



# **Risk Based Maintenance (RBM) – Minimierung der Nutzerrisiken und Betriebskosten mit einer risikobasierten Methode für den Unterhalt der BSA**

**Risk Based Maintenance (RBM) - Minimiser les risques  
d'utilisateur et les coûts d'opération de l'entretien EES avec  
une approche basée sur le risque**

**Risk Based Maintenance (RBM) - Minimizing user risks and  
operating costs with a risk based methodology for  
operational and safety equipment (OSE)**

**ASE (Analysis Simulation Engineering) AG  
Uri Schtalheim  
Stefan Ott**

**Institut für Datenanalyse und Prozessdesign IDP / ZHAW  
Christoph Heitz  
Lilach Goren Huber**

**Forschungsprojekt AGT 2015/004 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Tunnelforschung (AGT)**

**Februar 2019**

**1648**

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)



# **Risk Based Maintenance (RBM) – Minimierung der Nutzerrisiken und Betriebskosten mit einer risikobasierten Methode für den Unterhalt der BSA**

**Risk Based Maintenance (RBM) - Minimiser les risques  
d'utilisateur et les coûts d'opération de l'entretien EES avec  
une approche basée sur le risque**

**Risk Based Maintenance (RBM) - Minimizing user risks and  
operating costs with a risk based methodology for  
operational and safety equipment (OSE)**

**ASE (Analysis Simulation Engineering) AG  
Uri Schtalheim  
Stefan Ott**

**Institut für Datenanalyse und Prozessdesign IDP / ZHAW  
Christoph Heitz  
Lilach Goren Huber**

**Forschungsprojekt AGT 2015/004 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Tunnelforschung (AGT)**

**Februar 2019**

**1648**

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

Uri Schtalheim

### Mitglieder

Stefan Ott

Christoph Heitz

Lilach Goren Huber

## Begleitkommission

### Präsident

Patrick Bachofner

### Mitglieder

Bruno Sudret

Hanspeter Haas

Nicolas Bébié

Alain Gatti

Martin Wyss

## Antragsteller

Arbeitsgruppe Tunnelforschung (AGT)

## 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>9</b>
<b>Summary</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>13</b>
<b>2 Grundlagen Risk Based Maintenance</b> .....	<b>17</b>
<b>3 Stand der Forschung</b> .....	<b>19</b>
3.1 Risiko: Ausfall- und Schadensmodelle.....	19
3.2 Literatur zur risikobasierten Instandhaltung (RBM).....	19
3.3 Literatur zu Datenanalyse vs. Expertenwissen .....	20
3.4 Forschung zu RBM in der Schweiz .....	20
3.5 Internationale Ansätze .....	21
3.6 Erfahrungen aus anderen Branchen.....	21
<b>4 Konzeptioneller Ansatz</b> .....	<b>23</b>
<b>5 Vorgehen zur Kosten-/Risikoberechnung einzelner Anlagen</b> .....	<b>29</b>
5.1 Phase 1: Identifikation der Instandhaltungstätigkeiten .....	31
5.1.1 Ziel / Inhalt der Phase .....	31
5.1.2 Identifikation der Instandhaltungstätigkeiten.....	32
5.2 Phase 2: Fehlermodi und Modellierungsentscheidung .....	32
5.2.1 Ziel / Inhalt der Phase .....	32
5.2.2 Eruierung der Fehlermodi .....	32
5.2.3 Entscheidung über Modellierung.....	33
5.3 Phase 3: Risiko- und Kostenmodellierung .....	36
5.3.1 Ziel / Inhalt der Phase .....	36
5.3.2 Technisches Modell .....	37
5.3.2.1. Klassifizierung von prototypischen Modellen .....	38
5.3.2.2. Fazit.....	46
5.3.3 Modellierung Risiko.....	47
5.3.3.1. Ausgangslage.....	48
5.3.3.2. Ziel.....	48
5.3.3.3. Risikoarten .....	48
5.3.3.4. Bestimmung der Schadenshöhe .....	52
5.3.3.5. Vorgehen für die Berechnung der Risikoerhöhung.....	56
5.3.4 Modellierung Kosten .....	57
5.4 Phase 4: Abschätzung der Parameter .....	58
5.4.1 Ziel / Inhalt der Phase .....	58
5.4.2 Bestimmung der Parameterwerte .....	59
5.5 Phase 5: Berechnung der Resultate .....	61
5.5.1 Ziel / Inhalt der Phase .....	61
5.5.2 Risiko-Kosten-Diagramm .....	61
5.5.2.1. Risiko-Kosten-Diagramme auf der Ebene von Tätigkeiten.....	61
5.5.2.2. Risiko-Kosten-Diagramme auf der Ebene von Anlagen .....	62
5.5.3 Resultate / Erkenntnisse der Phase.....	64
5.6 Phase 6: Sensitivitätsanalyse .....	64
5.6.1 Ziel / Inhalt der Phase .....	64
5.6.2 Vorgehen Sensitivitätsanalyse .....	64
5.6.3 Resultate / Erkenntnisse der Phase.....	65

<b>6</b>	<b>Vorgehen zur Optimierung des Portfolios .....</b>	<b>67</b>
6.1	Optimale Portfolio-Strategie bei gegebenem Gesamtbudget .....	69
6.1.1	Risikominimierung bei gegebenem Gesamtbudget .....	69
6.1.2	Marginaltheorie und Equimarginalprinzip .....	72
6.1.3	Anwendung des Equimarginalprinzip-Verfahrens .....	74
6.1.4	Anwendungsbeispiel .....	74
6.2	Optimale Portfolio-Strategie ohne Gesamtbudget .....	77
<b>7</b>	<b>Pilotanwendung der Methodik .....</b>	<b>79</b>
7.1	Adaptationsbeleuchtung .....	79
7.1.1	Instandhaltungstätigkeiten .....	79
7.1.2	Fehlermodi und Modellierungsentscheidung .....	79
7.1.3	Resultate Kosten- und Risikobetrachtung .....	80
7.2	Lüftung .....	81
7.2.1	Instandhaltungstätigkeiten .....	81
7.2.2	Fehlermodi und Modellierungsentscheidung .....	81
7.2.3	Resultate Kosten- und Risikobetrachtung .....	82
7.3	VM-System .....	86
7.3.1	Instandhaltungstätigkeiten .....	86
7.3.2	Fehlermodi und Modellierungsentscheidung .....	87
7.4	Brandmeldeanlage .....	88
7.4.1	Instandhaltungstätigkeiten .....	88
7.4.2	Fehlermodi und Modellierungsentscheidung .....	88
7.4.3	Resultate Kosten- und Risikobetrachtung .....	88
7.5	Notstromanlage (USV) .....	90
7.5.1	Instandhaltungstätigkeiten .....	90
7.5.2	Fehlermodi und Modellierungsentscheidung .....	90
7.5.3	Resultate Kosten- und Risikobetrachtung .....	91
7.6	Portfolio-Optimierung über Pilotanwendungen .....	94
7.6.1	Optimale Portfolio-Strategie bei gegebenem Budget .....	95
7.6.2	Optimale Portfolio-Strategie ohne Budgetvorgaben .....	97
7.7	Erkenntnisse der Pilotanwendung .....	99
<b>8</b>	<b>Kosten / Nutzen – Potentialabschätzung .....</b>	<b>101</b>
8.1	Abschätzung der Kosten .....	101
8.1.1	Initialkosten .....	101
8.1.2	Modellpflege .....	103
8.1.3	Jährliche Gesamtkosten über 10 Jahre .....	104
8.2	Quantitativer Nutzen - Kosteneinsparung bei Optimierung .....	104
8.3	Qualitativer Nutzen .....	104
<b>9</b>	<b>Weiterer Forschungsbedarf .....</b>	<b>107</b>
<b>10</b>	<b>Empfehlung / Fazit .....</b>	<b>109</b>
	<b>Anhänge .....</b>	<b>111</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>117</b>
	<b>Projektabschluss .....</b>	<b>119</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen .....</b>	<b>122</b>

## Zusammenfassung

In Strassentunneln werden verschiedene Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) installiert, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Störungen oder Ausfälle dieser Systeme erzeugen ein Risiko für die Verkehrsteilnehmer, den Betreiber und die Umwelt. Damit die BSA möglichst zuverlässig funktionieren, werden regelmässige Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten durchgeführt. Diese Arbeiten sind mit Kosten verbunden, sorgen im Gegenzug im Optimalfall jedoch für ein tieferes Risiko. Um ein möglichst tiefes Gesamtrisiko zu erzielen, muss das zur Verfügung stehende Budget optimal eingesetzt werden. Dazu muss untersucht werden, wie stark die einzelnen Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten das Gesamtrisiko beeinflussen, und wie auf dieser Grundlage die optimale Kombination von Tätigkeiten (Instandhaltungsstrategie) gefunden werden kann, die für ein gegebenes Budget eine maximale Risikoreduktion erzeugen.

In diesem Dokument wird eine Methodik zur Entwicklung einer risikobasierten Instandhaltung bei Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen beschrieben. Mithilfe dieser Methodik können unterschiedliche Instandhaltungsstrategien für einzelne Anlagen hinsichtlich Kosten und Risiko vergleichbar gemacht werden, um so die Basis für eine risikobasierte Instandhaltung zu schaffen. Darüber hinaus erlaubt die Methodik, für ein Anlagenportfolio aus vielen Anlagen eine optimale Gesamt-Instandhaltungsstrategie zu bestimmen, die entweder bei gegebenem Gesamtbudget ein minimales Gesamtrisiko erzeugt, oder bei einem vorgegebenen Gesamtrisiko ein minimales Budget benötigt.

Dabei werden im Wesentlichen folgende Kernpunkte behandelt:

- Vorgehen zur Identifikation der Instandhaltungstätigkeiten und Beurteilung/Abschätzung ihres Optimierungspotentials hinsichtlich ihrer Wiederholungsfrequenz.
- Methodik und Modellierungsgrundsätze zu einer systematischen und strukturierten Berechnung von Risiko und Kosten der Instandhaltungstätigkeiten.
- Einheitlicher Vergleich des Risikoreduktionbeitrages von verschiedenen Instandhaltungstätigkeiten an unterschiedlichen Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen.
- Optimierungsverfahren hinsichtlich Risiko und Kosten über ein Portfolio von Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen bzw. deren Wartungs- und Instandhaltungstätigkeiten, um damit eine optimale Gesamt-Strategie abzuleiten.

Im vorliegendem Forschungsprojekt wurde eine praxistaugliche Methodik zur Anwendung der risikobasierten Instandhaltung entwickelt. In 6 standardisierten Phasen kann der Zusammenhang zwischen gewählter Instandhaltungsstrategie (Tätigkeiten, Häufigkeiten), deren Kosten und resultierendes Risiko einer Anlage ermittelt werden. Mit dieser Methode konnte erstmals im BSA-Kontext quantitativ der Zusammenhang zwischen den Ausgaben für Wartung und Instandhaltung und dem daraus resultierenden Risiko ermittelt werden. Diese Standardisierung erlaubt es einerseits für eine gegebene Risikoschranke (akzeptiertes Risiko) die minimal notwendigen Kosten zu ermitteln. Umgekehrt kann für ein gegebenes Gesamtbudget das minimale damit erreichbare Risiko ermittelt und die dazugehörige Instandhaltungsstrategie identifiziert werden. Dies ist möglich auf der Ebene einer einzelnen Anlage oder Anlagenkategorie, für alle Anlagen eines oder mehrerer Tunnel, aber auch auf der Ebene des Gesamtportfolios aller in der Schweiz installierten Anlagen.

Die Methodik wurde an den Pilotanwendungen Adaptationsbeleuchtung, Lüftung, VM-System, Brandmeldeanlage und Notstromanlage durchgeführt. Die Resultate zeigen, dass durch eine Änderung der Instandhaltungsstrategie für die innerhalb des Forschungsprojekts modellierten Wartungstätigkeiten sowohl die Gesamtkosten als auch das Gesamtrisiko um bis zu rund 20% reduziert werden können.

Ein weiterer Vorteil dieser standardisierten Methode ist, dass durch die konsequente Verknüpfung von Instandhaltungstätigkeiten und den zugehörigen Risiken eine einheitliche Wissenslage über die positiven Wirkungen der verschiedenen Tätigkeiten entsteht. Dies wird zu einer Harmonisierung und Optimierung der Instandhaltungsaktivitäten der verschiedenen Betreiber führen und kann das lokal vorhandene Expertenwissen in optimaler Weise für das Gesamtportfolio der Schweizer BSA nutzbar machen.

Eine Einschätzung des Potentials bei einer schweizweiten Einführung zeigt auf, dass die jährlichen Wartungskosten um rund 2.8 Mio. CHF gesenkt werden könnten, ohne das Gesamtrisiko über alle Tunnel zu erhöhen. Gesehen auf die gesamten Wartungskosten in Tunneln bedeutet dies eine mögliche Kostenreduktion von bis zu 12%.

## Résumé

Divers équipements d'exploitation et de sécurité (EES) sont installés dans les tunnels routiers afin d'assurer leur sûreté. Les dysfonctionnements ou défaillances de ces systèmes créent un risque pour les usagers de la route, l'exploitant et l'environnement. Afin de garantir un fonctionnement aussi fiable que possible des équipements EES, des travaux d'entretien et de réparation sont effectués régulièrement. Ces travaux sont coûteux mais permettent une diminution non négligeable des risques de dysfonctionnements. Afin d'obtenir un risque global aussi faible que possible, le budget disponible doit être utilisé de manière optimale. Pour ce faire, il convient d'examiner l'impact des activités d'entretien et de réparation sur le risque global et déterminer en conséquence une stratégie de réduction des risques optimale pour un budget donné.

Ce document décrit une méthodologie de maintenance des équipements d'exploitation et de sécurité basé sur leur risque de défaillance. Axée sur l'optimisation coûts-risques, cette méthodologie permet de comparer les différentes stratégies de maintenance de chaque type d'installation. Cette procédure s'adapte aussi à un ensemble comprenant plusieurs types d'installation pour déterminer une stratégie globale, soit en proposant une diminution des risques optimale tout en répondant aux exigences budgétaires, soit en proposant un budget optimal répondant au niveau de risque demandé.

Les points clés suivants sont traités:

- Procédure d'identification des activités de maintenance et évaluation/estimation de leur potentiel d'optimisation en fonction de leur fréquence de répétition.
- Méthodologie et principes de modélisation pour un calcul systématique et structuré des risques et des coûts des activités de maintenance.
- Comparaison homogène de la contribution à la réduction des risques de différentes activités de maintenance sur différents équipements d'exploitation et de sécurité.
- Procédure d'optimisation des équipements et installations en fonction de leur activité de maintenance/réparation afin de dériver une stratégie globale et optimale en se basant sur des contraintes de risques/coûts.

Dans le cadre de ce projet de recherche, une méthodologie pratique basée sur la considération des risques pour la mise en place d'une procédure de maintenance a été élaborée. En 6 phases standardisées, la relation entre la stratégie de maintenance choisie (activités, fréquences), ses coûts et le risque résultant d'un équipement peut être déterminée. Pour la première fois dans le contexte des équipements EES, il a été rendu possible de déterminer quantitativement la relation entre l'investissement lié à la maintenance et le risque qui en résulte. D'une part, cette standardisation permet de déterminer les coûts minimaux nécessaires pour un niveau de risque donné (risque accepté). Inversement, pour un budget global donné, le risque minimal réalisable peut être déterminé et la stratégie de maintenance associée peut être identifiée. Ceci est possible au niveau d'un seul équipement, d'une seule catégorie d'équipement, pour un ensemble d'équipements dans un ou plusieurs tunnels, mais aussi au niveau de l'ensemble des équipements installés en Suisse, toute catégorie confondue.

Dans le cadre de projets pilotes, la méthodologie a été appliquée pour les équipements suivant : éclairage d'adaptation, ventilation, signalisation dynamique, détection incendie et système d'alimentation sans coupure. La modélisation des activités d'entretien montre qu'une modification de la stratégie de maintenance peut réduire à la fois les coûts globaux et le risque global jusqu'à environ 20%.

Un autre avantage de cette méthode standardisée est que le lien cohérent entre les activités de maintenance et les risques associés apporte une connaissance plus homogène de ces différentes activités et de leurs bénéfices. Il en résultera une harmonisation et une optimisation des activités de maintenance des différents

exploitants, permettant d'utiliser au mieux les connaissances des experts locaux pour l'ensemble des équipements EES suisses.

Une évaluation de la possibilité d'une introduction à l'échelle nationale montre que les coûts annuels de maintenance pourraient être réduits d'environ CHF 2,8 millions sans augmenter le risque global dans l'ensemble des tunnels. Si l'on considère l'ensemble des coûts d'entretien dans les tunnels, cela signifie une réduction des coûts pouvant aller jusqu'à 12%.

## Summary

Various operating and safety equipments (OSE) are installed in road tunnels to ensure safe operation. Malfunctions or failures of these systems create a risk for road users, operators as well as for the environment. Regular maintenance and repair works are carried out to ensure OSE's functions as reliably as possible. These works are associated with costs, but in the ideal case they provide a lower risk in return. In order to achieve the lowest possible overall risk, the available budget must be used optimally. To this end, it must be analyzed to what extent the individual maintenance and repair activities influence the overall risk and how, on this basis, the optimum combination of activities (maintenance strategy) can be found that generates maximum risk reduction for a given budget.

This document describes a methodology for developing risk-based maintenance for operational and safety equipments. This methodology can be used to compare different maintenance strategies for individual equipments in terms of cost and risk, thus creating the basis for risk-based maintenance. In addition, this methodology allows to determine an optimal overall maintenance strategy for an asset of many equipments, which either generates a minimum overall risk for a given overall budget or requires a minimum budget for a given overall risk.

In general, the following key points are handled:

- Procedure for identifying maintenance activities and rating/estimation of their optimization potential in regard to their repetition frequency.
- Methodology and modelling principles for a systematic and structured calculation of risk and costs of maintenance activities.
- Consistent comparison of the risk reduction contribution of different maintenance activities on different operating and safety equipments.
- Optimization procedure regarding risk and costs of an asset of operating and safety equipments and their maintenance and repair activities in order to derive an optimum overall strategy.

In this research project, a practical methodology for the application of risk-based maintenance was developed. In 6 standardized phases, the relationship between the chosen maintenance strategy (activities, frequencies), its costs and the resulting risk of an equipment can be determined. For the first time in the OSE context, it was possible to quantitatively determine the relationship between investment in maintenance and the resulting risk. On the one hand, this standardization makes it possible to determine the minimum necessary costs for a given risk barrier (accepted risk). Conversely, for a given overall budget, the minimum achievable risk can be determined and the associated maintenance strategy can be identified. This is possible at the level of a single equipment or equipment category, for all equipments in one or more tunnels, but as well at the level of the overall asset of all installed equipments in Switzerland.

The methodology was implemented in pilot projects for systems adaptation lighting, ventilation, traffic-management, fire alarm and emergency power. Within the research project the results show that by changing the maintenance strategy, both the overall costs and the overall risk can be reduced by up to around 20%.

A further advantage of this standardized method is that the consistent linking of maintenance activities and their associated risks create a uniform knowledge regarding the positive effects of the various activities. This will lead to a harmonization and optimization of the maintenance activities of the various operators, so that locally available expert knowledge can be used for the overall asset portfolio of the Swiss OSE in an optimal way.

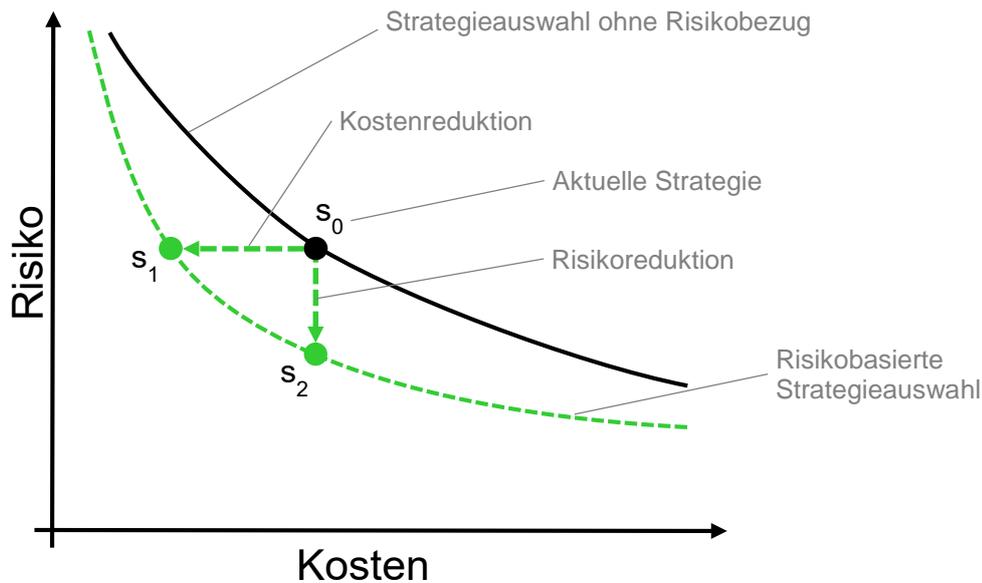
An assessment of the potential for a nationwide introduction shows that annual maintenance costs could be reduced by around CHF 2.8 million without increasing the overall risk across all tunnels. When looking at the total maintenance costs in tunnels, this means a possible cost reduction of up to 12%.

# 1 Einleitung

Für den sicheren Betrieb des Strassennetzes und Strassentunneln werden heute verschiedene Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) verbaut und unterhalten. Mit Anlagen wie der Signalisation, Energieversorgung, Lüftung, Beleuchtung etc. wird die Sicherheit und der Fahrkomfort für Verkehrsteilnehmer verbessert. Durch den Unterhalt der Anlagen wird dafür gesorgt, dass die Verfügbarkeit der BSA möglichst hoch und dadurch die Nutzerrisiken möglichst gering gehalten werden. Unter Nutzerrisiken fallen in erster Linie Ereignisse, welche die Verkehrssicherheit der Verkehrsteilnehmer beeinträchtigen (z.B. Rauchentwicklung bei einem Brand, Sichttrübung, erhöhtes Verkehrsaufkommen bzw. Stauerkennung etc.). Störungen und Ausfälle der BSA in bestimmten Verkehrssituationen können die Nutzerrisiken erhöhen, zum Beispiel durch eine erhöhte Unfallrate aufgrund des Ausfalls und/oder durch ein erhöhtes Schadensausmass im Falle eines Ereignisses. Neben der Beeinträchtigung der Sicherheit der Verkehrsteilnehmer kann ein Ausfall der BSA noch weitere negative Konsequenzen bzw. Risiken haben, z.B. Einschränkung der Verfügbarkeit der Strasse (Staubbildung), Umweltschäden oder Imageschaden für das ASTRA. Das Ziel des Anlagenunterhalts besteht also darin, die Gesamtheit dieser Risiken zu minimieren, wobei gleichzeitig die anfallenden Kosten tiefgehalten werden sollen.

Das ASTRA als Anlageeigentümer der BSA auf Schweizer Nationalstrassen ist bestrebt alle geeigneten Vorkehrungen für einen sicheren Betrieb zu treffen. Dies beinhaltet auch den zielgerichteten Einsatz der verfügbaren monetären Mittel für den Betrieb und Unterhalt der BSA. Zielgerichtet bedeutet die verfügbaren Mittel so einzusetzen, dass ein möglichst geringes Gesamtrisiko erreicht wird. Gemäss dem EFK-Bericht «Wirtschaftlichkeit der Gebietseinheiten und deren Aufsicht» [51] finden seitens ASTRA Zentrale zur Zeit erste Gespräche zum Informationsaustausch zwischen den Gebietseinheiten (Betreiber) statt. Dabei werden gleichartige Leistungen und deren Preise/Kosten verglichen. Hinsichtlich einer Erreichung eines möglichst geringen Gesamtrisikos müssen jedoch nicht nur die Preise/Kosten betrachtet werden, sondern auch deren Wirkung bzw. Nutzen. Daher ist ein methodisches Vorgehen gefragt, welches sowohl die Kosten- auch als Risikoseite betrachtet und die Frage beantwortet, wie die Mittel für den Unterhalt der BSA effizient eingesetzt bzw. verteilt werden können. Ein für sicherheitsrelevante Anlagen gängiges Verfahren beschreibt das Konzept der risikobasierten Instandhaltung (RBM).

Das Risiko durch Ausfälle der BSA wird durch die Unterhaltsstrategien massgeblich beeinflusst. Diese erzeugen jedoch Unterhalts- und Ersatzkosten (Lebenszykluskosten). Optimierte Unterhaltsstrategien sollen bei gleichen Kosten das Risiko reduzieren, oder bei gleichem Risiko die Kosten reduzieren (**Abb. 1**). Zurzeit bestehen Prozesse, welche die Instandhaltung basierend auf Erfahrungswerten regeln, jedoch ohne systematischen Bezug zum potentiellen Schadensausmass.



**Abb. 1** Schematischer Vergleich einer Unterhaltsstrategie ohne Risikobezug und einer risikobasierten Strategie: Kostensenkung bei gleichem Risiko ( $s_1$ ) oder Risikosenkung bei gleichen Kosten ( $s_2$ ).

Die risikobasierte Instandhaltung steuert die Instandhaltung so, dass das Risiko minimiert wird, mit dem Ansatz, die Investitionen dort einzusetzen, wo die grösste Gesamtwirkung und Risikoreduktion für alle Verkehrsteilnehmer erreicht wird. Eine theoretische Beispielanwendung ist im Fachkonzept EMS-CH [27] beschrieben, in welcher auch verschiedene Auswirkungen für die Verkehrsteilnehmer aufgezeichnet wurden. Es ist jedoch nicht beschrieben, wie der Ansatz konkret umgesetzt werden kann. Zusätzlich ist das Potential des Ansatzes zur Risikoreduktion oder Kosteneinsparung für die BSA Infrastruktur in der Schweiz noch nicht detailliert abgeschätzt. Im vorgeschlagenen Forschungsvorhaben wird die vorgeschlagene RBM operationalisiert sowie das konkrete Potential ermittelt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird für Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) in Strassentunnel eine Methodik zur Minimierung der Nutzerrisiken und Betriebskosten entwickelt. Mit Hilfe der Methodik können die Kosten und Risiken von Wartungstätigkeiten ausgewählter Anlagen bzw. Anlagenteile mathematisch modelliert werden, um eine Aussage über das Verhalten zwischen Kosten und Risiko zu treffen.

Ziel und Zweck ist die Beschreibung einer Methodik, wie Instandhaltungsstrategien hinsichtlich Risiko und Kosten vergleichbar gemacht und optimale Strategien identifiziert werden können. Anhand eines systematischen Vorgehens wird aufgezeigt, wie Risiken und Kosten berechnet werden, so dass eine einheitliche Bewertung und Betrachtung der verschiedenen Instandhaltungstätigkeiten für eine Anlage und über verschiedene Anlagen hinweg möglich ist. Aufgrund von dieser Basis wird ein Verfahren vorgestellt, so dass mit dem eingesetzten Budget über das gesamte Portfolio von Anlagen eine möglichst hohe Risikoreduktion ermöglicht wird.

Innerhalb dieses Dokuments werden folgende Themen bearbeitet:

1. Entwicklung eines praxistauglichen und umsetzungsreifen Konzeptes zur Anwendung der Methode der risikobasierten Instandhaltungsmethodik (RBM). Insbesondere:
  - a. Verfahren zur Bestimmung von optimalen Instandhaltungsstrategien unter Berücksichtigung der operativen Randbedingungen.
  - b. Verfahren zur Bestimmung der Ausfallraten und Kalibrierung der Kosten- und Risikomodelle (auch bei unsicherer Datengrundlage).
2. Quantitative Abschätzung der Kosteneinsparungen bei gleichem Risiko.

**1648** | Risk Based Maintenance (RBM) – Minimierung der Nutzerrisiken und Betriebskosten mit einer risikobasierten Methode für den Unterhalt der BSA

3. Quantitative Abschätzung der Risikoreduktion bei gleichen Kosten.
4. Pilotanwendung auf ein Portfolio von BSA-Anlagen als Proof of Concept.
5. Abschätzung der Kosten bei einer schweizweiten Einführung.



## 2 Grundlagen Risk Based Maintenance

Instandhaltung hat zum Ziel, das korrekte Funktionieren technischer Anlagen zu gewährleisten und die Lebenszykluskosten zu minimieren<sup>1</sup>. Die Norm SN EN 13306 (Begriffe der Instandhaltung) definiert Instandhaltung als «die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.» [11].

In den vergangenen Jahrzehnten haben sich verschiedene methodische Ansätze entwickelt, mit denen Instandhaltungsprogramme systematisch entwickelt und kontinuierlich optimiert werden können. Die wichtigsten dieser Ansätze sind

- **Reliability Centered Maintenance (RCM):** Dies ist eine Methodik, die auf die Erzeugung einer optimalen Verfügbarkeit komplexer Systeme unter Berücksichtigung technischer und betrieblicher Aspekte abzielt. Sie wurde entwickelt in der Airline-Industrie und wird vor allem für komplexe Systeme eingesetzt, bei denen Zuverlässigkeit die dominierende Grösse ist.
- **Total Productive Maintenance (TPM) und Lean Maintenance:** Diese Methoden wurden entwickelt im Umfeld der produzierenden Industrie. Sie basieren auf einer Optimierung der Instandhaltung unter betrieblichen Kostengesichtspunkten und Zielgrössen, die für die industrielle Produktion relevant sind (z.B. Qualität oder Overall Equipment Efficiency OEE)
- **Risikobasierte Instandhaltung (RBM):** Diese Methodik basiert auf dem Konzept des Risikos, das durch das nicht-optimale Funktionieren technischer Anlagen erzeugt wird, und versucht, die Instandhaltung so zu optimieren, dass diese Risiken minimiert werden, und gleichzeitiger Berücksichtigung der dabei entstehenden Kosten.

Im Umfeld der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA) der Schweizer Nationalstrassentunnel, die im vorliegenden Projekt der Untersuchungsgegenstand waren, ist die risikobasierte Instandhaltung die am besten geeignete Methodik, da die BSA ja vor allem deswegen überhaupt eingebaut sind, um Schaden für die Verkehrsteilnehmer und an der Infrastruktur abzuwenden.

*Beispiel: Die Lüftungsanlage sorgt dafür, dass die bei einem Brand im Tunnel entstehenden giftigen Rauchgase aus dem Tunnel geführt werden und die Infrastruktur geschützt wird.*

Die einzelnen Anlagen der BSA dienen also dazu, bestimmte Risiken, die im Tunnel existieren, zu beseitigen und sorgen so für die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer. Im Rahmen der Instandhaltung interessieren wir uns nicht für die Frage, welche Risiken existieren, und welche technischen Massnahmen ergriffen werden müssen, um diese Risiken zu beseitigen. Diese Fragen werden in einer Designphase diskutiert und führen zur Entscheidung für oder gegen bestimmte BSA-Anlagen sowie deren konkrete Ausgestaltung (z.B. Menge oder Redundanz). Im Rahmen des vorliegenden Berichts gehen wir deshalb davon aus, dass die BSA-Anlagen vorgegeben sind (wird durch das ASTRA im Rahmen von Normen, Richtlinien und Fachhandbüchern definiert).

Der Referenzfall, auf den sich alle Überlegungen beziehen, ist das ideale Funktionieren dieser Anlagen. Das bedeutet, dass wir vom (hypothetischen) Fall ausgehen, dass die Anlagen jederzeit in einem funktionsfähigen Zustand sind, also keine Ausfälle und Störungen haben.

---

<sup>1</sup> In Anlehnung an EN 13306 (Begriffe der Instandhaltung) und DIN 31051 (Grundlagen der Instandhaltung) unterscheiden wir in diesem Bericht begrifflich nicht zwischen Wartung und Instandhaltung. Der Begriff «Instandhaltung» umfasst beide Tätigkeiten.

Jedes Instandhaltungsprogramm dient dazu, diesem Idealzustand möglichst nahe zu kommen. Dennoch bleibt jedoch in der Regel ein Restrisiko – es ist nie möglich, mit absoluter Sicherheit einen Ausfall einzelner BSA oder einer ganzen Anlagen zu verhindern, und oft ist es auch aus Kostengründen gar nicht wünschenswert.

Es ist aber immer der Fall, dass Art und Umfang der Instandhaltung einen Einfluss auf die Häufigkeit und/oder Schwere der Störungen hat. Je häufiger Instandhaltungsmassnahmen durchgeführt werden, desto geringer ist in der Regel die Störungsrate, und desto geringer ist auch das entstehende Risiko. Gleichzeitig sind jedoch auch die Kosten höher.

Im Rahmen der risikobasierten Instandhaltung ist es deshalb notwendig, die konkrete Beziehung zwischen Art und Häufigkeit einer Instandhaltungsmassnahme und dem damit erzeugten Risiko zu beschreiben. Dies ist der methodische Kern der risikobasierten Instandhaltung.

Im vorliegenden Projekt wurde auf dieser Grundlage eine voll ausgearbeitete Methodik entwickelt, die diesen Ansatz für den Anwendungsfall der BSA in Strassentunneln konkret implementiert. Dabei wurde einerseits auf methodische Konsistenz und fachliche Qualität des Ansatzes geachtet. Andererseits war es ein Anliegen, einen Ansatz zu entwickeln, der im Rahmen der heute vorhandenen Strukturen und technischen Möglichkeiten praktikabel und wirtschaftlich umzusetzen ist.

## 3 Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird die vorhandene Literatur zu den relevanten Themen wie Ausfallraten- und Schadensmodelle, Risk Based Maintenance (RBM), Parameterschätzung etc. kurz erläutert, welche als Grundlage verwendet werden.

### 3.1 Risiko: Ausfall- und Schadensmodelle

Das Konzept des RBM basiert auf allgemeinen Ansätzen des Risikomanagement [12] und wendet dies an auf die Instandhaltung. Risiko wird generell als Produkt einer Wahrscheinlichkeit und eines Schadensausmasses definiert. Im Rahmen des RBM ist mit Wahrscheinlichkeit dabei immer die Ausfallwahrscheinlichkeit oder Ausfallrate der betrachteten Einheit gemeint (z.B. [13]).

Zur Modellierung der Ausfallrate werden in der Regel Weibullfunktionen angenommen, um die Altersabhängigkeit zu beschreiben (z.B. [14], [15]). Mit Weibullfunktionen kann auch die sogenannte Badewannekurve abgebildet werden. Bei Sicherheitsfunktionen, die im Falle eines Unfalls ansprechen sollen (z.B. Lüftungsanlage) ist nicht die Ausfallrate entscheidend, sondern die Nichtverfügbarkeit, die unter anderem vom Inspektionszyklus abhängt (z.B. [16]).

Die Schadenshöhe kann sich in verschiedenen Dimensionen entfalten. Khan und Haddara [14] zeigen explizite Modelle für die Berechnung von Ausfallkonsequenzen, wobei sie die Dimensionen finanzieller Schaden, Gesundheitsschaden, und Umweltschaden betrachten. Durch geeignete Kombination der Dimensionen kann eine integrale Masszahl „Gesamtschaden“ berechnet werden.

### 3.2 Literatur zur risikobasierten Instandhaltung (RBM)

Der Ansatz der RBM wurde vor allem im Bereich sicherheitskritischer Systeme entwickelt (z.B. [21]). Die grundlegenden Konzepte sind z.B. in folgenden Publikationen beschreiben:

- Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning [14]
- Risk based maintenance optimization: foundational issues [17]
- Risk-based maintenance - Techniques and applications [18]
- Engineering decisions for life quality [19]
- Instandhaltungslogistik [20]

Für die Anwendung von RBM müssen zwei Probleme gelöst werden:

- a) Die Beziehung zwischen Instandhaltungsstrategie und Risiko muss modelliert werden.
- b) Auf der Grundlage dieser Modelle muss die Instandhaltungsstrategie optimiert werden.

Für Problem (a) ist die eigentliche Schwierigkeit die Bestimmung der Beziehung zwischen Instandhaltungsstrategie und Ausfallrate (siehe z.B. [16]). Grundlegende Modelle dazu finden sich in der Instandhaltungsliteratur (z.B. [7]).

Bei Problem (b) geht es darum zu entscheiden, welche Instandhaltungsstrategie für die verschiedenen Einheiten gewählt werden soll. Grundsätzlich kann man zwei Stufen unterscheiden: Zunächst einmal geht es darum, ein grundlegendes Niveau von Sicherheit zu erzielen. Hierbei sind die Kosten vorerst irrelevant. Danach geht es um Kosteneffizienz ([22], [23]). Der Grossteil der RBM-Literatur fokussiert auf Probleme, in welchen Kosten keine Rolle spielen (z.B. [20], [18], [14]). Die Frage, wie ein gegebenes Budget optimal eingesetzt werden kann, wird deshalb gar nicht gestellt. Im Übersichtsartikel von Khan und Haddara [14] wird z.B. ein verbesserter Instandhaltungsplan erzeugt, indem die mögliche Risikoreduktion durch optimierte

Instandhaltung betrachtet wird. Die Kostenseite wird ignoriert. Ein ähnliches Vorgehen zeigt Krishnasamy et al [15] für ein RBM in einem Kraftwerk.

In der wenigen Literatur, in welcher Kosten berücksichtigt werden, gibt es im Wesentlichen zwei Ansätze [25]. Im ersten Ansatz wird das Risiko monetarisiert und zusammen mit der Summe der Kosten minimiert (ähnlich zur KNA Norm VSS 2006 [26]). Im zweiten Ansatz wird ein bestimmter Wert des Risikos als Randbedingung vorgegeben, und dann eine Kostenminimierung unter dieser Randbedingung durchgeführt.

Im vorliegenden Projekt soll der zweite Ansatz verfolgt werden (siehe Fachkonzept EMS-CH [27]). Hierzu wurde in den letzten Jahren am Institut für Datenanalyse und Prozessdesign (IDP) der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) eine strukturierte Optimierungsmethode entwickelt ([28], [9], [29]), die im Projekt zum Einsatz kommen soll. Die Methode basiert auf Ansätzen der multikriteriellen Optimierung (siehe z.B. [22]), Cost-Benefit-Ansätzen (z.B. [10]) und ökonomischen Ansätzen des marginalen Nutzens (siehe auch [25]). Die Methodik wurde angewendet auf Strom- und Wassernetze, und zeigte dort ein Kosteneinsparpotential von 10-30% durch optimierten Einsatz der Mittel über das Gesamtportfolio der Anlagen. Die Methode erlaubt, für ein Portfolio von Anlagen die kostenminimalen Instandhaltungsstrategien zu bestimmen, unter Einhaltung einer Risiko-Randbedingung.

In Bezug auf das Thema RBM lässt sich der Stand der Forschung folgendermassen zusammenfassen: Für die Modellierung von Ausfallraten und Verfügbarkeit sind etablierte Modelle vorhanden (z.B: Weibullfunktionen), die eingesetzt werden können. Für die Bestimmung einer optimierten Instandhaltungsstrategie für ein Portfolio technischer Anlagen unter der Randbedingung eines gegebenen Gesamtbudgets steht die am IDP entwickelte und erprobte Methodik zur Verfügung. Offen und fehlend ist jedoch die konkrete Spezifikation der Modelle für die typischen Betriebsmittel der BSA. Hier besteht eine klare Forschungslücke.

### 3.3 Literatur zu Datenanalyse vs. Expertenwissen

Bei allen Modellierungsansätzen stellt sich die Frage, wie die Risikomodelle parametrisiert werden können. In der Literatur werden verschiedene datenbasierte Verfahren beschrieben (z.B. [14], [15], [25]). Expertenwissen wird typischerweise in qualitativen oder semi-quantitativen Analysemethoden eingesetzt (z.B. [20], [30]). Die Herausforderung im vorliegenden Projekt besteht darin, für quantitative Methoden ein Verfahren zu entwickeln, das beides integriert. Ein etabliertes Verfahren dazu ist der Bayes-Ansatz, ein statistisches Verfahren zur Parameterschätzung, das zusätzlich zu den beobachteten Daten vorhandenes Vorwissen berücksichtigt (für eine allgemeine Einführung in die bayessche Statistik siehe z.B. [30], [31], [32]). Im Rahmen der Schätzung von Ausfallfunktionen wurde dieses Verfahren erfolgreich angewendet im Bereich der Strom- und Wasserversorgung (z.B. [34], [35]).

### 3.4 Forschung zu RBM in der Schweiz

In der Schweiz wurden zwei Forschungsgruppen identifiziert, die sich schon intensiver mit dem Thema RBM beschäftigt haben:

1. Die Arbeitsgruppe von Prof. Faber an der ETH (Institut f. Baustatik und Konstruktion) (z.B. [36], [38], [37], [24], [25]) fokussiert technisch auf Gebäude. Die verwendeten Risikomodelle fokussieren auf volkswirtschaftliche und gesellschaftliche Risiken und sind nicht direkt auf die BSA-Situation zu übertragen.
2. Die Arbeitsgruppe von Prof. Heitz an der ZHAW (Institut für Datenanalyse und Prozessdesign) fokussiert auf den optimalen Einsatz finanzieller Mittel in der Instandhaltung ([28], [9], [29]). Diese Arbeiten sind direkt für das Projekt verwendbar und wurden weiter oben schon erläutert.

### 3.5 Internationale Ansätze

Als Vergleich wurden die Strategien in der Instandhaltung in anderen Ländern untersucht. In Deutschland ist der Inhalt über die „Wartung und Instandhaltung der Strassenausstattung“ als Teil des Strassenbetriebsdienstes über ein Leistungsheft definiert und vom Bund über die Bundesländer vergeben. Die Ausgaben werden gemäss einem Verteilschlüssel vergeben [39], bei welchem die Fahrstreifenkilometer, die Belastungen, Lebenszyklen und andere Faktoren eine Rolle spielen. In Österreich ist die staatliche ASFiNAG [40] für das höherrangige Strassennetz verantwortlich. Über die Vergabemethodik der Aufträge wird auf den offiziellen Seiten nicht informiert (gemäss schriftlich vorhandenen Abklärungen nach Bedarf / Kostenwirksamkeit). In Grossbritannien bildet die HTMA [41] eine Gemeinschaft für den Unterhalt und berücksichtigt auch die Lebenszykluskosten. Der Risikoaspekt steht jedoch nicht im Vordergrund. In den USA werden Bau und Unterhalt von Autobahnen teilweise über bundesstaatliche, meistens jedoch über staatliche Gelder finanziert (CBO [42]). Über die präzise Verteilung wurde keine verfügbare Literatur gefunden. Es kann also zusammengefasst werden, dass eine optimierte Unterhaltsstrategie noch nicht im grossen Massstab angewendet wurde. Diese Erkenntnis unterstreicht deshalb die Notwendigkeit, eine detaillierte Abschätzung der Nutzen einer solchen Strategie für die Schweiz zu untersuchen.

### 3.6 Erfahrungen aus anderen Branchen

Das Problem des optimalen Mitteleinsatzes für technische Anlagen existiert analog auch in anderen Branchen. Brandenburger et al [30] stellen die Einführung eines risikobasierten Instandhaltungsmodells für die Stadtentwässerung Köln vor, basierend auf einer klassischen Risikomatrix mit Kosten- oder Risikoreduktionspotential. Vennegeerts [43] beschreibt für elektrische Verteilnetze ein Verfahren, dass die optimale Instandhaltung eines Portfolios berechnet. Dieses basiert jedoch auf komplexen Optimierungsverfahren (genetische Algorithmen), die für unseren Zweck zu kompliziert sind. Wenk [44] bezieht sich auf Verhältnismässigkeit von Einzelobjekten im Erdbebenrisiko.

Die klassische Instandhaltungsliteratur fokussiert in der Regel auf Einzelanlagen (z.B. [7]). Erst im Zuge der Weiterentwicklung zum „Asset Management“ wurde die Portfoliooptik stärker betont ([45], [46], [47], [48]). Zum Beispiel wurde vom Energieunternehmen Alpiq ein Assetmanagementmodell eingeführt, um die Rentabilität zu erhöhen [49]. In Portfolios gibt es die zusätzliche Optimierungsmöglichkeit, Geld zwischen Anlagen umzuverteilen. Dies liefert substantielles Optimierungspotential: Case-Studies im Bereich Strom- und Wasserversorgung ergeben Kostensenkungspotential von 10-30%, und Risikosenkungspotential von 20-50% [29]. Auch Brandenburg et al [30] skizziert diese Idee, ohne jedoch eine formale Lösung zu liefern. Unserem Wissen nach gibt es in der Asset-Management-Literatur, mit Ausnahme der genannten Arbeiten, bislang keine ausgearbeiteten Ansätze, um die Frage der optimalen Mittelverwendung mittels quantitativer Methoden geeignet für die BSA Infrastruktur zu lösen.

Zusammenfassend ist zu erwarten, dass ein Kostensenkungspotential bei Einheiten entsteht, welche heute wenig Risiko erzeugen. Potential für Risikoreduktion existiert bei Anlagen, die ein hohes Risiko aufweisen. Der in diesem Dokument beschriebene Optimierungsansatz verfolgt das Ziel automatisch Kostenreduktion bei unkritischen BSA realisieren, und das freiwerdende Budget für Risikominimierung kritischer BSA einzusetzen.



## 4 Konzeptioneller Ansatz

Grundlage des hier beschriebenen Ansatzes ist die Darstellung von Instandhaltungsstrategien als Punkte in einem zweidimensionalen Raum, wobei die zwei Dimensionen den Kosten einerseits, und dem Risiko andererseits entsprechen. Eine beliebige Wartungs- und Instandhaltungsstrategie wird also durch zwei Zahlen charakterisiert:

- Die jährlichen Kosten, die unter dieser Strategie erzeugt werden (diese beinhalten die Kosten für die Tätigkeiten selber, aber auch Energiekosten, Kosten für Ersatzteile, Kapitalkosten, usw., siehe Abschnitt 5.3.4)
- Das Risiko, das unter dieser Strategie durch Störungen und Ausfälle der BSA erzeugt wird. Dieses Risiko wird in Risikoeinheiten gemessen (siehe Abschnitt 5.3.3)

Beide Zahlen sind berechnet aufgrund von Lebenszyklusmodellen, und sind über den Lebenszyklus der Anlagen gemittelt. Die Kosten beschreiben also die über den Lebenszyklus gemittelten jährlichen Kosten, das Risiko das über den Lebenszyklus gemittelte Risiko. Die dazu verwendeten Modelle werden im Kapitel 5 ausführlich dargestellt.

Dabei kann man die Instandhaltungsstrategie, die man betrachtet, auf unterschiedlichen Ebenen formulieren:

- **Strategie auf Tätigkeitsebene:** Auf der Ebene einer einzelnen Tätigkeit (z.B. periodische Inspektion) wird charakterisiert durch ihre Häufigkeit. Verschiedene Strategien werden also beschrieben durch die Angabe der Frequenz (oder des Wartungszyklus), mit der diese Tätigkeit durchgeführt wird. Eine reaktive Instandhaltungsstrategie ergibt sich über den Grenzfall eines unendlich langen Wartungszyklus. Aufgrund praktischer und operativer Randbedingungen gibt es hier in der Regel nur ein paar wenige Optionen.
- **Strategie auf Anlagenebene:** Auf der Ebene einer Anlage gibt es verschiedene Tätigkeiten, die jeweils eine unterschiedliche Frequenz haben können. Eine Strategie wird beschrieben durch die Angabe der Frequenzen für die verschiedenen Tätigkeiten, besteht also aus einer *Kombination* von Häufigkeiten. Auf Ebene Anlage ist die Anzahl von möglichen Strategien oft sehr hoch und kann in die Tausende gehen.
- **Strategie auf Portfolio-Ebene:** Eine Strategie wird hier beschrieben durch die Kombination verschiedener Anlagenstrategien. Naturgemäss explodiert die Anzahl möglicher Strategien nochmals exponentiell im Vergleich zur Anlagenebene.

