beiden Szenario-Mediane und Fraktilwerte der dynamischen Einwirkung werden hier angenähert durch die vertikale Resultierende der auf die Galerie wirkenden Kräfte (Summe der Gewicht- und Umlenkkraft über die Galeriebreite).

Oberalp	T = 30 Jahre			T = 300 Jahre			Jährliches Maximum (Prädiktive)					
	Abschnitt	Median	Unsicherheit		Median	Unsicherheit		Fraktilwerte			Momente	
			SF	CoV		SF	CoV	q30	q300	300/30	$\mu Q$	CoV
km	[kN/m]	[-]	[-]	[kN/m]	[-]	[-]	[kN/m]	[kN/m]	[-]	[kN/m]	[-]	
I1	76790	61.9	1.19	0.43	136.9	2.61	0.99	73.8	356.6	4.83	8.8	4.91
	76810	136.9	1.16	0.48	297.6	1.53	0.77	158.8	455.5	2.87	20.2	3.00
	76830	152.2	1.16	0.56	257.8	1.80	0.83	176.4	464.6	2.63	24.0	2.67
	76850	<b>222.8</b>	<b>1.26</b>	<b>0.53</b>	<b>490.1</b>	<b>1.30</b>	<b>0.77</b>	<b>280.2</b>	<b>639.2</b>	<b>2.28</b>	<b>45.0</b>	<b>2.10</b>
	76870	154.9	1.53	0.52	352.6	2.32	0.87	236.4	817.1	3.46	27.8	3.72
	76890	79.9	2.02	0.75	337.4	1.85	0.83	161.7	623.8	3.86	18.7	4.13
I2	76990	96.9	1.31	0.76	209.8	1.28	0.49	126.7	268.6	2.12	22.8	1.81
	77010	125.2	1.06	0.49	255.8	1.10	0.45	132.5	281.2	2.12	23.8	1.82
	77030	<b>219.9</b>	<b>1.07</b>	<b>0.44</b>	<b>342.9</b>	<b>1.13</b>	<b>0.43</b>	<b>234.7</b>	<b>386.0</b>	<b>1.64</b>	<b>72.3</b>	<b>0.94</b>
I3	77090	<b>169.5</b>	<b>1.04</b>	<b>0.57</b>	<b>323.0</b>	<b>1.16</b>	<b>0.44</b>	<b>175.7</b>	<b>374.3</b>	<b>2.13</b>	<b>31.3</b>	<b>1.83</b>
	77110	171.8	0.95	0.47	223.0	1.29	0.48	162.9	287.4	1.76	42.5	1.16

#### Vergleich der Ergebnisse für die beiden Galeriestandorte

Beim Vergleich der Ergebnisse in Tab. 25 und Tab. 26 lohnt sich zunächst ein Fokus auf die Galerieabschnitte mit den höchsten Einwirkungen in den Szenarien für T=30 und T=300 Jahre. Die entsprechenden Zahlen sind in den Tabellen fett gedruckt (Zone 4 der Salezer Galerie sowie km 76850, 77030 und 77090 für die drei Lawinenzüge am Oberalppass). In der Praxis ist davon auszugehen, dass benachbarte Galerieabschnitte – z.B. alle Abschnitte im selben Lawinenzug – auf dieselben, maximalen Einwirkungen bemessen werden. In Bereichen mit niedrigeren Einwirkungen führt dies zu einer gewissen Sicherheitsreserve, die in der Zuverlässigkeitsanalyse in Abschnitt 3.5.1 allerdings nicht berücksichtigt wird.

Die fett gedruckten Zahlen für Zone 4 der Salezer Galerie (Tab. 25) können wie folgt gelesen werden: Bemessungsrelevant ist in der Praxis die «beste Schätzung» (hier angenähert durch den Median) für das 30-jährige und vor allem für das 300-jährige Ereignis. Die Schätzunsicherheit dieser beiden Größen wird durch den zugehörigen Variationskoeffizienten CoV quantifiziert. Das probabilistische Modell berücksichtigt die gesamte Verteilung der drei für die Modellierung betrachteten Szenarien mit T=10, 30 und

300 Jahren. Hieraus resultiert die prädiktive Verteilung für das jährliche Maximum der Lawineneinwirkung. Der Variationskoeffizient CoV der Prädiktiven ist deutlich grösser (2.10) als der der Szenario-Verteilungen: er beinhaltet nicht nur die Schätzunsicherheit, sondern auch die natürliche Variation der Lawineneinwirkungen, die durch die Unterschiede zwischen dem 10-, 30- und 300-jährigen Ereignis bestimmt wird.

Die Einwirkungen für die beiden Wiederkehrperioden von 30 und 300 Jahren können auch als Fraktilwerte der prädiktiven Verteilung bestimmt werden. Im Gegensatz zu den Medianwerten der beiden Szenarien beinhalten diese «prädiktiven Schätzer» einen gewissen Aufschlag für die Schätzunsicherheit. In Tab. 25 wird dieser «Schätzfaktor» SF als Verhältnis zwischen dem Fraktilwert der Prädiktiven und dem Szenario-Median bestimmt.

Vergleicht man die Ergebnisse für die Salezer Galerie mit den Zahlen für den Oberalppass, so liegt die Streuung der Prädiktiven für zwei der drei fett gedruckten Galerieabschnitte am Oberalppass in einer ähnlichen Grössenordnung (Variationskoeffizient um die 2.0); nur im Lawinenzug I2 ist die Streuung niedriger als bei der Salezer Galerie. Allerdings ist die Unsicherheit der Szenario-Schätzungen am Oberalppass fast durchgängig niedriger als bei der Salezer Galerie, was sich auch in niedrigeren «Schätzfaktoren» SF niederschlägt. Dies kann folgendermassen erklärt werden:

- Bei der Salezer Galerie ist die Festlegung der Anriss-Szenarien sehr schwierig, was zu grossen Unsicherheiten in R führt. Durch die Kanalisierung der Lawine im Salezertobel hat dies einen grossen Effekt auf die Ergebnisse für die Fließhöhe  $d_L$ .
- Bei den Flächenlawinen am Oberalppass hat das Anriss-Szenario R einen deutlich kleineren Einfluss, was die Unsicherheit in der Schätzung reduziert. Problematisch ist allenfalls die Festlegung zur Anrisshöhe H, da diese bei Gleit- und Nassschneelawinen nur sehr schwer vorherzusagen ist. Die entsprechenden Unsicherheiten wurden in der Modellierung jedoch nicht erfasst, da der Simulationsansatz auf dem etablierten Vorgehen für trockene Lawinen basiert.
- Ein weiterer Grund für die grösseren Unsicherheiten bei der Salezer Galerie könnte in der Beurteilung durch mehrere Experten liegen. Tatsächlich ist die Variation der Szenario-Einwirkungen für den Experten x1, der beide Galerien beurteilt hat, bei der Salezer Galerie etwas kleiner als die der Verteilungen für alle Experten. Die Variation zwischen verschiedenen Experten wird weiter unten noch separat diskutiert.

Ein gegensätzlicher Effekt wäre aufgrund der Berücksichtigung der Umlenkraft am Oberalppass zu erwarten, die vor allem bei grossen Lawinenereignissen (grosse Fließhöhe) auf das Galeriedach wirkt und die Einwirkungen erhöht. Offenbar überwiegen aber die oben beschriebenen Effekte in der Unsicherheitsmodellierung.

Vergleicht man abschliessend die Ergebnisse für die Galerieabschnitte mit den grössten Einwirkungen mit den übrigen, nicht fett gedruckten Zahlen in Tab. 25 und Tab. 26, so ergibt sich für beide Galerien ein ähnliches Bild: Die Unsicherheiten sind insbesondere in den Galerieabschnitten gross, in denen die Einwirkung vergleichsweise klein ist. Dies ist durchaus nachvollziehbar: So kann es zum Beispiel am Rand des Einflussbereichs einer Lawine von den Eingangsgrössen der Simulation abhängen, ob die Lawine in diesem Bereich überhaupt die Galerie erreicht oder nicht.

Wie eingangs bereits erwähnt, ist es aber denkbar, dass diese schwächer belasteten Galerieabschnitte in der Praxis der Einfachheit halber ebenfalls auf die maximalen Einwirkungen in der Mitte des Lawinenzugs bemessen werden. Die entsprechende Tragsicherheitsreserve dürfte in der Regel ausreichen, um die grösseren Unsicherheiten im Randbereich zu kompensieren. Diese Hypothese wird auch durch die Ergebnisse in Tab. 25 und Tab. 26 gestützt: vergleicht man die «prädiktiven» Fraktilwerte, die ja bereits einen Aufschlag für die Schätzunsicherheit beinhalten, so sind die fett gedruckten Zahlen auch hier fast durchgängig grösser als die Fraktilwerte für die übrigen Galerieabschnitte.

*Galerie Salezer Davos: Schätzung durch mehrere Experten*

Die Beurteilung der Salezer Galerie in Davos durch mehrere Experten erlaubt es, die Variation der Einwirkungen bei einer Beurteilung durch verschiedene Experten zu analysieren. Die Einwirkungen gemäss «besten Schätzung» durch die drei Experten (vgl. Abschnitt 4.2.3) werden in Tab. 27 zusammengefasst und mit dem Modell für alle Experten gemäss Tab. 25 verglichen. Die Unterschiede, vor allem zwischen den Experten x1 und x2 einerseits und Experte x3 andererseits, sind zum Teil beachtlich.

**Tab. 27** Vergleich der «besten Schätzung» für die Fliesshöhe  $d_t$  einer 30-jährigen und einer 300-jährigen Lawine durch die drei beteiligten Lawinenexperten mit der Modellierung für die Salezer Galerie bei gleicher Gewichtung aller Experten.

Salezer	T = 30 Jahre				T = 300 Jahre				Prädiktive			
	Beste Schätzung				Beste Schätzung				Faktilwerte			
	Abschnitt	x1	x2	x3	alle	x1	x2	x3	alle	q30	q300	300/30
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]
Zone 1	2.52	2.35	0.00	1.10	3.18	4.42	0.82	1.96	1.65	5.50	3.34	
Zone 2	2.05	2.42	0.00	1.28	4.54	6.12	1.24	2.71	2.08	6.67	3.21	
Zone 3	4.42	4.76	0.00	3.68	8.25	8.63	2.92	5.58	4.33	9.74	2.25	
Zone 4	<b>6.18</b>	<b>5.89</b>	<b>0.00</b>	<b>4.33</b>	<b>9.74</b>	<b>10.79</b>	<b>3.85</b>	<b>6.92</b>	<b>5.84</b>	<b>13.72</b>	<b>2.35</b>	
Zone 5	4.04	3.83	0.00	2.59	6.76	8.77	1.81	5.33	3.90	11.79	3.02	
Zone 6	2.06	1.62	0.00	1.01	3.61	6.85	0.39	3.69	2.58	12.03	4.66	
Zone 7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00	0.58	4.57	7.84	

Alle beteiligten Experten sind seit mehreren Jahrzehnten am SLF im Fachgebiet Lawinenschutz tätig. Sie führen regelmässig Lawinenbeurteilungen durch und können als sehr erfahren betrachtet werden. Die Unterschiede in der Einschätzung der drei Experten sind also nicht durch verschiedene Ausbildungs- oder Kenntnisstände zu begründen, sondern zeigen vielmehr den grossen gutachterlichen Spielraum, der bei der Beurteilung der Lawineneinwirkungen auf Schutzgalerien besteht. Bei realen Fällen sollte die Plausibilität einer Beurteilung immer durch einen zweiten Experten geprüft werden.

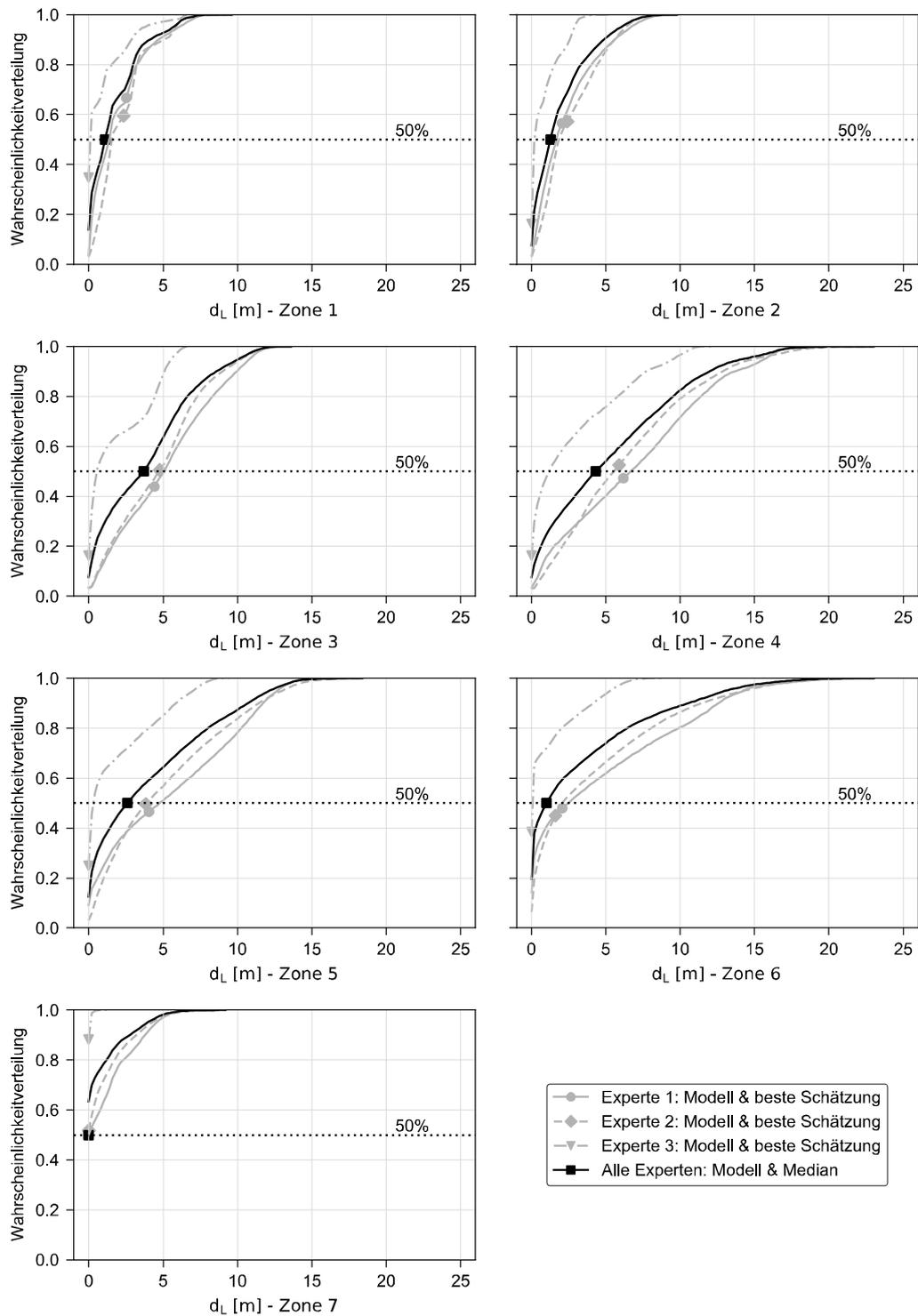
Zu beachten ist aber, dass die Experten im Rahmen der vorliegenden Untersuchung keine Möglichkeit hatten, die Plausibilität der Ergebnisse zu überprüfen, z.B. durch einen Vergleich der RAMMS-Simulationen mit Aufzeichnungen von beobachteten Lawineneignissen. Der Effekt dieser Einschränkung wird besonders bei der Beurteilung des 30-jährigen Ereignisses durch den Experten x3 deutlich: Mit den Eingangsgrössen für seine «besten Schätzung» erreicht die Lawine die Galerie gar nicht, weshalb die Einwirkung im 30-jährigen Ereignis Null ist. Dieses Ergebnis widerspricht klar der Beobachtung, dass in den 70 Jahren zwischen 1951 und 2020 mindestens 11 Lawinen die Salezer Galerie erreicht haben. In der Praxis wird in der Regel iterativ gearbeitet: nach der Überprüfung der Plausibilität der Simulationsergebnisse werden die Eingangsgrössen falls notwendig angepasst.

Insofern ist einerseits davon auszugehen, dass die Bandbreite der Einschätzung durch verschiedene Experten durch die vorliegende Untersuchung eher überschätzt wird und die Angaben in der Praxis dank der Plausibilisierung der Rechenergebnisse eher konvergieren. Andererseits gehört der Lawinenzug Salezer zu den am besten untersuchten Lawinenzügen der Schweiz, d.h. bei den meisten anderen Galerien dürften die Unsicherheiten beim Bestimmen der Eingangsgrössen für die Berechnung – im Vergleich zur Salezer Galerie – wesentlich grösser sein. In jedem Fall helfen Lawinenaufzeichnungen am Galeriestandort, um die Simulationsergebnisse zu überprüfen und zu plausibilisieren.

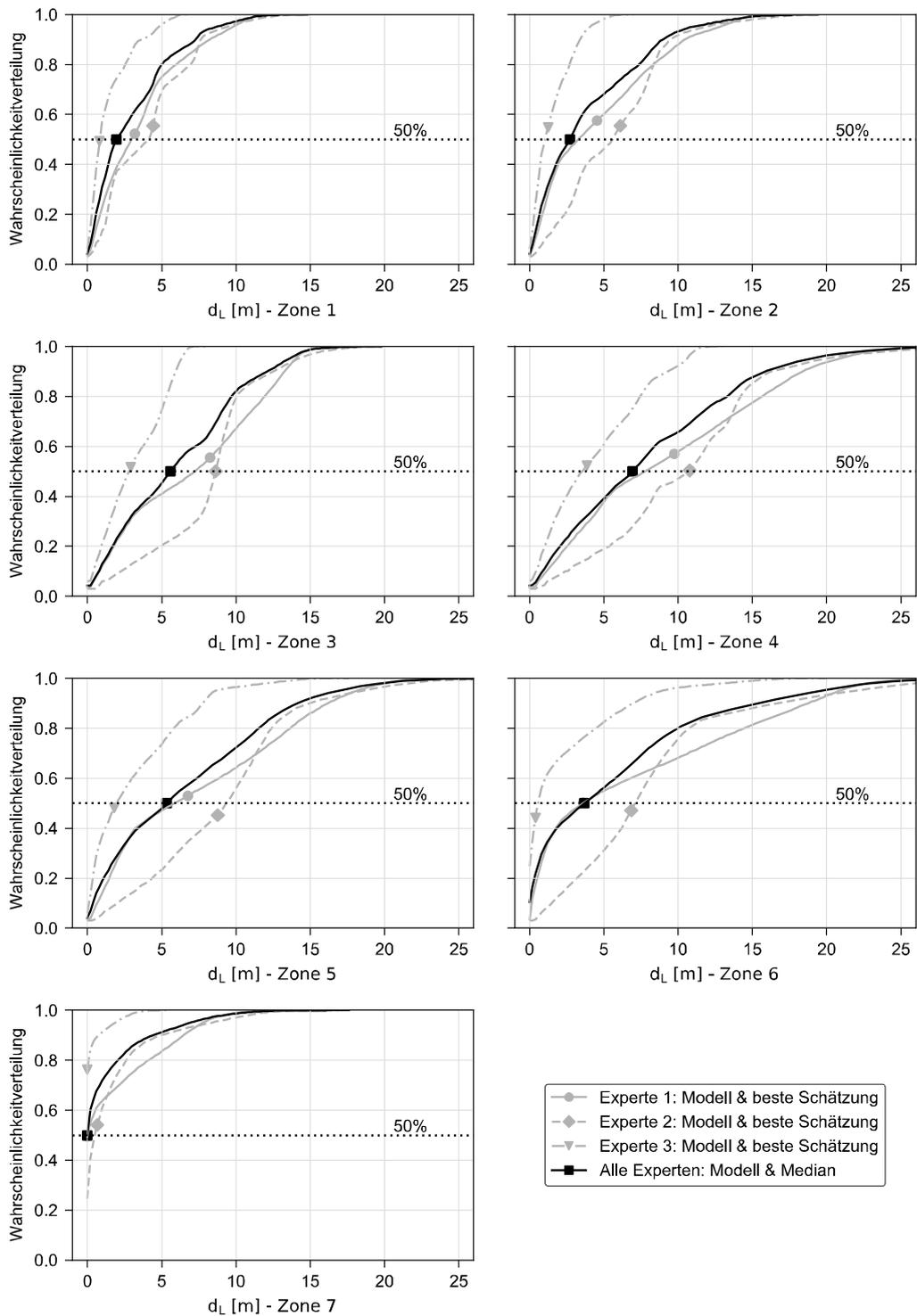
Neben den Ergebnissen für die beste Schätzung ist auch der Vergleich der Szenario-Verteilungen aufschlussreich. In Abb. 39 und Abb. 40 sind diese für die Wiederkehrperioden T=30 und 300 Jahre und verschiedene Galerieabschnitte dargestellt.

Wie bereits beim Vergleich der «besten Schätzung» in Tab. 27 wird deutlich, dass die Experten x1 und x2 die Lawinensituation eher konservativer beurteilen als der Experte x3. Interessant ist aber auch die Lage der «besten Schätzung» im Vergleich zum Medianwert,

d.h. zum 50%-Fraktile der Verteilung. Die Experten x1 und x2 (und x3 für T=300 Jahre) liegen mit ihrer Schätzung meist relativ nah am Median der mit ihrem Input definierten Verteilung, vor allem in den Galerieabschnitten mit den grössten Einwirkungen (Zone 3 bis 5). Anders verhält es sich bei der Schätzung des Experten x3 für das 30-jährige Ereignis, die zum Teil noch unter dem Median seiner eigenen Verteilung liegt. Der Experte x3 beurteilt das 30-jährige Ereignis also nicht nur insgesamt, d.h. in seiner gesamten Streubreite, optimistischer als seine Kollegen, sondern würde bei einer einzelnen Berechnung zusätzlich auch noch eher optimistische Eingangsgrössen wählen. Ohne Plausibilitätsprüfung führt dies zu dem bereits diskutierten Ergebnis, das im Widerspruch zur Lawinenbeobachtung an der Salezergalerie steht. Nach der gesamten Bandbreite gefragt, hält der Experte x3 aber auch Variationen, bei denen die 30-jährige Lawine die Galerie erreicht, durchaus für möglich. Ein seriöses Lawinengutachten sollte deshalb immer die Sensitivität der Ergebnisse auf die Wahl der Eingangsgrössen im Auge haben – auch oder gerade wenn das Ziel am Ende eine «beste Schätzung» ist, die der projektierende Ingenieur für die Bemessung der Galerie verwenden kann. Sehr wichtig ist auch die unabhängige Prüfung der Resultate in einem Lawinengutachten durch eine zweite Person.

Galerie Salezer, Szenario  $t_1$  (T= 30 Jahre)

**Abb. 39** Vergleich der Szenario-Verteilungen für die dynamischen Einwirkungen auf die Salezer-Galerie im 30-jährigen Ereignis bei Beurteilung durch verschiedene Experten. Die Punkte entsprechen der «besten Schätzung» gemäss Tab. 27.

Galerie Salezer, Szenario  $t_2$  (T= 300 Jahre)

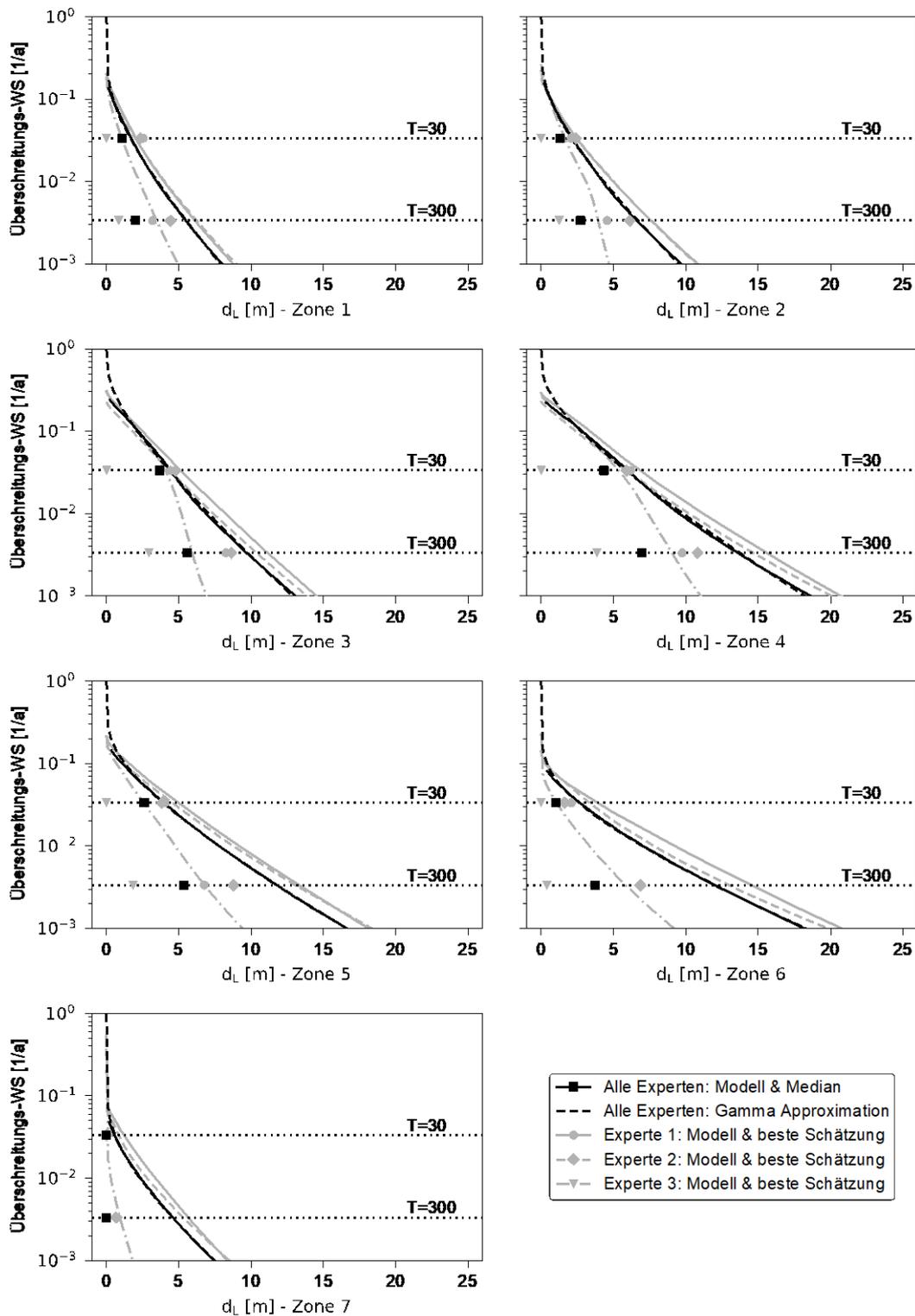
**Abb. 40** Vergleich der Szenario-Verteilungen für die dynamischen Einwirkungen auf die Salezer-Galerie im 300-jährigen Ereignis bei Beurteilung durch verschiedene Experten. Die Punkte entsprechen der «besten Schätzung» gemäß Tab. 27.

Aus den Szenario-Verteilungen der verschiedenen Experten wurde für jeden Experten eine prädiktive Extremwertverteilung für das jährliche Maximum der Lawineneinwirkung unter Berücksichtigung der Schätzunsicherheit ermittelt. Diese werden in Abb. 41 verglichen. Ebenfalls dargestellt ist die «beste Schätzung» durch die drei Experten sowie der Median der Szenario-Verteilung für alle Experten. Die verwendeten Symbole und Farben sind die gleichen wie in Abb. 39 und Abb. 40.

Auffällig ist, dass die Einwirkungen gemäss «besten Schätzung» in der Regel (zum Teil deutlich) niedriger sind als der entsprechende Fraktilwert der zugehörigen Verteilung. Dasselbe gilt für den Median der Szenario-Verteilung im schwarz dargestellten Modell für alle Experten. Der Grund hierfür ist – wie bereits weiter oben diskutiert – die Berücksichtigung der Schätzunsicherheit in der prädiktiven Verteilung.

Für die Zuverlässigkeitsberechnung wird angenommen, dass das gemeinsame Modell für alle Experten die Realität am ehesten repräsentiert, weshalb diese Verteilung (bzw. ihre Approximation mit einer Gamma-Verteilung) in der Grenzzustandsfunktion verwendet wird. Je nach Experte wird aber ein anderer Wert als «beste Schätzung» für die Bemessung verwendet, der unterschiedlich stark von dem «prädiktiven» Fraktilwert der schwarz dargestellten Verteilung abweichen kann. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Höhe der Bemessungsvariablen, d.h. darauf, wie «stark» bzw. widerstandsfähig die Galerie bemessen wird, und beeinflusst so auch die Zuverlässigkeit des Tragwerks.

## Galerie Salezer, jährliches Maximum und Szenarien



**Abb. 41** Vergleich der Extremwertverteilung für das jährliche Maximum der dynamischen Einwirkungen auf die Salezer-Galerie bei Beurteilung durch verschiedene Experten. Die Punkte entsprechen der «besten Schätzung» je Szenario bzw. dem Szenario-Median im Modell bei gleicher Gewichtung aller Experten.

## 4.3 Ruhende Einwirkungen aus natürlich abgelagerter Schneedecke (Fall 2)

Fall 2 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] beschreibt die Einwirkungen aus einer Fliesslawine über einer natürlich abgelagerten Schneedecke (keine Lawinenablagerung aus vorhergehenden Ereignissen). Die Einwirkung auf die Galerie setzt sich somit zusammen aus ruhenden und dynamischen Einwirkungen aufgrund von Schnee und Lawinen.

### 4.3.1 Grundlagen zur Ermittlung der Schneelast

Eine wichtige Ausgangsgrösse zur Ermittlung der Lawineneinwirkungen auf Schutzgalerien ist die Schneelage im Untersuchungsgebiet. Von Interesse ist nicht nur die Schneemenge im Lawinenanrissgebiet, sondern auch die „natürlich abgelagerte“ (d.h. nicht durch Lawinen verursachte) Schneelast auf dem Galeriedach. Bei der Bemessung gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] wird diese insbesondere für Fall 2 explizit ausgewiesen (Fliesslawine über schneebedecktem Galeriedach). Die Lawinenablagerung in Fall 3 und Fall 4 enthält ebenfalls einen gewissen Anteil „natürlicher“ Schneedecke.

In der Praxis wird die Schneelast auf dem Galeriedach vom Lawinenexperten bestimmt. Als Grundlage dienen in der Regel Daten von einer oder mehreren möglichst nahen und in schneeklimatischer Hinsicht vergleichbaren Messstationen. Die Expertenschätzung berücksichtigt zudem die lokalen Bedingungen am Galeriestandort, z.B. hinsichtlich Besonnung, Topographie und Windeinfluss.

Konzeptionell erfolgt die Ermittlung der Schneelast auf dem Galeriedach analog zur Schneelast auf Dächern, z.B. gemäss SIA 261 [6]: Zunächst wird aufgrund von möglichst aussagekräftigen Messdaten die Schneelast auf horizontalem Grund bestimmt. Diese wird dann vom Lawinenexperten zur Berücksichtigung der Hanggeometrie und des Windeinflusses im Galeriebereich korrigiert und auf dem Galeriedach verteilt. Im Gegensatz zur Schneelast auf Dächern ist allerdings nicht das jährliche Maximum von Interesse, sondern die *Schneelast zum Lawinenzeitpunkt*. Hierbei sind zwei gegenläufigen Effekte zu berücksichtigen:

- In schneereichen Wintern steigt die Lawinenaktivität, weshalb in „Lawinenwintern“ eher grössere Schneelasten zu erwarten sind als in einem „beliebigen“ Winter.
- Andererseits fällt die Periode grösster Lawinenaktivität häufig auf den Hochwinter, während die maximale Schneelast in der Regel erst im Spätwinter erreicht wird (gilt nicht für Nassschneelawinen).

Zur Ermittlung der Schneelast in Fall 2 (Fliesslawine über schneebedecktem Galeriedach) müssen grundsätzlich beide Effekte berücksichtigt werden, je nach Standort kann jedoch entweder der eine oder der andere stärker ins Gewicht fallen. Fall 3 (Fliesslawine über abgelagertem Lawinenschnee) verhält sich ähnlich, sofern die Einwirkungskombination von einer Hochwinterlawine dominiert wird (Fliesslawine als Leiteinwirkung mit Lawinenablagerung als Begleiteinwirkung).

Anders verhält es sich bei Fall 4 (Lawinenablagerung ruhend) oder auch bei Fall 3, wenn am betrachteten Standort vor allem Spätwinterlawinen (z.B. Nassschneelawine) relevant sind und / oder der Einfluss der Lawinenablagerung überwiegt (Lawinenablagerung als Leiteinwirkung mit Fliesslawine als Begleiteinwirkung). Hier spielt der zweite Effekt eine kleinere Rolle, da die maximale Lawinenablagerung ebenfalls im Spätwinter zu erwarten ist und somit im Jahresverlauf eher mit der maximalen Schneelast zusammenfällt als die klassische Hochwinterlawine.

Im Folgenden liegt der Fokus auf der „natürlichen“ Schneelast in Fall 2 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] (Fliesslawine über schneebedecktem Galeriedach).

### 4.3.2 Modellierung auf Basis von Daten zu ausgewählten Standorten

Um die Schneelast zum Lawinenzeitpunkt systematisch untersuchen zu können, wurden zunächst Datensätze zur gemessenen Schneelast auf horizontalem Gelände an drei verschiedenen Standorten zusammengestellt:

- Davos (SLF Station 5DF, 1560m) – anwendbar für die Galerie Salezer
- Andermatt (SLF Station 2AN, 1440m) – Standort Hospental
- Zuoz (SLF Station 7ZU, 1710m) – Standort Val Raschitsch

Die Standorte wurden aufgrund der guten Qualität der Aufzeichnungen in der Schadenlawinen-Datenbank des SLF (Stationen Davos, Zuoz) ausgewählt bzw. aufgrund des guten Lawinenkatasters im Falle der Station Andermatt (Zusammenstellung von Lawinendaten für ein Galerieprojekt im Hospental).

Zur Abschätzung der Schneelast kann der an den relevanten SLF-Stationen gemessene Wasserwert (Snow Water Equivalent SWE, im Folgenden mit WW bezeichnet) der Schneedecke verwendet werden. Für den Wasserwert liegen zwar nur 14-tägige Messreihen vor, er lässt sich jedoch gut anhand der täglichen Aufzeichnungen zur Schneehöhe HS und zur Neuschneehöhe HN interpolieren. Zusätzlich wurden auch die Daten zur Schneehöhe HS als alternative Grösse zur Abschätzung der Schneelast auf horizontalem Grund ausgewertet.

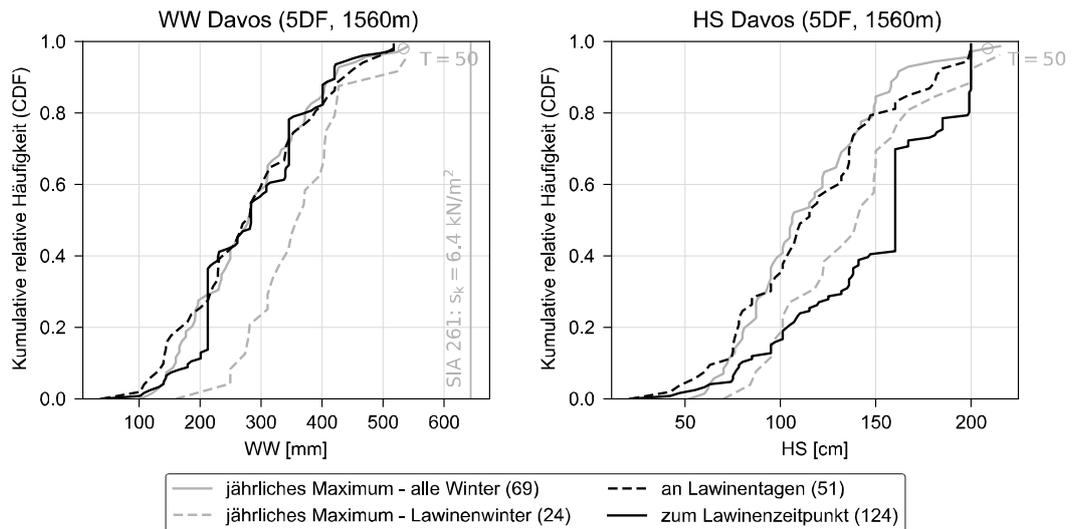
Aus den Datenreihen zum Wasserwert an den drei SLF Stationen wurden anschliessend die Daten ausgewählt, an denen die Schadenlawinen-Datenbank des SLF bzw. das Lawinenkataster mindestens einen Lawinenabgang mit Lawinenauslauf im Siedlungsgebiet oder auf Verkehrswegen in den drei untersuchten Tälern (oberes Landwassertal, Urseren, Engadin zwischen La Punt und Susch) verzeichnet.

Durch die Kombination der beiden Datensätze (Schnee- und Lawinendaten) konnten für jeden der drei Standorte Daten für die Schneelast „zum Lawinenzeitpunkt“ gewonnen werden. Zu beachten ist allerdings, dass die Lawinen nicht an einem bestimmten Standort, sondern lediglich in einem umliegenden Perimeter abgegangen sind. Die Lawinenaktivität am Galeriestandort (bzw. ihr Zusammenspiel mit der Schneelast) wird also über die Lawinenaktivität im betrachteten Perimeter angenähert.

Für die Auswertung der Daten wurden zwei verschiedene Ansätze verfolgt: Einerseits wurde aus den Datenreihen der drei SLF Stationen die Verteilung des jährlichen Maximums ermittelt; hierbei handelt es sich um die grösste Schneelast, die im Laufe eines Winters verzeichnet wurde. Durch Kombination mit den Schadenlawinen-Daten wurde andererseits die Verteilung der Schneelast zum Zeitpunkt von Schadenlawinen im untersuchten Gebiet bzw. Perimeter ermittelt.

Daten zum jährlichen Maximum der Schneelast auf horizontalem Grund sind – zumindest an den Messstationen mit langjährigen Datenreihen – in der Regel verfügbar. Für die Bemessung in Fall 2 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] (Fliesslawine über schneebedecktem Galeriedach) ist jedoch die Schneelast zum Lawinenzeitpunkt relevant. Insofern ist bei der Diskussion der Datenauswertung primär der Vergleich zwischen den beiden Verteilungen – jährliches Maximum vs. Schneelast zum Lawinenzeitpunkt – von Interesse.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Datenanalyse für die drei Standorte präsentiert und diskutiert. Abb. 42 zeigt die Ergebnisse für die Verteilung der Schneelast am Standort Davos (Messstation 5DF Davos Flüelastrasse), links für den Wasserwert WW und rechts für die Schneehöhe HS.



