



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral des routes OFROU

DOCUMENTATION

DANGERS NATURELS SUR LES ROUTES NATIONALES : CONCEPT DE RISQUE

*Méthodologie basée sur les risques pour l'évaluation,
la prévention et la maîtrise des dangers naturels
gravitationnels sur les routes nationales*

*Édition 2012 V2.20
ASTRA 89001*

Impressum

Auteurs / Groupe de travail

Gogniat Bernard	(OFROU N-SFS, président)
Trocmé Maillard Marguerite	(OFROU N-SFS)
Huber Marc	(OFROU I-ES)
Arnold Philippe	(OFROU I-ES)
Vollmer Urs	(OFROU I-3)
Rieder Urban	(OFROU I-2)
Sandri Arthur	(OFEV Division prévention des dangers)
Raetzo Hugo	(OFEV Division prévention des dangers)
Dorren Luuk	(OFEV Division prévention des dangers)
Egli Thomas	(PLANAT, coordination des recherches c/o Egli Engineering)
Eberli Josef	(Canton de Nidwald, ingénieur cantonal)
Knuchel Reto	(Canton des Grisons, entretien des routes)
Kienholz Hans	(Université de Berne, Institut géographique)
Donzel Michel	(Groupe de recherche sur les ouvrages d'art)
Utelli Hans-Heini	(IMPULS AG, suivi)
Perren Bernhard	(IMPULS AG, suivi)

Traduction (version originale en allemand)

Services linguistiques OFROU (traduction française et traduction italienne)

Éditeur

Office fédéral des routes OFROU
Division réseaux routiers N
Standards et sécurité de l'infrastructure SSI
3003 Berne

Diffusion

Le document est téléchargeable gratuitement sur le site www.astra.admin.ch.

© OFROU 2012

Reproduction à usage non commercial autorisée avec indication de la source.

Table des matières

	Impressum	2
	Résumé	5
1	Introduction	9
1.1	Situation initiale	9
1.2	Données de base utilisées	9
1.3	Structure du présent rapport	9
2	Modèle de base de l'analyse des risques	10
2.1	Objectifs	10
2.2	Méthodes existantes	10
2.3	Le concept de risque	11
2.4	Notion de risque et paramètres du risque	13
2.5	Procédure générale	15
2.6	Objectif visé, délimitation du système et travaux préparatoires	15
2.7	Périmètre	16
3	Analyse des dangers	18
3.1	Généralités	18
3.2	Carte des phénomènes	22
3.3	Processus: « Chute »	23
3.4	Processus: « Eau »	29
3.5	Processus: « Avalanches »	33
3.6	Processus: « Glissements »	36
3.7	Processus « Effondrement / Affaissement »	43
3.8	Documentation: analyse des dangers et résultats à fournir	45
4	Analyse de l'exposition	46
4.1	Types de dommages possibles	46
4.2	Objets menacés	53
5	Analyse des conséquences	57
5.1	Risques pour les personnes	57
5.2	Risques matériels	57
6	Calcul du risque	60
6.1	Généralités	60
6.2	Type de dommage possible a: impact direct	61
6.3	Type de dommage possible b: télescopage	63
6.4	Type de dommage possible c: ensevelissement	64
6.5	Type de dommage possible d1: disponibilité – fermeture après évènement	66
6.6	Type de dommage possible d2: disponibilité – fermeture préventive	67
6.7	Addition de risques	68
6.8	Documentation relative au calcul du risque et produits à remettre	69
7	Appréciation des risques et des mesures	70
7.1	Généralités	70
7.2	Critères de contrôle	70
7.3	Efficience et efficacité des mesures	71
7.4	Procédé de planification et d'appréciation des mesures	72
7.5	Synthèse du procédé	77
	Annexes	79
	Bibliographie	105
	Liste de modifications	109

Résumé

Situation initiale

Les dangers naturels gravitationnels tels que les avalanches, les chutes de pierres et de blocs, les coulées de boues et les inondations, mais aussi les glissements de terrain menacent régulièrement certains tronçons du réseau des routes nationales suisse. Les tout récents éboulements survenus sur la N2 près du Gothard illustrent ces faits de manière impressionnante, tout comme les intempéries de 2005 ou les avalanches de l'hiver 1999.

Dans ce contexte, divers projets ont été lancés, ou sont en cours, par l'Office fédéral des routes (OFROU), en collaboration avec l'OFEV, la PLANAT, les cantons ainsi que les Hautes Écoles. Ces projets s'articulent autour d'une gestion des dangers naturels fondée sur les risques, applicable à l'ensemble du territoire suisse et intégrant tout le réseau des voies de communication. L'utilité de ces projets réside dans la gestion uniforme et ciblée des risques et dans la transparence des moyens utilisés à cet effet.

Avec le **sous-projet n° 3: « Élaboration d'une procédure pour la gestion des dangers naturels gravitationnels »**, l'OFROU veut établir une base permettant d'évaluer les dangers naturels gravitationnels (avalanches, éboulements, crues, glissements de terrain et affaissements) qui menacent les routes nationales suisses, en suivant des critères uniformes et transparents, et de planifier des mesures de protection contre ces dangers sous l'aspect de critères coût/efficacité.

Le sous-projet n° 3 est suivi par des représentants de l'OFROU (divisions I et R, filiales et unités territoriales), de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV, division Prévention des dangers), de la plate-forme PLANAT, des Hautes Écoles et des cantons.

La méthodologie est basée sur les directives et recommandations de la Confédération en vigueur pour l'évaluation des dangers, sur les nouvelles méthodes d'analyse et d'appréciation des risques développées par la PLANAT, ainsi que sur les enseignements tirés des trains de recherches AGB1. Pour assurer la concordance avec le réseau routier, ces données de base ont été adaptées aux particularités et aux besoins des routes nationales.

Objectifs

L'utilisation de la méthodologie permet d'atteindre les objectifs suivants:

- la menace qui pèse sur le réseau des routes nationales du fait de dangers naturels gravitationnels peut être évaluée suivant une méthodologie unique en ce qui concerne le type de danger, son intensité et sa probabilité;
- à partir de là, il est possible de chiffrer et de comparer les conséquences (dommages) inhérentes à ces dangers pour les usagers et les exploitants des routes, ainsi que les risques subséquents;
- les résultats peuvent être intégrés à la gestion des risques opérée au niveau de l'ensemble de l'OFROU et y être comparés à d'autres risques;
- la comparaison des risques existants avec les critères d'examen permet de faire des déductions sur les actions requises;
- des priorités peuvent être définies pour la planification de mesures;
- on est en mesure d'évaluer la mesure ou la combinaison de mesures optimales à partir de réflexions sur le rapport coût-utilité;
- il est possible de privilégier et de mettre en œuvre des mesures au meilleur coût.

Le concept de risque

Le concept de risque servant de base à la méthodologie comprend les étapes suivantes:

- **Analyse des risques** – Que peut-il se passer ? Cette analyse comprend l'analyse des dangers, l'analyse de l'exposition et l'analyse des conséquences.
- **Évaluation des risques** – Que peut-on accepter ?
- **Planification des mesures** - Que faut-il faire ?

Analyse des dangers

L'analyse des dangers évalue la probabilité et l'étendue des dangers naturels. La méthodologie garantit que le choix des scénarios déterminants pour le danger potentiel se fait selon des critères homogènes et transparents. Ces critères sont basés sur l'analyse d'événements historiques, l'analyse de données statistiques, le relevé de témoins muets sur le terrain, l'appréciation de la prédisposition du terrain et l'évaluation des mesures de protection existantes et de la forêt de protection. Les scénarios établis ainsi sur l'origine du danger pour chaque source de processus permettent de délimiter les rayons d'action le long des routes nationales en tenant compte des conditions particulières, de les représenter sous forme de cartes d'intensité et de collecter les paramètres significatifs pour évaluer les dommages occasionnés.

Analyse de l'exposition et des conséquences

Cette étape de travail consiste à quantifier les dommages et les risques causés par les dangers naturels. Sont pris en considération:

- **les risques pour les personnes**, entraînés par un impact direct ou un télescopage avec un obstacle sur les routes nationales;
- les risques pour les personnes générés par des impacts directs sur des installations annexes, tels que les aires de repos, les centres d'entretien, etc.
- **les risques matériels**, résultant des travaux de déblaiement et de remise en état suite à un événement naturel;
- **les risques de disponibilité** qui interviennent lorsqu'un tronçon de route doit être fermé préventivement ou ultérieurement par suite d'un événement naturel. Pour les véhicules concernés, il s'ensuit des trajets de déviation plus longs qui doivent être chiffrés à l'aide du modèle de trafic IVT-ETH.

Tous les risques sont quantifiés séparément et convertis en valeur monétaire pour être comparés.

Appréciation des risques et planification de mesures

L'analyse des risques a pour but de vérifier si les risques identifiés sont supportables pour l'exploitant des équipements et pour la société. D'autre part, elle stipule des procédés et des critères qui permettent d'examiner les mesures et les combinaisons de mesures sous leur rapport coût/utilité. L'objectif de l'appréciation des risques est d'identifier les risques intolérables et de fournir des critères permettant de prendre des décisions optimales quant aux mesures à prendre.

Pour les **risques individuels de décès** (p. ex. pendulaires qui parcourent quatre fois par jour un tronçon de route déterminé), on fixe une limite de 10^{-5} , dérivée de la probabilité générale de décès d'une personne. Ce critère d'examen constitue une condition-cadre qui doit permettre d'identifier des tronçons de route présentant des risques individuels de décès plus élevés.

L'appréciation des **risques collectifs** se fait à l'aide du taux coût/utilité, sauf si des facteurs macroéconomiques et/ou politiques plus importants doivent impérativement être pris en considération. Des mesures de réduction des risques collectifs peuvent être prises tant que le quotient coût/efficacité ≥ 1 . Ce chiffre constitue une valeur limite. La méthodologie détermine la manière dont sont calculés les coûts et l'utilité (= risque réduit par une mesure) annuels. Pour comparer les risques menaçant les personnes et les risques matériels et pour les convertir en valeur monétaire, on utilise le montant du principe des coûts marginaux.