Unabhängig auf welcher Ebene man die Strategie betrachtet, ist der Ansatz jedoch immer der gleiche: Eine gegebene Strategie ist charakterisiert durch Kosten und Risiko.

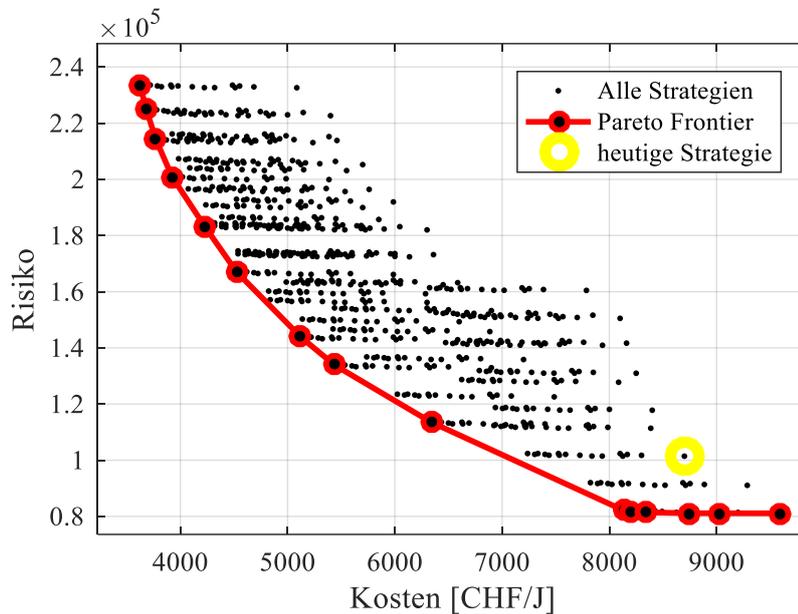
Ein wichtiges konzeptionelles Element des hier beschriebenen Ansatzes besteht in der Identifikation von sogenannten «effizienten» Instandhaltungsstrategien. Eine Instandhaltungsstrategie nennen wir dann effizient, wenn eine der folgenden Punkte zutrifft:

- bei gleichen Kosten mit keiner anderen Strategie ein tieferes Risiko erzielt werden kann
- bei gleichem Risiko mit keiner anderen Strategie geringere Kosten entstehen.

Die Menge der effizienten Strategien ist eine Teilmenge der Menge aller Strategien. Wir verwenden hier ein Konzept, das aus der multikriteriellen Optimierung bekannt ist und dort unter dem Begriff der Pareto-Front etabliert ist. Die effizienten Strategien

entsprechen genau der Pareto-Front der Strategien im zweidimensionalen Risiko-Kosten-Raum.

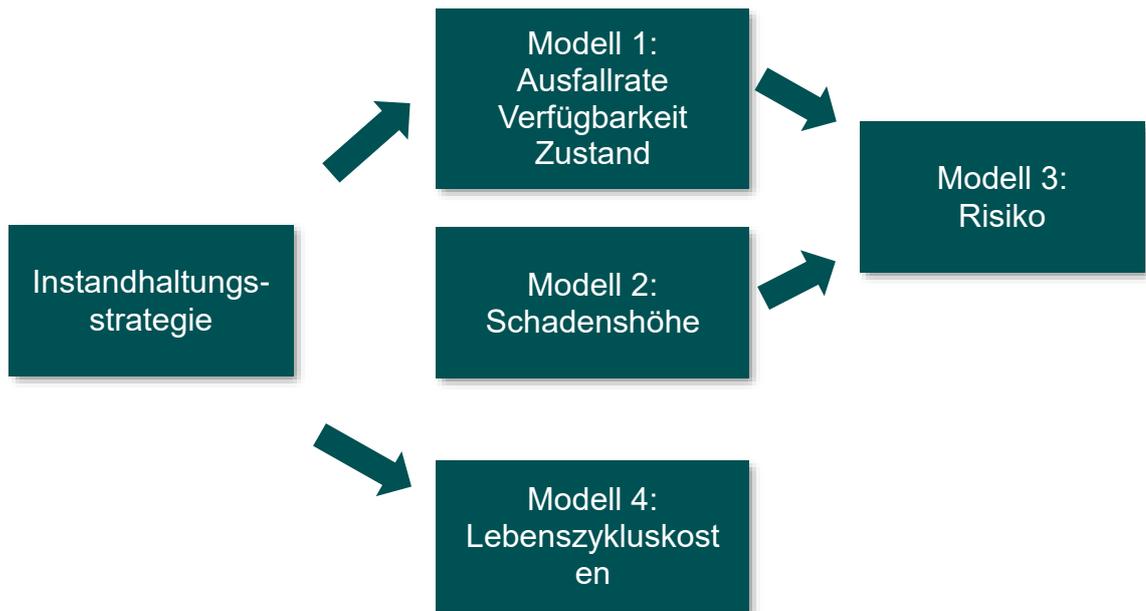
In **Abb. 2** ist ein Beispiel der Menge aller Instandhaltungsstrategien einer Anlage gezeigt, und die entsprechende Pareto-Front (auch Pareto Frontier genannt) als rote Line dargestellt.



**Abb. 2** Beispiel eines Pareto-Diagramms

Die zweidimensionale Darstellung aller Strategien erlaubt also einen einfachen ersten Optimierungsschritt, der darin besteht, eine ineffiziente Strategie durch eine effiziente Strategie zu ersetzen, also durch eine Strategie auf der Pareto-Front.

Die Grundlage der Pareto-Optimierung bilden die Instandhaltungsstrategien sowie ihre Kosten und Risikoreduktionsbeiträge. In der folgenden Abbildung ist ersichtlich, welche Teilprodukte und Modelle benötigt werden. Diese Modelle werden auf der Ebene der Instandhaltungstätigkeiten oder auf der Ebene der Anlage definiert. Durch Aggregation kann man dann Modelle für höhere Stufen ableiten.



**Abb. 3** Teilprodukte und Modelle für Pareto-Optimierung

Die Durchführung einer Instandhaltungstätigkeit geschieht aus bestimmten Gründen. Entweder wird dadurch die Verfügbarkeit einer Anlage erhöht (und damit das Risiko aufgrund von Störungen und Ausfällen reduziert) und/oder die Lebenszykluskosten gesenkt. Die Modellierung muss beide Aspekte mit geeigneten Modellen beschreiben. Dies führt zu den notwendigen Modellen, welche für die Risiko- und Kostenberechnung notwendig sind. Es braucht folglich:

- Ein Risikomodell, das den Zusammenhang zwischen Instandhaltungstätigkeit und erzeugtem Risiko beschreibt. Dazu sind zwei Elemente notwendig: einerseits muss die Ausfallrate/Verfügbarkeit in Abhängigkeit des Instandhaltungsintervalls bestimmt werden. Andererseits muss die Schadenshöhe bei Ausfall modelliert werden. Da die Ausfallrate durch Alterung in der Regel zunimmt, muss der Verlauf über den gesamten Lebenszyklus abgebildet werden. Eine Mittelung über den Lebenszyklus liefert die Risikozahl, mit der wir in unserem Modell arbeiten.
- Ein Kostenmodell, das die Beziehung zwischen der Instandhaltungstätigkeit und den mittlere jährlichen Kosten herstellt.

Wie wir in Abschnitt 5.3.3 zeigen werden, kann man davon ausgehen, dass jede Tätigkeit mit einem bestimmten Risikomechanismus verknüpft ist, und dass diese Risikomechanismen sich additiv überlagern zum Gesamtrisiko. In ähnlicher Weise können die Kosten in der Regel als Addition der Kosten der einzelnen Tätigkeiten berechnet werden. Aus diesem Grund können wir für die Modellierung von Anlagen und Portfolios einen einfachen additiven Ansatz verwenden, um Kosten und Risiko für eine Anlage bzw. für ein Anlagenportfolio zu berechnen. Die grundlegenden Modellelemente sind jedoch immer auf der Ebene der Tätigkeit definiert und parametrisiert.

Mit Hilfe dieser Modelle auf Ebene von Tätigkeiten wird der Risiko- und Kostenbetrag für die einzelnen Instandhaltungstätigkeiten in Abhängigkeit ihrer Instandhaltungsintervalle berechnet. Dies ist schematisch in folgender Tabelle dargestellt:

**Tab. 1** Schematische Darstellung Risiko und Kosten von Instandhaltungstätigkeiten in Abhängigkeit des Instandhaltungsintervalls

Instandhaltungstätigkeit	Instandhaltungsintervall [Monate]	Risiko	Kosten
A	1	...	...
A	3	...	...
A	6	...	...
A	12	...	...
B	6	...	...
B	12	...	...
B	18	...	...
C	3	...	...
C	6	...	...
C	9	...	...
C	12	...	...

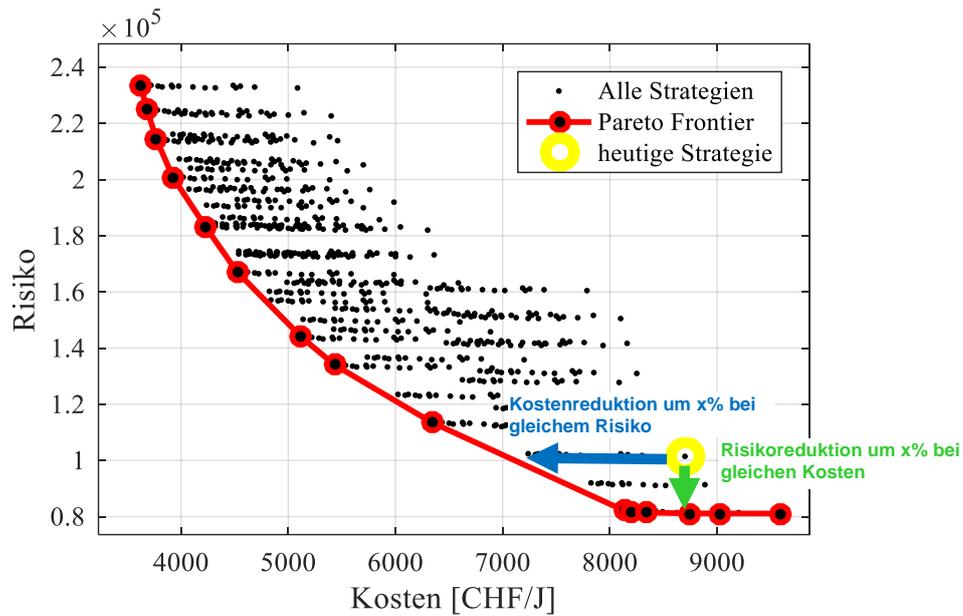
Die Instandhaltungstätigkeiten werden anschliessend zu möglichen Instandhaltungsstrategien  $p_i$  zusammengesetzt, z.B.

$$p_1 = \{(A,1), (B,6), (C,3)\}$$

$$p_2 = \{(A,3), (B,12), (C,3)\}$$

$$p_3 = \{(A,6), (B,12), (C,9)\}$$

Nicht sinnvolle oder nicht mögliche Kombinationen (z.B. aus betrieblichen oder gesetzlichen Rahmenbedingungen) können dabei ausgeschlossen werden. Für jede dieser so definierten Instandhaltungsstrategien ergibt sich so deren Risiko- und Kostenbetrag, welche im Pareto-Diagramm abgebildet werden. Durch diese Methodik können also Instandhaltungsstrategien quantitativ bewertet werden, und Verbesserungspotential der heute realisierten Strategien kann identifiziert werden. In **Abb. 4** ist ein Beispiel einer solchen Analyse gezeigt. Die gelb markierte Strategie entspricht der heute realisierten Instandhaltungsstrategie einer Anlage. Diese ist offensichtlich nicht effizient. Bessere Strategien können in verschiedenen Richtungen gefunden werden: es gibt zum Beispiel eine Strategie auf der Pareto-Front, die das gleiche Risiko bei deutlich geringeren Kosten erzeugt. Oder eine Strategie, die bei gleichen Kosten weniger Risiko produziert.



**Abb. 4** Beispiel Kosten-/Risikooptimierung

Zentrales Element der in diesem Bericht vorgestellten Methodik ist also die konsequente Analyse von Instandhaltungsstrategien bezüglich der Dimensionen Kosten und Risiko, und eine darauf aufbauende Optimierung.

In den folgenden Abschnitten werden die dazu notwendigen Modelle im Detail hergeleitet und begründet.



## 5 Vorgehen zur Kosten-/Risikoberechnung einzelner Anlagen

Der konzeptionelle Ansatz, nach welchem mögliche Instandhaltungsstrategien ermittelt und verglichen werden können, ist in Kapitel 2 beschrieben. Grundlage des Ansatzes ist die Quantifizierung von Risikobeitrag und Kosten einzelner Instandhaltungstätigkeiten (siehe **Tab. 1** auf Seite 26). Folgend wird das Vorgehen beschrieben, wie wir für einzelne Anlagen bzw. Anlagenteile die Kosten bzw. Risiken berechnen.

Bevor wir uns mit der Berechnung bzw. Modellierung der Kosten und Risiken beschäftigen können, müssen wir uns die Frage stellen, was wir genau modellieren müssen. Wie ist die Kostenseite abzubilden? Welche Risiken gibt es überhaupt und wie können wir die Risiken identifizieren?

Die Instandhaltung umfasst also sowohl reaktive Massnahmen (Reparatur) als auch präventive Massnahmen. Unter einer Instandhaltungsstrategie verstehen wir die Regeln, nach welcher präventive Massnahmen durchgeführt werden. Dies beinhaltet einerseits die Auswahl von präventiven Tätigkeiten, andererseits deren Rhythmus. Durch die Auswahl von präventiven Tätigkeiten ist auch festgelegt, welche Anlagenteile *nicht* präventiv gewartet werden.

Innerhalb des Forschungsprojekts wir die heutigen präventiven Tätigkeiten. Ziel ist, für diese Tätigkeiten optimierte Wartungszyklen zu finden. Es ist jedoch nicht das Ziel, die Auswahl der präventiven Tätigkeiten zu verbessern (z.B. neue präventive Tätigkeiten einzuführen, die heute noch nicht durchgeführt werden). Aus diesem Grund gehen wir davon aus, dass eine Instandhaltungsstrategie aus den heute bestehenden präventiven Tätigkeiten besteht, wobei der Freiheitsgrad darin besteht, für jede Tätigkeit das entsprechende Intervall zu definieren.

Dies hat Konsequenzen auf die Modellierung:

- Bezüglich des Risikos können wir uns damit auf diejenigen Störungen und Ausfälle der Anlagen beschränken, die durch die heute bestehenden präventiven Tätigkeiten beeinflusst werden. Alle anderen Störungen und Ausfälle bleiben durch eine Optimierung ja unbeeinflusst, brauchen also nicht berücksichtigt werden. Insbesondere brauchen wir solche Risiken gar nicht modellieren, deren Auftretenswahrscheinlichkeit heute nicht durch gezielte Massnahmen aktiv reduziert wird.
- Bezüglich der Kosten können wir uns auf diejenigen Kosten beschränken, die durch die heute bestehenden präventiven Tätigkeiten beeinflusst werden. Kostenanteile, die durch eine Veränderung der heutigen Wartungszyklen nicht beeinflusst werden, müssen nicht modelliert werden. Dazu gehören auch Reparaturkosten für Störungen/Ausfälle, die heute nicht aktiv verhindert werden.

Dadurch ergibt sich ein Modellierungsansatz, der von den heute bekannten präventiven Tätigkeiten ausgeht. Für jede dieser Tätigkeiten müssen in Abhängigkeit des Wartungszyklus

- (a) die mittleren jährlichen Kosten bestimmt werden, die anfallen
- (b) das mittlere Risiko bestimmt werden, das das Nicht-Perfekt-Funktionieren der Anlage erzeugt

Die Modellierung muss in erster Linie die *Veränderung* der Kosten bzw. des Risikos beschreiben, die durch eine Veränderung des Wartungszyklus bewirkt werden. Konstante Anteile von Kosten oder Risiko können ignoriert werden.

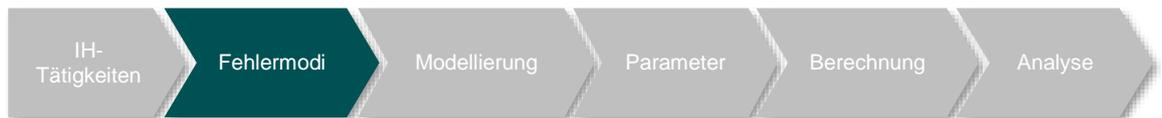
Mit diesen Überlegungen kommen wir zu Schluss, dass für die Kosten- und Risikomodellierung in erster Linie die *Auswirkungen* der Instandhaltungstätigkeiten ausschlaggebend sind. Falls eine Tätigkeit häufiger oder seltener ausgeführt wird, ergibt sich daraus eine Auswirkung auf die Kosten oder auf das Risiko.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde deshalb ein 6-stufiges strukturiertes Vorgehen entwickelt, welches von den Instandhaltungstätigkeiten über die Auswirkungen hin zur Modellierung und so zur Berechnung der Kosten und des Risikos führt.



**Abb. 5** Vorgehen Phase 1 - Instandhaltungstätigkeiten identifizieren

Ausgangslage bildet die heutige Instandhaltungsstrategie bzw. die Instandhaltungstätigkeiten, wie sie heute ausgeführt werden. Diese werden in einem ersten Schritt identifiziert und bilden die Grundlage, um die Risiken und Kosten zu bestimmen.



**Abb. 6** Vorgehen Phase 2 - Fehlermodi bestimmen

Wie bereits erwähnt, haben präventive Instandhaltungstätigkeiten einen gewünschten Effekt oder einen Nutzen, sonst würde man sie ja nicht durchführen. Zum Beispiel verlängern sie die Lebensdauer einer BSA oder verhindern Ausfälle bzw. Störungen. In Anlehnung an die in der Zuverlässigkeitstheorie gängige Terminologie beschreiben wir diesen Effekt mit Hilfe des Konzepts des Fehlermodus. Der Begriff „Fehlermodus“ (failure mode) stammt aus der „Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)“ (siehe z.B. [6]), welche eine Methode zur systematischen Risikoanalyse darstellt. Anwendung findet eine FMEA zum Beispiel im RCM-Verfahren (Reliability Centred Maintenance – zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung) zur Festlegung einer optimalen Instandhaltungsstrategie. In diesem Kontext hilft die FMEA zur Identifikation von möglichen Fehlern und Folgen, worauf anschliessend die notwendigen Massnahmen (bzw. Instandhaltungstätigkeiten) festgelegt werden.

Wir gehen davon aus, dass der angestrebte Nutzen einer präventiven Massnahme darin besteht, einen bestimmten Fehlermodus zu verhindern oder zu vermindern.

*Beispiel:* Der Nutzen einer Reinigungstätigkeit ist die Verhinderung einer übermässigen Verschmutzung. Der Fehlermodus der Reinigung ist folglich die Verschmutzung.

Über die Fehlermodi lassen sich die Risiken und Kostenfolgen ableiten, welche in der Modellierung berücksichtigt werden müssen.



**Abb. 7** Vorgehen Phase 3 – Kosten- und Risikomodell entwickeln

In der Modellierungsphase geht es darum, die Beziehung zwischen Instandhaltungsintervall und Kosten bzw. Risiko quantitativ zu beschreiben. Dazu muss

in der Regel ein Lebenszyklusmodell aufgestellt werden. Ein Modell beschreibt, wie die Kosten und das Risiko über die Zeit zu- und abnehmen und welche Auswirkung dabei das Instandhaltungsintervall hat.

Ziel der Modellierung ist es, möglichst allgemeingültige Kosten- und Risikomodelle zu entwerfen, die auch für andere Tunnelobjekte wiederverwendet werden können. Solche Modelle enthalten typischerweise verschiedene Modellparameter, die einerseits von der modellierten Anlage abhängen (z.B. Alterungsgeschwindigkeit, Ausfallrate, ...), andererseits auch die Umgebungsvariablen bezeichnen können (z. B. Verkehrslast, Unfallhäufigkeit, Richtungs- bzw. Gegenverkehr etc).



**Abb. 8** Vorgehen Phase 4 – Parameter abschätzen

Da die verschiedenen Tunnelobjekte technisch unterschiedlich sein können, aber auch unterschiedlichen Umgebungsvariablen ausgesetzt sein können, müssen wir vor der quantitativen Berechnung von Kosten und Risiko die Modellparameter spezifisch abschätzen und festlegen.



**Abb. 9** Vorgehen Phase 5 – Kosten- und Risiko berechnen

Mit Hilfe der entwickelten Modelle und den festgelegten Parameter berechnen wir für die einzelnen BSA die mittleren jährlichen Kosten sowie das mittlere jährliche Risiko und erreichen so die notwendigen Resultate, um verschiedene Instandhaltungstätigkeiten bzw. Instandhaltungsstrategien zu vergleichen. Resultat dieser Phase ist das eingangs erwähnte Schaubild, wo jede Strategie als Punkt in einem zweidimensionalen Risiko-Kosten-Raum dargestellt ist.



**Abb. 10** Vorgehen Phase 6 – Analyse der Resultate, Sensitivitätsanalyse der Parameter

Abschliessend analysieren wir die Resultate, um Verbesserungspotential zu identifizieren und über die Änderung der Instandhaltungsstrategie zu realisieren. Dies kann auf der Ebene einer Anlage oder auf der Ebene des Portfolios geschehen (siehe Kapitel 6). Des Weiteren helfen Sensitivitätsanalysen, die Robustheit der Resultate aufzuzeigen.

In den folgenden Unterkapiteln sind die einzelnen Phasen genauer beschrieben und erläutert.

## 5.1 Phase 1: Identifikation der Instandhaltungstätigkeiten

### 5.1.1 Ziel / Inhalt der Phase

Das Ziel der ersten Phase ist die aktuellen Instandhaltungstätigkeiten des Betreibers zu identifizieren und die Rahmenbedingungen sowie organisatorischen Abhängigkeiten zu

klären. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit besteht kein Anspruch, die Angemessenheit und Vollständigkeit der heutigen Instandhaltungstätigkeiten zu beurteilen. Es wird kein Instandhaltungsprogramm entworfen und auch nicht eruiert, an welchen Anlagen/Anlagenteile Instandhaltungsarbeiten sinnvoll sind.

## 5.1.2 Identifikation der Instandhaltungstätigkeiten

Um einen Überblick zu erhalten, welche Instandhaltungstätigkeiten heute ausgeführt werden, wird ein Interview mit dem Betreiber der Anlagen durchgeführt. Für diese Interviews wurde ein Frageraster (siehe I.1.1.11) entworfen, mit welchen die wichtigsten Grundlageninformationen über die einzelnen Instandhaltungstätigkeiten eingeholt werden können. In erster Linie muss verstanden werden, weshalb die Instandhaltungstätigkeit notwendig ist und welche Kosten entstehen. Nur mit Hilfe dieser Informationen können in der nächsten Phase die Fehlermodi definiert werden. Es gilt daher Fragen zu klären wie:

- Welche Instandhaltungstätigkeiten werden wie durchgeführt?
- Wie oft werden die Arbeiten durchgeführt?
- Weshalb werden die Arbeiten durchgeführt?
- Wie viel kostet eine einmalige Durchführung einer Instandhaltungstätigkeit?
- Etc.

Als zusätzliche und nützliche Informationsquelle kann ein Instandhaltungstool des Betreibers dienen. Dadurch kann bereits vor dem Interview ein definierter Rahmen geschaffen werden, da vorgängig die verschiedenen Instandhaltungstätigkeiten in Erfahrung gebracht werden können.

## 5.2 Phase 2: Fehlermodi und Modellierungsentscheidung

### 5.2.1 Ziel / Inhalt der Phase

Jede Instandhaltungstätigkeit erzielt eine Wirkung bzw. erfüllt einen Nutzen. Der Nutzen liegt meistens in der Minderung/Verhinderung von Risiken oder der Senkung bestimmter Kosten. Um den Nutzen zu bestimmen, werden in dieser Phase zuerst die Fehlermodi der Tätigkeiten bestimmt und die Auswirkungen der Fehlermodi abgeleitet. Anschliessend wird mit Hilfe einer qualitativen Bewertung entschieden, für welche Auswirkungen Kosten- bzw. Risikomodelle notwendig sind, um eine risikobasierte Instandhaltung zu gestalten.

### 5.2.2 Eruiierung der Fehlermodi

Für die Modellierung der Kosten und Risiken müssen wir erst definieren, welche Kosten und Risiken im Zusammenhang mit einer Instandhaltungstätigkeit stehen. Der Ansatz dazu führt über die Festlegung der Fehlermodi und Bestimmung von deren Folgen.

Aufgrund von definierten Instandhaltungstätigkeiten leiten wir die zugrundeliegenden Fehlermodi ab und legen deren Folgen fest. Die Folgen können zusätzliche Kosten und/oder ein Risiko bedeuten. Diese Kosten und Risiken sind anschliessend für die Modellierung und Berechnung ausschlaggebend.

Für jede Instandhaltungstätigkeit stellen wir uns die Frage „Was passiert, wenn diese Tätigkeit nicht durchgeführt wird?“. Daraus ergeben sich die einzelnen Fehlermodi, wofür die Auswirkungen abgeleitet werden können.

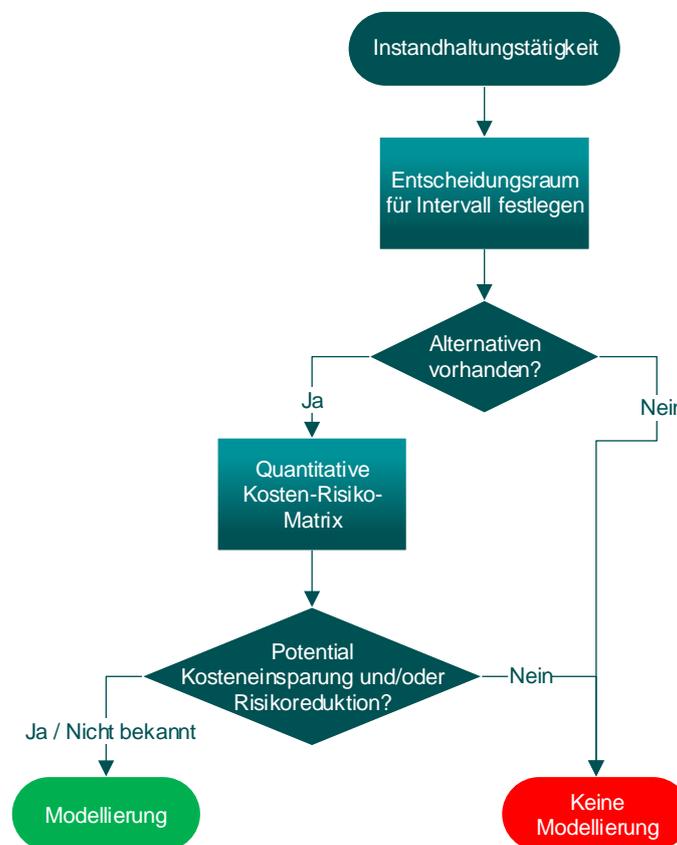
*Beispiel: Als fiktives Beispiel nehmen wir eine Instandhaltungstätigkeit „Reinigung Verkehrssignale im Tunnel“ und legen dafür den Fehlermodus sowie deren Auswirkungen fest:*

**Tab. 2** Beispiel Beschreibung Fehlermodus und Auswirkung

Fehlermodus	Folge / Auswirkung	Risiko	Kosten
Verschmutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verringerte Sichtbarkeit</li> <li>Erhöhtes Unfallrisiko</li> <li>Erhöhtes Unfallausmass</li> <li>Stärkere Korrosion</li> <li>Verkürzte Lebensdauer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓</li> <li>✓</li> </ul>	✓

### 5.2.3 Entscheidung über Modellierung

Nicht für alle Instandhaltungstätigkeit ist der Aufwand für Kosten- und Risikomodellierung sinnvoll. Teilweise ist es möglich bereits vorgängig abzuschätzen, dass eine Änderung des bestehenden Instandhaltungsintervalls weder Kosten noch Risiko in einem ausreichenden Mass senken kann. Folglich entwickelten wir ein systematisches Vorgehen, um über die Modellierung einer Instandhaltungstätigkeit zu entscheiden.



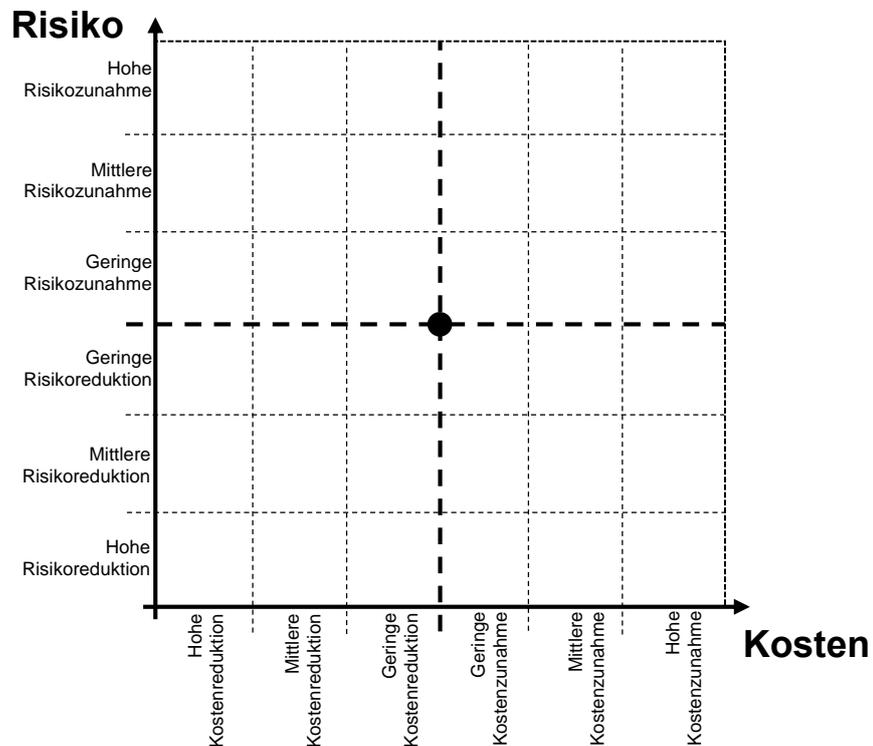
**Abb. 11** Entscheidungsbaum für Modellierung der Kosten und Risiken einer Instandhaltungstätigkeit

Als erstes wird zu einer Instandhaltungstätigkeit der Entscheidungsraum des Instandhaltungsintervalls festgelegt. Zum Beispiel können durch betriebliche Einschränkungen Instandhaltungen nur in definierten Zeitabständen erfolgen. Der Entscheidungsraum legt somit fest, welche Intervalle realistisch sind und welche Alternativen existieren. Falls es keine Alternativen gibt, kann keine Optimierung erfolgen, und auf eine Modellierung kann verzichtet werden. Weiter werden die Kosten und Risiken auf ihre Abhängigkeit vom Instandhaltungsintervall bewertet. Als Grundlage dafür dienen die Fehlermodi, welche vorgängig identifiziert worden sind (vgl. Abschnitt 5.2.2). Im Wesentlichen benötigen wir für eine Instandhaltungstätigkeit die folgenden Informationen:

**Tab. 3** Übersicht Entscheidungsraum, Kosten- und Risikofaktoren einer Tätigkeit

Tätigkeit	Ausprägung	
Entscheidungsraum des Instandhaltungsintervalls in $\Delta$ Jahre	$\Delta = 0.5, 1, 1.5, \dots$	
Kosten mit heutigem Instandhaltungsintervall	Tätigkeitskosten	CHF/J
	Reparaturkosten	CHF/J
	Betriebs-/Degradationskosten	CHF/J
Sind <b>Kosten</b> abhängig vom Instandhaltungsintervall?	Tätigkeitskosten	Ja/Nein
	Reparaturkosten	Ja/Nein
	Betriebs-/Degradationskosten	Ja/Nein
Sind <b>Risiken</b> abhängig vom Instandhaltungsintervall?	Unfallhäufigkeit	Ja/Nein
	Schadensausmass <sup>2</sup> bei Ereignis	Ja/Nein
	Ausfallrate bzw. Eintretenshäufigkeit Fehlermodi	Ja/Nein
	Direkter Schaden (Sperrung, Stau, Personenschaden, etc.) bei Ausfall bzw. Eintreten eines Fehlermodi	Ja/Nein

Als nächstes erstellen wir eine qualitative Analyse mit Hilfe einer Risiko-Kosten-Matrix, welche in **Abb. 12** dargestellt ist.



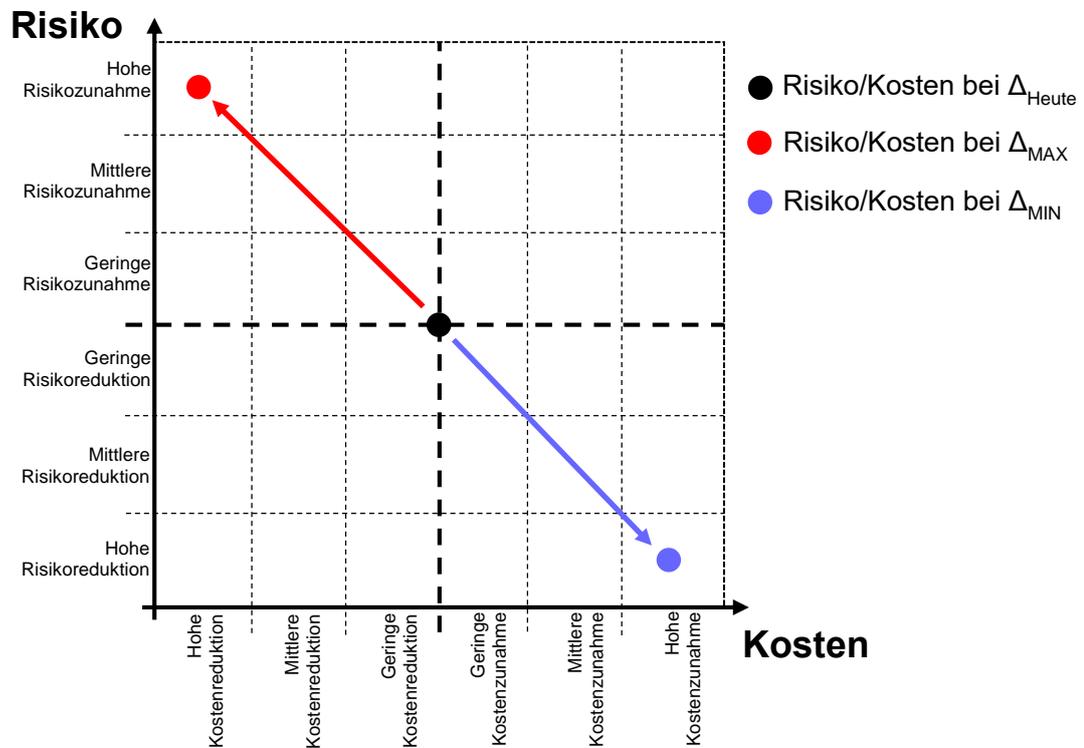
**Abb. 12** Qualitative Risiko-Kosten-Matrix

In diese Matrix werden die folgenden drei Punkte definiert:

- Risiko/Kosten bei **heutigem** Instandhaltungsintervall ( $\Delta_{\text{Heute}}$ )
- Risiko/Kosten bei **maximalem** Instandhaltungsintervall ( $\Delta_{\text{MAX}}$ )
- Risiko/Kosten bei **minimalem** Instandhaltungsintervall ( $\Delta_{\text{MIN}}$ )

<sup>2</sup> Vergl. **Abb. 17** Risikomatrix. Quelle: ERMA Konzeptbericht 2009 [4] auf Seite 48.

Da wir die Risiko- und Kostenhöhe nicht genau kennen, schätzen wir sie grob ab. Die Übersicht in **Tab. 3** dient uns als Grundlage, um die einzelnen Einflussgrößen zu beurteilen. Falls eine Abschätzung aufgrund zu vieler Fehlermodi nicht möglich ist, ist in Phase 3 (vgl. Abschnitt 5.3) eine Modellierung der Kosten und Risiken notwendig.



**Abb. 13** Beispiel ausgefüllte Risiko-Kosten-Matrix

Der schwarze Punkt entspricht dem aktuellen Instandhaltungsintervall. Dieses kann im Entscheidungsraum verändert werden. Alternative Intervalle werden durch andere Punkte im Entscheidungsraum bezeichnet. Wenn ein Intervall die Kosten reduziert (erhöht) befindet sie sich links (rechts) des roten Punktes. Wenn durch das neue Intervall das Risiko reduziert (erhöht) wird, befindet sich der Punkt darunter (darüber).

Um zu entscheiden, ob eine Modellierung der Instandhaltungstätigkeit sinnvoll ist, wird die Matrix in vier Bereiche eingeteilt:

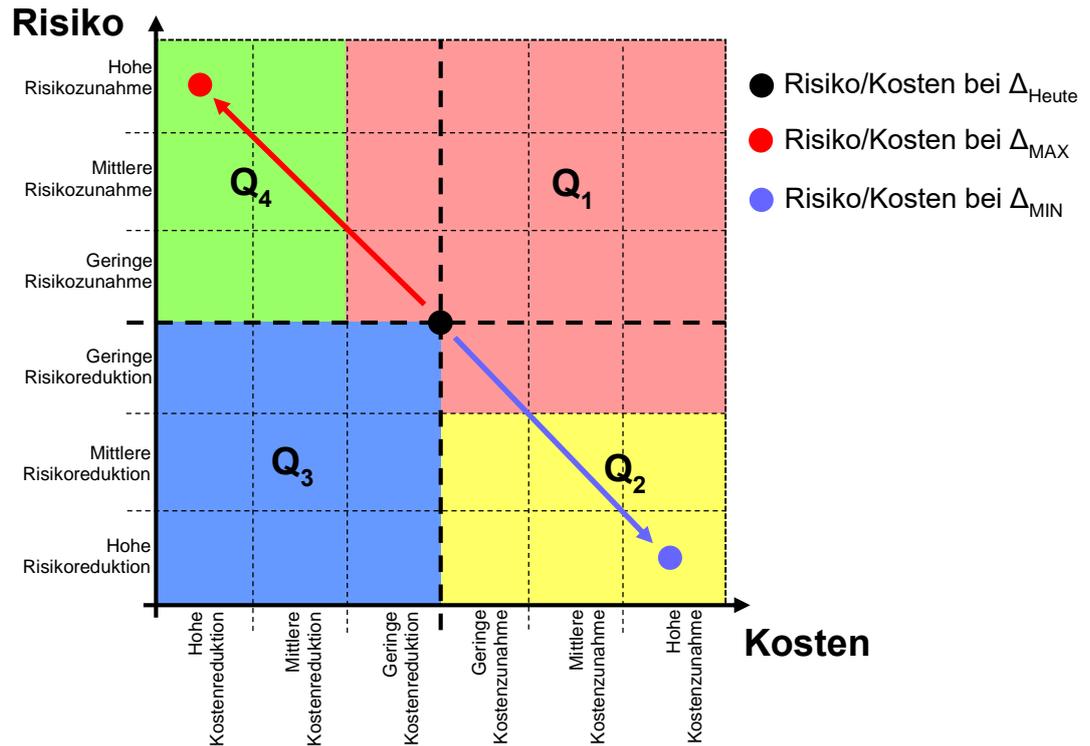


Abb. 14 Beispiel ausgefüllte Risiko-Kosten-Matrix

**Eine Modellierung ist sinnvoll**, wenn sich mindestens ein Punkt in den Bereichen  $Q_2$ ,  $Q_3$ , oder  $Q_4$  befindet. Der gewöhnliche Fall ist, wenn sich die Punkte in  $Q_2$  und  $Q_4$  befinden. Dann gibt es durch eine Intervallveränderung das Potential, entweder Kosten einzusparen oder Risiko zu reduzieren. Der optimale Fall ist wenn die alternativen Strategien im  $Q_3$  (blau) sind. Dann gibt es ein Potential sowohl für eine Kosteneinsparung als auch für Risikoreduktion.

**Eine Modellierung ist nicht sinnvoll**, wenn sich beide Punkte im ersten Bereich ( $Q_1$ , rosarot) befinden. In diesem Bereich können wir durch Veränderung des Intervalls weder Kosten einsparen noch das Risiko reduzieren. Falls wir nur sehr wenig einsparen können (und dafür das Risiko erhöhen) lohnt es sich ebenfalls nicht zu modellieren. Gleiches gilt wenn wir das Risiko nur sehr wenig reduzieren können und dafür mehr bezahlen. Auch dann lohnt sich in der Regel die Modellierung nicht. Deshalb ist der rosarote Bereich in beiden Richtungen etwas erweitert.

## 5.3 Phase 3: Risiko- und Kostenmodellierung

### 5.3.1 Ziel / Inhalt der Phase

Nachdem in Phase 2 bestimmt wurde, für welche Tätigkeiten eine Modellierung notwendig ist, werden in Phase 3 die mathematischen Modelle aufgestellt. Die Fehlermodi, die durch jede Tätigkeit adressiert werden, wurden bereits in der Phase 2 identifiziert. In Phase 3 ist das Ziel, für jeden Fehlermodus ein Modell zu erstellen, das die Beziehung zwischen Tätigkeitsintervall und Risiko bzw. Kosten quantifiziert.

Grundlage dafür ist ein technisches Modell, das die Beziehung zwischen Intervall und mittlerem Zustand der Anlage beschreibt, insbesondere deren Ausfallverhalten bzw. Degradationszustand (denn dies definiert sowohl Risiko als auch die Kosten).

Die Länge des Intervalls hat einen Einfluss auf die Ausfallrate/Störungsrate oder den Degradationszustand / die Alterungsfunktion der Anlage. Wir erstellen quantitative

Modelle, um diese Zusammenhänge abzubilden. Anschliessend wird die so berechnete Ausfallrate (bzw. Alterung) in Abhängigkeit des Wartungsintervalls verwendet, um das Risiko und die Kosten als Funktionen des Intervalls zu modellieren.

Für die Modellierung werden in der Regel vereinfachte Ansätze verwendet, die nicht alle physikalischen Prozesse exakt abbilden. Eine solche Vereinfachung ist notwendig, weil meist nicht genug Detailkenntnisse vorhanden sind, um ein physikalisch korrektes Modell abzuleiten. Im Einzelfall ist es fast immer prinzipiell möglich, ein physikalisch korrektes Modell abzuleiten; dies erfordert aber in der Regel einen hohen Aufwand, der in der Praxis nicht zu leisten ist. Insofern beschreiten wir in der Modellierung einen Mittelweg, der versucht, die wichtigen Zusammenhänge approximativ abzubilden, gleichzeitig aber auf der Grundlage des vorhandenen Wissens ohne zusätzliche Studien abstützt. Daher werden wir für Degradationsprozesse in der Regel eine lineare Zeitabhängigkeit annehmen. Für die Modellierung der Ausfallrate treffen wir zudem grundsätzlich die Annahme einer konstanten Ausfallrate, obwohl sie in der Regel nur im zeitlichen Durchschnitt gültig ist. Diese einfachen Modelle sind konsistent mit dem Genauigkeitsgrad des Erfahrungswissens in der Praxis und erlauben Nachvollziehbarkeit und intuitives Verständnis der Ergebnisse.

Im Grundsatz modellieren wir nur diejenigen Aspekte, die durch die Wahl der Instandhaltungsstrategie überhaupt beeinflusst werden können. Risiko- oder Kostenbeiträge, die unabhängig vom Wartungsintervall sind, werden deshalb nicht modelliert.

*Beispiel:* Bei der Analyse des Risikos der Beleuchtung eines Tunnels ist es nicht nötig, das Risiko für Umweltschäden zu modellieren, weil dieses unabhängig ist von der Art und Weise, wie die Instandhaltung durchgeführt wird.

Dies führt zu einer starken Vereinfachung der Modellierungsaufgabe. Sie ist gerechtfertigt, weil wir mit der Modellierung auf eine Optimierung des Systems abzielen. Konstante Beiträge (d.h. nicht von der Strategie abhängig) können deshalb vernachlässigt werden.

### 5.3.2 Technisches Modell

Grundlage der Modellierung ist das technische Modell, das den Zusammenhang zwischen der Häufigkeit einer Instandhaltungstätigkeit und den technischen Eigenschaften Ausfallrate, Verfügbarkeit und Zustand abbildet (Modell 1 in **Abb. 3**). Das technische Modell wird als Grundlage für die Berechnung des Risikos und der Kosten verwendet.

Ausfälle einer Anlage sind definiert als «Beendigung der Fähigkeit einer Betrachtungseinheit, eine geforderte Funktion zu erfüllen» (DIN 31051, siehe auch [8]). Oft gibt es verschiedene Gründe, wieso eine Einheit oder Anlage einen Ausfall hat: es kann z.B. ein elektrisches Versagen geben, oder die Mechanik kann einen Fehler haben. Diese verschiedenen Ausfallursachen (Fehlermodi) sind zu unterscheiden, weil sie oft unterschiedliche Konsequenzen haben (z.B. sind die Reparaturkosten oft sehr unterschiedlich, oder die Ausfallzeiten).

Technische Modelle beziehen sich normalerweise auf einen ganz bestimmten Fehlermodus. Wenn wir also hier von Ausfallrate sprechen, so meinen wir spezifisch die Rate von Ausfällen, die dem jeweiligen Fehlermodus zugeordnet sind. Analoges gilt für die Verfügbarkeit/Nichtverfügbarkeit.

Die technischen Eigenschaften sind zeitabhängig. Beispielsweise verändert sich der Zustand jedes technischen Systems über die Zeit; in der Regel verschlechtert sich der Zustand. Analog steigt in der Regel die Ausfallrate. Um das technische Modell aufzustellen, ist ein Wissen über diese Dynamik notwendig. Um die optimalen Instandhaltungsstrategien zu bestimmen, ist es jedoch nicht wichtig, die technischen Eigenschaften in ihrem zeitlichen Verlauf genau zu modellieren. Relevant ist der

*Mittelwert über den Lebenszyklus*, in ähnlicher Weise, wie man auch bei den Lebenszykluskosten nicht den genauen Verlauf der Kosten angibt, sondern die Summe über den Lebenszyklus, oder die gemittelten jährlichen Kosten.

Resultat des technischen Modells ist also immer ein Mittelwert einer der technischen Grössen

- Zustand
- Störungsrate
- Verfügbarkeit / Nichtverfügbarkeit

wobei diese Mittelung über den gesamten Lebenszyklus erfolgt.

### 5.3.2.1. Klassifizierung von prototypischen Modellen

Die technischen Modelle wurden im Projekt anhand der untersuchten Systeme entwickelt. Es zeigt sich aber schon auf der Grundlage der wenigen untersuchten Systeme, dass es prototypische Modelle gibt, die immer wieder vorkommen. Es war ein Ziel des Projektes, diese prototypischen Modellklassen zu identifizieren und verallgemeinerbar zu beschreiben. Damit können wir eine Wiederverwendbarkeit der Modelle gewährleisten.

Die im Folgenden aufgeführten prototypischen Modelltypen konnten wir bisher identifizieren:

- Degradation/Alterung mit Auswirkung auf Zustand
- Degradation mit Auswirkung auf die Nutzungsdauer
- Degradation/Alterung mit Auswirkung auf Ausfallrate und Verfügbarkeit
- Verfügbarkeit und Ausfallrate bei komplexen Systemen
- Verfügbarkeit bei verzögerter Reparatur

Naturgemäss ist diese Unterteilung nicht abschliessend, dennoch gehen wir davon aus, dass damit die wichtigsten Mechanismen beschrieben sind.