**Abb. 42** Auswertung der Daten zur Schneelast auf horizontalem Grund (Wasserwert WW und Schneehöhe HS) am Standort Davos – Verteilung des jährlichen Maximums im Vergleich zur Verteilung der Schneelast zum Lawinenzzeitpunkt.

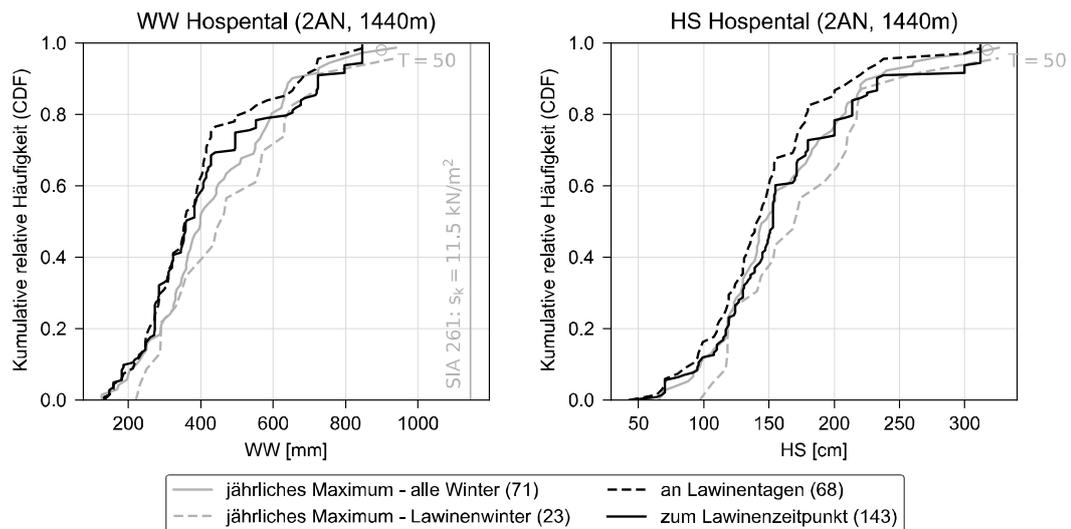
Die graue durchgezogene Kurve zeigt die klassische Auswertung für das jährliche Maximum der Schneelast auf horizontalem Grund (Extremwertverteilung). Der charakteristische Wert der Schneelast gemäss SIA 261 [6] ist über das 98%-Fraktile dieser Verteilung definiert, also als Schneelast mit einer Wiederkehrperiode von  $T=50$  Jahren, grauer Kreis. Allerdings ist die Datenreihe der Messstationen nicht lang genug, um diesen Wert zuverlässig zu schätzen. Die Schneelastkarte der SIA 261 basiert deshalb auf den grössten je beobachteten Werten an rund 80 Messstationen, Details siehe Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES, Tafel 3.2 [35]). Die Abweichungen zwischen den hier dargestellten Datenauswertungen und den Werten gemäss SIA 261 [6] (graue vertikale Linie in der Auswertung für den Wasserwert WW) lassen sich durch (grösstenteils konservative) Annahmen bei der Regionalisierung der Daten in der HADES-Auswertung erklären.

Die grau gestrichelte Kurve in Abb. 42 bezieht sich ebenfalls auf das jährliche Maximum, allerdings wurden hier lediglich Daten aus Jahren berücksichtigt, bei denen es zu mindestens einem Lawinenabgang im Untersuchungsgebiet gekommen ist. Da die Lawinenaktivität in schneereichen Wintern zunimmt, überrascht es nicht, dass die maximale Schneelast in einem solchen „Lawinenwinter“ mit mindestens einer Schadenlawine tendenziell höher ist als in einem beliebigen Winter mit oder ohne Lawinenabgang.

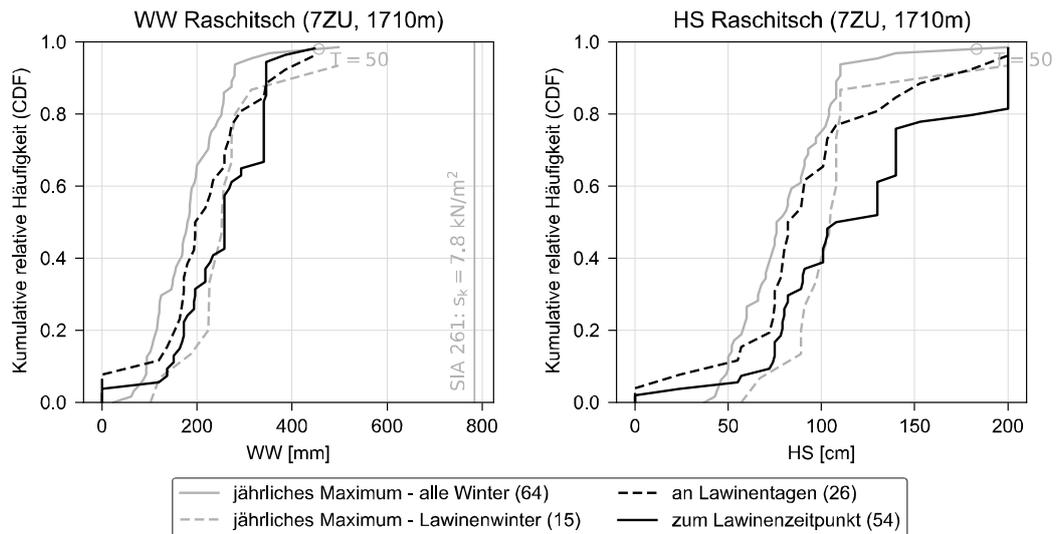
Zum Lawinenabgang kommt es allerdings nicht unbedingt am selben Tag, an dem auch die maximale Schneelast beobachtet wird. Dies wird mit den schwarzen Kurven berücksichtigt, für die nicht das jährliche Maximum, sondern die Schneelast am Tag der beobachteten Lawinenabgänge untersucht wurde. Die beiden Kurven unterschieden sich lediglich in der Handhabung von Duplikaten: Die gestrichelte Linie enthält genau einen Datenpunkt pro „Lawinentag“ (mit mindestens einer Lawine), während für die durchgezogene Linie Tage mit mehreren Lawinenabgängen entsprechend stärker gewichtet wurden. Dies erklärt die „Sprünge“ in der Kurve aufgrund von Tagen mit mehreren Lawinenabgängen. Beide schwarzen Kurven enthalten zum Teil mehrere Datenpunkte pro Lawinenwinter, weshalb sie die grau gestrichelte Linie für die Verteilung des jährlichen Maximums in Lawinenwintern kreuzen bzw. in Bezug auf die Schneelast überschreiten können. Die Verteilung der Schneelast „an einem Lawinentag“ (schwarz gestrichelt) verhält sich in der Auswertung robuster als die Auswertung «zum Lawinenzzeitpunkt» (schwarz durchgezogen), die von einigen wenigen Tagen mit sehr vielen Lawinenabgängen dominiert werden kann.

Konzentriert man sich auf den Vergleich der Verteilung für die Schneelast „am Lawinentag“ (schwarz gestrichelte Kurve) mit der klassischen Auswertung für das jährliche Maximum (graue durchgezogene Kurve), so erkennt man sehr schön die beiden in Abschnitt 4.3.1 diskutierten gegenläufigen Effekte: Einerseits kommen Schadenlawinen eher in schneereichen Winter vor, was tendenziell zu höheren Schneelasten führt (grau gestrichelte Kurve), andererseits kommen die Lawinen aber nicht unbedingt am selben Tag bzw. in derselben Jahreszeit, in der auch die Schneedecke ihren Maximalwert erreicht (schwarz gestrichelte Kurve). Am Standort Davos heben sich die beiden Effekte offenbar mehr oder weniger gegenseitig auf. Dies gilt insbesondere für die Verteilung des Wasserwertes der Schneedecke (linke Grafik in Abb. 42).

Um zu prüfen, ob diese Beobachtung verallgemeinert werden kann, wurden mit dem gleichen Ansatz auch die beiden anderen Standorte untersucht. Die Ergebnisse für die Verteilung der Schneelast am Standort Hospental (Messstation 2AN, Andermatt) sind in Abb. 43 dargestellt, die für den Standort Raschitsch (Messstation 7ZU, Zuoz) in Abb. 44. Die am Beispiel Davos diskutierten gegenläufigen Effekte sind auch hier gut zu erkennen, allerdings unterscheidet sich ihr (relativer) Einfluss an den betrachteten Standorten. Die Verteilung des jährlichen Maximums (graue durchgezogene Linie) kann an allen drei Standorten zumindest als grobe Näherung für die Schneelast zum Lawinenzzeitpunkt (bzw. am Lawinentag, schwarz gestrichelte Linie) verwendet werden. Am (eher schneearmen) Standort Raschitsch ist diese Näherung nicht konservativ, allerdings sind hier die Schneelasten auch eher klein. Zudem ist die Auswertung für den Standort Raschitsch aufgrund der schlechteren Datenbasis ohnehin vorsichtig zu beurteilen (lediglich 26 Tage mit Lawinenabgang, davon mehr als die Hälfte konzentriert auf drei Winter).



**Abb. 43** Auswertung der Daten zur Schneelast auf horizontalem Grund (Wasserwert WW und Schneehöhe HS) am Standort Hospental – Verteilung des jährlichen Maximums im Vergleich zur Verteilung der Schneelast zum Lawinenzzeitpunkt.



**Abb. 44** Auswertung der Daten zur Schneelast auf horizontalem Grund (Wasserwert WW und Schneehöhe HS) am Standort Raschitsch – Verteilung des jährlichen Maximums im Vergleich zur Verteilung der Schneelast zum Lawinenzzeitpunkt.

Um die Bandbreite der Unsicherheiten bezüglich der natürlich abgelagerten Schneelast abschätzen zu können, wurde an die Datensätze der vier Standorte zum jährlichen Maximum (alle Winter) eine Gamma-Verteilung angepasst, deren Mittelwert und Variationskoeffizient in Tab. 28 zusammengestellt sind. Der Mittelwert der Verteilung basierend auf der Schneehöhe HS wurde mit einer Raumlast von  $\gamma_s = 4.0 \text{ kN/m}^3$  gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] berechnet, was zu etwas höheren Werten führt als die Berechnung basierend auf dem Wasserwert WW mit einer im Mittel etwas niedrigeren Raumlast. Dass die tatsächliche Schneewichte – und somit auch ihre Streuung – in den Wasserwerten enthalten ist, erklärt auch, warum der Variationskoeffizient der Wasserwert-Verteilungen jeweils etwas höher ist. Die Verteilung basierend auf dem Wasserwert gibt somit realistischere Werte für die Ermittlung der Einwirkungen auf die Galerie und ihre Streuung.

**Tab. 28** Vergleich der Mittelwerte und Variationskoeffizienten von an die Datensätze zum jährlichen Maximum (alle Winter) angepassten Gamma-Verteilungen für die vier betrachteten Standorte. Die angegebenen Zahlen beziehen sich immer auf die Verteilung der Flächenlast in  $\text{kN/m}^2$ , jeweils berechnet aus einem Datensatz zum Wasserwert WW in mm (direkte Umrechnung der Einheiten) bzw. zur Schneehöhe HS in cm (Annahme einer Schneewichte von  $\gamma_s = 4.0 \text{ kN/m}^3$ ).

Nat. Schneedecke		$\mu Q_s$	CoV
Standort	Variable	$[\text{kN/m}^2]$	$[-]$
Davos	WW	2.75	0.36
	HS	4.56	0.31
Hospental	WW	4.25	0.42
	HS	6.34	0.34
Valsot	WW	1.87	0.40
	HS	3.85	0.36
Raschitsch	WW	1.78	0.44
	HS	3.23	0.32

Die Verteilung der Einwirkungen aufgrund natürlich abgelagerter Schneedecke für den Standort Davos kann zusammen mit der Modellierung der dynamischen Einwirkungen aus Kapitel 4.2 genutzt werden, um die kombinierten Einwirkungen in Fall 2 auf die Galerie Salezer zu untersuchen.

### 4.3.3 Kombination der ruhenden und dynamischen Einwirkungen

Für Fall 2 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] werden die ruhenden Lasten aus der natürlich abgelagerten Schneedecke mit dynamischen Einwirkungen aus einem Lawinenabgang über dem Galeriedach kombiniert. Die beiden Einwirkungen wirken gemeinsam als Leiteinwirkung bzw. als einzige variable Einwirkung. Dennoch stellt sich die Frage, wie die beiden zufälligen Grössen miteinander kombiniert werden bzw. welche Fraktilwerte für die Schneedecke und die dynamische Einwirkung verwendet werden sollen.

Als Ausgangspunkt für die Diskussion dieser Fragen dient die folgende Gleichung:

$$Q = D + S \quad (3.8)$$

Hierin bezeichnet  $Q$  die gesamte Lawineneinwirkung (ruhend und dynamisch) in Fall 2,  $D$  die dynamische Einwirkung und  $S$  die ruhende Einwirkung aus einer natürlich abgelagerten Schneedecke. In Kapitel 4.3.1 und 4.3.2 wurde diskutiert, wie die Verteilung der *Schneelast zum Lawinenzeitpunkt* ermittelt bzw. angenähert werden kann. Für die in Fall 2 hauptsächlich relevanten Hochwinterlawinen ist die Verteilung des jährlichen Maximums, am besten bezogen auf den Wasserwert WW, eine gute Näherung für diese bedingte Verteilung.

Die Abhängigkeit zwischen den Zufallsvariablen  $D$  und  $S$  wird deutlich reduziert, wenn man die Verteilung der Schneelast zum Lawinenzeitpunkt betrachtet. Eine gewisse verbleibende Abhängigkeit ist zwar denkbar, z.B. weil mehr Schnee im Anrissgebiet potentiell auch zu grösseren Lawinenanrissen führen kann. Der Zusammenhang zwischen der Schneehöhe und dem Lawinenanriss ist aber alles andere als deterministisch, und mit dem in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Simulationsansatz wurde gezeigt, dass verschiedene andere Faktoren wie die Grösse des Anrissgebiets oder die Reibung in der Sturzbahn bzw. im Galeriereich ebenfalls einen – zum Teil deutlich grösseren – Einfluss auf die Lawineneinwirkungen haben. Bei Berücksichtigung all dieser «Störfaktoren» erscheint die Annahme einer weitestgehenden Unabhängigkeit oder allenfalls leichten Korrelation zwischen den Zufallsvariablen  $D$  und  $S$  durchaus realistisch.

Unter dieser Annahme wird die Bestimmung des charakteristischen Wertes für die gesamte Lawineneinwirkung  $Q$  zu einem Problem der Lastkombination. Bei unabhängigen Einwirkungen ist es üblich, nur eine der beiden Grössen als seltenen Extremwert zu definieren; sowohl aus praktischen als auch aus theoretischen Überlegungen sollte dies die dynamische Lawineneinwirkung  $D_k$  sein, die auch für Fall 2 vom Lawinenexperten in der Regel als 30-jähriges bzw. 300-jähriges Ereignis ermittelt wird. Die Frage ist nun, mit welchem charakteristischen Wert  $S_k$  der natürlich abgelagerten Schneedecke diese 30- bzw. 300-jährige Fließlawine kombiniert werden muss, damit die Summe der beiden charakteristischen Werte ebenfalls dem 30- bzw. 300-jährigen Ereignis für die gesamte Lawineneinwirkung  $Q$  entspricht. Dies kann mit einer einfachen Monte Carlo Simulation basierend auf Gleichung (3.8) untersucht werden.

Für die Ermittlung des theoretisch korrekten charakteristischen Wertes  $S_k$  bzw. der entsprechenden Wiederkehrperiode  $T_S$  in der Verteilung der Schneelast zum Lawinenzeitpunkt werden die folgenden Annahmen getroffen (als Referenz siehe Tab. 28, sowie Tab. 16 in Kapitel 3.6.2):

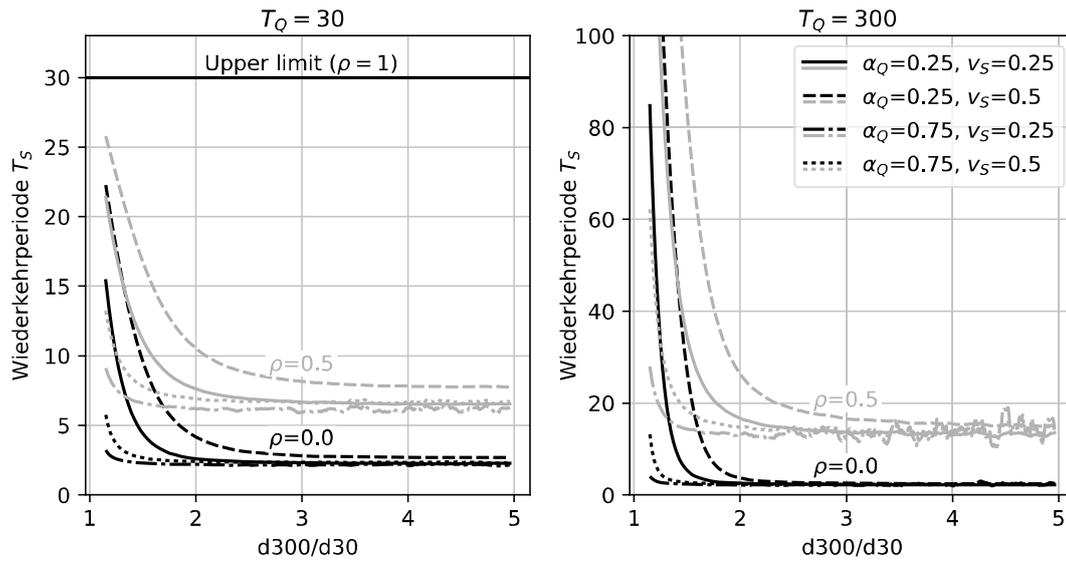
- Modellierung der *dynamischen Einwirkung*  $D$  :
  - Gamma-verteilt mit Mittelwert  $\mu_D = 1$  (normierte Zufallsvariable) und variablem Variationskoeffizienten, ausgedrückt über das Verhältnis der Fraktilwerte  $d_{300}/d_{30}$
  - Anteil der dynamischen Einwirkung an der gesamten Lawineneinwirkung in Fall 2: zwischen  $\alpha_Q = \mu_D/\mu_Q = 0.25$  und  $\alpha_Q = 0.75$
  - Charakteristischer Wert  $D_k$ : Ereignis mit Wiederkehrperiode  $T_D = 30$  bzw.  $T_D = 300$
- Modellierung der *natürlich abgelagerten Schneedecke*  $S$  :

- Gamma-verteilt mit Variationskoeffizient  $v_S = 0.25$  bzw.  $v_S = 0.5$ , um die Bandbreite der in Kapitel 4.3.2 untersuchten Standorte abzudecken; Mittelwert aus den Annahmen für  $D$  berechnet zu  $\mu_S = \mu_Q - \mu_D = 1/\alpha_Q - 1$
- Charakteristischer Wert  $S_k$ : Fraktilwert von  $S$  mit Wiederkehrperiode  $T_S$  (gesucht)
- Modellierung der *gesamten Einwirkung*  $Q = D + S$ 
  - Simulation von  $D$  und  $S$  mit Korrelation  $\rho = 0$  (unabhängige Zufallsvariablen) bzw.  $\rho = 0.5$  (leichte Korrelation); Einwirkung  $Q$  als Summe der beiden Zufallsvariablen
  - Charakteristischer Wert  $Q_k$ : Ereignis mit Wiederkehrperiode  $T_Q = 30$  bzw.  $T_Q = 300$

Mit den getroffenen Annahmen werden zunächst die Zufallsvariablen  $D$  und  $S$  simuliert und die gesamte Lawineneinwirkung  $Q$  ermittelt. Die charakteristischen Werte  $D_k$  und  $Q_k$  ergeben sich direkt aus den entsprechenden Verteilungen bzw. Simulationen und werden verwendet, um den gesuchten charakteristischen Wert der Schneelast  $S_k = Q_k - D_k$  zu berechnen. Mit der Verteilung der natürlich abgelagerten Schneedecke kann nun die Wiederkehrperiode  $T_S$  für diesen gesuchten charakteristischen Wert bestimmt werden.

Abb. 45 zeigt die Ergebnisse dieser Simulation. Auffällig ist der grosse Effekt der Streuung in der dynamischen Einwirkung  $D$ , ausgedrückt durch das Verhältnis  $d_{300}/d_{30}$ . Je grösser dieses Verhältnis, desto stärker wird die Streuung der gesamten Lawineneinwirkung  $Q$  im Fall 2 durch die dynamische Einwirkung  $D$  dominiert und desto weniger konservativ muss der Fraktilwert  $S_k$  der ruhenden Schneelast gewählt werden. Die Kurven für unkorrelierte Zufallsvariablen ( $\rho = 0$ ) konvergieren zum Mittelwert der Verteilung, der bei einer Wiederkehrperiode  $T_S$  von etwas mehr als 2 Jahren erreicht wird. Die Kurven für korrelierte Zufallsvariablen konvergieren ebenfalls, allerdings auf einen etwas höheren Wert. Die Bemessung auf den oberen Grenzwert von  $T_S = 30$  bzw.  $T_S = 300$  ist nur bei voll korrelierten Zufallsvariablen erforderlich.

Für die Praxis könnte die Verwendung des 10-jährigen Ereignisses für die ruhende Schneelast in Fall 2 eine sinnvolle Empfehlung sein. Das 10-jährige Ereignis lässt sich auch mit vergleichsweise kurzen Datenreihen für die natürlich abgelagerte Schneedecke noch gut ermitteln, und kombiniert mit dem 30-jährigen Ereignis einer Fließlawine über der natürlich abgelagerten Schneedecke liegt die Bemessung für typische Verhältnisse von  $d_{300}/d_{30} \geq 1.5$  nur in einigen wenigen betrachteten Fällen auf der unsicheren Seite. Für die Kombination mit der 300-jährigen Fließlawine müsste man zwar eigentlich einen höheren Wert wählen, z.B. mit einer Wiederkehrperiode von  $T_S = 30$ . Mit der Zuverlässigkeitsanalyse für Fall 2 (Kapitel 3.6.2) konnte aber gezeigt werden, dass die Festlegung des charakteristischen Wertes für die natürlich abgelagerte Schneedecke ohnehin nur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Bemessung hat. Insofern erscheint ein pragmatischer Ansatz unter Verwendung des 10-jährigen Ereignisses für die ruhende Schneelast auch für die aussergewöhnliche Bemessungssituation durchaus gerechtfertigt.



**Abb. 45** Wiederkehrperiode  $T_s$  zur Wahl des Fraktilwerts für die ruhende Schneelast in Fall 2 zur Kombination mit dem 30- bzw. 300-jährigen Ereignis der dynamischen Lawineneinwirkung  $D$  (Basis: Monte Carlo Simulation von Gleichung (3.8)).

## 4.4 Ruhende und dynamische Einwirkungen bei Kombination von Ereignissen (Fall 3)

Fall 3 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] beschreibt die Einwirkungen aus einer Fließlawine über einer bereits bestehenden Lawinenablagerung. Für die probabilistische Modellierung betrachtet man Kombinationen mehrerer Lawinenereignisse: aus einer oder mehreren Vorlawinen ergibt sich die ruhende Einwirkung; schliesslich fliesst eine letzte Lawine über dieser bestehenden Vorablagerung ab und führt zu dynamischen Einwirkungen auf dem Galeriedach.

### 4.4.1 Unsicherheiten bei der Beurteilung der kombinierten Einwirkungen

Die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Lawineneinwirkungen in Fall 3 haben grundsätzlich ähnliche Ursachen wie bei Fall 1, siehe Tab. 21 in Kapitel 4.2.1. Zu den dort aufgeführten Unsicherheiten bei den lawinendynamischen Berechnungen kommen allerdings neue Unsicherheiten hinzu, die sich aus der Kombination mehrerer Lawinenereignisse ergeben:

- Zusätzliche Unsicherheiten bei der Berechnung der Einwirkungen:
  - Messungen lassen vermuten, dass die dynamischen Lawineneinwirkungen durch Vorablagerungen stark gedämpft werden. Dass dies nicht berücksichtigt wird, führt zu einer sehr konservativen Bemessung insbesondere, wenn die dynamische Lawineneinwirkung viel kleiner ist als die die Einwirkung der Vorablagerung (Fließhöhe  $\ll$  Ablagerungshöhe).
  - Eine grosse Lawine kann während dem Überfließen der Galerie einen Teil der Vorablagerung mitreissen.
- Zusätzliche Unsicherheiten in den lawinendynamischen Berechnungen:
  - Unsicherheiten aus der Festlegung der Einwirkungsszenarien (Kombination mehrerer Lawinen für Vorablagerung und dynamische Einwirkung)
  - Unsicherheiten bei der Bestimmung der Vorablagerungen als Basis für die Ermittlung der ruhenden Einwirkungen und zur Festlegung der Hanggeometrie für die Ermittlung der dynamischen Einwirkungen
  - Lawinendynamische Berechnungsprogramme (RAMMS), resp. die verwendeten Parameter wurden an einzeln aufgetretenen Lawinen geeicht. Für die zweite und weitere innerhalb einer Saison im selben Lawinenzug abgehende Lawinen kann die Reibung im Lawinenzug wesentlich kleiner sein als in den Empfehlungen angegeben. Die Ablagerungsgeometrie kann mit den heute verfügbaren Berechnungsprogrammen nur ungenügend abgebildet werden.

Für die vorliegende Untersuchung liegt der Fokus weiterhin auf der Modellierung der Unsicherheiten in den lawinendynamischen Berechnungen durch Variation der Eingangsparameter. Die sehr wichtige Unsicherheit bezüglich einer möglichen Dämpfung der dynamischen Einwirkungen durch die Vorablagerung kann in diesem Rahmen nicht untersucht werden.

Die Vorablagerungen wurden in dieser Untersuchung ebenfalls mit Hilfe von lawinendynamischen Berechnungen festgelegt, d.h. es kommen ähnliche Unsicherheiten – z.B. zum Anrisszenario oder zu den Reibungsparametern – zum Tragen wie bei der Ermittlung der dynamischen Einwirkungen. Eine zentrale Unsicherheit für die Einwirkungen in Fall 3 ist aber sicherlich die Festlegung der Kombinations- bzw. Einwirkungsszenarien, die im folgenden Abschnitt diskutiert wird.

#### 4.4.2 Vorgehen zur Modellierung der Unsicherheiten

Die Modellierung der Unsicherheiten orientiert sich grundsätzlich an dem in Kapitel 4.2.2 für Fall 1 beschriebenen Szenario-basierten Ansatz unter Verwendung von RAMMS-Simulationen. Allerdings wurden für Fall 3 einige Anpassungen vorgenommen, die in Abb. 46 illustriert sind. Die wichtigste Änderung besteht darin, dass das Einwirkungsszenario neu nicht nur eine einzelne Lawine beinhaltet, sondern mehrere Lawinen, die nacheinander über der Galerie abgehen und dort Schnee ablagern. Das Vorgehen hierfür ist im linken Teil von Abb. 46 dargestellt:

- Die erste Lawine wird ohne Vorablagerung berechnet, d.h. die Hanggeometrie entspricht der in Fall 1.
- Die aus der Berechnung resultierenden Ablagerungshöhen definieren die Vorablagerung für die nächste Lawine.
- Die Berechnung weiterer Lawinen wird fortgesetzt, bis die im Einwirkungsszenario definierte Anzahl Lawinen erreicht ist.
- Die zuletzt berechnete Lawine definiert die dynamischen Einwirkungen; die statische Einwirkung ergibt sich aus der Vorablagerung.

Die zentrale Annahme ist in diesem Vorgehen die Definition der Einwirkungsszenarien, bei der festgehalten wird, wie viele Lawinen insgesamt über der Galerie abgehen und welche «Wiederkehrperiode» (als Mass für die Lawinengrösse) diese Lawinen als Einzellawinen hätten, siehe Tab. 29 für die Galerie Salezer und Tab. 30 für die Galerie am Oberalp-Pass. Da mehrere Lawinenereignisse im selben Jahr nicht unabhängig voneinander sind, lassen sich diese «Einzel-Wiederkehrperioden» nicht ohne weiteres zu einer gemeinsamen «Szenario-Wiederkehrperiode» kombinieren. Die Annahmen zur Wiederkehrperiode des Einwirkungsszenarios basieren deshalb auf einer Expertenschätzung und sind ebenfalls in Tab. 29 und Tab. 30 angegeben.

Die zugrundeliegenden Überlegungen können am Beispiel von Szenario 4 für die Salezer-Galerie illustriert werden. Die dynamischen Einwirkungen werden hier von einer 30-jährigen Lawine verursacht, also einer Einzellawine von einer Grösse, die im Mittel nur alle 30 Jahre einmal überschritten wird. Wir gehen aber davon aus, dass in Situationen, in denen eine solche Lawine auftreten kann, in der Regel bereits eine 10-jährige Lawine angerissen ist. Deshalb beträgt die Wiederkehrperiode des Kombinations-Szenarios aus einer 10-jährigen Lawine (Ablagerung auf der Galerie) und einer 30-jährigen Lawine (dynamische Einwirkung) ebenfalls 30 Jahre. Der Fall, dass eine 30-jährige Fließlawine über einer ebenfalls 30-jährigen Lawinenablagerung abfließt, ist etwas seltener, was zu einer geschätzten Wiederkehrperiode von 50 Jahren führt (Szenario 8).

Die Szenario-Definition in Tab. 29 und Tab. 30 wird auch für die Modellierung von Fall 4 (ruhende Einwirkung aus Lawinenablagerung auf dem Galeriedach) verwendet, siehe Kapitel 4.5 für Details.

**Tab. 29** Szenario-Definition für die Galerie Salezer mit kombinierter Einwirkung aus mehreren Lawinen (Fall 3 und 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1])

Sz.-Nr.	Wiederkehrperiode Einwirkungsszenario	«Wiederkehrperioden» der 2-3 Lawinen im Einwirkungsszenario		
	$T_{\text{Szenario}}$	$T_1$	$T_2$	$T_3$
1	20 Jahre	10 Jahre	-	10 Jahre
2	30 Jahre	10 Jahre	10 Jahre	10 Jahre
3	30 Jahre	30 Jahre	-	10 Jahre
4	30 Jahre	10 Jahre	-	30 Jahre
5	50 Jahre	10 Jahre	30 Jahre	10 Jahre
6	50 Jahre	30 Jahre	10 Jahre	10 Jahre
7	50 Jahre	10 Jahre	10 Jahre	30 Jahre
8	50 Jahre	30 Jahre	-	30 Jahre
9	100 Jahre	10 Jahre	30 Jahre	30 Jahre
10	100 Jahre	30 Jahre	10 Jahre	30 Jahre
11	300 Jahre	10 Jahre	-	300 Jahre
12	350 Jahre	10 Jahre	10 Jahre	300 Jahre
13	400 Jahre	30 Jahre	-	300 Jahre
14	500 Jahre	10 Jahre	30 Jahre	300 Jahre
15	500 Jahre	30 Jahre	10 Jahre	300 Jahre

**Tab. 30** Szenario Definition für die Galerie am Oberalppass mit kombinierter Einwirkung aus mehreren Lawinen (Fall 3 und 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1])

Einwirkungsszenario		Vorablagerung		Fliesslawine	
Nr.	$T_{\text{Szenario}}$	Anzahl	$T_i$	$T_{\text{dyn}}$	Anrisssszenario
1	30 Jahre	1 Vorlawine	30 Jahre	30 Jahre	$r_2$ (normal)
2	100 Jahre	2 Vorlawinen	30 Jahre	30 Jahre	$r_3$ (etwas grösser)*
3	300 Jahre	3 Vorlawinen	30 Jahre	300 Jahre	$r_2$ (normal)

\*die 100-jährige Fliesslawine wird durch eine «grosse» 30-jährige Lawine angenähert

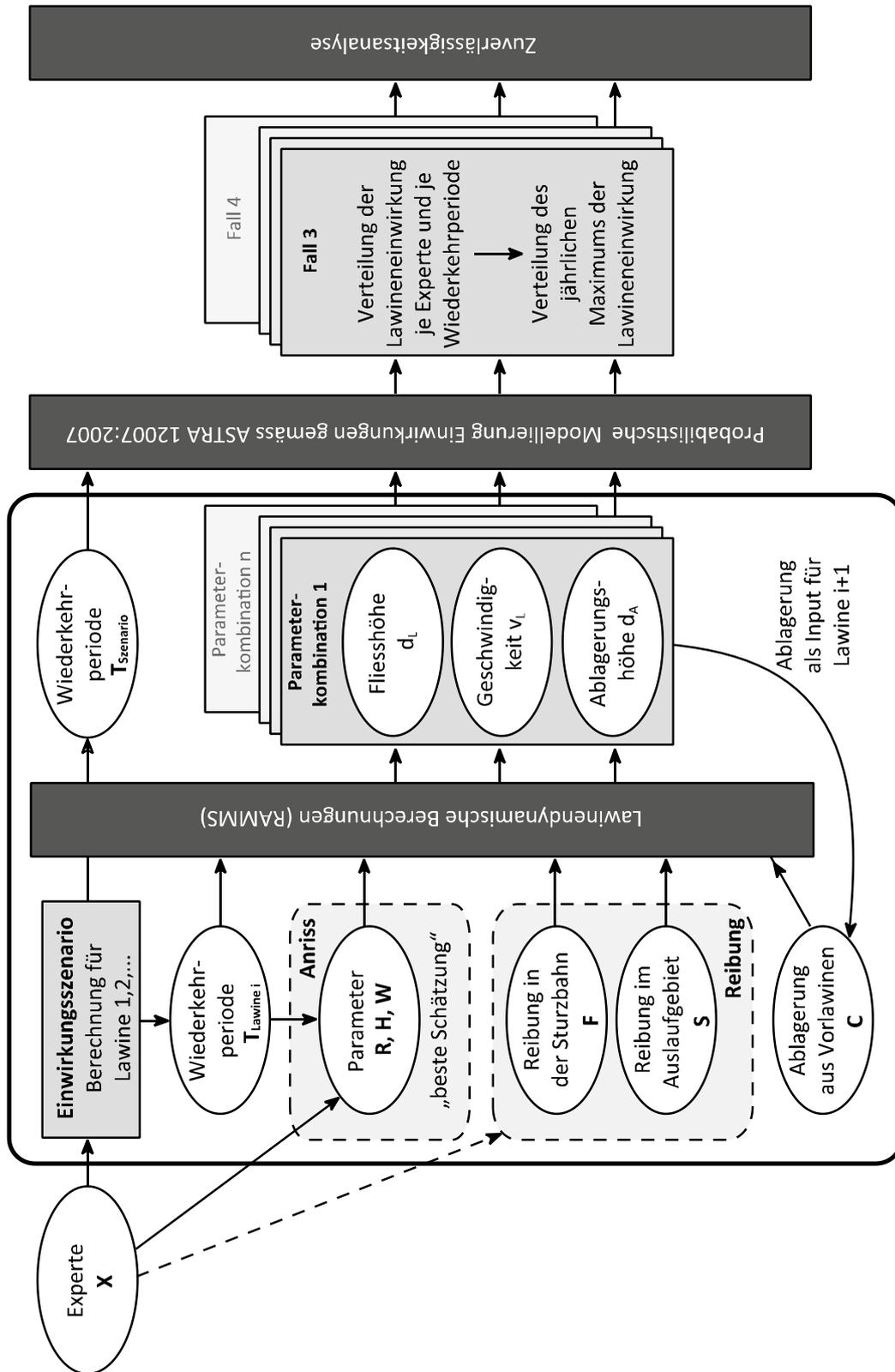


Abb. 46 Illustration der Eingangsgrößen zur Modellierung der Unsicherheiten in lawindynamischen Berechnungen (Fall 3).

### 4.4.3 Lawinendynamische Berechnungen

Wie schon bei der Modellierung der dynamischen Einwirkungen für Fall 1 basieren die lawinendynamischen Berechnungen für Fall 3 auf einem Simulationsansatz, bei dem die Input-Parameter der RAMMS-Simulationen systematisch variiert werden, siehe Kapitel 4.2.2 für Details. Da in jedem Einwirkungsszenario 2-4 Einzellawinen kombiniert werden, müssten mit dem dort beschriebenen Ansatz sehr viele Parametervariationen berechnet werden. Die grössten Unsicherheiten liegen aber ohnehin in der Definition der Einwirkungsszenarien, weshalb Vereinfachungen für die Modellierung der Einzellawinen gerechtfertigt sind. Die getroffenen Annahmen sind spezifisch für den betrachteten Galeriestandort und werden in Tab. 31 (für die Galerie Salezer) bzw. Tab. 32 (für die Galerie am Oberalppass) zusammengefasst. Für die Kombination der Einzellawinen in einem Einwirkungsszenario ist vor allem der Umgang mit den Vorablagerungen aus vorhergehenden Lawinenabgängen zentral (Parameter C in Tab. 31 und Tab. 32). Das Vorgehen unterscheidet sich für die beiden betrachteten Galerien.

Für die Galerie Salezer definiert sich der Parameter C über Grössenklassen des Ablagerungsvolumens (in  $m^3$ ) auf dem Galeriedach. Um diese Klassen zu definieren, wurden zunächst alle Simulationen für die Situation ohne Vorablagerung durchgeführt und in etwa gleich «häufige» Ablagerungsklassen eingeteilt. Im Anschluss wurde aus allen Simulationen innerhalb einer Klasse eine gemittelte Ablagerungsgeometrie auf der Galerie und in der Sturzbahn bestimmt, die als Vorablagerung für die «nächste» Lawine in der Simulation berücksichtigt wird. In Einwirkungsszenarien mit drei Lawinenabgängen werden die Lawinenablagerungen aus zwei Vorlawinen addiert, um die Vorablagerung für die dritte Lawine zu bestimmen. Im Folgenden werden wieder die gleichen Ablagerungsklassen und Geometrien verwendet, was die Simulation erleichtert.