La méthodologie stipule de surcroît la manière dont la **combinaison optimale de mesures** sera constituée parmi les mesures dont le quotient coût/efficacité ≥ 1 .

L'expérience a montré qu'il existe de très nombreux tronçons de route affectés par des dangers naturels. Pour des raisons de ressources, il est impossible de commencer la planification des mesures partout en même temps. La méthodologie montre en vertu de quels critères les **priorités** doivent être définies pour la planification des mesures.

Situation actuelle et perspectives

La présente méthodologie a été testée dans le projet de recherche AGB1 – AGB2007/201: « Testregion Risikomethoden » (Région test Méthodes de gestion des risques) pour déterminer sa comparabilité aux résultats d'autres risques et l'applicabilité des résultats dans la gestion des risques de l'OFROU. D'autre part, l'application pratique de la méthodologie a été testée dans un projet pilote réalisé au Gothard, sur un tronçon de route d'une longueur totale d'environ 30 km. Les deux projets ont été analysés du point de vue de leur procédure. La présente version 2.00 de la documentation a été adaptée en fonction des expériences faites.

Dans une prochaine étape, cette méthodologie deviendra obligatoire au titre de directive interne pour l'ensemble de l'OFROU.

1 Introduction

1.1 Situation initiale

Les dangers naturels gravitationnels tels que les avalanches, les chutes de pierres et de blocs, les coulées de boues et les inondations, mais aussi les glissements de terrain menacent régulièrement certains tronçons du réseau des routes nationales suisse. Les tout récents éboulements survenus sur la N2 près du Gothard illustrent ces faits de manière impressionnante, tout comme les intempéries de 2005 ou les avalanches de l'hiver 1999.

L'Office fédéral des routes (OFROU) veut faire évaluer les routes nationales suisses menacées par des dangers naturels gravitationnels selon des critères uniformes et transparents qui permettront de comparer les résultats venant des différentes régions et de gérer de manière homogène la protection contre les dangers naturels. D'autre part, le but est d'harmoniser la gestion des risques dans le contexte des dangers naturels avec la gestion des risques pour l'ensemble des activités de l'OFROU.

Le présent rapport expose la procédure méthodologique nécessaire à une gestion (évaluation, prévention et maîtrise) des dangers naturels gravitationnels fondée sur les risques comme celle qui doit être utilisée à l'avenir par l'OFROU.

1.2 Données de base utilisées

La présente méthode est basée sur le Guide du concept de risque, élaboré dans le cadre du plan d'action de la PLANAT 2006-2008 [48] et sur la procédure élaborée dans le cadre du projet « Gefahrenbeurteilung, Risikoanalyse, Massnahmenplanung Nationalstrassen Kanton Bern » [43].

Les autres données de base utilisées sont citées dans les chapitres et sous-chapitres respectifs. Toutes les données de base utilisées sont réunies à la fin du document, dans le chapitre Bibliographie.

1.3 Structure du présent rapport

Le présent rapport s'articule comme suit:

Chapitre 1	Introduction
Chapitre 2	Modèle de base de l'analyse des risques
Chapitre 3	Analyse des dangers
Chapitre 4	Analyse de l'exposition
Chapitre 5	Analyse des conséquences
Chapitre 6	Calcul du risque
Chapitre 7	Appréciation des risques et des mesures
Chapitre 8	Annexes

2 Modèle de base de l'analyse des risques

2.1 Objectifs

Les objectifs fixés pour cette méthode ont été en partie dérivés de [13], formulés dans le rapport du 9 janvier 2008 [41] et ajustés au cours de la réunion du groupe d'encadrement, le 14 janvier 2008. L'application de cette méthode permettra de répondre aux questions suivantes:

- les tronçons de route de l'ensemble du réseau des routes nationales suisse, concernés par des dangers naturels sont connus;
- le type, l'intensité et la probabilité d'occurrence des processus dangereux sont connus;
- les conséquences (dommages) inhérentes pour les usagers et les exploitants des routes ainsi que les risques en découlant sont connus;
- les résultats peuvent être intégrés à la gestion des risques pratiquée au niveau de l'ensemble de l'OFROU et y être comparés à d'autres risques;
- la comparaison des risques existants avec les critères d'examen permet de déduire les actions requises;
- des priorités peuvent être posées pour la planification de mesures;
- on est en mesure d'évaluer la mesure ou la combinaison optimale de mesures à partir de réflexions sur le rapport coût-utilité;
- il est possible de privilégier et de mettre en œuvre des mesures au meilleur coût;
- les produits, notamment les données numériques, doivent être compatibles avec d'autres applications de l'OFROU (MISTRA) et susceptibles d'être complétés, développés et mis à jour;
- les produits doivent être faciles à comprendre et à manipuler aux différents niveaux des utilisateurs et des décideurs.

2.2 Méthodes existantes

En Suisse, il existe différentes approches méthodologiques pour analyser les risques induits par les dangers naturels le long des voies de communication. Ces approches sont toutes plus ou moins basées sur les publications de l'OFEFP (ancien OFEV) ([23]) et de C. Wilhelm ([59] resp. [60]), qui se penchent explicitement sur le thème de l'analyse des risques dans le cadre des dangers naturels.

Les différences entre les diverses approches résident moins dans le concept de risque servant de base de travail, que dans la finesse du traitement et dans la quantification explicite des risques. On trouve surtout des différences au niveau du nombre et du type de scénarios qui doivent être pris en compte pour l'appréciation des dangers et au niveau des types de dommages observés. Le rapport de la PLANAT 2004 ([52]) expose différentes approches méthodologiques pour la gestion des risques émanant des dangers naturels.

Dans le cadre du projet « Gefahrenbeurteilung, Risikoanalyse, Massnahmenplanung Naturgefahren Nationalstrassen Kanton Bern » [43], les bases précitées ont été utilisées pour l'élaboration d'une procédure méthodologique.

Parallèlement à l'élaboration de la présente méthodologie, des directives ont été développées dans le cadre du projet AGB2005/102 « Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung » [11]. Elles constituent la base méthodologique de l'appréciation des risques dans les divers domaines de sécurité de l'OFROU. Le respect de ces directives doit garantir la comparabilité des risques sur l'ensemble de divers domaines de la sécurité, soutenir et améliorer la prise de décisions et permettre ainsi une répartition des ressources efficace et acceptable sur le plan de la société. Dans le même temps, un rapport a été établi dans le cadre du mandat de recherche AGB2002/020 « Beurteilung von Risiken und Kriterien zur

Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten » [12].

Entre 2006 et 2008, PLANAT, la plate-forme nationale « Dangers naturels », a mis au point le « Leitfaden Risikokonzep Naturgefahren » (RIKO) [48] (Guide sur le concept de risque des dangers naturels). Ce guide doit constituer une base pour gérer les dangers naturels et donc contribuer à une gestion uniforme de ces dangers. Le projet « Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für die Raumplanung (PROTECT) » [49] a également été réalisé pendant la même période. Il énonce des principes uniformes pour apprécier les effets des mesures de protection dans le cadre de l'évaluation des dangers naturels gravitationnels.

Tout en s'appuyant sur les méthodes déjà existantes, la présente méthodologie est complétée au niveau des exigences spécifiques des routes nationales et de l'OFROU. Elle a pour but d'assurer que la procédure appliquée dans l'appréciation, l'évaluation et la gestion des dangers naturels à proximité des routes nationales soit homogène et transparente pour l'ensemble des processus. Elle répond aux conditions et aux besoins spécifiques rencontrés aux abords des routes nationales et assure la référence au réseau routier.

Elle garantit les interfaces avec les rapports, les directives et les bases méthodologiques élaborés pendant la même période.

D'autre part, il existe différentes directives de l'OFROU, généralement spécifiques à des processus ou même à des mesures, telles que la directive « zur Einwirkung infolge Steinschlag auf Schutzgalerien » [1] ou la documentation « Steinschlag: Naturgefahr für die Nationalstrassen. Überprüfung der bestehenden Galerien. » [3]. Au sein de l'OFROU, la hiérarchie des différents documents est réglemantée comme suit:

- instruction
- directive
- manuel technique
- documentation

2.3 Le concept de risque

L'idée fondamentale du concept de risque sur lequel repose la présente méthodologie comporte les volets ci-dessous (cf. Figure 2.1); elle est basée sur le « Leitfaden Risikokonzep » [48] :

- Analyse des risques (Que peut-il se passer?)
- Évaluation des risques (Que peut-on accepter?)
- Planification des mesures (Que faut-il faire?)

Ce modèle a été dérivé de l'analyse et de l'évaluation de problèmes de sécurité techniques et complexes, ainsi que de la planification des mesures inhérentes. Comme tout modèle, il ne reflète que partiellement la réalité. En ce sens, il représente une convention permettant une gestion uniforme et donc comparable des problèmes de sécurité. L'objectif du concept est de quantifier les risques autant que faire se peut et d'élaborer, à partir de cette quantification, des énoncés sur l'acceptabilité de ces risques ainsi que sur l'opportunité et la fiabilité des concepts de sécurité.

Le schéma de planification de la sécurité pour les dangers naturels qui sert de base à cette méthodologie est présenté en page suivante (adapté d'après [48]).