#### (a) **Degradation/Alterung mit Auswirkung auf Zustand**

Es gibt Anlagen, welche sich durch eine kontinuierliche Degradation auszeichnen, wobei die Zustandsverschlechterung direkt das Risiko oder die Betriebskosten beeinflussen. In diesem Fall muss das technische Modell den Zusammenhang zwischen Instandhaltungsintervall und Zustand beschreiben. Output des Modells ist der über den Lebenszyklus gemittelte Zustand, welcher wiederum ein Input ist für die Risikoberechnung oder die Berechnung der Kosten.

*Beispiel: Verschmutzung der Adaptationsbeleuchtung führt zur Abnahme der Helligkeit im Tunnel (Zustandsverschlechterung). Dadurch kommt es zu einem erhöhten Unfallrisiko. Gleichzeitig führt eine starke Verschmutzung auch zu einem erhöhten Ausfall von Leuchten, was zusätzliche Kosten erzeugt.*

Die Dynamik dieses Prozesses sieht also folgendermassen aus: der Zustand der Anlage verschlechtert sich über die Zeit immer mehr, solange keine Intervention/Massnahme stattfindet. Die IH-Tätigkeit setzt die Anlage in einen «neuwertigen» Zustand zurück.

Das technische Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Wartungsintervall und dem mittleren (über die Zeit gemittelten) Zustand, wobei der Zustand in einer geeigneten Einheit ausgedrückt werden muss (z.B. Helligkeit,

Abnutzungsgrad, ...). Welche Einheit sinnvollerweise gewählt werden muss, hängt von der Anlage und vom Fehlermodus ab.

Der Zusammenhang von Wartungsintervall und mittleren Zustand hängt natürlich vom Degradationsprozess ab. Als einfachstes Modell für die Zustandsdynamik kann man von einer konstanten Zustandsverschlechterung ausgehen. Der Zeitverlauf des Zustandes entspricht dann einem Sägezahnverlauf: Der Zustand nimmt kontinuierlich ab bis zur nächsten Wartung, wo er wieder auf den Maximalwert zurückgesetzt wird. Durch zeitliche Mittelung dieses Verlaufs kann der über den Lebenszyklus gemittelte Zustand berechnet werden. Je häufiger die Wartung durchgeführt wird, desto besser ist der mittlere Zustand.

### **(b) Degradation mit Auswirkung auf die Nutzungsdauer**

Insbesondere Anlagen mit mechanischen Teilen haben einen sogenannten «Abnutzungsvorrat» (siehe auch [8]). Nach einer bestimmten Anzahl von Betriebsstunden ist die Anlage so abgenutzt, dass sie ihre Funktion nicht mehr erfüllen kann. Oft hängt die Nutzungsdauer oder die Lebensdauer einer Anlage davon ab, wie häufig eine Wartung durchgeführt wird, weil die Wartung die Abnutzung der Anlage verlangsamt. Typisch ist das der Fall bei Reinigungsarbeiten. Die Gesamtnutzungsdauer einer solchen Anlage hängt deshalb direkt vom Intervall ab.

*Beispiel:* Wenn die Reinigung der Strahlventilatoren weniger häufig durchgeführt wird, nimmt die Nutzungsdauer eines Ventilators ab.

Die Nutzungsdauer einer Anlage muss nicht unbedingt für das Risiko relevant sein (z.B. wenn die Ausfallrate während der Nutzungsdauer konstant ist), hat aber immer starke Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten, weil eine Reduktion der Nutzungsdauer die Kapitalkosten pro Jahr erhöht.

In diesem Fall beschreibt das technische Modell den Zusammenhang zwischen dem Wartungsintervall  $\Delta$  und der damit erzielten Nutzungsdauer  $T$ .

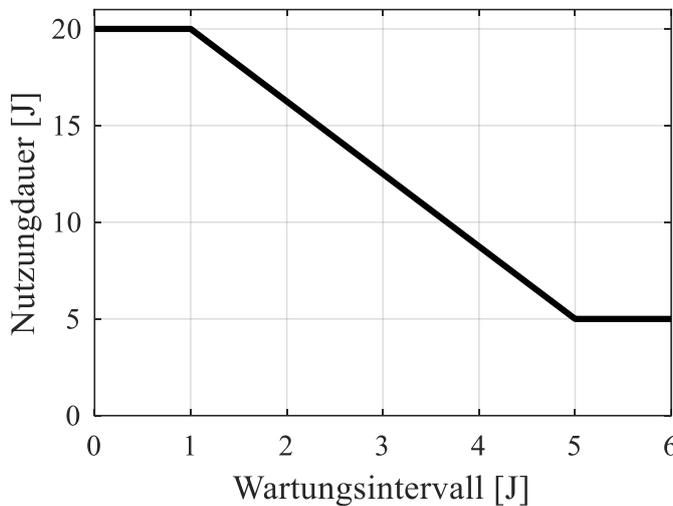
Das einfachste Modell (das wir in der Regel vorschlagen) ist ein lineares Modell mit einer minimalen und einer maximalen Nutzungsdauer, d.h. wir gehen davon aus, dass die Lebensdauer linear vom Wartungsintervall abhängt (siehe **Abb. 15**). Dieses wird anhand von folgenden Expertenaussagen parameterisiert (die Expertenaussagen werden durch Interviews erhoben, siehe Kapitel 5.4):

- Nutzungsdauer  $T_0$  beim heutigen Intervall  $\Delta = \Delta_0$
- Minimale Nutzungsdauer  $T_{\min}$  (Nutzungsdauer, wenn keine Wartung erfolgt)
- Maximale Nutzungsdauer  $T_{\max}$ . Entspricht einer maximalen Nutzungsdauer, die auch mit mehr Wartung nicht vergrößert werden kann (technische, gesetzliche oder operative Randbedingungen).

Diese Angaben werden verwendet, um eine lineare Interpolation zu machen zwischen den zwei Punkten  $(\Delta_0, T_0)$  und  $(T_{\min}, T_{\min})$ . Für Wartungsintervalle grösser als  $T_{\min}$  ergibt sich immer  $T_{\min}$  als Nutzungsdauer. Zusätzlich darf die Nutzungsdauer nicht grösser als  $T_{\max}$  sein. Das Resultat ist eine funktionale Abhängigkeit der Nutzungsdauer  $T$  vom Wartungsintervall  $\Delta$ :

$$(0.1) \quad T(\Delta) = \max \left[ \min \left[ T_{\max}, T_0 - a \cdot (\Delta - \Delta_0) \right], T_{\min} \right] \quad a = \frac{T_0 - T_{\min}}{T_{\min} - \Delta_0}$$

**Abb. 15** zeigt die Abhängigkeit der Nutzungsdauer vom Wartungsintervall auf. Für das Beispiel wurden die folgenden Parameter verwendet:  $\Delta_0 = 1J$ ,  $T_0 = 20J$ ,  $T_{\min} = 5J$ ,  $T_{\max} = 20J$ .



**Abb. 15** lineares Modell der Abhängigkeit der Nutzungsdauer vom Wartungsintervall.

Bemerkung: Dieser lineare Modellansatz ist nicht primär durch ein physikalisches Modell motiviert, sondern durch die Praktikabilität. Die oben angeführten Modellparameter lassen sich durch Expertenaussagen von Praktikern ableiten, ohne dass ein detailliertes physikalisches Modell vorhanden sein muss. Die lineare Interpolation ist die einfachste Form, dieses Praxiswissen in ein Modell zu überführen. Falls detailliertere Kenntnisse vorhanden sind, können komplexere Modelle verwendet werden.

### (c) Degradation/Alterung mit Auswirkung auf Ausfallrate und Verfügbarkeit

Dieser Modelltyp macht eine Aussage über die Abhängigkeit der mittleren Ausfallrate oder der Verfügbarkeit in Abhängigkeit der Instandhaltungsstrategie. Ein solches Modell ist nur dann relevant, wenn die Ausfallrate bzw. Verfügbarkeit von der Instandhaltungsstrategie abhängig ist. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn sich die Ausfallrate im Laufe der Zeit ändert.

Fehler, Ausfälle oder Störungen sind einzelne Ereignisse, die nicht-vorhersagbar sind und als zufällige Ereignisse modelliert werden. Die methodische Grundlage für diese Modellierung ist die sogenannte Ausfallrate oder Hazardrate (siehe z.B. [7], [8]), die oft vom Alter abhängt (z.B. Badewannenkurve). Die Altersabhängigkeit kann sehr verschiedene Formen annehmen. Das technische Modell bestimmt die *mittlere* Ausfallrate/Störungsrate, also die über die Nutzungsdauer gemittelte Ausfallrate. Bei den Modellen, die in der Literatur zu finden sind, wird diese üblicherweise aus der altersabhängigen Hazardrate berechnet durch Mittelung über die Nutzungsdauer. Dies erfordert aber die Kenntnis des Verlaufs der Hazardrate – in der Praxis ist diese Kenntnis oft nicht vorhanden.

Aus diesem Grund arbeiten wir mit einfacheren Ansätzen, bei dem wir direkt die *mittlere* Ausfallrate/Störungsrate in Abhängigkeit des Wartungsintervalls modellieren (denn nur dies ist für die Ableitung einer optimalen Instandhaltungsstrategie relevant). Dies ermöglicht die Anwendung von einfachen statistischen Ansätzen und die Verwendung von einfach abfragbarem Expertenwissen.

Das technische Modell stellt also einen Zusammenhang her zwischen dem Wartungsintervall  $\Delta$  und der über den Lebenszyklus gemittelten Ausfallrate/Störungsrate  $\lambda$ .

Grundsätzlich unterscheiden wir zwischen drei Fällen, abhängig davon, welcher Art die Instandhaltungstätigkeiten sind. Je nach Fall müssen unterschiedliche Modelle verwendet werden, die im Folgenden beschrieben sind.

i. **Inspektionstätigkeiten für verdeckte Funktionen: Verfügbarkeit**

Ein häufiger Fall ist die Inspektion von Sicherheitsanlagen, also Anlagen wie z.B. eine Lüftungsanlage, die nur im Ereignisfall verwendet werden. Inspektionen dienen hier dazu, einen Ausfall der Anlage zu detektieren, der ohne Inspektion nicht festgestellt werden könnte. In der Instandhaltungsliteratur spricht man hier von «verdeckten Funktionen» (siehe [6]). Im Bereich der Betriebs- und Sicherheitseinrichtung gibt es öfters Tätigkeiten, die diesem Typ entsprechen.

Durch die Inspektionstätigkeiten wird die Ausfallrate selber nicht beeinflusst (diese ist eine Eigenschaft des technischen Systems), aber je häufiger eine Inspektion gemacht wird, desto kürzer ist die resultierende Ausfallzeit. Inspektionen bei verdeckten Funktionen haben deshalb eine Auswirkung auf die Verfügbarkeit. Bei Sicherheitseinrichtungen ist die Verfügbarkeit die wichtigste technische Grösse, die das Risiko bestimmt, denn das Risiko entsteht im Zusammenwirken eines Ereignisses wie Unfall oder Brand mit einer Nichtverfügbarkeit der Sicherheitseinrichtung.

*Beispiel: Die Messwerte der Sichttrübungsmessung können über die Zeit vom effektiven Zustand abweichen, weshalb eine regelmässige Kontrolle notwendig ist. Ohne eine Kontrolle könnte nicht festgestellt werden, ob die Messung noch korrekt funktioniert oder nicht. Die Kontrolle selbst beeinflusst nicht, wie oft es zu einer fehlerhaften Messung (Ausfall) kommt. Sie beeinflusst aber die Verfügbarkeit, da der Fehler bemerkt und korrigiert werden kann.*

Je häufiger eine solche Anlage inspiziert wird, desto kürzer sind die Intervalle, während deren die Anlage unbemerkt in einem Fehlerzustand ist. Das mit der Anlage verknüpfte Risiko hängt grundsätzlich ab von der Ausfallrate, der Inspektionsfrequenz, und der Eintrittsrate des Grundereignisses (z.B. Unfall mit Brand). Die Häufigkeit  $\lambda_s$  der Schadensereignisse (z.B. Unfall mit Brand bei nicht-funktionierender Lüftungsanlage) kann berechnet werden als

$$(0.2) \quad \lambda_s = \lambda_{\text{Ereignis}} \cdot N(\Delta)$$

wobei  $\lambda_{\text{Ereignis}}$  die Eintrittsrate des zugrundeliegenden Ereignisses (z.B. Unfall mit Brand) ist, und  $N(\Delta)$  die Nichtverfügbarkeit der Anlage bezeichnet. Aus diesem Grund ist für Anlagen mit verdeckten Funktionen die Verfügbarkeit die zentrale Grösse, die in die Risikoberechnung einfließt.

Die Nichtverfügbarkeit der Anlage kann über folgende Formel berechnet werden (Herleitung siehe I.1.1.1II.2)

$$(0.3) \quad N(\Delta) = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda\Delta}}{\lambda\Delta}$$

wobei  $\lambda$  die Ausfallrate der Anlage ist und  $\Delta$  das Inspektionsintervall.

Im Fall von Inspektionen von Anlagen beschreibt also das technische Modell den Zusammenhang zwischen dem Inspektionsintervall  $\Delta$  und der Verfügbarkeit bzw. Nichtverfügbarkeit.

Wichtiger Parameter für die Bestimmung der Verfügbarkeit ist die Ausfallrate  $\lambda$  der Anlage. Für die Bestimmung der Ausfallrate der Anlage sind historische Erfahrungen notwendig. Beobachtet man  $n$  gleichartige Anlagen über einen Zeitraum  $T$ , dann ist der Erwartungswert der Anzahl Störungen gegeben durch  $nT\lambda$ . Deshalb ist der übliche Schätzer für die Ausfallrate gegeben durch

$$\lambda = \frac{\text{Anzahl beobachteter Störungen}}{nT}$$

Dies ist ein sinnvoller Schätzer, wenn  $n$  gross genug ist (z.B. grösser als 10). Sehr oft treffen wir jedoch Situationen an, wo die Anlagen so zuverlässig sind, dass es praktisch keine Beobachtungen von Störungen gibt. Hier versagen die Standardmethoden.

Ein häufiger Fall ist, dass noch keine einzige Störung beobachtet worden ist. Die naive Schätzung würde eine Störungsrate von Null ergeben, was ein physikalisch sinnloses Ergebnis ist, denn keine technische Anlage hat eine Störungsrate, die exakt Null ist. In der Praxis gehen wir auch tatsächlich davon aus, dass die Störungsrate grösser als Null ist, denn wäre sie Null, könnte man sich die Inspektionen vollständig ersparen. Die Tatsache, dass heute Inspektionen durchgeführt werden, bedeutet also nichts anderes, als dass man tatsächlich von der Möglichkeit einer Störung ausgeht, also eine Störungsrate grösser Null annimmt. Wenn dies aber so ist, dann ist auch das Risiko grösser als Null, und wir müssen dieses Risiko quantitativ bestimmen, ansonsten können wir keine Optimierung der Instandhaltungsstrategie durchführen.

Es ist also notwendig, auch im Fall von wenigen oder gar keinen beobachteten Störungen eine Störungsrate abzuschätzen. Für den Fall, dass keine einzige Störung beobachtet wurde, kann die Störungsrate beliebig klein sein – hierüber können wir keine Aussage machen. Aber sie kann nicht beliebig gross sein, denn wenn die Störungsrate eine bestimmte Grenze überschreiben würde, hätten wir mindestens eine Störung sehen müssen im Beobachtungszeitraum.

Aus dieser Idee kann man statistisch sauber eine Abschätzmethodik ableiten, die für den Fall von sehr wenigen Ausfallbeobachtungen geeignet ist. Die Methodik wird im I.1.1.III.1 ausführlich dargestellt. Die Ausfallrate wird mit der folgenden Formel abgeschätzt:

$$(0.4) \quad \lambda \leq \frac{\chi^2(\alpha, 2r + 2)}{2Tn}$$

Hier bezeichnet  $r$  die Anzahl beobachteter Ausfälle in der Beobachtungsperiode  $T$  bei  $n$  gleichartigen Exemplaren der Anlage, und  $\alpha$  ist das Signifikanzniveau. Das Konfidenzniveau setzen wir in der Regel auf  $1-\alpha=0.95$ .  $\chi^2$  ist die Chi-Square Verteilung für Konfidenz  $\alpha$  und  $2r+2$  Freiheitsgrade.

Diese Formel gibt eine obere Grenze für die Ausfallrate, entspricht also einem worst-case-Szenario für die Ausfallrate. Die angegebene Formel liefert daher eine wichtige Abschätzung, mit der bestimmt werden kann, wie hoch die Nichtverfügbarkeit  $N(\Delta)$  maximal sein kann, gegeben die aktuell vorhandenen Datenlage. Dieser Wert sollte für die Risikoberechnung verwendet werden.

ii. **Inspektionstätigkeiten, die einen drohenden Ausfall verhindern:**

Es gibt Inspektionstätigkeiten, die durchgeführt werden, um einen sich abzeichnenden Ausfall (der noch nicht eingetreten ist) zu erkennen und die Störungsursache zu beseitigen, so dass die Störung bzw. der Ausfall vermieden werden kann. Methodisch

spricht man hier von «zustandsbasierter Instandhaltung» oder «condition-based maintenance» (siehe [6], [8]).

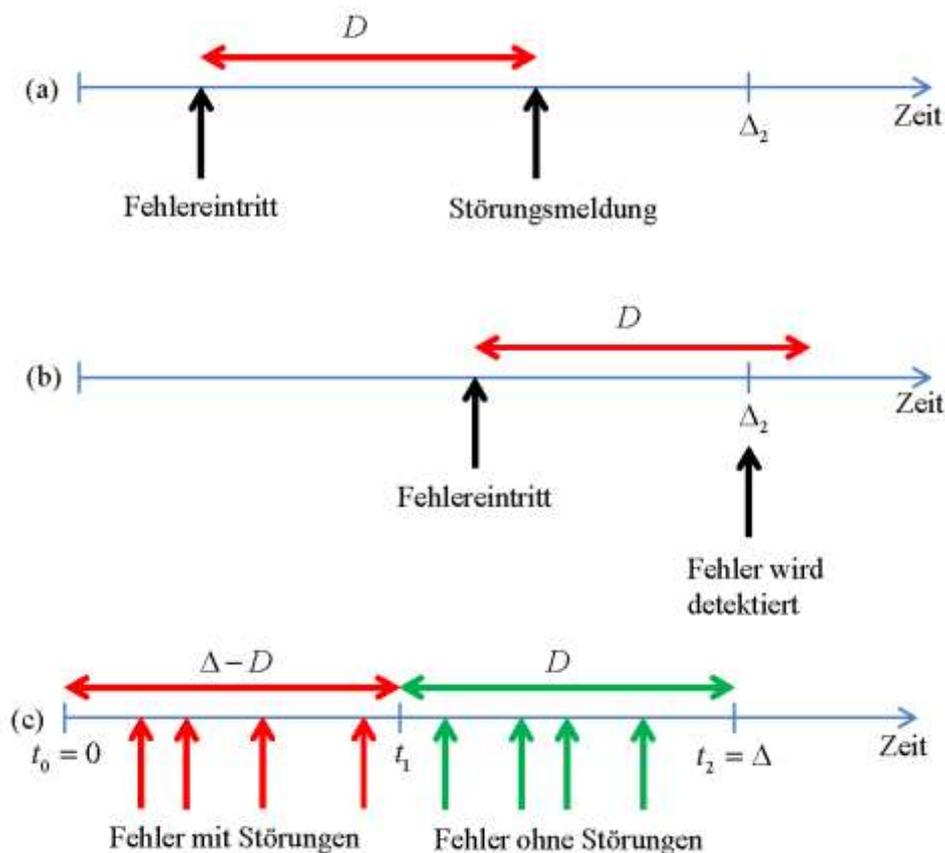
Durch die Wartungstätigkeit (Zustandskontrolle) können Fehler also erkannt werden bevor sie zu einer Störung führen, und rechtzeitig behoben werden. Falls dies nicht gemacht würde, würde sich ein Fehler zu einer Störung entwickeln, die eine entsprechende Störungsmeldung auslöst. Die Inspektionstätigkeit beeinflusst also die Störungsrate des zugehörigen Fehlermodus (im Unterschied zu den im letzten Abschnitt diskutierten Inspektionstätigkeiten, die nicht einen Fehler vermeiden, sondern nur aufdecken).

*Beispiel:* Die Sichtkontrolle eines Strahlventilators dient zur Feststellung von eventuellen mechanischen Schäden. Wird der Schaden nicht frühzeitig erkannt, so kann sich dieser Schaden durch die Benutzung des Strahlventilators verschlimmern, bis schliesslich der Schaden so schlimm ist, dass eine Störung vorliegt.

Die Fehlfunktion selber ist, im Gegensatz zum Fall i), nicht verdeckt, sondern wird erkannt, sobald eine Störung eingetreten ist.

In diesem Fall unterscheiden wir zwischen der *Fehlerrate*  $\lambda_f$  (dies ist eine Eigenschaft der Anlage) und der *Störungsrate*  $\lambda_s$ , also der Rate von effektiv auftretenden Störungen. Für die Risikoberechnung ist die Störungsrate der entscheidende Faktor, und das technische Modell muss diese Rate bestimmen, in Abhängigkeit vom Inspektionsintervall  $\Delta$ .

Wir nehmen also an, dass Fehler mit einer mittleren Rate  $\lambda_f$  auftreten. Die typische Zeitperiode für die Entwicklung der Störung aus einem Fehler bezeichnen wir mit  $D$ . Falls  $D < \Delta$  ist, kann es sein, dass sich zwischen zwei Inspektionen ein Fehler unbemerkt zu einer Störung entwickeln kann (siehe **Abb. 16**).



**Abb. 16 Zustandskontrolle zur frühzeitigen Fehlererkennung.**

- (a) Fehler wird nicht frühzeitig detektiert und löst eine Störungsmeldung aus.  
 (b) Fehler wird bei der Zustandskontrolle detektiert bevor eine Störungsmeldung ausgelöst wird.  
 (c) Alle Fehler die innerhalb der Zeitperiode  $D$  vor der Zustandskontrolle eintreten, werden detektiert. Alle anderen lösen eine Störungsmeldung aus.

Die Störungsrate  $\lambda_s$  hängt also vom Wartungsintervall ab, obwohl die ursprüngliche Fehlerrate  $\lambda_F$  natürlich unabhängig vom Inspektionsintervall ist.

Die Abhängigkeit der Störungsrate vom Intervall wird anhand der folgenden Überlegung berechnet: ein Fehler kann zufällig irgendwann innerhalb des Inspektionsintervalls  $\Delta$  auftreten. Falls der Fehler innerhalb des Zeitintervalls zwischen  $t_1 = \Delta - D$  und  $t_2 = \Delta$  eintritt, wird er frühzeitig erkannt und führt nicht zu einer Störung. Alle Fehler die früher eintreten, d.h. in der Periode zwischen  $t_0 = 0$  und  $t_1 = \Delta - D$  entwickeln sich zu Störungen. Falls das Inspektionsintervall kleiner ist als  $D$ , werden alle Störungen vermieden. Die effektive Störungsrate ist daher:

$$(0.5) \quad \lambda_s(\Delta) = \max\left(0, \lambda_F \frac{\Delta - D}{\Delta}\right)$$

Das technische Modell beschreibt also für diesen Fall den Zusammenhang zwischen Inspektionsintervall  $\Delta$  und der Störungsrate  $\lambda_s$ .

Die Zeitperiode  $D$ , die hier massgeblich einfließt, kann abgeschätzt werden anhand Expertenaussagen: Wenn wir die Fehlerrate  $\lambda_F$  des Systems und die Störungsrate  $\lambda_s$  bei dem aktuellen Inspektionsintervall  $\Delta_1$  kennen, und die Störungsrate grösser Null ist, können wir aus Formel (0.5) die Grösse  $D$  berechnen.

$$(0.6) \quad D = \Delta_1 \left(1 - \frac{\lambda_s(\Delta_1)}{\lambda_F}\right) \quad (\text{falls } \lambda_s > 0)$$

Falls die aktuelle Störungsrate gleich Null ist, können wir nur eine obere Grenze für  $D$  abschätzen, d.h. die Aussage machen, dass  $D > \Delta_1$  ist. Dies führt zu folgender Formel:

$$(0.7) \quad D = \Delta_1 \cdot \left(1 - \frac{\lambda_s(\Delta_1)}{\lambda_F}\right), \quad \text{falls } \lambda_s > 0 \quad (\text{falls } \lambda_s > 0)$$

$$D \geq \Delta_1, \quad \text{falls } \lambda_s = 0$$

Somit erhalten wir in jedem Fall zumindest eine obere Grenze für die Störungsrate  $\lambda_s(\Delta)$  in Abhängigkeit vom Inspektionsintervall anhand Formel (0.5). Das heisst wir können zumindest angeben, wie hoch die Störungsrate im ungünstigsten Fall (minimales  $D$ ) ist. Dieser worst-case sollte dann für die Risikoberechnung verwendet werden

iii. **Wartungstätigkeiten, die direkt die Fehlerrate beeinflussen:**

Im Gegensatz zum vorherigen Fall ii) gibt es auch Wartungstätigkeiten, die die Fehlerrate direkt beeinflussen. Wir nehmen für diesen Fall an, dass jeder Fehler sofort zu einer Störung führt (ansonsten wären wir im Fall ii.), wir brauchen also nicht zu unterscheiden zwischen Fehler und Störung.

*Beispiel: Die Befestigung von Strahlventilatoren nimmt über die Zeit ab (Alterung der Aufhängung, Lockerung der Schrauben etc.). Die Zustandsverschlechterung führt aber nicht unmittelbar zu einem Schaden (vergl. Modell (a)). Mit einer*

*regelmässigen Wartung/Kontrolle wird verhindert, dass es zu einem Ausfall der Befestigung kommt. Die Instandhaltungsstrategie hat folglich einen Einfluss auf die Ausfallrate bzw. die Verfügbarkeit der Befestigung.*

Die eigentliche Wartungstätigkeit ist in diesem Fall eine positive Beeinflussung des Anlagenzustandes, die entweder nach Zeitplan durchgeführt wird (präventive Instandhaltung) oder aber als zustandsabhängige Instandhaltung. Bei einer zustandsabhängigen Instandhaltung hat man einen regelmässigen Rhythmus von Inspektionen und die Wartungstätigkeit wird nur dann durchgeführt, wenn die Notwendigkeit dafür bei der Inspektion erkannt wird. Eine solche Situation haben wir z.B., wenn die Tätigkeit nicht nur eine Inspektion, sondern auch weitere Massnahmen beinhaltet, die zur Minderung der Ausfallhäufigkeit bzw. Degradation/Verschleissprozesse dienen.

Das technische Modell beschreibt in diesem Fall den Zusammenhang zwischen dem Wartungsintervall  $\Delta$  und der daraus resultierenden Störungsrate  $\lambda$ . Im Fall der zustandsbasierten Instandhaltung bezeichnet das Wartungsintervall das Intervall, mit dem die Inspektionen durchgeführt werden.

Wie oben beschrieben, geht es beim technischen Modell darum, die mittlere Ausfallrate oder Störungsrate zu berechnen, in Abhängigkeit vom Wartungsintervall  $\Delta$ . Falls wir die Details der Ausfallursache nicht modellieren können/möchten, verwenden wir einen vereinfachten Modellierungsansatz. Ein einfacher Modellansatz besteht darin, dass wir annehmen, dass die mittlere Ausfallrate eine lineare Abhängigkeit vom Wartungsintervall hat.

Die genaue Abhängigkeit wird durch Expertenaussagen abgeschätzt. Wir fragen:

- i. Wie häufig sind Ausfälle mit dem aktuellen Intervall  $\Delta_1$ ? Antwort: Ausfallrate  $\lambda_1$ .
- ii. Falls die Tätigkeit nicht durchgeführt werden würde, wie lange würde es dauern, bis die erste von  $n_A$  Anlagen im Tunnel ausfallen würde? Diese Zeit wird mit  $T_{fail}$  bezeichnet.
- iii. Was wäre die minimale Ausfallrate, die unter besten Bedingungen überhaupt erreichbar wäre? Diese wird mit  $\lambda_{min}$  bezeichnet.

Aus  $T_{fail}$  kann man die Ausfallrate einer einzelnen Anlage berechnen:

$$(0.8) \quad \lambda_2 = \frac{1}{n_A \cdot T_{fail}}$$

Nun wird linear interpoliert zwischen den Punkten  $(t_1, \lambda_1)$  und  $(T_{fail}, \lambda_2)$ , mit einer minimalen Ausfallrate  $\lambda_{min}$  als Grenzwert (häufigere Durchführung der Tätigkeit kann die Ausfallrate nicht unter  $\lambda_{min}$  reduzieren):

$$(0.9) \quad \lambda(\Delta) = \max \left[ \lambda_{min}, \lambda_1 + \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{T_{fail} - t_1} (\Delta - \Delta_1) \right]$$

#### **(d) Verfügbarkeit und Ausfallrate bei komplexen Systemen:**

Oft setzen sich Systeme zusammen aus eine Menge  $n_A$  gleichartigen BSA. Ein Ausfall einer einzigen BSA führt noch nicht dazu, dass das System als Ganzes nicht mehr funktioniert. Ein Systemausfall wird hier durch einen kritischen Zustand definiert, bei welchem eine Schwelle von nicht-funktionierenden BSA überschritten wird. Die Schwelle kann anhand Anzahl oder Anteil ausgefallener BSA definiert werden. Der

kritische Zustand des Systems wird also durch mehrere Ausfälle von einzelnen BSA verursacht. Der Systemausfall (der kritische Zustand) entspricht daher der gleichzeitigen Nichtverfügbarkeit von  $n_c$  BSA.

*Beispiel:* Für eine funktionsfähige Entlüftung einer Tunnelröhre sind nicht zwingend sämtliche Strahlventilatoren notwendig. Ein Ausfall der Entlüftung ist daher erst dann der Fall, wenn sich ein bestimmter Anteil der Strahlventilatoren nicht in funktionsfähigem Zustand befinden.

Wir gehen davon aus, dass wir die Verfügbarkeit  $V$  und die Ausfallrate  $\lambda_{\lambda_A}$  einer einzelnen BSA (z.B. eines einzelnen Strahlventilators) kennen. Anschliessend definieren wir eine Ausfallrate des ganzen Systems wie folgt: Wenn eine kritische Zahl von  $n_c$  BSA ausfällt, wird dies als Ausfall des Systems definiert. Die Ausfallrate  $\lambda_{\text{sys}}$  ist die Rate der Systemausfälle. Der Ausfall des Systems passiert dann, wenn eine BSA ausfällt, während gleichzeitig schon  $n_c - 1$  BSA nicht verfügbar sind. Die Rate dafür ergibt sich zu:

$$(0.10) \quad \lambda_{\text{sys}} = (n_A - n_c + 1) \cdot \lambda_A \cdot \underbrace{\binom{n_A}{n_c - 1} \cdot (1 - V)^{n_c - 1} \cdot V^{n_A - n_c + 1}}_{\text{Wahrscheinlichkeit, dass } n_c - 1 \text{ Anlagen nicht verfügbar sind}}$$

Der Faktor  $n_A - n_c + 1$  steht für die Anzahl noch laufender BSA. Die Rate, mit der irgendeine dieser BSA ausfällt, ist  $(n_A - n_c + 1) \cdot \lambda_A$ . Der zweite Term entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass gleichzeitig  $(n_c - 1)$  BSA von  $n_A$  BSA nicht verfügbar sind.

#### (e) Verfügbarkeit bei verzögerter Reparatur

Falls Ausfälle/Störungen nicht sofort sondern nur im spezifischen Wartungsfenstern behoben werden können, so hat dies Einfluss auf die Verfügbarkeit.

*Beispiel:* Defekte Leuchtmittel der Durchfahrtsbeleuchtung können nur erschwert oder gar nicht unter Verkehr ersetzt werden. Deshalb beschränkt sich das Ersetzungsfenster auf die geplanten Tunnelsperrungen.

In diesem Fall befindet sich die BSA länger in einem funktionsunfähigen Zustand, wodurch die Verfügbarkeit abnimmt. Das Zeitintervall zwischen zwei solchen Wartungszeitpunkten bezeichnen wir mit  $d$ . Dann ergibt sich bei einer Ausfallrate  $\lambda_A$  die Verfügbarkeit  $V$  zu (Herleitung siehe I.1.1.1II.2):

$$(0.11) \quad V(\lambda_A, d) = \frac{1 - e^{-\lambda_A d}}{\lambda_A d}$$

### 5.3.2.2. Fazit

Die obige Klassifizierung der typischen technischen Modelle ist die Grundlage für die meisten technischen Modelle, die im Rahmen des Projekts verwendet wurden. Diese technischen Modelle liefern die technischen Grössen Zustand, Verfügbarkeit und Ausfallrate, die die Grundlage sowohl für das Risikomodell als auch das Kostenmodell sind (siehe Abschnitte 5.3.3 und 5.3.4).

### 5.3.3 Modellierung Risiko

Im letzten Abschnitt haben wir die Elemente des technischen Modells diskutiert. Resultate des technischen Modells sind Aussagen über die Fehlerrate, die Verfügbarkeit, oder den mittleren Zustand einer BSA oder eines ganzen Systems.

In diesem Abschnitt gehen wir auf die Modellierung des Risikos ein. Diese Modellierung basiert auf den Ergebnissen des technischen Modells, benötigt aber zusätzlich noch Informationen über das Schadensausmass. Wie in Abschnitt 5.3.1 diskutiert, ist grundsätzlich eine Modellierung des Risikos nur dann sinnvoll, wenn das Risiko durch die Veränderung des Tätigkeitsintervalls beeinflusst werden kann. Wenn dies nicht der Fall ist, ist das Risiko konstant, und eine Optimierung der Instandhaltungstätigkeit kann rein aufgrund der Kosten durchgeführt werden.

Resultat der hier entwickelten Risikomodellierung ist ein Risikobeitrag einer Anlage, oder eines Systems von Anlagen, aufsummiert über alle Fehlermodi der betrachteten Anlage. Das Modell berechnet also das Risiko, das von der betrachteten Anlage erzeugt wird, und zwar konkret durch das nicht-perfekte Funktionieren der Anlage. Jede Anlage liefert ein solches Risiko, und das Gesamtrisiko ergibt sich als Summe dieser Teilrisiken.

Dieses Vorgehen ist konsistent mit dem üblichen Vorgehen in der Risikoanalyse, wo das Gesamtrisiko immer als eine Summe von Einzelrisiken verstanden wird. In dem hier betrachteten Setting handelt es sich konkret um Risiken, die durch Ausfälle, mangelnde Verfügbarkeit, oder Abnutzung von Anlagen oder einzelnen BSA entstehen, denn dies sind die Risiken, die durch die Instandhaltung beeinflusst werden können.

Würde man die normale Risikomanagement-Methodik anwenden, würde man für eine Anlage ganz allgemein danach fragen, welche Risiken bestehen, die ihre Ursache in Ausfall, mangelnder Verfügbarkeit, oder Abnutzung haben. Im Rahmen unserer Untersuchungen verfolgen wir ein vereinfachtes Verfahren, bei dem wir von den aktuell durchgeführten Instandhaltungstätigkeiten ausgehen.

Die Überlegung dahinter ist die folgende: Für die Instandhaltung der BSA besteht heute eine langjährige praktische Erfahrung. Aus dieser Erfahrung heraus wurden die heute angewendeten Tätigkeiten der Instandhaltung entwickelt. Wir können also davon ausgehen, dass die praktisch relevanten Risiken der Anlagen heute durch geeignete Massnahmen in der Instandhaltung angemessen adressiert werden: Wenn es bei einer Anlage einen Fehlermode gibt, der zu einem relevanten Risiko führt<sup>3</sup>, dann können wir davon ausgehen, dass es heute eine Instandhaltungstätigkeit gibt, die dieses Risiko adressiert. Umgekehrt können wir davon ausgehen, dass es keine Fehlermodi gibt, die bis heute übersehen worden sind und ein bisher nicht beachtetes Risiko darstellen.

Wenn diese Annahmen zutreffen, dann können wir das Gesamtrisiko einer Anlage beurteilen, indem wir alle Tätigkeiten analysieren, zu jeder Tätigkeit das entsprechende Risiko definieren (das beinhaltet die Definition der entsprechenden Fehlermodi) und dann das Risiko quantitativ bestimmen in Abhängigkeit der Instandhaltungspolitik.

Für die Analyse des Risikos einer Anlage gehen wir also von den heute bekannten Instandhaltungstätigkeiten aus. Wir identifizieren für jede Tätigkeit die dahinterliegenden Fehlermodi (in der Regel adressiert eine Tätigkeit mehrere Fehlermodi) und berechnen das Gesamtrisiko als die Summe der Teilrisiken für die Fehlermodi. So erhalten wir für jede Tätigkeit einen Risikobeitrag, der aber nicht interpretiert werden darf als «Risikobeitrag der Tätigkeit». Die korrekte Interpretation ist «Risikobeitrag der dieser Tätigkeit zugeordneten Fehlermodi».

---

<sup>3</sup> Es gibt immer Risiken, die zwar theoretisch existieren, aber in der Praxis so klein sind, dass man sie als irrelevant einschätzen würde. Hier hat man in der Regel keine Instandhaltungstätigkeiten, um das Risiko zu vermindern.

Der gesamte Risikobeitrag einer Anlage besteht dann aus der Summe aller dieser so bestimmten Risikobeiträge. Wenn wir annehmen, dass es keine Fehlermodi gibt, die durch zwei verschiedene Tätigkeiten gleichzeitig adressiert werden (dies ist eine sinnvolle Annahme), ist das das methodisch korrekte Vorgehen und liefert das Gesamtrisiko unter Berücksichtigung aller relevanten und heute bekannten Fehlermodi.

Für die Modellierung des Risikos muss der Zusammenhang zwischen den technischen Grössen (Ausfallrate, Nichtverfügbarkeit, Zustand) und dem dadurch erzeugten Risiko quantitativ definiert werden. Im Folgenden wird dieser Zusammenhang schematisch strukturiert.

### 5.3.3.1. Ausgangslage

Folgende Voraussetzungen werden als gegeben betrachtet:

- Die Menge aller Instandhaltungsstrategien  $\{p\}$  ist ein Input des Risikomodells. In den meisten Fällen steht der Parameter  $p$  für das Zeitintervall  $\Delta$  einer regelmässigen Instandhaltungstätigkeit.
- Die Ausfallrate  $\lambda(p)$  und die Verfügbarkeit  $v(p)$  für jede Strategie wird durch das technische Modell bestimmt; analog der mittlere Systemzustand.
- Die Raten der Ereignisse Unfall und Brand sind bekannt. Falls sie vom Zustand der betrachteten Anlage abhängen, ist diese Abhängigkeit quantitativ beschrieben.
- Die Matrix des Schadensausmasses nach Schadensindikatoren [4] wird als Grundlage zur Bestimmung der Schadenshöhe verwendet.

### 5.3.3.2. Ziel

Das Risikomodell beschreibt den Zusammenhang zwischen einer Instandhaltungsstrategie  $p$  und dem unter dieser Strategie erzeugten Risiko für eine betrachtete Anlage. Das Risiko wird separat für jede Instandhaltungstätigkeit berechnet und setzt sich dabei aus der Summe der Risikobeiträge von verschiedenen Fehlermodi zusammen.

*Beispiel: Die Reinigung und Funktionskontrolle der Strahlventilatoren wird wegen drei Fehlermodi benötigt: i) Kürzung der Nutzungsdauer der Strahlventilatoren. ii) Herunterfallen des gesamten Strahlventilators oder Teile davon iii) mechanische Fehlfunktionen und evtl. Ausfall. Das gesamte Risiko dieser drei Fehlermodi wird als die Summe von drei Beiträgen berechnet, je eine für jeden Fehlermodus, und kann der Tätigkeit „Reinigung und Funktionskontrolle“ zugeordnet werden.*

Es ist wichtig zu realisieren, dass es bei der Risikomodellierung nicht darum geht, das Gesamtrisiko zu bestimmen, das durch die Anlagen reduziert wird. Dies wäre der Ansatz eines generellen Risikomanagements. Wenn dies das Ziel wäre, müsste man alle Fehlermodi einer Anlage bestimmen, für jeden Fehlermodus das entsprechende Risiko in absoluten Zahlen abschätzen (egal, ob es durch eine Instandhaltungstätigkeit beeinflusst werden kann oder nicht), und alle diese Beiträge aufsummieren.

Im Rahmen der Risikobasierten Instandhaltung ist dies jedoch nicht das Ziel. Hier wollen wir im Gegensatz dazu verstehen, wie der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Instandhaltungsstrategien  $p$  und den unter diesen Strategien erzeugtem Risiko ist. Dabei geht es um einen relativen Vergleich zwischen verschiedenen Strategien (z.B. wieviel Risiko wird zusätzlich erzeugt, wenn die Inspektionsfrequenz halbiert wird), nicht um das absolute Niveau des Risikos.

### 5.3.3.3. Risikoarten

Wir unterscheiden zwischen drei Arten von Risiko, die sich in ihrem Wirkungsmechanismus unterscheiden:

1. **Direktes Risiko aufgrund des Ausfalls:** Durch den Ausfall einer Anlage werden Personen verletzt, Umweltschäden erzeugt oder der Ausfall führt zu Staus und Verkehrsbehinderungen.  
*Beispiel:* Ausfall verursacht keinen Unfall, Tunnel wird aus Sicherheitsgründen trotzdem gesperrt.
2. **Unfallrisiko aufgrund von Nichtverfügbarkeit oder Degradation:** Aufgrund von Nichtverfügbarkeit oder Degradation einer Anlage werden Unfälle provoziert; Nichtverfügbarkeit/Degradation erhöht die Unfallrate. Die so zusätzlich erzeugten Unfälle führen zu Personenverletzungen, Stauschäden und finanziellen Schäden.
3. **Schadensrisiko aufgrund von Nichtverfügbarkeit oder Degradation:** Nichtverfügbarkeit bzw. Degradation hat keinen Einfluss auf die Unfallhäufigkeit oder Brandhäufigkeit, jedoch erhöht sich das Schadensausmass beim Ereignis aufgrund der Nichtverfügbarkeit oder des schlechten Zustandes der Anlage (Unfall bzw. Brandfall).

Für das methodische Vorgehen ist es wichtig zu realisieren, dass auch im Falle des perfekten Funktionierens aller Anlagen das Risiko nicht Null ist: Auch dann können Unfälle oder andere Ereignisse passieren, und auch dann werden diese Ereignisse zu Schäden führen. Im Rahmen der risikobasierten Instandhaltung geht es darum zu bestimmen, wie stark dieses Risiko durch die Instandhaltung verändert wird. Wir betrachten also denjenigen Risiken, die durch Ausfälle einerseits oder Funktionsverlust durch Degradation andererseits entstehen.

Wir berechnen deshalb die Erhöhung des Risikos durch das nicht-perfekte Funktionieren einer Anlage infolge eines Ausfalls oder infolge von Degradation der BSA. Dazu definieren wir ein Referenzniveau des Risikos, nämlich das Risiko einer perfekt funktionierenden Anlage,  $R_0$ .

Der erste oben beschriebene Risikobeitrag (direktes Risiko von Ausfällen) ist natürlich Null beim Referenzrisiko, denn wir nehmen ja an, dass dort gar keine Ausfälle auftreten. Dies gilt jedoch nicht für den zweiten und dritten Beitrag.

Das Referenzrisiko  $R_0$  ist verknüpft mit dem Auftreten von Ereignissen (hier betrachten wir hauptsächlich Unfallereignisse und Brandfälle), und ist ein Produkt der Ereignishäufigkeit (Anzahl Unfälle/Brandfälle im Jahr)  $h_0$ , und der Schadenshöhe bei perfekt funktionierenden Anlagen  $s_0$ . Das Gesamtrisiko des Referenzfalls besteht folglich aus Beiträgen aufgrund von Unfällen und Brandfällen:

$$(0.12) \quad R_0 = h_0^{(\text{Unfall})} \cdot s_0^{(\text{Unfall})} + h_0^{(\text{Brand})} \cdot s_0^{(\text{Brand})}$$

Beim Ausfall einer Anlage oder bei einer Zustandsverschlechterung erhöht sich der Risikolevel um den Betrag  $\Delta R$ . Das Gesamtrisiko einer Anlage ist also die Summe des Referenzrisikos und der Risikoerhöhung durch Ausfälle oder Degradation:

$$(0.13) \quad R = R_0 + \Delta R$$

Die Risikoerhöhung  $\Delta R$  ist eine Summe von Beiträgen aus den verschiedenen Fehlermodi, die durch die entsprechenden Instandhaltungstätigkeiten adressiert werden (siehe oben). Wir bezeichnen den Beitrag einer Tätigkeit mit  $\Delta R_{\text{Tätigkeit}}$  und berechnen die Risikoerhöhung der Fehlermodi, die dieser Tätigkeit zugeordnet sind, als eine Summe der drei oben genannten Risikoarten:

$$(0.14) \quad \Delta R_{\text{Tätigkeit}} = \Delta R_D + \Delta R_U + \Delta R_V$$

Dabei bezeichnet  $\Delta R_D$  den Beitrag durch das direkte Risiko,  $\Delta R_U$  den Beitrag durch Erhöhung der Unfallhäufigkeit, und  $\Delta R_V$  der Beitrag durch Erhöhung des Schadensausmasses. Je nach betrachtetem Fehlermodus sind nicht alle Beiträge relevant.

Im Folgenden werden die drei Beiträge  $\Delta R_D, \Delta R_U, \Delta R_V$  berechnet.

Die Berechnung der drei Beiträge zur Risikoerhöhung folgt aus dem technischen Modell, das die Ausfallrate  $\lambda$  und die Nichtverfügbarkeit  $N$  sowie den mittleren Zustand bei jeweiliger Instandhaltungsstrategie abschätzt. Wir fokussieren im Folgenden auf einen einzelnen Fehlermodus (adressiert durch eine bestimmte Tätigkeit) und bezeichnen die verschiedenen Instandhaltungsstrategien mit  $p$ .

1. Die durch die Anlage erzeugte direkte Risikoerhöhung  $\Delta R_D$  ist unabhängig von der Unfallrate. Die Risikoerhöhung ergibt sich durch die Multiplizierung der Ausfallrate  $\lambda$  mit der Schadenshöhe aufgrund des Ausfalls,  $s_D$ . Die relevante Grösse aus dem technischen Modell ist die Ausfallrate, die eine Funktion der Strategie  $p$  ist.

$$(0.15) \quad \Delta R_D = \lambda(p) \cdot s_D$$

Bemerkung:  $s_D$  ist nicht die maximal mögliche Schadenshöhe, sondern die durchschnittliche Schadenshöhe bei einem Ausfall der Anlage.

2. Die Risikoerhöhung  $\Delta R_U$  wird durch eine erhöhte Unfallrate  $\Delta h_U$  aufgrund des Ausfalls der BSA oder aufgrund eines schlechten mittleren Zustands erzeugt.

Falls die Unfallrate vom Zustand abhängig ist, berechnen wir mittels des technischen Modells den mittleren Zustand (gemittelt über die Nutzungsdauer), der eine Funktion der Instandhaltungsstrategie  $p$  ist. Das Risikomodell spezifiziert dann eine Erhöhung der Unfallrate um einen Faktor  $f_h > 1$ . Dieser Faktor wird durch Expertenschätzungen bestimmt.