Mit diesem Vorgehen ergeben sich bei der Galerie Salezer für jede Einzellawine in einem Einwirkungsszenario  $4 \times 3$  Variationen der Reibungsparameter F und S über 8 verschiedenen Hanggeometrien zur Berücksichtigung der Vorablagerungen (Parameter C). Da drei verschiedene «Wiederkehrperioden» der Einzellawinen betrachtet werden, sind dies insgesamt  $4 \times 3 \times 8 \times 3 = 288$  Parametervariationen, die in RAMMS berechnet und anschliessend in der probabilistischen Analyse für jedes der in Tab. 29 definierten Einwirkungsszenarien kombiniert werden.

Bei der Galerie am Oberalppass können Einwirkungsszenarien mit Vorablagerungen aus vielen kleineren Ereignissen eine Rolle spielen, was nur mit sehr vielen Simulationen modelliert werden könnte. Um das Vorgehen zu vereinfachen, wurden für die Vorablagerung mehrere «identische» Lawinen (mit den gleichen Eingabeparametern) nacheinander simuliert; erst für die Simulation der «letzten» Lawine (Fliesslawine, dynamischen Einwirkungen) wird wieder ein neuer Parametersatz gewählt. Der Parameter C ist in diesem Ansatz einfach die Anzahl Vorlawinen, die bereits zu Ablagerungen auf dem Galeriedach beigetragen haben. Eine weitere Vereinfachung besteht darin, dass für die Modellierung der Ablagerung «grosse» 30-jährige Ereignisse verwendet werden, wodurch auf Simulationen mit mehr als drei (dann i.d.R. kleinere) Vorlawinen verzichtet werden kann.

Für die Modellierung der Vorablagerung werden je nach Einwirkungsszenario zwischen 9 und 13 ausgewählte Variationen der Reibungsparameter F und S berechnet (reduzierte Variation vor allem in Bezug auf den Parameter F; gleiche Parameter für alle «Vorlawinen»). Im Anschluss werden diese Vorablagerungen aus 1-3 «Vorlawinen» mit  $4 \times 7 = 28$  verschiedenen Fliesslawinen kombiniert werden (volle Variation von F und S für die dynamischen Einwirkungen). Die Analyse berücksichtigt insgesamt 2744 verschiedene Kombinationen aus je einer Fliesslawine und einer Vorablagerung.

**Tab. 31** Definition der Eingangsgrössen für die Simulation mit RAMMS in Fall 3 bzw. 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] – Vereinfachter Simulationsansatz für die Kombination mehrerer Lawineneignisse, Galerie Salezer.

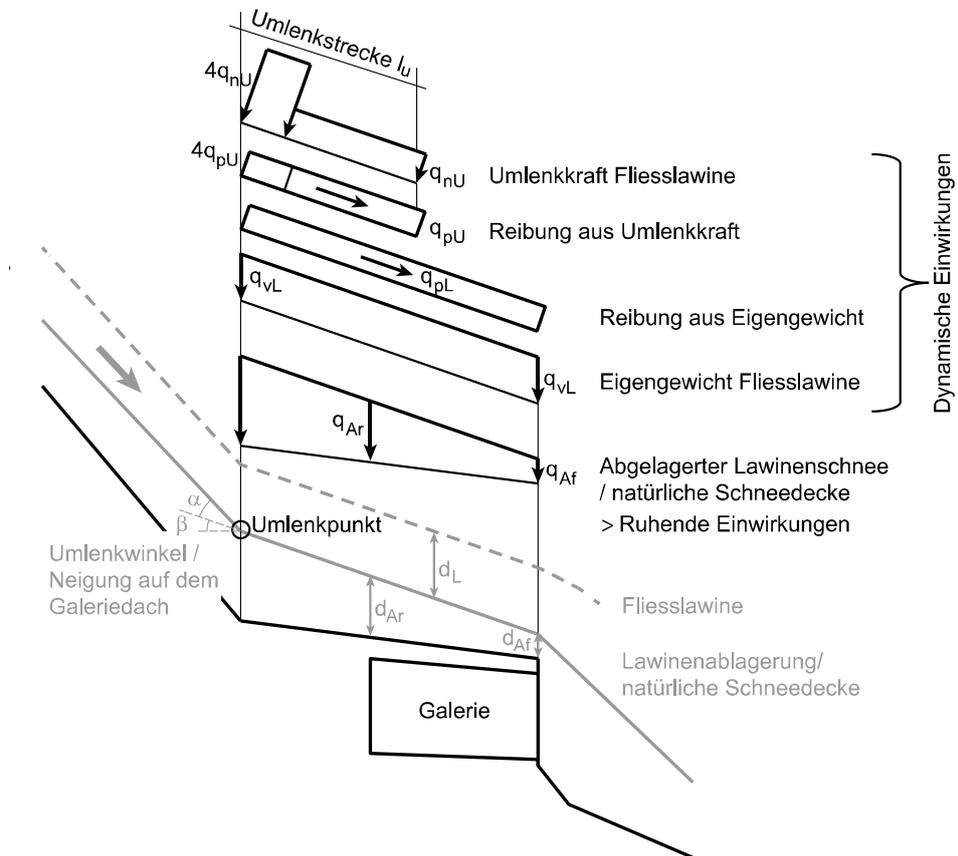
<b>Wiederkehrperiode T</b> der Einzellawinen (als Input für die RAMMS-Simulation)	
t <sub>1</sub> 10-jähriges Ereignis	t <sub>3</sub> 300-jähriges Ereignis
t <sub>2</sub> 30-jähriges Ereignis	
<b>Anriss-Szenario R, Anrisshöhe H, Windeintrag W</b> – «beste Schätzung», keine Variation	
r <sub>2</sub> Realistische Einschätzung	w <sub>1</sub> Windeintrag w interpoliert zwischen w <sub>1</sub> und w <sub>2</sub> ; erhöhte Wahrscheinlichkeit (2/3), dass ein
h <sub>2</sub> Leicht erhöhte Anrisshöhe bzw. -Mächtigkeit	w <sub>2</sub> Windeintrag die Anrissmächtigkeit erhöht (w <sub>2</sub> )
<b>Reibung in der Sturzbahn F und im Auslaufgebiet S</b> – volle Variation der beiden Parameter	
f <sub>1</sub> Reibung viel kleiner als gemäss Richtlinie	s <sub>1</sub> Reibung im Vergleich zur Reibung in der Sturzbahn grossflächig erhöht
f <sub>2</sub> Reibung kleiner als gemäss Richtlinie	
f <sub>3</sub> Reibung gemäss Richtlinie	s <sub>2</sub> Kurz oberhalb der Galerie erhöhte Reibung
f <sub>4</sub> Reibung grösser als gemäss Richtlinie	s <sub>3</sub> Erst auf dem Galeriedach erhöhte Reibung
<b>Vorablagerungen C</b> – Grössenklassen des Ablagerungsvolumens auf dem Galeriedach (Zone 1 bis 7)»	
c <sub>0</sub> Keine Ablagerung (<10m <sup>3</sup> ) auf der Galerie	c <sub>4</sub> 780-1873m <sup>3</sup> Ablagerung auf der Galerie
c <sub>1</sub> 10-186m <sup>3</sup> Ablagerung auf der Galerie	c <sub>5</sub> 1873-2768m <sup>3</sup> Ablagerung auf der Galerie
c <sub>2</sub> 186-361m <sup>3</sup> Ablagerung auf der Galerie	c <sub>6</sub> 2768-3825m <sup>3</sup> Ablagerung auf der Galerie
c <sub>3</sub> 361-780m <sup>3</sup> Ablagerung auf der Galerie	c <sub>7</sub> 3825-5700m <sup>3</sup> Ablagerung auf der Galerie

**Tab. 32** Definition der Eingangsgrössen für die Simulation mit RAMMS in Fall 3 bzw. 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] – Vereinfachter Simulationsansatz für die Kombination mehrerer Lawineneignisse, Galerie am Oberalppass.

<b>Wiederkehrperiode T</b> der Einzellawinen (als Input für die RAMMS-Simulation)	
t <sub>2</sub> 30-jähriges Ereignis	t <sub>3</sub> 300-jähriges Ereignis
<b>Anriss-Szenario R, Anrisshöhe H, Windeintrag W</b> – «beste Schätzung», keine Variation	
<i>Parameter für die Modellierung der Fliesslawine (dynamische Einwirkung)</i>	
r <sub>2</sub> Realistische Einschätzung (T <sub>Szenario</sub> = 30, 300)	h <sub>2</sub> Etwas grössere Anrisshöhe bzw. -Mächtigkeit
r <sub>3</sub> Vorsichtige Einschätzung (T <sub>Szenario</sub> = 100)	w <sub>1</sub> Kein Windeintrag im Anrissgebiet
<i>Parameter für die Modellierung der «Vorlawinen» (ruhende Einwirkung)</i>	
r <sub>4</sub> Pessimistische Einschätzung (Vorablagerung aus 1-3 «grossen» 30-jährigen Ereignissen, um eine Modellierung von >3 Vorlawinen zu vermeiden)	h <sub>1</sub> Anrisshöhe bzw. – Mächtigkeit gemäss [34]
	w <sub>1</sub> Kein Windeintrag im Anrissgebiet
<b>Reibung in der Sturzbahn F und im Auslaufgebiet S</b> – Variation beider Parameter	
<i>Modellierung der Fliesslawine:</i>	
	s <sub>0</sub> Keine erhöhte Reibung
f <sub>1</sub> Reibung viel kleiner als nach Richtlinie	s <sub>1</sub> Erhöhte Reibung auf Galeriedach
f <sub>2</sub> Reibung gemäss Richtlinie	s <sub>2</sub> Erhöhte Reibung am Geländeknick
f <sub>3</sub> Reibung grösser als nach Richtlinie	s <sub>3</sub> Erhöht 6Hm oberhalb vom Knick
f <sub>4</sub> Reibung Nassschneelawinen ganze Sturzbahn	s <sub>4</sub> Erhöht 20Hm oberhalb vom Knick
<i>Modellierung der «Vorlawinen»:</i>	
	s <sub>5</sub> Stark erhöht 20Hm oberhalb
Reduzierte Variation, v.a. in Bezug auf F	s <sub>6</sub> Extrem erhöht 20Hm oberhalb
<b>Vorablagerungen C</b> – Anzahl Vorlawinen mit identischen Parametern F und S	
c <sub>0</sub> Keine Vorlawine	c <sub>2</sub> 2 Vorlawinen
c <sub>1</sub> Eine Vorlawine	c <sub>3</sub> 3 Vorlawinen

#### 4.4.4 Berechnung der Einwirkungen auf die Galerie

Abb. 47 zeigt die Einwirkungen, die in Fall 3 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] auf die Galerie wirken. Zusätzlich zu den dynamischen Einwirkungen aus einem Lawinenabgang über dem Galeriedach müssen in Fall 3 auch die ruhenden Einwirkungen aus zuvor abgelagertem Lawinenschnee berücksichtigt werden (die natürliche Schneedecke wird in Fall 3 in diese Vorablagerung aus Lawinenschnee integriert). Auch die Hanggeometrie, insbesondere die Lage des Umlenkpunktes und der Umlenkwinkel, kann durch die Vorablagerung verändert werden.



**Abb. 47** Illustration der auf die Galerie wirkenden Kräfte im Fall 3 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] (Fließlawine über abgelagertem Lawinenschnee).

##### Einwirkung infolge Schneeauflast und Eigengewicht der Fließlawine (Galerie Salezer)

Da bei der Galerie Salezer wie schon im Fall 1 wieder keine Umlenkkräfte berücksichtigt werden müssen, berechnen sich die Einwirkungen auf die Galerie hier wie folgt:

- Dynamische Einwirkung aus dem Gewicht der Fließlawine:  $q_{vL} = \gamma_L \cdot d_L$
- Ruhende Einwirkung aus der Lawinenablagerung auf dem Galeriedach:  $q_A = \gamma_A \cdot d_A$
- Totale Einwirkung (ruhend und dynamisch):  $q_{vL} + q_A = \gamma_L \cdot d_L + \gamma_A \cdot d_A$

Die Fließhöhe  $d_L$  ergibt sich aus den RAMMS-Simulationen für die «letzte» Einzellawine, die Ablagerungshöhe  $d_A$  als Summe der Ablagerungen aus 1-2 Vorlawinen. Auf eine Unterscheidung der Ablagerungshöhen an der Galeriefront bzw. Rückseite wird bei der Galerie Salezer verzichtet, die Einwirkungen werden in  $\text{kN/m}^2$  angegeben.

Als Raumlast wird für die Fließlawine der Richtwert  $\gamma_L = 3.0 \text{ kN/m}^3$  für trockene Fließlawinen gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] verwendet, für die Lawinenablagerung gilt  $\gamma_A = 4.5 \text{ kN/m}^3$ . Die Unsicherheiten in diesen Annahmen werden wie schon bei Fall 1

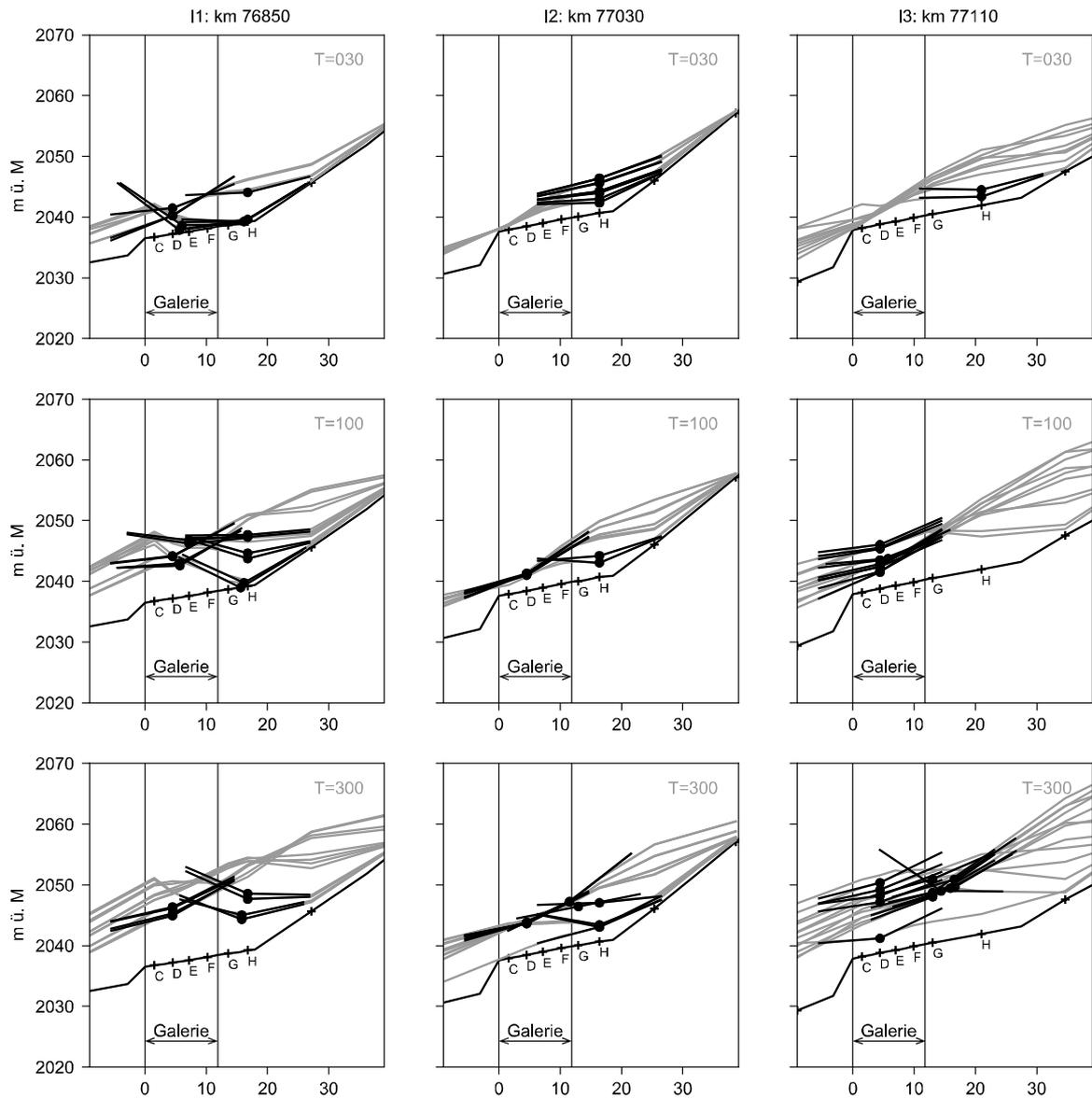
vernachlässigt (siehe Diskussion in Abschnitt 4.2.1). Ebenfalls vernachlässigt werden wieder die hangparallelen Reibungskräfte, da diese proportional zur Gewichtskraft der Fliesslawine sind und somit keinen Einfluss auf die Modellierung der Unsicherheiten haben.

#### *Kombination mit Umlenkkraft (Galerie Oberalppass)*

Die Berechnung der dynamischen Einwirkungen auf die Galerie am Oberalppass erfolgt grundsätzlich nach dem gleichen Vorgehen wie für Fall 1, siehe Kapitel 4.2.3 für Details. Allerdings wird die Hanggeometrie neu durch die Schneeoberfläche der bestehenden Lawinenablagerung bestimmt und muss deshalb für jeden Vorablagerungs-Fall neu ermittelt werden. Für die probabilistische Modellierung erfolgt dies automatisiert mit Hilfe eines einfachen Algorithmus bzw. einer Heuristik zur Bestimmung des Umlenkpunktes sowie zur Berechnung des Umlenkwinkels.

Abb. 48 verdeutlicht die Unsicherheit in der Wahl des Umlenkpunktes und -Winkels für die drei Galerieabschnitte mit den höchsten Einwirkungen je Lawinenzug. Grau dargestellt sind die simulierten Ablagerungen aufgrund früherer Lawinenabgänge für das 30-jährige, 100-jährige und 300-jährige Ereignis, schwarz die berechneten Umlenkpunkte und -Winkel. Bei Ablagerungsfällen ohne Umlenkpunkt gibt es keine Umlenkkraft in Fall 3 und die Einwirkungen berechnen sich analog zur Galerie Salezer.

Wie gross die dargestellten «geometrischen» Unsicherheiten sind, hängt einerseits von der Hanggeometrie ab, andererseits aber auch von der Grösse der betrachteten Vorablagerung. Besonders grosse Unsicherheiten gibt es im Lawinenzug I1 und generell im 300-jährigen Ereignis. Bei den übrigen Fällen ist zumindest die Lage des Umlenkpunktes mit wenigen Ausnahmen gut durch die Hanggeometrie bestimmt und es variiert hauptsächlich die Grösse des Umlenkwinkels.



**Abb. 48** Darstellung der simulierten Lawinenablagerungen (grau) auf der Galerie am Oberalpass im Fall 3 mit Illustration des rechnerischen Umlenkpunktes und Umlenkwinkels für die einzelnen Simulationen (schwarz). Die Punkte C bis H zeigen die Hanggeometrie ohne Schnee.

Jeder Vorablagerungsfall wird schliesslich mit verschiedenen Fließlawinen kombiniert, wobei die Eingangsparameter für die Berechnung der Fließlawine wieder variiert werden. Die dynamischen Einwirkungen ergeben sich jeweils aus der Kombination einer Vorablagerung mit einer Fließlawine. Die Vorablagerung bestimmt hierbei die Hanggeometrie (Lage des Umlenkpunktes und Umlenkwinkel  $\alpha_U$ , Galeriewinkel  $\beta$ ) und aus der Modellierung der Fließlawine ergibt sich die Fließhöhe  $d_L$  und -Geschwindigkeit  $v_L$ . Zu den dynamischen Einwirkungen kommen noch die ruhenden Einwirkungen aus abgelagertem Lawinenschnee hinzu. Beide Einwirkungen werden als vertikale Resultierende pro Laufmeter Galerie in [kN/m] zusammengefasst, siehe Kapitel 4.2.3 für eine Diskussion dieser Annahme.

#### 4.4.5 Probabilistische Modellierung

Mit den Parametervariationen gemäss Tab. 31 bzw. Tab. 30 ergeben sich für jedes Einwirkungsszenario (Kombination mehrerer Lawinenereignisse) verschiedene ruhende,

dynamische und totale Einwirkungen. Um die Verteilung der Einwirkung je Szenario zu ermitteln, werden die Ergebnisse der RAMMS-Simulationen mit den Eintrittswahrscheinlichkeiten der zugrundeliegenden Parametervariationen gewichtet.

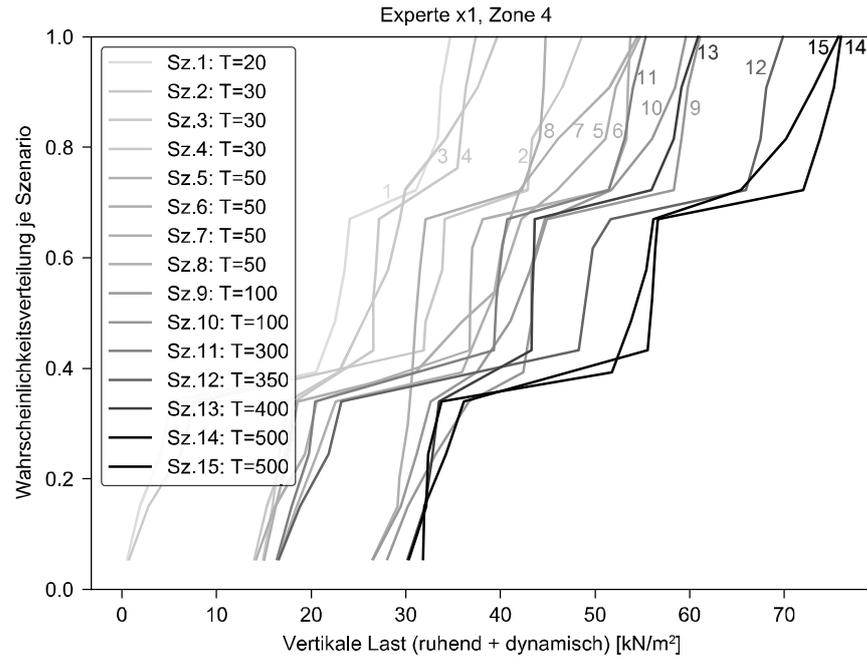
Bei der Galerie Salezer ergibt sich diese ähnlich wie in Kapitel 4.2.5 für Fall 1 beschrieben aus den Wahrscheinlichkeitsannahmen für die Reibungsparameter F und S gemäss Tab. 24, wobei auf eine Modellierung von Abhängigkeiten zwischen den Parametern der ersten, zweiten und ggf. dritten Lawine verzichtet wird.

Beim Oberalppass wird vereinfacht angenommen, dass alle für ein bestimmtes Einwirkungsszenario berechneten Variationen der Reibungsparametern F und S gleich wahrscheinlich sind. Auf eine Modellierung der Abhängigkeiten zwischen den Parametern der «Vorlawinen» für die ruhenden Einwirkungen und der «Fliesslawine» für die dynamischen Einwirkungen wird auch hier verzichtet.

Sobald die Verteilung der Einwirkungen in den einzelnen Einwirkungsszenarien bestimmt ist, werden diese mit dem in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Simulationsansatz zu einer Extremwertverteilung für das jährliche Maximum der Lawineneinwirkung in Fall 3 kombiniert. Als Wiederkehrperiode für jedes Szenario dienen hierbei nicht die für die RAMMS-Simulationen verwendeten rechnerischen Werte je Einzellawine (Parameter T), sondern die geschätzte Wiederkehrperiode des Einwirkungsszenarios als Kombination mehrerer Einzellawinen (Tab. 29 bzw. Tab. 30).

Wie schwierig die Festlegung von Einwirkungsszenarien aus mehreren Lawinen ist, wird in Abb. 49 ersichtlich. Die Abbildung zeigt ein Beispiel für die probabilistische Modellierung der Szenario-Einwirkungen in Fall 3 in den 14 Einwirkungsszenarien gemäss Tab. 29. Die Graustufen wurden in Abhängigkeit der Szenario-Wiederkehrperiode gewählt: je dunkler die Farbe der Kurve, desto grösser ist die vom Lawinenexperten geschätzte Wiederkehrperiode des Einwirkungsszenarios. Wie zu erwarten, steigen die Einwirkungen tendenziell mit der Szenario-Wiederkehrperiode. Bei Betrachtung einzelner Szenarien gibt es aber teils deutliche Abweichungen von dieser Tendenz. So liegen zum Beispiel die Einwirkungen von Szenario Nr. 13 mit einer geschätzten Wiederkehrperiode von 400 Jahren in einer ähnlichen Grössenordnung wie Szenario Nr. 9 mit einer geschätzten Wiederkehrperiode von lediglich 100 Jahren. Solche Inkonsistenzen sind so zu erklären, dass ein Lawinenexperten a priori kaum vorhersehen kann, welche Vorablagerungsfälle für die Einwirkungen auf die Galerie besonders ungünstig bzw. günstig sind; dafür ist das Zusammenspiel der verschiedenen Berechnungsparameter zu komplex.

In der Praxis – d.h. ohne probabilistische Analyse – lässt sich die in Abb. 49 aufgezeigte Unsicherheit kaum erfassen, zumindest wenn das Ziel die Festlegung von «realistischen» Einwirkungsszenarien mit einer definierten Wiederkehrperiode ist. Selbst mit einer systematischen Parametervariation und bei Betrachtung unterschiedlicher Kombinationsszenarien kann ein Lawinenexperte höchstens die Bandbreite der Szenario-Einwirkungen aufzeigen und besonders ungünstige Kombinationen identifizieren. Die so festgelegten Einwirkungen sind aber nicht automatisch realistisch, sondern werden im Gegenteil eher konservativ sein. Möchte man dies vermeiden, bleibt ein grosser gutachterlicher Spielraum mit entsprechenden Unsicherheiten bei der Festlegung der Einwirkungsszenarien.



**Abb. 49** Verteilung der Szenario-Einwirkungen in Fall 3 auf die Salezer-Galerie in der massgebenden Zone 4 gemäss Experten-Schätzung für die in Tab. 29 definierten Einwirkungsszenarien.

In der probabilistischen Analyse werden die Unsicherheiten der Szenario-Einwirkungen mitgeführt und bei der Ermittlung der Extremwertverteilung für das jährliche Maximum der Einwirkungen in Fall 3 berücksichtigt. Im hierfür verwendeten Simulationsansatz können die oben beschriebenen Inkonsistenzen dazu führen, dass z.B. vergleichsweise häufig eine Simulation für die Einwirkung in einem 100-jähriges Ereignis grösser ist als die zugehörige Simulation für ein 400-jähriges Ereignis. Mathematisch ergibt dies zwar natürlich keinen Sinn, aber weil die Einwirkungen in den 15 Szenarien insgesamt mit der Szenario-Wiederkehrperiode zunehmen, ist die Anpassung einer Extremwertverteilung dennoch möglich und ausreichend robust. Bei der Salezer-Galerie wird deshalb der in Kapitel 4.1.2 beschriebene Simulationsansatz insofern leicht angepasst, dass «mathematisch inkonsistente» Simulationen einzelner Szenarien zugelassen werden.

Anders verhält es sich bei der Galerie am Oberalppass, bei der auch in Fall 3 lediglich drei Einwirkungsszenarien mit unterschiedlicher Szenario-Wiederkehrperiode betrachtet werden (vgl. Tab. 30). Von einzelnen lokalen Problemen im Schwanzbereich der drei Szenario-Verteilungen abgesehen, entsprechen die Simulationen bei dieser Galerie aber generell der Erwartung, dass die Einwirkungen auf die Galerie mit der Szenario-Wiederkehrperiode zunehmen. Der in Kapitel 4.1.2 beschriebene Simulationsansatz kommt hier ohne weitere Anpassung zur Anwendung.

#### 4.4.6 Ergebnisse der Modellierung für Fall 3 und Vergleich mit Fall 4

In Tab. 33 und Tab. 34 sind die Ergebnisse der Modellierung für die beiden Galerien und die Fälle 3 und 4 zusammengefasst. Die Gegenüberstellung der beiden Fälle ist insofern interessant, dass für beide Situationen derselbe Modellierungsansatz sowie dieselben Szenarien und Berechnungsannahmen verwendet wurden (siehe Kapitel 4.5 für Details zur Modellierung von Fall 4). Bei der Salezer-Galerie sind die Ergebnisse denn auch sehr ähnlich: der Unterschied zwischen den beiden Szenarien besteht hier letztendlich nur darin, dass die Fließhöhe der letzten Lawine im Einwirkungsszenario in Fall 3 zu einer anderen (tendenziell kleineren) Gewichtskraft führt als der Beitrag dieser letzten Lawine zur gesamten Lawinenablagerung in Fall 4. Anders verhält es sich bei der Galerie am Oberalppass, bei der in Fall 3 ein relevanter Beitrag der Umlenkraft zur dynamischen Lawineneinwirkung zu erwarten ist. Aus diesem Grund sind die Einwirkungen auf die

Galerie am Oberalppass in Fall 3 generell höher in Fall 4 und auch die Streuung bzw. Unsicherheit der Einwirkungen ist in Fall 3 grösser.

**Tab. 33** Zusammenfassung der Einwirkungs-Modellierung auf die Galerie Salezer in den Fällen 3 und 4. Die Einwirkungen enthalten die Gewichtskraft der Lawinenablagerung (Annahme einer konstanten Ablagerungshöhe über die gesamte Galeriebreite) sowie in Fall 3 das Eigengewicht der Fließlawine.

Salezer	Jährliches Max. (Prädiktive) - Fall 3					Jährliches Max. (Prädiktive) - Fall 4				
	Fraktilewerte			Momente		Fraktilewerte			Momente	
	q30	q300	300/30	$\mu Q$	CoV	q30	q300	300/30	$\mu Q$	CoV
	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[m]	[-]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]	[m]	[-]
Zone 1	3.66	13.51	3.69	0.43	3.96	2.66	13.11	4.92	0.32	4.97
Zone 2	7.53	21.15	2.81	0.97	2.92	8.72	25.58	2.93	1.09	3.09
Zone 3	21.88	37.77	1.73	6.00	1.09	22.55	42.67	1.89	5.04	1.40
Zone 4	<b>25.00</b>	<b>45.16</b>	<b>1.81</b>	<b>6.18</b>	<b>1.24</b>	<b>25.28</b>	<b>46.36</b>	<b>1.83</b>	<b>6.04</b>	<b>1.29</b>
Zone 5	11.75	30.24	2.57	1.63	2.57	13.64	34.58	2.54	1.93	2.52
Zone 6	4.61	19.10	4.14	0.53	4.38	5.24	22.52	4.30	0.61	4.51
Zone 7	0.00	1.23	-	0.02	18.74	0.00	1.23	-	0.02	18.71

**Tab. 34** Zusammenfassung der Einwirkungs-Modellierung auf die Galerie am Oberalppass in den Fällen drei und vier. Die Einwirkungen werden hier angenähert durch die vertikale Resultierende aller auf die Galerie wirkenden Kräfte (Gewichtskraft der Lawinenablagerung sowie in Fall 3 Gewichts- und Umlenkkraft der Fließlawine).

Oberalp	Jährliches Max. (Prädiktive) - Fall 3					Jährliches Max. (Prädiktive) - Fall 4					
	Fraktilewerte			Momente		Fraktilewerte			Momente		
	q30	q300	300/30	$\mu Q$	CoV	q30	q300	300/30	$\mu Q$	CoV	
	km	[kN/m]	[kN/m]	[-]	[kN/m]	[-]	[kN/m]	[kN/m]	[-]	[kN/m]	[-]
I1	76790	84.2	414.8	4.93	10.0	4.97	116.6	275.1	2.36	17.9	2.23
	76810	254.3	926.9	3.65	29.6	3.92	264.2	554.1	2.10	48.4	1.77
	76830	406.9	1007.1	2.47	59.0	2.42	363.0	710.0	1.96	75.7	1.51
	76850	<b>543.9</b>	<b>1230.7</b>	<b>2.26</b>	<b>88.3</b>	<b>2.07</b>	<b>415.0</b>	<b>812.8</b>	<b>1.96</b>	<b>86.4</b>	<b>1.52</b>
	76870	315.4	1136.6	3.60	36.8	3.88	320.9	715.1	2.23	53.3	2.01
	76890	165.2	594.7	3.60	19.3	3.87	154.8	442.3	2.86	19.8	2.99
I2	76990	218.5	386.4	1.77	56.6	1.17	156.1	292.2	1.87	35.7	1.36
	77010	256.0	707.2	2.76	33.5	2.86	207.4	485.3	2.34	32.2	2.20
	77030	<b>290.1</b>	<b>762.2</b>	<b>2.63</b>	<b>39.6</b>	<b>2.66</b>	<b>198.6</b>	<b>490.8</b>	<b>2.47</b>	<b>28.8</b>	<b>2.41</b>
I3	77090	411.7	1346.8	3.27	49.2	3.51	<b>300.3</b>	<b>630.9</b>	<b>2.10</b>	<b>54.9</b>	<b>1.78</b>
	77110	<b>375.7</b>	<b>1564.8</b>	<b>4.16</b>	<b>43.6</b>	<b>4.40</b>	274.2	670.9	2.45	40.2	2.37

Für die Galerie am Oberalppass wird im Folgenden der Einfluss der «geometrischen Unsicherheiten» bezüglich der Festlegung des Umlenkpunktes- und Winkels auf die Einwirkungen in Fall 3 untersucht. Diese wurden in Abb. 48 anhand der simulierten Ablagerungen aus vorhergehenden Lawinenereignissen illustriert. Von Interesse ist hierbei vor allem:

- Ob es zu einer Umlenkung der Lawine kommt (Umlenkwinkel  $\alpha > 0$ )
- Wie gross der Umlenkwinkel ist: nach Gleichung (3.3) ist die Umlenkkraft proportional zum Sinus des Umlenkwinkels,  $\sin(\alpha)$
- Wo der Umlenkpunkt liegt und wie lang die Umlenkstrecke  $l_u$  ist; letztere wird proportional zur Fließhöhe  $d_l$  modelliert.

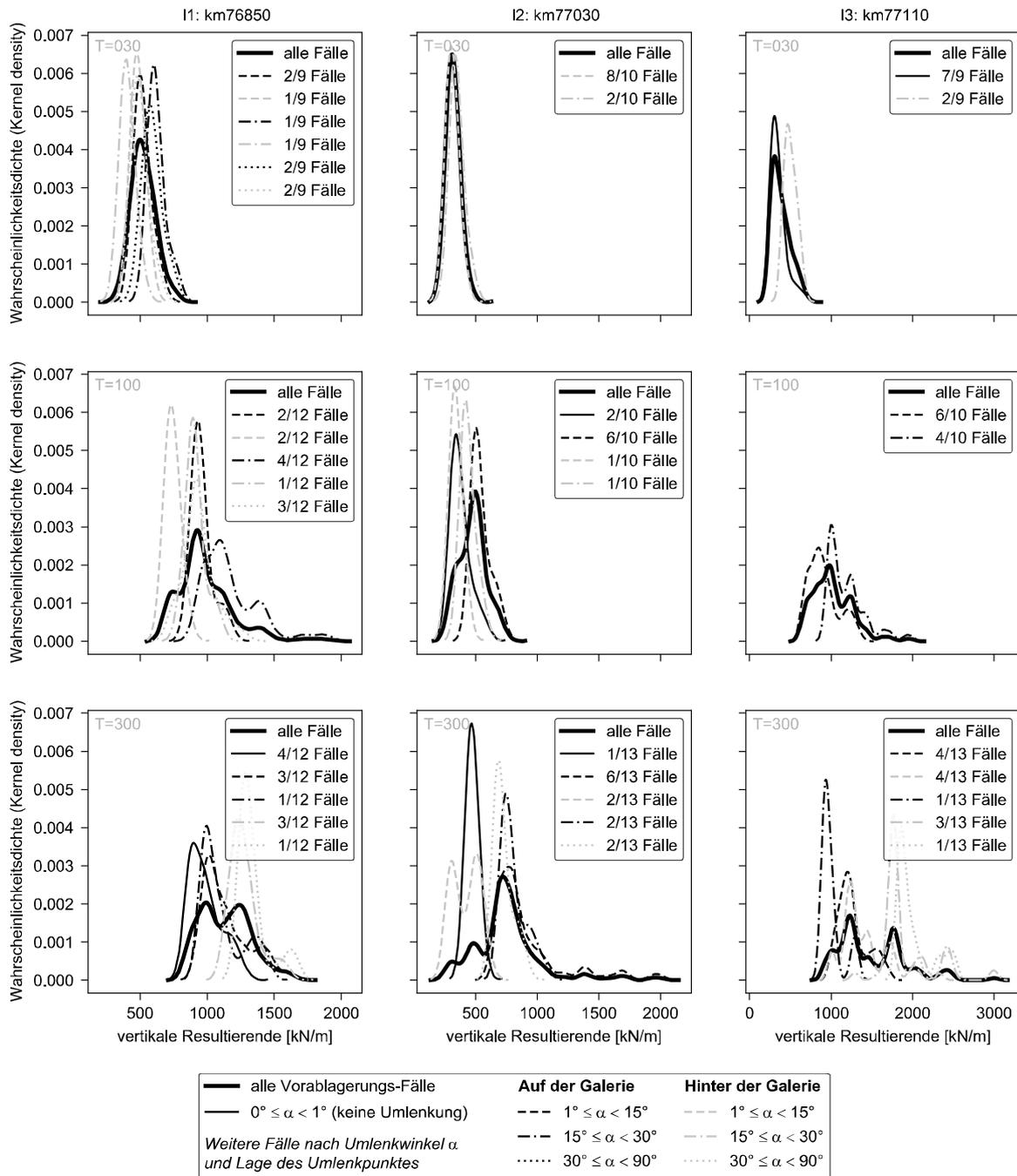
Gerade beim letzten Punkt sind die Abhängigkeiten einigermaßen komplex. Liegt der Umlenkpunkt auf dem Galeriedach, so beginnt die Umlenkstrecke auf der Galerie und der Bereich mit der erhöhten Umlenkkraft spielt in jedem Fall eine Rolle. Liegt der Umlenkpunkt hinter der bergseitigen Galerierückwand, kann es dagegen sein, dass ein wesentlicher Teil

der Umlenkraft vom Erdreich hinter der Galerie aufgenommen wird; dies hängt aber von der genauen Lage des Umlenkpunktes sowie von der Fliesshöhe  $d_L$  ab, die die Umlenkstrecke  $l_u$  bestimmt. Eine Erhöhung des Erddrucks infolge der dynamischen Kräfte muss nicht berücksichtigt werden, siehe ASTRA-Richtlinie 12007 [1].