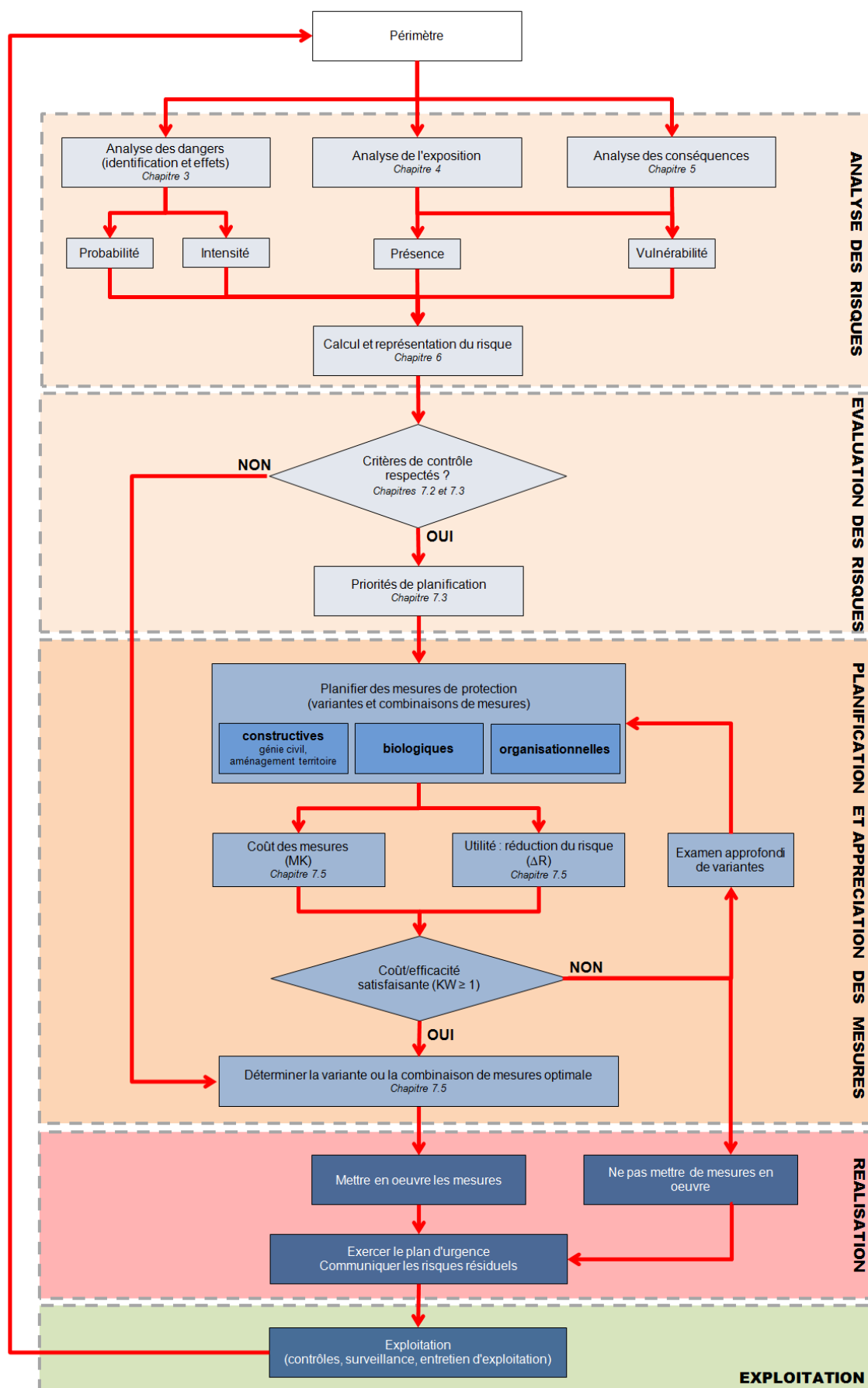


Fig. 2.1 Schéma de planification de la sécurité pour les dangers naturels (adapté d'après [48]).

Analyse des risques – Que peut-il se passer ? L'analyse des risques comporte l'analyse des dangers, l'analyse de l'exposition, l'analyse des conséquences et la détermination proprement dite des risques. En s'appuyant sur des scénarios donnés, on y détermine les facteurs et les circonstances qui contribuent au risque global.

Évaluation des risques – Que peut-on accepter? L'appréciation des risques montre si les risques identifiés se situent au-dessus ou au-dessous de critères d'appréciation définis (objectifs de protection) et si la protection présente des lacunes.

Planification et appréciation des mesures - Que faut-il faire ? Elles exposent les mesures et les moyens susceptibles de générer une réduction des risques et le train de mesures optimal pour atteindre les objectifs de protection ciblés.

2.4 Notion de risque et paramètres du risque

Notion de risque et formule du risque

Vu sous un angle général, le risque désigne la possibilité d'occurrence d'une conséquence indésirable, à savoir un dommage. Il y a risque lorsque des objets sont exposés à des effets dangereux et peuvent subir des dommages en raison de leur vulnérabilité. La formule du risque synthétisant ces corrélations peut être exprimée comme suit:

Risque $R = \text{ampleur des dommages } S \times \text{probabilité de dommages } p_s$

Risiko $R = \text{Schadenausmass } S \times \text{Schadenwahrscheinlichkeit } p_s$

Elle est traduite en valeur (statistique) des dommages attendus par an ou par évènement.

- L'ampleur des dommages est déterminée par:
 - le nombre de personnes ainsi que le nombre et la valeur des objets exposés à un évènement dangereux au moment où celui-ci survient effectivement,
 - l'effet physique (= intensité) de cet évènement et
 - la vulnérabilité des personnes, des objets ou d'un système concernés face à cet évènement.
- La probabilité des dommages est déterminée par:
 - la probabilité d'un évènement dangereux et
 - la probabilité que des personnes ou des biens se trouvent dans la zone menacée.

Types de dommages possibles

Un évènement naturel peut toucher des personnes, des objets ou des systèmes.

- **Dommages directs:**
 - des personnes peuvent être tuées ou blessées à la suite d'un évènement naturel;
 - les objets menacés (p. ex. bâtiments, infrastructure routière et ferroviaire, conduites, espaces verts, etc.) sont déplacés, endommagés ou même détruits par des évènements naturels. Le dommage correspond en règle générale au montant nécessaire à remettre l'objet dans l'état où il était avant l'évènement. Les dommages directs peuvent généralement être directement chiffrés en unités monétaires.
- **Dommages indirects (dommages subséquents):**
 - ce sont notamment les coûts inhérents à une interruption d'exploitation ou à des pertes de gain;
 - les dommages causés à la nature et à l'environnement, par exemple par des substances polluantes s'échappant d'un camion-citerne;
 - outre ces dommages, auxquels on peut plus ou moins attribuer une valeur, d'autres objets peuvent également être touchés sans qu'il soit tout simplement possible de leur donner une valeur économique. Ce sont surtout des objets culturels qui ne peuvent pas être remplacés en cas de dommage, ou seulement partiellement.

Le potentiel de dommages dont on doit tenir compte dans les analyses de risques des routes nationales est articulé en groupes de la façon suivante (voir également Fig. 4.1, page 47):

- **Personnes:** ce groupe englobe toutes les personnes qui se trouvent sur la chaussée ou sur des installations annexes placées sous la responsabilité de l'OFROU. On prend comme indicateur de dommage les victimes décédées. Les blessés ne sont pas pris en compte séparément.¹
- **Objets:** on entend par objets la chaussée et les ouvrages d'art qui s'y rattachent, tout comme l'ensemble des installations annexes placées sous la responsabilité de l'OFROU (UH-Peri, périmètre d'entretien). D'autres dommages causés à des objets tels que véhicules ou biens transportés ne sont pas pris en considération.
- **Disponibilité:** certains tronçons de routes ne sont plus disponibles pour les usagers de la route par suite d'une fermeture préventive ou consécutive à des événements naturels. Ces fermetures entraînent des dommages subséquents par les frais de déviation qu'elles occasionnent.

Fig. 2.2 Catégorisation possible des dommages (en italique: pris en compte dans la méthodologie, écriture normale: non pris en compte dans la méthodologie)

	Dommmages directs	Dommmages indirects
Dommmages internes	Décès de travailleurs de l'OFROU <i>Dommmages matériels causés à l'infrastructure</i>	Atteintes à l'image de marque
Dommmages externes	<i>Décès d'usagers de la route en général</i> Dommmages matériels aux véhicules et aux biens transportés Dommmages causés à la nature et à l'environnement	<i>Coûts des déviations suite à la fermeture de la route (disponibilité)</i>

Paramètres du risque

Un risque peut être déterminé aussi bien qualitativement que quantitativement. Si le risque est déterminé qualitativement, le paramètre du risque est relatif et sans unité.

Si le risque est quantifié, on pourra faire la différence entre le risque menaçant des personnes et le risque menaçant des biens matériels, d'une part, et entre les risques collectifs et les risques individuels, d'autre part.

- Lorsque l'on ne calcule le risque que pour un seul objet de dommage, on parle du risque lié à l'objet. Lorsque l'on considère le risque auquel sont exposés tous les objets menacés dans le système considéré comme collectif, on parle de risque collectif. Le **risque collectif** reflète le chiffre escompté de tous les dommages d'une unité de référence:
 - le **risque matériel** y est calculé en risque par an (ou valeur statistique annuelle des dommages attendus) et exprimé en [CHF par an].

¹Les coûts subséquents causés par des blessés lors d'un accident peuvent être considérables. Mais du fait que l'on manque de valeurs empiriques dans le domaine des dangers naturels pour pouvoir déterminer le nombre de blessés et l'ampleur de leurs blessures, seul le nombre de victimes décédées est pris en considération pour simplifier les conséquences à prendre en compte.

- Le **risque pour les personnes** y est calculé en risque par an et exprimé en [nombre de décès par an]. On peut alors en déduire dans combien d'années on peut s'attendre à une victime, statistiquement parlant. Pour pouvoir comparer le risque pour les personnes au risque matériel et pour additionner ces deux risques, il est possible de monétariser le risque pesant sur les personnes. On peut alors utiliser différents types de coûts:
 - les coûts marginaux, selon le concept de risque de la PLANAT [48],
 - les coûts sociaux liés aux accidents selon [5] (correspondant à 1,8 million de francs),
 - les coûts des accidents selon [14] (correspondant à 3,4 millions de francs).
- Les coûts marginaux sont fixés par l'Office fédéral du développement territorial ARE (*Value of statistical life (VOSL) : empfohlener Wert der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos in der Schweiz*).
- A partir du risque collectif se rapportant aux personnes, il est possible de déduire mathématiquement l'ampleur du risque pour l'individu se trouvant dans une zone menacée. On parle alors de **risque individuel de décès**, l'unité du risque individuel étant en règle générale la probabilité de décès par an ou par unité d'une activité déterminée (p. ex. par km parcouru en voiture)².