*Beispiel:* Ein Faktor  $f_h = 1.2$  bedeutet, dass bei dem betrachteten mittleren Systemzustand eine 20%-ige Erhöhung der Unfallrate im Vergleich zu einer perfekt funktionierenden Anlage zu erwarten ist.

Die Unfallrate ergibt sich somit zu

$$(0.16) \quad \Delta h_U(p) = (f_h(p) - 1) \cdot h_0^{(\text{Unfall})}$$

Etwas komplexer ist die Situation, wenn das Risiko durch den Ausfall einer Anlage erzeugt wird. Hier führt in der Regel nicht der Ausfall selber zu einem Unfall, sondern die Tatsache, dass eine Anlage über längere Zeit nicht funktioniert, führt zu einer erhöhten Unfallrate während dieser Zeit. Das Risiko wird also durch die Nichtverfügbarkeit erzeugt: Ausfälle führen zu einer Nichtverfügbarkeit  $N$ , die durch die Wahl einer Instandhaltungsstrategie  $p$  beeinflusst werden kann. Die Erhöhung der Unfallrate  $h_0^{(\text{Unfall})}$  während der Nichtverfügbarkeit wird mit dem Faktor  $f_h > 1$  bezeichnet. Die Rate von Unfällen, die im langjährigen Durchschnitt aufgrund der Ausfälle der Anlage zusätzlich auftreten, ist daher:

$$(0.17) \quad \Delta h_U(p) = N(p) \cdot (f_h - 1) \cdot h_0^{(\text{Unfall})}$$

Die Erhöhung der Unfallrate hängt von der Strategie  $p$  ab. Allerdings kann die Instandhaltungsstrategie die Schadenshöhe  $s_0$  bei dieser Risikoart nicht beeinflussen und sie bleibt daher unverändert im Vergleich zum Referenzfall (perfekt

funktionierenden Anlagen). Dies ergibt den folgenden Beitrag zur Risikoerhöhung aufgrund von erhöhter Unfallrate:

$$(0.18) \quad \Delta R_U = \Delta h_U(p) \cdot s_0^{(\text{Unfall})} = N(p) \cdot (f_h - 1) \cdot h_0^{(\text{Unfall})} \cdot s_0^{(\text{Unfall})}$$

3. Der Risikobeitrag  $\Delta R_V$  beschreibt die Erhöhung des Risikos durch eine erhöhtes Schadensausmass  $\Delta s_V$  im Falle einer Nichtverfügbarkeit der BSA bei einem Unfall und/oder Brand. Die Schadenshöhe wird während der Nichtverfügbarkeit um einen Faktor  $f_s > 1$  erhöht.

$$(0.19) \quad \Delta s_V = N(p) \cdot \left[ (f_s^{(\text{Unfall})} - 1) \cdot s_0^{(\text{Unfall})} + (f_s^{(\text{Brand})} - 1) \cdot s_0^{(\text{Brand})} \right]$$

Die Unfallrate und die Brandhäufigkeit sind in diesem Fall unverändert im Vergleich zum Referenzfall  $h_0^{(\text{Unfall})}$  und  $h_0^{(\text{Brand})}$ . Damit ergibt sich der Risikobeitrag:

$$(0.20) \quad \begin{aligned} \Delta R_V &= h_0^{(\text{Unfall})} \cdot \Delta s_V^{(\text{Unfall})}(p) + h_0^{(\text{Brand})} \cdot \Delta s_V^{(\text{Brand})}(p) = \\ &= N(p) \cdot \left[ (f_s^{(\text{Unfall})} - 1) \cdot h_0^{(\text{Unfall})} \cdot s_0^{(\text{Unfall})} + (f_s^{(\text{Brand})} - 1) \cdot h_0^{(\text{Brand})} \cdot s_0^{(\text{Brand})} \right] \end{aligned}$$

Bemerkung: Falls bei einem Ausfall das Schadensausmass für Brand oder Unfall nicht erhöht wird, so ist  $f_s = 1$  und der entsprechende Term entspricht Null.

Die gesamte Risikoerhöhung für einen Fehlermodus ergibt sich durch die Summe der drei Risikobeiträge  $\Delta R_D, \Delta R_U, \Delta R_V$ :

$$(0.21) \quad \begin{aligned} \Delta R_{\text{Tätigkeit}} &= \Delta R_D + \Delta R_U + \Delta R_V \\ &= \lambda(p) \cdot s_D + N(p) \cdot (f_h - 1) \cdot h_0^{(\text{Unfall})} \cdot s_0^{(\text{Unfall})} \\ &\quad + N(p) \cdot \left[ (f_s^{(\text{Unfall})} - 1) \cdot h_0^{(\text{Unfall})} \cdot s_0^{(\text{Unfall})} + (f_s^{(\text{Brand})} - 1) \cdot h_0^{(\text{Brand})} \cdot s_0^{(\text{Brand})} \right] \end{aligned}$$

### 5.3.3.4. Bestimmung der Schadenshöhe

Wesentlicher Input für jedes Risikomodell ist die Schadenshöhe beim Eintritt des Risikoereignisses. Wie oben beschrieben betrachten wir zwei Arten von Risikoereignissen: Der Ausfall einer Anlage (direkter Schaden), oder Unfall- und Brandereignisse bei gleichzeitiger Nichtverfügbarkeit einer Anlage.

Schäden können in unterschiedlichen Dimensionen ausgedrückt werden (z.B. in Geldeinheiten, in Anzahl Toten oder Verletzten, oder in beliebigen anderen Einheiten). Ein konsistentes Risikomodell muss die Schäden in einer gemeinsamen Einheit behandeln.

Im Rahmen dieses Projekts verwenden wir die vom ASTRA definierte Risikomatrix (ERMA Konzeptbericht 2009 [4]):

Häufigkeitsklasse		VIII	Ausmassklasse						
			A	B	C	D	E	F	
1'000 / a	300 mal pro Jahr	VIII							
100 / a	30 mal pro Jahr	VII							
10 / a	3 mal pro Jahr	VI							
1 / a	1 mal in 1 Jahren	V							
0,1 / a	1 mal in 10 Jahren	IV							
0,01 / a	1 mal in 100 Jahren	III							
0,001 / a	1 mal in 1'000 Jahren	II							
0,0001 / a		I							

	A	B	C	D	E	F
Personenschaden [T]	< 3 LV	3 LV, 1 – 3 5V	1 – 3 T	3 – 30 T	30 – 300 T	> 300 T
Finanz- und Sachschaden [CHF]	< 300'000	300'000 – 3 Mio	3 Mio – 30 Mio	30 Mio – 300 Mio	300 Mio – 3 Mia	> 3 Mia
Umweltschaden [-]	sehr klein	klein	mittel	gross	sehr gross	katastrophal
Beschränkung Verfügbarkeit NS [-]	sehr klein	klein	mittel	gross	sehr gross	katastrophal
Einschränkung Amtstätigkeit [-]	sehr klein	klein	mittel	gross	sehr gross	katastrophal
Politischer Schaden und Imageschaden [-]	sehr klein	klein	mittel	gross	sehr gross	katastrophal

Abb. 17 Risikomatrix. Quelle: ERMA Konzeptbericht 2009 [4]

In dieser Matrix sind 6 Schadensindikatoren mit jeweils 6 Ausmassklassen A-F abgebildet. Diese Ausmassklassen machen die verschiedenen Indikatoren vergleichbar und liefern die gemeinsame Einheit, mit der verschiedenen Risikodimensionen miteinander vergleichbar gemacht werden.

Wir verwenden die hier definierten Ausmassklassen für die Modellierung der Schadenshöhen. Es ist ein übliches Vorgehen im Risikomanagement, die Schadenshöhen auf einer logarithmischen Skala auszudrücken, was auch für die im ERMA Konzeptbericht beschriebene Risikomatrix zutrifft. Das ist gut zu sehen bei den Finanz- und Sachschäden, die von einer Klasse zur nächsten um jeweils eine Zehnerpotenz ansteigt. Es ist also eine naheliegende Wahl, das Schadensausmass in dimensionslosen „Schadenseinheiten“ auszudrücken, deren Wert von einer Ausmassklasse zur anderen um den Faktor 10 ansteigt.

In Übereinstimmung mit den üblichen Konventionen verzichten wir beim Schadensausmass auf eine genaue numerische Angabe des Wertes, sondern beschränken uns auf die diskreten Schadensklassen. Zulässige Werte für das Schadensausmass sind also nur die diskreten Werte 10,100,1000, ... Dies ist eine grobe Diskretisierung, die im Wesentlichen die Grössenordnung des Schadensausmasses angibt. Dies ist jedoch gängige Praxis im Risikomanagement, und darin begründet, dass eine genauere Angabe des Schadensausmasses in der Regel gar nicht möglich ist.

Da ein Fehlermodus zu Schäden in jeder Schadensdimension führen kann (mit jeweils unterschiedlicher Schadenshöhe), müssen die Schadenshöhen als Vektoren angegeben werden. Die Komponenten der Vektoren entsprechen den 6 Indikatoren und nehmen Werte auf einer logarithmischen Skala an.

Beispielsweise können wir das Schadensausmass des Referenzrisikos (perfekt funktionierende Anlagen) bezüglich des Ereignisses „Unfall“ als Vektor von sechs Schadensindikatoren folgendermassen angeben:

$$(0.22) \quad \vec{s}_0 = \begin{bmatrix} s_{01} \\ s_{02} \\ s_{03} \\ s_{04} \\ s_{05} \\ s_{06} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10^{K_{01}} \\ 10^{K_{02}} \\ 10^{K_{03}} \\ 10^{K_{04}} \\ 10^{K_{05}} \\ 10^{K_{06}} \end{bmatrix} \quad K_{0i} = 1, 2, \dots, 6$$

Die Potenz  $K_{0i}$  des Schadensindikators  $i$  kann die ganzzahligen Werte 1-6 betragen, die den jeweiligen Ausmassklassen A-F entsprechen. In den dimensionslosen Schadensseinheiten sind also der kleinste Wert  $10^1=10$ , und der grösste Wert  $10^6$ . Selbstverständlich ist die Wahl dieses Wertebereichs willkürlich, aber da wir am Ende nur verschiedene Risiken miteinander vergleichen, kommt es nicht darauf an.

*Beispiel:* Die erste Komponente  $s_{01}$  des Referenzrisikos  $\vec{s}_0$  gibt das Schadensausmass eines Unfalls in der Dimension „Personenschaden“ an, und zwar unter der Annahme, dass alle Anlagen perfekt funktionieren. Ist beispielsweise  $s_{01} = 100$ , so bedeutet das, dass bei perfekt funktionierenden Anlagen ein Unfall im Schnitt 3 Leichtverletzte und 1-3 Schwerverletzte produziert. Damit ist nur das Schadensausmass eines Unfalls spezifiziert. Das eigentliche Unfallrisiko ergibt sich aus der Multiplikation des Schadensausmasses mit der Auftretensrate (in diesem Fall die Unfallhäufigkeit).

In der gleichen Art wie das Schadensausmass des Referenzrisikos  $s_0$  kann auch die Schadenshöhe  $s_D$  der direkten Schäden abgebildet werden. Das Schadensausmass bezeichnet die Höhe des Schadens, wenn die Anlage ausfällt (in allen sechs Schadensdimensionen).

$$(0.23) \quad \Delta R_i^{(\text{Tätigkeit})} = \Delta R_{Di} + \Delta R_{Ui} + \Delta R_{Vi}$$

mit den drei Beiträgen:

$$\begin{aligned}
 \Delta R_{Di} &= \lambda(p) \cdot s_{Di} \\
 (0.24) \quad \Delta R_{Ui} &= N(p) \cdot (f_h - 1) \cdot h_0^{(\text{Unfall})} \cdot s_{0i}^{(\text{Unfall})} \\
 \Delta R_{Vi} &= N(p) \cdot \left[ (f_{si}^{(\text{Unfall})} - 1) \cdot h_0^{(\text{Unfall})} \cdot s_{0i}^{(\text{Unfall})} + (f_{si}^{(\text{Brand})} - 1) \cdot h_0^{(\text{Brand})} \cdot s_{0i}^{(\text{Brand})} \right]
 \end{aligned}$$

Die Faktoren  $f_{si}$  beschreiben die Erhöhung des Schadensausmasses für die jeweiligen Indikatoren  $i=1..6$  relativ zu den Referenzwerten  $s_{0i}$ . Die werden aus den Differenzen in den Schadensausmassen zwischen dem Referenzfall und dem Fall eines Ausfalls abgeleitet (vgl. Beispiel unten).

Die gesamte Risikoerhöhung aufgrund der Fehlermodi, die einer bestimmten Tätigkeit zugeordnet sind, ist die Summe aller Risikobeiträge:

$$(0.25) \quad \Delta R_{\text{Tätigkeit}} = \sum_{i=1}^6 \Delta R_i^{(\text{Tätigkeit})}$$

### Fiktives Beispiel

Die Funktion der Lüftung ist die Minderung des Schadensausmasses im Falle eines Brandes durch die Abführung von Rauch und die Gewährleistung der Sicht im Tunnel. Wenn ein Unfall zu einem Brand führt und gleichzeitig die Lüftungssteuerung wegen eines Ausfalls nicht verfügbar ist, wird das Schadensausmass erhöht. Die am meisten betroffenen Schadenindikatoren sind der Personenschaden, Finanzschaden und Imageschaden.

Um die Erhöhung des Risikos aufgrund der Nichtverfügbarkeit der Lüftungssteuerung zu berechnen, muss das Referenzrisiko verglichen werden mit dem Risiko, das besteht, wenn die Lüftungssteuerung ausgefallen ist. Notwendig ist deshalb die Information über die Referenzwerte  $s_{0i}$ , nämlich die Schadenshöhen bei einem Brand in dem spezifischen Tunnel, wenn alle Anlagen perfekt funktionieren.

Es ist wichtig zu beachten, dass die Referenzwerte  $s_{0i}$  als Eigenschaften des Tunnels definiert sind und nicht eine Eigenschaft der betrachteten Anlagen im Tunnel ist. Deshalb sind diese Referenzwerte für alle Anlagen eines Tunnels gleich gross und müssen nur einmal bestimmt werden.

Eine Abbildung aller Werte für die Schadenshöhe in Matrixform ist hilfreich. Als hypothetisches Beispiel nehmen wir an, dass der Referenzfall durch die folgende Tabelle für die sechs Schadensausmass-Dimensionen spezifiziert ist:

	A	B	C	D	E	F
1-Personen		+				
2-Finanz		+				
3-Umwelt		+				
4-Verfügbarkeit			+			
5-Amtstätigkeit		+				
6-Image			+			

Wie nehmen weiter an, dass bei nicht-funktionierender Lüftungssteuerung die Schadensmatrix auf die folgenden Werte geändert wird:

	A	B	C	D	E	F
1-Personen				+		
2-Finanz				+		
$K_0 =$ 3-Umwelt		+				
4-Verfügbarkeit			+			
5-Amtstätigkeit		+				
6-Image						+

Man erkennt, dass die Schadensausmasse für Umwelt, Verfügbarkeit und Amtstätigkeit gleich bleiben. Das bedeutet: Wir nehmen an, dass die Tatsache, dass die Lüftungssteuerung defekt ist, keine Auswirkungen auf die Umweltschäden hat, die bei einem Unfall entstehen würden. Analog für die Amtstätigkeit und die Verfügbarkeit des Tunnels.

Dagegen ist die Annahme, dass das Schadensausmass eines Ereignisses in den Dimensionen Personenschaden, Finanzschaden, und Imageschade zunehmen würde. Beispielsweise würde der Personenschaden bei einem Unfall vom Referenzwert „Klasse B“ (3 LV, 1-3 SV) steigen auf „Klasse D“ (3-30 T).

Aus den Referenzwerten und den Werten des Schadensausmasses beim Ausfall können die Erhöhungsfaktoren  $f_{si}$  abgeleitet werden. Die Erhöhungsfaktoren des Schadensausmasses sind daher:

$$(0.26) \quad f_{si} = \frac{S_{Ai}}{S_{0i}} = 10^{K_{Ai} - K_{0i}} \quad \vec{f}_s = \begin{bmatrix} 10^{4-2} \\ 10^{4-2} \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 10^{6-3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 \\ 100 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1000 \end{bmatrix}$$

Damit man die gesamte Risikoerhöhung aufgrund der Nichtverfügbarkeit der Lüftungssteuerung in einem gegebenen Tunnel berechnen kann, braucht man im Allgemeinen noch die Schadenshöhe, die direkt durch den Ausfall erzeugt wird ( $s_{Di}$ ). Im betrachteten Beispiel nehmen wir an, dass diese Schadenshöhe Null ist, denn der Ausfall der Lüftungssteuerung erzeugt keine direkten Schäden. Ausnahme sind die Reparaturkosten für die Steuerung, wobei diese Aufwendungen Bestandteil der Kostenmodellierung sind und daher nicht im Risiko betrachtet werden.

Für die Berechnung des Risikos muss nun das Schadensausmass multipliziert werden mit der Häufigkeit des entsprechenden Ereignisses. Im betrachteten hypothetischen Beispiel gehen wir von einer durchschnittlichen Brandhäufigkeit von  $h_0^{(\text{Brand})} = 0.2$  Brandfällen pro Jahr aus (wenn alle Anlagen im Tunnel perfekt funktionieren).

Die mittlere Nichtverfügbarkeit der Lüftungssteuerung sei gegeben durch  $N(p) = 0.2$ , wobei wir eine bestimmte Instandhaltungsstrategie  $p$  annehmen.

Somit ist die Risikoerhöhung die Summe der Beiträge der Schadensindikatoren zum Gesamtrisiko:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^6 \Delta R_i &= \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_6 \\
 (0.27) \quad &= N(p) \cdot h_0^{(\text{Brand})} \cdot [(f_{s_1} - 1) \cdot s_{01} + (f_{s_2} - 1) \cdot s_{02} + (f_{s_6} - 1) \cdot s_{06}] \\
 &= 0.2 \cdot 0.2 \cdot [2 \cdot 99 \cdot 100 + 999 \cdot 1000]
 \end{aligned}$$

**Bemerkung zur finanziellen Dimension des Risikos (Finanz- und Sachschäden):**

Bei den finanziellen Auswirkungen von Ausfällen ist es äusserst wichtig die korrekte Zuordnung zu Risiko auf der einen Seite und Kosten auf der anderen Seite zu machen. In Übereinstimmung mit den üblichen Konventionen in der Instandhaltung ordnen wir alle finanzielle Aufwände, die notwendig sind, um die Funktionsfähigkeit der BSA zu erhalten oder wiederherzustellen, den Kosten zu (siehe Abschnitt 5.3.4). Das bedeutet, dass die Kosten für die Störungsbehebung inklusive Material und personenstunden ein Teil der Kosten sind<sup>4</sup>. Alle Kosten, die nicht für die direkte Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit der Anlage anfallen, gehören zum Risiko.

*Beispiel: Die Kosten für eine ungeplante Tunnelsperrung bei einem Unfall haben nichts mit der Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit einer Anlage zu tun. Diese Kosten sind dem Risiko zuzuordnen. Demgegenüber ist Aufwendungen für die Störungsbehebung den Kosten zuzuordnen.*

**Bemerkung zur Anlagenredundanz:**

Wenn eine BSA redundant ist, besteht bei einer Nichtverfügbarkeit von nur einer BSA kein Risiko. Das Risiko entsteht nur dann, wenn gleichzeitig auch die redundante BSA ausfällt. Das bedeutet, dass die relevante Nichtverfügbarkeit, die man in den Formeln verwenden muss, ein Produkt der Nichtverfügbarkeiten der zwei redundanten BSA ist. Die effektive Nichtverfügbarkeit im Rahmen von Redundanz kann allgemein auch für mehr als zwei BSA exakt berechnet werden (siehe Abschnitt 5.3.2.1, «Ausfall und Verfügbarkeit von komplexen Systemen»).

Im Rahmen des vorliegenden Projektes verwenden wir gelegentlich einen vereinfachten Ansatz. Die Redundanz wird dabei durch einen Koeffizienten abgebildet, der Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann.

**5.3.3.5. Vorgehen für die Berechnung der Risikoerhöhung**

- i. Für jede betrachtete Instandhaltungsstrategie  $p$  mittels des technischen Modells die Ausfallrate  $\lambda(p)$  und Nichtverfügbarkeit  $N(p)$  bzw. den mittleren Zustand berechnen.
- ii. Referenzwert der Unfallrate  $h_0^{(\text{Unfall})}$  und die Rate  $h_0^{(\text{Brand})}$  für Brände im Tunnel bestimmen (Annahme: alle Anlagen im Tunnel funktionieren perfekt)
- iii. Referenzwerte der Schadenshöhe  $s_{0i}$  für jeden Schadensindikator bestimmen: Mittlerer Schaden (Ausmassklassen  $K_0$ ) bei Unfall und Brand abschätzen, wenn alle Anlagen funktionieren und damit den Vektor  $\vec{s}_0$  berechnen.
- iv. Direkte Schadenshöhe  $s_{Di}$  durch den Ausfall für jeden Schadensindikator bestimmen:

<sup>4</sup> Dies ist dadurch begründet, dass es eine direkte Folge der Instandhaltungsstrategie ist, wie hoch die Störungsrate ist, d.h. wie hoch die Kosten sind, die für die Störungsbehebung an der Anlage selber aufgewendet werden müssen.

- a. Tabelle für  $K_D$  ausfüllen: was ist die Ausmassklasse  $K_{Di}$  (eine Ganzzahl zwischen 1 und 6, die der Klasse A bis F entspricht) des Schadensindicators  $i$  bei einem Ausfall der betrachteten Anlage?
- b. Den Vektor  $\vec{s}_D$  berechnen:  $s_{Di} = 10^{K_{Di}}$
- v. Für Unfälle und Brandfälle den Faktor  $f_h$  bestimmen: Um welchen Faktor erhöht sich die durchschnittliche Anzahl Unfälle/Brände im Jahr wenn die Anlage nicht funktioniert? Falls sich bei einem Ausfall die Raten nicht erhöhen ist  $f_h = 1$ .
- vi. Die Faktoren  $f_{si}$  (Änderung der Schadenshöhe bei einem Ereignis) berechnen:
  - a. Die Tabelle für  $K_A$  ausfüllen: was ist die Ausmassklasse  $K_{Ai}$  (eine Ganzzahl zwischen 1 und 6 die der Klasse A bis F entspricht) des Schadensindicators  $i$  bei einem Unfall/Brand, falls die Anlage ausfällt?
  - b. Den Vektor  $\vec{f}_s$  berechnen:  $f_{si} = 10^{K_{Ai} - K_{0i}}$
- vii. Komponenten der Risikoerhöhung  $\Delta R_i$  berechnen: Die abgeleiteten Grössen in die entsprechenden Formel (0.23) und (0.24) einsetzen.
- viii. Gesamte Risikoerhöhung anhand Formel (0.27) berechnen.

Wie oben erwähnt, muss dieses Vorgehen im Prinzip für jeden Fehlermodus getrennt durchgeführt werden. Dabei lassen sich jedoch in der Praxis oft Elemente wiederverwenden. Beispielsweise muss die Berechnung des Referenzrisikos nur einmal pro Tunnel durchgeführt werden (Schritt ii und iii).

### Notwendige Inputparameter

Die Inputparameter zum Risikomodell können in 3 Gruppen unterteilt werden

- (i) Parameter des technischen Modells in Abhängigkeit der Instandhaltungsstrategie  $p$ . Diese sind spezifisch für eine Anlage und einen Fehlermodus:
  - a. Ausfallrate  $\lambda(p)$
  - b. Nichtverfügbarkeit  $N(p)$
  - c. Mittlerer Zustand
- (ii) Referenzwerte, wenn alle Anlagen im Tunnel perfekt funktionieren. Diese sind Eigenschaften des Tunnels und sind unabhängig von einer spezifischen Anlage:
  - a. Unfallrate  $h_0^{(\text{Unfall})}$  und Brandhäufigkeit  $h_0^{(\text{Brand})}$ .
  - b. Schadensausmass  $\vec{s}_0^{(\text{Unfall})}$  und  $\vec{s}_0^{(\text{Brand})}$  in Vektorform (gegeben durch Tabellen  $K_0^{(\text{Unfall})}$  und  $K_0^{(\text{Brand})}$  wie oben beschrieben), separat für Unfall und Brandfall je nach Zweck der Tätigkeit.
- (iii) Faktoren, die die Risikoerhöhung durch einen Ausfall einer Anlage bestimmen:
  - a. Das direkte Schadensausmass aufgrund des Ausfalls  $\vec{s}_D$  in Vektorform (gegeben durch eine Tabelle  $K_D$  analog zu  $K_0$ ).
  - b. Erhöhung der Unfallrate aufgrund des Ausfalls  $f_h$
  - c. Erhöhung des Schadensausmasses aufgrund der Nichtverfügbarkeit oder Degradation beim Unfall  $\vec{f}_s^{(\text{Unfall})}$  oder Brandfall  $\vec{f}_s^{(\text{Brand})}$ , in Vektorform (berechnet anhand der Tabellen  $K_0$  und  $K_A$  wie im obigen Rezept, separat für Unfall und Brandfall je nach Zweck der Tätigkeit).

### 5.3.4 Modellierung Kosten

Wir modellieren den Kostenbeitrag für eine Tätigkeit, falls die Kosten durch die Veränderung des Wartungsintervalls beeinflusst werden können. Es ist wichtig zu

unterscheiden zwischen Kostenbeiträgen, die zum Kostenmodell gehören, und denjenigen die zum Risikomodell gehören. Die Unterscheidung wird wie folgt definiert: Zu den Kosten gehören alle finanzielle Aufwände die notwendig sind, um die Funktionsfähigkeit der BSA zu erhalten oder wiederherzustellen. Alle anderen finanziellen Aufwände werden dem Risiko durch die Schadenausmassmatrix zugeteilt.

Die gesamten jährlichen Kosten einer Tätigkeit setzen sich aus verschiedenen Arten von Kostenbeiträgen zusammen:

$$(0.28) \quad C_{\text{Tätigkeit}} = C_M + C_I + C_{S1} + C_{S2} + C_E$$

**(a) Instandhaltungskosten für präventive Arbeiten und Wartung  $C_M$**

Diese Kosten beschreiben die jährlichen finanziellen Aufwände der Durchführung einer Tätigkeit. Diese beinhalten Personenstunden und Materialkosten, die für die Inspektion, Zustandskontrolle und Wartung benötigt werden. Wir bezeichnen mit  $C_A$  die gesamten Kosten der Tätigkeit und mit  $\Delta$  das Wartungsintervall. Der jährliche Beitrag zu den Instandhaltungskosten ist dann:

$$(0.29) \quad C_M = C_A / \Delta$$

**(b) Investitionskosten  $C_I$**

Die mittleren jährlichen Investitionskosten  $C_I$  beinhalten die finanziellen Aufwände der Beschaffung einer neuen BSA. Die Beschaffungskosten  $C_0$  teilen wir durch die Nutzungsdauer  $T$  der BSA. Die mittleren jährlichen Investitionskosten ändern sich, wenn die Nutzungsdauer vom Wartungsintervall  $\Delta$  abhängig ist (vgl. Abschnitt 5.3.2):

$$(0.30) \quad C_I = C_0 / T(\Delta)$$

**(c) Störungskosten  $C_S$**

Die Störungskosten beinhalten die Materialkosten für den Ersatz von BSA sowie die Kosten für die Störungsbehebung (inklusive Störungseruierung und Quittierung der Störmeldung), die beim Auftreten einer einzigen Störung anfallen. Falls diese mit der Anzahl BSA skaliert, müssen die Störungskosten pro BSA  $C_S^{(BSA)}$  berechnet werden. Um die jährlichen Störungskosten zu berechnen werden die Anzahl BSA  $n_A$  sowie die mittlere Ausfallrate  $\lambda(\Delta)$  berücksichtigt:

$$(0.31) \quad C_S = C_S^{(BSA)} \cdot n_A \cdot \lambda(\Delta)$$

**(d) Energiekosten  $C_E$**

Kosten für Strom/Energieverbrauch, die durch die Wartungstätigkeit beeinflusst werden. Die Berechnung der Energiekosten ist spezifisch und hat keine allgemeine Struktur

## 5.4 Phase 4: Abschätzung der Parameter

### 5.4.1 Ziel / Inhalt der Phase

Durch die mathematische Modellierung in Phase 3 sind nicht nur bekannt wie wir die Kosten und Risiken berechnen. Es ist auch bekannt, welche Informationen (Parameter) für die Berechnung benötigt werden. Falls z.B. durch eine Verlängerung des Instandhaltungsintervalls der Stromverbrauch verdoppelt wird, so muss für die Kostenberechnung der normale Stromverbrauch ermittelt werden. Da diese

Parametergrößen von Tunnel zu Tunnel variieren können, müssen sie objekt- bzw. anlagenspezifisch definiert werden. Ziel dieser Phase ist folglich die benötigten Größen quantitativ zu bestimmen, um zusammen mit der Kosten- und Risikomodellierung die Grundlage für die Berechnung zu schaffen.

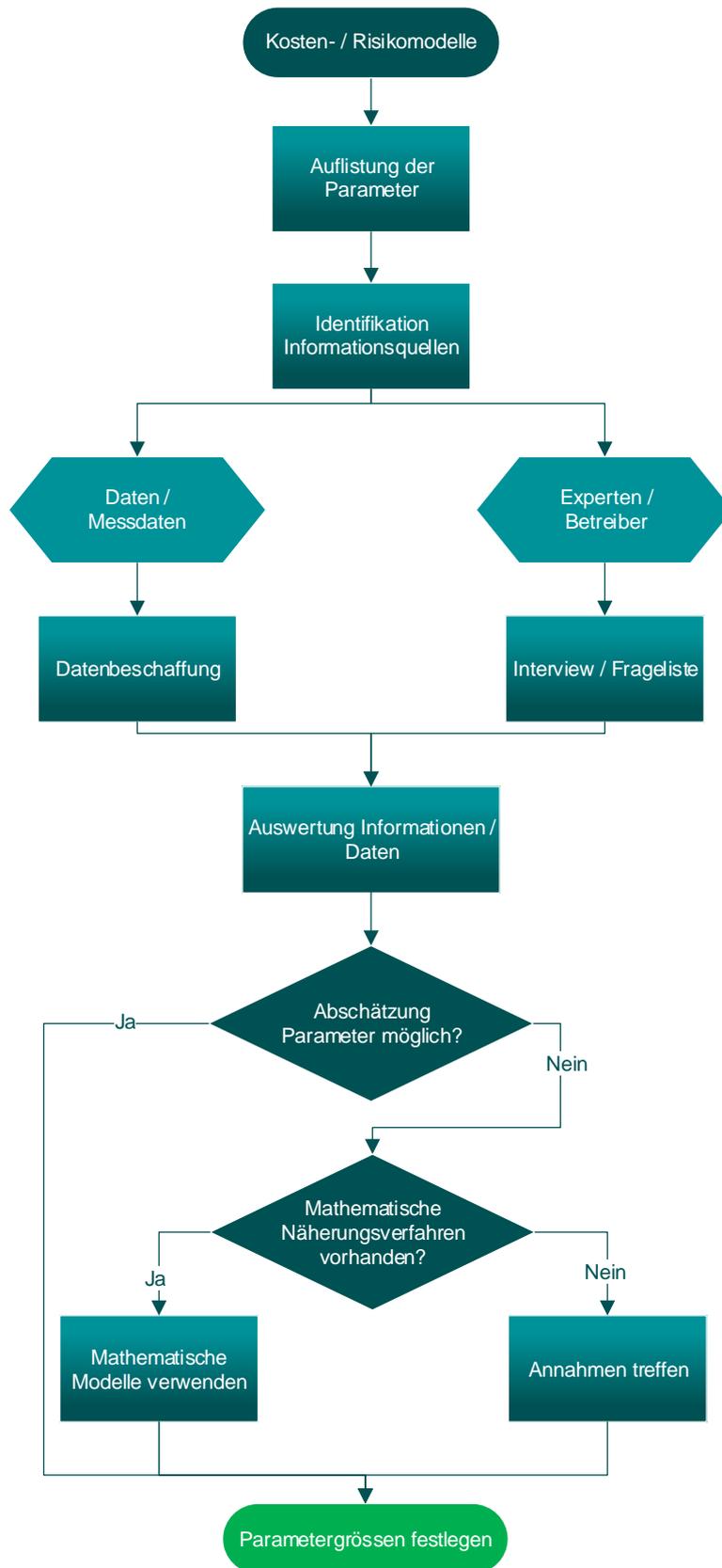
#### 5.4.2 Bestimmung der Parameterwerte

Damit wir die einzelnen Parameterwerte für die Berechnung der Kosten und Risiken festlegen können, verwenden wir das in **Abb. 18** dargestellte Vorgehen. Um als erstes einen Überblick über die Parameter zu erhalten, müssen sie aus den in Phase 3 definierten Kosten- und Risikomodellen zusammengetragen werden.

Für jeden Parameter entscheiden wir, welche Informationsquelle uns zur Bestimmung des Parameterwertes weiterhelfen könnte. Eventuell kann es notwendig sein, Quellen vorgängig zu prüfen, ob die enthaltenen Informationen in der benötigten Qualität bezogen werden können. Falls zur Abschätzung der Parameterwerte Experten-/Betreiberwissen benötigt wird, erstellen wir eine Frageliste. Die Fragen sollten so praxisorientiert wie möglich gestaltet sein, so dass sie möglichst einfach beantwortet werden können. Statt z.B. zu fragen, wie oft ein Fehler auftritt, kann die Frage nach der qualitativen Häufigkeit (monatlich, wöchentlich, täglich, mehrmals täglich...) womöglich einfacher beantwortet werden und eine ausreichende Genauigkeit enthalten.

Mit Hilfe der Informationen wird entschieden, ob eine Abschätzung des Parameterwertes möglich ist. Im besten Fall können alle Parameter aus den ausgewerteten Daten und Antworten der Experten / Betreiber abgeleitet werden. Nun gibt es aber auch den Fall, dass eine Situation in der Vergangenheit noch nie beobachtet worden ist. Dies macht eine Abschätzung eines Parameterwertes sehr schwierig, da es natürlich nicht bedeutet, dass diese Situation auch in Zukunft nie eintreten wird. Für diesen Fall verwenden wir ein mathematisches Abschätzungsverfahren (siehe I.1.1.III.1), mit welchem wir dennoch eine Aussage treffen können.

Ist eine Abschätzung auch über dieses Verfahren nicht möglich, so müssen Annahmen getroffen werden, um den Parameterwert grob festzulegen. In Phase 6 (vgl. Kapitel 5.5.1) können solche Abschätzungen einer Sensitivitätsanalyse unterzogen werden. So kann überprüft werden, inwiefern eine Änderung der Parametergröße das Resultat beeinflusst.



**Abb. 18** Vorgehen zur Abschätzung der Parametergrößen

## 5.5 Phase 5: Berechnung der Resultate

### 5.5.1 Ziel / Inhalt der Phase

In Kapitel 5.3 wurde beschrieben, wie für jede Tätigkeit die Höhe des Risikos und die Kosten der entsprechenden Fehlermodi in Abhängigkeit der Instandhaltungsstrategie (des Intervalls der Tätigkeit) berechnet. Die Berechnungen erfolgen durch die Anwendung der in Kapitel 5.3 aufgestellten Modelle sowie den in Kapitel 5.4 ermittelten Parameterwerten.

Die konkrete Berechnung liefert folgende Teilergebnisse:

- Pro Tätigkeit:
  - Kosten der Tätigkeit in Abhängigkeit des Intervalls
  - Für jeden Fehlermodus: Ausfallrate/Degradation in Abhängigkeit des Intervalls
  - Für jeden Fehlermodus: Teilrisiko in Abhängigkeit des Intervalls
  - Gesamtrisiko (summiert über alle betrachteten Fehlermodi der Tätigkeit)
  - Kosten-Risiko-Diagramm der Tätigkeit
- Pro Anlage oder System
  - Menge der möglichen Anlagenstrategien als Kombination von Tätigkeitsintervallen für Einzeltätigkeiten definieren
  - Kosten-Risiko-Diagramm für die Anlage (alle Tätigkeiten)
  - Eine erste Optimierung der IH-Strategie auf Anlagenebene

### 5.5.2 Risiko-Kosten-Diagramm

Im Risiko-Kosten-Diagramm werden die verschiedenen Strategien als Punkte dargestellt; jeder Punkt bezeichnet eine bestimmte Strategie. Die x-Koordinate des Punktes gibt die mittleren jährlichen Kosten an, die y-Koordinate das entsprechende Risiko, welches mit der IH-Strategie erzielt wird. Somit erhalten wir einen Überblick über alle relevanten IH-Strategien mit ihren Auswirkungen auf die jährlichen Kosten und das Gesamtrisiko. Dies erlaubt einen Vergleich zwischen verschiedenen Optionen für Strategien und kann zu einem ersten Schritt der Optimierung dienen. Es kann nämlich vorkommen, dass es Strategien gibt, die teurer sind und gleichzeitig mehr Risiko erzeugen als andere. Solche Strategien würde man in der Praxis nicht anwenden. Eine Strategie ist nur dann sinnvoll, wenn es keine andere Strategie gibt, die für die gleichen Kosten weniger Risiko erzeugt.

Risiko-Kosten-Diagramme können wir auf Ebene der Tätigkeiten oder auf der Ebene der Anlage erzeugen. Folgend werden die beiden Arten genauer beschrieben.

#### 5.5.2.1. Risiko-Kosten-Diagramme auf der Ebene von Tätigkeiten

Bei einem Risiko-Kosten-Diagramm auf Ebene der Tätigkeit sind die einzelnen Strategien durch die unterschiedlichen Intervalle definiert. Jedes Intervall entspricht einer Strategie und ist als Punkt dargestellt. Die Darstellung eines Kosten-Risiko-Diagramms auf der Ebene «Tätigkeit» ist in der folgenden Abbildung zusehen.

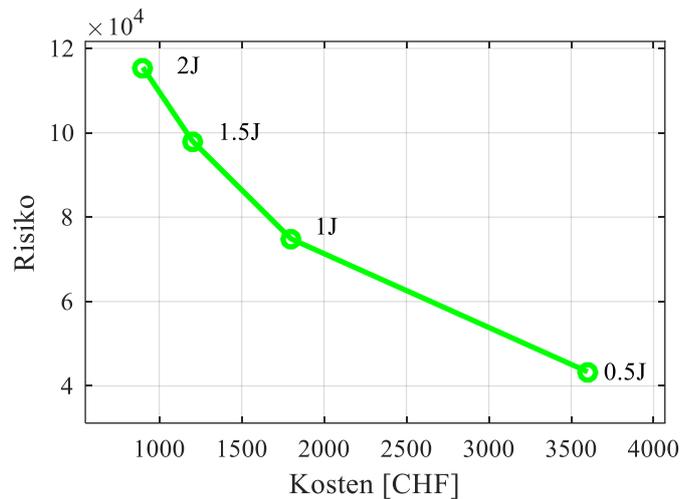


Abb. 19 Darstellung Kosten-Risiko-Diagramm

### 5.5.2.2. Risiko-Kosten-Diagramme auf der Ebene von Anlagen

Bei einem Risiko-Kosten-Diagramm auf Ebene der Anlage werden mehrere Tätigkeiten berücksichtigt. Eine Anlagenstrategie ist eine Kombination von Strategien der unterschiedlichen Tätigkeiten, sie besteht daher aus einer beliebigen Kombination von Intervallen. Hat man an der Anlage eine Menge von  $d$  unterschiedlichen Tätigkeiten, so wird eine Anlagenstrategie  $P_k$  ( $k=1, 2, 3, \dots$ ) durch eine Kombination von  $d$  Intervallen definiert:

$$(0.32) \quad P_k = \{ \Delta_1^{(k)}, \Delta_2^{(k)}, \dots, \Delta_d^{(k)} \}$$

Der Index  $k$  nummeriert die verschiedenen Anlagenstrategien durch, also die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten von Intervallen für die einzelnen Tätigkeiten. Da schnell sehr viele unterschiedliche Kombinationen möglich sind, gibt es für eine Anlage oft eine grosse Menge an verschiedenen Strategien<sup>5</sup>.

*Beispiel:* Bei einer Anlage werden vier verschiedene Tätigkeiten T1, T2, T3 und T4 durchgeführt. Für die einzelnen Tätigkeiten existieren folgende Intervallmöglichkeiten:

- Tätigkeit T1: 6 mögliche Intervalle: 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 Jahre
- Tätigkeit T2: 4 mögliche Intervalle: 0.5, 1, 1.5, 2 Jahre
- Tätigkeit T3: 2 mögliche Intervalle: 0.25, 0.5 Jahre
- Tätigkeit T4: 4 mögliche Intervalle: 0.25, 0.5, 0.75, 1 Jahre

Die Gesamtmenge an unterschiedlichen Kombinationen  $k$  der vier Intervalle ist  $6 \times 4 \times 2 \times 4 = 192$ .

Pro Kombination (d.h. pro Anlagenstrategie) berechnen wir die nun die jährlichen Gesamtkosten und das Gesamtrisiko durch Summation:

<sup>5</sup> Im Prinzip kann man beliebige Intervalle für die verschiedenen Tätigkeiten miteinander kombinieren. In der Praxis kann es jedoch auch eine Koppelung zwischen Tätigkeiten geben, z.B. weil es nicht wirtschaftlich ist, zwei Tätigkeiten in einem unterschiedlichen Rhythmus durchzuführen. Die Menge von sinnvollen Anlagenstrategien ist daher oft kleiner als die durch die Kombinatorik grundsätzlich mögliche Menge an Kombinationen. Solche in der Praxis wichtigen Kopplungen können einfach berücksichtigt werden, indem nicht sinnvolle Kombinationen gar nicht erst in die Menge der betrachteten Strategien aufgenommen werden.

Gesamtkosten der Kombination k:

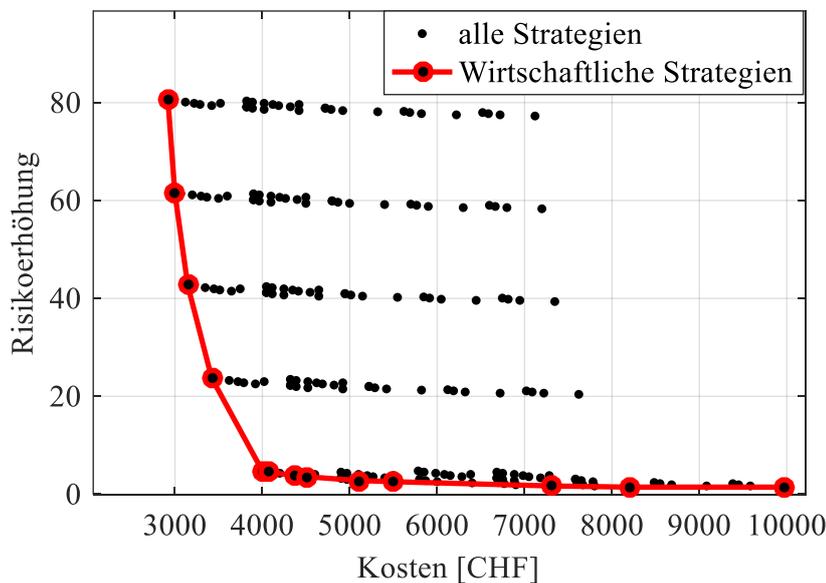
$$(0.33) \quad C_{tot}(\Delta_1^{(k)}, \Delta_2^{(k)}, \dots, \Delta_d^{(k)}) = \sum_{a=1}^d C_a(\Delta_a^{(k)})$$

Gesamtrisiko der Kombination k:

$$(0.34) \quad \Delta R_{tot}(\Delta_1^{(k)}, \Delta_2^{(k)}, \dots, \Delta_d^{(k)}) = \sum_{a=1}^d \Delta R_a(\Delta_a^{(k)})$$

Die sinnvollen (effizienten) Strategien liegen alle auf der sogenannten «Pareto-Front» (siehe Kapitel 6). Der Begriff der Pareto-Front kommt aus der multikriteriellen Optimierung. Die Pareto-Front bezeichnet die Menge aller Alternativen, die nicht bezüglich eines Kriteriums verbessert werden kann, ohne dass man bezüglich eines anderen Kriteriums eine Verschlechterung hat. Konkret bedeutet das im betrachteten Fall: Ein Punkt der Pareto-Front zeichnet sich dadurch aus, dass es keine Strategie gibt, die billiger ist und höchstens das gleiche Risiko generiert. Mit anderen Worten: Jede Strategie, die niedrigere Kosten hat, hat auch mehr Risiko. Man kann also die Strategien, die auf der Pareto-Front liegen, als «effiziente Strategien» bezeichnen.

In der folgenden Abbildung ist die Menge aller Strategien für die Tunnellüftung dargestellt. Die Pareto-Front besteht aus den roten Punkten. In **Abb. 20** ist zu sehen, dass die Pareto-Front eine Folge von Strategien beinhaltet, die, wenn man sie von links nach rechts liest, immer teurer werden, gleichzeitig aber zu einem immer kleineren Risiko führen.



**Abb. 20** Beispiel Pareto-Front

Auf der Ebene der Anlage sollte man also eine Strategie auswählen, die auf der Pareto-Front liegt. Jene Strategien, welche nicht auf der Pareto-Front liegen, können ausgeschlossen werden. Dies liefert schon eine starke Reduktion der Menge der sinnvollen Strategien, aber noch kein eindeutiges Ergebnis. Man hat auf der Ebene der Anlage typischerweise immer noch verschiedene Optionen, die verschieden teuer sind, aber bei höheren Kosten auch weniger Risiko erzeugen. Dennoch kann man hier schon von einer ersten Phase der Optimierung sprechen.

Für die Portfolio-Optimierung (siehe Kapitel 6) ist es nicht notwendig, alle möglichen Strategien auf Anlagenebene zu betrachten. Man kann für die Portfolio-Optimierung die Betrachtung einschränken auf die Strategien, die auf der Pareto-Front liegen. Auch aus diesem Grund ist die Berechnung der Pareto-Front für jede Anlage ein wichtiges Resultat der Analyse.

### 5.5.3 Resultate / Erkenntnisse der Phase

Zusammengefasst halten wir fest: Phase 5 liefert als Resultat einerseits eine Übersicht über alle möglichen Strategien einer Anlage, und andererseits eine Auswahl von sinnvollen Strategien, die sich als Pareto-Front der Gesamtmenge von Strategien ergibt.

## 5.6 Phase 6: Sensitivitätsanalyse

### 5.6.1 Ziel / Inhalt der Phase

Viele Parameter müssen aufgrund von Erfahrungswerten der Betreiber abgeschätzt werden (siehe Abschnitt 5.4). Naturgemäss haben diese Werte eine gewisse Unsicherheit.

Normalerweise sind die Ergebnisse (in unserem Fall das Risiko-Kosten-Diagramm auf Ebene Anlage) bezüglich der meisten Parameter nicht sehr sensitiv, und nur wenige Parameter haben einen stärkeren Einfluss auf das Endergebnis. Um diese Parameter zu identifizieren, führt man eine Sensitivitätsanalyse durch.

Bei der Sensitivitätsanalyse werden einzelne Parameterwerte verändert (im Rahmen der erwarteten Unsicherheit), um den Einfluss auf das Resultat ersichtlich zu machen.

### 5.6.2 Vorgehen Sensitivitätsanalyse

Um die Sensitivität der Ergebnisse von einem bestimmten Parameter abzuschätzen, arbeitet man oft mit drei Werten «worst case», «beste Schätzung», «best case» für diesen Parameter. Der Wert «beste Schätzung» ist der Referenzwert, den wir für die Berechnungen verwenden.