Hinzu kommen mögliche Wechselwirkungen zwischen der ruhenden und der dynamischen Einwirkung: so führt z.B. eine grosse Lawinenablagerung auf dem Galeriedach zwar zu grossen ruhenden Einwirkungen, diese kann aber die dynamische Einwirkung ggf. positiv beeinflussen, weil die Lawinenablagerung das Gelände «ausflacht» und die Umlenkung der Flieslawine reduziert.

Anhand der Simulationen für die Galerie am Oberalppass kann der Beitrag der verschiedenen Effekte untersucht werden, siehe Abb. 50. Die Abbildung zeigt am Beispiel der drei Galerieabschnitte mit den massgebenden Einwirkungen je Lawinenzug, wie der Umlenkwinkel und die Lage des Umlenkpunktes (auf bzw. bergseitig hinter der Galerie) die Verteilung der Einwirkungen in den drei betrachteten Szenarien beeinflusst.

Beim 30-jährigen Ereignis sind die Abhängigkeiten vergleichsweise klein und zeigen das bereits beschriebene Verhalten mit reduzierten Einwirkungen, wenn der Umlenkpunkt hinter der Galerie liegt. Beim 100-jährigen und beim 300-jährigen Ereignis gilt dies in der Tendenz zwar ebenfalls, durch die grösseren Lawinenablagerungen und Fliesshöhen werden die Abhängigkeiten aber zunehmend gestört und die Unsicherheiten werden grösser.



**Abb. 50** Vergleich der Einwirkungs-Verteilungen (Kernel Density Estimate) je Szenario für Fall 3 auf die Galerie am Oberalppass mit verschiedenen Vorablagerungs-Fällen zur Untersuchung des Einflusses von Umlenkpunkt und -Winkel.

Welchen quantitativen Beitrag die Unsicherheiten bezüglich Umlenkpunkt und -Winkel auf die Unsicherheit der Szenario-Einwirkungen haben, kann mit einer Varianz-Dekomposition geklärt werden. Hierzu wird geprüft, welcher Anteil der Varianz einer Szenario-Verteilung (dargestellt als fett gedruckte Kurven in Abb. 50) durch die Wahl der Vorablagerung erklärt werden kann. Als Grundlage dient die folgende Formel:

$$\begin{aligned} \text{Var}[Q_{S_z, T}] &= \sum_{i=1}^n \text{Var}[Q_{S_z, T} | A_i] \cdot \frac{1}{n} \\ &+ \sum_{i=1}^n E[Q_{S_z, T} | A_i]^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot \frac{1}{n} - 2 \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} E[Q_{S_z, T} | A_i] \cdot E[Q_{S_z, T} | A_j] \cdot \frac{1}{n^2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Hierin bezeichnet  $Q_{S_z,T}$  die (zufällige) Einwirkung im Szenario mit der Wiederkehrperiode  $T$ , die entweder allgemein oder bedingt auf die verschiedenen Vorablagerungsfälle  $A_i$  betrachtet werden kann. Ein Vorablagerungsfall entspricht hierbei einer exakt definierten Schneeoberfläche, wie zum Beispiel in Abb. 48 für die verschiedenen Simulationen dargestellt. Mit dieser Definition sind die ruhenden Einwirkungen sowie der Umlenkpunkt und -Winkel bekannt, wenn man die Einwirkung  $Q_{S_z,T}$  auf einen Vorablagerungsfall  $A_i$  bedingt. Die verbleibenden Unsicherheiten in der Zufallsvariablen  $Q_{S_z,T}$  ergeben sich somit nur aus der Unsicherheit in der Modellierung der Fließlawine (mit zufälliger Fließhöhe und -Geschwindigkeit), die über die Vorablagerung fließt und die dynamischen Einwirkungen auf die Galerie verursacht.

Der erste Term in Gleichung (3.9) ist der Erwartungswert der bedingten Varianz; es handelt sich hierbei um den Teil der Varianz, der nicht durch die Festlegung der Vorablagerung erklärt werden kann. Die beiden übrigen Terme (zweite Zeile von Gleichung (3.9)) definieren den Teil der gesamten Varianz, der sich aus der Variation der Vorablagerungen ergibt.

In Tab. 35 sind die Ergebnisse der Varianz-Dekomposition für die drei massgebenden Abschnitte der Galerie am Oberalppass zusammengefasst. In den meisten Fällen kann ein Grossteil der Varianz (60% oder mehr) durch die Unsicherheit in der Vorablagerung erklärt werden. Die Ausnahmen lassen sich anhand von Abb. 48 und Abb. 50 wie folgt erklären:

- Lawinenzug I2, km 77030, T=30 Jahre und Lawinenzug I3, km 77710, T=100 Jahre: Die Lage des Umlenkpunktes ist in allen Vorablagerungs-Fällen gleich bzw. sehr ähnlich und auch die Grösse des Umlenkwinkels variiert vergleichsweise wenig.
- Lawinenzug I1, km 76850, T=300 Jahre und Lawinenzug I3, km 77110, T=30 Jahre: Bei einem nennenswerten Anteil der Vorablagerungs-Fälle gibt es keine Umlenkung.

Dennoch wird – mit nur einer Ausnahme – auch in diesen Fällen die Varianz der Lawineneinwirkungen in Fall 3 etwa zur Hälfte durch die Unsicherheit in der Vorablagerung auf dem Galeriedach erklärt.

**Tab. 35** Varianz-Dekomposition für die Szenario-Verteilung der totalen (d.h. ruhenden und dynamischen) Lawineneinwirkungen in Fall 3 in den drei massgebenden Abschnitten der Galerie am Oberalppass, basierend auf Gleichung (3.9).

Galerie-Abschnitt	Szenario T	Totale Varianz		durch Vorablagerung erklärt		durch Variation Fließlawine	
		[kN/m] <sup>2</sup>	[kN/m] <sup>2</sup>	[%]	[kN/m] <sup>2</sup>	[%]	
I1 km 76850	30	6'771	4'030	60%	2'741	40%	
	100	43'187	26'991	62%	16'196	38%	
	300	33'455	16'956	51%	16'499	49%	
I2 km 77030	30	1'500	307	20%	1'194	80%	
	100	10'812	6'485	60%	4'327	40%	
	300	78'862	49'593	63%	29'269	37%	
I3 km 77110	30	11'866	5'508	46%	6'358	54%	
	100	60'743	31'652	52%	29'091	48%	
	300	168'836	113'989	68%	54'847	32%	

Die Diskussion der geometrischen Unsicherheiten bezieht sich auf die rechnerisch ermittelten Einwirkungen gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1]. Die Umlenkkraft wird hier über die Umlenkstrecke  $l_u$  konstant modelliert, mit einer erhöhten – ebenfalls konstanten – Umlenkkraft direkt hinter dem Umlenkpunkt. Dieser für die Praxis entwickelte «diskrete» Ansatz kann ggf. im Einzelfall zu höheren Unsicherheiten führen als ein Modell mit entlang der Umlenkstrecke kontinuierlich abnehmender Umlenkkraft. Je mehr unterschiedliche Umlenkpunkte und Fließhöhen in der Simulation betrachtet werden, desto weniger sollte dieser Aspekt jedoch ins Gewicht fallen.

## 4.5 Ruhende Einwirkungen aus abgelagertem Lawinenschnee (Fall 4)

Fall 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] beschreibt die Einwirkungen aus einer ruhenden Lawinenablagerung auf dem Galeriedach. Die probabilistische Modellierung basiert auf denselben Grundscenarien wie für Fall 3.

### 4.5.1 Vorgehen zur Modellierung der Einwirkungen in Fall 4

Grosse Lawinenablagerungen auf dem Galeriedach werden an den betrachteten Standorten vor allem dann erreicht, wenn sich mehrere Lawinen nacheinander auf dem Galeriedach ablagern. Für die probabilistische Modellierung können deshalb dieselben Szenarien und RAMMS-Simulationen verwendet werden wie für Fall 3, siehe Kapitel 4.4 für Details. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die «Fliesslawine» für Fall 4 nicht mehr als dynamische Einwirkung einfließt, sondern als zusätzliche Lawinenablagerung, die zur Vorablagerung hinzugefügt wird. Das bedeutet, dass die Lawinenablagerung in Fall 4 im Vergleich zur ruhenden Einwirkung in Fall 3 jeweils einen zusätzlichen Lawinenabgang berücksichtigt.

### 4.5.2 Ergebnisse der Modellierung für Fall 4

Die Ergebnisse der Modellierung für Fall 4 wurden bereits in Kapitel 4.4.6 zusammengefasst und mit den Ergebnissen für die Einwirkungen in Fall 3 verglichen. Im Folgenden wird deshalb nur auf die Galerie am Oberalppass eingegangen, wo ein Vergleich der Ergebnisse für Fall 4 mit realen Messdaten möglich ist.

Am Oberalppass wurden in den Jahren 1951 und 2018 Schneehöhen-Messungen durchgeführt, um die Ablagerungen auf dem Galeriedach zu messen (siehe Kapitel 3.3.2). Abb. 51 zeigt einen Vergleich dieser Messungen mit den Simulationen der drei Szenarien gemäss Tab. 30 für die drei Lawinenzüge, jeweils dargestellt für den Abschnitt mit den massgebenden Einwirkungen. Für die Modellierung waren die gemessenen Schnee- resp. Ablagerungshöhen nicht verwendet worden.

Abb. 52 basiert auf denselben Ergebnissen wie Abb. 51. Dargestellt sind die Szenario-Verteilungen der vertikalen Resultierenden für die drei Galerieabschnitte im Vergleich mit der vertikalen Resultierenden, die aus den Schneehöhenmessungen berechnet werden kann. Der Vergleich lässt die folgenden qualitativen Schlussfolgerungen zu:

- Im Lawinenzug I1 liegen beide Messungen höchstens (mit geringer Wahrscheinlichkeit) im Bereich des 30-jährigen Ereignisses, eher darunter.
- Im Lawinenzug I2 entspricht die Messung von 2018 auch höchstens dem 30-jährigen Ereignis. Die Messung von 1951 führt zu höheren Werten und wird z.B. nur von etwas mehr als der Hälfte der Simulationen für das 100-jährige Ereignis überschritten.
- Im Lawinenzug I3 entsprechen beide Messungen einem «mittleren Wert» der Verteilung für das 100-jährige Ereignis (die Messung von 1951 liegt etwas über, die von 2018 etwas unter dem Medianwert)

Die «Wiederkehrperiode» der beiden Messwerte ergibt sich aus dem Vergleich der beiden Messungen mit der Extremwertverteilung für das jährlichen Maximum, siehe Abb. 53 für einen Vergleich zwischen dem Modell und der Messung. Die Wiederkehrperiode der Messungen berechnet sich als Kehrwert der jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit gemäss Modell. Für die Messung von 2018 ergeben sich in den drei Lawinenzügen I1, I2 und I3 Wiederkehrperioden von 8, 17 und 58 Jahren, für die Messung von 1951 Wiederkehrperioden von 10, 59 und 106 Jahren.

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass die berechneten Wiederkehrperioden auf einem Modell basieren und somit nicht unbedingt der Realität

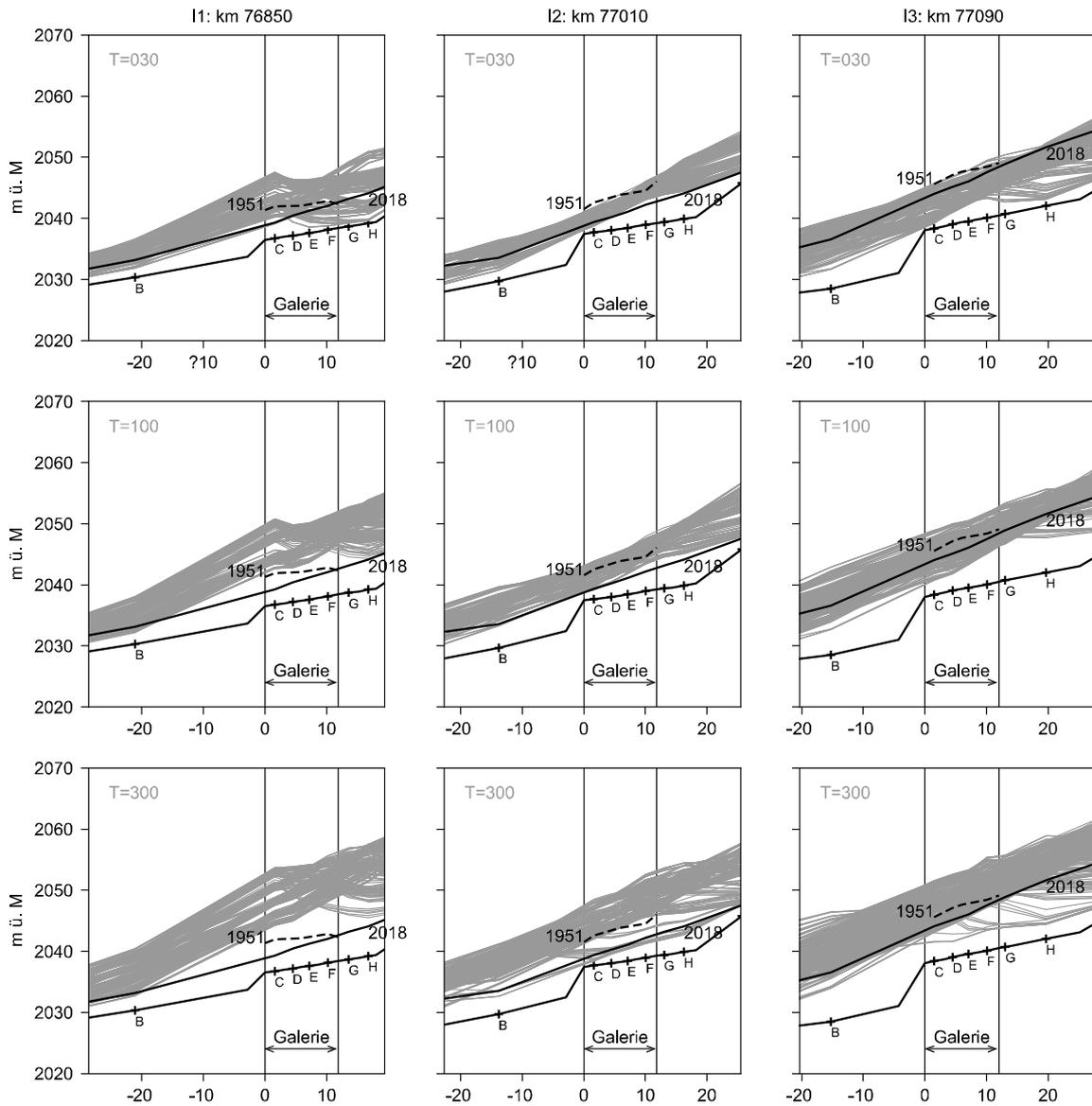
entsprechen. Glaubt man dem Modell, sind z.B. die vergleichsweise niedrigen Wiederkehrperioden im Lawinenzug I1 so zu verstehen, dass die beiden Winter in diesem Lawinenzug dort nicht zu Extremereignissen in Bezug auf die Lawinenablagerungen geführt haben. In Anbetracht der Schätzunsicherheit könnten die Ergebnisse aber auch so verstanden werden, dass das Modell die Lawineneinwirkungen im Lawinenzug I1 eher überschätzt.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Extremereignis in den 60 Jahren zwischen 1950 und 2020 mindestens ein- bzw. zweimal erreicht oder überschritten wird, ist eine Funktion der Wiederkehrperiode und beträgt:

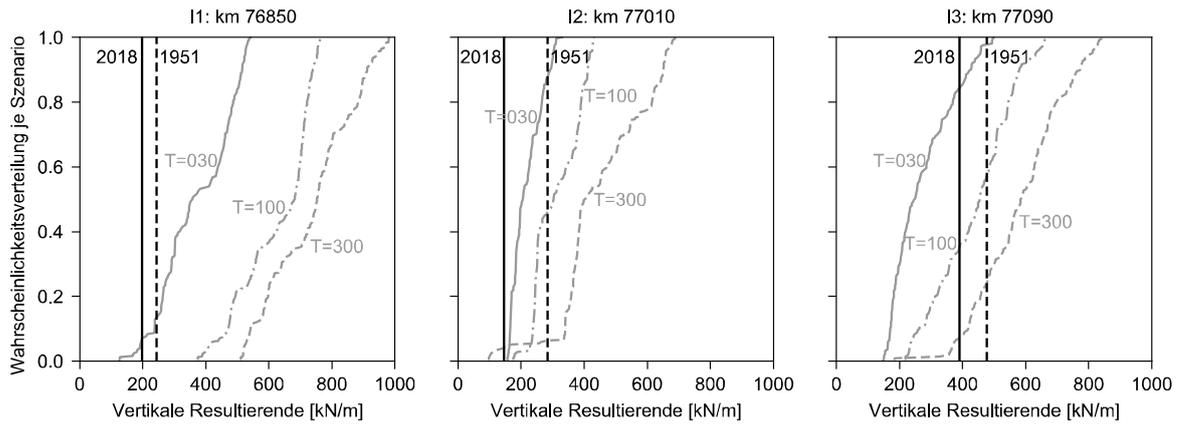
- 99.8% (1x) bzw. 98.6% (2x) für das 10-jährige Ereignis
- 86.9% (1x) bzw. 59.9% (2x) für das 30-jährige Ereignis
- 70.2% (1x) bzw. 33.8% (2x) für das 50-jährige Ereignis
- 45.3% (1x) bzw. 12.1% (2x) für das 100-jährige Ereignis
- 18.1% (1x) bzw. 1.7% (2x) für das 300-jährige Ereignis

Betrachtet man diese Wahrscheinlichkeiten, eine bestimmte Beobachtung zu machen, so ist die Vermutung naheliegend, dass die Modellierung mindestens für den Lawinenzug I1 tatsächlich konservativ ist und die realen Einwirkungen überschätzt. Bei den anderen Lawinenzügen ist die Beurteilung weniger eindeutig.

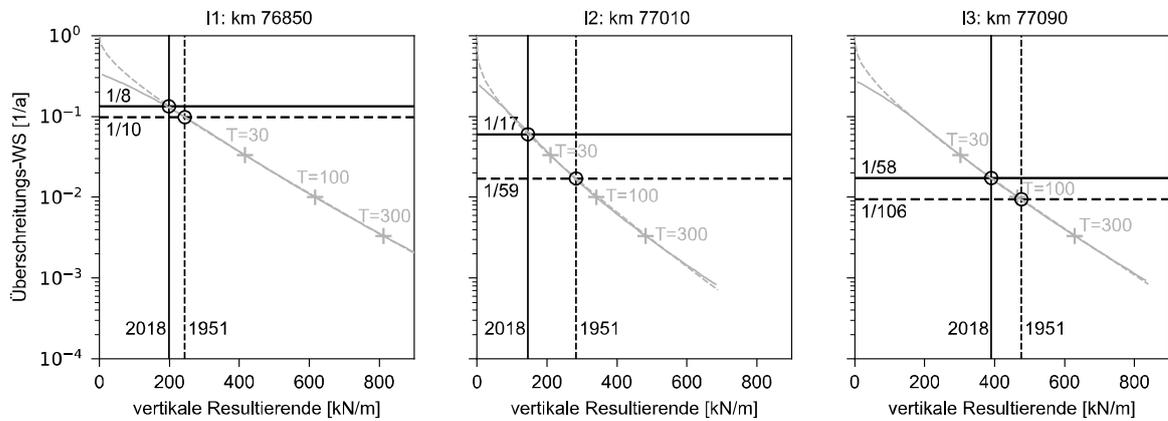
1951 und 2018 wurden Messkampagnen durchgeführt, weil die Ablagerungshöhen über die gesamte Galerie gesehen als aussergewöhnlich beurteilt wurden. Dies schliesst nicht aus, dass in anderen Jahren die Ablagerungen in I1 lokal wesentlich höher waren als in diesen Jahren.



**Abb. 51** Vergleich der Simulationen (grau) für das 30-, 100- und 300-jährige Ereignis der Lawinenablagerung am Oberalppass (Fall 4) mit den Schneehöhen-Messungen aus den Jahren 1951 und 2018 (schwarz). Die Punkte B bis H zeigen die Hangeometrie ohne Schnee.



**Abb. 52** Vergleich der modellierten Szenario-Verteilungen für die vertikale Resultierende durch Lawinenablagerungen auf der Galerie am Oberalppass im Fall 4 (grau) mit den aus den Schneehöhen-Messungen von 1951 und 2018 berechneten Resultierenden (schwarz).



**Abb. 53** Vergleich des Modells für die Extremwertverteilung der vertikalen Resultierenden durch Lawinenablagerungen auf der Galerie am Oberalppass im Fall 4 (grau) mit den Schneehöhen-Messungen aus den Jahren 1951 und 2018 (schwarz).

## 5 Berücksichtigung von Daten zu beobachteten Lawineneinwirkungen

Für die Überprüfung bestehender Bauten erlaubt die SIA 269 [10], die Lawineneinwirkung standortspezifisch festzulegen und die Bemessungswerte an die beiden folgenden Überlegungen anzupassen:

- Aufgrund der tendenziell höheren Kosten einer Verstärkung bestehender Galerien im Vergleich zu einer «stärkeren» Bemessung des Tragwerks bei einem Galeriereubau kann in Abhängigkeit der Konsequenzen eines Tragwerksversagens ggf. ein niedrigeres Sicherheitsniveau akzeptiert werden.
- Wenn zum bestehenden Tragwerk oder den im Laufe der Standzeit beobachteten Lawineneinwirkungen zusätzliche Daten oder Informationen zur Verfügung stehen, dürfen diese für eine Aktualisierung des Tragwerkswiderstandes oder der Einwirkungen verwendet werden.

Der erste Punkt wurde bereits in Kapitel 2.2 bei der Festlegung der Ziel-Zuverlässigkeiten diskutiert, siehe z.B. Tab. 2 in Kapitel 2.2.1.

Im vorliegenden Kapitel liegt der Fokus auf dem zweiten Punkt, also auf der Aktualisierung der Lawineneinwirkungen mit Daten zu beobachteten Ereignissen. Diese ist grundsätzlich nicht nur bei bestehenden Galeriebauwerken zulässig und sinnvoll, sondern kann auch für Galeriereubauten zur Anwendung kommen. Die Voraussetzung ist allerdings in beiden Fällen, dass Informationen zu vergangenen Lawinenabgängen oder -Ablagerungen im Untersuchungsgebiet vorliegen. Da vor allem die Lawinenablagerungen durch die Hanggeometrie im Bereich des Galeriedachs beeinflusst werden können, die durch den Bau einer Galerie verändert wird, ist die Datensammlung hier vor allem für bestehende Galerien realistisch.

### 5.1 Ansätze zur Berücksichtigung von Daten

Die Bestimmung von Lawineneinwirkungen auf bestehenden Galerien kann verbessert werden, wenn Aufzeichnungen über frühere Lawinenabgänge zur Verfügung stehen. Zu deren Berücksichtigung bei der Festlegung von Lawineneinwirkungen gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Ansätze:

- Implizite Berücksichtigung im Rahmen der gutachterlichen Festlegung
- Explizite Berücksichtigung durch Aktualisierung von Lawineneinwirkungen

Bei der impliziten Berücksichtigung stehen in der Regel Angaben zu den maximalen Lawineneinwirkungen im Beobachtungszeitraum im Vordergrund. Die Abschätzung der Einwirkungen wird hierdurch verbessert, es ist jedoch unklar, in welchem Masse die Unsicherheiten reduziert werden und wie dies im Rahmen des Bemessungskonzeptes berücksichtigt werden kann.

Eine explizite quantitative Ermittlung des Einflusses kann durch eine Aktualisierung der Lawineneinwirkungen mit den Methoden der Bayes'schen Wahrscheinlichkeitsrechnung erreicht werden. Dabei werden die Wahrscheinlichkeitsverteilung aus der Expertenschätzung und die neuen Daten zu den Lawinenabgängen zu einer neuen Wahrscheinlichkeitsverteilung kombiniert. Die Aktualisierung der ruhenden Lawineneinwirkungen ist vergleichsweise einfach, da hier das probabilistische Modell

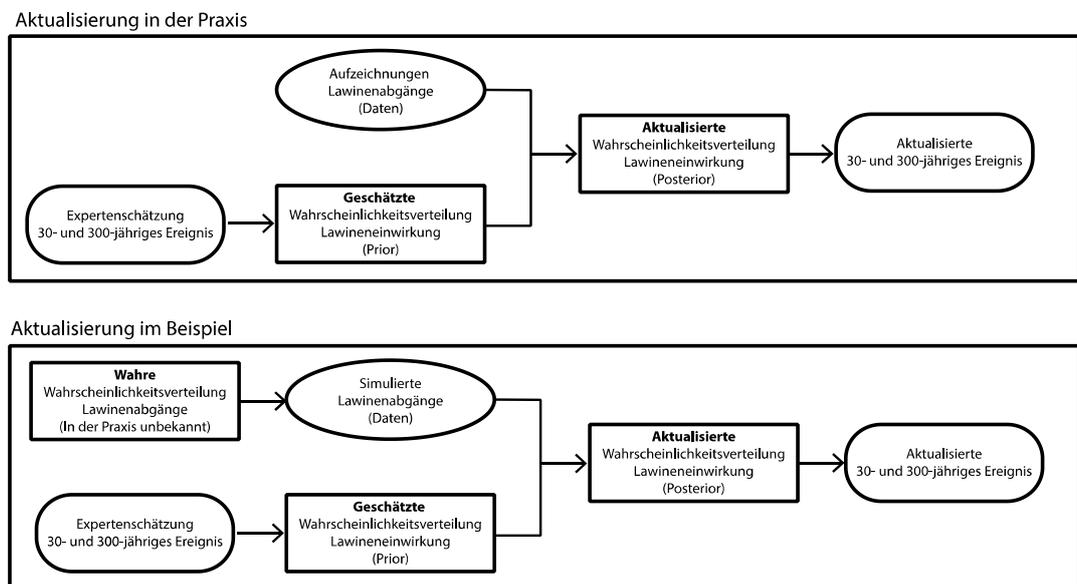
direkt mit Beobachtungen zu den Ablagerungshöhen aktualisiert werden kann. Im Gegensatz hierzu hängen die dynamischen Einwirkungen von zwei Variablen ab (Fließhöhe und Geschwindigkeit der Lawine), die nicht direkt im Feld beobachtet, sondern lediglich aus den Angaben im Lawinenkataster und mit lawinedynamischen Berechnungen bestimmt werden können. Diese Abschätzungen sind mit Unsicherheiten verbunden, die in der Aktualisierung der Einwirkungen berücksichtigt werden müssen.

Im Folgenden wird lediglich die Aktualisierung anhand von ruhenden Lawineneinwirkungen beschrieben. Somit ist im Rest des Kapitels die Lawineneinwirkung gleichbedeutend bzw. direkt korreliert mit der Schneehöhe, die im Feld direkt gemessen werden kann (siehe z.B. Kapitel 3.3.2).

Das Vorgehen zur Aktualisierung wird mit Hilfe einer Beispielrechnung illustriert. Das Beispiel dient als Grundlage für eine Parameterstudie, auf deren Basis das Potential der Aktualisierung von Lawineneinwirkungen mit Daten zu beobachteten Lawinen abgeschätzt werden kann.

## 5.2 Beispiel Aktualisierung der Lawineneinwirkung

Das Ziel der Aktualisierung ist es, eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lawineneinwirkung zu berechnen, die sowohl die Expertenschätzung als auch Daten aus beobachteten Lawinenabgängen berücksichtigt. Aus der aktualisierten Wahrscheinlichkeitsverteilung können verbesserte Schätzungen der 30-jährige und 300-jährige Ereignisse abgelesen werden. In Abb. 54 ist das Aktualisierungsvorgehen schematisch dargestellt. Die Aktualisierung in der nachfolgenden Beispielrechnung und in der Praxis unterscheiden sich in einigen Aspekten, was ebenfalls dargestellt ist.



**Abb. 54** Aktualisierung in der Praxis und in der Beispielrechnung.

Der Aufbau der Beispielrechnung wird nachfolgend beschrieben. Die Aktualisierung erfolgt mit den Methoden des Bayes'sches Updating.

Vor der Aktualisierung muss eine Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lawineneinwirkungen vorhanden sein. Dies ist die so genannte Prior Verteilung, sie kann aus der Expertenschätzung bei Bau oder Instandsetzung der Galerie abgeleitet werden (siehe z.B. Kapitel 4 zur probabilistischen Modellierung von Lawineneinwirkungen).

Die Aktualisierung wird mit Daten zu den jährlichen maximalen Schneeablagerungen durchgeführt. In der Praxis werden diese Daten auf der Galerie erhoben. In der Beispielrechnung wird als Datenquelle eine «Wahre» Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lawineneinwirkung postuliert, und Daten der Lawinenabgänge daraus simuliert. Als Ergebnis der Beispielrechnung werden die aktualisierte Schneehöhe des 30- und 300-jährigen Ereignisses ermittelt. Sie werden den ursprünglichen Schneehöhen gegenübergestellt, womit der Einfluss der Aktualisierung festgestellt werden kann.

In der Praxis ist die Datensammlung mit Aufwand verbunden: es ist nicht realistisch, dass sämtliche jährlichen Maxima der Schneehöhe für sämtliche Lawinengalerien gemessen werden können. Um den Aufwand zu reduzieren, werden nur grosse jährliche maximale Schneehöhen gemessen, siehe z.B. Kapitel 3.3.2 für die Galerie am Oberalppass. Dies ist gerechtfertigt, denn kleine jährliche Maxima enthalten sehr wenig Information über das 30-jährige und 300-jährige Ereignis und haben keinen Einfluss auf die Galeriebemessung. Für die Aktualisierung wird eine Minimalschneehöhe (*censoring Points*  $x_{cens}$ ) festgelegt, unterhalb derer die maximale jährliche Schneehöhe in der Aktualisierung nicht explizit berücksichtigt wird, sondern nur, dass die Schneehöhe unterhalb des *censoring Points* lag. Die Daten zur Aktualisierung werden somit gefiltert und wie folgt berücksichtigt:

- die jährlichen maximalen Schneehöhen  $x > x_{cens}$  werden in der Aktualisierung explizit als Datenpunkt berücksichtigt.
- Die jährlichen maximalen Schneehöhen  $x < x_{cens}$  werden nicht explizit berücksichtigt. Es wird nur berücksichtigt, dass die Schneehöhe unterhalb dem *censoring Point* lag.

In der Realität ist der Einfluss der Aktualisierung schwer im Voraus abzuschätzen, weil die maximale jährliche Schneehöhe naturgemäss stark variieren kann. Insbesondere bei relativ kurzen Beobachtungszeiträumen ( $N < 30$  Jahren,  $N$  ist die Beobachtungsdauer) ist die Varianz in den statistischen Kenngrössen der Daten gross, was sich auf die aktualisierten Schneehöhen niederschlägt. Um dies zu berücksichtigen wird die Beispielrechnung in eine Monte Carlo Simulation eingebettet: in jeder Monte Carlo Realisation werden die maximalen jährlichen Schneehöhen neu simuliert und eine Aktualisierung durchgeführt. Es lässt sich so einen Erwartungswert der aktualisierten 30-jährigen und 300-jährigen Ereignisse ermitteln.

Die Parametrisierung der Beispielrechnung wird nachfolgend beschrieben.

## 5.2.1 Parametrisierung

Die Input-Parameter für das Aktualisierungsmodell sind nachfolgend beschrieben:

### *Expertenschätzung und geschätzte Wahrscheinlichkeitsverteilung*

- Expertenschätzung von der 30-jährigen Schneehöhe  $x_{30}$
- Expertenschätzung von der 300-jährigen Schneehöhe  $x_{300}$

Mit der Expertenschätzung wird mit dem Vorgehen gemäss Kapitel 4.1 die geschätzte Wahrscheinlichkeitsverteilung  $F'_x(x)$  ermittelt. Für die Auswertung der Aktualisierung spielen die eigentliche Werte von  $x_{30}$  und  $x_{300}$  keine Rolle, sondern ihr Verhältnis, das als Mass für die Varianz der Verteilung verstanden werden kann: je grösser  $x_{300}/x_{30}$  desto grösser die Varianz der Verteilung. In der Beispielaktualisierung werden die Verhältnisse  $x_{300}/x_{30} = 2$  und  $x_{300}/x_{30} = 4$  betrachtet; dies entspricht einer Situation mit vergleichsweise geringer bzw. hoher Variation der Lawineneinwirkung.

Um die Aktualisierung mit Methoden des Bayes'schen Updating anzuwenden, muss zusätzlich zu der aleatorischen Unsicherheit der Lawineneinwirkung (ausgedrückt durch das Verhältnis  $x_{300}/x_{30}$ ) auch die Schätzunsicherheit bei der Bestimmung des 30-jährigen bzw. 300-jährigen Ereignisses explizit modelliert werden. Für das vorliegende Kapitel wurde hierfür der in [30] beschriebene Ansatz verwendet, der konzeptionell etwas von dem Vorgehen in Kapitel 4 abweicht. Für die Anwendung des Bayes'schen Updating spielt dies

keine Rolle; in beiden Fällen ist der Prior einfach eine Gumbelverteilung mit unsicheren Verteilungsparametern.

#### Wahre Wahrscheinlichkeitsverteilung

Die wahre Wahrscheinlichkeitsverteilung der Schneehöhen ist in Wirklichkeit unbekannt, muss zur Durchführung der Beispielaktualisierung aber angenommen bzw. postuliert werden. Sie wird in Bezug zur geschätzten Wahrscheinlichkeitsverteilung wie folgt definiert:  $x_{30,wahr} = c \cdot x_{30}$  und  $x_{300,wahr} = c \cdot x_{300}$ . Der Parameter  $c$  steuert das Verhältnis zwischen wahrer und geschätzter Wahrscheinlichkeitsverteilung:

- bei  $c < 1$  sind die geschätzten Schneehöhen grösser als die wahren, die Expertenschätzung ist also konservativ,
- bei  $c > 1$  sind die geschätzten Schneehöhen kleiner als die wahren, die Expertenschätzung somit optimistisch.

Ausgehend von  $x_{30,wahr}$  und  $x_{300,wahr}$  wird die wahre Wahrscheinlichkeitsverteilung  $F_{X,wahr}(x)$  als Gumbelverteilung geschätzt. In der Beispielrechnung wird der Bereich  $c = 0.5$  (konservativ) bis  $c = 2$  (optimistisch) betrachtet.

#### Censoring point $x_{cens}$

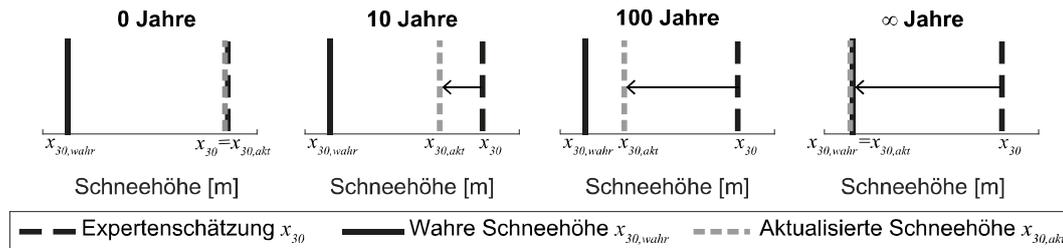
Die minimale jährliche Schneehöhe  $x_{cens}$  (*censoring Point*) die in der Aktualisierung berücksichtigt wird, ist als Quantilwert der geschätzten Wahrscheinlichkeitsverteilung festgelegt:  $x_{cens} = F_X^{-1}(q_{cens})$ . In der Beispielrechnung werden  $q_{cens} = 0.95$  und  $q_{cens} = 0.966$  betrachtet (entsprechen einem 20-jährigen, respektive einem 30-jährigen Ereignis). Zur Erinnerung: Liegt ein jährliches Maximum im Beispiel über dem *censoring Point*, wird es explizit als Datenpunkt berücksichtigt, liegt es dagegen unterhalb des *censoring Point*, wird nur berücksichtigt, dass es unterhalb lag, die eigentliche Schneehöhe aber nicht.

#### Beobachtungsdauer

Die Beobachtungsdauer  $N$  in Jahren gibt an, wie viele Beobachtungen für die Aktualisierung zur Verfügung stehen. In der Beispielrechnung wird  $N = 5$ ,  $N = 20$  und  $N = 100$  betrachtet. Zur Klarstellung: Da ein Teil der Beobachtungen  $x$  nicht berücksichtigt werden, weil sie unter dem *censoring Point* liegen ( $x < x_{cens}$ ), wird die Aktualisierung jeweils mit einer deutlich kleineren Anzahl Datenpunkte durchgeführt; für die übrigen Datenpunkte wird lediglich angegeben, in wie vielen Jahren der *censoring Point* nicht überschritten wurde.

## 5.3 Erwartete Ergebnisse

Zunächst wird das erwartete Ergebnis beschrieben. In Abb. 55 ist beispielhaft die Aktualisierung der Expertenschätzung über vier unterschiedliche Dauern dargestellt (0, 10, 100 und unendliche Jahre) für den Fall, dass  $x_{30,wahr} < x_{30}$  (konservative Expertenschätzung). Bei einer Beobachtungsdauer von 0 Jahren ist die aktualisierte Schneehöhe gleich der Expertenschätzung; mit zunehmender Aktualisierungsdauer verschiebt sich die aktualisierte Schneehöhe zunehmend in Richtung der wahren Schneehöhe. Bei sehr langer Aktualisierungsdauer ist die aktualisierte Schneehöhe im Erwartungswert gleich der wahren Schneehöhe und die konservative Expertenschätzung hat auf das Ergebnis keinen Einfluss mehr.



**Abb. 55** Erwartetes Ergebnis einer Aktualisierung für  $x_{30}$  bei  $x_{30,wahr} < x_{30}$  (konservative Expertenschätzung).

Für  $x_{30,wahr} > x_{30}$  (optimistische Expertenschätzung) ist das erwartete Ergebnis spiegelverkehrt. Bei  $x_{300}$  wird erwartet, dass die Aktualisierung derselben Logik folgt, aber «langsamer» ist als bei  $x_{30}$ , das heißt, dass eine längere Beobachtungsdauer notwendig ist, bis sich die aktualisierte Schneehöhe von  $x_{300}$  zu  $x_{300,wahr}$  bewegt.