2.5 Procédure générale

L'analyse des risques est effectuée par étapes de la façon suivante (cf. Figure 2.1):

- **Objectif visé, délimitation du système et travaux préparatoires:** définition des objectifs de l'analyse des risques, délimitation du système à évaluer.
- **Analyse des dangers:** identification des dangers (fixation des scénarios déterminants et de leur probabilité d'occurrence) et analyse des effets (détermination de la nature, de l'ampleur et des effets physiques du processus).
- **Analyse de l'exposition:** identification de la nature et de l'emplacement des objets menacés, ainsi que de leur présence en termes de temps et de lieu.
- **Analyse des conséquences:** détermination de la sensibilité aux dommages (vulnérabilité) et de l'ampleur des dommages sur un objet en fonction de l'intensité du processus.
- **Détermination et représentation des risques:** calcul des paramètres déterminants les risques et représentation sur des cartes, des tableaux et des diagrammes.

La forme concrète de l'analyse des risques, notamment son niveau de détail et de quantification, dépend en premier lieu des objectifs poursuivis par cette analyse. L'un des facteurs limitatifs importants en termes de niveau de détail et de quantification est la qualité et le degré de quantification des données disponibles. Indépendamment des exigences posées à une analyse des risques, il conviendra de suivre la systématique présentée.

2.6 Objectif visé, délimitation du système et travaux préparatoires

Au début des travaux, avec les services responsables, il est nécessaire d'éclaircir les points suivants:

- Quelle est la problématique ?
- Quelles sont les personnes impliquées ?
- Quels objectifs poursuit-on en faisant cette analyse des risques ?
- Délimitation de l'appréciation sur le plan géographique et sur celui du contenu?
- Quelles sont les données de base disponibles auprès des services responsables?
- Quels sont les résultats finaux attendus?

² Dans la réalité, tous les individus constituent ensemble la collectivité, le risque collectif est le total de tous les risques individuels. Mathématiquement, le processus utilisé est le contraire, étant donné que les personnes menacées sont saisies comme collectivité dans un espace (p. ex. via la moyenne du trafic journalier (TJM)).

Sur la base de cette analyse de la situation, on peut fixer le niveau de détail nécessaire, resp. les coûts.

Parmi les travaux préparatoires, on compte, comme dans d'autres études similaires, l'acquisition des données de base nécessaires (voir également les chapitres suivants) et la prise de contact avec les services impliqués, avec des spécialistes de la discipline et du territoire concernés, ainsi qu'avec des connaisseurs locaux du terrain.

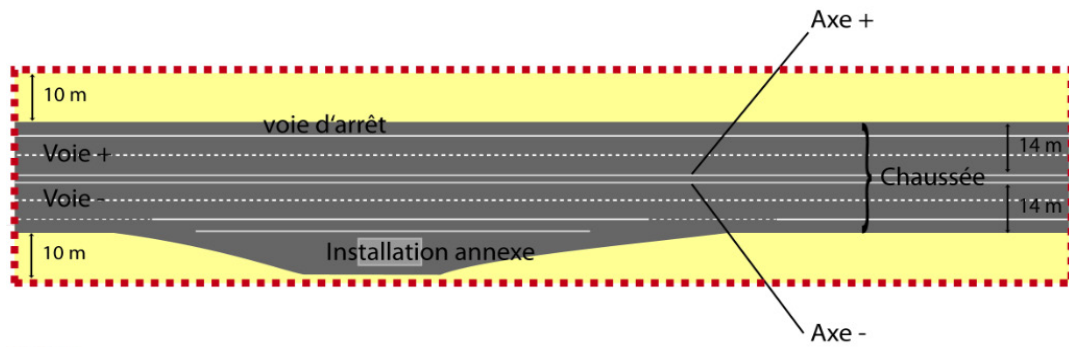
D'autre part, on doit déterminer l'organisation du projet, les compétences, les résultats intermédiaires attendus, les plannings, etc.

2.7 Périmètre

L'analyse des dangers et des risques, tout comme la planification des mesures, doit se référer au réseau des routes nationales, en tenant compte de tous les autres objets éventuels susceptibles de subir des dommages. Le potentiel de dommages déterminant englobe les zones et objets désignés dans l'application technique UH-PERI (périmètre d'entretien des routes nationales) de l'OFROU (voir également chap. 4.2). Les sources de processus doivent être étudiées en fonction du potentiel de danger qu'elles représentent pour les objets. Le périmètre exact d'investigation dépend des problèmes rencontrés. Il doit être défini en amont par le mandant ou en concertation avec lui.

Indépendamment de cela, le périmètre d'investigation d'un tronçon de route ou d'un objet peut être subdivisé comme suit (cf. Fig. 2.3):

- « Périmètre Potentiel de dommages »: il comprend en règle générale les objets décrits dans l'UH-PERI (périmètre d'entretien) + environ 10 m en aval et en amont. En cas de besoin, le « Périmètre Potentiel de dommages » peut toutefois être élargi (p. ex. pour l'appréciation des effets induits par des ouvrages de protection ou autres). Il constitue une partie du « Périmètre Évaluation des dangers ». Il ne faut pas oublier que les processus naturels dangereux:
 - peuvent se dérouler au-dessus de l'objet du dommage (p. ex. un cours d'eau passe au-dessus de la voûte d'une galerie),
 - peuvent avoir un effet direct sur l'objet du dommage (p. ex. le processus affecte la chaussée) ou
 - peuvent se dérouler sous l'objet du dommage (p. ex. un cours d'eau ou une avalanche passe sous un pont).
 On tiendra compte du fait que certains éléments de la construction (p. ex. piliers de pont, murs de soutènement, voûtes de galeries) peuvent être affectés par un processus dangereux ou par ses conséquences (p. ex. glissements de berges). Ce domaine fait donc, lui aussi, partie du « Périmètre Potentiel de dommages », même si la chaussée ou autres objets ne sont pas directement touchés par le processus. Il est en tout cas impératif de déterminer s'il y a menace. La décision doit être documentée par un expert en dangers. Si la construction est affectée, les éventuels dommages devront être estimés sur place (voir chapitre 5).
- « Périmètre Évaluation des dangers »: celui-ci englobe toutes les sources de processus susceptibles d'influer sur le tronçon de route ou l'objet examiné (= Périmètre Potentiel de dommages). Ce périmètre doit être délimité par le mandant. Au sein du « Périmètre Évaluation des dangers », certaines zones de processus ne concernent pas le Périmètre Potentiel de dommages. Les sources de processus évaluées qui ne sont pas déterminantes pour le Périmètre Potentiel de dommages doivent être documentées (cf. Fig. 3.2).



Périmètre Potentiel de Dommages

Fig. 2.3 Représentation schématique de la notion de « périmètre ».

3 Analyse des dangers

3.1 Généralités

Processus de dangers naturels observés

Description de la procédure pour les processus de dangers naturels suivants:

Fig. 3.1 Processus de dangers naturels traités dans la présente méthodologie

Processus majeurs	Processus de danger
Chute	Chute de pierres / de blocs
	Éboulements
	Chute de glace
Eau	Débordement avec épandage alluvial, inondation
	Débordement de laves torrentielles
	Érosion des berges / Affouillement
Avalanches	Avalanche coulante
	Avalanche poudreuse
	Glissement de neige
Glissements	Glissements permanents et tassements
	Glissements spontanés
	Coulées de boue
Effondrement / Affaissement	Effondrement du sol / dolines

Évaluation par source de processus

L'identification des dangers ainsi que l'analyse de leurs effets doivent être réalisées en référence à une source de processus précise. On entend par source de processus un territoire qui présente une prédisposition uniforme à la formation de dangers (cf. Fig. 3.2). Dans le cas des avalanches, il s'agit généralement du périmètre parcouru par l'avalanche incluant la zone de rupture. Dans le cas des dangers hydrologiques, ce sera le cours d'eau et son bassin hydrographique. Dans le cas des coulées de boues, des processus d'éboulements, des glissements de terrain et des zones avec effondrement / affaissement, ces périmètres doivent être délimités sur la base de critères et d'événements clairement documentés (voir chapitre 3.3).

- Les événements présentant des périodes de retour supérieures à 300 ans sont désignés comme dangers résiduels. Dans le cas des dangers hydrologiques, il s'agit des crues extrêmes (EHQ). Dans le cas des cours d'eau, le danger résiduel est déterminé autant que faire se peut dans l'analyse des dangers (étendue avec niveau d'intensité). Pour les autres phénomènes, les périodes de retour ne doivent être mentionnées que si l'on est en présence de situations dangereuses spécifiques, par exemple un danger d'écroulement connu ou une situation spéciale dans le bassin hydrographique d'un torrent. Ces circonstances doivent alors être discutées dans le rapport technique. Pour les récurrences supérieures à 300 ans, il n'est pas nécessaire de faire une détermination des risques.

Procédure de base

La procédure présentée ici reflète le niveau actuel de la technique en matière d'appréciation des dangers et fait l'objet de documentations dans les publications fédérales appropriées.