Durch Ersetzen dieses Referenzwertes durch die beiden Extremwerte «best case» und «worst case» und Neuberechnung der Ergebnisse erzeugt man zwei Alternativ-Ergebnisse. Unterscheiden sich diese nur wenig von dem ursprünglichen Ergebnis, ist das Ergebnis nicht sensitiv bezüglich des betrachteten Parameters, und man muss keinen weiteren Aufwand betreiben, um genauere Abschätzungen für den entsprechenden Parameterwert zu erhalten.

Unterscheiden sich die Ergebnisse jedoch stark von den ursprünglichen Ergebnissen, hat man einen sensitiven Parameter identifiziert. Hier ist es in der Regel notwendig, Zusatzaufwand zu betreiben, um den Parameterwert besser abzuschätzen, das heisst die Spannweite zwischen dem «best case» und dem «worst case» zu reduzieren.

Es ist empfehlenswert die Sensitivitätsanalyse auf der Ebene des Risiko-Kosten-Diagramms einer Anlage zu machen, da die erste Optimierung der Instandhaltungsstrategie auf dieser Ebene stattfindet. Es wird häufig vorkommen, dass ein Parameter auf der Ebene der Tätigkeit durchaus sensitiv ist, aber auf der Ebene der Anlage nicht mehr.

*Beispiel: Wenn die einer Tätigkeit zugeordneten Fehlermodi (verglichen mit den Fehlermodi anderer Tätigkeiten) nur ein sehr geringes Risiko erzeugen, dann ist es auf der Anlagenebene irrelevant, wie hoch das Risiko tatsächlich ist. Es wird ohnehin dominiert von den anderen Risiken. Das bedeutet, dass alle Parameter, die sich auf das Risikomodell auswirken (z.B. Schadenshöhe), auf Ebene der Anlage nicht sensitiv sind.*

Analog gilt: Wenn eine Tätigkeit nur geringe Kosten verursacht (verglichen mit anderen Tätigkeiten), dann sind die Parameter des Kostenmodells nicht sensitiv auf Ebene der Anlage.

Durch eine Betrachtung auf Anlagenebene können also die sensitiven Parameter auf eine Mindestmenge reduziert werden, was gleichzeitig bedeutet, dass der minimale Aufwand für eine genaue Bestimmung der Parameterwerte betrieben werden muss.

Eine Sensitivitätsanalyse kann auch genutzt werden um abzuschätzen, wie unterschiedlich sich gleiche Anlagen in verschiedenen Tunneln verhalten. Durch tunnelspezifische Faktoren wie Verkehrsdichte, bauliche Gegebenheiten, Redundanz oder Kostenstruktur können sich sowohl die Kosten als auch die Risiken verändern, was zu einem anderen Kosten-Risiko-Diagramm führen kann, und entsprechend auch zu einer anderen Pareto-Front.

Durch Variieren von Modellparametern über den Wertebereich, der über die verschiedenen Tunnel abgestrichen wird, kann man deshalb auch Aussagen machen darüber, wie stark sich die Pareto-Front in ihrer Lage ändert, oder ob die Strategien, die auf der Pareto-Front liegen, stark von diesen tunnelspezifischen Faktoren abhängen.

### **5.6.3 Resultate / Erkenntnisse der Phase**

Das Hauptresultat der Phase 6: Sensitivitätsanalyse besteht in der Identifikation derjenigen Parameter, die einen spürbaren Einfluss auf das Endergebnis (Risiko-Kosten-Diagramm der Anlage, Lage der Pareto-Front, Strategien der Pareto-Front) haben. Die Sensitivitätsanalyse hat normalerweise zur Folge, dass man die sensitiven Parameter nochmals genauer abschätzt, so dass ein zweites Ergebnis dieser Phase ein verbessertes Modell ist.



## 6 Vorgehen zur Optimierung des Portfolios

Im Kapitel 5.5.2.2 wurde beschrieben, wie man auf der Ebene einer einzelnen Anlage optimale Instandhaltungsstrategien findet. Die Instandhaltungsstrategie auf der Ebene einer Anlage ist definiert dadurch, dass man für jede Instandhaltungstätigkeit das entsprechende Wartungsintervall vorgibt. Sie ist also eine Kombination von Intervallen. Weil es in der Regel mehrere Instandhaltungstätigkeiten gibt, für die jeweils verschiedene Instandhaltungsintervalle möglich sind, kann die Menge der möglichen Instandhaltungsstrategie für eine Anlage sehr gross sein.

Wie oben diskutiert, ist es auf der Ebene einer Anlage grundsätzlich nicht möglich, die optimale Instandhaltungsstrategie zu finden, denn die beiden Dimensionen «Kosten» und «Risiko» sind zunächst nicht miteinander kompatibel und werden in verschiedenen Einheiten ausgedrückt. Deshalb gibt es immer den Trade-off zwischen Kosten und Risiko, und durch mehr Geldeinsatz kann in der Regel das Risiko verringert werden. Es ist jedoch möglich, in einem ersten Optimierungsschritt aus der grossen Menge von verschiedenen möglichen Instandhaltungsstrategien diejenigen herauszufinden, die pareto-optimal sind, das heisst, die auf der Pareto-Front liegen. Diese pareto-optimalen Strategien zeichnen sich dadurch aus, dass sie ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis haben in folgendem Sinne: Für jede Strategie, die nicht auf der Pareto-Front liegt, findet sich mindestens eine pareto-optimale Strategie, die sowohl billiger ist als auch ein kleineres Risiko erzeugt. In diesem ersten Optimierungsschritt kann man also die Menge aller möglichen Instandhaltungsstrategien reduzieren auf die «sinnvollen», sprich die pareto-optimalen.

Die Menge der pareto-optimalen Strategien einer Anlage hat die Eigenschaft, dass sie aus einer geordnete Menge von Strategien besteht, wobei die folgende Strategie sowohl höhere Kosten hat als auch in geringeres Risiko als die vorhergehende.

Formal ausgedrückt: Seien  $(C_k, \Delta R_k)$ ,  $k=1,2,\dots,m$  die  $m$  verschiedenen Strategien der Pareto-Front für eine Anlage, wobei  $C_k$  die mittleren jährlichen Kosten der Strategie  $k$  bezeichnen, und  $\Delta R_k$  die mittlere Risikoerhöhung, die mit der Strategie zusammenhängt (die Referenzsituation ist das perfekte Funktionieren aller Anlagen). Diese Strategien seien bezüglich der Kosten geordnet, das heisst

$$(0.35) \quad C_k > C_{k-1}, \text{ für alle } k > 1$$

Dann gilt:

$$(0.36) \quad \Delta R_k \leq \Delta R_{k-1}, \text{ für alle } k > 1$$

Beweis: Hätte man eine Strategie  $k$ , für die  $\Delta R_k > \Delta R_{k-1}$  wäre, dann wäre diese Strategie dominiert durch die Strategie  $k-1$  (denn diese wäre dann sowohl billiger als auch risikoärmer). Also wäre die Strategie  $k$  kein Element der Pareto-Front.

In **Abb. 21** ist die Pareto-Front einer Anlage schematisch dargestellt.



**Abb. 21** Pareto-Front einer Anlage. Jeder Punkt entspricht einer Anlagenstrategie, die durch eine spezifische Kombination  $(C_k, \Delta R_k)$ ,  $k=1,2,\dots$  definiert ist.

Für die folgenden Abschnitte gehen wir davon aus, dass wir für jede Anlage die Menge aller pareto-optimalen Strategien vorliegen haben. Wir bezeichnen diese Menge mit

$$(0.37) \quad \left\{ \left( C_k^{(j)}, \Delta R_k^{(j)} \right) \mid j=1,\dots,N, k=1,\dots,m_j \right\}$$

wobei der Index  $j$  für die Anlage steht, und der Index  $k$  für die entsprechende Strategie. Jede Anlage  $j$  kann eine andere Menge  $m_j$  von pareto-optimalen Strategien haben.

In den nächsten Abschnitten diskutieren wir, wie wir für dieses Portfolio von  $N$  Anlagen die optimale Instandhaltungsstrategie finden. Ein solches Portfolio kann zum Beispiel die Menge aller Anlagen eines Tunnels sein.

Eine Portfoliostrategie besteht in der Kombination von Anlagenstrategien, also muss für jede Anlage  $j$  eine der möglichen pareto-optimalen Strategien  $k_j=1,\dots,m_j$  ausgewählt werden. Eine Portfoliostrategie  $P$  wird also durch die Kombination

$$(0.38) \quad P = (k_1, k_2, \dots, k_N)$$

angegeben, wobei  $k_j$  die ausgewählte Strategie für Anlage  $j$  bezeichnet.

Die Anzahl  $\#P$  aller möglichen Portfoliostrategien ist in der Regel eine sehr grosse Zahl und gegeben durch

$$(0.39) \quad \#P = m_1 \cdot m_2 \cdot \dots \cdot m_N = m^N$$

*Beispiel:* Nehmen wir ein Portfolio bestehend aus 20 Anlagen, wobei für jede Anlage 10 verschiedene pareto-optimale Instandhaltungsstrategien existieren. Daraus ergeben sich total  $10^{20}$  verschiedene Portfoliostrategien.

Um die Portfoliostrategien miteinander vergleichen zu können, kann man nun im Prinzip für alle möglichen Portfoliostrategien  $P$  die jeweiligen Gesamtkosten  $C(P)$  und die jeweilige Risikoerhöhung  $\Delta R(P)$  berechnen:

$$(0.40) \quad C(P) = \sum_{j=1}^N C_{k_j}^{(j)}$$
$$\Delta R(P) = \sum_{j=1}^N \Delta R_{k_j}^{(j)}$$

Man geht also alle möglichen Portfoliostrategien durch und berechnet jeweils Kosten und Risiko. Dies wäre ein äquivalentes Vorgehen wie bei der Bestimmung der Anlagenstrategie (siehe Abschnitt 5.5.2), ist aber in vielen Fällen zu rechenintensiv. Wenn die Auswertung einer Portfoliostrategie eine Millisekunde benötigt, bräuchte man für  $10^{20}$  Portfoliostrategien immer noch mehr als  $10^9$  Jahre, also mehr als eine Milliarde Jahre.

Im Folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, das die optimale Portfoliostrategie in zwei Schritten bestimmt. Im ersten Schritt gehen wir von der Randbedingung eines gegebenen Gesamtbudgets aus und bestimmen diejenige Portfoliostrategie, die das kleinste Risiko erzeugt für dieses Budget. In einem zweiten Schritt kann dann das Gesamtbudget variiert werden.

## 6.1 Optimale Portfolio-Strategie bei gegebenem Gesamtbudget

### 6.1.1 Risikominimierung bei gegebenem Gesamtbudget

Wir gehen zunächst davon aus, dass wir für das Gesamtportfolio der Anlagen ein gegebenes jährliches Gesamtbudget  $B$  haben, mit dem die Instandhaltung finanziert werden kann. Konsistent mit dem vorherigen Kapitel meinen wir mit Kosten der Instandhaltung alle Kosten, die notwendig sind, um die Funktionsfähigkeit der BSA zu erhalten oder wiederherzustellen (siehe Kapitel 5.3.4). Dieses Gesamtbudget deckt die Instandhaltungskosten für alle Anlagen des Portfolios.

Konkret sind das:

- Kosten für präventive Instandhaltungsarbeiten und Wartung pro Jahr
- Mittlere jährliche Kapitalkosten der Anlagen
- Erwartungswert der jährlichen Störungskosten (Störungsbehebung und Kosten für Ersatzteile)
- Jährliche Energiekosten oder andere Betriebskosten

Alle Kostenfaktoren werden zunächst auf Ebene Anlage definiert und sind abhängig von der Anlagen-Instandhaltungsstrategie. Mit Ausnahme der Störungskosten sind die Kostenfaktoren deterministisch berechenbar, wenn die entsprechenden Kostenmodelle vorliegen. Die Störungskosten enthalten eine stochastische Komponente, da die Anzahl und Schwere der Störungen zufällig ist und schwanken kann. Deshalb muss für diesen Kostenfaktor der Erwartungswert verwendet werden.

Wir gehen also davon aus, dass für alle oben genannten Kostenfaktoren ein über alle Anlagen des Portfolios gemeinsames definiertes jährliches Globalbudget  $B$  existiert.

Eine zulässige Portfoliostrategie muss also die Bedingung erfüllen:

$$(0.41) \quad \sum_{j=1}^N C_{k_j}^{(j)} \leq B$$

Für das gegebene Budget  $B$  gibt es eine *optimale* Portfoliostrategie, nämlich diejenige, die das minimale Risiko erzeugt, ohne das Budget zu überschreiten. Als Optimierungsproblem kann das folgendermassen geschrieben werden:

$$(0.42) \quad \sum_{j=1}^N \Delta R_{k_j}^{(j)} = \min$$

unter der Nebenbedingung  $\sum_{j=1}^N C_{k_j}^{(j)} \leq B$

Dabei wird über die Menge aller möglichen Portfoliostrategien optimiert.

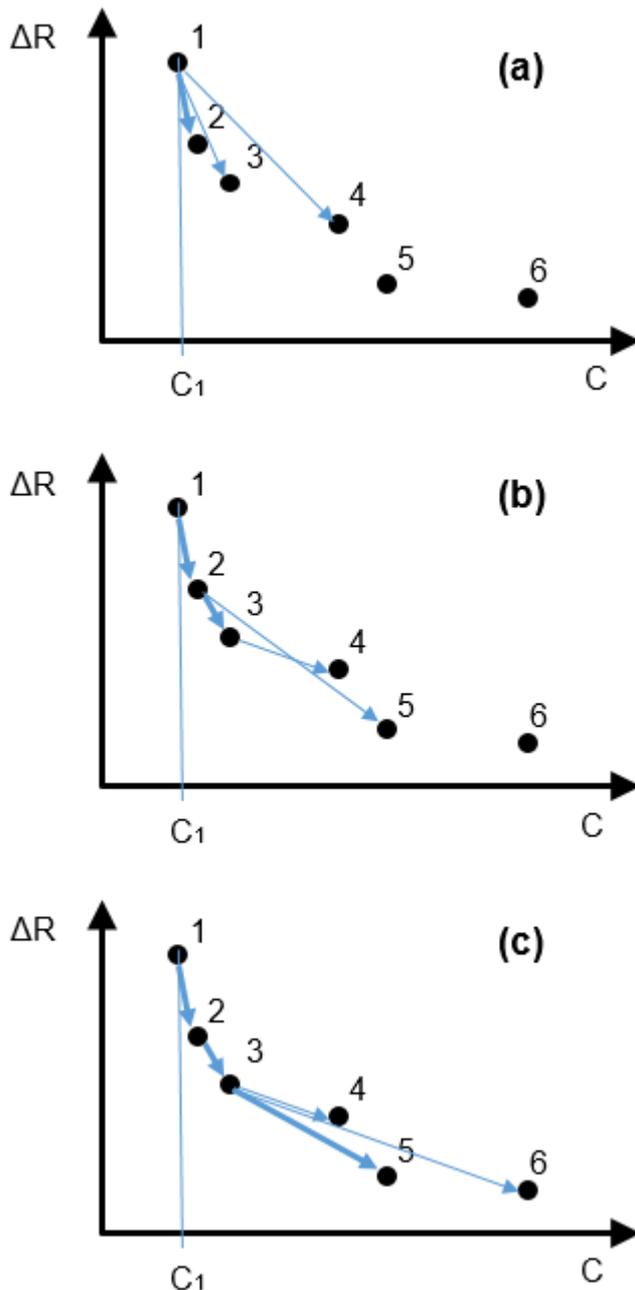
Dies ist ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem, das NP-hart ist, also sehr schwer zu lösen ist. Typische Lösungsmethoden sind einerseits Heuristiken oder Meta-Heuristiken wie z.B. genetische Algorithmen, Branch-and-Bound-Methoden, oder Simulated Annealing. Andererseits können solche Probleme, wenn sie nicht zu gross sind, mit modernen Solvern gelöst werden. Beide Ansätze sind nicht-trivial und erfordern in der Regel einen grossen Initialaufwand bei der Entwicklung.

Im Rahmen des vorliegenden Problems können wir aber auf eine sehr einfache Weise eine Näherungslösung finden. Die Grundlagen dieses Verfahrens sind für eine allgemeine Kosten-Nutzen-Optik in der Veröffentlichung „On the economics of asset management“ [9] beschrieben. Im Folgenden wenden wir diese Grundidee an auf das spezielle Problem der risikobasierten Instandhaltung.

Das Verfahren geht davon aus, dass wir die Kosten für die Instandhaltungsstrategie einer einzelnen Anlage als eine Folge von Teilkosten verstehen. Wir beginnen mit der billigsten Strategie (Strategie 1 in **Abb. 22**) und gehen stückweise weiter zu immer teureren Strategien.

Die minimalen Kosten für die Anlage sind  $C_1$ , diese können ohnehin nicht unterschritten werden. Von der Strategie 1 aus können wir entweder zu Strategie 2 gehen, oder zu Strategie 3, oder zu Strategie 4, usw. (siehe **Abb. 22**). Um den maximalen Effekt für das zusätzlich investierte Geld zu erhalten, sollte man diejenige Option wählen, die am meisten Risiko pro zusätzlich investiertem Franken vernichtet. In **Abb. 22** ist das der Schritt von Strategie 1 zu Strategie 2 (siehe **Abb. 22** (a)). Dieselbe Überlegung führt von Strategie 2 zu Strategie 3 als nächsten Schritt (siehe **Abb. 22** (b)).

Von Strategie 3 aus ist jedoch als nächste Strategie nicht Strategie 4, sondern Strategie 5 zu wählen, denn der Übergang  $3 \rightarrow 5$  vernichtet mehr Risiko pro eingesetztem Franken als der Übergang  $3 \rightarrow 4$ . Das heisst, wenn man sich entscheidet, nicht bei Strategie 3 stehenzubleiben, sondern für die Anlage mehr Geld für die Instandhaltung auszugeben, dann sollte man gleich zu Strategie 5 wechseln.



**Abb. 22** Die Kosten für eine gewählte Portfoliostrategie können als eine Summe von Teilkosten aufgefasst werden, die sich ergeben, wenn man schrittweise von der billigsten Strategie A zu immer teureren Strategien voranschreitet. In jedem Schritt wählt man diejenige Option aus, die für den nächsten Schritt die maximale Risikoreduktion pro eingesetztem Zusatzfranken ergibt.

(a) Wir beginnen mit der billigsten Strategie 1. Die effektivste Zusatzinvestition führt uns zu Strategie 2.

(b) im nächsten Schritt ist die effektivste Investition der Übergang zu Strategie 3.

(c) Der Übergang von Strategie 3 zu Strategie 4 ist weniger effektiv als der direkte Übergang zu Strategie 5. Deshalb wird Strategie 4 ausgelassen.

Auf diese Weise erhält man eine Untermenge von Strategien der Pareto-Front, die sich dadurch auszeichnet, dass in jedem Teilschritt das eingesetzte Geld optimal verwendet wird (das heißt so, dass pro eingesetztem Franken am meisten Risiko vernichtet wird).

Diese Untermenge kann einfach geometrisch beschrieben werden: Sie entspricht genau der konvexen Hülle der Pareto-Front. Vereinfacht gesprochen verbindet man dazu die

Punkte der Pareto-Front mit einer Linie. Falls diese Linie «nach innen ausgebeult» ist, streicht man den entsprechenden Punkt (das wäre die Strategie 4 in **Abb. 22**). Damit erhält man eine Folge von Strategien, die dadurch gekennzeichnet ist, dass ihre Verbindungslinie konvex ist, das heisst nach links gekrümmt.

Das Verhältnis von Risikoreduktion zu Kostenerhöhung für diese Teilschritte wurde in der Asset-Management-Literatur schon beschrieben und wird dort als «Marginal Cost Effectiveness» (MCE) bezeichnet (siehe [10]):

$$(0.43) \quad MCE_k = \frac{\Delta R_k - \Delta R_{k+1}}{C_{k+1} - C_k}$$

Die Marginal Cost Effectiveness sagt also, wie effektiv das zusätzliche Geld eingesetzt werden kann. Aufgrund des Konstruktionsverfahrens sinkt die Effektivität von Schritt zu Schritt, das heisst, mit dem ersten Teilschritt kann man am meisten Risiko pro eingesetztem Franken vernichten. Je mehr Geld man schon ausgegeben hat für eine Anlage, desto weniger zusätzliche Risikovernichtung kann man durch noch mehr Mitteleinsatz erzielen.

## 6.1.2 Marginaltheorie und Equimarginalprinzip

Das Phänomen, dass mit immer grösserem zusätzlichem Mitteleinsatz immer weniger zusätzlicher Nutzen erzeugt wird, ist aus vielen Bereichen bekannt. Die klassische 80-20-Regel (Pareto-Prinzip<sup>6</sup>) formuliert das Erfahrungswissen, dass 80% der Ergebnisse mit 20% des Aufwandes erzielt werden können. Ein bisschen detaillierter sagt diese Regel, dass anfänglich der Gewinn, der mit einer Aufwandseinheit erzielt werden kann, gross ist. Je mehr Aufwand man schon betrieben hat, desto kleiner ist der zusätzliche Gewinn, den man durch noch mehr Aufwand erzielen kann.

Natürlich ist das kein Gesetz im Sinne einer naturwissenschaftlichen Tatsache. Dennoch gibt es viele Situationen, in denen wir eine solche Abhängigkeit zwischen Einsatz von Mitteln (Aufwand) und Ertrag haben. Grosse Popularität hat dieses Prinzip in der Volkswirtschaft und der Wohlfahrtsökonomik erhalten, deren Grundlagen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelt wurden. Eine zentrale Person dieser Entwicklung war der deutsche Volkswirt Hermann Heinrich Gossen (1810–1858), der die bekannten «Gossenschen Gesetze» formuliert hat, die noch heute für viele makro- und mikroökonomischen Modelle grundlegend sind. Das im Folgenden beschriebene Verfahren basiert auf der Anwendung dieser ökonomischen Modelle.

Das erste Gossensche Gesetz (auch Gesetz vom abnehmenden Grenznutzen genannt) lautet, dass der Konsum eines Gutes mit zunehmender Menge einen immer geringeren Zusatznutzen (Grenznutzen) stiftet. Das bedeutet mit anderen Worten, dass der Grenznutzen von ausgegebenem Geld sinkt, je mehr man schon für das gleiche Gut ausgegeben hat. In der ökonomischen Literatur wird dieses Gesetz in der Regel als ein Axiom verwendet, das heisst man geht von seiner Gültigkeit aus. In unserem Fall ist dieses Gesetz per Konstruktion erfüllt, denn die konvexe Hülle der Pareto-Front von Instandhaltungsstrategien hat genau diese Eigenschaft.

Eine klassische ökonomische Entscheidungssituation besteht darin, dass man eine bestimmte Menge Geld hat, und dieses Geld für verschiedene Güter ausgeben kann. Die Abhängigkeit zwischen eingesetztem Geld und erzieltm Nutzen kann für jedes Gut unterschiedlich sein, aber für jedes Gut hat man einen abnehmenden Grenznutzen. Die Aufgabe besteht darin, das Geld so auszugeben, dass man für die Gesamtmenge des Geldes den maximalen Nutzen erhält. Das zweite Gossensche Gesetz (auch Equimarginalprinzip genannt) sagt nun, dass diese optimale Geldverteilung genau dann gegeben ist, wenn der Grenznutzen für jedes Gut gleich gross ist.

<sup>6</sup> Das Pareto-Prinzip hat nichts mit der Pareto-Front zu tun, hat seine Namensgebung aber von der gleichen Person Vilfredo Pareto (1848–1923), einem italienischen Ingenieur, Ökonom und Soziologe.

Die Anwendung dieses zweiten Gossenschen Gesetzes auf die Menge der betrachteten Anlagenstrategien erlaubt uns die einfache Berechnung der optimalen Portfoliostrategie.

Man kann das Equimarginalprinzip streng mathematisch beweisen für den Fall von differenzierbaren Nutzenfunktionen, die dem ersten Gossenschen Gesetz genügen. In betrachteten Fall der risikobasierten Instandhaltung lässt sich dieses Prinzip folgendermassen formulieren:

Gegeben N Anlagen (durchnummeriert mit  $k=1, \dots, N$ ) und für jede Anlage ein Kontinuum von Instandhaltungsstrategien, das durch eine differenzierbare Funktion  $\Delta R_k(C)$  charakterisiert sind. Das heisst, für jeden Betrag C von jährlichen Instandhaltungskosten gibt es für die Anlage k eine Instandhaltungsstrategie, die eine bestimmte Risikoreduktion  $\Delta R_k$  produziert. Diese Funktion  $\Delta R_k(C)$  ist für jede Anlage konvex, das heisst ihre Ableitung nimmt kontinuierlich ab mit C – je höher C ist, desto flacher ist die Kurve.

Die oben dargestellte Folge von Instandhaltungspolitiken mit ihrer stetig abnehmenden Marginal Cost Effectiveness ist eine diskrete Version einer solchen Kurve.

Das Equimarginalprinzip besagt nun, dass die optimale Mittelverwendung eines begrenzten Budgets B dadurch charakterisiert ist, dass die Ableitung der Funktionen  $\Delta R_k(C)$  für jede Anlage gleich gross ist. Das heisst: Die Aufteilung des Gesamtbudgets B auf die verschiedenen Anlagen  $k=1 \dots N$  in Form der Zuweisung eines Teilbudgets von  $C_k$  für Anlage k ist genau dann optimal, wenn gilt

$$(0.44) \quad \left. \frac{d\Delta R_k(C)}{dC} \right|_{C=C_k} = g \quad \text{für alle } k=1, \dots, N$$

Dabei ist g eine Zahl, die für alle Anlagen gleich gross ist.

Beweisskizze: Wenn man eine Budgetaufteilung hätte, die für zwei Anlagen i und j zwei verschiedene Ableitungen hätte, etwa

$$(0.45) \quad \left. \frac{d\Delta R_i(C)}{dC} \right|_{C=C_i} > \left. \frac{d\Delta R_j(C)}{dC} \right|_{C=C_j}$$

dann könnte man etwas Geld umverteilen von Anlage j zu Anlage i. Bei j würde das Risiko etwas steigen, aber bei Anlage i würde das Risiko um einen grösseren Betrag sinken. Die Umverteilung hätte also den Effekt, dass das Gesamtrisiko sinken würde, wobei aber das Gesamtbudget natürlich gleichbleiben würde. Deshalb kann die ursprüngliche Aufteilung nicht optimal gewesen sein.

Die optimale Budgetaufteilung kann einfach konstruiert werden mittels folgendem Algorithmus: Man beginnt damit, dass man für jede Anlage die billigste Strategie auswählt. Dies definiert das minimal mögliche Budget. Normalerweise wird das zur Verfügung stehende Budget höher sein als das minimale Budget. Nun erhöhen wir in kleinen Schritten das Gesamtbudget, wobei wir den Zuwachs des Gesamtbudgets so auf die Anlagen aufteilen, dass nach der Verteilung die Ableitung der Kurve  $\Delta R_k(C)$  für jede Anlage gleich gross ist. Dies machen wir solange, bis wir das Sollbudget erreicht haben. Damit ist die optimale Budgetverteilung erreicht.

Auch wenn wir im Falle von Instandhaltungsstrategien nicht ein Kontinuum von Strategien haben, sondern eine Menge von diskreten Optionen, so haben wir doch oft eine sehr dichte Menge solcher Optionen. Wenn wir also das Equimarginalprinzip anwenden, erhalten wir eine Aufteilung des Gesamtbudgets, das nahe am Optimum liegen wird.

### 6.1.3 Anwendung des Equimarginalprinzip-Verfahrens

Das Verfahren, um für ein Portfolio von N Anlagen die optimale Portfolio-Strategie bei gegebenem Gesamtbudget B zu finden, baut auf dem Equimarginalprinzip auf und funktioniert folgendermassen:

1. Initialisierung: Wähle für jede Anlage die billigste Instandhaltungsstrategie aus und berechne das dazu notwendige Minimalbudget. Setze die Variable «aktuelles Gesamtbudget» auf dieses Minimalbudget.
2. Bestimme nun für jede Anlage diejenige Investitionsoption, die für das investierte Geld die maximale Nutzenreduktion erzielt. Diese entspricht dem Übergang von der aktuellen Instandhaltungsstrategie zu einer teureren Instandhaltungsstrategie auf der konvexen Hülle der Pareto-Front.
3. Bestimme nun im Portfolio diejenige Anlage, bei der die Marginal Cost Effectiveness maximal ist, das heisst wo pro eingesetztem Franken das meiste Risiko vernichtet wird. Erhöhe bei dieser Anlage das Teilbudget um den dazu notwendigen Betrag und ändere deren Instandhaltungsstrategie entsprechend. Erhöhe die Variable «aktuelles Gesamtbudget» um diesen Betrag.
4. Falls das aktuelle Gesamtbudget kleiner ist als das vorgegebene Gesamtbudget B, springe zu Schritt 2.
5. Ansonsten: Abbruch

Mit diesem Algorithmus lässt sich nur in wenigen Iterationen eine Budgetaufteilung berechnen, die nahe an der optimalen Budgetaufteilung ist. Zugleich erhält man auch die dazugehörige Instandhaltungsstrategie für die Einzelanlagen mitgeliefert, so dass man am Ende eine Portfoliostrategie hat, die das minimale Risiko erzeugt, das mit dem eingesetzten Budget überhaupt erzielt werden kann.

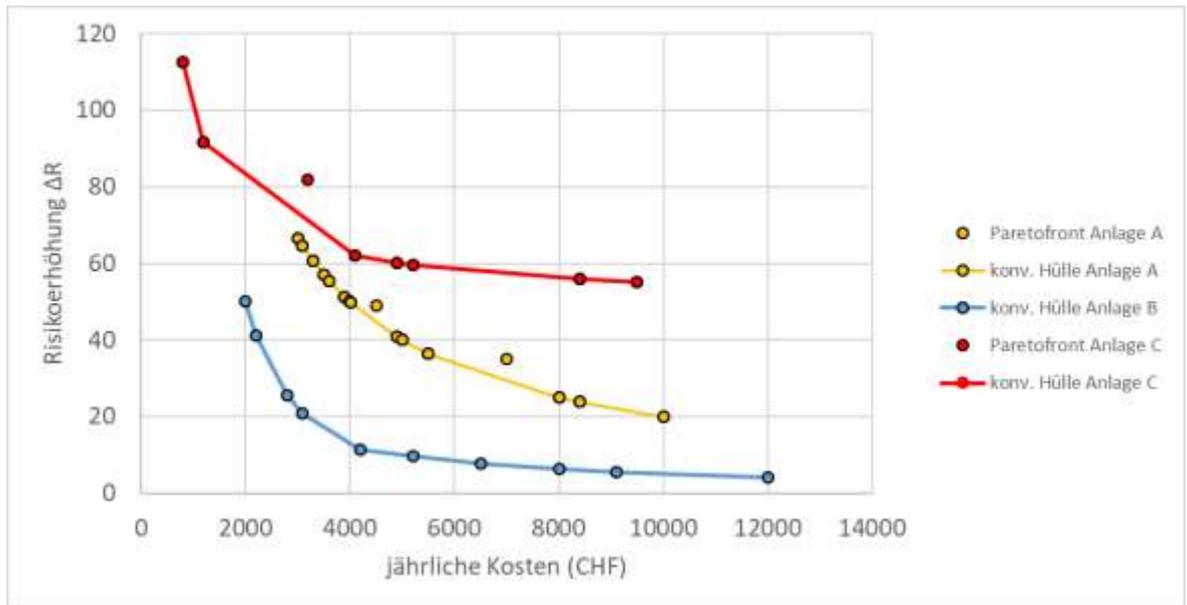
Bemerkung: Dieses Verfahren liefert nicht die mathematisch optimale Lösung – es handelt sich immer noch um ein möglichst einfaches Näherungsverfahren. Beispielsweise achtet das Verfahren nicht darauf, das Budget punktgenau auszuschöpfen, sondern bricht dann ab, wenn das Budget überschritten ist.

Man kann zeigen, dass es für die Bestimmung des wirklich optimalen Punktes zwingend die Methoden der ganzzahligen Optimierung benötigt, man also das oben angesprochene NP-harte Optimierungsproblem lösen muss, was heute technisch zwar möglich ist, für die Praxis jedoch bei weitem zu aufwendig ist. Die hier vorgestellte Näherungslösung liefert jedoch in realistischen Fällen ein Ergebnis, das sehr nahe am Optimum liegt. Da auch die Modelle selber in der Regel Unsicherheiten enthalten, macht es keinen Sinn, viel Aufwand zu treiben, um das theoretisch (d.h. unter Annahme von fehlerfreien Modellen) «echte» Optimum zu berechnen, denn das Ergebnis würde dadurch nicht wirklich besser.

Aus diesem Grund ist das hier vorgestellte einfache Verfahren für die Praxis ausreichend und besser geeignet als die Anwendung der kombinatorischen Optimierung.

### 6.1.4 Anwendungsbeispiel

Wir betrachten ein hypothetisches Portfolio aus drei Anlagen A, B und C. Die Pareto-Fronten der jeweiligen Instandhaltungsstrategien und ihre konvexe Hülle sind in **Abb. 23** dargestellt. Bei den Anlagen A und C gibt es jeweils Instandhaltungsstrategien, die zwar auf der Pareto-Front liegen, aber nicht auf der konvexen Hülle der Pareto-Front, die durch eine Linie gekennzeichnet ist.



**Abb. 23** Kosten-Risiko-Diagramm für drei Anlagen A, B und C. Dargestellt sind nur die Instandhaltungsstrategien, die auf der Pareto-Front liegen. Die Linien verbinden die Punkte der konvexen Hülle der Pareto-Front. Für Anlage A und Anlage C gibt es Instandhaltung

Die Daten der Anlagen sind in den folgenden Tabellen dargestellt:

Paretofront Anlage A		konv. Hülle Anlage A		
Kosten	Risiko	Kosten	Risiko	MCE
3000	66.667	3000	66.6667	
3100	64.516	3100	64.5161	0.02150538
3300	60.606	3300	60.6061	0.01955034
3500	57.143	3500	57.1429	0.01731602
3600	55.556	3600	55.5556	0.01587302
3900	51.282	3900	51.2821	0.01424501
4000	50	4000	50	0.01282051
4010	49.875	4010	49.8753	0.01246883
4500	49	4900	40.8163	0.01017864
4900	40.816	5000	40	0.00816327
5000	40	5500	36.3636	0.00727273
5500	36.364	8000	25	0.00454545
7000	35	8400	23.8095	0.00297619
8000	25	10000	20	0.00238095
8400	23.81			
10000	20			

Paretofront Anlage B		konv. Hülle Anlage B		
Kosten	Risiko	Kosten	Risiko	MCE
2000	50	2000	50	
2200	41.322314	2200	41.322314	0.04338843
2800	25.5102041	2800	25.5102041	0.02635352
3100	20.8116545	3100	20.8116545	0.01566183
4200	11.3378685	4200	11.3378685	0.00861253
5200	9.61538462	5200	9.61538462	0.00172248
6500	7.69230769	6500	7.69230769	0.00147929
8000	6.25	8000	6.25	0.00096154
9100	5.49450549	9100	5.49450549	0.00068681
12000	4.16666667	12000	4.16666667	0.00045788

Paretofront Anlage C		konv. Hülle Anlage C		
Kosten	Risiko	Kosten	Risiko	MCE
800	112.5	800	112.5	
1200	91.6666667	1200	91.6666667	0.05208333
3200	82	4100	62.195122	0.0101626
4100	62.195122	4900	60.2040816	0.0024888
4900	60.2040816	5200	59.6153846	0.00196232
5200	59.6153846	8400	55.952381	0.00114469
8400	55.952381	9500	55.2631579	0.00062657
9500	55.2631579			

Das minimale Gesamtbudget B für diese Anlagen ist  $B = 3'000 + 2'000 + 800 = 5'800$  CHF. Falls nur dieses Budget zur Verfügung steht, muss für jede Anlage die billigste Instandhaltungsstrategie ausgewählt werden. Die Risikoerhöhung verglichen mit dem Idealfall von perfekt funktionierenden Anlagen beträgt dann

$$(0.46) \quad \Delta R = 66.66 + 50 + 112.5 = 229.16$$

Wenn wir nun den oben beschriebenen Algorithmus ablaufen lassen, können wir für verschiedene Gesamtbudgets die optimale Aufteilung bestimmen und das sich für dieses Budget ergebende Gesamtrisiko. In der folgenden Tabelle sind verschiedene Werte des Gesamtbudgets dargestellt, wobei der erste Wert das minimal mögliche Budget ist (5'800 CHF), der letzte Wert das maximal mögliche Budget (31'500 CHF). Gleichzeitig ist die sich ergebende Budgetverteilung auf die verschiedenen Anlagen und die jeweiligen Risikoanteile ausgewiesen:

Budget	5800	6200	6400	12100	19100	31500
Kosten A	3000	3000	3000	4900	10000	10000
Kosten B	2000	2000	2200	3100	4200	12000
Kosten C	800	1200	1200	4100	4900	9500
<b>Gesamtkosten</b>	<b>5800</b>	<b>6200</b>	<b>6400</b>	<b>12100</b>	<b>19100</b>	<b>31500</b>
Risiko A	66.6	66.6	66.6	40.8	20	20
Risiko B	50	50	41.3	20.8	11.3	4.16
Risiko C	112.5	91.6	91.6	62.2	60.2	55.26
<b>Gesamtrisiko</b>	<b>229.1</b>	<b>208.2</b>	<b>199.5</b>	<b>123.8</b>	<b>91.5</b>	<b>79.42</b>

Es ist an den Ergebnissen zu sehen, dass die Budgetaufteilung zwischen den verschiedenen Anlagen des Portfolios sich mit dem verfügbaren Budget ständig verändert.

Beispielsweise wird das zusätzliche Budget von 1'400 CHF bei einer Budgeterhöhung von 5'800 CHF auf 6'200 CHF für die Anlage C verwendet, während die anderen Anlagen leer ausgehen. Dies liegt daran, dass die Ableitung der Kosten-Risiko-Kurve am Anfang bei Anlage C am grössten ist. Das heisst, Investition von zusätzlichem Geld bringt zunächst den meisten Effekt bei Anlage C. Konsequenterweise wird das Geld also zuerst einmal eingesetzt, um das Risiko bei Anlage C zu senken. Für die 1'400 CHF erhält man eine Risikoreduktion von  $229.1 - 208.2 = 20.9$  Risikoeinheiten. Bei keiner anderen Anlage könnte man für das gleiche Geld eine gleich grosse Risikoreduktion erzielen.

Erhöht man das Budget weiter, kommt als nächste Anlage die Anlage B an die Reihe, bei der man durch eine Erhöhung der Kosten um 200 CHF das Risiko um 8.7 Risikoeinheiten senken kann. Die Reduktion des Risikos pro eingesetztem Franken (Marginal Cost Effectiveness MCE) ist hier kleiner als im ersten Schritt, aber bei keiner anderen Anlage kann man in diesem zweiten Schritt mehr Risiko pro Franken vernichten. Deshalb wird das Zusatzbudget für die Verbesserung der Instandhaltung von Anlage B verwendet.

Bei einem Budget von 19'100 CHF wird für Anlage A die teuerste Strategie gewählt, während der Geldeinsatz bei den anderen Anlagen kleiner ist. Dies liegt daran, dass Anlage A über den ganzen Bereich eine relative grosse Ableitung hat, so dass im mittleren Budgetbereich mit Priorität in Anlage A investiert wird, weil dort durch Zusatzgeld immer noch substantiell Risiko reduziert werden kann, während das bei Anlage B und C (nach den anfänglichen grossen Gewinnen im Risiko) nicht mehr der Fall ist.

Setzen wir als Grenzfall das maximale Budget von 31'500 CHF ein, ergibt sich zwangsläufig, dass wir für alle Anlagen die teuerste Instandhaltungsstrategie wählen müssen.

Es sei darauf hingewiesen, dass der beschriebene Ansatz nicht nur die optimale Geldaufteilung zwischen den Anlagen liefert, sondern bei der Berechnung gleichzeitig bestimmt, mit welcher Instandhaltungsstrategie jede Anlage betrieben werden muss. So kann also mit dem Algorithmus auf eine einfache Art und Weise die optimale Portfoliostrategie abgeleitet werden, unter der Voraussetzung, dass das Globalbudget B vorgegeben ist.

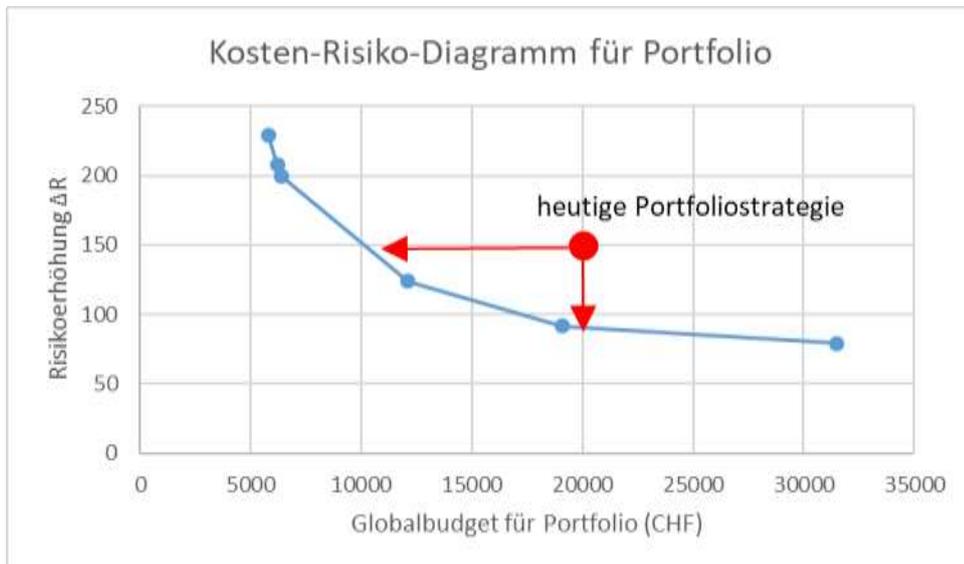
## 6.2 Optimale Portfolio-Strategie ohne Gesamtbudget

Im letzten Abschnitt haben wir gesehen, wie man eine optimale Portfolio-Strategie bestimmt, wenn das Gesamtbudget vorgegeben ist. Dies ist zunächst für sich genommen ein wichtiges Problem, denn wenn man sich die Aufgabe stellt, die Instandhaltungsstrategien zum Beispiel eines Tunnels zu optimieren, dann wird man im ersten Schritt von einem gegebenen Budget ausgehen (in der Regel das bisherige Budget) und sich fragen, ob und wie man das Geld besser einsetzen könnte. Diese Frage wird mit dem im letzten Abschnitt beschriebenen Verfahren gelöst. In den meisten Fällen wird man durch diese Optimierung für den gleichen Mitteleinsatz ein niedrigeres Risiko erzielen.

Das Sparpotential durch optimierten Mitteleinsatz in der Instandhaltung kann dann bestimmt werden, indem man das Budget schrittweise soweit senkt, dass wieder der ursprüngliche Risikolevel erreicht wird. Dann hat man die optimale Portfoliostrategie gefunden, die das ursprüngliche Risiko mit dem kleinsten Mitteleinsatz erzeugt.

Etwas allgemeiner kann man beide Fragen in einem Schritt lösen, indem man für verschiedene Budgetwerte jeweils mit dem im letzten Abschnitt beschriebenen Verfahren die optimale Portfoliostrategie bestimmt, und damit das Gesamtrisiko des Portfolios für das jeweils eingesetzte Geld ausrechnet. Die Menge dieser so berechneten Punkte liefert wieder ein Kosten-Risiko-Diagramm, nun aber auf einer höheren Ebene: Es ist eine Darstellung des Gesamtrisikos des Portfolios in Abhängigkeit der eingesetzten Mittel für die Instandhaltung, unter der Annahme, dass diese Mittel optimal eingesetzt werden.

In **Abb. 24** ist diese Kurve schematisch dargestellt, wobei nur die Punkte verwendet sind, die in der Budgettabelle des letzten Abschnitts berechnet worden sind. Es sind natürlich viel mehr Möglichkeiten für das Gesamtbudget vorhanden, die alle einfach berechnet werden könnten, worauf hier aus Gründen der Nachvollziehbarkeit jedoch verzichtet wurde.



**Abb. 24** Kosten-Risiko-Diagramm des Gesamtportfolio.

In dieser Abbildung kann die grundsätzliche Abhängigkeit des Risikos vom eingesetzten Instandhaltungsbudget gesehen werden. Dies ist eine Eigenschaft des Portfolios. Aufgrund der Konstruktion dieser Kurve kann man sagen, dass es nicht möglich ist, mit einem ausgewählten Gesamtbudget ein kleineres Risiko zu erzeugen als das in der Kurve dargestellte. Umgekehrt ist es natürlich durch die Auswahl von suboptimalen Instandhaltungsstrategien an den Anlagen durchaus möglich, das Geld so einzusetzen, dass das resultierende Gesamtrisiko viel grösser ist als das in der Kurve ausgewiesene.

Nehmen wir an, die heutige Portfoliostrategie sei durch Kosten von 20'000 CHF charakterisiert und produziert ein Risiko von 150 Risikoeinheiten. Dann ist durch eine optimierte Portfoliostrategie entweder eine Risikominderung auf den Wert 90 erreichbar, oder eine Kostenreduktion um ca. 50% auf den Wert 10'000 CHF.

Gleichzeitig liefert diese Grafik jedoch auch eine Aussage darüber, wie hoch das Budget grundsätzlich zu wählen ist. Durch die Visualisierung des Risikos in Abhängigkeit vom eingesetzten Geld kann man in quantitativer Weise sehen, wieviel das Risiko durch zusätzlichen Mitteleinsatz gesenkt werden kann, oder wie stark das Risiko steigen wird, wenn Mittel gekürzt werden (immer unter der Annahme der jeweils optimalen Portfoliostrategie).

*Beispiel:* Aus einem Kosten-Risiko-Diagramm wie in **Abb. 24** lässt sich herauslesen, dass mit einem Budget von 20'000 CHF das Risiko fast auf seinen minimalen Wert reduziert werden kann. Eine weitere Erhöhung auf z.B. 30'000 CHF würde das Risiko nicht mehr wahrnehmbar verringern.

Umgekehrt würde eine Budgetkürzung von 20'000 CHF auf z.B. 10'000 CHF das Risiko um ca. 66% erhöhen (von 90 auf 150 Risikoeinheiten).

Auch wenn also die Festsetzung eines Budgets für das Gesamtportfolio immer ein politischer Entscheidung ist und man um den üblichen Trade-off zwischen Kosten und Risikominderung nicht herumkommt, kann mit einer solchen Portfolio-Darstellung doch die Diskussion auf einer sachlichen und nachvollziehbaren Grundlage geführt werden.

## 7 Pilotanwendung der Methodik

In Kapitel 5 und 6 wurde die Methodik bzw. das Vorgehen beschrieben, um die Kosten und Risiken von einzelnen Anlagen zu Berechnen und optimale Instandhaltungsstrategien zu finden. Um die Machbarkeit zu prüfen haben wir dieses Vorgehen für verschiedene Anlagen angewendet und eine Portfolio-Optimierung über diese Anlagen durchgeführt. In diesem Kapitel werden die wichtigsten Resultate und Erkenntnisse aufgeführt.

Für folgende Tunnelobjekte und Anlagen wurde die Methodik angewendet. Detaillierte Informationen zur Anwendung sind in separaten Anwendungsberichten dokumentiert, dem Forschungsbericht jedoch nicht beigelegt<sup>7</sup>.