## 5.4 Ergebnisse

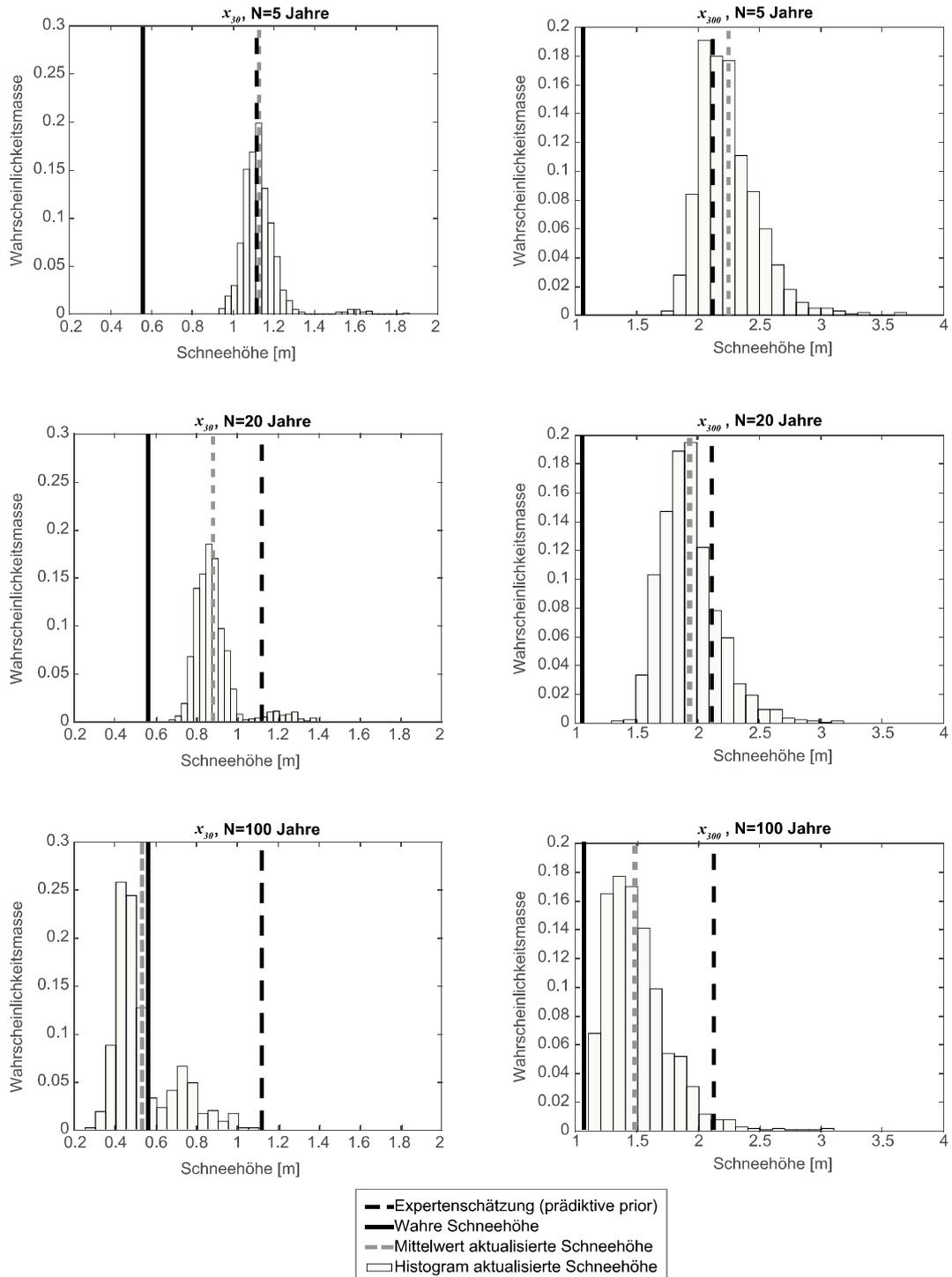
Zuerst werden die detaillierten Resultate für eine Parametrisierung beschrieben um den Einfluss der Aktualisierung besser zu verstehen und mit der Erwartung aus Kapitel 5.3 zu vergleichen. Danach werden in Kapitel 5.4.2 Ergebnisse für weitere Parametrisierungen angegeben.

### 5.4.1 Detaillierte Ergebnisse für den Fall einer konservativen Schätzung

Nachfolgend werden detaillierte Ergebnisse für folgende Parametrisierung dargestellt und beschrieben:

- $x_{300}/x_{30} = 2$ , d.h. Lawineneinwirkung mit (vergleichsweise) geringer Streuung
- $c = x_{30,wahr}/x_{30} = 0.5$ , d.h. konservative Expertenschätzung als Prior Verteilung
- $N = 5, 20, 100$  Jahre, für die Beobachtungen vorliegen
- $q_{cens} = 0.966$ , d.h. der *censoring Point*  $x_{cens}$  entspricht dem 30-jährigen Ereignis

In der folgenden Abbildung sind sechs Diagramme für diese Parametrisierung dargestellt. Die Diagramme unterscheiden sich in der Anzahl Jahre  $N$ , die zur Aktualisierung berücksichtigt sind, und in der Jährlichkeit der betrachteten Schneehöhe ( $x_{30}$ ,  $x_{300}$ ).



**Abb. 56** Ergebnisse der Aktualisierung für  $x_{30}$  (links) und  $x_{300}$  (rechts), ausgehend von einer konservativen Expertenschätzung, die mit Daten aus drei unterschiedliche Beobachtungsdauern aktualisiert wird ( $N=5$ ,  $N=20$  und  $N=100$  Jahre).

Abb. 56 folgt grundsätzlich der gleichen Darstellung wie in Abb. 55. Für die aktualisierte Schneehöhe wird sowohl das Histogramm der aktualisierten Schneehöhen in den Monte Carlo Realisationen dargestellt, wie auch deren Mittelwert. Das Histogramm ist hierbei so zu verstehen, dass je nachdem, wie die (zufälligen) Beobachtungen ausfallen, das Ergebnis der Aktualisierung höher oder tiefer ausfallen kann als der Mittelwert aller Monte Carlo Simulationen. So kann zum Beispiel der Konservatismus in einer Schätzung für das 30-jährige Ereignis sogar noch verstärkt werden, wenn innerhalb eines kurzen Zeitraums von 5 Jahren zufällig ein grosses Ereignis beobachtet wurde.

Die Ergebnisse in Abb. 56 entsprechen allgemein den Erwartungen, die in Kapitel 5.3 dargelegt sind: mit zunehmender Aktualisierungsdauer verschiebt sich die aktualisierte Schneehöhe von der Expertenschätzung zur wahren Schneehöhe und die Verschiebung ist beim 30-jährigen Ereignis schneller als bei 300-jährigen Ereignis. Es werden zwei weitere Beobachtungen gemacht:

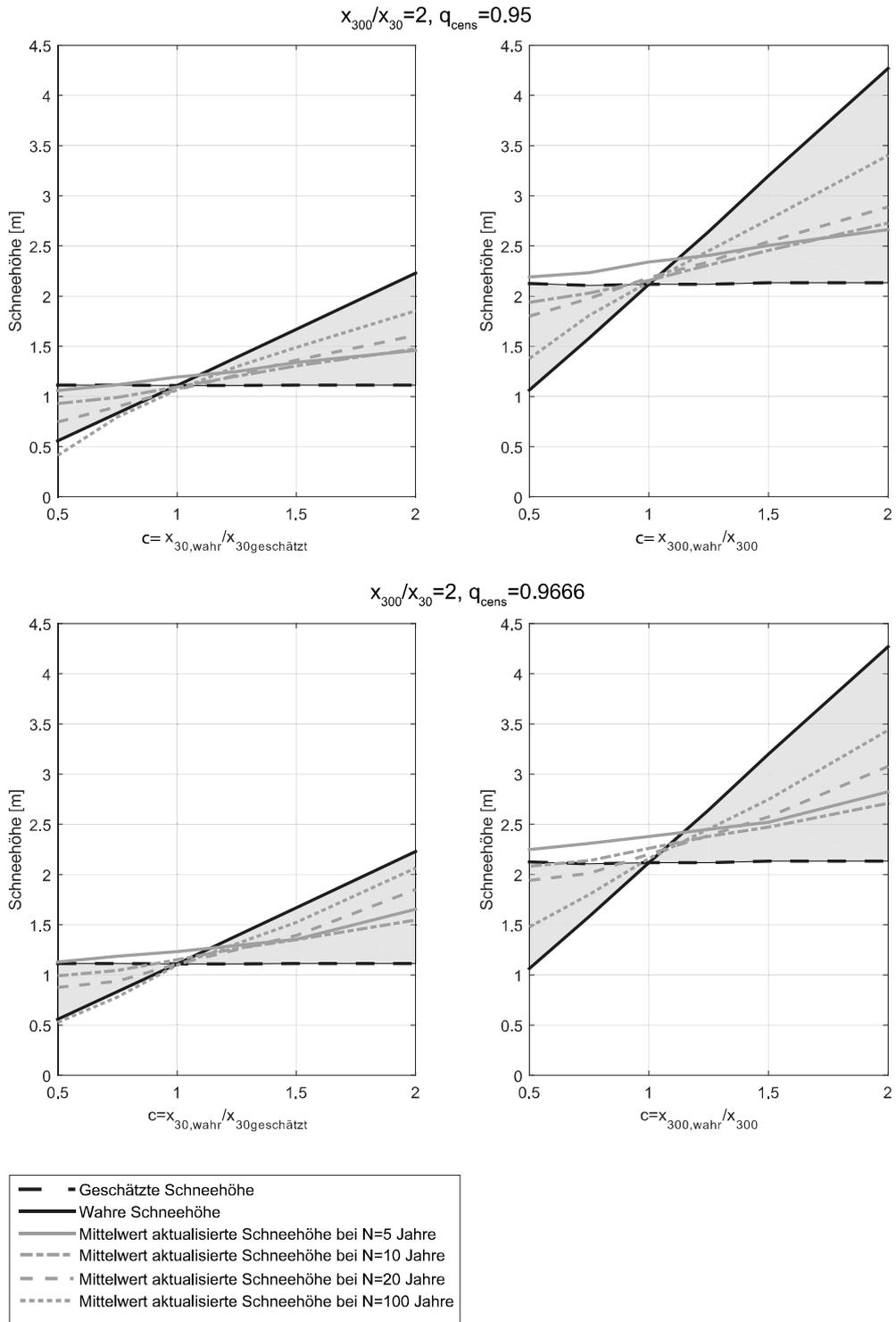
- Die Streuung der aktualisierten Schneehöhen ist jeweils relativ gross. Dies ist insbesondere bei kleinen Beobachtungsdauern  $N$  zu erwarten.
- Die aktualisierte Schneehöhe schießt zum Teil «über das Ziel hinaus», das heisst, sie liegt nicht mehr zwischen der Expertenschätzung der Schneehöhe und der wahren Schneehöhe, wie das theoretisch sein sollte. Dafür gibt es zwei Gründe:
  - **Grund 1:** Monte Carlo Simulationen basieren auf numerischen Methoden, bei der es zu geringfügigen Abweichungen in den Ergebnissen kommen kann.
  - **Grund 2:** Die Aktualisierung wirkt sich unterschiedlich (schnell) auf den mittleren Teil der Verteilung und auf den oberen Schwanzbereich aus. Bei kleinen Beobachtungsdauern  $N$  wird die Aktualisierung von charakteristischen Werten im Schwanzbereich durch die bereits früher erreichten Anpassungen im mittleren Teil der Verteilung «gestört».

Der zweite Grund kann folgendermassen erläutert werden: Bei kleinen Beobachtungsdauern  $N$  enthalten die Daten vor allem Information über den mittleren Teil der Verteilung, deshalb wird sich dieser Bereich entsprechend den Erwartungen von der Prior-Verteilung zur wahren Wahrscheinlichkeitsverteilung verschieben. Doch wie entwickeln sich der obere Schwanzbereich der Verteilung, der hier von Interesse ist? Bei kleinen Beobachtungsdauern  $N$  ist so gut wie keine Information zum Schwanz der Verteilung vorhanden, es wäre deshalb zu erwarten, dass sich der obere Verteilungsteil nicht gross verändert und die Schätzung für  $x_{30}$  und insbesondere für  $x_{300}$  konstant bleibt. Entgegen der Erwartung kann es aber dennoch zu Verschiebungen kommen, weil der Schwanz der Verteilung und ihr mittlerer Teil mit denselben Verteilungsparametern «modelliert» wird. Der obere Schwanz muss sich bei der Aktualisierung den Veränderungen im mittleren Teil «fügen», um der mathematischen Formulierungen der Wahrscheinlichkeitsverteilung zu genügen. Die daraus resultierenden Verschiebungen können entgegen der Erwartung sein. Mit zunehmender Beobachtungsdauer  $N$  ist in den Daten aber zunehmend auch Information zum oberen Schwanz der Verteilung vorhanden, und die aktualisierte Verteilung wird sich auf der ganzen Länge entsprechend den Erwartungen verhalten.

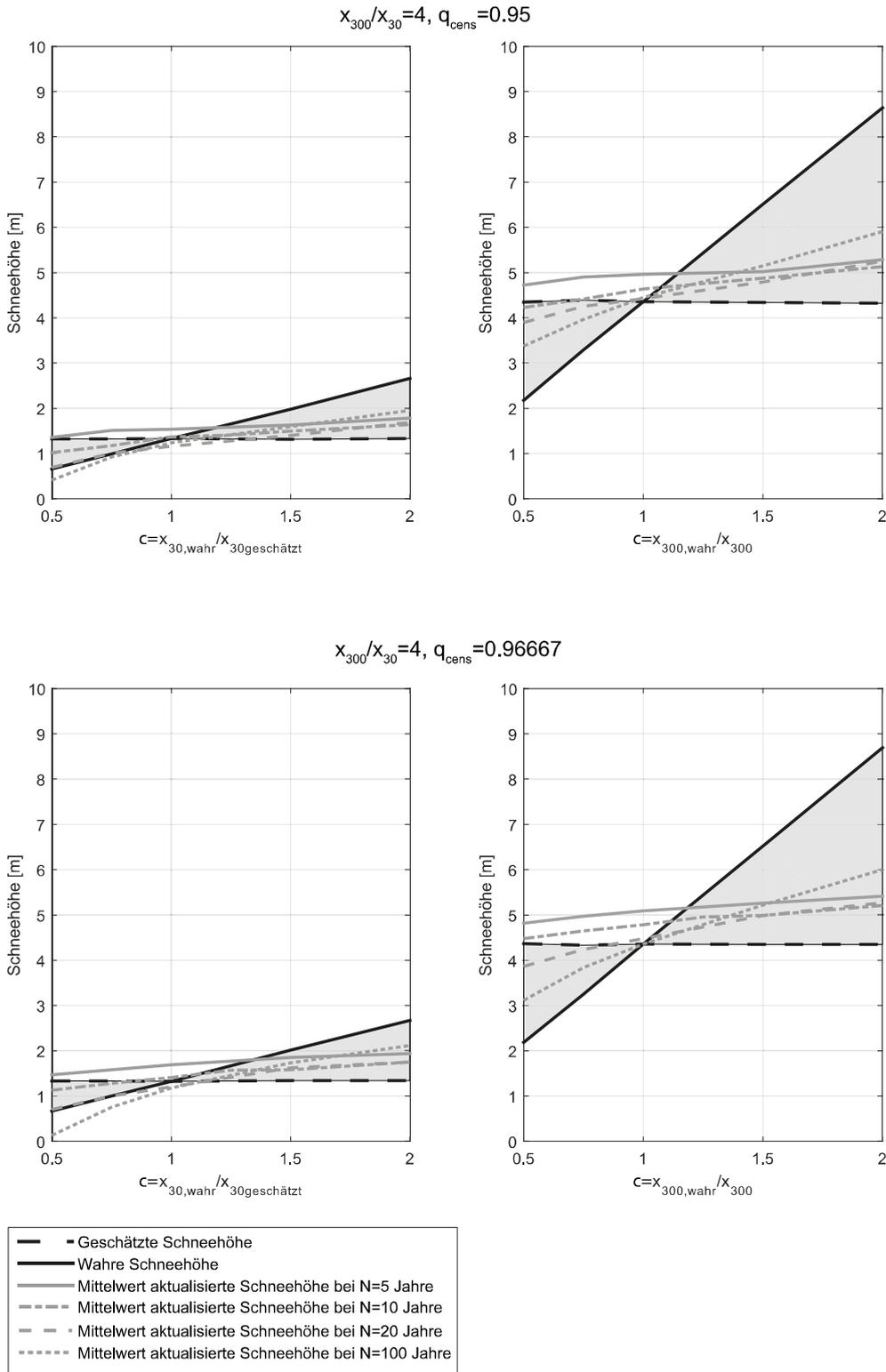
#### 5.4.2 Ergebnisse für weitere Parametrisierungen

Nachfolgend werden die Ergebnisse für weitere Parametrisierungen dargestellt. Dafür wird eine kompaktere Darstellung gewählt: in einem Diagramm sind  $x_{300}/x_{30}$  und  $q_{cens}$  (also jene Parameter die in einer praktischen Situation bekannt sein können) konstant gehalten, während der Wert von  $c = x_{30,wahr}/x_{30}$  variiert wird und auf der X-Achse aufgetragen ist. Die X-Achse gibt somit an, ob die Expertenschätzung eher konservativ ( $c < 1$ ), realistisch ( $c \approx 1$ ) oder optimistisch ( $c > 1$ ) ist, was in einer praktischen Situation nicht bekannt ist. Die Beobachtungsdauer  $N$  dient als Schar-Parameter.

Auf der Y-Achse ist die Schneehöhe dargestellt. In den Grafiken sind jeweils die Expertenschätzung  $x_{30}$  resp.  $x_{300}$  und die wahren Werte  $x_{30,wahr}$  resp.  $x_{300,wahr}$  der Schneehöhe dargestellt, sowie der Erwartungswert der aktualisierten Schneehöhe.



**Abb. 57.** Ergebnisse der Parameterstudie zur Aktualisierung des 30-jährigen Ereignisses (links) und des 300-jährigen Ereignisses (rechts) für  $x_{300}/x_{30}=2$  (eher geringe Streuung der Lawineneinwirkung) und explizite Betrachtung von Datenpunkten, die das 20-jährige (oben) bzw. 30-jährige (unten) Ereignis überschreiten.



**Abb. 58.** Ergebnisse der Parameterstudie zur Aktualisierung des 30-jährigen Ereignisses (links) und des 300-jährigen Ereignisses (rechts) für  $x_{300}/x_{30}=4$  (eher hohe Streuung der Lawineneinwirkung) und explizite Betrachtung von Datenpunkten, die das 20-jährige (oben) bzw. 30-jährige (unten) Ereignis überschreiten

Die gestrichelte schwarze Linie in Abb. 57 und Abb. 58 entspricht der Expertenschätzung der Schneehöhe (Prior), die ausgezogene schwarze Linie der «wahren» Schneehöhe im 30-jährigen bzw. 300-jährigen Ereignis. Die graue Fläche dazwischen ist der Bereich, in dem die aktualisierten Schneehöhen erwartungsgemäss liegen sollten. Die drei grauen

Linien entsprechen den aktualisierten Schneehöhen für unterschiedliche Beobachtungsdauern.

Bevor auf die Abbildungen eingegangen wird, wird das erwartete Ergebnis beschrieben. Es wird erwartet, dass:

- die aktualisierten Schneehöhen (graue Linien) jeweils im grauen Bereich liegen
- mit zunehmender Beobachtungsdauer  $N$  sich die aktualisierte Schneehöhe weg von der geschätzten Schneehöhe (gestrichelte schwarze Linie) hin zur wahren Schneehöhe (ausgezogene schwarze Linie) verschiebt
- der Einfluss der Aktualisierung mit zunehmendem  $N$  und bei extremen Werten von  $c$  (starke Über- bzw. Unterschätzung der Schneehöhen durch den Experten) zunimmt.

Die Erwartungen sind im Großen und Ganzen erfüllt. Es sind aber auch einigen Abweichungen von den oben beschriebenen Erwartungen zu beobachten:

- Die aktualisierte Schneehöhe bei  $N = 5$  scheinen in allen Fällen zu gross sein. Dies ist insbesondere bei  $c = 1$  (realistische Expertenschätzung) gut zu beschreiben: hier sind die geschätzte und wahre Schneehöhe gleich gross, und die Aktualisierung sollte keinen Einfluss haben. Das bedeutet, dass alle Linien durch denselben Punkt führen sollten, was für die aktualisierte Schneehöhe mit  $N = 5$  (und zum Teil auch für längere Beobachtungsdauern) nicht der Fall ist. Diese Abweichung wird mit «Grund 2» aus Kapitel 5.4.1 begründet, also mit der eher langsamen Anpassung des oberen Schwanzbereichs im Vergleich zum mittleren Teil der Verteilung.
- Die aktualisierten Schneehöhen bei  $c < 1$  und  $N = 100$  liegen zum Teil ausserhalb des grauen Bereiches. Dies ist mit «Grund 1» aus Kapitel 5.4.1 begründet, ergibt sich also aus der numerischen Unsicherheit in den Monte Carlo Simulationen.

Der Einfluss der Quantilwerte für die Zensurierung  $q_{cens}$  auf die Aktualisierung ist im betrachteten Bereich klein, d.h. es spielt keine grosse Rolle, ob Messungen erst für Schneehöhen, die das 30-jährige Ereignis ( $q_{cens} = 0.96667$ ) überschreiten, detailliert berücksichtigt werden, oder bereits ab dem 20-jährigen Ereignis ( $q_{cens} = 0.95$ ).

### 5.4.3 Vereinfachung mit bekannter Varianz der Schneehöhenverteilungen

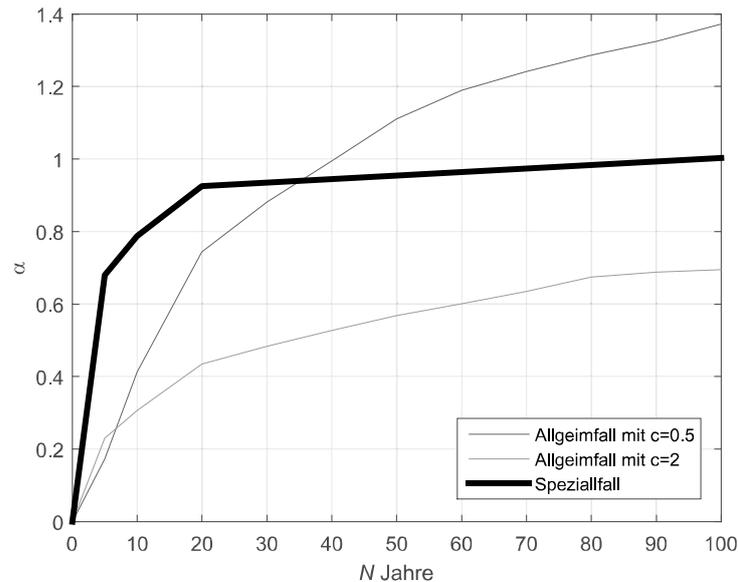
Im vorhergehenden Beispiel unterscheiden sich die wahre Wahrscheinlichkeitsverteilung der Schneehöhe und deren geschätzten Wahrscheinlichkeitsverteilungen in sämtlichen Parametern (oder vereinfacht: sie unterscheiden sich sowohl im Mittelwert wie auch in der Varianz). Weil bei der probabilistischen Modellierung von Lawineneinwirkungen grundsätzlich alle Verteilungsparameter unbekannt bzw. unsicher sind, ist dies der korrekte Ansatz. Rein mathematisch handelt es sich aber um «anspruchsvollste» Aktualisierung, die am langsamsten von der geschätzten auf die wahre Wahrscheinlichkeitsverteilung konvergiert. Bleibt ein Parameter in der Aktualisierung konstant (in der Regel die Varianz oder der Variationskoeffizient), kann die ganze Information aus den Daten verwendet werden, um den Mittelwert zu aktualisieren und die Aktualisierung wird entsprechend schneller.

Im Folgenden wird dieser Spezialfall untersucht und mit dem zuvor diskutierten Allgemeinfeld verglichen. Anders als in Kapitel 5.4.1 und 5.4.2 wird also nun angenommen, dass die wahre und geschätzte Wahrscheinlichkeitsverteilungen dieselbe Varianz aufweisen und sich nur im Mittelwert unterscheiden. Diese Annahme entspricht einer einfachen «Verschiebung» der gesamten Wahrscheinlichkeitsverteilung durch die Aktualisierung. Das Resultat wird nachfolgend dargestellt und kommentiert.

In Abb. 59 wird die Geschwindigkeit der Aktualisierung für den Spezialfall mit konstanter Varianz und für den Allgemeinfall (Aktualisierung beider Parameter) dargestellt. Auf der Y-Achse ist der normierte Wert  $\alpha$  eingetragen, der hier wie folgt definiert ist:

$$\alpha = \frac{x_{30,akt} - x_{30}}{x_{30,wahr} - x_{30}} \quad (4.1)$$

Somit ist zu Beginn der Aktualisierung ist  $\alpha = 0$  weil  $x_{30,akt} = x_{30}$ , und die Aktualisierung ist abgeschlossen wenn  $x_{30,akt} = x_{30,wahr}$  und somit  $\alpha = 1$ .



**Abb. 59.** Wert von  $\alpha$  für den Spezialfall mit konstanter Varianz und für den Allgemeinfall (Aktualisierung von Mittelwert und Varianz) mit  $x_{300} / x_{30} = 2$  und  $c = 0.5$  (Prior konservativ) und  $c = 2$  (prior optimistisch).

Aus der Abbildung können zwei Erkenntnisse gewonnen werden:

- Der Spezialfall mit konstanter Varianz konvergiert viel schneller als die Allgemeinfälle. Bei einer Aktualisierung mit  $N = 20$  Jahren ist bereits  $x_{30,akt} \approx x_{30,wahr}$  und eine längere Datensammlung führt nur noch zu einer geringfügigen Verbesserung der aktualisierten Schätzung für das 30-jährige Ereignis.
- Bei der aktualisierten Schneehöhe im Spezialfall sind die oben beschriebene Probleme des «über das Ziel hinauschiessen» nicht zu beobachten: die aktualisierte Schneehöhe nähert sich asymptotisch der wahren Schneehöhe, wie dies gemäss Kapitel 5.3 zu erwarten ist.

Insgesamt scheint somit das Potential einer Aktualisierung mit Methoden des Bayes'schen Updating viel grösser, wenn nur einen Parameter aktualisiert wird. Wie bereits erwähnt, gibt es jedoch keine Grundlage, um die Varianz oder den Variationskoeffizienten der Lawineneinwirkung einheitlich festzulegen. Insofern kann der mathematisch günstigere Spezialfall mit konstanter Varianz nur genutzt werden, wenn projekt- bzw. standortspezifisch Aussagen zur Varianz der Lawineneinwirkung gemacht werden können

## 5.5 Potential der Aktualisierung von Lawineneinwirkungen

Die Aktualisierung mit Beobachtungen zu realen Lawineneinwirkungen kann helfen, die Einwirkungen besser abzuschätzen. Am einfachsten geht dies bei den Schneehöhen, da diese einfach gemessen werden kann.

Das Potential der Aktualisierung ist im Prinzip gegeben: die Aktualisierung der Lawineneinwirkung erlaubt es zu jedem Zeitpunkt, alle zur Verfügung stehenden Informationen zu berücksichtigen und somit die zu jedem Zeitpunkt beste Schätzung der Lawineneinwirkungen zu erhalten. Je grösser die Abweichung der geschätzten Schneehöhen von den wahren Schneehöhen, desto grösser wird der Einfluss der Aktualisierung und desto schneller wirkt sich die Aktualisierung aus. Wie gross die Auswirkung der Aktualisierung in einer konkreten Situation jeweils sein wird, ist jedoch zufällig und im Voraus nicht bekannt.

Es geht jedoch aus der Beispielrechnung hervor, dass die Aktualisierung bei kurzen Beobachtungsdauern nicht immer stabile Ergebnisse liefert (die Gründe sind im Kapitel 5.4 erläutert). Dies ist insofern unglücklich, da die Aktualisierung eher für kurze Beobachtungsdauern ( $N < 30$  Jahre) interessant ist. Ein stabileres Ergebnis kann erreicht werden, indem nur der Mittelwert der Verteilung aktualisiert wird, dieser Ansatz erfordert jedoch zusätzliche Annahmen zur Varianz der Verteilung.

## 5.6 Empfehlungen zur Aktualisierung und Datensammlung

Eine gezielte Datensammlung und Aktualisierung der Lawineneinwirkung wird für jene Galerien empfohlen, bei denen die Expertenschätzung der Lawineneinwirkung objektiv schwierig und entsprechend mit grossen Unsicherheiten verbunden ist. Zur Aktualisierung sollten  $N > 5$  Beobachtungsjahre zur Verfügung stehen. Bei kleineren Beobachtungszeiträumen sind vor allem die Ergebnisse zur Aktualisierung einer konservativen Expertenschätzung unzuverlässig. Bei längeren Beobachtungszeiträumen reduziert sich das Problem und die aktualisierten Lawineneinwirkungen konvergieren zum wahren 30-jährigen bzw. 300-jährigen Ereignis (beim 30-jährigen Ereignis geschieht dies schneller).

Eine systematische Datensammlung, auch über kürzere Beobachtungszeiträume, wird in jedem Fall empfohlen, um eine zukünftige gutachterliche Festlegung der Lawineneinwirkung abzustützen (impliziter Ansatz zur Berücksichtigung von Daten bzw. Beobachtungen). Eine Aktualisierung mit den Methoden des Bayes'schen Updating (expliziter Ansatz) scheint bei geringen Beobachtungszeiträumen aber wenig Effekt zu haben und ist mit zu grossen Unsicherheiten verbunden.

## 6 Schlussfolgerungen und Bemessungsempfehlungen für Lawinengalerien

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Schlussfolgerungen aus der vorliegenden Untersuchung hinsichtlich der Zuverlässigkeit des bestehenden Bemessungskonzeptes für Lawinengalerien zusammengefasst. Hieraus ergeben sich Empfehlungen für mögliche Anpassungen des Konzeptes und für zukünftige Forschung.

### 6.1 Schlussfolgerungen zum heutigen Bemessungskonzept

In Kapitel 3 wird das rechnerische Sicherheitsniveau von Lawinengalerien nach aktueller Normung bestimmt; eine kurze Zusammenfassung der wesentlichen Schlussfolgerungen findet sich in Kapitel 3.4.1 für die Ergebnisse der allgemeingültigen Parameterstudie und in Kapitel 3.4.2 für die im Rahmen dieser Untersuchung betrachteten Galeriestandorte.

Das Bemessungskonzept für Lawinengalerien basiert grundsätzlich auf den SIA-Normen. Wegen der grossen Bedeutung der stark streuenden Lawineneinwirkung wird die Zuverlässigkeit der Tragwerke aber in erster Linie von den Festlegungen der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] bestimmt, die die Schnittstelle zwischen dem Lawinengutachter und dem bemessenden Ingenieur definiert.

Im Vergleich zu anderen Tragwerken ist auch der Beitrag und die Unsicherheit der ruhenden Einwirkung hoch, da diese bei Lawinengalerien (je nach Geometrie) häufig vor allem von der Erdauflast bestimmt wird. Für die Zuverlässigkeit der Galerietragwerke weniger bedeutend sind die Unsicherheiten auf der Widerstandsseite, evtl. mit Ausnahme von Galerien mit Zugankern, die in der Praxis mit einem entsprechend konservativen Ansatz behandelt werden (siehe Kapitel 2.4.1 für eine kurze Diskussion).

Der Fokus der vorliegenden Untersuchung liegt auf dem Bemessungsansatz zur Festlegung der Lawineneinwirkungen. Im Folgenden wird diskutiert, welche Schlussfolgerungen die Analysen zum bestehenden Sicherheitsniveau zulassen.

#### 6.1.1 Sicherheitsniveau nach aktueller Normung

Für das bestehende Sicherheitsniveau nach aktueller Normung, d.h. vor allem bei Anwendung der bestehenden ASTRA-Richtlinie 12007 [1], lässt die vorliegende Untersuchung die folgenden Schlussfolgerungen zu:

- Die berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten liegen grösstenteils in der Grössenordnung zwischen etwa  $P_f = 10^{-4}$ , also ein Versagen etwa alle 10'000 Jahre, und  $P_f = 10^{-3}$  (ein Versagen etwa alle 1000 Jahre).
- Im Vergleich zum allgemeinen Sicherheitsniveau der SIA-Normen ist das nominelle Sicherheitsniveau von Lawinengalerien somit eher niedrig, gerade in Anbetracht der grossen Streuung der Lawineneinwirkung liegen die Ergebnisse aber durchaus noch im Rahmen der auch für andere Tragwerke üblichen Versagenswahrscheinlichkeiten.
- Eine risikobasierte Optimierung der (Ziel-)Zuverlässigkeit kommt ebenfalls zu dem Schluss, dass für Galerie-Neubauten – je nach erwarteten Konsequenzen im Falle eines Galerieversagens – eine jährliche Versagenswahrscheinlichkeit zwischen  $P_f = 10^{-4}$  (für Standorte mit hohem Verkehrsaufkommen) und  $P_f = 10^{-3}$  (bei niedrigem Verkehrsaufkommen) angemessen ist; siehe Kapitel 2.2.2 für Details.
- Ein Vergleich mit dem beobachteten Sicherheitsniveau der bestehenden Galeriebauwerke in der Schweiz (Kapitel 3.4.3) legt nahe, dass die Ergebnisse der

Zuverlässigkeitsanalysen die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit realer Galeriebauwerke eher überschätzt.

Die oben genannten «globalen» Schlussfolgerungen aus der Analyse des bestehenden Sicherheitsniveaus zeigen keinen offensichtlichen Bedarf an pauschalen Korrekturen am Bemessungskonzept der ASTRA-Richtlinie 12007 [1]. Im Vergleich zu anderen Bemessungssituationen ist das nominelle (d.h. rechnerische) Sicherheitsniveau der Galerietragwerke zwar eher niedrig und im Einzelfall – für Galeriestandorte mit hohen Konsequenzen eines Tragwerksversagens und daraus resultierender optimaler Ziel-Versagenswahrscheinlichkeit von  $10^{-4}$  pro Jahr – kann die Versagenswahrscheinlichkeit auch bis zu einer Grössenordnung niedriger sein als das risikobasierte Optimum.

Dem gegenüber steht allerdings, dass in den betrachteten Fällen 1 bis 4 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] in der Schweiz noch kein Galerietragwerk versagt hat (Ein Versagensereignis in Fall 8 ist in Kapitel 1.1.2 beschrieben). Diese Beobachtung lässt auf das Vorliegen so genannter „hidden safeties“ schliessen. Hierbei handelt es sich um versteckte Sicherheiten, die nicht im Bemessungskonzept der heutigen ASTRA-Richtlinie [1] und ihrer Vorgänger-Richtlinie [2] begründet sind. Mögliche Ursachen für diese «hidden safeties» wurden im Detail in Kapitel 3.4.3 diskutiert; unabhängig von ihrem Ursprung führen sie dazu, dass die realen Tragwerke zuverlässiger sind als in den Berechnungen angenommen.

Eine Reduktion bzw. Kompensation der „hidden safeties“ durch das Sicherheitskonzept und seine Elemente (z.B. Wahl der Fraktilwerte, Sicherheitsbeiwerte) wird generell nicht angestrebt. Falls systematisch konservative Annahmen getroffen werden, z.B. bei der Berechnung oder Anordnung der dynamischen Einwirkungen gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1], sollten diese Annahmen überprüft werden (siehe z.B. Kapitel 6.2.1). Andernfalls liegt es im Ermessen der Lawinenexperten (für die Einwirkungsseite) sowie der bemessenden Ingenieure (für die Widerstandsseite), auf der konservativen Seite liegende Annahmen zu treffen oder nicht; die SIA-Normen und die ASTRA-Richtlinie 12007 [1] erlauben grundsätzlich «exakt» zu rechnen und über das Sicherheitsniveau des Bemessungskonzept hinausgehende «hidden safeties» zu vermeiden – insbesondere, wenn eine konservative Bemessung die Baukosten stark in die Höhe treibt.

Neben den bisher diskutierten «globalen» Schlussfolgerungen lässt die Analyse des bestehenden Sicherheitsniveaus noch weitere, eher spezifische Schlussfolgerungen zu:

- Die Betrachtung unterschiedlicher Bemessungssituationen führt zu keiner starken Variation des Sicherheitsniveaus, d.h. das Bemessungskonzept ist vergleichsweise «robust». Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist die Berücksichtigung des «aussergewöhnlichen» (300-jährigen) Ereignisses in der Bemessung.
- Verzichtet ein Bauherr auf die Berücksichtigung des 300-jährigen Ereignisses, was vor allem bei einem grossen Unterschied zum 30-jährigen Ereignis verlockend sein kann, kann dies zu sehr hohen rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeiten führen.
- Das grösste Schutzdefizit bei Lawingalerien liegt nicht im Bemessungskonzept sondern in der Länge des Schutzbauwerks, die insbesondere in der Vergangenheit oft nur auf ein 30-jähriges Ereignis oder noch häufigeres Ereignis ausgelegt wurde.
- Ebenfalls ungünstig für das rechnerische Sicherheitsniveau der Galerietragwerke sind verschiedene Effekte, die zu einer optimistischen (d.h. nicht konservativen) Festlegung der Lawineneinwirkungen führen können, unter anderem:
  - Fehlende Berücksichtigung der Schätzunsicherheit bei der Beurteilung der Einwirkungen im 30-jährigen bzw. 300-jährigen Ereignis
  - Beurteilung der Einwirkungen durch einen «optimistischen» Lawinenexperten, der die realen Einwirkungen ggf. unterschätzt

Mögliche Anpassungen der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] zur Berücksichtigung der beiden letzten Punkte werden weiter unten in Kapitel 6.2.2 und 6.2.3 diskutiert.