Fig. 3.4 Méthodologie d'évaluation des dangers

Étape	Remarques
Identification des dangers	
1. Acquisition, examen et analyse des données de base existantes	• Documents existants selon renseignements du mandant et connaissance du mandataire. • Cartes indicatives des dangers. • Cartes des dangers et autres investigations et rapports concernant les dangers naturels. • Cadastre des événements, documentations sur les événements et analyses des événements. • Cadastre des ouvrages de protection. • Plans de constructions existantes.
2. Analyse d'événements historiques	• Renseignements sur les événements, leurs causes et leurs effets dommageables. • Les événements doivent, si possible, être classés par rapport à des sources de processus. • Outre le cadastre des événements de l'OFROU, d'autres sources peuvent être éventuellement consultées, par exemple d'autres cadastres disponibles (de communes, de centrales électriques, des chemins de fer) ainsi que des bases de données (p. ex. OFEV, Institut WSL), des dossiers de projets (mandants comme mandataires), les connaisseurs locaux du terrain, les services en charge de la documentation des événements, des documents historiques, des archives, mais aussi les médias (journaux, Internet).
3. Analyse de l'état géologique, géomorphologique et hydrogéologique	• Carte des phénomènes selon le chapitre 3.2. • Analyse de la prédisposition aux processus (activité, mécanismes de déclenchement, modes d'action). • Subdivision des sources de danger en zones homogènes, présentant une prédisposition uniforme (appelées « sources de processus »). • Les vérifications et analyses à effectuer dans la zone de départ, de transit et de dépôt sont précisées dans les chapitres spécifiques du processus concerné.
4. Formulation des scénarios de base (appelés scénarios de formation des dangers)	• Les paramètres possibles de l'événement sont catégorisés à l'aide des scénarios selon Fig. 3.3. Les mesures existantes (se basant sur [49]³) et l'état actuel de la forêt doivent être pris en considération dans les scénarios. Les effets des mesures de protection existantes doivent faire l'objet d'une documentation sans lacunes et transparente, se référant aux scénarios.

³ Le présent document ayant été élaboré en se focalisant sur les cartes de dangers et l'aménagement du territoire, les valeurs et critères qui y sont utilisés en matière d'appréciation des dangers doivent encore être discutés pour l'OFROU.

5. Évaluation des mesures de protection existantes et/ou analyse des points faibles	• Dossiers de projets. • Appréciation de la fiabilité sur la base de la sécurité structurale, de l'aptitude au service et de la durabilité pour chaque scénario de base et pour différents types de dangers potentiels (cf. note de bas de page³). • Outre le cadastre des ouvrages de protection, d'autres sources sont nécessaires, comme le plan de contrôle et d'entretien, les plans de l'ouvrage réalisé et / ou les appréciations <i>in situ</i> pour l'évaluation de la fiabilité.
Analyse des effets	
6. Analyse des effets	• A l'appui de toutes les données de base disponibles, l'étendue et la probabilité d'occurrence géographique d'événements possibles seront évaluées pour chaque source de processus et chaque scénario. • L'évaluation tient compte de la situation actuelle (forêt, constructions existantes, etc.). • L'analyse des effets doit tenir compte des conditions spécifiques aux abords des routes nationales (voir ci-dessous). • Dans le « Périmètre Potentiel de dommages » (voir Fig. 2.1), le rayon d'action doit être délimité avec échelonnement en niveaux d'intensité. De plus, les paramètres spécifiques aux processus qui doivent être collectés sont définis aux chapitres correspondants. Dans le « Périmètre Évaluation des dangers », seule l'enveloppe de la zone d'action doit être délimitée (voir Fig. 2.1). • Les critères d'intensité sont définis conformément aux publications correspondantes. Ils sont plus précisément décrits dans les chapitres spécifiques des processus. • Les paramètres à collecter en complément pour le calcul ultérieur des risques sont décrits dans les chapitres spécifiques des processus. • Les modèles à utiliser et les méthodes à appliquer sont décrits dans les chapitres spécifiques des processus.
7. Représentation de l'analyse des effets : cartes d'intensité	• Cartes d'intensité pour le « Périmètre Potentiel de dommages » de chaque source de processus pour toutes les périodes de retour sélectionnées. • Le minimum de résultats à fournir est décrit au chapitre 3.8. • Le modèle de données est décrit dans un document séparé.

L'élaboration de l'analyse doit se faire selon les principes, les méthodes et les critères d'une évaluation moderne des dangers naturels. Elle doit répondre au minimum aux trois exigences suivantes:

- exactitude technique dans les règles de l'art en vigueur,
- traçabilité de l'évaluation et transparence en termes de procédures, de méthodes et d'incertitudes,
- application des bases légales, des normes, des directives, des recommandations en vigueur ainsi que mise en œuvre de la présente méthodologie.

Les faits, les calculs et les interprétations doivent pouvoir être nettement distingués les uns des autres, les incertitudes et les hypothèses doivent être mentionnées.

Exactitude de position de l'analyse des effets

- L'analyse des effets doit prendre en considération les conditions spécifiques régnant dans le secteur du potentiel de dommages (p. ex. la chaussée). La chaussée (une route nationale à 4 voies a une largeur moyenne d'environ 25 m) doit être prise en compte comme un élément influençant le processus.
- Le détail de l'analyse des effets doit avoir un niveau de précision tel que l'on doit pouvoir dire si toute la largeur de la chaussée est affectée ou bien les voies dans un sens de circulation, ou simplement la zone latérale à la chaussée (voie d'arrêt).
- Dans l'analyse des effets, on doit faire la distinction entre un processus :
 - qui se déroule au-dessus de la chaussée (p. ex. toit de galerie ou d'entrée de tunnel) et n'affecte donc pas la chaussée elle-même,
 - qui affecte la chaussée elle-même ou
 - qui se déroule sous la chaussée (p. ex. cours d'eau sous un pont).
 - Il est également possible d'avoir des combinaisons de niveaux d'intensité au-dessus, sur et au-dessous de la chaussée.
- Les zones d'action des différentes sources de processus peuvent se chevaucher (voir Fig. 3.2).

Évaluation des effets des mesures de protection

L'évaluation des effets des mesures de protection est réalisée en se basant sur [49]³. Si des directives spécifiques existent en ce qui concerne l'effet et sur le dimensionnement de certains objets (p. ex. galeries ou entrées de tunnels), l'évaluation doit se faire conformément à ces directives.

La procédure décrite dans [49] ne concerne que des mesures exerçant des effets nettement identifiables et déterminants sur le processus. Les mesures temporaires, telles que les déclenchements artificiels d'avalanches ou le nettoyage des rochers, et les mesures ayant une influence sur le potentiel de dommages ou la vulnérabilité ne sont pas prises en considération dans l'étape « Analyse des dangers ». Elles seront intégrées dans les étapes de travail suivantes qui concerne l'analyse des risques.

Les effets de mesures de protection existantes doivent faire l'objet d'une documentation transparente, sans lacunes et pour chaque période de retour.

3.2 Carte des phénomènes

Objectif

La « carte des phénomènes » est un des documents de base qui doit être fourni pour l'identification des dangers liés aux mouvements de terrain (chute, glissements de terrain et écoulement / affaissement) ainsi qu'aux processus de laves torrentielles et aux dangers liés aux torrents. Elle fait état de traces d'événements et de phénomènes antérieurs de nature géologique, géomorphologique ou hydrologique. En outre, elle recense les interventions humaines susceptibles d'avoir une influence sur le déroulement des processus, notamment par le biais des ouvrages de protection. Elle sert :

- à l'analyse de terrain : observation et interprétation des formes du terrain (« témoins muets »);
- à l'identification et à l'estimation de processus possibles (prédisposition, mécanismes de déclenchement, mode d'action);
- à la traçabilité de l'évaluation des dangers et à la transparence de l'analyse.

Bases méthodologiques

- BUWAL, BWW, 1995: Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene [27].
- BWG, 2002: EDV-Legende für die digitale Kartographie (ArcGis, MapInfo, MicroStation und AutoCad) [29].
- PLANAT, BWG, BUWAL, 2000: Vom Gelände zur Karte der Phänomene – Kompendium [54].

Périmètre

La carte des phénomènes est élaborée pour le « Périmètre Évaluation des dangers » conformément au chapitre 2.7. La prise en compte d'autres périmètres éventuels doit faire l'objet d'une concertation avec le mandant.

Type de processus

Des cartes de phénomènes doivent être établies pour les processus: « Chute », « Eau », « Glissements » et « Effondrement / Affaissement ».

Les phénomènes hydrologiques (p. ex. sources), ainsi que les interventions humaines (en particulier les ouvrages de protection) doivent indiqués sur la carte et relevés en fonction du type de processus.

Degré de détail de l'étude

Le degré de détail de l'étude doit être adapté à la problématique. Il doit être fixé par le mandant en amont ou déterminé en concertation avec lui.

Type de recensement des données

La carte des phénomènes est en premier lieu une cartographie de terrain. Aux endroits où l'on fait appel à l'interprétation de photographies aériennes, à des modèles altimétriques de terrain et à d'autres données, ces données, lorsqu'elles sont utilisées, devront également être intégrées à la carte des phénomènes.

Produits

Les produits suivants sont à remettre au mandant :

- Carte des phénomènes : la symbologie peut être tracée électroniquement ou dessinés à la main selon les indications mentionnée plus haut. L'échelle dépendra de la problématique posée et devra être déterminée en accord avec le mandant.
- Rapport explicatif de la carte des phénomènes avec description des phénomènes (p. ex. sous forme de tableau). Il sera notamment nécessaire de donner des détails sur la problématique, les processus et sur les zones concernées et, si nécessaire, de compléter les informations par des photos.

3.3 Processus: « Chute »

Introduction / Objectif

L'évaluation du danger de chute exige de classer les zones de départ par catégorie de source de processus présentant la même prédisposition à l'apparition du phénomène. Elle nécessite également la réalisation de modélisations d'éboulements pour chaque source de processus et la présentation des résultats d'analyse de leurs effets en se référant aux scénarios possibles. L'évaluation doit être faite pour chaque processus dangereux. Le processus majeur « chute » comprend les processus de danger suivants:

- chutes de pierres et de blocs,
- éboulements,
- chutes de glace.

Les écroulements ne sont pas systématiquement examinés. Si l'évaluation des dangers conclut à des scénarios de danger concrets, la procédure ultérieure sera décidée en concertation avec le mandant.

Bases méthodologiques

- Bundesamt für Strassen (ASTRA), 2004: Überprüfung der bestehenden Galerien – Generelle Überprüfung. Dokumentation [3].
- Bundesamt für Strassen (ASTRA), 2008: Einwirkungen infolge Steinschlag auf Schutzgalerien. Richtlinie, 2008, v2.01 [1].
- BWW, BRP, BUWAL, 1997: Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Empfehlungen [17].
- Gerber, W., 1994: Beurteilung des Prozesses Steinschlag. Kursunterlagen der Forstlichen Arbeitsgruppe Naturgefahren, Poschiavo. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf [34].