**Tab. 4** Pilotanwendung der Methodik

Anlage	Tunnelobjekt
Adaptationsbeleuchtung	Tunnel Allmend
Lüftung	Tunnel Allmend
VM-System	Tunnel Allmend
Brandmeldeanlage	Tunnel Allmend
Notstromanlage (USV)	Tunnel Giessbach

### 7.1 Adaptationsbeleuchtung

#### 7.1.1 Instandhaltungstätigkeiten

Die folgenden Instandhaltungstätigkeiten werden seitens Betreiber an der Adaptationsbeleuchtung des Tunnels Allmend durchgeführt:

**Tab. 5** Instandhaltungstätigkeiten Adaptationsbeleuchtung

Nr.	Tätigkeit	Art	Intervall	Kosten pro Durchführung
T1	Zustandskontrolle/Ersatz Leuchten, Aufhängungen, Abdichtungen, Gläser, Anschlüsse	Zustandsbasiert	12 Monate	0 CHF (in Kosten von T3 enthalten)
T2	Kontrolle der Störungsmeldungen	Reaktiv	-	ca. 320 CHF
T3	Reinigung der Leuchten	Präventiv	12 Monate	ca. 2'500 CHF
T4	Ersatz defekter Leuchtmittel	Zustandsbasiert	6 Monate	ca. 350 CHF (ca. 10 Stk. pro Jahr à 70 CHF)

#### 7.1.2 Fehlermodi und Modellierungsentscheidung

Aufgrund des Interviews mit dem Betreiber wurden basierend auf den Instandhaltungstätigkeiten folgende Fehlermodi und Auswirkungen identifiziert:

**Tab. 6** Fehlermodi und Auswirkungen Adaptationsbeleuchtung

Nr.	Fehlermodus / Ursache	Auswirkung	Risiko	Kosten
T1	Abnutzung/Alterung Aufhängung, Dichtungen, Gläser, Anschlüsse	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herunterfallen der Leuchte</li> <li>Abnahme Lebensdauer /</li> </ul>	✓	✓

<sup>7</sup> In Rücksprache mit der Begleitungskommission werden die Anwendungsberichte nicht öffentlich publiziert.

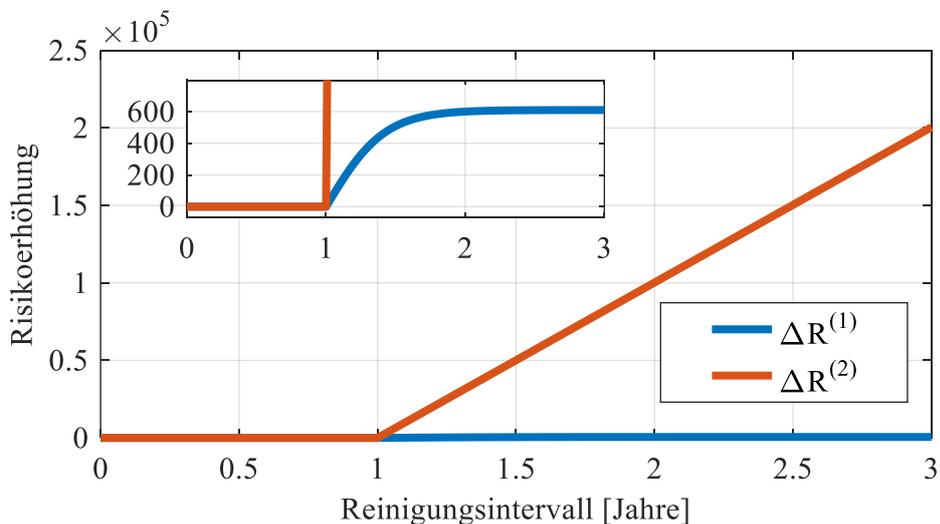
		mehr Ausfälle Leuchtmittel	
T2	Störungsmeldung	• Eruiierung Störungsursache	✓
T3	Verschmutzung	• Erhöhter Stromverbrauch • Abnahme der Helligkeit • Abnahme Lebensdauer / mehr Ausfälle Leuchtmittel	✓ ✓ ✓
T4	Defekt Leuchtmittel	• Abnahme der Helligkeit	✓

Die Risiken- und Kostenberechnung wurden nur für die Fehlermodi von T1 „Zustandskontrolle/Ersatz Leuchten, Aufhängung, Abdichtungen, Gläser, Anschlüsse“ und T3 „Reinigung der Leuchten“ ausgeführt. Tätigkeit T2 „Kontrolle der Störungsmeldungen“ und T4 „Ersatz defekter Leuchtmittel“ sind nicht berücksichtigt worden, da kein Optimierungspotenzial identifiziert werden konnte.

### 7.1.3 Resultate Kosten- und Risikobetrachtung

Die berechnete Risikoerhöhung setzt sich aus den zwei Risiken  $R^{(1)}$  (Unfallrisiko) und  $R^{(2)}$  (Herunterfallen Leuchte) zusammen, die einzelnen Risikobeiträge sind in der **Abb. 25** dargestellt. Hauptsächlich wird die Gesamtrisikoerhöhung durch das Risiko  $R^{(2)}$  bestimmt, wobei beide Risiken bei einem Instandhaltungsintervall von unter einem Jahr praktisch nicht vorhanden sind. Falls das Reinigungsintervall länger als 1 Jahr ist, wird der Risikobeitrag  $R^{(2)}$  viel höher als  $R^{(1)}$ , weil hauptsächlich der Image- und politischer Schaden für  $R^{(2)}$  höher eingeschätzt wurde.

Da der Unterschied der beiden Risikobeiträge sehr gross wird, ist in der **Abb. 25** eine zusätzliche Grafik dargestellt. Die Grafik zeigt eine vergrößerte Darstellung der Risikobeiträge.



**Abb. 25** Zusammensetzung der Risikoerhöhung

In der **Abb. 26** ist das Risiko-Kosten-Diagramm dargestellt. Es ist ersichtlich, wie hoch die Risiken und Kosten für eine Strategie (Reinigungsintervall) ausfallen. Längere Intervalle als 1 Jahr führen zu höheren Kosten als auch zu höherem Risiko. Ein kürzeres Intervall bedeutet höhere Kosten und das gleiche Risiko. Deshalb ist die einzige wirtschaftliche Strategie für den Tunnel Allmend diejenige mit einem Intervall von 1 Jahr. Diese entspricht der aktuellen Strategie des Betreibers.

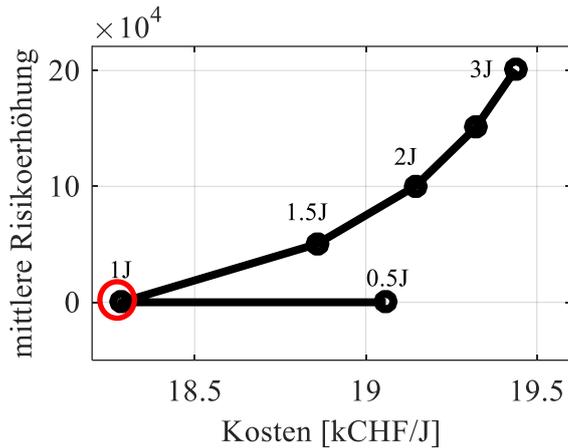


Abb. 26 Risiko in Abhängigkeit zu den Kosten

## 7.2 Lüftung

### 7.2.1 Instandhaltungstätigkeiten

Die folgenden Instandhaltungstätigkeiten werden seitens Betreiber an der Lüftungsanlage des Tunnels Allmend durchgeführt:

Tab. 7 Instandhaltungstätigkeiten Lüftung

Nr.	Tätigkeit	Art	Intervall	Kosten pro Durchführung
T1	Sicht-, Zustands- und Funktionskontrolle, Reinigung Strahlventilatoren	Präventiv	12 Monate	ca. 1'800 CHF
T2	Austausch Backup Batterie	Präventiv	72 Monate	ca. 100 CHF
T3	Funktionskontrolle Lüftungssteuerung	Präventiv	6 Monate	ca. 200 CHF
T4	Prüfung Sichttrübungsmessung	Präventiv	6 Monate	ca. 450 CHF
T5	Kontrolle Messwerte Sichttrübungsmessung	Präventiv	3 Monate	ca. 450 CHF
T6	Reinigung & Kontrolle Strömungsmessung	Präventiv	12 Monate	ca. 300 CHF
T7	Kontrolle Messwerte Strömungsmessung	Präventiv	3 Monate	ca. 200 CHF

### 7.2.2 Fehlermodi und Modellierungsentscheidung

Aufgrund des Interviews mit dem Betreiber wurden basierend auf den Instandhaltungstätigkeiten folgende Fehlermodi und Auswirkungen identifiziert:

Tab. 8 Fehlermodi und Auswirkungen Lüftung

Nr.	Fehlermodus / Ursache	Auswirkung	Risiko	Kosten
T1a	Verschmutzung Strahlventilator	Verkürzung der Lebensdauer • Höhere Lebenszykluskosten		✓
T1b	Abnutzung/Alterung Aufhängung, Befestigung Komponenten Strahlventilator	Herunterfallen Strahlventilator oder Teile davon • Risiko für Verkehrsteilnehmer	✓	
T1c	Früherkennung Defekt Strahlventilator	Mehr Ausfälle/Störungsmeldung • Höhere Nichtverfügbarkeit • Höhere Entstörungskosten	✓	✓
T2	Stromausfall	Absturz der Steuerung bzw. Programm • Höhere Nichtverfügbarkeit	✓	✓

			• Höhere Entstörungskosten		
T3	Früherkennung Defekt Steuerung	Ausfall Steuerung	• Höhere Nichtverfügbarkeit	✓	
T4	Auf die Eruiierung der Fehlermodi der Tätigkeit T4 „Prüfung Sichttrübungsmessung“ wurde verzichtet, da eine Änderung des Instandhaltungsintervalls nicht sinnvoll erscheint.				
T5	Falsche Messwerte	Zu hohe Messwerte	• Höhere Betriebskosten, weil Lüftung unnötig eingeschaltet wird	✓	✓
			• Risiko für Tunnelsperrung aufgrund Reflexauslösung auf Signalisation		
		Zu tiefe Messwerte	• Höhere Nichtverfügbarkeit	✓	
T6	Falsche Messwerte	Falsche Lüftungsregelung	• Ungenügende und längere Entlüftung	✓	✓
T7	Falsche Messwerte	Falsche Lüftungsregelung	• Ungenügende und längere Entlüftung	✓	✓

Die Risiken- und Kostenberechnung wurden nur für die Fehlermodi von T1 „Sicht-, Zustands- und Funktionskontrolle, Reinigung Strahlventilatoren“, T3 „Funktionskontrolle Lüftungssteuerung“, T5 „Kontrolle Messwerte Sichttrübungsmessung“ und T7 „Kontrolle Messwerte Strömungsmessung“ ausgeführt. Alle anderen Tätigkeiten sind nicht berücksichtigt worden, da kein Optimierungspotenzial identifiziert werden konnte.

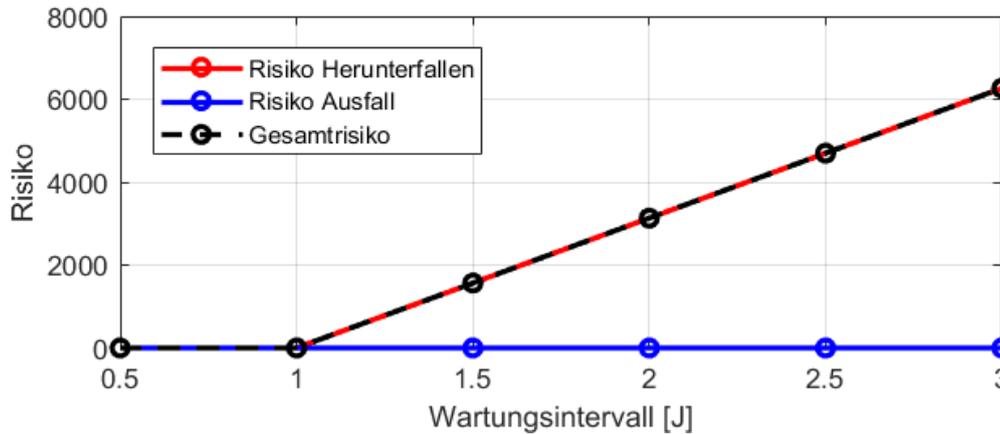
### 7.2.3 Resultate Kosten- und Risikobetrachtung

Folgend sind die Risikodiagramme für die einzelnen Tätigkeiten sowie das Risiko-Kosten-Diagramm über alle Tätigkeiten dargestellt.

#### Risiko Tätigkeit T1 „Sicht-, Zustands- und Funktionskontrolle, Reinigung Strahlventilatoren“

Die Risikoerhöhung, die durch die Tätigkeit T1 reduziert werden kann, ist in der **Abb. 27** dargestellt. Es ist ersichtlich, dass das Risiko aufgrund von herunterfallenden Teilen wesentlich höher ist als das Risiko durch Ausfälle der Ventilatoren. Der Grund dafür ist, dass Ausfälle der Ventilatoren nur dann ein Risiko darstellen, wenn mehrere Ventilatoren gleichzeitig ausfallen. Da dies nur sehr selten passieren kann, ist dieser Risikobeitrag vernachlässigbar im Vergleich zum Risiko durch das Herunterfallen von Teilen.

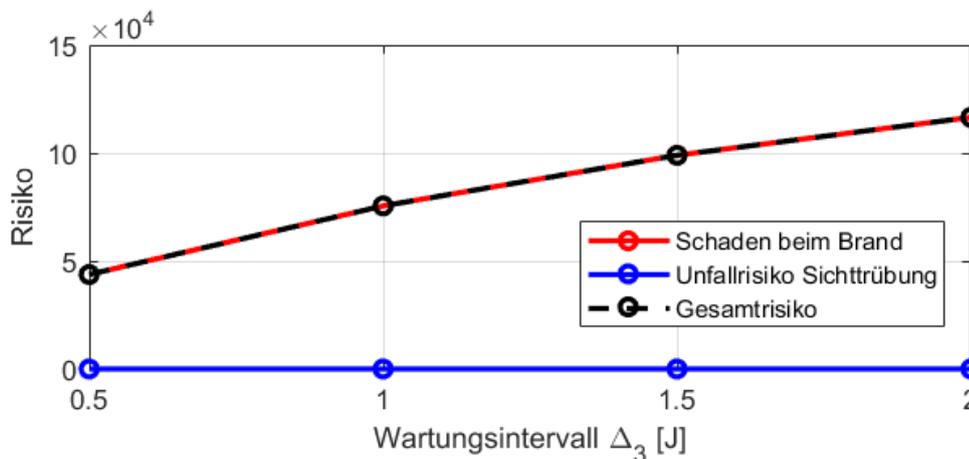
Laut Betreiber ist das Risiko des Herunterfallens von Teilen beim aktuellen Intervall schon minimal und kann durch eine häufigere Durchführung der Tätigkeit nicht weiter reduziert werden.



**Abb. 27** Risikomodell T1 „Sicht-, Zustands- und Funktionskontrolle, Reinigung Strahlventilatoren“. Die Beiträge zur Risikoerhöhung in Abhängigkeit des Wartungsintervalls.

**Risiko Tätigkeit T3 „Funktionskontrolle Lüftungssteuerung“**

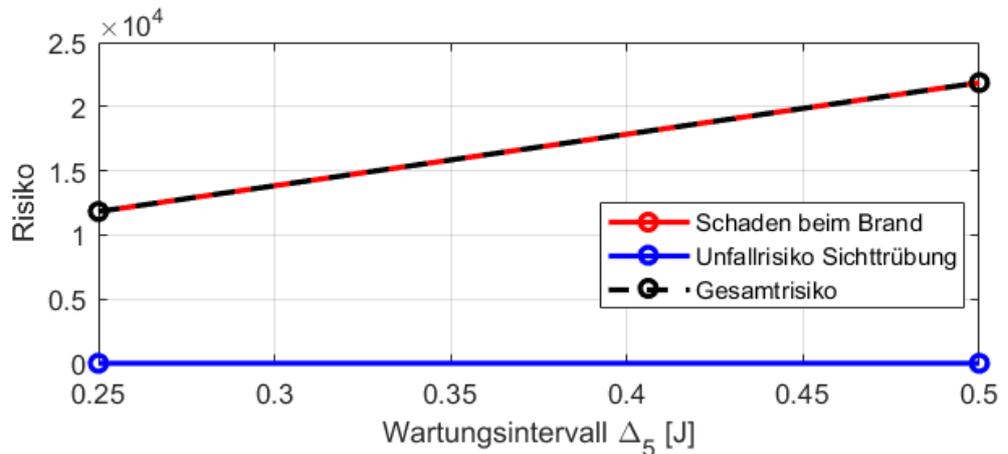
Die Risikoerhöhung, die durch die Tätigkeit T3 reduziert werden kann, ist in der **Abb. 28** dargestellt. Es gibt zwei Beiträge zum Risiko: ein erhöhter Schaden beim Brand und eine Erhöhung der Unfallrate bei Sichttrübung. Der Schaden beim Brand führt zu einem deutlich höheren Risiko als das Risiko bei einer Sichttrübung. Dies kommt daher, dass der Imageschaden bei einer defekten Lüftungssteuerung im Brandfall als sehr hoch eingeschätzt wurde.



**Abb. 28** Risikomodell T3 „Funktionskontrolle Lüftungssteuerung“. Die Beiträge zur Risikoerhöhung in Abhängigkeit des Wartungsintervalls.

**Risiko Tätigkeit T5 „Kontrolle Messwerte Sichttrübungsmessung“**

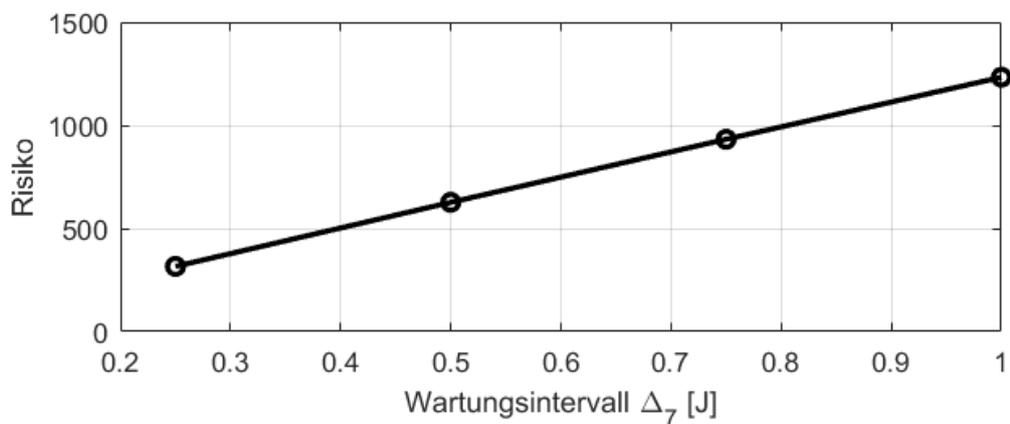
Hier gibt es eine ähnliche Situation wie beim Risiko der Tätigkeit T3. Aus den zwei Risikobeiträgen ist der Schaden beim Brand aufgrund der Abschätzung des Imageschadens bei weitem dominant. Ein Risiko bei einer unnötigen Einschaltung der Lüftung wurde nicht berechnet, da aus dem Interview mit dem Betreiber kein Risiko identifiziert werden konnte.



**Abb. 29** Risikomodell T5 „Kontrolle Messwerte Sichttrübungsmessung“. Die Beiträge zur Risikoerhöhung in Abhängigkeit des Wartungsintervalls.

**Risiko Tätigkeit T7 „Kontrolle Messwerte Strömungsmessung“**

In **Abb. 30** ist die Entwicklung des Risikos in Abhängigkeit des Wartungsintervalls aufgeführt. Umso grösser das Wartungsintervall, desto höher das Risiko, dass falsche Messwerte der Strömungsmessung nicht erkannt werden und bei einem Brandfall die Entlüftung nicht korrekt funktioniert.



**Abb. 30** Risikomodell T7. Die Risikoerhöhung in Abhängigkeit des Wartungsintervalls.

**Risiko-Kosten-Diagramm**

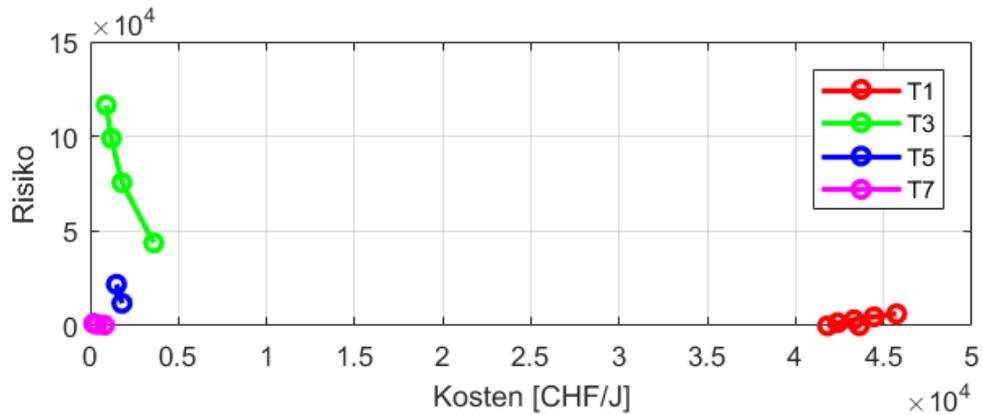
In der **Abb. 31** ist das Risiko-Kosten-Diagramm für alle vier Tätigkeiten der Lüftung dargestellt. Jeder Punkt im Diagramm bezeichnet eine mögliche Instandhaltungsstrategie für die Tätigkeit. In diesem Fall entspricht eine Strategie einem Durchführungsintervall für die Tätigkeit. Für jede Strategie wird die Risikoerhöhung gegen die jährlichen Kosten aufgezeigt.

Auf der Ebene der Anlage Lüftung können wir folgenden Beobachtungen machen:

- Die Strategie für T1 (Kontrolle Strahlventilatoren) kann unabhängig von den anderen Tätigkeiten optimiert werden. Der Grund dafür: es gibt eine Strategie, die sowohl die Kosten als auch das Risiko minimiert (vergl. **Abb. 32**). Diese hat das Durchführungsintervall von einem Jahr.
- Die übrigen drei Tätigkeiten müssen im Rahmen des ganzen Portfolios optimiert werden. Für diese können keine Entscheidungen auf der einzelnen Tätigkeitsebene

getroffen werden. Der Grund dafür: je häufiger eine Tätigkeit durchgeführt wird, desto höher sind die jährlichen Kosten und desto geringer das Risiko.

- **Abb. 31** zeigt alle Tätigkeiten in einem Plot. Es ist ersichtlich, dass das Risiko der Tätigkeit T3 (Funktionskontrolle Lüftungssteuerung) dominant ist. Dies wird bei einer Portfoliooptimierung dazu führen, dass eine wesentliche Risikominimierung durch eine erhöhte Investition in die Tätigkeit T3 erreicht werden kann.



**Abb. 31** Gesamtübersicht Kosten-Risiko Diagramm für alle vier modellierten Tätigkeiten der Lüftung

Für eine genauere Betrachtung sind in der **Abb. 32** die detaillierteren Risiko-Kosten-Diagramme der einzelnen Tätigkeiten abgebildet. Jeder Punkt ist mit dem entsprechenden Wartungsintervall beschriftet.

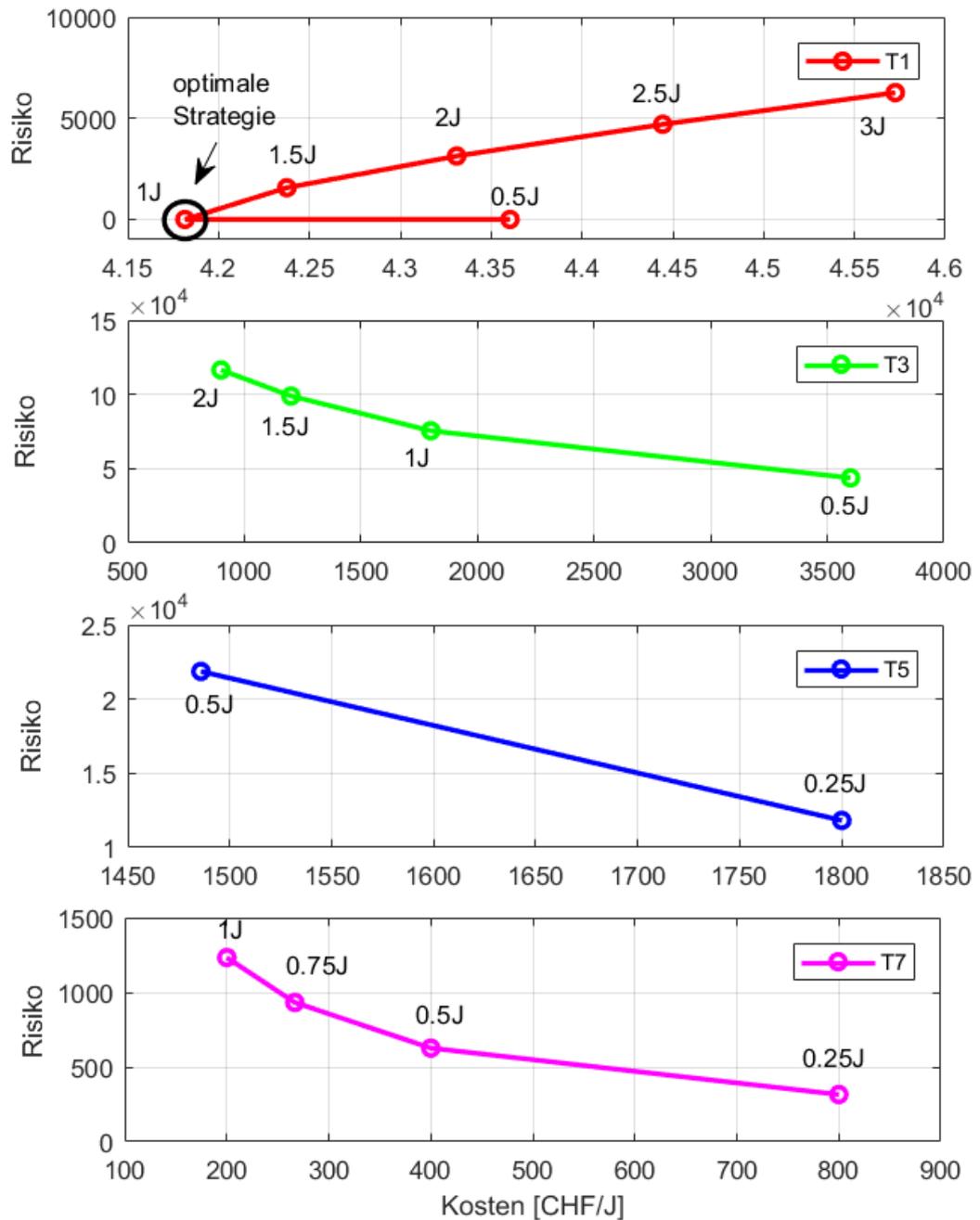


Abb. 32 Detaillierte Kosten-Risiko-Diagramme für die vier modellierten Tätigkeiten der Lüftung

## 7.3 VM-System

### 7.3.1 Instandhaltungstätigkeiten

Die folgenden Instandhaltungstätigkeiten werden seitens Betreiber im Bereich VM-System des Tunnels Allmend durchgeführt:

Tab. 9 Instandhaltungstätigkeiten VM-System

Nr.	Tätigkeit	Art	Intervall	Kosten pro
-----	-----------	-----	-----------	------------

				Durchführung
T1	Kontrolle und präventiver Ersatz Leuchtmittel bei Ampeln	Präventiv / Zustandsbasiert	12 Monate	0 CHF (in Kosten von T3 enthalten)
T2	Funktionskontrolle Steuerung	Präventiv	6 Monate	ca. 300 CHF
T3	Reinigung der Signale/Ampeln im Tunnel	Präventiv	12 Monate	ca. 3'000 CHF
T4	Schmieren der Ketten bei Prismenwechsler	Präventiv	12 Monate	0 CHF (in Kosten von T3 enthalten)
T5	Ersatz defekter Leuchtmittel bei Ampel	Reaktiv	-	ca. 1'500 CHF
T6	Ersatz Drehsignal	Reaktiv	-	ca. 12'000 CHF
T7	Ersatz Prismenwechsler	Reaktiv	-	ca. 300 CHF

### 7.3.2 Fehlermodi und Modellierungsentscheidung

Aufgrund des Interviews mit dem Betreiber wurden basierend auf den Instandhaltungstätigkeiten folgende Fehlermodi und Auswirkungen identifiziert:

**Tab. 10 Fehlermodi und Auswirkungen VM-System**

Nr.	Fehlermodus / Ursache	Auswirkung	Risiko	Kosten
T1	Abnutzung/Alterung	Mehr Ausfälle <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhtes Unfallrisiko</li> <li>• Erhöhtes Unfallausmass</li> <li>• Höhere Entstörungskosten</li> </ul>	✓	✓
T2	Zustände werden nicht korrekt geschaltet (defekte Ein-/Ausgänge, Softwarefehler, ...)	Falsche Signalstellung bei Ereignis <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhtes Unfallrisiko</li> <li>• Erhöhtes Unfallausmass</li> </ul>	✓	
T3	Verschmutzung	Abnahme Sichtbarkeit Signale <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhtes Unfallrisiko</li> <li>• Erhöhtes Unfallausmass</li> </ul> Abnahme Lebensdauer / mehr Ausfälle <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhtes Unfallrisiko</li> <li>• Erhöhtes Unfallausmass</li> <li>• Höhere Entstörungskosten</li> <li>• Höhere Ersetzungskosten</li> </ul>	✓	✓
T4	Abnutzung	Abnahme Lebensdauer / mehr Ausfälle <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhtes Unfallrisiko</li> <li>• Erhöhtes Unfallausmass</li> <li>• Höhere Entstörungskosten</li> <li>• Höhere Ersetzungskosten</li> </ul>	✓	✓
T5	Defekt Leuchtmittel	Falsche / Keine Signalstellung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhtes Unfallrisiko</li> <li>• Erhöhtes Unfallausmass</li> </ul>	✓	
T6	Defekt Drehsignal (Motor)	Falsche / Keine Signalstellung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhtes Unfallrisiko</li> <li>• Erhöhtes Unfallausmass</li> </ul>	✓	
T7	Defekt Prismenwechsler	Falsche / Keine Signalstellung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhtes Unfallrisiko</li> <li>• Erhöhtes Unfallausmass</li> </ul>	✓	

Da wir bei keiner Tätigkeit ein wesentliches Optimierungspotenzial entdecken konnten, haben wir komplett auf die Kosten- und Risikomodellierung verzichtet. Wir gehen folglich davon aus, dass der Betreiber bereits nahe dem Optimum arbeitet und sich eine

Änderung der Instandhaltungsstrategie (Veränderung der Intervalle) weder aus Kosten- noch Risikosicht grossartig lohnen könnte.

## 7.4 Brandmeldeanlage

### 7.4.1 Instandhaltungstätigkeiten

Die folgenden Instandhaltungstätigkeiten werden seitens Betreiber an der Brandmeldeanlage des Tunnels Allmend durchgeführt:

**Tab. 11** Instandhaltungstätigkeiten Brandmeldeanlage

Nr.	Tätigkeit	Art	Intervall	Kosten pro Durchführung
T1	Austausch Backup Batterie	Präventiv	72 Monate	ca. 100 CHF
T2	Zustandskontrolle Steuerschränke	Präventiv	3 Monate	ca. 400 CHF
T3	Funktionskontrolle Steuerung, Prüfen Punktmelder, Zustandskontrolle Fühlerrohre	Präventiv	12 Monate	ca. 900 CHF

### 7.4.2 Fehlermodi und Modellierungsentscheidung

Aufgrund des Interviews mit dem Betreiber wurden basierend auf den Instandhaltungstätigkeiten folgende Fehlermodi und Auswirkungen identifiziert:

**Tab. 12** Fehlermodi und Auswirkungen Brandmeldeanlage

Nr.	Fehlermodus / Ursache	Auswirkung	Risiko	Kosten
T1	Stromausfall	Absturz der Steuerung bzw. Programm <ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Nichtverfügbarkeit</li> <li>• Höhere Entstörungskosten</li> </ul>	✓	✓
T2	Früherkennung Defekt einer Komponente im Steuerschrank	Mehr Ausfälle/Störungsmeldung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Nichtverfügbarkeit</li> <li>• Höhere Entstörungskosten</li> </ul>	✓	✓
T3a	Verdeckter Defekt Steuerung	Reflexe werden nicht ausgelöst <ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Nichtverfügbarkeit</li> </ul>	✓	
T3b	Verdeckter Defekt Punktmelder	Punktmelder detektiert Brand nicht <ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Nichtverfügbarkeit</li> </ul>	✓	
T3c	Früherkennung Defekt Fühlerrohr	Mehr Ausfälle/Störungsmeldung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Nichtverfügbarkeit</li> <li>• Höhere Entstörungskosten</li> </ul>	✓	✓

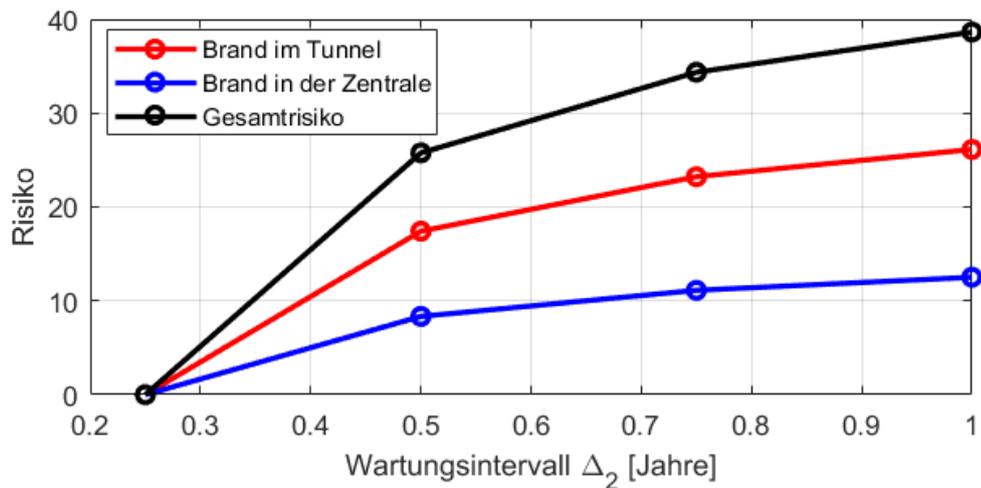
Die Risiken- und Kostenberechnung wurden nur für die Fehlermodi von T2 „Zustandskontrolle Steuerschränke“ und T3 „Funktionskontrolle Steuerung, Prüfen Punktmelder, Zustandskontrolle Fühlerrohre“ ausgeführt. Tätigkeit T1 „Austausch Backup Batterie“ ist nicht berücksichtigt worden, da kein Optimierungspotenzial identifiziert werden konnte.

### 7.4.3 Resultate Kosten- und Risikobetrachtung

Folgend sind die Risikodiagramme für die einzelnen Tätigkeiten sowie das Risiko-Kosten-Diagramm über alle Tätigkeiten dargestellt.

#### Risiko Tätigkeit T2 „Zustandskontrolle Steuerschränke“

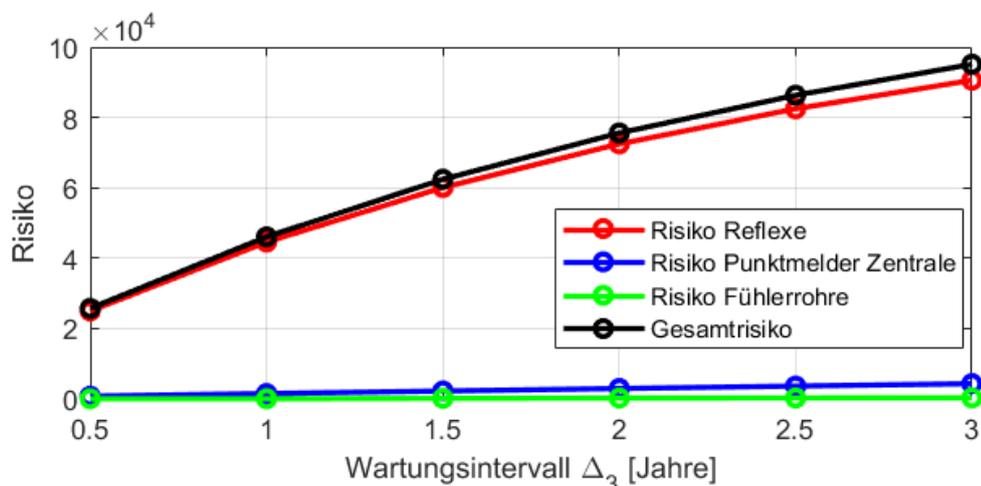
Die Nichtverfügbarkeit der Steuerschränke führt zur Risikoerhöhung im Brandfall im Tunnel oder in der Zentrale. **Abb. 33** zeigt die Beiträge zur Risikoerhöhung durch die zwei Brandfälle und die gesamte Risikoerhöhung in Abhängigkeit des Wartungsintervalls. Der Risikobeitrag bei einem Brand im Tunnel fällt trotz vorhandener Redundanz (Branddetektion über Sichtrübungsmessung bzw. Lüftungssteuerung) höher aus als jener bei einem Brand in der Zentrale. Der Grund liegt bei der Abschätzung des Schadensausmasses bei einem Brand. Das generelle Schadensausmass bei einem Brand im Tunnel ( $K_{0i}^{(\text{Brand T})}$ ) wurde höher abgeschätzt als bei einem Brand im Tunnel ( $K_{0i}^{(\text{Brand Z})}$ ).



**Abb. 33** Risikomodell T2 „Zustandskontrolle Steuerschränke“. Die Beiträge zur Risikoerhöhung in Abhängigkeit des Wartungsintervalls.

**Risiko Tätigkeit T3 „Funktionskontrolle Steuerung, Prüfen Punktmelder, Zustandskontrolle Fühlerrohre“**

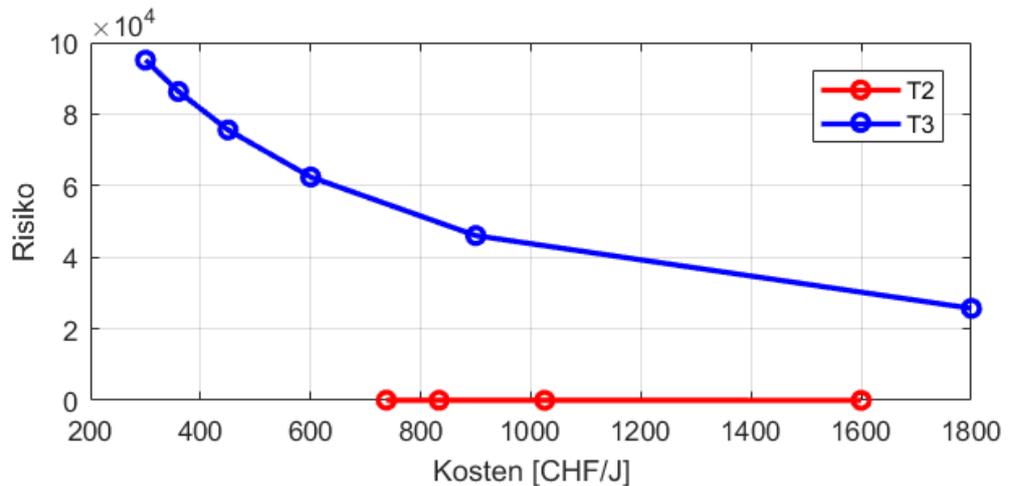
Die Risikoerhöhung, die durch die Tätigkeit T3 reduziert werden kann, ist in der **Abb. 34** dargestellt. Es ist ersichtlich, dass das Risiko aufgrund einer defekten Steuerung (Risiko Reflexe) deutlich höher ist, als das Risiko von defekten Punktmeldern oder Fühlerrohren. Dies liegt sowohl am höheren Schadensausmass als auch an der höheren Nichtverfügbarkeit der Steuerung.



**Abb. 34** Risikomodell T3. Beiträge zur Risikoerhöhung in Abhängigkeit des Wartungsintervalls.

### Risiko-Kosten-Diagramm

In der **Abb. 35** werden die Risiko-Kosten-Kurven der zwei Tätigkeiten T2 und T3 dargestellt und miteinander verglichen. Das Risiko durch T3 ist deutlich höher als dasjenige durch T2. Eine Veränderung des Wartungsintervalls  $\Delta_3$  hat ebenfalls einen grösseren Einfluss auf das Gesamtrisiko als die Veränderung des Intervalls  $\Delta_2$ . Um allerdings eine Aussage bezüglich der optimalen Strategie zu treffen, muss das ganze Portfolio berücksichtigt werden.



**Abb. 35** Kosten-Risiko-Diagramm für die Tätigkeiten T2 und T3 der Brandmeldeanlage im Tunnel Allmend.

## 7.5 Notstromanlage (USV)

### 7.5.1 Instandhaltungstätigkeiten

Die folgenden Instandhaltungstätigkeiten werden seitens Betreiber an der Notstromversorgung (USV & Batterien) des Tunnels Giessbach durchgeführt:

**Tab. 13** Instandhaltungstätigkeiten Notstromanlage (USV)

Nr.	Tätigkeit	Art	Intervall	Kosten pro Durchführung
T1	Batteriekontrolle	Präventiv	3 Monate	ca. 400 CHF
T2	Jahreskontrolle	Präventiv	12 Monate	ca. 650 CHF
T3	Revision USV-Anlage	Präventiv	48 Monate	ca. 1'000 CHF

### 7.5.2 Fehlermodi und Modellierungsentscheidung

Aufgrund des Interviews mit dem Betreiber wurden basierend auf den Instandhaltungstätigkeiten folgende Fehlermodi und Auswirkungen identifiziert:

**Tab. 14** Fehlermodi und Auswirkungen Notstromanlage (USV)

Nr.	Fehlermodus / Ursache	Auswirkung	Risiko	Kosten
T1a	Fehlfunktionen der Batteriezellen (Zu tiefe Dauerladespannung)	Mehr Störungsmeldung <ul style="list-style-type: none"> <li>Höhere Nichtverfügbarkeit (Reduktion der Autonomiezeit der Notstromversorgung)</li> <li>Höhere Entstörungskosten</li> </ul>	✓	✓

T1b	Aufblähung der Batterie	Schaden (Explosion) bei Einschaltung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Nichtverfügbarkeit (Ausfall Notstromversorgung)</li> <li>• Risiko finanzieller Schaden</li> </ul>	✓	
T1c	Oxidation der Batteriepole	Brand in Tunnelzentrale <ul style="list-style-type: none"> <li>• Risiko finanzieller Schaden</li> </ul>	✓	
T1d	Fehlfunktion Alarmübermittlung der USV-Anlage	Störungen bleiben unbemerkt -> längere Ausfallzeit <ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Nichtverfügbarkeit</li> </ul>	✓	
T1e	Defektes Display USV-Anlage	Störungsbehebung dauert länger <ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Nichtverfügbarkeit</li> <li>• Höhere Entstörungskosten</li> </ul>	✓	✓
T2a	Verdeckter Defekt USV-Anlage	Störungen bleiben unbemerkt -> längere Ausfallzeit <ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Nichtverfügbarkeit</li> </ul>	✓	
T2b	Verdeckter Defekt Batteriezelle (Zu tiefe Zellspannung unter Last)	Störungen bleiben unbemerkt -> längere Ausfallzeit <ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Nichtverfügbarkeit (Reduktion der Autonomiezeit der Notstromversorgung)</li> </ul>	✓	
T3	Defekte Komponenten der USV-Anlage	Mehr Ausfälle der USV-Anlage <ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhere Nichtverfügbarkeit</li> </ul>	✓	

Die Risiken- und Kostenberechnung wurden nur für die Fehlermodi von T1 „Batteriekontrolle“ und T2 „Jahreskontrolle“ ausgeführt. Tätigkeit T3 „Revision USV-Anlage“ ist nicht berücksichtigt worden, da der Betreiber allfällige Risiken bei einer Abweichung des Instandhaltungsintervalls von den Herstellerangaben nicht tragen möchte.

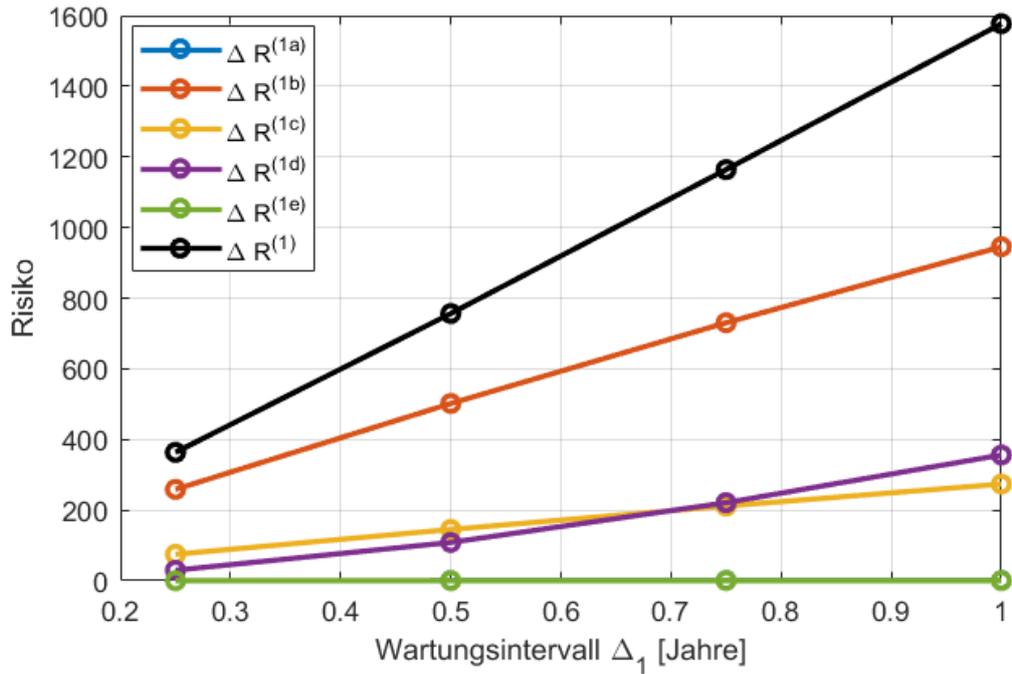
### 7.5.3 Resultate Kosten- und Risikobetrachtung

Folgend sind die Risikodiagramme für die einzelnen Tätigkeiten sowie das Risiko-Kosten-Diagramm über alle Tätigkeiten dargestellt.