### 6.1.2 Einwirkungskombinationen nach ASTRA-Richtlinie 12007

In Bezug auf die betrachteten Fälle 1 bis 4 der ASTRA-Richtlinie können die folgenden Schlussfolgerungen gemacht werden:

- Für die betrachteten Galeriestandorte sind vor allem die Einwirkungen in Fall 3 (Fliesslawine über abgelagertem Lawinenschnee) und Fall 4 (Lawinenablagerung ruhend) massgebend.
- Fall 1 (Fliesslawine auf schneefreiem Galeriedach) kann vor allem an tief gelegenen Standorten (unterhalb von 500 bis 700m) massgebend werden, die von Lawinen aus hoch gelegenen Anrissgebieten mit steilen Sturzbahnen erreicht werden.
- Fall 2 (Fliesslawine über natürlich abgelagerter Schneedecke) sollte nur massgebend werden, wenn an einem Standort keine Ereignisse mit mehreren Lawinenabgängen in einem Winter zu erwarten sind; an den übrigen Standorten wird die natürliche Schneedecke in die Lawinenablagerung für Fall 3 integriert.
- Ein pauschaler Verzicht auf einen der vier Fälle für alle Galeriestandorte kann nicht gerechtfertigt werden, da die Beurteilung sehr standortspezifisch ist. Allerdings kann ein Lawinenexperte in der Regel einschätzen, ob ein Fall für eine bestimmte Galerie massgebend werden kann oder nicht.
- Kombinationen aus ruhenden und dynamischen Lawineneinwirkungen sollten wegen der vielfältigen Interaktionen zwischen der Fliesslawine und der bestehenden Schneedecke stets gemeinsam als Leit- oder Begleiteinwirkung betrachtet werden, siehe Kapitel 6.2.4 für Details.
- In Fall 2 (Fliesslawine über natürlich abgelagerter Schneedecke) wird die Zuverlässigkeit hauptsächlich durch die stärker streuenden dynamischen Einwirkungen bestimmt. Die Festlegung zum charakteristischen Wert der ruhenden Schneelast hat nur einen geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Bemessung.

## 6.2 Empfehlungen für Anpassungen am bestehenden Konzept

### 6.2.1 Ansätze zur Reduktion der versteckten Sicherheiten

Versteckte Sicherheiten in einer Bemessung resultieren aus der guten Ingenieur-Praxis, im Zweifel «auf der sicheren Seite» zu bemessen und sind zunächst einmal kein direkter Grund zur Sorge: Ein Galerietragwerk wird durch versteckte Sicherheiten nicht unsicher, sondern im Gegenteil besonders zuverlässig. Die vier in dieser Untersuchung betrachteten Fällen stellen eine starke Vereinfachung der natürlichen Lawinenprozesse dar. In der Natur treten meist Mischformen dieser Fälle oder sogar zusätzliche Fälle auf. Ein Galeriedach kann zum Beispiel teilweise schneefrei sein, eine Lawine kann Felsbrocken mitführen oder ein Teil der Schneemassen „springt“ auf das Galeriedach (siehe Fall 8 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1]). Weil die Vielfalt der möglichen Einwirkungen in der Bemessung nur begrenzt erfasst werden kann, ist eine «robuste» Bemessung von Lawinengalerien wünschenswert.

Wenn sich verschiedene «hidden safeties» im Bemessungsprozess addieren, kann dies jedoch zu übertrieben konservativen und damit kostspieligen Bauwerken führen. Dies gilt insbesondere für komplexe Bemessungsaufgaben mit vielen Unsicherheiten, die den Einbezug und das Zusammenspiel verschiedener Experten erfordern. Den Beteiligten ist in einem solchen Kontext oft nicht bewusst, welche der getroffenen Annahmen konservativ sind und/oder welchen Effekt diese auf den gesamten Bemessungsprozess haben.

Besonders kritisch kann dies bei der Beurteilung bestehender Galerietragwerke werden, wenn die beteiligten Experten die Situation anders einschätzen als in der ursprünglichen Bemessung angenommen und teure Verstärkungsmassnahmen notwendig werden, obwohl sich an der Lawinensituation im Feld nichts verändert hat. Mit dem heute

verwendeten 2-dimensionalen numerischen Berechnungsmodell RAMMS können Lawineneinwirkungen bedeutend realistischer eingeschätzt werden als z.B. mit dem bis zum Jahre 2000 eingesetzten Voellmy-Salm Modell, das in der Sturzbahn die Lawinengeschwindigkeit stark unterschätzte. Die Einwirkungen auf Lawinengalerien, die vor 1970 gebaut wurden, wurden meist gutachterlich ohne Simulationen bestimmt. Weiter ist zu beachten, dass es vor der Herausgabe der ersten Richtlinie „Einwirkungen auf Lawinenschutzgalerien“ von 1994 [2] keine Vorgaben gab, wie die Einwirkungen auf eine Galerie festzulegen sind.

Auf der anderen Seite besteht bei der Beurteilung bestehender Galerien möglicherweise die Chance, bestehende «hidden safeties» in der ursprünglichen Bemessung zu nutzen, um bekannte Mängel z.B. aufgrund von Vereinfachungen in heute veralteten Lawinenmodellen zu kompensieren. Vor diesem Hintergrund ist es erstrebenswert, versteckte Sicherheiten so gut wie möglich explizit zu machen, um sie anschliessend entweder zu reduzieren (wenn der zugrundeliegende Konservatismus gut verstanden ist) oder zumindest so gut wie möglich zu vereinheitlichen. Im Folgenden wird diskutiert, an welchen Stellen im Bemessungsprozess von Lawinengalerien «hidden safeties» auftreten könnten.

#### *Gefahrenbeurteilung durch anerkannte Lawinenexperten*

Der gutachterliche Spielraum bei der Festlegung von Lawineneinwirkungen kann je nach betrachtetem Standort sehr hoch sein. Die Lawinenexperten sind sich der Unsicherheiten in der Regel bewusst und arbeiten mit einheitlichen Grundsätzen und Methoden. Dennoch können vor allem aufgrund unterschiedlicher Annahmen zu den Eingabewerten der lawinendynamischen Berechnungen sehr unterschiedliche Bemessungseinwirkungen resultieren, wenn zwei verschiedene Lawinenexperten mit vergleichbarer Ausbildung die Lawinensituation am selben Standort beurteilen, siehe Kapitel 6.2.3 für Details. Für sehr wichtige Eingangsgrössen wie z.B. die Lage und Grösse eines Lawinenanrissgebietes ist es nicht möglich, formale Regeln zu definieren, wie diese festzulegen sind, da jeder Lawinenzug seine eigene Charakteristik hat.

Neben dem offensichtlich unerwünschten Effekt der Variation zwischen verschiedenen Lawinenexperten ist bei grossen Unsicherheiten in der Gefahrenbeurteilung auch verstärkt mit «hidden safeties» im Lawinengutachten zu rechnen: Insbesondere bei unklaren Lawinensituationen mit einer schlechten Datenlage werden in der Regel vorsichtigere Annahmen getroffen als in klar definierten Lawinensituationen mit zahlreichen Beobachtungen. Wie gross diese versteckten Sicherheiten ausfallen, liegt im Ermessen des Lawinengutachters; nicht immer sind die enthaltenen Konservatismen explizit.

Die Unsicherheiten in der Gefahrenbeurteilung lassen sich am besten durch Dokumentationen von früheren Lawinenabgängen und –ablagerungen am Galeriestandort reduzieren. Sowohl bei Galeriereubauten wie auch bei bestehenden Galerien liegen mehrheitlich ungenügende Dokumentationen zu vergangenen Lawinenabgängen und Schneeverteilungen im Galeriebereich vor. Nach Fertigstellung einer Galerie wird das Lawinenkataster oft nicht mehr (oder nur noch in begrenztem Umfang) weitergeführt, weil der Strassenabschnitt durch die Galerie geschützt ist. Informationen zur Höhe der Lawinenablagerungen auf dem Galeriedach, die für die Beurteilung der ruhenden Einwirkungen in Fall 4 hilfreich wären, fehlen oft gänzlich.

Die fehlenden Aufzeichnungen für Standorte mit bestehenden Galerien sind vor allem deswegen schmerzlich, weil eine zu konservative Bemessung gerade bei der Beurteilung bestehender Galeriebauwerke mit sehr hohen Kostenfolgen verbunden sein kann – insbesondere, wenn durch den Konservatismus die Nachweise für das bestehende Tragwerk nicht mehr erfüllt sind und eventuelle «hidden safeties» im Lawinengutachten den Bedarf nach einer Verstärkung des Tragwerks überhaupt erst begründen. Bei Neubauten (oder auch bei der Bemessung einer ohnehin notwendigen Verstärkung) fallen die durch ein konservatives Lawinengutachten entstehenden Mehrkosten oft weniger ins Gewicht.

Allgemein gilt: Gute Aufzeichnungen zu vergangenen Lawinenabgängen sowie zu Lawinenablagerungen auf dem Galeriedach erleichtern es den Lawinenexperten, eine realistische Beurteilung der standortspezifischen Lawinensituation abzugeben und ihre Verantwortung für die Sicherheit des geschützten Strassenabschnitts wahrzunehmen, ohne auf konservative Annahmen zurückgreifen zu müssen. Der potentielle Nutzen der hieraus resultierenden Reduktion von «hidden safeties» im Lawinengutachten ist vor allem bei bestehenden Galeriebauten hoch.

#### Empfehlung: Systematische Lawinenaufzeichnungen auch für bestehende Galerien

Detaillierte Empfehlungen für eine systematische Datenerfassung an Standorten mit bestehenden Galeriebauwerken werden weiter unten in Kapitel 6.3.3 gegeben. Für Galerienneubauten gelten dieselben Empfehlungen sinngemäss.

#### *Interpretation des Lawinengutachtens und Ermittlung der Einwirkungen*

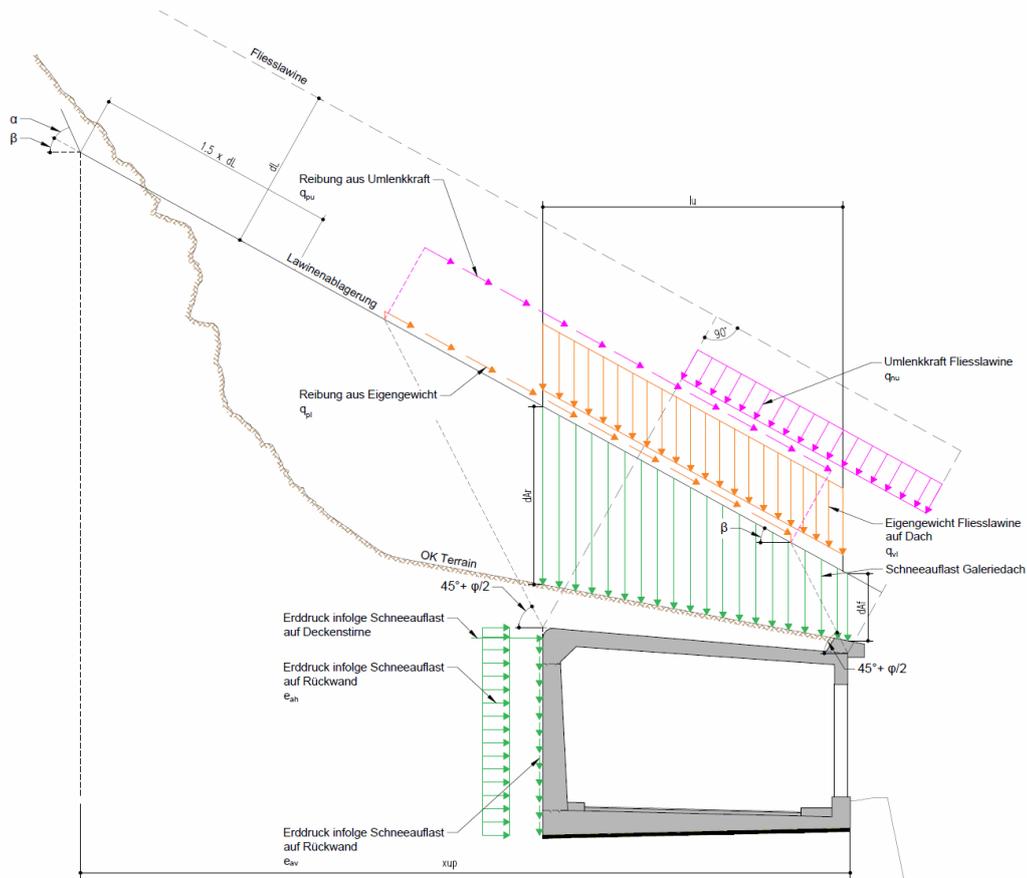
Die Schnittstelle zwischen dem Lawinenexperte und der bemessenden Ingenieure ist in der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] grundsätzlich klar definiert; dies beinhaltet Regeln zur Berechnung der Einwirkungen auf die Galerie basierend auf den Angaben im Lawinengutachten. Die Vorgabe klarer Regeln für ein einheitliches Vorgehen zur Ermittlung der Einwirkungen ist an dieser Stelle grundsätzlich sehr zu begrüssen, weil die bemessenden Ingenieure in der Regel über keine Expertise im Bereich der Lawinenmodellierung verfügen.

In der Praxis gibt es bei den Anwendern der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] jedoch immer wieder offene Fragen, die seitens der bemessenden Ingenieure im Zweifel meist zu einer konservativen Auslegung der für sie unklaren Regeln führen. Ein Thema ist hier unter anderem die Vorgaben zur Kombination unterschiedlicher Einwirkungen, die weiter unten diskutiert werden. Weitere Fragen ergeben sich, weil die Lawineneinwirkungen nicht direkt auf das Galeriedach einwirken, sondern an der Oberkannte des Terrains bzw. der Erdauflast oder sogar – im Falle der dynamischen Einwirkungen in Fall 2 und 3 – nur an der Oberfläche der bestehenden Schnee- oder Lawinenablagerung bestimmt werden. In der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] sind zwar gewisse Empfehlungen zur Berücksichtigung des Erddrucks (bzw. seiner Erhöhung durch die Lawineneinwirkungen) enthalten, diese beantworten aber nicht alle Fragen, insbesondere nicht nur die Frage zur Kraftweiterleitung über eine bestehende Schneedecke.

Auch aus wissenschaftlicher Sicht ist zurzeit unklar, ob bzw. in welchem Umfang die Schneedecke und die Lawinenablagerung die dynamischen Kräfte bei einem Lawinenabgang möglicherweise aufnehmen bzw. dämpfen kann. Der aktuelle Bemessungsansatz könnte hier ggf. stark konservativ sein, derzeit fehlen aber Grundlagen, um eine entsprechende Anpassung der anzunehmenden Einwirkungen in Fall 2 und 3 zu begründen.

Unabhängig von dieser Frage muss für die Bemessung der Galerie aber auch bestimmt werden, in welcher «Einflussfläche» auf der Schneedecke die Einwirkungen die Galerie belasten, und in welchem Bereich die Einwirkungen vom Erdreich hinter der bergseitigen Galerierückwand aufgenommen werden (mit oder ohne Erhöhung des Erddrucks). Zu dieser Frage wären klarere Vorgaben in der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] wünschenswert, um die Anwendung zu vereinheitlichen und übertrieben konservative Auslegungen zu vermeiden. Falls auf Seiten der bemessenden Ingenieure noch weitere Unsicherheiten zur Anwendung der Bemessungseinwirkungen bestehen, sollten auch diese so gut wie möglich durch Klarstellungen in der ASTRA-Richtlinie 12007 oder alternativ einer erläuternden Hintergrundinformation beseitigt werden.

In der derzeitigen ASTRA-Richtlinie 12007 ist die Lastwirkung nicht ganz eindeutig definiert, so dass die Ingenieure in der Praxis hierfür Annahmen treffen müssen. In Abb. 60 ist ein Beispiel aus der Praxis dargestellt. Für die Vergleichbarkeit von Bemessungen können solche konkreten Vorgaben hilfreich sein.



**Abb. 60.** Beispiel von Annahmen über die Lastverteilung, die in der Praxis verwendet werden (von Aldo Chitvanni, zur Publikation freigegeben).

#### Empfehlung: Klare Vorgaben zur Kraftweiterleitung über Schneedecke und Erdreich

Die ASTRA-Richtlinie 12007 [1] sollte um klare Vorgaben zur Kraftweiterleitung der Lawineneinwirkungen über die Schneedecke und das Erdreich ergänzt werden.

#### *Bemessung des Tragwerks mit den zuvor definierten Einwirkungen*

Wenn die Einwirkungen auf das Tragwerk bekannt sind, spielt es für die Bemessung im Prinzip keine Rolle mehr, dass es sich bei dem Bauwerk um eine Lawingalerie handelt. Dennoch gibt es natürlich auch auf der Widerstandsseite versteckte Sicherheiten durch konservative Annahmen in der Bemessung. Diese Annahmen sind den bemessenden Ingenieuren meist (mehr oder weniger) bewusst; wie stark sie auf der sicheren Seite liegen, ist allerdings in vielen Fällen nicht oder nur unzureichend bekannt.

Ein offensichtlicher Konservatismus liegt vor, wenn ein Tragwerk mit einem Erfüllungsgrad von  $R_d / E_d \geq 1.0$  bemessen wird. Die zusätzliche Sicherheit ist in diesem Fall explizit und wird in der Praxis wohl kaum realisiert werden, wenn dies zu beträchtlichen Mehrkosten führt. Etwas weniger offensichtlich ist dies, wenn eine Galerie oder ein Galerieabschnitt entlang der Strassenachse vereinfacht konstant mit den maximalen Einwirkungen bemessen wird, was in den übrigen Bereichen zu einem grösseren Erfüllungsgrad führt. Sofern im Lawinengutachten genügend Informationen für eine angemessene Differenzierung der Einwirkungen entlang der Strassenachse vorliegen, gilt aber auch in diesem Fall, dass eine «Überbemessung» der weniger stark belasteten Bereiche wohl kaum realisiert wird, wenn die Mehrkosten beträchtlich sind. Zudem ist sie aus Zuverlässigkeitssicht sogar sinnvoll, weil die Unsicherheit der Einwirkungen in den weniger stark belasteten Bereichen zunimmt (siehe Kapitel 3.6.1).

Weitere versteckte Sicherheiten liegen in der Verwendung vereinfachter Tragwerks-Modelle, z.B. durch eine Bemessung mit einem einfachen 2D-Rahmenmodell, mit dem Tragreserven quer zur Schnittebene unberücksichtigt bleiben. Generell liegt es in der Verantwortung der bemessenden Ingenieure, die Komplexität des Tragwerksmodells angemessen zu wählen. Wenn die Kostenfolgen beim Bau der Galerie überschaubar sind, genügt auch ein einfaches Modell mit entsprechend konservativen Annahmen. Gerade bei der Beurteilung bestehender Galerietragwerke lohnt sich aber ggf. ein komplexeres Modell, wenn hierdurch auf eine Verstärkung verzichtet werden kann.

Dasselbe gilt für die Festlegung der Bemessungswerte für die Materialfestigkeiten, für die zunächst das Potential einer Aktualisierung mit den Methoden der SIA 269 [10] abgeschätzt und ggf. ausgereizt werden sollte, ehe man zu der Schlussfolgerung kommt, dass eine Verstärkung der Galerie notwendig wird. Die relevanten Materialfestigkeiten und auch die ruhenden Einwirkungen lassen sich vergleichsweise einfach mit Hilfe von Daten aus einer Zustandserfassung am Bauwerk aktualisieren; die Methoden hierfür sind unabhängig von der Lawineneinwirkung und können für jedes beliebige Tragwerk zum Einsatz kommen.

Empfehlung: Möglichst exakte Bemessung vor allem für bestehende Tragwerke

Wenn sich die Frage stellt, ob eine bestehende Galerie verstärkt werden muss, sollten alle Möglichkeiten der Tragwerksbemessung ausgereizt werden, um «hidden safeties» auf der Widerstandsseite zu vermeiden. Dies beinhaltet auch die Anwendung der Methoden aus der SIA 269 [10] zur risikobasierten Festlegung von Bemessungswerten sowie zur Aktualisierung des Tragwiderstandes mit Daten aus einer Zustandserfassung des Bauwerks.

Diese Empfehlung ist unabhängig von der Festlegung der Lawineneinwirkungen und richtet sich an die bemessenden Ingenieure, aber auch an die Bauwerkseigentümer, die auf eine realitätsnahe Bemessung zur Vermeidung unnötiger Verstärkungsmassnahmen drängen sollten.

## 6.2.2 Festlegungen zum Bemessungswert der Lawineneinwirkungen

Die Festlegung der Bemessungswerte der Lawineneinwirkung geschieht durch die Definition des charakteristischen Wertes  $Q_k$  und die Wahl des Lastbeiwertes  $\gamma_Q$ . Der charakteristische Wert der Lawineneinwirkung ist als 30-jähriges Ereignis für die «normale» Bemessungssituation bzw. als 300-jähriges Ereignis für die aussergewöhnliche Bemessungssituation definiert. Zusammen mit dem Lastbeiwert bestimmt diese Definition massgeblich das Sicherheitsniveau einer Bemessung von Lawingalerien.

Zur Diskussion des Lastbeiwertes lohnt sich zunächst ein Blick auf die Definition des Teilsicherheitsbeiwertes für die Einwirkungsseite gemäss SIA 260 [5]. In den meisten Fällen (unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Ein- und Auswirkungen) kann der Lastbeiwert gemäss §4.4.2.5 wie folgt ermittelt werden:

$$\gamma_F = \gamma_S \gamma_f \quad (5.1)$$

Der Partialfaktor  $\gamma_f$  berücksichtigt hierbei mögliche ungünstige Abweichungen der Einwirkungsgrösse vom repräsentativen Wert – zum Beispiel, dass anstelle der 30-jährigen Lawine mit einer jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeit von 1/30 auch ein grösseres Ereignis auftreten könnte. Der Partialfaktor  $\gamma_S$  berücksichtigt Modellunsicherheiten bezüglich der Ein- und Auswirkungen – also zum Beispiel die Schätzunsicherheit bei der Beurteilung des 30-jährigen Ereignisses durch einen Lawinenexperten.

Der aktuell gültige Lastbeiwert  $\gamma_Q = 1.5$  für das 30-jährige Lawinenereignis wird einfach von anderen veränderlichen Einwirkungen (z.B. Wind, Schnee, Nutzlasten) übernommen. Hieraus ergeben sich im Bemessungskonzept der SIA 260 [5] mehrere implizite Annahmen:

- Der charakteristische Wert  $Q_k$  der Lawineneinwirkung wird ähnlich definiert wie bei anderen veränderlichen Einwirkungen (i.d.R. als 50-jähriges Ereignis).
- Die Streuung der Lawineneinwirkung liegt in einer ähnlichen Grössenordnung wie die der anderen veränderlichen Einwirkungen (Partialfaktor  $\gamma_f$ )
- Die Modellunschärfe bei der Festlegung der Lawineneinwirkung liegt in einer ähnlichen Grössenordnung wie bei anderen veränderlichen Einwirkungen (Partialfaktor  $\gamma_s$ )

Der erste Punkt ist mit der Definition der Lawineneinwirkung als 30-jähriges Ereignis zwar nicht erfüllt. Aus praktischer Sicht empfiehlt es sich aber, an dieser Festlegung festzuhalten, da sie dem üblichen Vorgehen der Lawinenexperten entspricht. Gefahrenbeurteilungen werden nach Bundesvorgaben für Wiederkehrperioden von 30, 100 und 300 Jahren durchgeführt. Auch die Reibungswerte für Lawinenmodelle wurden für diese Wiederkehrperioden festgelegt. Ein Wechsel zum 50-jährigen Ereignis würde vermutlich zu weiteren Schätzunsicherheiten und «hidden safeties» führen. Wie gross der Unterschied zwischen dem 30-jährigen und dem 50-jährigen Ereignis ist, hängt davon ab, wie stark die Lawineneinwirkungen streuen. In der vorliegenden Untersuchung wurde für die Zuverlässigkeitsanalysen explizit berücksichtigt, dass der charakteristische Wert als 30-jähriges Ereignis definiert ist.

Auch der zweite Punkt ist für Lawineneinwirkungen in der Regel nicht erfüllt: Die natürliche Streuung der Einwirkung – in dieser Untersuchung meist charakterisiert durch den Unterschied zwischen dem 30-jährigen und dem 300-jährigen Ereignis – ist deutlich grösser als bei anderen veränderlichen Einwirkungen. Entsprechend gross werden rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeiten mit zunehmendem Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$ , wenn nur die Bemessung für ein 30-jähriges Ereignis betrachtet wird. Die zusätzliche Berücksichtigung des 300-jährigen Ereignisses (ein anderer Fraktilwert derselben Einwirkungsverteilung) kompensiert diesen Mangel zum Teil. Das Bemessungskonzept ist hierdurch sehr robust, allerdings lässt sich die Zuverlässigkeit der Bemessung für ein 300-jähriges Ereignis nicht mehr weiter steuern, da bei der aussergewöhnlichen Bemessungssituation auf der Einwirkungsseite keine Sicherheitsbeiwerte (bzw. ein Sicherheitsbeiwert von 1.0) zur Anwendung kommen.

Beim dritten Punkt geht es um die Schätz- bzw. Modellunsicherheiten bei der Beurteilung der Lawineneinwirkung. Hier ist es möglich, dass diese höher sind als bei anderen veränderlichen Einwirkungen. Auch bei anderen Einwirkungen wurde der Beitrag des Partialfaktors  $\gamma_s$  in der Vergangenheit jedoch nicht unbedingt systematisch basierend auf einer Analyse der Modellunsicherheiten ermittelt, und die Verwendung desselben Lastbeiwertes  $\gamma_Q = 1.5$  ist selbst für übliche Wind-, Schnee- und Nutzlasten bereits eine grobe Vereinfachung. Vor diesem Hintergrund, aber auch in Anbetracht der offenbar vorhandenen «hidden safeties» in der Bemessung kann eine generelle Erhöhung des Lastbeiwertes für Lawineneinwirkung zur Berücksichtigung eines «Schätzfaktors» nicht unbedingt empfohlen werden. Aufgrund der grossen Bedeutung der Modellunsicherheiten bei der Ermittlung der Einwirkungen wird in Kapitel 6.2.3 aber dennoch ein möglicher Ansatz zur Berücksichtigung der Schätzunsicherheit diskutiert.

Die Beurteilung des bestehenden Bemessungskonzeptes in Kapitel 6.1 zeigt keinen offensichtlichen Anpassungsbedarf in Bezug auf das «globale» Sicherheitsniveau von Galeriereubauten basierend auf der ASTRA-Richtlinie 12007 [1]. Allenfalls für Galeriereubauten an Standorten mit hohem Verkehrsaufkommen könnten ggf. höhere Zuverlässigkeiten angestrebt werden; dies würde die Einführung eines risikobasierten Bemessungskonzeptes erforderlich machen, siehe Kapitel 6.2.4 für Details. In Anbetracht der positiven Erfahrungen mit der (beobachteten) Zuverlässigkeit bestehender Galeriereubauten könnte aber auch am bestehenden Bemessungskonzept festgehalten werden, zumindest solange keine grossen Schritte zur Reduktion der offenbar vorhandenen «hidden safeties» gemacht werden.

Die Berücksichtigung des 300-jährigen Ereignisses als aussergewöhnliche Einwirkung ist von zentraler Bedeutung für die Zuverlässigkeit und die «Robustheit» des bestehenden Bemessungskonzeptes. Gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1], Artikel 3.5, kann der

Bauherr aufgrund von Risikoüberlegungen entscheiden, ob das aussergewöhnliche Lawinenereignis berücksichtigt werden soll oder nicht. Basierend auf der vorliegenden Untersuchung kann jedoch eindeutig davon abgeraten werden, auf die aussergewöhnliche Bemessung zu verzichten.

#### Empfehlung: Verpflichtende Berücksichtigung des 300-jährigen Ereignisses

Die Bemessung auf das 300-jährige Lawinenereignis als aussergewöhnliche Einwirkung sollte nicht fakultativ dem Bauherrn überlassen werden, sondern in jedem Fall verpflichtend sein, solange am bestehenden Bemessungskonzept der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] festgehalten wird. Dies entspricht aber vermutlich auch heute schon der gängigen Praxis.

### 6.2.3 Berücksichtigung der Schätzunsicherheit im Bemessungskonzept

Wie bereits in Kapitel 6.2.2 diskutiert, kann man beim bestehenden Bemessungskonzept für Lawingalerien nicht davon ausgehen, dass der Lastbeiwert  $\gamma_o = 1.5$  für das 30-jährige Lawinenereignis hoch genug ist, um auch die Modellunschärfen bei der Ermittlung der Einwirkungen mit abzudecken. Tatsächlich liegen die in Kapitel 4.2.6 zusammengestellten «Schätzfaktoren» für die dynamischen Einwirkungen in Fall 1 allein bereits in der Grössenordnung von bis zu 1.3 oder höher für die Galerieabschnitte mit den massgebenden Einwirkungen. Noch deutlicher wird dies beim 300-jährigen Ereignis, das mit noch grösseren (Schätz-)Unsicherheiten verbunden ist, aber in der Bemessung als aussergewöhnliche Einwirkung ohne jeden Sicherheitsbeiwert einfließt.

Der in Kapitel 4.2.6 eingeführte «Schätzfaktor» drückt aus, um wieviel die «beste Schätzung» für die Einwirkungen z.B. im 30-jährigen Ereignis erhöht werden müsste, um die Unsicherheiten in der Schätzung angemessen zu berücksichtigen. In der Praxis basiert die Bemessung in der Regel direkt auf der «besten Schätzung» eines Lawinenexperten, d.h. die Schätzunsicherheiten sind entweder gar nicht oder allenfalls implizit in einer konservativen Beurteilung berücksichtigt. Bei einem Beiwert zur Berücksichtigung der Schätzungenauigkeit von 1.5 kann dies im für die Bemessung auf das 30-jährige Ereignis relevanten Bereich etwa zu einer Verdopplung von Versagenswahrscheinlichkeiten in der Grössenordnung von  $10^{-3}$  pro Jahr führen; für niedrigere Versagenswahrscheinlichkeiten in der Grössenordnung von  $10^{-4}$  pro Jahr ist der Einfluss der Schätzunsicherheit sogar noch grösser (siehe z.B. Abb. 24 in Kapitel 3.6.1).

Ein weiteres Problem, das sich aus der Schätzunsicherheit ergibt, ist die starke Variation in der Einschätzung durch verschiedene Experten. In der vorliegenden Untersuchung wurde dies am Beispiel der Lawingalerie Salezer in Davos eindrücklich gezeigt, für die die dynamischen Einwirkungen unabhängig voneinander von drei verschiedenen Experten beurteilt wurde, siehe Kapitel 4.2.6. und 3.6.1. Ohne die Möglichkeit, die Berechnungen durch Berücksichtigung von Lawinaufzeichnungen nachzujustieren oder einer Plausibilitätsprüfung durch einen weiteren Experten, betragen die Unterschiede in den empfohlenen Einwirkungen bis zu einen Faktor 2.8 für das 300-jährige Ereignis; in der Zuverlässigkeitsanalyse führt dies zu einer Variation der Versagens-Wahrscheinlichkeiten um etwa eine Grössenordnung, d.h. einen Faktor 10 oder sogar etwas mehr.

Wird ein Galerieneubau basierend auf einer «optimistischen» Einschätzung eines Lawinenexperten bemessen, kann dies einerseits (falls auch die «hidden safeties» gering ausfallen) zu sehr hohen Versagenswahrscheinlichkeiten von deutlich über  $10^{-3}$  pro Jahr führen. Andererseits ist es aber auch ohne ein Galerieversagen nicht unwahrscheinlich, dass die Galerie bei einer späteren Neubeurteilung basierend auf einem neuen, «realistischen» oder gar «konservativen» Lawinengutachten verstärkt werden muss, was angesichts der hohen rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeiten ja durchaus seine Berechtigung hat.

Bei Galerieneubauten ist eine Erhöhung der Bemessungswerte oft mit vergleichsweise geringen (zusätzlichen) Kosten verbunden; dasselbe gilt bei einer ohnehin notwendigen Verstärkung einer bestehenden Galerie. In diesen Situationen kann die Einführung eines «Schätzfaktors» zur Berücksichtigung der Modellunschärfen bei der Beurteilung der

Lawineneinwirkungen ggf. sehr effizient sein, da sie einerseits das Risiko eines Galerieversagens reduziert, andererseits aber auch einen gewissen Puffer für zukünftige Überprüfungen des Tragwerks bietet. Anders als bei den «hidden safeties» ist die zusätzliche Sicherheit aber explizit, was die Entscheidung über eine mögliche Berücksichtigung eines solchen Schätzfaktors erleichtert. Dies ist insofern interessant, weil es auch Situationen gibt, in denen ein höherer Bemessungswert grosse Kosten verursacht, z.B. weil eine Galerie mit Felsankern rückverankert werden muss, oder weil die Verstärkung einer bestehenden Galerie durch die Einführung eines «Schätzfaktors-« überhaupt erst notwendig wird.

Konzentriert man sich auf den Nutzen eines Beiwerts zur Berücksichtigung der Unsicherheit in der Festlegung der Bemessungslast in der Bemessung, der durch die reduzierte Gefahr eines Tragwerksversagens erzielt wird, kann mit Hilfe einer einfachen Risikoanalyse bestimmt werden, wieviel teurer die Bemessung z.B. in einem Neubauprojekt werden darf, damit der Sicherheitsgewinn die Kosten überwiegt. Hierfür wird im Folgenden angenommen, dass mit der Einführung eines zusätzlichen Beiwerts  $SF = 1.5$  für das 30-jährige Ereignis die jährliche Wahrscheinlichkeit eines Tragwerksversagens in etwa halbiert werden kann, also z.B. von  $2 \cdot 10^{-x}$  auf  $10^{-x}$ . Für  $x = 3$ , d.h. für jährliche Versagenswahrscheinlichkeiten in der Grössenordnung von  $10^{-3}$ , ist dies in etwa realistisch (siehe Abb. 24 in Kapitel 3.6.1). Dies bedeutet, dass das Risiko aufgrund eines Tragwerksversagens durch Lawineneinwirkungen durch eine Erhöhung der Bemessungseinwirkungen um 50% in etwa halbiert werden kann. Für niedrigere Versagenswahrscheinlichkeiten und auch für die Bemessung auf das 300-jährige Ereignis wird die Risikoreduktion mit dieser Annahme tendenziell unterschätzt und der tatsächliche Effekt ist noch etwas höher.

Im Bemessungskonzept könne empfohlen werden den effektiven Beiwert durch eine einfache Risikoanalyse fallspezifisch festzulegen.

Die Ergebnisse der Risikoanalyse sind in Tab. 36 zusammengefasst. Sie basieren auf den folgenden Annahmen:

- Versagenswahrscheinlichkeit ohne Berücksichtigung eines «Schätzfaktors» in der Bemessung doppelt so hoch wie in der Tabelle angegeben.
- Baukosten einer doppelspurigen Galerie  $C_w = 30'000 \text{ CHF} / m$ , Konsequenzen eines Tragwerksversagens je nach Konsequenzklasse gleich  $\rho \cdot C_w$
- Jährliche Risikoreduktion kumuliert über eine Galerie-Restnutzungsdauer von 50 Jahren (und einer Nutzungsdauer von 100 Jahren) unter Annahme einer gesellschaftlichen Verzinsung von 2%

Die kumulierte Risikoreduktion kann direkt mit den Mehrkosten verglichen werden, die bei einem Galerie Neubau durch die Berücksichtigung eines Beiwerts in der Bemessung entstehen. Sind die Mehrkosten niedriger als die in der Tabelle angegebenen Werte, so ist die Berücksichtigung des Beiwertes für die Schätzunsicherheit unter den oben getroffenen Annahmen effizient.

In welcher Konsequenzklasse ein Tragwerk liegt, kann in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens auf der durch die Galerie geschützten Strasse bestimmt werden, siehe Kapitel 2.2.2 für Details. In Tab. 36 fett gedruckt sind die Ergebnisse für die je nach Konsequenzklasse optimalen (Ziel-)Versagenswahrscheinlichkeiten, die in einem risikobasierten Bemessungskonzept relevant sind. Ein Beiwert von beispielsweise  $SF = 1.5$  ist hier effizient, wenn er bei einem Galerie Neubau mit Mehrkosten von maximal etwa 1'000-2'000 CHF pro Laufmeter realisiert werden kann (wie oben diskutiert, ist die tatsächlich Risikoreduktion bei Versagenswahrscheinlichkeiten in der Grössenordnung von  $10^{-4}$  vermutlich etwas höher als in der Tabelle angenommen).

Mit dem aktuellen Bemessungskonzept ist die Situation weniger klar. Hier wird die Versagenswahrscheinlichkeit der Bemessung primär von der Streuung der Lawineneinwirkung bestimmt und ist somit unabhängig von der Konsequenzklasse. Für

Verhältnisse  $q_{300}/q_{30}$  im Bereich zwischen 2.0 und 2.5 variiert die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit bei Bemessung auf das 30-jährige Ereignis meist etwa zwischen  $10^{-4}$  und  $10^{-3}$ , was der in Tab. 36 abgedeckten Bandbreite entspricht.

**Tab. 36** Risikoreduktion bei Halbierung der jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit, um die je nach Konsequenzklasse optimale Ziel-Versagenswahrscheinlichkeit (fett gedruckte Zahlen) von  $10^{-3}$ ,  $5 \cdot 10^{-4}$  bzw.  $10^{-4}$  zu erreichen.

Konsequenzklassen gemäss Definition in Kapitel 2.2.2		Konsequenzen eines Tragwerksversagens		
		gering: $\rho < 2$	moderat: $2 < \rho < 5$	gross: $5 < \rho < 10$
Versagenswahrscheinlichkeit	[1/Jahr]	<b><math>10^{-3}</math></b>	$10^{-3}$	$10^{-3}$
Jährliche Risikoreduktion	[CHF/m-a]	<b>30 – 60</b>	60 – 150	150 – 300
Kumuliert über 50 Jahre	[CHF/m]	<b>943 – 1'885</b>	1'885 – 4'714	4'714 – 9'427
Kumuliert über 100 Jahre	[CHF/m]	<b>1'293 – 2'586</b>	2'586 – 6'465	6'465 – 12'930
Versagenswahrscheinlichkeit	[1/Jahr]	$5 \cdot 10^{-4}$	<b><math>5 \cdot 10^{-4}</math></b>	$5 \cdot 10^{-4}$
Jährliche Risikoreduktion	[CHF/m-a]	15 – 30	<b>30 – 75</b>	75 – 150
Kumuliert über 50 Jahre	[CHF/m]	471 – 943	<b>943 – 2'357</b>	2'357 – 4'714
Kumuliert über 100 Jahre	[CHF/m]	646 – 1'293	<b>1'293 – 3'232</b>	3'232 – 6'465
Versagenswahrscheinlichkeit	[1/Jahr]	$10^{-4}$	$10^{-4}$	<b><math>10^{-4}</math></b>
Jährliche Risikoreduktion	[CHF/m-a]	3 – 6	6 – 15	<b>15 – 30</b>
Kumuliert über 50 Jahre	[CHF/m]	94 – 189	189 – 471	<b>471 – 943</b>
Kumuliert über 100 Jahre	[CHF/m]	129 – 259	259 – 646	<b>646 – 1'293</b>

Eine allgemeine Aussage dazu, wie realistisch es ist, die notwendige Verstärkung bei einem Galerieneubau kostengünstiger zu erreichen, ist nicht möglich. Bei Neubaukosten von ca. 30'000CHF pro Laufmeter Galerie kann gemäss Tab. 36 maximal ein einstelliger Prozentsatz der Bausumme zusätzlich ausgegeben werden, damit die Mehrkosten durch die erreichte Risikoreduktion gerechtfertigt sind.