Périmètre

Subdivision du périmètre selon chapitre 2.7.

Contenu

L'évaluation du danger d'éboulement comprend les étapes d'analyse suivantes:

Fig. 3.5 Méthodologie d'analyse des dangers, processus majeur: « Chute »

Identification des dangers	
1. Acquisition, examen et analyse des données de base existantes	• Cartes topographiques, modèle altimétrique de terrain. • Cartes géologiques, géotechniques, géomorphologiques et hydrogéologiques. • Couverture du sol, en particulier forêt. • Cartes des dangers et autres investigations et rapports existants concernant la géologie et les dangers naturels. • Photographies aériennes. • Documentations et analyses des événements. • Cadastre des ouvrages de protection et plans des ouvrages de protection existants. • Plans de constructions existantes. • Autres bases disponibles en fonction des indications du mandant.
2. Analyse d'événements historiques	• selon chapitre 3.1.
3. Analyse de l'état géologique, géomorphologique et hydrogéologique	• Carte des phénomènes (voir chapitre 3.2). • Recensement des discontinuités selon Fig. 3.6. • Analyse de la prédisposition (activité, mécanismes de déclenchement, modes d'action). • Subdivision des zones de départ en zones homogènes présentant la même prédisposition (= sources de processus). Les sources de processus doivent être désignées par un nom précis. • Représentation cartographique, sous une forme appropriée, sur la carte des phénomènes, de la prédisposition des sources de processus. • Évaluation de la zone de transit et de dépôt (rugosité, amortissement, forêt). • Chute de glace : identifier les territoires où l'on a connaissance de chutes de glace d'après le cadastre des événements ou d'après les renseignements fournis par les responsables de l'entretien, où vraisemblance des endroits où l'on doit s'attendre à ces chutes sur la base de la réflexion.

4. Formulation des scénarios de base (scénarios de formation des dangers)	• Chute de pierres / de blocs : définition de scénarios, par période de retour, décrivant la taille des blocs resp. les volumes détachés, pour chaque source de processus en tenant compte de la situation des discontinuités, de la documentation disponible sur les événements et les ouvrages de protection existants. • Éboulement : définition de scénarios, par période de retour, sous forme de volumes détachés, pour chaque source de processus en tenant compte de la situation des discontinuités, de la documentation disponible sur les événements et les ouvrages de protection existants. D'éventuelles analyses géologiques plus approfondies pour évaluer les dangers d'éboulements seront convenues avec le mandant. • Chute de glace : détermination, pour les périodes de retour significatives, des volumes et des hauteurs de chute significatifs, basé sur des événements historiques et des observations in situ ainsi que sur des réflexions portant sur leur plausibilité.
5. Évaluation des mesures de protection en place	• Voir chapitre 3.1.
Analyse des effets	
6. Probabilité et ampleur des événements possibles	• Des modélisations d'éboulements se référant à des scénarios doivent être réalisées pour chaque source de processus au droit des profils de pentes représentatifs. Les profils de pente doivent être sélectionnés de manière à pouvoir faire en outre une interpolation des résultats sur les zones de dépôt. Les paramètres « énergie de chute » et « hauteur de chute » doivent être disponibles sur tout le profil, ou au moins pour les zones suivantes : • au niveau de la chaussée resp. au niveau du périmètre potentiel de dommages comme indiqué au chapitre 2.7, • au niveau des ouvrages de protection existants, • à l'emplacement sur le terrain où des mesures de protection adéquates peuvent être réalisées, • dans des cas exceptionnels motivés, on pourra renoncer à la modélisation des éboulements d'une source de processus (p. ex. situations très simples comme celles de zones de transit et de dépôt courtes et plus ou moins homogènes). On utilisera alors la méthode de la déclivité globale selon Gerber (1994) pour estimer les hauteurs de chute, l'énergie de chute et le rayon d'action. • L'effet de la forêt dans son état actuel doit être pris en compte dans la modélisation des éboulements. • Les ouvrages de protection sont pris en compte comme indiqué au chapitre 3.1. • Galeries : dans le cadre d'un degré de détail moyen, l'action de galeries existantes est estimée selon la documentation de l'OFROU, 2004, phase F à J. Les phases de A à E sont réalisées selon le procédé décrit dans la présente méthodologie. Si une investigation spécifique est nécessaire pour une galerie, celle-ci sera réalisée selon la directive correspondante de l'OFROU. • La plausibilité des calculs doit être contrôlée (p. ex. au moyen des événements documentés). • Chutes de glace : les effets de chutes de glace sont calculés avec $E = m \times g \times h$ • les zones d'influence doivent être estimées sur la base des événements historiques et de réflexions portant sur la plausibilité. • La précision de position de l'analyse des effets est obtenue selon le chapitre 3.1. • L'échelonnement de l'intensité en catégories se fait selon Fig. 3.7. • Par ailleurs, les paramètres suivants doivent être collectés dans le « Périmètre Potentiel de dommages » :

	• taille des blocs (= taille significative des blocs à la source du processus), • probabilité d'occurrence spatiale selon les indications de la page 28, • énergie de la chute (indiquer quel paramètre statistique de la modélisation a été utilisé, p. ex. intervalle de confiance de 90%. Le paramètre statistique utilisé dépend du modèle).
7. Présentation des résultats et des produits	• Cartes d'intensité pour le « Périmètre Potentiel de dommages » de chaque processus dangereux et de chaque source de processus pour toutes les périodes de retour sélectionnées. • Enveloppe du processus pour le « Périmètre Évaluation des dangers » de chaque processus dangereux et de chaque source de processus pour toutes les périodes de retour sélectionnées. • Le minimum des produits à fournir est décrit au chapitre 3.8. Les produits suivants sont à fournir en complément: • description des différentes sources de processus selon Fig. 3.6, avec photo pour chaque source de processus et prises de vue supplémentaires des zones présentant un grand potentiel; • représentation cartographique de la prédisposition des sources de processus sur la carte des phénomènes; • résultats des modélisations d'éboulements; • représentation des profils de chute sur une carte. • Le modèle de données est décrit dans un document séparé.

Discontinuités et définition des scénarios avec exemples

Source de processus Luusig Flue
Documentation Photo vue générale 9, Carte des Phénomènes (Annexe 3C)
N° des événements historiques 17,33
Ouvrages de protection réf. au cadastre des ouvrages de protection
 Auteur
 Date visite de terrain

Fréquence des événements (ans)		Discontinuités pertinentes					Bloc déterminant		Type de rupture	Remarques	Doc.
Scénario		S	J1	J2	J3	J4	Forme	m³	Masse t		
Très fréquent	1 - 10 ans	---	X	---	---	X	cubique	0.006	0.015	ES	
Fréquent	10 - 30 ans	---	X	X	---	X	cubique	0.15	0.375	EB	
Rare	30 - 100 Jahre	X	X	X	---	---		3.6	9	EB	Falaise Ouest Cascade
Très rare	100 - 300 Jahre	---	---	---	X	X		27	68	EB d'un FS 500 m³	Tête rocheuse au P. 1035

Remarques

Influence sur le bloc déterminant

X présent
 --- non pertinent / insignifiant

Type de
 rupture

ES Pierre isolé
 EB Bloc isolé
 FS Eboulement (>100 m³)

Dimensions du bloc

Bloc déterminant

A déterminer pour les modelisations de chutes

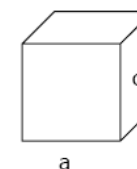


Fig. 3.6 Recensement des discontinuités et formation de scénarios.

Échelonnement de l'intensité

L'historique des voies de communication montre, par expérience, que les énergies développées lors d'un évènement peuvent dépasser largement 300 kJ. On observe que l'ampleur des dommages causés à l'infrastructure concernée dépend beaucoup de cette énergie, qu'elle soit de 300 kJ ou de 10 à 100 fois cette valeur. C'est la raison pour laquelle, en plus de la catégorie d'intensité, l'indication de l'énergie de l'évènement en kJ est un autre paramètre important à recenser. Cette donnée est par ailleurs utile pour le dimensionnement d'éventuelles mesures de protection.

Fig. 3.7 Critères d'intensité pour le processus « Chute »

Processus dangereux	Faible intensité	Intensité moyenne	Forte intensité
Chute de pierres / de blocs (chute de pierres $\varnothing < 50$ cm chute de blocs $\varnothing > 50$ cm)	$E < 30$ kJ	$30 < E < 300$ kJ	$E > 300$ kJ
Éboulement et écoulement rocheux (Vol. 100 – 100'000 m ³)	-----	-----	$E > 300$ kJ

E = énergie cinétique

Probabilité d'occurrence spatiale

La probabilité d'occurrence spatiale p_{Os} peut être calculée comme suit:

$$p_{Os} = TE \times \frac{\text{Diamètre du bloc [m]}}{\text{Largeur du tronçon balayé par le processus [m]}}$$

$$p_{rA} = ET \times \frac{\text{Blockdurchmesser [m]}}{\text{Breite des vom Prozess bestrichenen Abschnitts [m]}}$$

TE = type d'évènement: ce facteur tient compte du fait que lors du détachement de plusieurs fragments mobilisés simultanément ou de la rupture de masses rocheuses en paquets (éboulement), il faut s'attendre à des effets de dispersion et à un dépôt en largeur.

TE = 1 pour pierres et blocs individuelles

TE = 5 pour plusieurs blocs simultanément

TE = 10 pour petits éboulements

TE = de 20 à 50 pour éboulements

Dans la Fig. 3.8 sans tenir compte du type d'évènement, la probabilité dans le cas A est de: $p_{Os} = 1/50 = 0.02$, dans le cas B de: $= 1/100 = 0.01$.