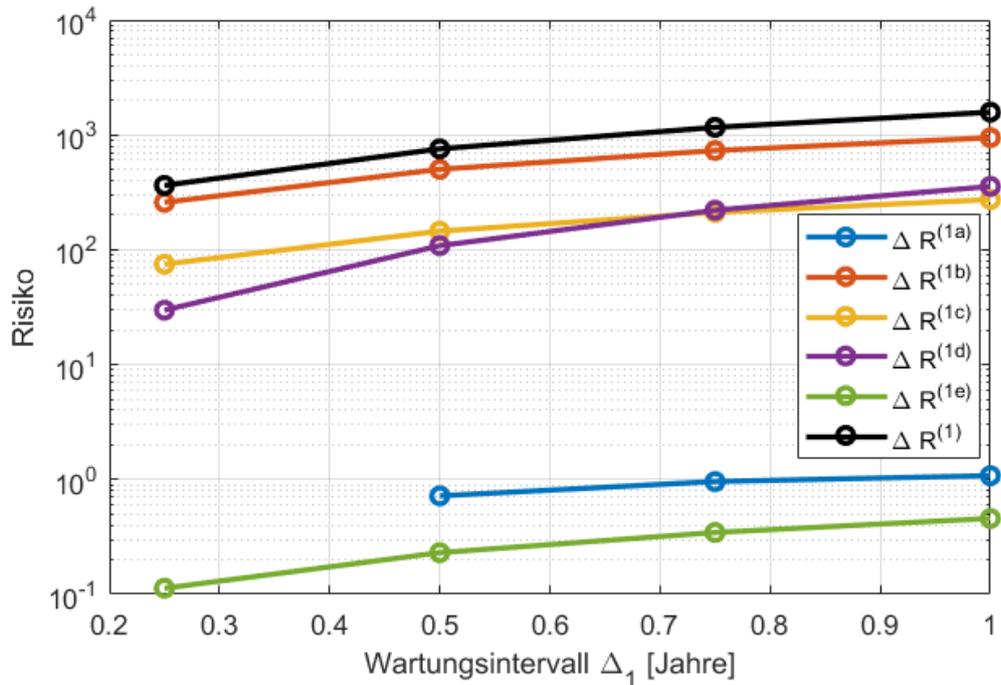
#### Risiko Tätigkeit T1 „Batteriekontrolle“

Die gesamte Risikoerhöhung besteht aus Beiträgen der 5 Fehlermodi 1a-1e. Wie in der **Abb. 37** ersichtlich ist, sind die Beiträge der Fehlermodi 1a und 1e vernachlässigbar. Dies liegt sowohl an den tiefen Nichtverfügbarkeiten als auch an den niedrigen Schadenausmassen dieser Fehlermodi.

- Beim Fehlermodus 1a (Fehlfunktion der Batteriezellen) ist die Ausfallrate sehr tief. Das Schadensausmass ist zudem gering, da kaum mehr als 1-2 Batteriezellen gleichzeitig ausfallen.
- Beim Fehlermodus 1e (Defektes Display USV-Anlage) ist die Auswirkung auf die Nichtverfügbarkeit der Notstromversorgung relativ gering, wodurch praktisch kein Risiko entsteht.



**Abb. 36** Risikomodell T1. Die Beiträge zur Risikoerhöhung in Abhängigkeit des Wartungsintervalls.

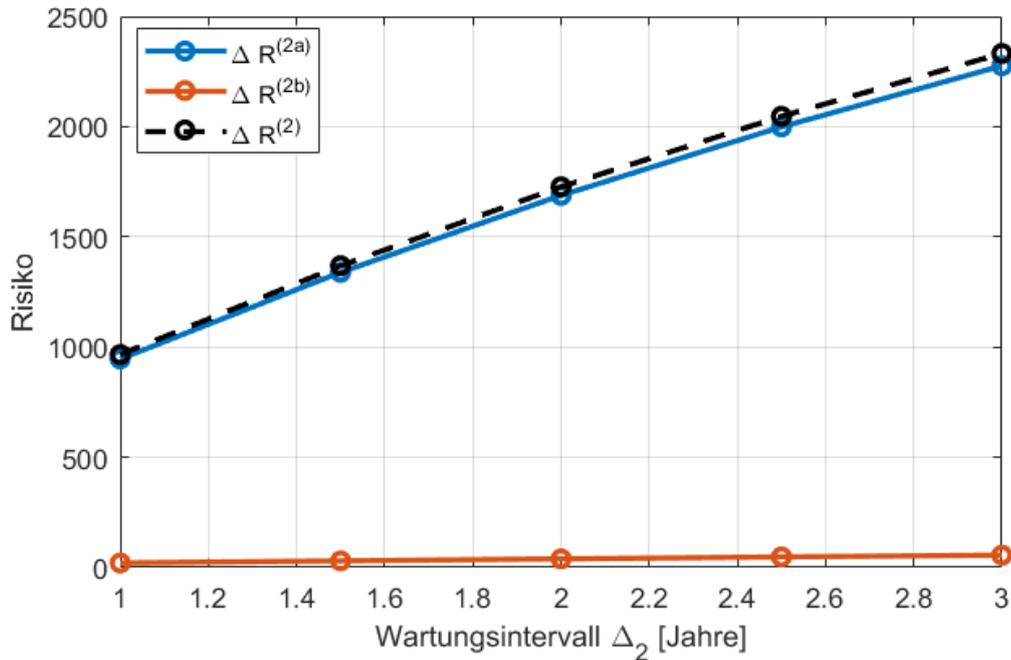


**Abb. 37** Risikomodell T1. Die Beiträge zur Risikoerhöhung in Abhängigkeit des Wartungsintervalls auf einer logarithmischen Skala.

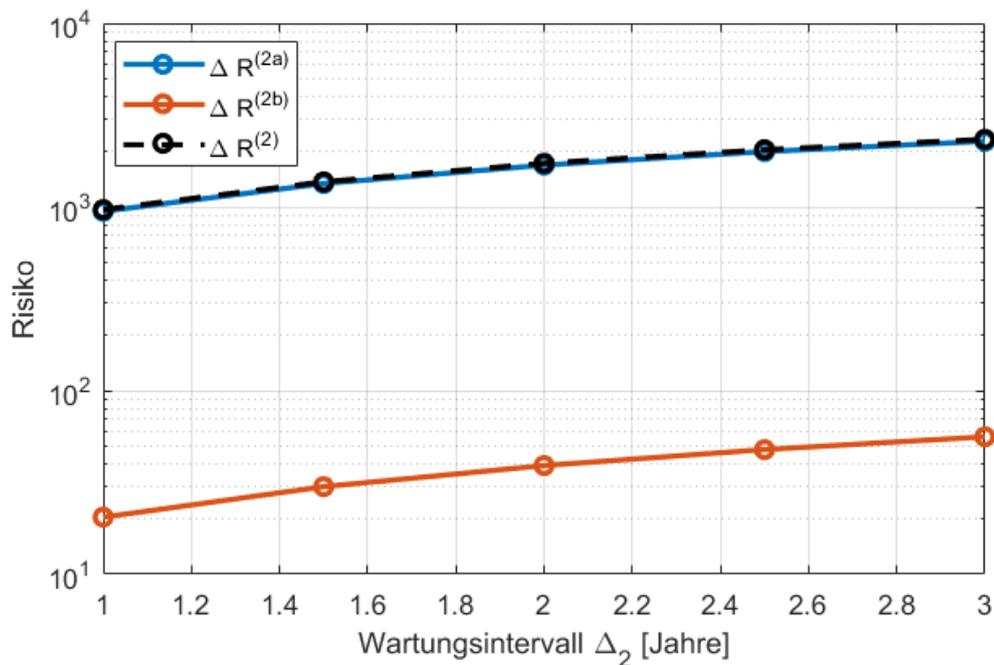
**Risiko Tätigkeit T1 „Jahreskontrolle“**

Die gesamte Risikoerhöhung, die durch T2 vermindert wird, besteht aus den Risikobeiträgen der zwei Fehlermodi 2a und 2b. Das Gesamtrisiko ist jedoch stark durch den Fehlermodi 2a dominiert, da sowohl das Schadensausmass als auch die

Nichtverfügbarkeit der USV-Anlage grösser ist als jenes der Batteriezellen. Dies ist in **Abb. 38** (sowie in **Abb. 39** mit logarithmischer Skalierung) ersichtlich.



**Abb. 38** Risikomodell T2. Die Beiträge zur Risikoerhöhung in Abhängigkeit des Wartungsintervalls.



**Abb. 39** Risikomodell T2. Die Beiträge zur Risikoerhöhung in Abhängigkeit des Wartungsintervalls auf einer Log-Skala.

### Risiko-Kosten-Diagramm

In der **Abb. 35** werden die Risiko-Kosten-Kurven der zwei Tätigkeiten T1 und T2 dargestellt und miteinander verglichen. Jeder Punkt im Diagramm bezeichnet eine

mögliche Instandhaltungsstrategie für die Tätigkeit. In diesem Fall entspricht eine Strategie einem Durchführungsintervall für die Tätigkeit. Für jede Strategie wird die Risikoerhöhung gegen die jährlichen Kosten aufgezeigt.

Auf der Ebene der Notstromversorgung können wir folgenden Beobachtungen machen:

- Beide Tätigkeiten müssen im Rahmen des ganzen Portfolios optimiert werden. Für diese können keine Entscheidungen auf der einzelnen Tätigkeitsebene getroffen werden. Der Grund dafür: je häufiger eine Tätigkeit durchgeführt wird, desto höher sind die jährlichen Kosten und desto geringer das Risiko.
- Das Risiko, welches durch T2 adressiert wird, ist etwas höher als jenes durch T1. Das Risikoniveau bewegt sich für beide Tätigkeiten allerdings in ähnlicher Grössenordnung.

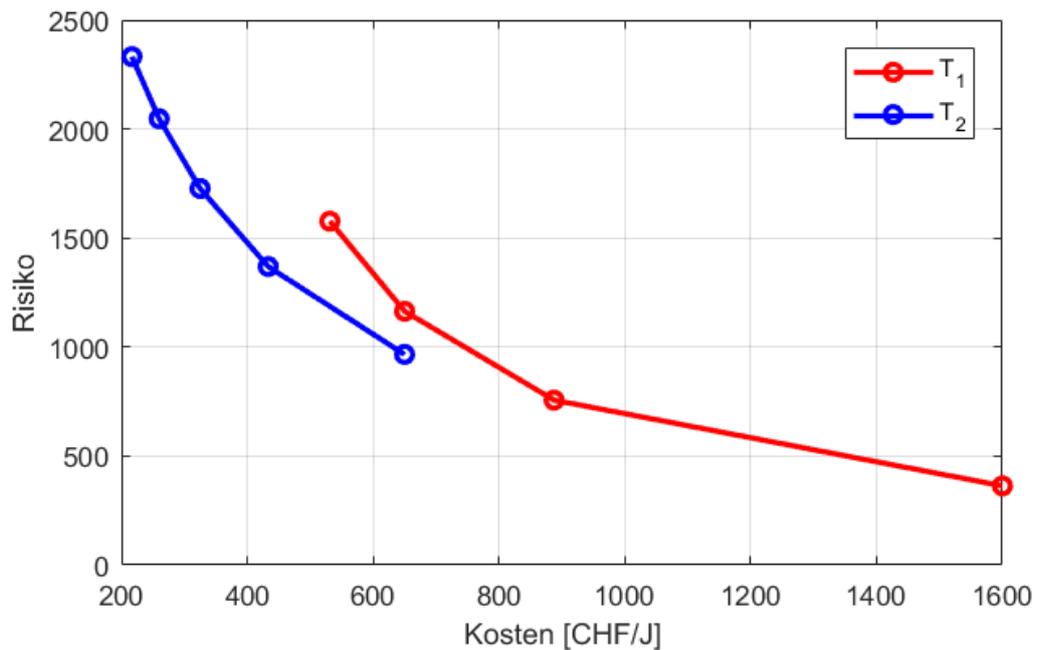


Abb. 40 Kosten-Risiko-Diagramm für die Tätigkeiten T1 und T2 der Notstromversorgung.

## 7.6 Portfolio-Optimierung über Pilotanwendungen

Im Kapitel 6 ist das Vorgehen zur Durchführung einer Optimierung eines Portfolios beschrieben. Hier zeigen wir die Resultate, wenn eine Optimierung über die Pilotanwendungen durchgeführt wird. Unser Portfolio besteht folglich aus den 5 betrachteten Anlagen in den vorangehenden Kapiteln (siehe auch **Tab. 4** auf Seite 79).

Für die Portfoliooptimierung betrachten wir nur jene Tätigkeiten, welche wir vorangehend modelliert haben und nicht bereits auf Tätigkeitsebene optimiert werden konnten. Begründung:

- Gewisse Tätigkeiten scheinen kaum Optimierungspotential aufzuweisen. Daher sind diese innerhalb einer Portfolio-Optimierung nicht relevant, da sie unverändert bleiben.
- Falls eine Tätigkeit bereits auf Tätigkeitsebene optimiert werden kann, muss diese im Portfolio nicht mehr betrachtet werden. Es ist dann bereits klar, welche Strategie für diese Tätigkeit die beste ist.

Folglich besteht unser Portfolio für die Optimierung aus den folgenden Anlagen/Tätigkeiten mit den aktuellen Instandhaltungsintervallen:

**Tab. 15** Portfolio der Instandhaltungstätigkeiten für Optimierung

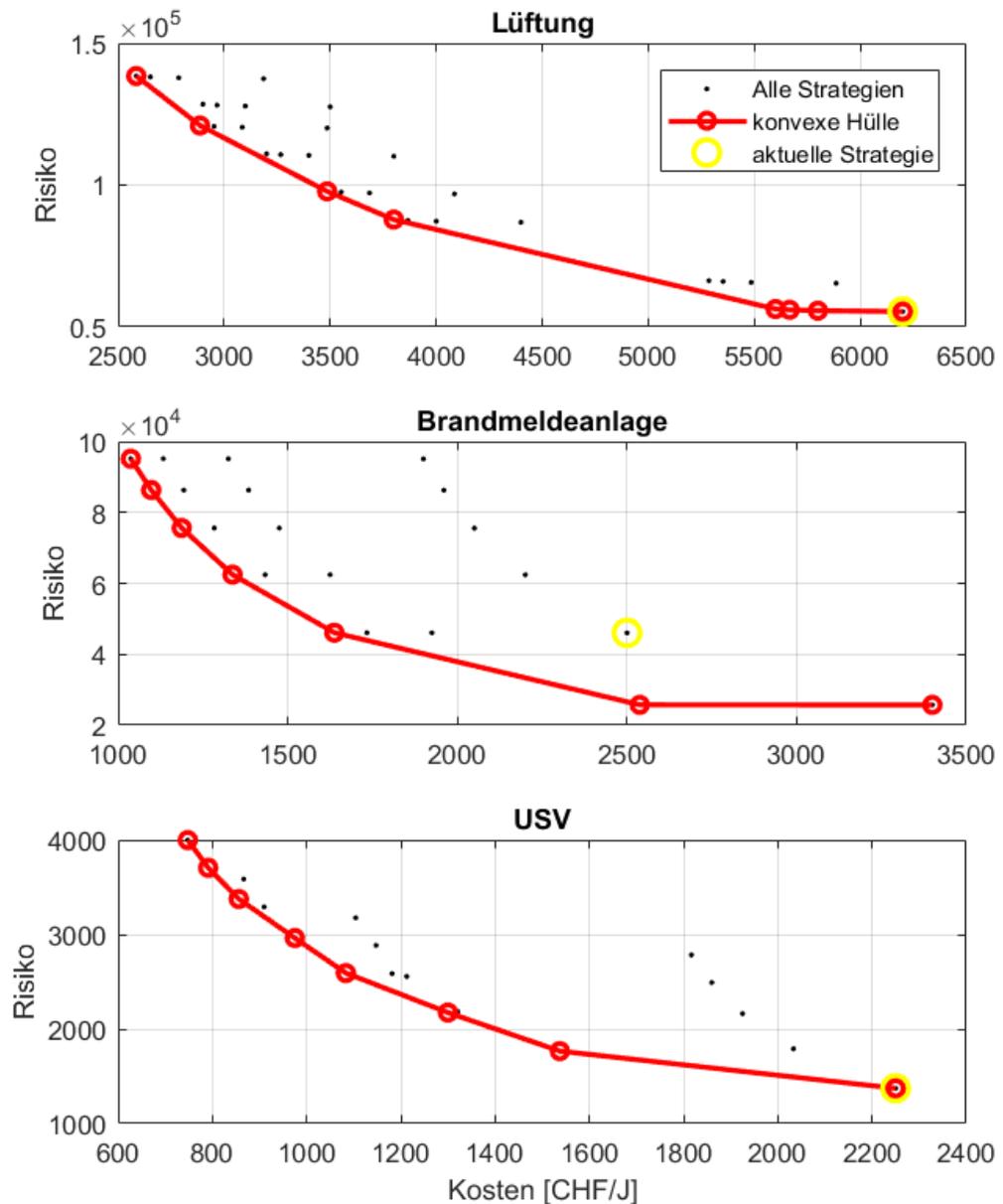
Nr.	Anlage	Tätigkeit	Intervall
L3	Lüftung	Funktionskontrolle Lüftungssteuerung	6 Monate
L5	Lüftung	Kontrolle Messwerte Sichtrübungsmessung	3 Monate
L7	Lüftung	Kontrolle Messwerte Strömungsmessung	3 Monate
B2	Brandmeldeanlage	Zustandskontrolle Steuerschränke	3 Monate
B3	Brandmeldeanlage	Funktionskontrolle Steuerung, Prüfen Punktmelder, Zustandskontrolle Fühler-rohre	12 Monate
U1	Notstromanlage (USV)	Batteriekontrolle	3 Monate
U2	Notstromanlage (USV)	Jahreskontrolle	12 Monate

Insgesamt wollen wir also für ein Portfolio mit 7 Tätigkeiten eine optimale Strategie finden.

### 7.6.1 Optimale Portfolio-Strategie bei gegebenem Budget

In einem ersten Schritt zeigen wir die Resultate auf, wenn das gegebene Portfolio hinsichtlich eines Budgets optimiert werden soll. Das bedeutet: wir suchen diejenige Strategie, welche das geringste Risiko bei einem vorgegebenen Budget liefert.

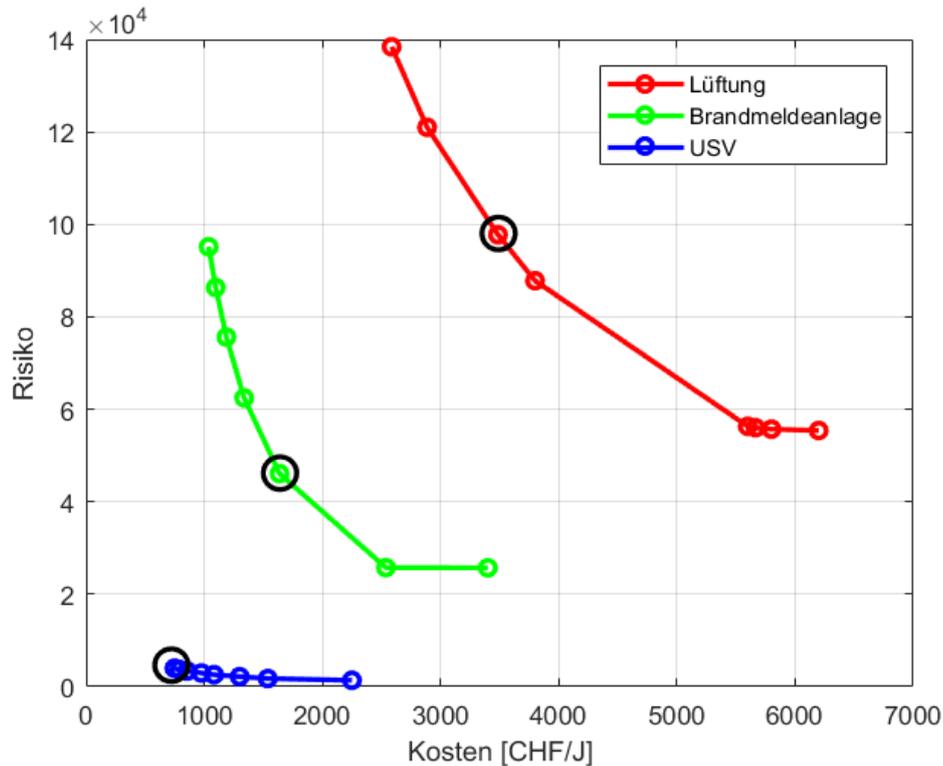
Wie in Kapitel 6.1 dargestellt, suchen wir erst nach der konvexen Hülle der Pareto-Front von jeder Anlage. In der folgenden Abbildung sind diese dargestellt. Ein schwarzer Punkt bezeichnet eine Strategie (Kombination von IH-Intervallen) für die Anlage. Rote Kurven sind die konvexen Hüllen und die aktuellen Strategien sind mit gelben Kreisen markiert. In der Grafik ist bereits zu erkennen, dass sich die heutige Strategie der Brandmeldeanlage nicht auf der konvexen Hülle befindet und daher hinsichtlich Kosten/Risiko-Verhältnis nicht optimal ist.



**Abb. 41** Kosten-Risiko-Diagramme pro Anlage, Darstellung der konvexen Hüllen.

Als nächstes wenden wir das in Kapitel 6.1.3 beschriebene Verfahren an, um für ein bestimmtes Budget die optimale Strategie zu finden. In unserer Anwendung verwenden wir ein jährliches maximales Budget von 6'000 CHF<sup>8</sup> für unser Portfolio und erhalten das in **Abb. 42** dargestellte Resultat. Die schwarzen Kreise bezeichnen die optimale Strategie pro Anlage.

<sup>8</sup> Der Betrag wurde frei von uns gewählt und dient nur zur Veranschaulichung der Anwendung des Verfahrens.



**Abb. 42** Kosten-Risiko-Diagramme der Anlagen im Portfolio, Darstellung der optimalen Strategie pro Anlage

Bei dieser Strategie betragen die berechneten jährlichen Kosten 5'871 CHF, womit das maximale Budget von 6'000 CHF nicht überschritten wird. Aus der Grafik nicht ersichtlich sind die Instandhaltungsintervalle der einzelnen Tätigkeiten, welche bei der Strategie verwendet werden. Diese sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

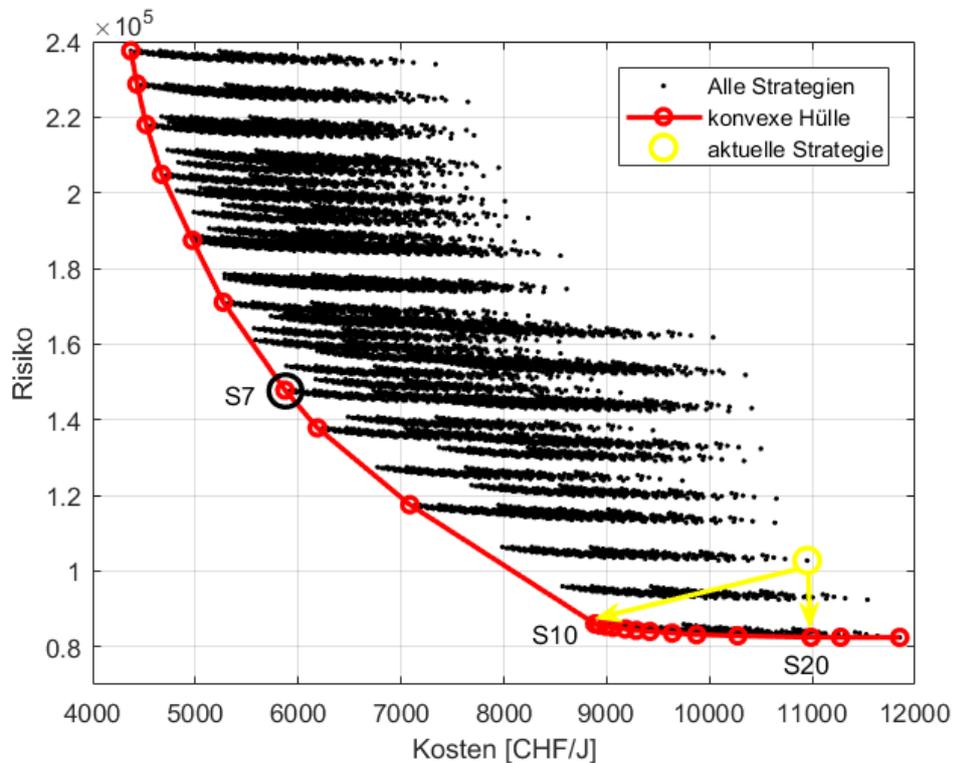
**Tab. 16** Instandhaltungsintervalle bei einer optimierten Strategie mit einem maximalen Budget von 6'000 CHF

Nr.	Anlage	Tätigkeit	Intervall
L3	Lüftung	Funktionskontrolle Lüftungssteuerung	12 Monate
L5	Lüftung	Kontrolle Messwerte Sichttrübungsmessung	6 Monate
L7	Lüftung	Kontrolle Messwerte Strömungsmessung	12 Monate
B2	Brandmeldeanlage	Zustandskontrolle Steuerschranke	12 Monate
B3	Brandmeldeanlage	Funktionskontrolle Steuerung, Prüfen Punktmelder, Zustandskontrolle Fühler-rohre	12 Monate
U1	Notstromanlage (USV)	Batteriekontrolle	12 Monate
U2	Notstromanlage (USV)	Jahreskontrolle	36 Monate

## 7.6.2 Optimale Portfolio-Strategie ohne Budgetvorgaben

Im vorangehenden Kapitel wurden die Resultate dargestellt, wenn das Portfolio hinsichtlich eines definierten maximalen Budgets optimiert wird. In diesem Abschnitt betrachten wir die Optimierung ohne ein vorgegebenes Budget. Dies entspricht dem im Kapitel 6.2 vorgestellten Verfahren. Es geht dabei um eine **allgemeine Betrachtung der möglichen Strategien** und der Identifikation des Optimierungspotenzials hinsichtlich Kosten und Risiko.

Bei unserem Portfolio mit 7 Tätigkeiten ergeben sich aufgrund den möglichen Instandhaltungsintervallen total 15'360 Instandhaltungsstrategien, welche unterschiedliche Kosten und Risiken bedeuten. Im nachfolgenden Kosten-Risiko-Diagramm (**Abb. 43**) sind alle diese Strategien als schwarze Punkte dargestellt. Die rote Linie bildet die konvexe Hülle (Strategien mit bestem Kosten/Nutzen-Verhältnis), welche aus insgesamt 22 Strategien (rote Kreise) besteht.



**Abb. 43** Konvexe Hülle für unser Portfolio mit den 7 Tätigkeiten. Ein schwarzer Punkt bezeichnet eine Instandhaltungsstrategie. Der gelbe Kreis bezeichnet die aktuelle Strategie. Der Schwarze Kreis markiert das Resultat aus Kapitel 7.6.1 (Budget  $\leq 6'000$  CHF).

Anhand des Diagramms können die verschiedenen Strategien miteinander verglichen werden. Die aktuelle Strategie des Betreibers ist mit einem gelben Kreis markiert und ist suboptimal in diesem Sinn, dass sie nicht auf der konvexen Hülle liegt. Das bedeutet, dass mit einer anderen Strategie hinsichtlich der Gesamtkosten als auch des Gesamtrisikos tiefere (bessere) Resultate erzielt werden können. Jede Strategie auf der konvexen Hülle, welche tiefere/ähnliche Gesamtkosten und gleichzeitig tieferes Gesamtrisiko bringt, ist eine Verbesserung (rote Punkte innerhalb der gelben Pfeile).

Desweiteren wird durch das Diagramm das Resultat des vorherigen Kapitels bestätigt. Wenn ein Budget von 6'000 CHF pro Jahr vorgegeben ist, dann ist die Strategie S7 die optimale Strategie, da diese auf der konvexen Hülle liegt und das Budget nicht übersteigt. Die Instandhaltungsintervalle der Tätigkeiten entsprechen dann genau dem Resultat, das in Kapitel 7.6.1 dargestellt wurde (vergl. **Tab. 16** und Strategie S7 in **Tab. 17**).

Die berechneten Kosten und Risiken der heutigen Strategie sowie jene 22 Strategien auf der konvexen Hülle sind in der nachfolgenden Tabelle (**Tab. 17**) aufgeführt. Jene Strategien, welche sowohl tiefere/ähnliche Gesamtkosten als auch ein tieferes Gesamtrisiko ergeben, sind gelb markiert.

**Tab. 17** Quantitative Resultate der Instandhaltungsstrategien auf der konvexen Hülle

Strategie	Instandhaltungsintervall [Jahre]							Kosten [CHF/Jahr]	Risiko [x10 <sup>5</sup> ]	ΔK [%]	ΔR [%]
	L3	L5	L7	B2	B3	U1	U2				
<b>S0 (heute)</b>	<b>0.5</b>	<b>0.25</b>	<b>0.25</b>	<b>0.25</b>	<b>1</b>	<b>0.25</b>	<b>1</b>	<b>10'950.03</b>	<b>1.028</b>		
S1	2	0.5	1	1	3	1	3	4'371.40	2.380	-60.1%	+131.5%
S2	2	0.5	1	1	2.5	1	3	4'431.40	2.290	-59.5%	+122.8%
S3	2	0.5	1	1	2	1	3	4'521.40	2.180	-58.7%	+112.1%
S4	2	0.5	1	1	1.5	1	3	4'671.40	2.050	-57.3%	+99.4%
S5	1.5	0.5	1	1	1.5	1	3	4'971.40	1.870	-54.6%	+81.9%
S6	1.5	0.5	1	1	1	1	3	5'271.40	1.710	-51.9%	+66.3%
S7	1	0.5	1	1	1	1	3	5'871.40	1.480	-46.4%	+44.0%
S8	1	0.25	1	1	1	1	3	6'185.54	1.380	-43.5%	+34.2%
S9	1	0.25	1	1	0.5	1	3	7'085.54	1.180	-35.3%	+14.8%
S10	0.5	0.25	1	1	0.5	1	3	8'885.54	0.861	-18.9%	-16.2%
S11	0.5	0.25	1	1	0.5	1	2.5	8'928.87	0.857	-18.5%	-16.6%
S12	0.5	0.25	1	1	0.5	1	2	8'993.87	0.854	-17.9%	-16.9%
S13	0.5	0.25	0.75	1	0.5	1	2	9'060.51	0.851	-17.3%	-17.2%
S14	0.5	0.25	0.75	1	0.5	0.75	2	9'179.26	0.847	-16.2%	-17.6%
S15	0.5	0.25	0.75	1	0.5	0.75	1.5	9'287.59	0.843	-15.2%	-18.0%
S16	0.5	0.25	0.5	1	0.5	0.75	1.5	9'420.89	0.840	-14.0%	-18.3%
S17	0.5	0.25	0.5	1	0.5	0.75	1	9'637.56	0.836	-12.0%	-18.7%
S18	0.5	0.25	0.5	1	0.5	0.5	1	9'875.06	0.832	-9.8%	-19.1%
S19	0.5	0.25	0.25	1	0.5	0.5	1	10'275.03	0.829	-6.2%	-19.4%
S20	0.5	0.25	0.25	1	0.5	0.25	1	10'987.53	0.825	+0.3%	-19.7%
S21	0.5	0.25	0.25	0.5	0.5	0.25	1	11'275.03	0.825	+3.0%	-19.7%
S22	0.5	0.25	0.25	0.25	0.5	0.25	1	11'850.03	0.825	+8.2%	-19.7%

Aus der obigen Tabelle ist zu entnehmen, dass bei diesem Portfolio die Kosten um ca. 19% und gleichzeitig das Risiko um ca. 16% gesenkt werden kann (Strategie S10). Oder bei ungefähr identischen Kosten kann das Risiko um ca. 20% gesenkt werden (Strategie S20).

Anmerkung: Sowohl die Kosten als auch die Risiken beziehen sich auf die modellierten Tätigkeiten, bzw. auf die diesen Tätigkeiten zugrundeliegenden Fehlermodi. Für die nicht-modellierten Tätigkeiten und die dazugehörigen Fehlermodi gehen wir davon aus, dass sich Kosten und Risiken nicht signifikant ändern lassen.

## 7.7 Erkenntnisse der Pilotanwendung

Aus der Durchführung der Pilotanwendungen ziehen wir folgende Erkenntnisse:

- Die entwickelte Methodik lässt sich anwenden und führt zu den angestrebten Resultaten: Instandhaltungsstrategien lassen sich hinsichtlich Risiko und Kosten systematisch vergleichen. Dies bildet die Grundlage, um schliesslich über ein Gesamtportfolio eine Optimierung über verschiedene Anlagen und Tunnel vorzunehmen.
- Um das Risiko sowie die Kosten zu modellieren und anschliessend die Resultate zu berechnen, braucht es ein fundiertes Verständnis der Anlagen. Eine unverzichtbare

Informationsquelle ist daher der Betreiber, welcher aufgrund seiner Erfahrung die Anlagen kennt und die benötigten Angaben grob abschätzen kann. Mit Hilfe der Sensitivitätsanalysen konnte anschliessend die Robustheit der Resultate analysiert und überprüft werden. Je nach Anwendung ist die Sensitivität unterschiedlich gross. Eine Änderung der Modellparameter kann im Einzelfall zu qualitativ unterschiedlichen Resultaten führen. Die Sensitivitätsanalyse gibt deshalb einen guten Hinweis darauf, bei welchen Modellparametern es sich lohnt, zusätzlichen Aufwand zu leisten, um eine genauere Bestimmung des Wertes des jeweiligen Parameters zu erhalten.

- Die Funktionsweise und technische Realisierung einer Anlage können in Tunneln unterschiedlich sein. Wird bei einem Tunnel eine andere Funktionsweise festgestellt, sollte das bestehende Modell entsprechend angepasst werden, so dass die neue Funktionsweise berücksichtigt wird.
- Die Risikodiagramme haben aufgezeigt, dass eine häufigere Ausführung einer Instandhaltungstätigkeit nicht immer zu einem signifikant geringeren Risiko führt. Gewisse Risiken lassen sich ab einem bestimmten Intervall nicht mehr weiter reduzieren, da das Risiko bereits auf nahezu Null gesenkt ist.
- Eine Reduktion der Wartungshäufigkeit und somit der Wartungskosten erzielt nicht zwangsläufig eine Einsparung in den Gesamtkosten. Durch die Senkung von Wartungskosten können anderweitige Kosten entstehen, welche die Einsparungen auf- oder gar überwiegen. Direkte Kostenfolgen (wie z.B. Energiekosten) sollten daher in die Modellierung miteinbezogen werden.
- Falls bei einer Tätigkeit gleichzeitig die Gesamtkosten als auch das Risiko am geringsten sind, so muss diese Tätigkeit für die Optimierung des Portfolios nicht berücksichtigt werden. Dadurch wird die Komplexität bei der Entscheidungsfindung reduziert. Allerdings kann diese Aussage durchaus tunnelspezifisch sein - bei anderen Tunneln kann aufgrund von unterschiedlichen Parameterwerten ein anderes Zusammenspiel zwischen Gesamtkosten und Risiko entstehen (siehe Sensitivitätsanalysen in Anwendungsberichten). Daher muss von Tunnel zu Tunnel entschieden werden, ob eine Tätigkeit für eine Optimierung der Instandhaltungsstrategie des Portfolios von Bedeutung ist oder nicht. Ob eine Modellierung notwendig ist oder nicht, ist somit kein genereller Entscheid, welcher für andere Tunnelobjekte nicht mehr hinterfragt werden muss. Wir sind der Ansicht, dass dies erst der Fall sein kann, wenn über mehrere Tunnelobjekte das gleiche Fazit ausfällt.
- Im Rahmen der Anwendung der Methodik haben wir die Zusammenstellung der Tätigkeiten nicht hinterfragt, allerdings lohnt es sich vielleicht dies genauer zu betrachten, hinsichtlich der Unterschiede im Risiko zwischen den Aufgaben. Es könnte durchaus der Fall auftreten, dass durch eine Änderung der Tätigkeit eine zusätzliche Optimierung möglich wäre, womit ein besseres Risiko/Kosten-Verhältnis erreicht werden.
- Ob eine Modellierung einer bestimmten Anlage oder Tätigkeit notwendig ist oder nicht, hängt von der spezifischen Situation des betrachteten Tunnels ab. Es kann also sein, dass die gleiche Anlage in einem Tunnel nicht modelliert werden muss, einem anderen Tunnel dagegen schon. Erst wenn sich herausstellt, dass in mehreren Tunneln mit unterschiedlicher Situation eine Tätigkeit jedes Mal von der Modellierung ausgeschlossen wird, kann diese generell für die Modellierung ausgeschlossen werden.
- Die Erkenntnisse aus der Portfolio-Optimierung liefern Rückschlüsse darauf, welche Teile der jeweiligen Instandhaltungsstrategien relevant sind: Durch eine Analyse der Instandhaltungsstrategien auf der Pareto-Front lässt sich ableiten, was die für das Gesamtsystem kritischen Tätigkeiten sind, denen besondere Beachtung geschenkt werden sollte. Dies ist eine Art der Sensitivitätsanalyse auf Gesamtsystemebene.

## 8 Kosten / Nutzen – Potentialabschätzung

In den vorangehenden Kapiteln wurde aufgezeigt, wie Instandhaltungsstrategien hinsichtlich Risiko und Kosten vergleichbar gemacht und eine Optimierung erreicht werden kann. In diesem Kapitel soll das Potential einer solchen Optimierung auf der Grundlage des Ansatzes der risikobasierten Instandhaltung in einer schweizweiten Betrachtung abgeschätzt werden. Auf der einen Seite berücksichtigen wir dafür die Kosten, welche bei einer schweizweiten Anwendung anfallen. Dem gegenüber stehen der quantitative als auch qualitative Nutzen.

Für die folgenden Abschätzungen gehen wir also davon aus, dass der beschriebene Ansatz auf alle BSA und auf alle Tunnel in der Schweiz ausgerollt wird. Die Abschätzung von Kosten und Nutzen erfolgt durch eine Hochrechnung aufgrund der Erkenntnisse, die durch die Pilotanwendungen erzielt worden sind. Naturgemäss sind solche Hochrechnungen mit starken Unsicherheiten behaftet, dennoch soll in diesem Kapitel zumindest eine grobe Abschätzung durchgeführt werden.

### 8.1 Abschätzung der Kosten

Zur Abschätzung der Kosten betrachten wir zwei Kostenfaktoren: Initialkosten und Kosten für die Modellpflege. Unter die Initialkosten fallen Aufwendungen, welche ausgeführt werden müssen, um eine erste Portfoliooptimierung über alle Schweizer Tunnelobjekte durchführen zu können. Da die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen in regelmässigen Abständen erneuert bzw. ersetzt werden, müssen auch die entwickelten Risiko- und Kostenmodelle auf die neuen Situationen angepasst werden (Modellpflege). Dies beinhaltet einerseits die Entwicklung von neuen Modellen, da bei der Einführung neuer Technologien sich die Instandhaltungstätigkeiten sowie die Fehlermodi ändern können. Somit muss der Zusammenhang zwischen der Häufigkeit der Tätigkeiten und dem Risiko neu modelliert werden. Des Weiteren können sich beim Ersatz einer Anlage die Parameterwerte der Modelle ändern, da zwar eine gleiche/ähnliche Technologie eingesetzt wird, sich das Produkt jedoch unterscheidet.

#### 8.1.1 Initialkosten

Die Initialkosten bestehen im Wesentlichen aus:

- der Entwicklung der Modelle für die einzelnen, verschiedenen Anlagentypen der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen, welche innerhalb eines Tunnels vorkommen können und wartungsrelevant sind.
- der Anwendung der Modelle auf die einzelnen Tunnelobjekte (Bestimmung der zu verwendenden Modelle und Abschätzung der Werte der Modellparameter)
- Berechnung der Resultate und Durchführung der Portfoliooptimierung

**Tab. 18** Abschätzung der Initialkosten

Nr.	Position	CHF
1	<b>Entwicklung Grundmodelle</b> Innerhalb des Forschungsprojekts wurden 5 verschiedene Anlagentypen betrachtet und modelliert. Der Aufwand für die Pilotanwendungen betrug ca. die Hälfte des Forschungsvolumens. Dies entspricht im Schnitt einem Aufwand von ca. 30'000 CHF pro Anlage, um die beschriebene Methodik (siehe Kapitel 5) für eine Anlage durchzuführen und die Risiko- und Kostenmodelle zu entwickeln.	<b>2.58 Mio.</b>
	Um herauszufinden, wie viele unterschiedliche wartungsrelevante Anlagentypen vorkommen, wurden die Instandhaltungstätigkeiten des Betreibers <sup>9</sup> ausgewertet. Es zeigt	

<sup>9</sup> Betreiber der Tunnel in der ASTRA Gebietseinheit I

sich, dass ca. 36 unterschiedliche Anlagentypen existieren. Es gibt Anlagentypen, bei denen heute verschiedene Technologien eingesetzt sind (z.B. die Branddetektion im Tunnel durch Punkt- oder Linienmelder), so dass deshalb für mehr als 36 Anlagentypen Grundmodelle entwickelt werden müssen. Mit der Annahme, dass bei ca. 20% der Anlagentypen noch eine zusätzliche Technologie betrachtet werden muss, sind es total rund 43 Anlagentypen, für welche die Grundmodelle entwickelt werden müssen.

Auch innerhalb der Grundmodelle erwarten wir bei der Anwendung eine Variabilität zwischen verschiedenen Tunnelobjekten. Um die schweizweite Ausrollung einfach und kostengünstig zu ermöglichen, sollten die Grundmodelle deshalb dahingehend vorparametrisiert werden. Damit wird die Entwicklung der Grundmodelle aufwendiger sein als in der Pilotstudie. Konservativ schätzen wir ab, dass diese die Kosten verdoppelt, womit für die Modellierung pro Anlagentyp 60'000 CHF anzusetzen wären.

Abschätzung:  $43 * 60'000 \text{ CHF} = 2.58 \text{ Mio. CHF}$

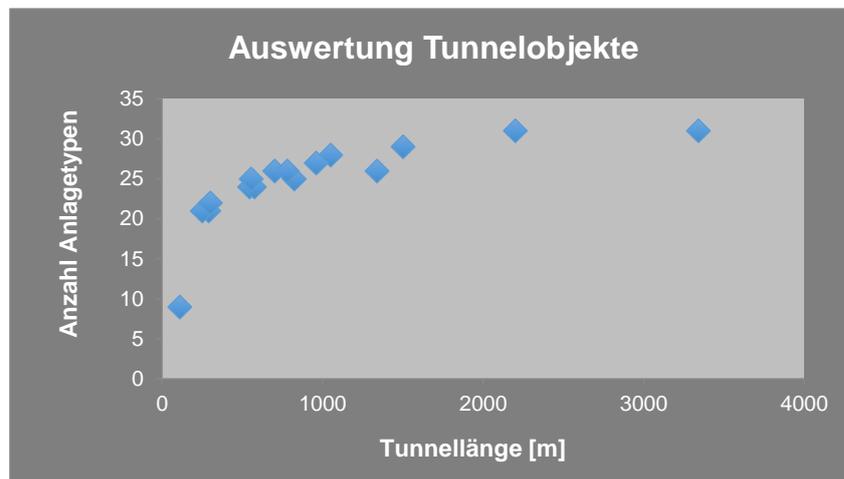
## 2 Lokale Parametrisierung der Grundmodelle für alle Tunnel

12.81 Mio.

Sind die Grundmodelle für einzelne Anlagentypen entwickelt, gilt es diese für die unterschiedlichen Tunnel zu parametrisieren. Das bedeutet: ein Modell zu spezifizieren, das den konkreten tunnelspezifischen Einsatz der Anlagentypen beschreibt (sowohl auf der Kosten- als auch auf der Risikoseite). Die Parameter des Grundmodells müssen also für jede Anlage individuell angepasst werden.

Wir gehen dabei von der Annahme aus, dass die Grundmodelle soweit ausgearbeitet sind, dass für alle Instandhaltungstätigkeiten und Fehlermodi Modelle vorhanden sind. Die Grundmodelle der Anlagentypen bleiben also gleich (das Problem grundsätzlich unterschiedlicher Technologien für den gleichen Anlagentyp wurde oben schon einberechnet). Folglich ist es also notwendig, für jede individuelle Anlage festzulegen, welche Modellelemente relevant sind und die lokalen Werte der Modellparameter (z.B. aktuelle Störungsraten, Schadensmatrizen etc.) abzuschätzen. Bei der Durchführung der Pilotanwendungen wurden jeweils ca. 0.5 Tage aufgewendet, um bei dem Betreiber die Informationen für die Abschätzung der Modellparameter einzuholen. Inkl. Nachbearbeitung rechnen wir daher mit ca. 1.5 Tage an Aufwand pro Anlage (konservative Schätzung).

Um die Anzahl modellierungsrelevanter Anlagen für die ganze Schweiz abzuschätzen, wurde aufgrund der Instandhaltungstätigkeiten des betrachteten Betreibers ausgewertet, wie viele unterschiedliche Anlagentypen in jedem Tunnel gewartet werden. In Abhängigkeit der Tunnellänge ergibt sich folgendes Bild.



**Abb. 44** Auswertung Anzahl wartungsrelevanter Anlagentypen in Abhängigkeit der Tunnellänge

In der Schweiz existieren ca. 239 unterschiedliche Tunnelobjekte [50]. Mit Hilfe der **Abb. 44** wurden die Anzahl der jeweils zu modellierenden Anlagen aufgrund ihrer Länge abgeschätzt. Dazu wurde über die Punkte ein Regressionsmodell gelegt, mit welchem anschliessend in Abhängigkeit der Tunnellänge die Anzahl wartungsrelevanter Anlagen berechnet werden kann. Nicht beachtet wird dabei die Anzahl der Tunnelröhren. Wir gehen davon aus, dass die Anzahl Tunnelröhren nur einen Einfluss auf den Umfang der einzelnen Anlagentypen haben, allerdings nicht auf deren Anzahl. Durch die Berechnung erhalten wir so eine Summe von 5'692 Anlagen, für welche die Modelle adaptiert/angewendet werden müssen.

Abschätzung:  $5'692 * (1.5 \text{ Tage} * 1'500 \text{ CHF/Tag}) = 12.81 \text{ Mio. CHF}$

<b>3</b>	<b>Berechnung der Resultate</b>	-
	Der Aufwand für die Berechnung der Portfoliooptimierung ist vernachlässigbar. Die erhobenen Parameter müssen lediglich ins Modell eingelesen und die Berechnung ausgeführt werden.	
<b>Total</b>		<b>15.39 Mio.</b>

Fazit: Es zeigt sich klar, dass der Hauptaufwand der Modellierung in der lokalen Parametrisierung der Grundmodelle für die Anlagen in den einzelnen Tunneln besteht, also in der lokalen Anpassung der Modellparameter. Dies erfordert für jeden Tunnel eine separate Aufnahme der Modellparameter. Demgegenüber ist die Entwicklung der Grundmodelle für die Anlagentypen deutlich geringer. Entsprechend sollte bei der Erarbeitung der Grundmodelle darauf geachtet werden, dass diese auf möglichst alle Situationen direkt angewendet werden können, so dass keine Modellanpassungen mehr notwendig sind, sondern lediglich eine Abschätzung der lokalen Modellparameter.

Mit den getroffenen (eher konservativen) Annahmen addieren sich die Gesamtkosten für das Ausrollen der Methodik auf die ganze Schweiz also auf etwa 15 Mio. CHF.

## 8.1.2 Modellpflege

Die Kosten zur Modellpflege sind abhängig davon, wie häufig Veränderungen an den Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen berücksichtigt werden müssen. Grundsätzlich sehen wir drei Punkte, welche einen Einfluss auf die Wahl der optimalen Instandhaltungsstrategie haben: Veränderungen der Störungsraten und Ereignishäufigkeiten, Verwendung von neuen Technologien und der Ersatz von Anlagen. Folgend schätzen wir grob die Kosten der Modellpflege, um die Modelle auch langfristig auf einem aktuellen Stand zu halten.