#### Empfehlung: Berücksichtigung der Schätzunsicherheit in Abhängigkeit der Mehrkosten

Eine Erhöhung der Bemessungswerte für die Lawineneinwirkungen mit einem projektbezogenen Beiwert, der die Unsicherheit in der Schätzung berücksichtigt, sollte in Betracht gezogen werden, sofern die Mehrkosten durch die in Tab. 36 überschläglich ermittelte Risikoreduktion gerechtfertigt werden können. Dies dürfte – wenn überhaupt – am ehesten bei Galerieneubauten erfüllt sein, oder wenn eine bestehende Galerie ohnehin verstärkt werden muss und der Beiwert nur noch beeinflusst, um wieviel der Tragwiderstand erhöht werden soll.

## 6.2.4 Risikobasiertes Bemessungskonzept für Galerieneubauten

Wie in Kapitel 6.2.2 diskutiert, gibt das aktuelle Bemessungskonzept für Lawingalerien mit den Festlegungen der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] im Grossen und Ganzen zufriedenstellende Ergebnisse für die Zuverlässigkeit der Tragwerke. Zwar sind die rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeiten je nach Bedeutung der Galerien tendenziell eher hoch, der Vergleich mit dem beobachteten Sicherheitsniveau zeigt aber, dass offenbar versteckte Sicherheiten existieren, die zu einer höheren Zuverlässigkeit der Galerien im Feld führen. Dennoch ist es zumindest denkbar, dass die Sicherheit von Galeriebauten an Standorten mit hohem Verkehrsaufkommen niedriger ist als angesichts der hohen Konsequenzen eines Tragwerksversagens optimal wäre.

Eine differenziertere Bemessung in Abhängigkeit der Konsequenzklasse eines Tragwerks kann mit der Einführung eines risikobasierten Bemessungskonzeptes erreicht werden. Ein solches Konzept wurde bereits für die Bemessung von Steinschlag-Schutzgalerien vorgeschlagen [29]. Die folgenden Gründe könnten dafürsprechen, ein risikobasiertes Konzept zur Bemessung von Lawinengalerien einzuführen:

- Eine differenziertere Festlegung der (Ziel-)Zuverlässigkeit in Abhängigkeit des standortspezifischen Verkehrsaufkommens bzw. der daraus resultierenden Bedeutung der Galerie wird angestrebt
- Nach einer erfolgreichen Reduktion der aktuell vorhandenen versteckten Sicherheiten sollen zusätzliche, explizite Sicherheiten eingeführt werden, um auch an Standorten mit hohem Verkehrsaufkommen ein akzeptables Sicherheitsniveau zu erreichen.
- Falls ein risikobasiertes Bemessungskonzept für Steinschlag-Schutzgalerien eingeführt wird, ist ein entsprechender Ansatz für Lawinengalerien schon aus Gründen der Konsistenz zwischen den beiden Bemessungssituationen ebenfalls sinnvoll.

Ein einfaches risikobasiertes Sicherheitskonzept für Lawinengalerien basiert auf den folgenden zwei Schritten:

- Zuerst wird in Abhängigkeit der Konsequenzen eines Tragwerksversagens die optimale (Ziel-)Zuverlässigkeit bestimmt
- Anschliessend wird unter Berücksichtigung der Streuung von Lawineneinwirkungen ein angemessener Lastbeiwert ermittelt, um die Ziel-Zuverlässigkeit zu erreichen.

Der erste Schritt ist in Kapitel 2.2.2 dieses Berichts ausführlich beschrieben. Tab. 37 ist aus diesem Kapitel entnommen. Die Wahl der Konsequenzklasse basiert auf einer Berechnung des Sach- und Personenrisikos durch ein Versagen der Galerie im Ereignisfall; sie wird vor allem durch das Verkehrsaufkommen auf der durch die Galerie geschützten Strasse bestimmt (siehe Tab. 4 bzw. Tab. 5 in Kapitel 2.2.2).

**Tab. 37** Optimale Versagenswahrscheinlichkeit für neue Lawinenschutzgalerien in Abhängigkeit der Konsequenzklasse (siehe Kapitel 2.2.2 für Details).

		Konsequenzen eines Tragwerksversagens		
		gering: $\rho < 2$	moderat: $2 < \rho < 5$	gross: $5 < \rho < 10$
Zuverlässigkeitsindex $\beta$	[-]	3.1	3.3	3.7
Versagenswahrscheinlichkeit $P_f$	[1/Jahr]	$10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$
Wiederkehrperiode	[Jahre]	1'000	2'000	10'000

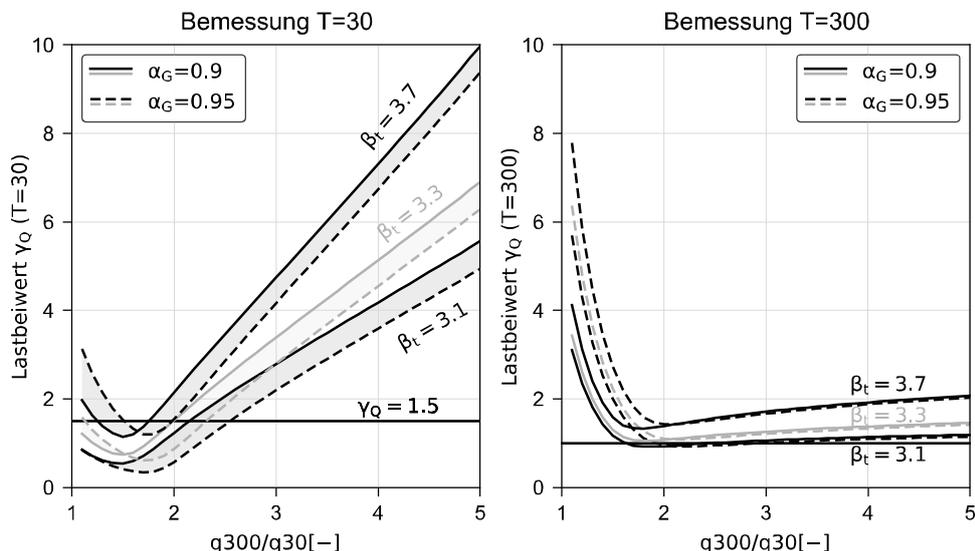
Der zweite Schritt ist die Festlegung eines angemessenen Lastbeiwerts  $\gamma_Q$ , der neben der Zielzuverlässigkeit gemäss Tab. 37 auch die Streuung der Lawineneinwirkung angemessen berücksichtigt. Um dies zu erreichen, wird der in Kapitel 2.3 beschriebene Ansatz umgekehrt angewendet: Anstatt mit einem gegebenen Lastbeiwert von  $\gamma_Q = 1.5$  die Zuverlässigkeit der Bemessung für ein 30-jähriges Ereignis zu berechnen, wird nun der erforderliche Lastbeiwert für eine gegebene Ziel-Zuverlässigkeit gesucht. Das Ergebnis dieser Optimierung ist in Abb. 61 dargestellt; relevant ist jeweils der aufsteigende Teil der Kurven ab einem Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$  von ca. 1.5.

Betrachtet man zunächst die linke Grafik, in der der optimale Lastbeiwert für die Bemessung auf das «normale», d.h. auf das 30-jährige Ereignis angegeben ist, so steigt  $\gamma_Q$  mit der Ziel-Zuverlässigkeit  $\beta_t$ , mit der Streuung der Lawineneinwirkung (Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$  zwischen dem 300-jährigen und dem 30-jährigen Ereignis) und mit dem Anteil der Lawineneinwirkung an der totalen Last (sinkender Anteil  $\alpha_G$  der ruhenden Last). Da  $\alpha_G$  generell eher schwer zu interpretieren ist, könnte man ein risikobasiertes Bemessungskonzept auch durch die Annahme eines festen Wertes vereinfachen, z.B. indem unabhängig von der Bemessungssituation immer die Kurve für  $\alpha_G = 0.90$  oder die

für  $\alpha_G = 0.95$  verwendet. Ansonsten kann das Verhältnis wie in Kapitel 3.5.4 beschrieben unter Berücksichtigung der Streuung (Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$ ) direkt aus dem Verhältnis  $\chi = G_k / (G_k + Q_k)$  der charakteristischen Werte ermittelt werden.

Wenn die Lawineneinwirkung wenig streut, genügt die heute übliche Bemessung auf das 30-jährige Ereignis mit einem Lastbeiwert von  $\gamma_Q = 1.5$ , um das geforderte Sicherheitsniveau zu erreichen. Dies gilt insbesondere für die niedrigste Konsequenzklasse mit einer Ziel-Zuverlässigkeit von  $\beta_i = 3.1$ , was einer jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit von  $P_f \approx 10^{-3}$  entspricht. Bei höheren Ziel-Zuverlässigkeiten und Verhältnissen  $q_{300}/q_{30}$  nimmt der erforderliche Lastbeiwert schnell sehr hohe Werte an. Praxisrelevant dürften aber insbesondere Bemessungssituationen mit einem Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$  bis etwa 2.5 sein; in diesem Bereich wird der Sicherheitsbeiwert gegenüber dem heutigen Niveau maximal etwa verdoppelt. (Höhere Werte  $q_{300}/q_{30} > 2.5$  als Zeichen für eine grosse Streuung der Lawineneinwirkung sind vor allem dort zu erwarten, wo die Lawineneinwirkungen selbst eher niedrig ist, siehe Kapitel 3.4.2 für Details).

Die rechte Seite von Abb. 61 zeigt der Vollständigkeit halber auch den Lastbeiwert, den man in einer Bemessung auf das 300-jährige Ereignis anwenden müsste, um die Ziel-Zuverlässigkeit für die drei Konsequenzklassen zu erreichen. Da die Bemessung auf das 300-jährige Ereignis als aussergewöhnliche Bemessungssituation gemäss SIA 260 [5] gilt, sind Sicherheitsbeiwerte auf der Lastseite hier nicht vorgesehen und die Festlegung eines Lastbeiwertes  $\gamma_Q$  ergibt keinen Sinn. Weil das 300-jährige Ereignis durch die Abhängigkeit vom Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$  auch auf der linken Seite von Abb. 61 für die Bemessung auf das 30-jährige Ereignis bereits einfließt, ist es im risikobasierten Bemessungskonzept aber auch nicht notwendig, für beide Situationen einen spezifischen Lastbeiwert festzulegen; die Kalibrierung des Lastbeiwertes  $\gamma_Q$  für das 30-jährige Ereignis genügt, um das geforderte, optimale Sicherheitsniveau zu erreichen. Die Grafik auf der rechten Seite zeigt aber schön, dass die Festlegung des charakteristischen Wertes als 300-jährige Ereignis für die «aussergewöhnliche» Bemessungssituation vor allem für stark streuende Einwirkungen ein wesentliches Sicherheitselement ist, das zumindest für die niedrigste Ziel-Zuverlässigkeit  $\beta_i = 3.1$  bereits (beinahe) ausreicht, um das geforderte Sicherheitsniveau zu erreichen.



**Abb. 61** Optimaler Lastbeiwert  $\gamma_Q$  in Abhängigkeit der der Streuung in der Lawineneinwirkung (Verhältnis  $q_{300}/q_{30}$ ) für die Bemessung auf das 30-jährige Ereignis (links) bzw. informativ auch für das 300-jährige Ereignis (rechts) mit einer vorgegeben Ziel-Zuverlässigkeit  $\beta_i$  gemäss Tab. 37.

Für ein robustes und praxistaugliches, risikobasiertes Bemessungskonzept sollten Tab. 37 und Abb. 61 (linke Seite) noch wie folgt ergänzt werden:

- Klare Vorgaben zur Wahl der Konsequenzklasse (siehe Kapitel 2.2.2)
- Ermittlung der Einwirkungen im 30-jährigen und im 300-jährigen Ereignis wie bisher
- Lastbeiwert  $\gamma_Q$  gemäss Abb. 61 nur für die 30-jährige Bemessung (linke Grafik)
- Für  $q_{300}/q_{30} < 1.5$  gilt immer  $\gamma_Q = 1.5$  (absteigender Teil der Kurven nicht relevant)
- Generell Beschränkung des Lastbeiwerts nach unten auf mindestens  $\gamma_Q = 1.5$
- Zusätzlich zum 30-jährigen Ereignis auch Bemessung auf das 300-jährige Ereignis als aussergewöhnliche Einwirkung (d.h. ohne Lastbeiwert), z.B. um Situationen abzudecken, in denen die 30-jährige Lawine die Galerie nicht erreicht.
- Evtl. zusätzliche Berücksichtigung eines «Schätzfaktors»  $SF$  gemäss Kapitel 6.2.3

Die y-Achse der Grafiken in Abb. 61 und somit der Lastbeiwert  $\gamma_Q$  berücksichtigen nur die natürliche Streuung der Lawineneinwirkung und nicht die mit ihrer Beurteilung verbundenen (Schätz-) Unsicherheiten. Um zu beurteilen, ob eine zusätzliche Erhöhung der Einwirkungen um einen Beiwert für die Unsicherheiten in der Schätzung effizient ist, können mit dem risikobasierten Bemessungskonzept erfolgen. Tab. 36 ist nur indikativ für einen Beiwert von 1.5.

#### Empfehlung: Erstellung eines risikobasierten Bemessungskonzeptes

Die Einführung eines risikobasierten Bemessungskonzeptes zur optimalen Wahl des Lastbeiwertes  $\gamma_Q$ , wie in diesem Kapitel beschrieben, kann aus heutiger Sicht vor allem für Galeriestandorte mit hohem Verkehrsaufkommen und entsprechend grossen Konsequenzen eines Tragwerksversagens von Interesse sein. In Zukunft könnten noch weitere Gründe für die Einführung eines solchen Konzeptes sprechen, z.B. wenn die heute vorhandenen «hidden safeties» erfolgreich reduziert wurden, oder aus Konsistenzgründen, wenn ein risikobasiertes Bemessungskonzept wie für Steinschlag-Schutzgalerien eingeführt wird [29].

## 6.2.5 Kombinationen von Lawineneinwirkungen

Im Folgenden werden die Regeln zur Kombination von Lawineneinwirkungen gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] diskutiert. Der Fokus liegt hierbei auf der Kombination unterschiedlicher Lawineneinwirkungen

### *Kombination mit anderen Einwirkungen*

Die Lawineneinwirkungen gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] werden im Rahmen der Bemessung mit weiteren ständigen oder veränderlichen Einwirkungen kombiniert. Hierbei kommen grundsätzlich die Regeln zur Lastkombination der SIA 260 [5] zur Anwendung. Für die Kombination mehrerer veränderlichen Einwirkungen werden hierfür Kombinationsbeiwerte  $\psi_0$ ,  $\psi_1$  oder  $\psi_2$  verwendet, um zu berücksichtigen, dass verschiedene Einwirkungen in der Regel nicht gleichzeitig ihren Extremwert annehmen.

In den meisten Fällen dürfte die Lawineneinwirkung als Leiteinwirkung massgebend für die Bemessung eines Galerietragwerks sein; die Kombinationsbeiwerte für die übrigen (Begleit-)Einwirkungen können in diesem Fall aus der SIA 260 [5] entnommen werden. Für Lastkombinationen, bei denen die Lawineneinwirkung als Begleiteinwirkung angesetzt wird, enthält die ASTRA-Richtlinie 12007 [1] eine Tabelle mit Richtwerten für die Reduktionsbeiwerte, wobei direkt Bezug auf die Fälle 1 bis 8 mit ihren ruhenden und dynamischen Einwirkungen genommen wird. Die Angaben in dieser Tabelle sind an die Vorgaben der SIA 260 [5] angelehnt und nicht durch quantitative Analysen abgestützt. In der Praxis dürften sie aber ohnehin nur in wenigen Einwirkungskombinationen zur Anwendung kommen bzw. für die Bemessung der Galerie massgebend werden. Die beiden relevantesten Fälle mit einer Lawineneinwirkung als Begleiteinwirkung – Die Bemessungssituation «Fahrzeuganprall» und die Bemessung von kombinierten Steinschlag- und Lawinenschutzgalerien – sind in der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] explizit erwähnt.

Für die Bemessungssituation «Fahrzeuganprall» wird empfohlen, lediglich die ruhenden Einwirkungen einer Lawinenablagerung auf dem Galeriedach (d.h. Fall 4) als Begleiteinwirkung zu berücksichtigen, wobei diese Einwirkung mit einem Kombinationsbeiwert  $\psi_2 = 0.2$  (als Richtwert) abgemindert werden darf. Diese Abminderung ist grundsätzlich sinnvoll, weil ein Fahrzeuganprall im Winter zwar möglich ist, aber nicht unbedingt in dem Winter mit den maximalen Lawinenablagerungen geschehen muss. Gemäss einer Fussnote in der Tabelle mit Reduktionsbeiwerten der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] sollte  $\psi_2$  als Mittelwert über mehrere Winter bestimmt werden, was standortspezifische Diskussionen erleichtert. Ob der vorgeschlagene Kombinationsbeiwert von  $\psi_2 = 0.2$  angemessen ist, kann theoretisch mit einer probabilistischen Analyse zur (zufälligen) Lastkombination bestimmt werden, wenn man annimmt, dass Lawineneinwirkung und Fahrzeuganprall unabhängig voneinander sind. Betrachtet man Szenarien wie z.B. das Entgleisen eines Zuges aufgrund einer überdurchschnittlich grossen Lawinenablagerung, ist diese Unabhängigkeit jedoch nicht mehr gegeben.

Für Galerien, die sowohl dem Lawinen- als auch dem Steinschlagschutz dienen, sind die beiden Einwirkungen gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] nicht gleichzeitig zu berücksichtigen. Auch diese Regelung ergibt Sinn, weil maximale Einwirkungen aus den beiden Naturgefahren im Jahresverlauf zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu erwarten sind. Allerdings können (kleinere) Felsblöcke von einer Lawine mittransportiert werden und die dynamische Lawineneinwirkung erhöhen.

Eine wichtige Grundannahme für die Verwendung der Kombinationsbeiwerte und -Regeln ist die statistische Unabhängigkeit der Begleiteinwirkung von der Leiteinwirkung. Für die Kombination mit anderen Einwirkungen (z.B. Wind, Fahrzeuganprall) ist diese gegeben, nicht aber für die Kombination verschiedener Lawineneinwirkungen untereinander.

#### *Kombination verschiedener Lawineneinwirkungen*

Die Kombination unterschiedlicher Lawineneinwirkungen wird durch die Fälle 1 bis 8 gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] definiert. Verschiedene Einwirkungen (z.B. ruhende und dynamische Einwirkungen in Fall 3) können hierbei grundsätzlich nicht als statistisch unabhängig betrachtet werden, weshalb die üblichen Methoden zur Lastkombination im Kontext der Normenkalibrierung nicht zur Anwendung kommen können.

Welche Einwirkungen gleichzeitig auftreten, sollte deshalb in den Vorgaben bzw. Fällen der ASTRA-Richtlinie und/oder standortspezifisch vom Lawinenexperten festgelegt werden. Für die Tragwerksbemessung sollten alle diese Einwirkungen gemeinsam entweder als Leit- oder Begleiteinwirkung angesetzt werden, d.h. als «Einwirkungsgruppe» gemäss Definition der SIA 261 [6]. Auch die natürlich abgelagerte Schneedecke wird sinnvollerweise vom Lawinenexperten festgelegt bzw. in die Lawinenablagerung integriert und fällt in dieselbe Einwirkungsgruppe. Dasselbe gilt für die Erhöhung des Erddrucks durch die (ruhenden) Einwirkungen aus Lawinenablagerungen und/oder natürlich abgelagertem Schnee.

Kombinationsbeiwerte  $\psi$  im Sinne der SIA 260 [5] werden nur benötigt, wenn das 30-jährige Ereignis der Lawineneinwirkungen mit einer anderen veränderlichen Einwirkung kombiniert wird. In der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] gibt es hierzu zum Teil widersprüchliche Aussagen, wie im Folgenden für die im Rahmen dieser Untersuchung betrachteten Fälle 2 und 3 diskutiert wird.

Fall 2 beschreibt Einwirkungen aus einer Fliesslawine (dynamische Einwirkungen) über einem schneebedeckten Galeriedach (natürlich abgelagerte Schneedecke, ruhende Einwirkung). Gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] sind beide Einwirkungen gemeinsam entweder als Leit- oder als Begleiteinwirkung anzusetzen. Wie oben bereits diskutiert, ist dies für die Tragwerksbemessung durchaus sinnvoll, weil es sich nicht um eine Lastkombination unabhängiger Einwirkungen im klassischen Sinne handelt. Bei der Bestimmung der ruhenden Einwirkungen sollte der Lawinenexperte allerdings berücksichtigen, dass die Grösse der dynamischen Einwirkungen neben der Schneelage

auch von vielen anderen zufälligen Faktoren abhängt und die beiden Einwirkungskomponenten somit vermutlich nur leicht korreliert sein dürften.

Von Interesse ist für Fall 2 die Schneehöhen-Verteilung «zum Lawinenzeitpunkt». Diese Verteilung unterscheidet sich zwar konzeptionell von der üblicherweise im Kontext der Tragwerksnormen verwendeten Verteilung des jährlichen Maximums der Schneehöhe, kann gemäss den in Kapitel 4.3 aufgeführten Analysen aber zumindest durch diese angenähert werden. Datenreihen zum jährlichen Maximum der Schneehöhe oder noch besser des zugehörigen Wasserwerts der Schneedecke sind für viele Messstationen verfügbar und können mit einer Extremwertstatistik ausgewertet werden. Zur Kombination mit den dynamischen Einwirkungen einer 30-jährigen und vereinfachend auch einer 300-jährigen Lawine ist es für Fall 2 ausreichend, das 10-jährige Maximum der natürlich abgelagerten Schneedecke zu bestimmen. Ein möglicher Einfluss der Wind- oder Sonnenexposition ist durch den Lawinenexperten zu berücksichtigen.

Schwieriger ist die Einwirkungskombination in Fall 3, für den eine Fliesslawine über abgelagertem Lawinenschnee als ruhende Einwirkung betrachtet wird. Gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] können «die Einwirkungen infolge abgelagertem Lawinenschnee und der Fliesslawine [...] nicht zusammen Leiteinwirkung sein». Die Idee hinter diesem Satz ist vermutlich, dass für Fall 3 nicht dieselbe (maximale) Lawinenablagerung angesetzt werden soll, die auch in Fall 4 als alleinige, ruhende Einwirkung zur Anwendung kommt.

In Kapitel 4.4 und 4.5 wurde dies zum Beispiel so gelöst, dass Fall 3 und 4 für dieselben Kombinationen mehrerer Lawinenereignisse bestimmt wurden, allerdings zu unterschiedlichen Zeitpunkten: Für Fall 3 definiert die «letzte» Lawine die dynamischen Einwirkungen über einer ruhenden Lawinenablagerung aus vorhergehenden Lawinen. Für Fall 4 wird die Lawinenablagerung durch dieselbe «letzte» Lawine um eine weitere Ablagerung erhöht. Durch dieses Vorgehen ergeben sich automatisch niedrigere Lawinenablagerungen in Fall 3, was der Grundidee zur Definition der beiden Fälle in der ASTRA-Richtlinie entspricht. Allerdings ist der Ansatz nur für Standorte anwendbar, bei denen sich die maximale Lawinenablagerung aus einigen wenigen grösseren Einzellawinen ergibt und nicht als Summe vieler kleinerer Schneescherben, deren dynamische Einwirkungen vernachlässigbar sind. Auch funktioniert das Vorgehen nur mit einem probabilistischen Modell, weil für die maximale Lawinenablagerung in Fall 4 eine andere «letzte» Lawine massgebend sein kann als für die maximale dynamischen Einwirkungen in Fall 3; so ist z.B. im Falle einer Umlenkung vor allem die Geschwindigkeit der Lawine relevant, eine Lawine mit hoher Geschwindigkeit lagert aber nur wenig Schnee ab.

Im Kontext des Sicherheitskonzeptes der SIA-Normen mit den entsprechenden Bedeutungen der Begriffe «Leit- und Begleiteinwirkung» ist der oben zitierte Satz aber trotz der sinnvollen impliziten Bedeutung sachlich nicht korrekt bzw. zumindest unglücklich formuliert. Für die Bemessung sind alle ruhenden und dynamischen Einwirkungen in Fall 3 gemeinsam entweder als Leit- oder als Begleiteinwirkung anzusetzen. Die sinnvolle Kombination einer Fliesslawine mit einer (nicht maximalen) Lawinenablagerung liegt in der Verantwortung des Lawinenexperten; dieser kann auch die komplizierten Wechselwirkungen – z.B. zur Veränderung der Hanggeometrie durch abgelagerten Lawinenschnee – besser überblicken.

Bei Galeriestandorten, für die die Umlenkkraft eine wichtige Rolle für die Bemessung spielt, verdienen die «geometrischen» Unsicherheiten bezüglich der Lage des Umlenkpunktes und der Grösse des Umlenkwinkels in Fall 3 besondere Aufmerksamkeit. Wie in Kapitel 4.4 am Beispiel der Galerie am Oberalppass gezeigt wurde, können diese einen wesentlichen Beitrag zur Schätzunsicherheit der Einwirkungen in Fall 3 haben; entsprechend gross ist der gutachterliche Spielraum bei der Festlegung der Hanggeometrie und der daraus resultierenden ruhenden und dynamischen Einwirkungen. Bei Galerieneubauten ist zudem selbst die finale Hanggeometrie ohne Schnee nicht in jedem Fall bekannt, wenn das Lawinengutachten erstellt wird. Möglichst einheitliche Vorgaben bezüglich der zu treffenden Annahmen wären hier im Sinne von einheitlichen Beurteilungsgrundlagen also durchaus wünschenswert, die Zusammenhänge sind aber

komplex und vermutlich auch sehr standortsspezifisch. Aus der vorliegenden Untersuchung lassen sich leider keine einheitlichen Empfehlungen ableiten

Die Grundsätze und Berechnungsformeln der Richtlinie basieren zudem auf Gefahrenbeurteilungen, die mit 1d-Simulationsmodellen durchgeführt werden. Die heute verwendeten 2d-Simulationsmodelle erlauben die Ermittlung von flächigen Verteilungen der Geschwindigkeit und Fliesshöhe im Bereich einer Galerie. Dies kann Auswirkungen z.B. auf die Grösse und Verteilung der Umlenkkräfte haben. Eine Überprüfung der Berechnungsformeln bzw. ihrer Anwendung mit modernen Lawinensimulationsmodellen wäre wünschenswert.

In der vorliegenden Untersuchung nicht explizit betrachtet wurden die Fälle 5 bis 8 der ASTRA-Richtlinie 12007 [1]. Auch hier gilt grundsätzlich, dass die Kombination verschiedener Lawineneinwirkungen grundsätzlich als «Einwirkungsgruppe» durch den Lawinenexperten festzulegen ist. Bei Fall 5 (statischer Schneedruck auf die talseitige Galeriefront) und Fall 7 (Kriechdrücke auf das Galeriedach) handelt es sich um natürliche «Erweiterungen» von Fall 4 (Lawinenablagerung ruhend) und auch in Fall 6 (Lawinendrucke auf die talseitige Galeriefront) sollte mindestens eine natürlich abgelagerte Schneedecke auf dem Galeriedach angesetzt werden. Anders verhält es sich bei Fall 8 (Lawinenaufprall auf Galeriedach), bei dem eine bestehende Schneedecke auf dem Galeriedach günstig wirkt, weil sie den Aufprall der Lawine dämpft.

Empfehlung: Alle Lawineneinwirkungen als Leit- oder Begleiteinwirkung

Für die Bemessung sind unabhängig vom betrachteten Fall der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] alle ruhenden und dynamischen Einwirkungen aus Lawinen und Schnee (inkl. natürlich abgelagerter Schneedecke) gemeinsam entweder als Leit- oder als Begleiteinwirkung anzusetzen. Die sinnvolle Kombination der verschiedenen Einwirkungs-Komponenten liegt in der Verantwortung des Lawinenexperten.

Empfehlung: Ruhende Einwirkungen aus natürlich abgelagerter Schneedecke in Fall 2

Für die ruhende Einwirkung in Fall 2 ist die Höhe der Schneedecke zum Lawinenzeitpunkt relevant. Als Näherung kann die Verteilung des jährlichen Maximums der Schneedecke aus Datenreihen zur Schneehöhe bzw. zum Wasseräquivalent der Schneedecke bestimmt werden. Zur Kombination mit einer 30-jährigen Fliesslawine (und näherungsweise auch mit der 300-jährigen Fliesslawine) genügt es, das 10-jährige Maximum der Schneelast zu bestimmen. Auf die Festlegung von Kombinationsbeiwerten für die natürlich abgelagerte Schneedecke kann verzichtet werden, da sie in dieselbe Einwirkungsgruppe fallen wie die übrigen Lawineneinwirkungen.

Empfehlung: Möglichst einheitliche Annahmen zu Hanggeometrie in Fall 3

So weit möglich bzw. sinnvoll, sollten einheitliche Grundlagen bezüglich der Annahmen zur Hanggeometrie (Umlenkpunkt und -Winkel) für die Lawinenexperten bereitgestellt werden. Dies erfordert einen Trade-off zwischen der bestmöglichen Beurteilung an einem bestimmten Standort und einer einheitlichen Beurteilung durch verschiedenen Lawinenexperten. Aus der vorliegenden Untersuchung lassen sich leider keine einheitlichen Empfehlungen ableiten.

Empfehlung: Überprüfung der Vorgaben für den Einsatz von 2d-Simulationsmodellen

Die Grundsätze und Berechnungsformeln der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] wurden für 1d-Lawinenmodelle entwickelt und sollten für den heute üblichen Einsatz von 2d-Simulationsmodellen überprüft werden, siehe Kapitel 6.4.

## 6.3 Umgang mit bestehenden Galerien

Bestehende Bauten unterscheiden sich aus Sicht der Risikoanalyse in zweierlei Hinsicht von Neubauten: Zum einen sind die Kosten einer Verstärkung bei einem bestehenden

Tragwerk meist deutlich höher als die einer vergleichbaren Erhöhung der Sicherheit bei der Bemessung eines neuen Tragwerks. Bei gleichen Konsequenzen eines Tragwerksversagens kann hierdurch ein niedrigeres Sicherheitsniveau bestehender Bauten gerechtfertigt werden, siehe Kapitel 6.3.1 für Details. Zum anderen können bei einem bestehenden Tragwerk standortspezifische Daten verwendet werden, um die Bemessungswerte der Einwirkungen und auch der Widerstände zu aktualisieren. Im Folgenden wird nur die Einwirkungsseite diskutiert.

Fokus der Diskussionen in Kapitel 6.3.2 und 6.3.3 ist die Verwendung und Sammlung von Daten zu beobachteten Einwirkungen (z.B. Schneehöhen, Kartierung von Lawineneignissen im Lawinenkataster) für bestehende Galerien, da diese in der Vergangenheit eher vernachlässigt wurde. Für Galerieneubauten sind Beobachtungen im Feld natürlich ebenfalls hilfreich; hier gelten grundsätzlich dieselben Überlegungen wie bei bestehenden Galerien.

### 6.3.1 Risikobasierte Festlegung der Bemessungseinwirkungen

Die SIA 269 [10], Anhang B, erlaubt für bestehende Bauten bereits heute, die Ziel-Zuverlässigkeit eines Tragwerks risikobasiert festzulegen und so die Massnahmeneffizienz einer Verstärkung bestehender Tragwerke sowie die Konsequenzen eines Tragwerksversagens angemessen zu berücksichtigen. Der Ansatz ist in Kapitel 2.2.1 dieses Berichts beschrieben, siehe vor allem Tab. 2.

Ein Problem bei der Anwendung dieses Vorgehens auf bestehende Lawinengalerien ist, dass das rechnerische, implizite Sicherheitsniveau der Bemessung auch bei Galerie-Neubauten schon relativ niedrig ist; dasselbe gilt für die risiko-optimierten Ziel-Zuverlässigkeiten gemäss Tab. 37. Versagens-Wahrscheinlichkeiten in der Grössenordnung von  $10^{-4}$  bis  $10^{-3}$  pro Jahr liegen bereits am oberen Ende der Vorgaben in Anhang B der SIA 269 [10] (vgl. Tab. 2 in Kapitel 2.2.1) und die zugehörigen Ziel-Zuverlässigkeiten gemäss Tab. 37 können somit auch für bestehende Bauwerke selbst bei sehr schlechter Massnahmeneffizienz nicht mehr unterschritten werden.

Eventuell vorhandene «hidden safeties» bringen in diesem Kontext meist keine Erleichterung: Da es sich per Definition um implizite («versteckte») Sicherheiten handelt, können diese auch bei einem bestehenden Bauwerk in der Regel nicht explizit berücksichtigt werden. Möglich ist allenfalls eine Berücksichtigung von standortspezifischen Daten, sei es aus einer Zustandserfassung des Bauwerks oder aus Aufzeichnungen zu früheren, beobachteten Lawineneinwirkungen (Kapitel 6.3.2).

Angesichts der teils sehr hohen Kosten von Verstärkungsmassnahmen könnte es vor allem an Standorten mit geringem Verkehrsaufkommen durchaus optimal sein, für bestehende Galeriebauten auch ein niedrigeres Sicherheitsniveau zu akzeptieren als gemäss Anhang B der SIA 269 [10] vorgegeben. Im Kontext der Normenkalibrierung bzw. der zuverlässigkeitsbasierten Tragwerksbemessung sind Versagenswahrscheinlichkeiten die höher sind als ca.  $10^{-3}$  pro Jahr zwar nicht unbedingt üblich. Andererseits wird bei der Entscheidung über Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren das 1000-jährige Ereignis in der Regel überhaupt nicht herangezogen. Dies kann zu dem Paradox führen, dass ein offener Strassenabschnitt, der nur durch sehr seltene Naturgefahren-Ereignisse gefährdet ist, überhaupt nicht geschützt wird, während eine bestehende Galerie mit einer entsprechenden Versagens-Wahrscheinlichkeit unabhängig von der Kosteneffizienz dieser Massnahme verstärkt werden muss.

Ein möglicher Ansatz wäre, dem Bauherrn bzw. Galerieeigentümer die Möglichkeit zu geben, bei bestehenden Galerien auch höhere rechnerische Versagens-Wahrscheinlichkeiten zu akzeptieren, wenn dies aufgrund einer standortspezifischen Risikoanalyse gerechtfertigt werden kann. Diese Regelung wäre vergleichbar mit dem heute gemäss ASTRA-Richtlinie 12007 [1] zulässigen Verzicht auf die Bemessung mit dem 300-jährigen Ereignis, allerdings bezieht sie sich direkt auf das relevante, kritische Ereignis (Galerieversagen) und nicht auf die Einwirkungsszenarien, die ein solches Ereignis

verursachen könnten. Zudem empfiehlt es sich, diese Ausnahme nur für bestehende Tragwerke zu erlauben und nicht für Galerieneubauten.

#### Empfehlung: Risikobasierte Ziel-Zuverlässigkeit für bestehende Galerien

Für Bestandsbauten kann bereits heute die Ziel-Zuverlässigkeit des Tragwerks gemäss Anhang B der SIA 269 [10] risikobasiert festgelegt werden. Für bestehende Lawinengalerien kann im Einzelfall aber ggf. sogar noch ein niedrigeres Sicherheitsniveau akzeptiert werden, sofern dies mit einer standortspezifischen Risikoanalyse gerechtfertigt wird.

### 6.3.2 Aktualisierung mit Daten zu beobachteten Einwirkungen

Neben der oben beschriebenen risikobasierten Festlegung von Bemessungswerten erlaubt die SIA 269 [10] auch, den charakteristischen Wert der Einwirkung bzw. den entsprechenden Bemessungswert mit Daten zu im Feld beobachteten Einwirkungen am Galeriestandort zu aktualisieren. Beide Ansätze (risikobasierte Festlegung der Bemessungswerte und Aktualisierung der Einwirkungen) können auch problemlos kombiniert werden.

Falls die standortspezifischen Bemessungswerte als «Überprüfungswerte» gemäss Anhang C der SIA 269 [10] bestimmt werden, sollte der Sensitivitätsfaktor  $\alpha_E$  mit Hilfe von FORM-Analysen (First Order Reliability Method) oder basierend auf den in diesem Bericht vorgestellten Berechnungen festgelegt werden, siehe z.B. Abb. 21 in Kapitel 3.5.4. Der in Artikel C.5 SIA 269 [10] empfohlene Wert für Leiteinwirkungen,  $\alpha_E = 0.7$ , unterschätzt tendenziell die Bedeutung der Lawineneinwirkungen für die Zuverlässigkeit des Tragwerks und führt zu Ergebnissen, die nicht auf der sicheren Seite liegen.

Die Aktualisierung von Lawineneinwirkungen rein auf statistischer Basis erfordert lange Datenreihen und ist somit nicht als realistisch einzustufen. Denkbar ist höchstens eine Aktualisierung mit den Methoden des Bayes'schen Updating, indem eine Beurteilung der zu erwartenden Einwirkungen durch einen Lawinenexperten als «Prior» mit zusätzlichen Daten aus Beobachtungen im Feld aktualisiert wird. Dieses Vorgehen wurde in Kapitel 5 angewendet, um das Potenzial eines solchen «expliziten» Vorgehens zur Berücksichtigung von Daten zu beobachteten Einwirkungen zu untersuchen.

Voraussetzung ist das Vorliegen einer Datenreihe mit Angaben zum jährlichen Maximum der Lawineneinwirkung bzw. – in Jahren ohne grosse Einwirkungen – die Information, dass ein bestimmter Schwellenwert nicht überschritten wurde. Entsprechende Empfehlungen zur Datensammlung sind in Kapitel 6.3.3 gegeben. Die detaillierte Berücksichtigung von Daten lediglich oberhalb eines definierten Schwellenwertes ist aber auch bei Vorliegen einer «vollständigen» Datenbasis angebracht, weil der Fokus auf dem oberen Schwanz der Verteilung liegt.