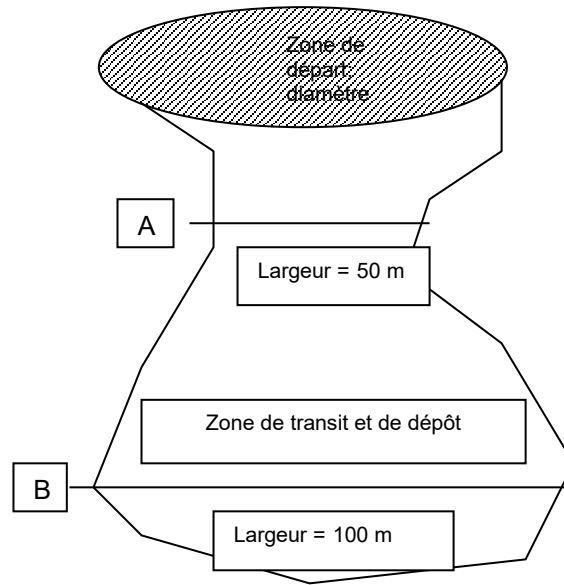


Fig. 3.8 Évaluation de la probabilité d'occurrence spatiale pour le processus « Chute ».

3.4 Processus: « Eau »

Introduction / Objectif

Le processus majeur « Eau » comprend les processus de danger suivants:

- débordement avec épandage alluvial, inondation
- débordement de laves torrentielles
- érosion des berges et affouillement

Ces processus dangereux ne sont pas toujours faciles à différencier précisément les uns des autres.

Les glissements de berges compris dans le « Périmètre Potentiel de dommages » doivent être évalués selon la méthodologie appliquée aux glissements (chapitre 3.6).

Bases méthodologiques

- ASTRA, BAV, BWB, SBB; 1998: Sicherheit von Bauwerken im Wasser. Empfehlung für die Überwachung und Hinweise für den Neubau [9].
- BWB, BRP, BUWAL, 1997: Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Empfehlungen [18].
- Bundesamt für Wasser und Geologie BWG, 2001: Hochwasserschutz an Fließgewässern, Wegleitung [28].

Périmètre

Subdivision du périmètre selon chapitre 2.7.

Contenu

L'évaluation des dangers hydrologiques comporte les étapes d'analyse suivantes:

Fig. 3.9 Méthodologie de l'analyse des dangers, processus majeur: « Eau »

Identification des dangers	
1. Acquisition, examen et analyse des données de base existantes	• Cartes topographiques, modèle altimétrique de terrain. • Anciennes cartes topographiques. • Cartes et données de base géologiques, géotechniques, géomorphologiques, hydrogéologiques et hydrologiques. • Couverture du sol, en particulier forêt. • Investigations et rapports existants concernant les dangers hydrologiques (projets d'ouvrages hydrauliques, études hydrologiques, cartes de dangers disponibles, etc.) • Photographies aériennes. • Documentations et analyses des événements. • Cadastre des ouvrages de protection et plans des ouvrages de protection existants. • Plans de ponts et d'autres ouvrages existants. • Autres bases disponibles en fonction des indications du mandant.
2. Analyse d'événements historiques	• selon chapitre 3.1.
3. Analyse de l'état géologique, géomorphologique, hydrogéologique et hydrologique	• Analyse de l'état morphologique du cours d'eau: bassin hydrographique, forme du cours d'eau, déclivité longitudinale, sections transversales du cours d'eau, sous-sol / géologie. • Carte des phénomènes pour le processus de danger: Débordement de laves torrentielles / Torrent. • Analyse des prédispositions dans les bassins hydrographiques: écoulement, chemins d'écoulement de l'eau (karst), potentiel de charriage, potentiel de bois flottant, stabilité des pentes latérales. • Évaluations et relevés photographiques dans les zones de transit et de dépôt (tronçons d'érosion et de dépôt, points faibles ou tronçons limitatifs tels que passages couverts et ponts, profils transversaux, configuration du fond du lit, traces de processus). • On prendra en compte le fait que les processus peuvent également se dérouler en aval de la chaussée et lui porter atteinte (p. ex. érosion du lit et érosion latérale, etc.). • Les torrents et les canaux doivent être désignés par une inscription claire et nette.
4. Formulation des scénarios de base (scénarios de formation des dangers)	• Définition de scénarios pour chaque cours d'eau ou tronçon de cours d'eau significatif. D'éventuels sous-scénarios (p. ex. ruptures de digue possibles à différents endroits pour une période de retour donnée) seront pris en considération par le biais de la probabilité d'occurrence spatiale. • Les débits des crues sont déterminés à partir d'éventuelles séries de mesures du débit, ou en fonction de la grandeur du bassin hydrographique et à l'aide des méthodes en vigueur, conformément à la pratique de l'OFEG 2003 [22]. Les enseignements, tirés de l'analyse des événements de 2005 et 2007 concernant l'intensité des précipitations et la durée des événements, sont alors à prendre en compte. • Détermination du charriage ou de la charge de laves torrentielles mobilisables pendant l'événement concerné, en se basant sur la recommandation faite pour l'appréciation des volumes solides déplacés dans les torrents [46] ou selon la méthode SEDEX [31]. La procédure à employer dépend de la dimension du cours d'eau et de la problématique abordée. Elle doit être déterminée en amont avec le mandant. • Appréciation de l'aptitude du cours d'eau à former des laves torrentielles. • Des hypothèses plausibles doivent être faites sur la quantité attendue de bois flottants, tant dans le cas des torrents que dans celui des rivières.

5. Évaluation du cours d'eau et des mesures existantes	• selon chapitre 3.1. • Détermination de la capacité d'écoulement compte tenu du transport sédimentaire, des dépôts de matériaux charriés et des obstructions aux sections d'étranglement. • Identification d'endroits présentant une érosion latérale potentielle.
Analyse des effets	
6. Probabilité et ampleur des événements possibles	• L'analyse des effets doit décrire le lieu, la date, la durée ainsi que la quantité d'eau et de charriage entraînés, l'ampleur de l'érosion latérale et celle de l'affouillement de parties d'ouvrages de construction immergées. • Dans le cas de cours d'eau perpendiculaires à la chaussée, on tiendra compte, en particulier, des processus de danger suivants : affouillement, inondation, épandage alluvial et débordement de laves torrentielles. • Dans le cas de cours d'eau parallèles à la chaussée, on tiendra particulièrement compte des phénomènes tels que l'érosion des berges et les inondations. • Les modèles ou méthodes à utiliser doivent être déterminées en amont avec le mandant. • L'étendue des phénomènes purement hydrologiques sur la chaussée doit être déterminée par une expertise en concertation avec la division Exploitation (centres d'entretien). • La plausibilité des calculs doit être contrôlée (p. ex. au moyen des événements documentés). • La précision de position de l'analyse des effets est obtenue selon le chapitre 3.1. • L'échelonnement de l'intensité en catégories se fait selon Fig. 3.10. • Par ailleurs, dans le « Périmètre Potentiel de dommages », les paramètres suivants doivent être collectés : • probabilité d'occurrence spatiale, selon la description ci-dessous, • vitesses d'écoulement, • hauteurs d'écoulement (de l'eau / de la lave torrentielle) et épaisseurs des dépôts; • en cas d'inondation, indiquer de plus si elle est statique ($v < 1$ m/s) ou dynamique ($v > 1$ m/s); • pour la partie de l'ouvrage de construction concernée, détermination de la profondeur d'affouillement par rapport à la profondeur des fondations.
7. Présentation des résultats et des produits	• Pour le « Périmètre Potentiel de dommages », cartes d'intensité de chaque source de processus pour toutes les périodes de retour sélectionnées. • Pour le « Périmètre Potentiel de dommages », zone d'influence du processus pour chaque source de processus et pour toutes les périodes de retour sélectionnées. • Le minimum des produits à fournir est décrit au chapitre 3.8. Les produits à remettre en complément sont : • description des différents cours d'eau resp. tronçons de cours d'eau, éventuellement avec photo; • description des parties d'ouvrage de construction immergées présentant un potentiel significatif de dommages et renseignements concernant l'affouillement (profondeur de l'affouillement au-dessous resp. au-dessus du niveau des fondations). • Le modèle de données est décrit dans un document séparé.

Fig. 3.10 Critères d'intensité pour le processus majeur « Eau »

Processus dangereux	Faible intensité	Intensité moyenne	Forte intensité
Inondation	$h < 0.5 \text{ m}$ ou $v \times h < 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$	$0.5 < h < 2 \text{ m}$ ou $0.5 < v \times h < 2 \text{ m}^2/\text{s}$	$h > 2 \text{ m}$ ou $v \times h > 2 \text{ m}^2/\text{s}$
Débordement de laves torrentielles	-----	$h < 1 \text{ m}$ ou $v < 1 \text{ m/s}$	$h > 1 \text{ m}$ et $v > 1 \text{ m/s}$
Érosion des berges			$d > 2 \text{ m}$

Inondation et débordement de laves torrentielles:

h = profondeur de l'eau ou épaisseur du dépôt

v = vitesse d'écoulement de l'eau

Érosion des berges:

d = épaisseur moyenne de l'érosion

En ce qui concerne les dommages susceptibles d'être infligés aux différents objets situés dans la zone de danger (analyse des conséquences), l'analyse du processus « Inondations » devra différencier si le processus est dynamique ($v > 1 \text{ m/s}$) ou statique ($v < 1 \text{ m/s}$).

Probabilité d'occurrence spatiale

La probabilité d'occurrence spatiale p_{os} sera déterminée dans chaque cas particulier, pour chaque source de processus, chaque période de retour et chaque niveau d'intensité. Elle peut varier dans la zone d'influence et on la détermine comme suit:

$$p_{os} = \frac{\text{Largeur resp. surface de dépôt en cas d'évènement [m resp. m}^2\text{]}}{\text{Largeur resp. surface maximale qui peut être balayée par le processus [m resp. m}^2\text{]}}$$

$$p_{rA} = \frac{\text{Breite resp. Fläche der Ablagerung im Ereignisfall [m resp. m}^2\text{]}}{\text{Maximale Breite resp. Fläche die vom Prozess bestrichen werden kann [m resp. m}^2\text{]}}$$

La largeur du dépôt peut être déduite p. ex. à partir des évènements historiques ou par analogie lors d'évènements dans une topographie similaire.