Die Modelle müssen laufend gepflegt werden. Das bedeutet insbesondere, die abgeschätzten Störungsraten fortlaufend zu überprüfen und wenn nötig zu korrigieren. Diese Aufgabe kann und sollte zumindest teilweise automatisiert werden, etwa indem die auftretenden Störungen systematisch in einer Datenbank erfasst und die resultierenden Störungsdaten automatisch berechnet werden. Dies würde die Abschätzungen aufgrund von Expertenbefragungen, wie sie in den Pilotanwendungen durchgeführt wurden und für die erstmalige Anpassung der Modelle notwendig sein werden, ersetzen. Die für eine solche (Teil-)Automatisierung notwendigen IT-Systeme stehen heute nicht zur Verfügung und müssten neu entwickelt werden. Diese Kosten sind nicht berücksichtigt (initiale Entwicklungskosten, regelmässige Service & Wartungskosten).

**Tab. 19** Abschätzung der jährlichen Kosten zur Modellpflege

Nr.	Position	CHF/Jahr
1	<b>Update der Störungsdaten</b> Wir gehen davon aus, dass der Betreiber die Störungen / Ereignisse pro Tunnelobjekt und Anlage in angemessener Form erfassen und rapportieren kann. Mit Hilfe von diesen Informationen können die in den Modellen verwendeten Störungsdaten verifiziert oder angepasst werden. Für diese Arbeit bei 239 Tunnelobjekten schätzen wir im Durchschnitt einen Aufwand von 4 Stunden pro Objekt und pro Jahr. Bei einer Jahresarbeitszeit von ca. 2'100 Stunden entspricht dies einer 45%-Stelle.  <i>Abschätzung:</i> 45% von 150'000 CHF = 67'500 CHF	<b>67'500</b>
2	<b>Modellanpassungen</b> Falls neue Technologien eingesetzt werden, müssen in der Regel auch die Risiko- und Kostenmodelle angepasst werden. Wenn wir davon ausgehen, dass pro Jahr durchschnittlich eine neue Technologie eingeführt wird, betragen die geschätzten Kosten ca. 60'000 CHF für die Risiko- und Kostenmodellierung (siehe Abschätzung Punkt 1 in <b>Tab. 18</b> ).	<b>60'000</b>

3	<b>Ersatz von Anlagen</b> Bei einer mittleren geschätzten Lebensdauer der Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen von 12 Jahren ergibt sich ein Ersetzungsbedarf von ca. 474 Anlagen pro Jahr <sup>10</sup> . Für eine Überprüfung und eventuelle Anpassung der Werte der Modellparameter schätzen wir pro Anlage durchschnittlich ca. 1 Tag.  <u>Abschätzung:</u> $474 * (1 \text{ Tag} * 1'500 \text{ CHF/Tag}) = 711'000 \text{ CHF}$	711'000
<b>Total</b>		<b>838'500</b>

Fazit: die jährlichen Kosten für die Aufrechterhaltung der Risikomodelle belaufen sich also auf etwa 0.84 Mio. CHF. Sie sind dominiert von den notwendigen Modellanpassungen beim Ersatz von Anlagen.

### 8.1.3 Jährliche Gesamtkosten über 10 Jahre

Für eine Abschätzung der mittleren jährlichen Kosten gehen wir von einem Betrachtungszeitraum von 10 Jahren aus. Wir ignorieren für unsere Abschätzung die Diskontierung.

Die Initialkosten verteilen sich also über 10 Jahre, was einen mittleren jährlichen Betrag von  $15 \text{ Mio. CHF} / 10 = 1.5 \text{ Mio. CHF}$  ergibt. Dazu müssen die laufenden Kosten von ca. 0.8 Mio. CHF addiert werden.

Insgesamt ergeben sich also Kosten von 2.3 Mio. CHF pro Jahr. Diese Kosten müssen dem Nutzen gegenübergestellt werden.

## 8.2 Quantitativer Nutzen - Kosteneinsparung bei Optimierung

Gemäss Angaben des ASTRA betragen die heutigen Wartungskosten für Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen ca. 37 Mio. CHF, wobei davon rund 24 Mio. CHF (66%) auf Tunnel entfallen. Wie in Kapitel 7.6 dargestellt, können mit einer optimierten Instandhaltungsstrategie bei gleichem Risiko die Kosten bis um 20% reduziert werden.

Die Pilotanwendungen haben aber auch gezeigt, dass nicht alle Wartungstätigkeiten bei der Optimierung berücksichtigt werden, da teilweise kein Optimierungspotenzial besteht. Folglich können wir für die Abschätzung des quantitativen Nutzens nicht 20% der heutigen Wartungskosten berechnen. Innerhalb der 5 Pilotanwendungen wurden total 24 Instandhaltungstätigkeiten identifiziert, welche jährlich ca. 20'000 CHF Gesamtkosten aufweisen (exkl. Störungs- und Reparaturkosten). Von diesen 24 Tätigkeiten wurden 10 bei der Risiko- und Kostenmodellierung berücksichtigt. Die jährlichen Kosten dieser 10 Tätigkeiten betragen ca. 12'000 CHF, was 60% der betrachteten Gesamtkosten ergibt.

Rechnet man dies hoch, ergeben sich damit Kosteneinsparungen von **ca. 2.88 Mio. CHF pro Jahr**, was 12% der Wartungskosten in Tunneln entspricht.

Abschätzung:  $24 \text{ Mio. CHF} * 60\% * 20\% = 2.88 \text{ Mio. CHF}$

## 8.3 Qualitativer Nutzen

Neben den Kosteneinsparungen gibt es zusätzlichen qualitativen Nutzen, welcher sich nicht direkt monetär beziffern lässt:

- **Systematischer Ansatz**

Das systematische Vorgehen ist für die alle Anlagen anwendbar und führt zu einer systematischen und nachvollziehbaren Begründung für das durchgeführte

<sup>10</sup> Berechnung der Anzahl Anlagen siehe **Tab. 18**

Instandhaltungsprogramm. Dies liefert eine fundierte Basis als Diskussionsgrundlage zwischen Betreiber und dem ASTRA. Es ist davon auszugehen, dass Unterschiede in der Instandhaltungsstrategie zwischen den einzelnen Betreibern zutage treten, die nicht aufgrund der unterschiedlichen lokalen Situation begründet werden können, sondern historische Wurzeln haben. Diese Diskussionen werden einerseits zu einer Harmonisierung der Instandhaltungsstrategien zwischen den Betreibern führen. Andererseits ist es sehr wahrscheinlich, dass hier zusätzliches Optimierungspotential zutage tritt, das bisher noch nicht berücksichtigt wurde.

- **Knowhow-Sicherung (Nachhaltigkeit) & Nachvollziehbarkeit (Transparenz)**

Die Instandhaltungstätigkeiten werden einheitlich dokumentiert und begründet. Der systematische Ansatz wird dazu führen, dass sich ein Konsens ergeben wird darüber, welchen Nutzen die einzelnen Tätigkeiten erbringen bzw. welche Fehlermodi adressiert werden. Es ist somit transparent, welche Tätigkeiten ausgeführt werden und weshalb diese notwendig sind.

Dies ist nicht nur für eine Optimierung der Instandhaltung relevant, sondern auch für juristische und politische Auseinandersetzung. Beispielsweise kann das ASTRA damit nachweisen, dass es seine Sorgfaltspflichten bei der Definition des Instandhaltungsprogramms erfüllt hat, wenn es zu grösseren Unglücken aufgrund von Anlagenausfällen kommen sollte. Ohne einen einheitlichen Ansatz und eine entsprechende Dokumentation ist ein solcher Nachweis schwer zu erbringen.

Die Einführung eines systematischen Ansatzes wäre also auch ein Element, um die Sorgfaltspflicht des ASTRA konkret zu implementieren.

- **Sichtbarkeit des Zusammenhangs zwischen Instandhaltungsstrategien und Risiko bzw. Kosten**

Die Risikomodelle verdeutlichen, welchen Einfluss die Wahl der Instandhaltungsstrategie auf die Kosten und auf das Risiko bringt. Zum Beispiel kann mit dem Risikoansatz herausgefunden werden, ob sich Kosten senken lassen zu Lasten eines nur moderaten Risikoanstiegs. In der *Tab. 17* auf Seite 99 ist z.B. ersichtlich, dass die Kosten um 34% reduziert werden können bei einer nur 15%igen Erhöhung des Risikos.

Eine Diskussion aufgrund der Pareto-Front der Portfolio-Optimierung liefert einen faktenbasierten Ansatz, um über den Trade-off von Kosten und Risiko zu diskutieren, der vor allem in der politischen Auseinandersetzung einen grossen Gewinn bringen würde.

- **Auftragsvergabe an Betreiber auf Grundlage Geld <-> Risikoreduktion**

Für die Auftragsvergabe des ASTRA an den Betreiber kann als eine Grundlage die Risikoreduktion beachtet werden. Die Risikomodellierung auf dem Gesamtportfolio eines Betreibers macht ersichtlich, welches Risiko bei welchem Geldeinsatz erreicht wird. Dies liefert eine sachliche Grundlage für die Entscheidung, wieviel Mittel bei den verschiedenen Betreibern für die Wartung und Instandhaltung investiert werden sollte. Der Trade-off zwischen Mitteleinsatz und Risikoreduktion, der sich im Portfolio-Pareto-Diagramm zeigt, kann dabei gut kombiniert werden mit anderen Faktoren (z.B. politischen Faktoren), die bei der Auftragsvergabe eine Rolle spielen.

- **Vergleich des Risikolevels auf unterschiedlichen Aggregationsstufen (pro Gebietseinheit, pro Tunnel, pro Anlage, pro Fehlermodus)**

Durch die Quantifizierung im Rahmen des Risikomodells kann man das Risiko, das durch nicht-perfekt-funktionierende Anlagen erzeugt wird, bestimmen und unter verschiedenen Blickwinkeln über die Subsysteme vergleichen. Grössere Diskrepanzen könnten beseitigt werden und so zu einem risikomässig ausgewogeneren System führen.

- **Identifikation der «Risikotreiber»**

Durch die Identifikation der Fehlermodi und deren Risikomodellierung wird ersichtlich, welche Fehlermodi den Hauptbeitrag des Risikos generieren. Dies würde wichtige Erkenntnisse liefern für das Design der BSA für einen neuen Tunnel oder für Ersatzinvestitionen. Dieses Wissen kann in künftigen Projekten genutzt werden, um durch entsprechende (bauliche oder technische) Massnahmen das Risiko künftig zu reduzieren. Auf diese Weise würde sich die technologische Entwicklung konsequent auf eine Risikoreduktion fokussieren und über die Jahre zu einer systematischen Verbesserung führen.

## 9 Weiterer Forschungsbedarf

Innerhalb der Forschungsprojekts wurden alle formulierten Ziele erreicht und dokumentiert. In Rücksprache mit der Begleitkommission besteht kein weiterer Forschungsbedarf<sup>11</sup>. Die Entwickelte Methodik wäre in einem nächsten Schritt für eine breite Anwendung in die Praxis zu überführen.

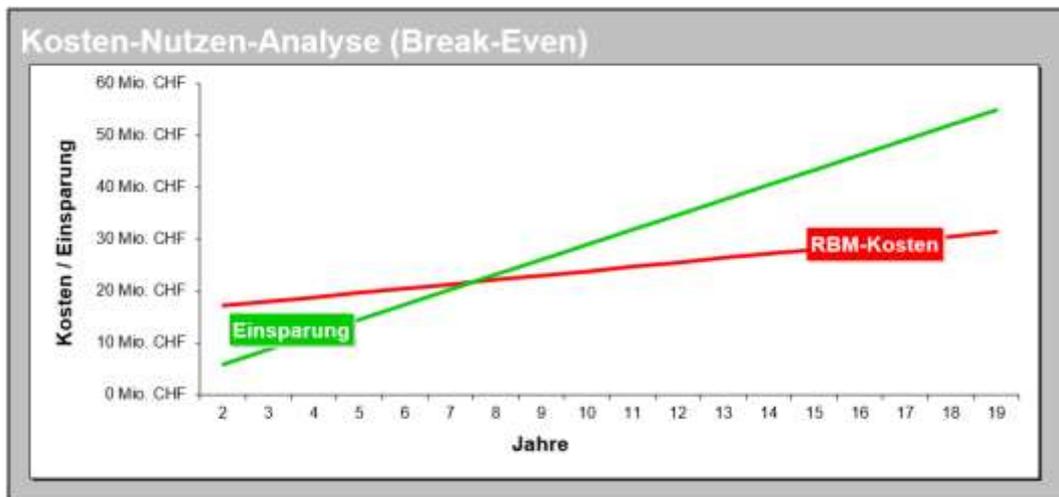
---

<sup>11</sup> Vergl. Kapitel Projektabschluss Absatz «weitergehender Forschungsbedarf».



## 10 Empfehlung / Fazit

Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojekts zeigen, wie ein risikobasierter Ansatz im Bereich von Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen systematisch realisiert werden kann. Die Resultate der Pilotanwendungen haben gezeigt, dass Optimierungspotenzial besteht: sowohl das Gesamtrisiko als auch die Gesamtkosten können mit einer optimierten Instandhaltungsstrategie reduziert werden. Um optimale Instandhaltungsstrategien zu identifizieren, fallen allerdings auch Kosten an. In Kapitel 8 wurden die Kosten der Einführung und der monetäre Nutzen berechnet. In der folgenden Kosten-Nutzen-Analyse (Break-Even) (**Abb. 45**) werden diese einander gegenübergestellt.



**Abb. 45** Kosten-Nutzen-Analyse (Break-Even)

Nach ca. 7 Jahren ab der schweizweiten Einführung einer risikobasierten Instandhaltung ist der Break-Even erreicht, die Einsparungen durch eine optimierte Instandhaltungsstrategie übersteigen die Kosten der Einführung (inklusive der laufenden Kosten für die Pflege der Modelle). Die **Abb. 45** bezieht sich dabei auf den Zeitpunkt nach Abschluss der Einführung, die Einführungsdauer selbst ist nicht Bestandteil der Break-Even-Betrachtung.

Die Kosten-Nutzen-Analyse zeigt jedoch nur die monetäre Sicht. In Kapitel 8.3 wurden einige wichtige nicht-monetarisierte Nutzenaspekte genannt, die eine klare qualitative Verbesserung der Instandhaltungstätigkeiten und der Organisation zur Folge hätte. Als Gesamtfazit ist also festzuhalten, dass die Einführung einer risikobasierten Instandhaltung für die BSA der Schweizer Tunnel sowohl aus finanziellen als auch aus übergeordneten Qualitätsaspekten sinnvoll ist.

Hinsichtlich der Umsetzung einer risikobasierten Instandhaltung ist eine etappenweise Einführung empfehlenswert, wobei die in diesem Bericht beschriebenen Phasen 1 und 2 (Identifikation der Instandhaltungstätigkeiten und Fehlermodi) des Vorgehens (vergl. Kapitel 5) schweizweit durchzuführen wären, um eine Allgemeingültigkeit zu erhalten und Quervergleiche zu ermöglichen. Dies deckt sich mit der Empfehlung der eidgenössischen Finanzkontrolle (EFK), welche den Austausch bzw. den Vergleich der Leistungen der einzelnen Gebietseinheiten begrüsst und die Meinung vertritt, dass eventuell durch die Führung des ASTRA dieser Vorgang formalisiert und gefördert werden sollte<sup>12</sup>. Das Vorgehen der Phase 1 entspricht genau einer solchen Formalisierung und führt durch einen systematischen Ablauf zu einer Übersicht der unterschiedlichen

<sup>12</sup> EFK-Bericht [51] Kapitel 5.3

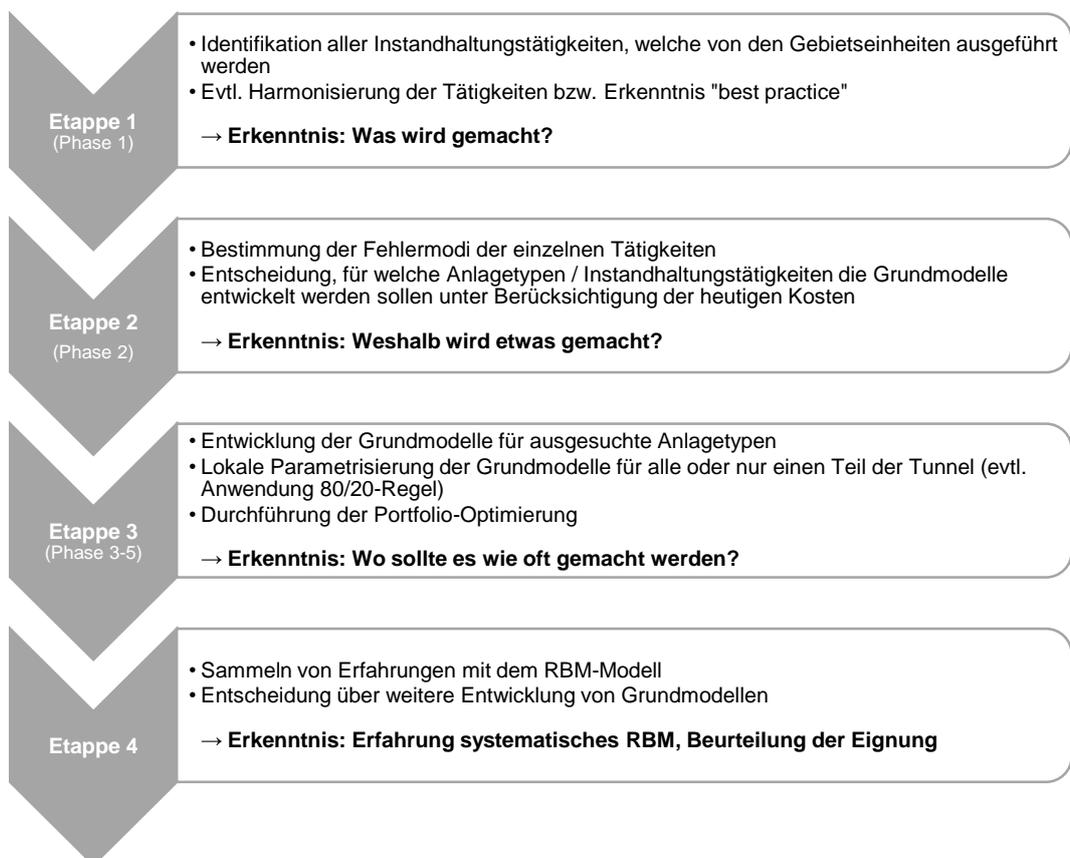
Instandhaltungsstrategien bzw. Tätigkeiten bzw. der Gebietseinheiten. Unterschiede können so identifiziert, diskutiert, verstanden und harmonisiert werden.

Die dann folgende Risiko- und Kostenmodellierung inklusive Entwicklung der Grundmodelle sowie die anschliessende lokale Parametrisierung kann in einem ersten Schritt durchaus zunächst auf eine einzige Gebietseinheit begrenzt werden. Damit hätte man eine überschaubare Anzahl von Involvierten, was die Modellentwicklung effizienter machen würde. Das lokal vorhandene Optimierungspotential kann sofort realisiert werden. Gleichzeitig kann man erste Erfahrungen mit der Anwendung des Ansatzes machen, die dann in der Zukunft bei der Ausweitung auf die anderen Gebietseinheiten genutzt werden können.

Weiterhin empfiehlt sich zunächst eine Fokussierung auf einzelne, kostentreibende Anlagentypen. Solche Anlagen sollten prioritär modelliert werden (Entwicklung der Grundmodelle und anschliessende lokale Parametrisierung). Weiter besteht für eine etappenweise Einführung auch die Möglichkeit, nur einen Teil aller Tunnel zu berücksichtigen und zu einem späteren Zeitpunkt weitere hinzuzunehmen.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Einführung des risikobasierten Ansatzes in verschiedener Weise etappiert werden kann. Mit den in jeder Etappe entwickelten Modelle kann sofort Optimierungspotential erkannt und realisiert werden, dazu braucht es nicht die vollständige Betrachtung aller BSA in der ganzen Schweiz. Insofern wird durch eine etappenweise Einführung schon während der Einführung Nutzen erzeugt.

Unsere Empfehlung ist deshalb, die Einführung einer risikobasierten Instandhaltung wie folgt umzusetzen:



**Abb. 46** Einführungsvorschlag RBM

## Anhänge

<b>I</b>	<b>Frageraster Interviews .....</b>	<b>112</b>
<b>II</b>	<b>Technische Modelle .....</b>	<b>114</b>
II.1	Anhang B.1: Berechnung der Ausfallrate bei wenigen/keinen Ausfallbeobachtungen...	114
II.2	Anhang B.2: Berechnung der Nichtverfügbarkeit für eine konstante Ausfallrate bei verdeckten Funktionen.....	115

# I Frageraster Interviews

Für das Interview mit dem Betreiber können mit den folgenden Fragen die wesentlichen Informationen über die aktuellen Instandhaltungstätigkeiten abgeholt werden.

Nr. 1	Welche Tätigkeiten werden präventiv, welche reaktiv ausgeführt?	
Wer:	...	Wann: ...
Antwort:	...	

Nr. 2	Weshalb wird die Tätigkeit ausgeführt? Was passiert, wenn man sie nicht ausführt?	
Wer:	...	Wann: ...
Antwort:	...	

Nr. 3	Was sind die Gründe für das momentane Ausführungsintervall der Tätigkeit? Welche Auswirkung hätte eine Verringerung/Verlängerung des Intervalls?	
Wer:	...	Wann: ...
Antwort:	...	

Nr. 4	Welche Kosten entstehen bei der Durchführung der Tätigkeit?	
Wer:	...	Wann: ...
Antwort:	...	

Nr. 5	Welche Störungen treten bei der BSA auf und wie oft?	
Wer:	...	Wann: ...
Antwort:	...	

Nr. 6	Wie lange dauert eine Störungsbehebung bzw. was kostet die Entstörung?	
Wer:	...	Wann: ...
Antwort:	...	

Nr. 7	Wie hoch ist die Ausfallrate bzw. wie viel Stück pro Jahr müssen ersetzt werden?	
Wer:	...	Wann: ...
Antwort:	...	

Nr. 8	Gibt es eine langsame „Degradation“ oder sind es 0-1-Ausfälle (funktioniert, oder funktioniert nicht)?  Falls Degradation vorhanden: wann ist der kritische Zustand erreicht?	
Wer:	...	Wann: ...
Antwort:	...	

Nr. 9	Wird direkt nach dem Ausfall ersetzt oder gibt es ein „Ersetzungs-Zeit-Fenster“?	
Wer:	...	Wann: ...
Antwort:	...	

Nr. 10	Wann wird die BSA jeweils gebraucht (Einsatz-Szenarios)? Bzw. was passiert, wenn die BSA dann nicht funktioniert?	
Wer:	...	Wann: ...
Antwort:	...	

## II Technische Modelle

In diesem Abschnitt werden die im Kapitel 5.3.2 verwendeten Berechnungsmethoden abgeleitet.

### II.1 Anhang B.1: Berechnung der Ausfallrate bei wenigen/keinen Ausfallbeobachtungen

Eine relativ häufige Situation in der Praxis ist, dass die Anzahl der in der Vergangenheit beobachteten Ausfälle Null ist. Das bedeutet natürlich nicht, dass die wirkliche Ausfallrate Null ist. Die üblichen statistischen Verfahren helfen hier nicht weiter, denn alle klassischen Schätzer für die Ausfallrate werden mit diesen Daten den Wert Null liefern. Dies ist einerseits definitiv die falsche Antwort, und andererseits hätte das zur Konsequenz, dass die entsprechende Anlage mit einem Risiko von Null belegt werden würde – eine Optimierung wäre dann nicht mehr möglich.

Aus diesem Grund muss eine Modellierungsmethodik auch in diesem häufigen Fall (keine Ausfälle beobachtet) eine Aussage machen. Dies ist auch möglich: in den Daten (keine Ausfälle beobachtet) steckt nämlich tatsächlich eine Information über die Ausfallrate. Man kann nämlich aus der Tatsache, dass man mit einem gegebenen Satz an Anlagen, die man über eine bestimmte Zeit beobachtet hat, keine Ausfälle gesehen hat, eine obere Abschätzung der Ausfallrate machen, das heisst man kann statistisch begründet die Aussage machen: «Die Ausfallrate kann nicht grösser sein als  $x$ .»

Wenn wir diesen so bestimmten Wert  $x$  nun als hypothetische Ausfallrate verwenden, nehmen wir sozusagen eine pessimistische Position ein – im Endeffekt weisen wir der Anlage das höchstmögliche Risiko zu, das mit den Beobachtungsdaten verträglich ist. Dies ist ein deutlich sinnvollerer Vorgehen als das Risiko auf Null zu setzen und konsistent mit den üblichen Risikomanagement-Ansätzen.

Technisch berechnet man diese maximal anzunehmende Ausfallrate mittels des Vertrauensintervalls des Schätzers für die Ausfallrate oder die MTBF (Mean Time Between Failures - mittlere Zeit zwischen Ausfällen). Dabei geht man von einem bestimmten Signifikanzniveau  $\alpha$  (üblicherweise wird  $\alpha=0.05$  verwendet) aus und berechnet denjenigen Wert der Ausfallrate, der zu diesem Signifikanzniveau gerade noch mit den Daten (im konkreten Fall: «In einer bestimmten Zeitperiode keine Ausfälle beobachtet») verträglich ist.

Die folgende Ableitung gilt für eine konstante Ausfallrate  $\lambda$  wobei  $\lambda = MTBF^{-1}$ . Generell gilt: Die Wahrscheinlichkeit, dass die echte MTBF kleiner ist als  $MTBF_L$  (L=Lower Limit), gegeben  $r$  beobachtete Ausfälle in  $n$  Einheiten der Anlage während  $T$  Jahren, ist kleiner als  $\alpha$  [1], [2], [3]:

$$(0.47) \quad MTBF_L = \frac{2Tn}{\chi^2(1-\alpha, 2r+2)}$$

Hier bezeichnet  $\chi^2$  die Chi-Square Verteilung für Konfidenzniveau  $1-\alpha$  und Freiheitsgrad  $2r+2$ . Das bedeutet mit anderen Worten: Mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1-\alpha$  ist die wirkliche MTBF grösser ist als  $MTBF_L$ .

Somit ergibt sich beispielsweise die untere Grenze des Vertrauensbereichs des MTBF-Schätzers für ein Konfidenzniveau von 95%, falls keine Ausfälle beobachtet wurden, zu:

$$(0.48) \quad MTBF_L = \frac{2Tn}{\chi^2(0.05, 2)} = 0.3338 \cdot Tn$$

Dies bedeutet, dass die echte, jedoch unbekannte, MTBF mit 95% Wahrscheinlichkeit grösser als  $0.3338 Tn$  ist.

*Beispiel:* Falls man nur eine einzige Anlage beobachtet, ist  $n=1$ . In diesem Fall bedeutet die obige Formel, dass man als pessimistischsten Wert für die MTBF ein Drittel des Beobachtungsintervalls annehmen muss. Beobachtet man beispielsweise eine Anlage über 6 Jahre und hat keinen Ausfall gesehen, dann kann man davon ausgehen, dass die MTBF grösser als  $6/3=2$  Jahre ist. Alle höheren Werte sind natürlich ebenfalls konsistent mit den Daten, z.B. könnte die MTBF den Wert 50 Jahre haben. Auch in diesem Fall hätten wir ja keine Ausfälle beobachtet. Aber es könnte eben auch gut sein, dass MTBF nur 2.5 Jahre ist (denn auch dann kann es durchaus vorkommen, dass wir über sechs Jahre keinen Ausfall sehen). Es jedoch nicht davon auszugehen, dass die MTBF kleiner als 2 Jahre ist, denn in einem solchen Fall hätten wir mindestens einen Ausfall sehen müssen.

Wenn wir das Konfidenzniveau von 95% als gegeben voraussetzen, ist die Aussage in diesem Beispiel also: «Wir können davon ausgehen, dass die MTBF grösser als 2 Jahre ist». Dies ist äquivalent mit der Aussage: «Die Ausfallrate ist kleiner als 0.5/Jahr.»

Hat man 10 gleiche Anlagen über 6 Jahre beobachtet, ohne dass es bei einer Anlage zu einem Ausfall gekommen ist, dann kann man daraus schliessen, dass MTBF mindestens einen Wert von  $60/3 = 20$  Jahre haben muss.

## II.2 Anhang B.2: Berechnung der Nichtverfügbarkeit für eine konstante Ausfallrate bei verdeckten Funktionen

Für die Berechnung der Risikoerhöhung infolge Ausfälle oder Verschlechterung des Zustands wird oft die Nichtverfügbarkeit der Anlage benötigt. Die Nichtverfügbarkeit  $N(p)$  ist, ähnlich wie die Ausfallrate, abhängig von der Instandhaltungsstrategie  $p$ . Die Nichtverfügbarkeit ist der mittlere Anteil der Zeit, in welchem die Anlage nicht gebraucht werden kann, weil sie ihre Funktion nicht mehr erfüllen kann. Die Nichtverfügbarkeit ist eine statistische Grösse. Sie hängt ab der Ausfallrate einerseits, und der Downtime andererseits. Operative Randbedingungen wie z.B. die Schnelligkeit eines Eingriffs nach einem Fehler beeinflussen die Nichtverfügbarkeit. Die Nichtverfügbarkeit spielt eine wichtige Rolle in der Bestimmung des Risikos einer Anlage. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn es sich um eine Sicherheitseinrichtung handelt (wie z.B. eine Lüftungsanlage), die bei einem Ereignis (z.B. eines Unfalls mit Brand) eine bestimmte Funktion erfüllen soll. Die Nichtverfügbarkeit einer solchen Anlage entspricht dann direkt dem Anteil der Ereignisse, bei denen die Schutzfunktion nicht ausgeübt wird.

Es kommt oft dann zu signifikanten Nichtverfügbarkeiten, wenn die Fehlfunktion der Anlage «verdeckt» ist, d.h. ein Ausfall nicht sofort offensichtlich ist, etwa weil beim Ausfall keine Störungsmeldung ausgelöst wird. Dann kann es dazu kommen, dass eine Anlage sehr lange nicht funktionsfähig ist, was einem hohen Risiko entspricht.

Eine solche Fehlfunktion kann allerdings durch regelmässige Inspektionen/Zustandskontrollen erkannt werden. Je häufiger die Inspektionen durchgeführt werden, desto kürzer sind die durchschnittlichen Ausfallzeiten der Anlage, und desto kleiner also auch das mittlere Risiko. In diesem Abschnitt wird der Zusammenhang zwischen dem Inspektionsintervall und der Nichtverfügbarkeit einer verdeckten Funktion abgeleitet.

Für das technische Modell verwenden wir in der Regel die Vereinfachung einer konstanten Ausfallrate  $\lambda$  (mit einer exponentiellen Verteilung der Zeit zwischen zwei

Ausfällen). In diesem Fall lässt sich die Nichtverfügbarkeit  $N(\Delta)$  in Abhängigkeit des Inspektionsintervalls  $\Delta$  einfach berechnen.

Die Nichtverfügbarkeit  $N(\Delta)$  entspricht dem Anteil der Zeit, während der die Anlage nicht funktionsfähig ist, gemittelt über den gesamten Lebenszyklus der Anlage. Gehen wir von einer konstanten Ausfallrate  $\lambda$  aus und einem konstanten Inspektionszyklus  $\Delta$ , und nehmen wir an, dass die Anlage bei der Inspektion sofort ersetzt wird, wenn sie in einem Fehlerzustand angetroffen wird, dann können wir die den Erwartungswert der Nichtverfügbarkeit während eines Inspektionszyklus  $[0, \Delta]$  folgendermassen berechnen:

$$(0.49) \quad N(\Delta) = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} f(t) \cdot (\Delta - t) dt$$

Dabei ist  $f(t)$  die Wahrscheinlichkeitsdichte für einen Ausfall zur Zeit  $t$ .  $f(t)dt$  ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Anlage im Intervall  $[t, t+dt]$  ausfällt. Falls dies passiert, kommt es zu einer Downtime von  $(\Delta - t)$ . Das Integral ist also die erwartete Downtime während des Inspektionsintervalls. Teilt man dies durch die Intervalllänge, ergibt sich gerade die Nichtverfügbarkeit.

Im Fall einer konstanten Ausfallrate (unabhängig vom Alter der Anlage) ist die Wahrscheinlichkeitsdichte gegeben durch:

$$(0.50) \quad f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

Damit erhalten wir die Nichtverfügbarkeit in Abhängigkeit des Inspektionsintervalls:

$$(0.51) \quad N(\Delta) = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} \lambda e^{-\lambda t} \cdot (\Delta - t) dt = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda \Delta}}{\lambda \Delta}$$

Im Fall einer kleineren Ausfallrate,  $\lambda \Delta \ll 1$  (Die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall während einer Inspektionsperiode, dies entspricht dem typischen Fall) hat die Nichtverfügbarkeit eine vereinfachte Form:

$$(0.52) \quad N(\Delta) \approx \frac{\lambda \Delta}{2}$$

Dies kann einfach interpretiert werden: Ausfälle des Systems treten mit der Rate  $\lambda$  auf, und die Downtime beträgt im Durchschnitt  $\Delta / 2$ .

## Literaturverzeichnis

- 
- [1] Tobias, P. A. and Trindade, D. (2011), **Applied reliability**. CRC Press.
- 
- [2] Reliability Analytics (2018): **Confidence Limits - Exponential Distribution**. [https://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/confidence\\_limits\\_exponential](https://reliabilityanalyticstoolkit.appspot.com/confidence_limits_exponential).
- 
- [3] Dep. Of Defense USA (1998), **Electronic Reliability Design Handbook**, MIL-HDBK-338B, pp. 8-43.
- 
- [4] Bundesamt für Strassen ASTRA (2009), **ASTRA 89002 Einführung Risikomanagement ASTRA – Grundlagen (Stand 2009)**
- 
- [5] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012), **ASTRA 83003 Managementsystem für die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen der Schweizer Nationalstrassen (EMS-CH)**
- 
- [6] Moubray, J. (1997), **Reliability-Centered Maintenance**. Second Edition, INDUSTRIAL PRESS INC
- 
- [7] Jardine, A.K.S., Tsang, A.H.C. (2013), **Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications**. Second Edition, CRC Press.
- 
- [8] Matyas, K. (2013), **Instandhaltungslogistik: Qualität und Produktivität steigern**, 5. Auflage, Carl Hanser Verlag.
- 
- [9] C. Heitz, Goren L. (2014), **On the economics of asset management**. Proc. Workshop on Production Economics, Innsbruck, Feb 2014, pp 89-102.
- 
- [10] Uddin, W., Hudson, and Haas, R. (2013), **Public Infrastructure Asset Management**, 2<sup>nd</sup> Edition, Chapter 15, McGraw-Hill Professional.
- 
- [11] Schweizerische Normenvereinigung (2001), **Begriffe der Instandhaltung**, SN EN 13306:2001
- 
- [12] ISO (2009), **Risk management – Principles and guidelines**, International Organization for Standardization, Genf.
- 
- [13] Smith C. (2005) **Reliability, maintainability, and risk: Practical methods for engineers**, Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford.
- 
- [14] Khan, F.I. und M.M. Haddara (2003), **Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 16 (6), pp. 561–573.
- 
- [15] Krishnasamy, L., F. Khan und M. Haddara (2005), **Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 18, pp. 69–81.
- 
- [16] Aven, T. (2008), **Risk Analysis in Maintenance**. In: Kobbacy, K.A.H, Murthy, D.N.P: (Eds.): Complex Systems Maintenance Handbook, Springer, pp. 437-458.
- 
- [17] Apeland, S. und T. Aven (2000), **Risk based maintenance optimization: foundational issues**, Reliability Engineering and System Safety, 67, pp. 285–292.
- 
- [18] Arunraj, N.S. und J. Maiti (2007) **Risk-based maintenance - Techniques and applications**, Journal of Hazardous Materials, 142 (3), pp. 653-661.
- 
- [19] Nathwani, J.S., N.C. Lind und M.D. Pandey (2009), **Engineering decisions for life quality**, Springer series in reliability engineering, Springer, London.
- 
- [20] Matyas, K. (2013), **Instandhaltungslogistik**, Carl Hanser Verlag, München.
- 
- [21] Patankar, M.S., und J.C. Taylor (2004), **Risk Management and Error Reduction in Aviation Maintenance**, Ashgate Publishing Ltd, Aldershot.
- 
- [22] De Almeida, A.T., C.A.V. Cavalcante, M.H. Alencar, R.J.P. Ferreira, A.T. de Almeida-Filho und T.V. Garcez (2015), **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis**, International Series in Operations Research & Management Science, Springer, Cham.
- 
- [23] Aven, T. (2008), **Risk analysis: assessing uncertainties beyond expected values and probabilities**, John Wiley & Sons, Chichester.
- 
- [24] Fischer, K., J. Kohler, M. Fontana, and M.H. Faber (2012), **Wirtschaftliche Optimierung im vorbeugenden Brandschutz**, Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- 
- [25] Fischer, K. (2014), **Societal decision-making for optimal fire safety**, IBK Bericht, 357, Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Zürich.
- 
- [26] VSS (2006), **Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr - Grundnorm**, SN 641 820, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich.
- 
- [27] ASTRA (2012), **Fachkonzept EMS-CH**, Dokument ASTRA 83003, V4.00, Bundesamt für Strassen, Bern.
-

- 
- [28] Heitz, C., S. Kleger und J. Sigrist (2013), **From Maintenance Management to Asset Management: Shifting the view from functional behavior of assets to value creation with assets**, 2nd World Maintenance Forum, Lugano.
- 
- [29] Heitz, C., L. Goren und J. Sigrist (2015), **Decision Making in Asset Management: Optimal allocation of resources for maximizing value realization**, proceedings of the 10th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM). Lect.Notes Mechanical Engineering, Tampere.
- 
- [30] Brandenburg, H., R. Homann und D. Kalaitzis (2008), **Entwicklung und Einführung einer risikobasierten Instandhaltungsstrategie bei den Stadtentwässerungsbetrieben Köln**, KA Abwasser Abfall, 55 (12), pp. 1335-1340.
- 
- [31] Berger, J.O. (1985), **Statistical decision theory and Bayesian Analysis**, 2nd Ed, New York, Springer-Verlag.
- 
- [32] Koch, K.-H. (2000), **Einführung in die Bayes-Statistik**, Springer, Berlin.
- 
- [33] Held, L. (2008), **Methoden der statistischen Inferenz. Likelihood und Bayes**, Springer Spektrum, Heidelberg.
- 
- [34] Gemperli, S. und C. Heitz (2013), **Anwendung der Bayesian Statistik um Ausfallwahrscheinlichkeiten besser abschätzen zu können** - Kombination von Vorwissen und beobachteten Daten, technischer Bericht, ZHAW, Winterthur.
- 
- [35] Capel, M. und C. Heitz (2014), **Empirical Behavior of the Likelihood Function for a Bayesian Parameters Estimation of a Weibull Ageing Model**, technischer Bericht, ZHAW, Winterthur.
- 
- [36] Faber, M. H. (2001), **Risk based inspection and maintenance planning**. proceedings to international workshop, Zürich, Juni 2001, Birkhäuser Verlag.
- 
- [37] Straub, D. und M.H. Faber (2005), **Risk based inspection planning for structural systems**, Structural Safety, 27 (4), pp. 335-355.
- 
- [38] Straub, D. (2004), **Generic approaches to risk based inspection planning for steel structures**, vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich, Zürich.
- 
- [39] Becker, T., J.P. Klatt und C. von Hirschhausen (2004), **Der Betriebsdienst auf Bundesfernstrassen: Reformoptionen, empirische Evidenz und wirtschaftspolitische Schlussfolgerungen**, TU Berlin, Arbeitsbericht Workpackage 5.6 Transport Institutions in the Policy Process (TIPP), Berlin.
- 
- [40] ASFiNAG (2016), **Autobahnen- und Schnellstrassen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft**, www.asfinag.at, Wien.
- 
- [41] HTMA (2016), **Highways Term Maintenance Association**, www.htma.info, London.
- 
- [42] CBO (2011), **Spending and Funding for Highways**, Economic and Budget Issue Brief, Congressional Budget Office, Washington.
- 
- [43] Vennegeerts, H. (2004), **Technische und wirtschaftliche Bewertung der Instandhaltung in elektrischen Verteilnetzen**, Aachener Beiträge zur Energieversorgung, Klinkenberg Verlag, Aachen.
- 
- [44] Wenk (2005), **SIA 2018 – Überprüfung bestehender Gebäude bezüglich Erdbeben**, DGEB-Publikation, 13, D-A-CH-Tagung 2005 in Köln – Aktuelle Themen des Erdbebeningenieurwesens und der Baudynamik, Zürich.
- 
- [45] Balzer, G. und C. Schorn (2011), **Asset Management für Infrastrukturanlagen – Energie und Wasser**, Springer, Berlin.
- 
- [46] Amadi-Echendu, J. E., (2010), **What is engineering asset management? Definitions, Concepts and Scope of Engineering Asset Management**, Springer, London.
- 
- [47] Lloyd, C. (2010), **Asset Management – Whole-life management of physical assets**, Thomas Telford, London.
- 
- [48] Hastings, N.A. J. (2010), **Physical Asset Management**, Springer, London.
- 
- [49] Rouge, N. und O. Bernard (2016), **Gestion des actifs hydroélectriques**, Branche Centrales Hydrauliques, Bulletin electro suisse, 2, pp. 15-18.
- 
- [50] Bundesamt für Strassen ASTRA, **Tunnel auf dem Nationalstrassennetz**, ASTRA v4.5.2015 (TUSI2014), <https://www.astra.admin.ch/astra/de/home/themen/nationalstrassen/tunnelsicherheit.html>
- 
- [51] Eidgenössische Finanzkontrolle (EFK) (19.12.2017), **Wirtschaftlichkeit der Gebietseinheiten und deren Aufsicht** – Bundesamt für Strassen, EFK-16549, [https://www.efk.admin.ch/images/stories/efk\\_dokumente/publikationen/ sicherheit\\_und\\_umwelt/verkehr\\_u nd\\_umwelt/16549/16549BE\\_Endg%C3%BCltige\\_Fassung\\_V04.pdf](https://www.efk.admin.ch/images/stories/efk_dokumente/publikationen/ sicherheit_und_umwelt/verkehr_u nd_umwelt/16549/16549BE_Endg%C3%BCltige_Fassung_V04.pdf)
-

# 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: 06.11.2018

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: AGT 2015/004  
Projekttitle: Untersuchung, Entwicklung und Anwendung einer Risikostrategie für den Unterhalt von Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA)  
Enddatum: 31.12.2018

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde eine praxistaugliche Methodik zur Anwendung der risikobasierten Instandhaltung entwickelt. In 6 standardisierten Phasen kann der Zusammenhang zwischen gewählter Instandhaltungsstrategie (Tätigkeiten, Häufigkeiten), deren Kosten und resultierendes Risiko einer Anlage ermittelt werden. Mit dieser Methode konnte erstmals im BSA-Kontext quantitativ der Zusammenhang zwischen den Ausgaben für Wartung und Instandhaltung und dem daraus resultierenden Risiko ermittelt werden. Diese Standardisierung erlaubt es einerseits für eine gegebene Risikoschranke (akzeptiertes Risiko) die minimal notwendigen Kosten zu ermitteln. Umgekehrt kann für ein gegebenes Gesamtbudget das minimale damit erreichbare Risiko ermittelt und die dazugehörige Instandhaltungsstrategie identifiziert werden.

Die Resultate zeigen, dass durch eine Änderung der Instandhaltungsstrategie für die innerhalb des Forschungsprojekts modellierten Wartungstätigkeiten sowohl die Gesamtkosten auch das Gesamtrisiko um bis zu rund 20% reduziert werden können.

Ein weiterer Vorteil dieser standardisierten Methode ist, dass durch die konsequente Verknüpfung von Instandhaltungstätigkeiten und den zugehörigen Risiken eine einheitliche Wissenslage über die positiven Wirkungen der verschiedenen Tätigkeiten entsteht. Dies wird zu einer Harmonisierung und Optimierung der Instandhaltungsaktivitäten der verschiedenen Betreiber führen und kann das lokal vorhandene Expertenwissen in optimaler Weise für das Gesamtportfolio der Schweizer BSA nutzbar machen.

Eine Einschätzung des Potentials bei einer schweizweiten Einführung zeigt auf, dass die jährlichen Wartungskosten um rund 2.8 Mio. CHF gesenkt werden könnten, ohne das Gesamtrisiko über alle Tunnel zu erhöhen. Gesehen auf die gesamten Wartungskosten in Tunneln bedeutet dies eine mögliche Kostenreduktion von bis zu 12%.

Zielerreichung:

Folgende Ziele wurden im Forschungsantrag formuliert:

- 1) Entwicklung eines Konzepts zur Anwendung RBM  
-> Erfüllung durch Kapitel 5 & 6
- 2) Quantitative Abschätzung der Kosteneinsparung  
-> Erfüllung durch Kapitel 8
- 3) Quantitative Abschätzung der Risikoreduktion bei gleichen Kosten  
-> Erfüllung durch Kapitel 7.6.2
- 4) Pilotanwendung auf ein Portfolio von BSA-Einheiten  
-> Erfüllung durch Kapitel 7

Alle Ziele wurden erfüllt und sind im Bericht dokumentiert.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Resultate der Pilotanwendungen haben gezeigt, dass Optimierungspotenzial besteht: sowohl das Gesamtrisiko als auch die Gesamtkosten können mit einer optimierten Instandhaltungsstrategie reduziert werden. Als Gesamtfazit ist also festzuhalten, dass die Einführung einer risikobasierten Instandhaltung für die BSA der Schweizer Tunnel sowohl aus finanziellen als auch aus übergeordneten Qualitätsaspekten sinnvoll ist.

Publikationen:

Zum Zeitpunkt des Projektabschlusses sind ausser der offiziellen Publikation durch das ASTRA keine weiteren Publikationen geplant.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Schtalheim

Vorname: Uri

Amt, Firma, Institut: ASE Analysis Simulation Engineering GmbH

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



## FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Das Hauptziel des Forschungsprojektes umfasste die Bereitstellung einer risikobasierten Methodik für den praktischen Einsatz bei der Planung und Beurteilung der Instandhaltung von Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA). Dieses Ziel wurde mit der entwickelten Methodik erreicht. Die Methodik ermittelt den Zusammenhang zwischen Instandhaltungsstrategie (welche Tätigkeiten werden mit welcher Häufigkeit ausgeführt?), deren Kosten und dem Risiko. Mit dieser Methode kann quantitativ der Zusammenhang zwischen den Ausgaben für Wartung und Instandhaltung und dem daraus resultierenden Risiko ermittelt werden. Über die oben genannte Hauptzielsetzung hinaus, schafft die Methodik eine Wissenslage zur Beurteilung von Instandhaltungstätigkeiten und deren Wirksamkeit.

##### Umsetzung:

Die Methodik wurde an konkreten Pilotanwendungen der Gebietseinheit 1 (Adaptationsbeleuchtung, Lüftung, VM-System, Brandmeldeanlage und Notstromanlage) auf ihre Praxistauglichkeit hin überprüft. Die Resultate zeigen, dass durch eine Änderung der Instandhaltungsstrategie für die innerhalb des Forschungsprojekts modellierten Instandhaltungstätigkeiten sowohl die Gesamtkosten als auch das Gesamtrisiko optimiert werden können.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Es besteht kein weitergehender Forschungsbedarf, jedoch muss die Methodik für eine breite Anwendung in die Praxis überführt werden. Dabei müssen die Instandhaltungstätigkeiten harmonisiert und modelliert werden.

##### Einfluss auf Normenwerk:

--

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Bachofner

Vorname: Patrick

Amt, Firma, Institut: Bachofner & Partner AG

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:



## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter [www.astra.admin.ch](http://www.astra.admin.ch) (*Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare*) heruntergeladen werden.