Formal gesehen müssten die Daten «neu» bzw. unabhängig von der als Prior dienenden Einschätzung des Lawinenexperten sein. Weil der Einfluss vergleichsweise kurzer Datenreihen auf die Beurteilung eines Extremwertes wie das 30-jährige Maximum aber intuitiv ohnehin kaum zu erfassen ist, spricht aus praktischer Sicht aber eher wenig dagegen, dass der Lawinenexperte die vorliegenden Daten bei seiner Einschätzung ebenfalls berücksichtigt. Eine gute Abstimmung mit den Experten, die das Bayes'sche Updating durchführen, ist hier jedoch zentral, um eine Verzerrung der Ergebnisse zu vermeiden.

Der explizite Ansatz zur Aktualisierung der Lawineneinwirkungen mit den Methoden der Bayes'schen Statistik kann frühestens ab  $N > 5$  Beobachtungsjahren empfohlen werden. Mit jedem zusätzlichen Beobachtungsjahr werden die Ergebnisse stabiler und der Einfluss der Daten auf die aktualisierten Einwirkungen nimmt zu. Wie gross der Effekt ist, hängt aber auch stark davon ab, wie «gut» bzw. realistisch der Prior, also die zugrundeliegende Einschätzung des Lawinenexperten ist; a priori ist dies in der Regel nur schwer zu beurteilen.

Wenn eine explizite Berücksichtigung der verfügbaren Daten nicht möglich oder sinnvoll ist – z.B. aufgrund von eher kurzen Datenreihen – können Informationen zu beobachteten Lawinenabgängen und -einwirkungen dennoch helfen, die gutachterliche Festlegung der Einwirkungen zu stützen. Gerade an Standorten, bei denen die Beurteilung der Einwirkung mit grossen Schätzunsicherheiten verbunden sind, können auch beschränkte Datenreihen helfen, die Situation im Feld besser zu erfassen, den gutachterlichen Spielraum einzuschränken und so die Einschätzung auch durch verschiedenen Experten zu vereinheitlichen.

Empfehlung: FORM-Alpha für Überprüfungswerte gemäss SIA 269, Anhang C

Falls die standortspezifischen Bemessungswerte als «Überprüfungswerte» gemäss Anhang C der SIA 269 [10] bestimmt werden, sollte der Sensitivitätsfaktor  $\alpha_E$  mit Hilfe von FORM-Analysen (First Order Reliability Method) oder basierend auf den in diesem Bericht vorgestellten Berechnungen festgelegt werden, siehe z.B. Abb. 21 in Kapitel 3.5.4.

Empfehlung: Berücksichtigung von Daten zur Aktualisierung von Lawineneinwirkungen

Verfügbare Daten zu beobachteten Lawineneinwirkungen (z.B. Schneehöhen, Ablagerungshöhen, Kartierung von beobachteten Lawinenabgängen im Lawinenkataster) sollten so gut wie möglich genutzt werden, um die Beurteilung der Einwirkungen abzustützen und/oder zu aktualisieren. Eine implizite Berücksichtigung als Grundlage für die Einschätzung durch einen Lawinenexperten ist in jedem Fall möglich. Bei Beobachtungszeiträumen von mehr als 5 Jahren kann zusätzlich auch ein expliziter Ansatz verfolgt werden, um die Expertenschätzung mit den Methoden der Bayes'schen Statistik zu aktualisieren. Je grösser der Beobachtungszeitraum, desto grösser ist das Potential eines solchen Bayes'schen Updating.

### 6.3.3 Empfehlung zur Datensammlung für bestehende Galerien

Eine systematische Datensammlung zu beobachteten Lawineneinwirkungen auf bestehende Galerien ist grundsätzlich immer eine gute Idee; dasselbe gilt für Standorte mit geplanten Galerieneubauten. Für eine gezielte Datensammlung ist es jedoch sinnvoll, die notwendigen Anstrengungen entsprechend dem Nutzen bzw. Potential der gesammelten Daten zu priorisieren. In einem mehrstufigen Ansatz müssen hierfür die folgenden zwei Fragen beantwortet werden:

- An welchen Standorten lohnt sich der Aufwand einer Datensammlung besonders?
- Welche Daten sollen jeweils gesammelt werden und wie kann dies erfolgen?

Die erste Frage stellt sich für Bauherren bzw. Eigentümer, die viele Galeriebauwerke besitzen und die Anstrengungen zur Datensammlung in diesem Portfolio priorisieren wollen. In dieser Situation gilt, dass eine systematische Datensammlung vor allem für jene Galeriebauwerke empfohlen wird, bei denen die Expertenschätzung der Lawineneinwirkung objektiv schwierig und entsprechend mit grossen Unsicherheiten verbunden ist. Ein möglicher Ansatz für ein «Unsicherheiten-Screening» in einem grösseren Galerieportfolio ist mit der Checkliste zur Abschätzung der Unsicherheit bei der Szenario-Bildung bzw. Gefahrenbeurteilung im PLANAT-Dokument zur Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen [33] gegeben. Besonders grosse Unsicherheiten gibt es z.B. an Standorten mit grosser Umlenkung, mit einem vertikalen Absatz oberhalb der Galerie oder mit einem sehr grossen Einzugsgebiet verbunden mit einer kanalisierten Sturzbahn. An Standorten mit geringeren Unsicherheiten kann ggf. auf eine systematische Datensammlung verzichtet werden.

Die zweite Frage sollte jeweils standortspezifisch für die im ersten Schritt ausgewählten Galeriebauten beantwortet werden. Relevant ist hier vor allem, ob für die Bemessung des Tragwerks eher ruhende oder eher dynamische Lawineneinwirkungen massgebend sind. Dies kann z.B. anhand der ursprünglichen bzw. der aktuellsten vorliegenden Bemessung sowie der zugrundeliegenden Festlegung der Einwirkungen durch einen Lawinenexperten

beurteilt werden. Auch eine direkte Einschätzung durch einen Lawinenexperten ohne detailliertes Lawinengutachten ist denkbar.

#### *Datensammlung zu ruhenden Lawineneinwirkungen*

An Standorten, an denen die Bemessung vor allem durch ruhende Einwirkungen aus Schnee- und Lawinenablagerungen auf dem Galeriedach dominiert wird, ist eine systematische Datensammlung vergleichsweise einfach. Das Ziel ist hier die Erstellung eines Datensatzes bzw. einer Datenreihe mit Angaben zum jährlichen Maximum der Schneehöhen auf dem Galeriedach für jeden Winter innerhalb des Beobachtungszeitraums. In «schneearmen» Wintern (relevant ist die Höhe Lawinenablagerungen auf dem Galeriedach) genügt es jedoch festzuhalten, dass die Schneehöhe unterhalb eines zuvor festgelegten Schwellenwertes liegt. Dieser Schwellenwert sollte sich an der gutachterlichen Festlegung zum 30-jährigen Ereignis der Lawinenablagerung orientieren, kann aber auch niedriger gewählt werden (z.B. in der Grössenordnung des 10-jährigen oder 20-jährigen Ereignisses). Im Vordergrund sollte hierbei die praktische Umsetzung bzw. Anwendung des Schwellenwertes stehen.

Ob der festgelegte Schwellenwert überschritten wird, kann ggf. einfach durch einen Augenschein geschätzt werden, z.B. durch Vergleich mit einem Foto, in dem eine entsprechende Schneeablagerung über dem Galeriedach eingezeichnet wird. Für eine genauere Beurteilung insbesondere bei längeren Galerien ist es auch denkbar, im Feld Markierungen an Stangen oder ähnlichem anzubringen, die sichtbar sein müssen, wenn die Schneehöhe unterhalb des angegebenen Schwellenwertes liegt. Wichtig ist in jedem Fall, das gewählte Vorgehen angemessen zu dokumentieren, um die Interpretation bzw. korrekte Verwendung der gesammelten Daten zu ermöglichen.

Wird der Schwellenwert überschritten, sollte ein Lawinenexperte kontaktiert werden, um den besten Zeitpunkt für eine detaillierte Kartierung der Schneehöhen im Feld zu bestimmen. Diese kann heute gut mit Hilfe eines Drohnenflugs erfolgen, siehe z.B. Abb. 14 in Kapitel 3.3.2 für die Aufnahmen am Oberalppass. Der Fehler, der durch eine Aufnahme ein paar Tage vor oder nach dem jährlichen Schneehöhen-Maximum entsteht, sollte in der Regel nicht allzu sehr ins Gewicht fallen, so dass ein einzelner Drohnenflug genügt. Relevanter ist eine Kontrolle der Hanggeometrie ohne Schnee im darauffolgenden Frühling, insbesondere an Standorten mit eher instabilen Hängen oberhalb der Galerie.

Die so gesammelten Daten können ab einem Beobachtungszeitraum von mehr als 5 Jahren gut verwendet werden, um mit dem in Kapitel 5 beschriebenen expliziten Ansatz unter Verwendung von Methoden der Bayes'schen Statistik die Einwirkungen auf die Galerie zu aktualisieren. Von Bedeutung ist hierbei prinzipiell jedes Beobachtungsjahr, d.h. inklusive der Winter, in denen der zuvor definierte Schwellenwert nicht überschritten wurde. Eine implizite Berücksichtigung der gesammelten Daten als Grundlage für die gutachterliche Festlegung in zukünftigen Lawinengutachten ist zwar auch bei kürzeren Zeiträumen möglich; hier sind aber vermutlich vor allem bzw. ausschliesslich die Jahre mit einer detaillierten Erfassung extremer Schneehöhen von Interesse.

#### *Datensammlung zu dynamischen Lawineneinwirkungen*

Für die Datensammlung an Standorten, in denen die dynamischen Lawineneinwirkungen dominierend sind, erübrigt sich die Festlegung eines Schwellenwertes; hier sollte grundsätzlich jedes relevante Lawineneignis erfasst werden. Ist in einem Winter keine Lawine über die Galerie geflossen, sollte jedoch auch dies explizit festgehalten werden.

Ein klassisches Lawinenkataster folgt grundsätzlich diesem Prinzip; in der Regel wurde bisher allerdings nur der Lawinenauslauf dokumentiert bzw. kartiert. Für die gutachterliche Festlegung der Lawineneinwirkung ist dies bereits eine nützliche Information, z.B. um die Plausibilität der lawinendynamischen Berechnungen zu überprüfen. Fernerkundungsmethoden erlauben heutzutage günstige und umfassendere Kartierungen. Wir empfehlen primär eine Kartierung mittels Drohnen, welche das Erfassen folgender Parameter erlaubt:

- Lawinenauslauf (sicherstellen, dass das Auslaufende kartiert wird)

- Fließbreite der Lawine;
- Ablagerungshöhen, Lawinenvolumen;
- Schneehöhe neben dem Lawinenzug;
- Anrissgebiet (Fläche, Höhe der Anrisskante, Anrissmächtigkeit)
- Lage der Sturzbahn

Zusätzlich sollte immer auch die Schneeart mitefassen werden (trocken/feucht/nass)

Quantitative Daten zur Beschreibung der dynamischen Einwirkungen – z.B. durch Messung der Fließhöhe und -Geschwindigkeit oder der auf die Galerie wirkenden Kräfte – können nur während des Lawineneignisses gesammelt werden und erfordern die vorgängige Installation entsprechender Messeinrichtungen, was mit deutlich grösserem Aufwand verbunden ist als die Dokumentation des Lawinenabgangs nach dem Ereignis. Denkbar sind Messsysteme wie Radar/Reissleinen zur Bestimmung der (Front-) Geschwindigkeit, Ultraschallsensoren o.ä. zum Messen der Fließhöhe, Überwachung der Auflagerkräfte (Ankerkräfte).

Die gesammelten Daten sollten stets mit einer systematischen Kartierung der zugehörigen Lawinenabgänge ergänzt werden.

#### Empfehlung: Systematische Datensammlung für bestehende Galerien

Eine systematische Datensammlung zu beobachteten Lawineneinwirkungen lohnt sich vor allem an Standorten, an denen die gutachterliche Festlegung der Einwirkungen besonders schwierig und die Schätzunsicherheiten entsprechend gross sind. Für die ausgewählten Standorte sollte zunächst geklärt werden, ob für die Bemessung des Tragwerks eher die ruhenden oder eher die dynamischen Einwirkungen massgebend werden, um den Fokus der Datensammlung entsprechend zu setzen. Ein mögliches Vorgehen ist oben für beide Fälle beschrieben. Das Ziel ist jeweils das Erstellen eines Datensatzes mit jährlichen Angaben zu den beobachteten maximalen Schneehöhen (für die ruhenden Einwirkungen) bzw. zu den beobachteten Lawineneignissen (für die dynamischen Einwirkungen). Werden in einem bestimmten Winter keinen nennenswerten Einwirkungen beobachtet, genügt es festzuhalten, dass die Schneehöhen unter einem zuvor definierten Schwellenwert lagen bzw. dass keine Lawine die Galerie erreicht hat.

## 6.4 Empfehlungen für zukünftige Forschung

Aus dem vorliegenden Forschungsbericht lassen sich eine Reihe von Empfehlungen für zukünftige Forschungsarbeiten ableiten. Diese lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen:

- Forschung mit Bezug zum Bemessungskonzept der ASTRA-Richtlinie 12007
  - Überarbeitung der Richtlinie basierend auf den Empfehlungen in diesem Bericht
  - Erarbeitung eines ergänzenden Handbuchs mit detaillierteren Erläuterungen
  - Umfrage unter Bemessungsingenieuren und Lawinenexperten zu offenen Fragen bei der Anwendung der Richtlinie in der Praxis
  - Erarbeitung von Empfehlungen zur Anwendung der Grundsätze und Rechenformeln gemäss Richtlinie im Zusammenhang mit 2d-Lawinensimulationsmodellen
  - Untersuchung zur Dämpfung der dynamischen Einwirkungen durch eine bestehende Lawinenablagerung oder natürlich abgelagerte Schneedecke
  - Erarbeitung von Methoden zur rechnerischen Ermittlung der Einwirkungen in Fall 8 (Lawinenaufprall auf das Galeriedach)
  - Probabilistische Analyse zur Lastkombination zwischen Lawineneinwirkungen und anderen der aussergewöhnlichen Einwirkung durch Fahrzeuganprall
- Forschung mit Bezug zum Monitoring von Lawineneinwirkung an bestehenden Galerien
  - Pilotprojekt zur systematischen Datensammlung an bestehenden Galerien
  - Systematische Aufnahme der Ablagerungshöhen nach Grossereignissen

Für eine Überarbeitung der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] enthält der vorliegende Bericht bereits einige konkrete Empfehlungen, siehe Kapitel 6.2 für Details. Weitere Anpassungen können sich aus den oben aufgeführten Forschungsempfehlungen ergeben. Um die Richtlinie schlank zu halten, kann es sinnvoll sein, detaillierte Erläuterungen und Empfehlungen in ein ergänzendes Dokument, z.B. im Sinne eines kurzen «Handbuchs» auszulagern. Die Zielgruppe für ein solches Handbuch wären sowohl anerkannte Lawinenexperten, die mit dem Erstellen eines Lawinengutachtens zur Ermittlung der Einwirkungen beauftragt sind, als auch Bauingenieure, die die Angaben der Lawinenexperten zur Projektierung neuer Galeriebauwerke oder zur Überprüfung bestehender Galerien verwenden. Ehe die Empfehlungen für die Praxis überarbeitet werden, empfiehlt sich eine Umfrage unter erfahrenen Personen dieser beiden Zielgruppen, um eventuelle Unklarheiten bei der Anwendung der bestehenden Richtlinie aufzudecken und im Rahmen der Überarbeitung beseitigen zu können.

Aus Sicht der Lawinenmodellierung hat sich seit der Erarbeitung der Rechenformeln der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] ein Wechsel von einfachen 1d-Berechnungen hin zur Verwendung von 2d-Simulationsmodellen vollzogen. Die neuen Modelle erlauben die Ermittlung von flächigen Verteilungen der Geschwindigkeit und der Fliesshöhe, die entlang der Strassenachse variieren. Dies kann Auswirkungen z.B. auf die Grösse und Verteilung der Umlenkkraft haben. Die Grundsätze und Berechnungsformeln der Richtlinie sollten deshalb für den Einsatz von 2d-Simulationsmodellen überprüft werden. Zudem braucht es praktische Empfehlungen zum Auslesen der Geschwindigkeiten und Fliesshöhen, z.B. als Maximal- oder Mittelwerte in einem 2d-Rechengitter, und zur Festlegung der Gitterweite.

Unabhängig vom Lawinensimulationsmodell stellt sich die Frage, ob bzw. wie stark die dynamischen Einwirkungen aus einer Flieslawine durch eine bestehende Lawinenablagerung oder eine natürlich abgelagerte Schneedecke gedämpft werden. Sowohl die Durchführung von Versuchen mit Schnee auf einem künstlichen «Galeriedach» als auch die Messung von realen Lawinenkennwerten auf einem Galeriedach sind leider sehr aufwändig, und die Interpretation der Messergebnisse ist schwierig [36]. Andererseits besteht bei der Erforschung dieser Frage möglicherweise ein grosses Potential zum besseren Verständnis und ggf. zur Reduktion der «hidden safeties» in der Bemessung von Lawingalerien. Vor allem bei der Überprüfung bestehender Galerie-Tragwerke, bei deren Planung die dynamischen Einwirkungen aus heutiger Sicht nicht ausreichend berücksichtigt wurden, könnten so ggf. hohe Kosten durch Verstärkungsmassnahmen am bestehenden Tragwerk vermieden werden.

Nicht mit den verfügbaren Lawinenmodellen berechnet werden können die Einwirkungen aus einem senkrechten oder «schrägen» Lawinenaufprall auf ein Galeriedach. Die Festlegung der Grösse und Verteilung der Lawineneinwirkung im zugehörigen Fall 8 der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] sind sehr unsicher, aber für die Bemessung von grosser Relevanz. Wissenschaftlich abgestützte Berechnungsformeln gibt es derzeit nicht.

Schliesslich wurde das Thema der Lastkombination in der vorliegenden Studie nur hinsichtlich der relevantesten Einwirkungskombinationen behandelt, d.h. insbesondere in Bezug auf die Kombination verschiedener Lawineneinwirkungen untereinander und auf das Zusammenspiel zwischen Lawineneinwirkungen und natürlich abgelagerter Schneedecke. Die Kombination mit weiteren, unabhängigen Einwirkungen erfordert zusätzliche probabilistische Analysen, um die Kombinationsbeiwerte  $\psi$  der ASTRA-Richtlinie 12007 [1] zu überprüfen. Von Interesse ist hier insbesondere die Betrachtung von Einwirkungskombinationen mit der aussergewöhnlichen Einwirkung «Stützenanprall» sowie ggf. die Kombination von Lawineneinwirkungen mit einem unabhängig von der Schnee- und Lawinenablagerung bestehenden Wasser- oder Erddruck auf die bergseitige Galerierückwand.

Unabhängig von den Festlegungen der ASTRA-Richtlinie empfiehlt sich die Intensivierung von Untersuchungen zur systematischen Datensammlung an bestehenden Galerien, wie in Kapitel 6.3.3 beschrieben. Entsprechende Forschungsvorhaben dienen nicht nur einem besseren Verständnis zur Modellierung von Lawineneinwirkungen allgemein, sondern können auch direkt bei der (zukünftigen) Beurteilung der Lawinensituation an den untersuchten Standorten helfen. Moderne Mittel wie Drohnen oder automatischen

Kameras, ggf. kombiniert mit Begehungen, erlauben heute eine deutlich günstigere Ereignisdokumentation als in der Vergangenheit. Wichtig ist eine gute, strategische Planung der Datensammlung, z.B. in Bezug auf die Auswahl der Standorte für ein Pilotprojekt, aber auch in Bezug auf die Festlegung der zu sammelnden Daten. Letzteres gilt auch für die systematische Aufnahme von Ablagerungshöhen, die nach Grossereignissen grundsätzlich an beliebigen Standorten erfolgen kann und mit Drohnenbefliegungen relativ kostengünstig möglich ist. Für Nationalstrassen empfiehlt sich die vorgängige Planung solcher Aufnahmen inklusive erforderlichem Budget, um im Falle eines Grossereignisses vorbereitet zu sein. Die Aufnahmen sollten mit der allgemeinen Ereignisdokumentation des BAFU bzw. des SLF koordiniert werden.



## Glossar

Begriff	Bedeutung
Beste Schätzung	Schätzung des Mittelwertes durch einen Experten
$C_F$	Kosten bei Versagen des Tragwerks
CoV	Variationskoeffizient
$C_W$	Wiederherstellungskosten der Galerie
$D_k$	Dynamische Einwirkung
DTV	Durchschnittlicher täglichen Verkehr
$E_d / S_d$	Bemessungswert der Einwirkung. Die Bezeichnung $S_d$ ist in der internationalen Fachliteratur gebräuchlich und wird daher ebenfalls verwendet.
$E_k / S_k$	Charakteristischer Wert der Einwirkung. Die Bezeichnung $S_k$ ist in der internationalen Fachliteratur gebräuchlich und wird daher ebenfalls verwendet.
EN	Europäische Norm
$E_T$	Erwartete Anzahl Todesfälle in einem Versagensereignis
FORM	First Order Reliability Method
Fraktil	Lagemass in der Statistik. Gibt an wieviel Prozent der Beobachtungen bzw. Datenpunkte in einer geordneten Liste unter diesem Wert liegen. Gibt auch an mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Realisation einer Zufallsvariable unter diesem Wert liegt.
G	Zufallsvariable, die die ständige Last repräsentiert, mit Index k als charakteristischer Wert.
$g(\mathbf{X})$	Grenzzustandsfunktion als Funktion der Basisvariablen $\mathbf{X}$
GK	Grenzwert der Grenzkosten
HADES	Hydrologischer Atlas der Schweiz
HS	Schneehöhe [mm]
Hm	Meter Höhendifferenz
JCSS	Joint Committee on Structural Safety
$P_f$	Versagenswahrscheinlichkeit
Posterior Verteilung	Mit Daten aktualisierte Prior Wahrscheinlichkeitsverteilung. Der Verteilungstyp der Posterior Verteilung muss nicht dem Verteilungstyp der Prior Verteilung entsprechen.
Pr[.]	Wahrscheinlichkeit
Prädiktive Verteilung	Verteilung die sich durch Integration über die Unsicherheiten der Posteriorverteilung ergibt. Der Verteilungstyp der Prädiktiven Verteilung muss nicht dem Verteilungstyp der Posteriorverteilung entsprechen.
Prior Verteilung	Ursprünglich vorhandene Wahrscheinlichkeitsverteilung. Repräsentiert das vorhandene Wissen über die Zufallsvariable vor der Verwendung der vorhandenen Daten oder Informationen.
Q	Zufallsvariable, die die veränderliche Last repräsentiert, mit Index k als charakteristischer Wert.
$q_{300} / q_{30}$	Einwirkung des 300/30-jährigen Ereignis
$q_A$	Eigengewicht der natürlich abgelagerten Schneedecke
$q_{nU}$	Umlenkraft
$q_{pL}$	Reibungskraft aus der Fließlawine
$q_{pU}$	Reibungskraft aus der Umlenkraft
$q_{vL}$	Eigengewicht der Fließlawine
RAMMS-	Lawindynamisches numerisches Simulationsprogramm des SLF
$R_d$	Bemessungswert des Widerstands

$R_k$	Charakteristischer Wert des Widerstands
$SC_M$	Sicherheitskosten, die der eigentlichen Sicherung des Tragwerks angelastet werden
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SN	Schweizer Norm (SN)
SORM	Second Order Reliability Method
T	Wiederkehrperiode des Bemessungsereignisses
WW	Wasserwert [mm]
$\Delta R_M$	Risikoreduktion infolge von Erhaltungsmaßnahmen
$\Phi^{-1}(\cdot)$	Inverse der Standardnormalverteilung
$\beta$	Zuverlässigkeitsindex
$\gamma$	(gesellschaftlicher) Diskontierungszinssatz
$\gamma_Q / \gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert mit Index Q für die Lasten und Index M für die Widerstände
$v_D$	Variationskoeffizienten der dynamischen Einwirkung
$v_R$	Variationskoeffizienten des Widerstandes
$v_S$	Variationskoeffizienten der Einwirkung
$\omega$	Obsolenzrate
$\psi$	Kombinationswert für die Einwirkungen.

## Literaturverzeichnis

### Weisungen und Richtlinien des ASTRA

- [1] Bundesamt für Strassen ASTRA (2007), „**Richtlinie Einwirkungen infolge Lawinen auf Schutzgalerien**“, *Richtlinie ASTRA 12007, V2.00*, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [2] Bundesamt für Strassenbau, Baudirektion GD SBB (1994), „**Einwirkungen auf Lawinenschutzgalerien**“, *Richtlinie ASTRA / SBB, ersetzt durch ASTRA 12007:2007*.
- [3] Bundesamt für Strassen ASTRA (2014), „**Risikoanalyse für Tunnel der Nationalstrassen**“, *Richtlinie ASTRA 19004, v1.01*, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- [4] ONR 24806, 2011. Permanenter technischer Lawinenschutz – Bemessung und konstruktive Ausgestaltung.

### Normen

- [5] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „**Grundlagen der Projektierung von Tragwerken**“, *Norm SIA 260:2013*.
- [6] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2014), „**Einwirkungen auf Tragwerke**“, *Norm SIA 261:2020*.
- [7] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „**Betonbau**“, *Norm SIA 262:2013*.
- [8] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „**Stahlbau**“, *Norm SIA 263:2013*.
- [9] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2013), „**Geotechnik**“, *Norm SIA 267:2013*.
- [10] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2011), „**Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken**“, *Norm SIA 269:2011*.
- [11] Europäisches Komitee für Normung CEN (2002), „**Grundlagen der Tragwerksplanung**“ (Eurocode 0), *Norm EN 1990:2002*.

### Dokumentation

- [12] Joint Committee on Structural Safety (2001), „**Probabilistic Model Code**“, [www.jcss-lc.org](http://www.jcss-lc.org).
- [13] Der Kiureghian, A, Ditlevsen, O (2009), „**Aleatory or epistemic? Does it matter?**“, *Structural Safety*, Volume 31, Issue 2, March 2009, Pages 105-112
- [14] Melchers, R.E. (2003), „**Structural reliability analysis and prediction**“, John Wiley & Sons
- [15] Mehlhorn, G (1997). „**Der Ingenieurbau: Grundwissen Tragwerkszuverlässigkeit und Einwirkungen**“, Ernst und Sohn
- [16] Madsen, H.O., Krenk, S., Lind, N.C. (2006). „**Methods of Structural Safety**“, Dover Publications Inc.
- [17] Faber, M. H. und Sørensen, J.D. (2003), „**Reliability Based Code Calibration - the JCSS Approach.**“ *In: Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (Proceedings ICASP 9)*, edited by Der Kiureghian, A., Madanat, S. und Pestana, J. M.
- [18] Bründl, M., Hafner, E. Bébi, P., Bühler, Y., Margreth, S., Marty, C., Schaer, M., Stoffel, L., Techel, F., Winkler, K., Zweifel, B., Schweizer, J., (2019). „**Ereignisanalyse Lawinensituation im Januar 2018**“. WSL Bericht, 76. 162 S.
- [19] Faber, M. H. und Kübler, O. (2002). „**Preliminary Assessment of the Draft SWISSCODES (SIA 260).**“
- [20] Fischer, K. und Faber, M.H. (2012) „**The LQI Acceptance Criterion and Human Compensation Costs for Monetary Optimization - A Discussion Note.**“, *LQI Symposium in Kgs. Lyngby, Denmark*
- [21] Rackwitz, R. (2000) „**Optimization — the Basis of Code-Making and Reliability Verification.**“ *Structural Safety* 22, no. 1: 27–60.
- [22] Fischer, K.; Barnardo-Viljoen, C. und Faber, M.H. (2012) „**Deriving Target Reliabilities from the LQI**“, *LQI Symposium in Kgs. Lyngby, Denmark*.
- [23] Fischer, K.; Viljoen, C.; Köhler, J. und Faber, M.H. (2019) „**Optimal and acceptable reliabilities for structural design**“ *Structural Safety* 76: 149-161.
- [24] Bundesamt für Strassen ASTRA (2017), „**RoadRisk**“, Website, [www.roadrisk.admin.ch](http://www.roadrisk.admin.ch) (Zugriff: 06.05.2020)
- [25] Schubert, M. und Faber, M.H. (2009), „**Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierbarer Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen auf Kunstbauten**“. *ASTRA Bericht 616*, Forschungsauftrag AGB 2002/020, [www.mobilityplatform.ch](http://www.mobilityplatform.ch).

- 
- [26] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012), „**Naturgefahren auf den Nationalstrassen: Risikokzept**“, Dokumentation ASTRA 89001, v2.10, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- 
- [27] Bundesamt für Strasse ASTRA (2014), „**Risikokzept für Tunnel der Nationalstrassen**“, Dokumentation ASTRA 89005, v1.00, [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch).
- 
- [28] Custer, R.; Fischer, K.; Schubert, M. und Güngerich, A. (2016), „**Grenzkosten als Festsetzung im Rahmen von Nutzen-Kosten-Analysen für Sicherheitsmassnahmen**“, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Verkehr (BAV), Bundesamt für Strassen (ASTRA) und Bundesamt für Umwelt (BAFU)
- 
- [29] Röthlin, C.; Vogel, T.; Custer, R. und Schubert, M. (2019), „**Grundlagen zur Überprüfung und Bemessung von Steinschlagschutzgalerien**“, ASTRA Bericht 697, Forschungsauftrag AGB 2011/014, [www.mobilityplatform.ch](http://www.mobilityplatform.ch).
- 
- [30] Fischer, K.; Schubert, M.; Schaer, M.; Margreth, S. ; Schellenberg K. (2015), „**Reevaluation of the Design Loads for an Existing Avalanche Protection Gallery – A Probabilistic Approach**“, *Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges*, IABSE Conference, September 23-25 2015, Geneva, Switzerland
- 
- [31] Fischer, K. (2015), „**Bauwerke gezielt verbessern – Investieren mit Berechnung**“, *TEC 21*, Vol. 43/2015, pp. 34-36
- 
- [32] Christen, M., Kowalski, J. und Bartelt, P. (2010): „**RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain.**“ *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 63, 1-2, pp. 1-14.
- 
- [33] Margreth, S; Burkard, A. und Buri, H. (2008): „**Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raumplanung - Teil B: Lawinen**“, Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, [www.planat.ch](http://www.planat.ch).
- 
- [34] Salm, B., Burkard, A., Gubler, H.U. (1990): „**Berechnung von Fliesslawinen: eine Anleitung für Praktiker; mit Beispielen**“, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Mitteilung Nr. 47
- 
- [35] Martinec, J., Lang, H. und Rohrer, M. (1992) „**Schneehöhen und Wasseräquivalente der Schneedecke; Neuschneehöhen extremer Schneefall-Ereignisse**“, *Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES)*, Tafel 3.2, <https://hydrologischeratlas.ch>.
- 
- [36] Platzer K. und Margreth S. (2007), „**Experimentelle Untersuchung der Lawinenkräfte auf Galeriedächer**“, Bundesamt für Strassen ASTRA, Forschungsauftrag AGB 1997/068 und 2001/480, Bericht VSS Nr. 613, [www.mobilityplatform.ch](http://www.mobilityplatform.ch).
- 
- [37] Margreth S. und Platzer K. (2008), „**New findings on the design of snow sheds**“, In: Johannesson, T.; Eiriksson G.; Hestnes, E.; Gunnarsson, J. (eds) : *International Symposium on Mitigative measures against Snow Avalanches*. Egilsstadir, Iceland, 11-14 March 2008, Pp. 32-37.
- 
- [38] Platzer K.; Bartelt, P.; Jaedicke, C. (2007), „**Basal shear and normal stresses of dry and wet snow avalanches after a slope deviation**“, *Cold Reg. Sci. Technol.* 49:11-25
-

# Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 27.10.2021

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: AGB 2015/001

Projekttitel: Weiterentwicklung des Bemessungskonzeptes für neue und bestehende Lawinengalerien

Enddatum: 27.10.2021

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im ersten Schritt wurde ein probabilistisches Modell zur Bestimmung der Lawineneinwirkung entwickelt. Da die Lawineneinwirkungen auf gutachterlichen Einordnungen unter Einbezug vorhandener Daten basieren, unterscheiden sich die Typen von Unsicherheiten in den Lawineneinwirkungen von denen, die für andere veränderliche Lasten in den Tragwerksnormen angenommen werden. Die Lawineneinwirkungen sind zudem sehr ortsspezifisch. Diese Aspekte wurden im Projekt beleuchtet und ein Lösungsansatz zur probabilistischen Modellierung der Lawineneinwirkung erarbeitet. Mit diesem Modell wurde das Sicherheitsniveau der aktuellen Bemessungsansätze bestimmt und die Einwirkungskombination nach der derzeit gültigen ASTRA Richtlinie bewertet und anschliessend Empfehlungen für Anpassungen am bestehenden Konzept abgeleitet.

Es wurden konkrete Empfehlungen

- zur Reduktion von versteckten Sicherheiten,
- zu Vorgaben in Bezug auf die Definition der Krafteinleitung über die Schneedecke und das Erdreich,
- zur Festlegung eines Bemessungswertes,
- zur Berücksichtigung der Schätzunsicherheit mit einem Beiwert,
- für ein risikobasiertes Bemessungskonzept für Galerieneubauten,
- zur Kombinationen von Lawineneinwirkungen sowie
- zum Umgang mit bestehenden Galerien

entwickelt.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Ziel 1 nach Formular 2 wurde erreicht: Entwicklung eines probabilistischen Sicherheits- und Bemessungskonzeptes für Lawinenschutzgalerien.  
Mittels probabilistischer Analysen wurde das Sicherheitsniveau bestimmt, welches bei der Anwendung der derzeit gültigen ASTRA-Richtlinie 12007 und der SIA Normen erreicht wird.

Ziel 2 nach Formular 2 wurde erreicht: Es werden Regeln und Vorgehensweisen für die Bemessung von neuen und für die Beurteilung der Tragfähigkeit von bestehenden Galerien basierend auf der ASTRA-Richtlinie 12007:2007 abgeleitet.  
Bei der Ermittlung von Lawineneinwirkungen wurde der Lastbeiwert für die Einwirkungsseite in Abhängigkeit der Streuung der Einwirkung bestimmt. Damit können die Unsicherheiten in der Bestimmung der Last berücksichtigt werden und die Bemessung von Lawinenschutzgalerien wird wie bisher in das Konzept der SIA-Normen (SIA 260) integriert.

Ziel 3 nach Formular 2 wurde erreicht: Wie können ortsspezifische Informationen zu früheren Lawinenabgängen genutzt werden können, um die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Einwirkungen zu reduzieren bzw. welche Daten sollten im Vorfeld gesammelt werden sollten.  
Die detaillierte Untersuchung hat gezeigt, dass eine gezielte Datensammlung und Aktualisierung der Lawineneinwirkung für jene Galerien zu empfehlen sind, bei denen die Expertenschätzung der Lawineneinwirkung objektiv schwierig und entsprechend mit grossen Unsicherheiten verbunden ist.

Die definierten Projektziele wurden erreicht. Es sind im Projekt eine Vielzahl von Empfehlungen erarbeitet worden und weiterer Forschungsbedarf identifiziert worden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Es wird empfohlen, bei der nächsten Überarbeitung der ASTRA-Richtlinie 12007 die Resultate dieses Berichts zu berücksichtigen.

Die Analyse der derzeitigen Praxis hat gezeigt, dass zusätzlich die Erarbeitung eines ergänzenden Handbuchs mit detaillierteren Erläuterungen, Hintergründen und Anwendungsbeispielen hilfreich wäre.

Eine systematische Datensammlung zu beobachteten Lawineneinwirkungen auf bestehende Galerien ist grundsätzlich sinnvoll; dasselbe gilt für Standorte mit geplanten Galerienbauten. Im Hinblick auf die Aktualisierungsmöglichkeiten nach SIA 269 wäre eine zugängliche und einheitliche Datenbank sinnvoll.

Publikationen:

Bisher wurden noch nicht in Fachzeitschriften zu den Forschungsergebnissen publiziert.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Schubert Vorname: Matthias  
Amt, Firma, Institut: Matrisk GmbH

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Die Begleitkommission beurteilt das Forschungsprojekt, den Schlussbericht und die darin enthaltenen Daten und Folgerungen positiv. Die geplanten Projektziele wurden mehrheitlich erfüllt:

- Darstellung der Grundlagen und Entwicklung eines probabilistischen Sicherheits- und Bemessungskonzeptes für Lawingalerien;
- Aufzeigen des Vorgehens für die Bemessung von neuen und Überprüfung auf Basis von Kosten-Nutzen Betrachtung für bestehende Lawingalerien;
- Verwendung von ortsspezifischen Informationen zur Reduktion von Unsicherheiten.

Betreffend Werkzeuge für die Lastmodellierung und Anwendung der Resultate des Forschungsprojekts durch Ingenieure in der Praxis sind jedoch noch weitere Arbeiten in Zusammenhang mit einer Revision der ASTRA-Richtlinie 12007 und Erstellung eines Handbuchs erforderlich.

##### Umsetzung:

Der Schlussbericht stellt die Grundlagen für das probabilistische Sicherheits- und Bemessungskonzept ausführlich dar. Der Einfluss der massgebenden Parameter auf die Sicherheit von neuen und bestehenden Lawingalerien werden aufgezeigt. Damit liegen für eine Revision der ASTRA-Richtlinie 12007 und die Erstellung eines Handbuchs mit Hintergrundinformation und Anwendungsbeispielen für neue und bestehende Lawingalerien gute Grundlagen vor. Möglichkeiten für die Reduktion von versteckten Sicherheiten in der heutigen Bemessung werden im Bericht ebenfalls aufgezeigt.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Es darf hinterfragt werden, ob weitere Studien zum Lastfall Lawinenaufprall auf Galerien sowie zu Lastkombinationen von Fahrzeugaufprall auf Stützen mit Lawineneinwirkung momentan eine ausreichend hohe Relevanz für eine weitere Arbeit haben. Dagegen wird der Vorschlag für weitere Datensammlung zu und Monitoring von Lawineneinwirkungen auf Galerien positiv beurteilt.

##### Einfluss auf Normenwerk:

Für das Normenwerk des SIA besteht kein unmittelbarer Bedarf für Anpassungen. Dagegen wird empfohlen, die ASTRA-Richtlinie 12007 auf Basis der Resultate dieses Projektes zu überarbeiten.

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Ganz

Vorname: Hans Rudolf

Amt, Firma, Institut: GANZ Consulting

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