Dans le cas de sous-scénarios (voir point 4, Fig. 3.10), si différentes surfaces partielles peuvent être concernées par le processus de crues, la probabilité qu'une surface partielle soit touchée selon ce sous-scénario doit être prise en compte dans le scénario d'occurrence générale.

La probabilité d'occurrence spatiale p_{os} décrit la part de surface (b) ou de largeur (x_2) réellement affectée par un processus, en rapport à l'ensemble de la zone qui pourrait potentiellement être touchée par ce type de processus (a pour des objets de référence surfaciques ou x_1 pour des éléments linéaires), et ce pour un scénario déterminé.

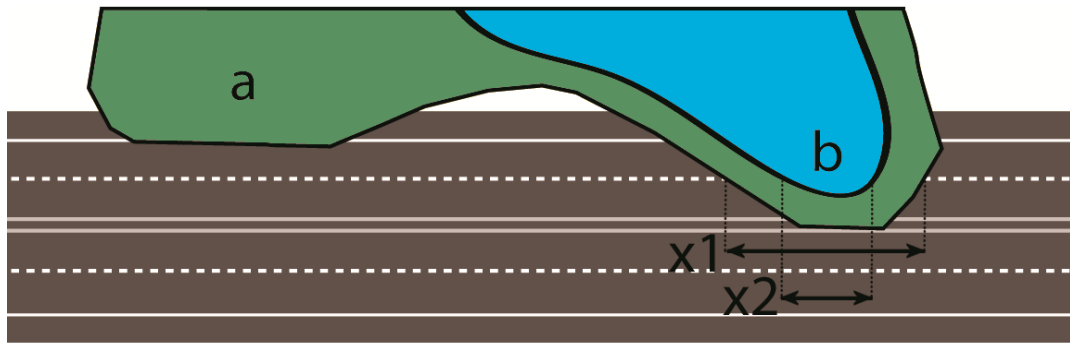


Fig. 3.11 La probabilité d'occurrence spatiale p_{os} .

3.5 Processus: « Avalanches »

Introduction / Objectif

Pour l'évaluation du danger d'avalanche, il est nécessaire de réaliser la modélisation des événements les plus graves possibles. Les événements de moindre importance, pour lesquels on ne dispose d'aucun modèle de calcul, peuvent être évalués au moyen de la déclivité globale et des enregistrements dans les cadastres. Le processus majeur « Avalanches » comprend les processus de dangers suivants:

- Avalanche coulante
- Avalanche de poudreuse
- Glissement de plaque de neige

Bases méthodologiques

- Bundesamt für Forstwesen, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 1984: Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirkenden Tätigkeiten [19].
- Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 1999: Neue Berechnungsmethoden in der Lawinengefahrenkartierung [32].
- Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Mitteilungen, 1990: Berechnung von Fliesslawinen, eine Anleitung für Praktiker [33].
- Bundesamt für Strassen (ASTRA), SBB AG, 1998: Planung, Bau und Unterhalt von Schutzgalerien gegen Steinschlag- und Lawineneinwirkungen – Ausgabe 1998. Dokumentation [4].
- Bundesamt für Strassen (ASTRA), SBB AG, 2007: Einwirkungen infolge Lawinen auf Schutzgalerien. Richtlinie. Ausgabe 2007 V2.00 [2].

Périmètre

Subdivision du périmètre selon chapitre 2.7.

Contenu

L'évaluation du danger d'avalanche comporte les étapes d'analyse suivantes:

Fig. 3.12 Méthodologie de l'analyse des dangers, processus majeur: « Avalanches »

Identification des dangers	
1. Acquisition, examen et analyse des données de base existantes	• Cartes topographiques, modèle altimétrique de terrain. • Données de base hydrologiques (séries de mesures des précipitations). • Couverture du sol, en particulier forêt. • Cartes des dangers et autres investigations et rapports existants concernant les avalanches. • Photographies aériennes. • Documentations et analyses des événements. • Cadastre des ouvrages de protection et plans des ouvrages de protection existants. • Plans de constructions existantes. • Autres bases disponibles en fonction des indications du mandant.
2. Analyse d'événements historiques	• Selon chapitre 3.1.
3. Analyse de l'état topographique	• Analyse de la prédisposition des sources de processus (déclivité de la pente, exposition, rugosité de la surface, végétation, formation de corniches, neige soufflée). • Évaluation de la zone de transit et de dépôt (rugosité, végétation, obstacles, structures directionnelles). • Présentation cartographique des sources de processus à 1/10'000. • Les sources de processus doivent être désignées par un nom précis.
4. Formulation des scénarios de base (scénarios de formation des dangers)	• Détermination des sources de processus déterminantes et de l'épaisseur du manteau neigeux en tenant compte de la documentation disponible d'événements et des ouvrages de protection existants pour les périodes de retour significatives. Pour la catégorie des événements très fréquents (fréquences de ≤ 10 ans), il sera possible, après concertation avec le mandant, de renoncer à la formulation de scénarios de base et à la modélisation consécutive. Dans ces cas précis, on s'en tiendra uniquement au cadastre des événements.
5. Inventaire et évaluation des mesures de protection existantes	• selon chap. 3.1.

Analyse des effets	
6. Probabilité et ampleur des événements possibles	• Réaliser, le long du couloir d'avalanche, des modélisations d'avalanches unidimensionnelles se référant aux scénarios pour chaque source de processus. Les modélisations sont réalisées conformément aux méthodes du SLF de 1999 et 1990 • En cas de sources de processus n'entraînant que des petits événements (coulées ou glissement de plaque de neige, volume de la couverture neigeuse < 5'000 m³), la zone d'influence sera estimé à l'aide d'une déclivité globale située entre 40% et 45% et les intensités estimées en fonction de valeurs empiriques. • L'action de la forêt, dans son état actuel, doit être prise en compte dans l'évaluation des avalanches. • Les ouvrages de protection sont pris en compte comme indiqué au chapitre 3.1. • Galeries de protection anti-avalanche existantes: si une investigation spécifique d'objet pour une galerie est nécessaire, celle-ci sera réalisée selon la directive correspondante de l'OFROU. Les effets significatifs seront alors recensés pour les différents cas, conformément à la présente méthodologie, dans la mesure où ils sont définis. La vérification de la sécurité structurale et de l'aptitude au service est réalisée conformément à la directive de l'OFROU. • La plausibilité des calculs doit être contrôlée (p. ex. au moyen des événements documentés). • L'échelonnement de l'intensité en catégories se fait selon Fig. Fig. 3.13 • Le déploiement latéral des avalanches doit être estimé par un expert en fonction du terrain et d'une carte topographique. • Par ailleurs, les paramètres suivants doivent être collectés dans le « Périmètre Potentiel de dommages »: • probabilité d'occurrence spatiale, selon la description ci-dessous, • indiquer si l'avalanche est plutôt de type coulant ou poudreux • vitesses des avalanches, • épaisseur de l'avalanche, • pression déterminante de l'avalanche perpendiculairement au sens de l'écoulement.
7. Présentation des résultats et des produits	• Cartes d'intensité pour le « Périmètre Potentiel de dommages » de chaque source de processus pour toutes les périodes de retour sélectionnées. • Enveloppe du processus pour le « Périmètre Potentiel de dommages » de chaque source de processus pour toutes les périodes de retour sélectionnées. • Le minimum des produits à fournir est décrit au chapitre 3.8. Les produits à remettre en complément sont: • description des différentes zones de rupture, éventuellement avec photo, • représentation cartographique des zones de rupture (ensemble et zones significatives pour le calcul) sur une carte au 1/10'000. • Le modèle de données est décrit dans un document séparé.

Fig. 3.13 Critères d'intensité pour le processus majeur « Avalanches »

Processus dangereux	Faible intensité	Intensité moyenne	Forte intensité
Avalanches poudreuses	$q < 3 \text{ kN/m}^2$	$3 < q < 30 \text{ kN/m}^2$	$q > 30 \text{ kN/m}^2$
Avalanches coulantes et glissement de plaques de neige	---	$3 < q < 30 \text{ kN/m}^2$	$q > 30 \text{ kN/m}^2$

q = pression

Probabilité d'occurrence spatiale

La probabilité d'occurrence spatiale p_{os} est déterminée, en fonction des spécificités de chaque cas, pour chaque source de processus, chaque période de retour et chaque type d'intensité. Elle peut varier au sein même d'une zone d'influence et on la détermine de la façon suivante :

$$p_{os} = \frac{\text{Largeur de dépôt en cas d'évènement [m]}}{\text{Largeur maximale qui peut être balayée par le processus [m]}}$$

$$p_{ra} = \frac{\text{Breite der Ablagerungen im Ereignisfall [m]}}{\text{Maximale Breite die vom Prozess bestrichen werden kann [m]}}$$

La largeur du dépôt peut être déduite p. ex. à partir des événements historiques ou par analogie lors d'événements dans une topographie similaire.

3.6 Processus: « Glissements »

Introduction / Objectif

Le processus majeur « Glissements » comprend les processus de danger suivants :

- Glissements et tassements permanents
- Glissements spontanés
- Coulées de boues

L'évaluation doit être faite pour chaque processus de danger.

Pour les glissements et les tassements permanents, il n'est pas possible, lors d'une étude de degré de détail moyen, d'élaborer des cartes d'intensité pour différentes périodes de retour. Pour ce processus, l'évaluation des dangers doit comprendre au moins l'évaluation de la prédisposition, de la délimitation géographique des processus ainsi que de leur ampleur.

L'évaluation de glissements permanents, de glissements spontanés et de coulées de boues doit s'appuyer sur le projet de classification des dangers de glissements au sens large du terme, élaboré pour le compte de l'Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) par le groupe de travail Danger naturel et géologie (DNG). Les glissements de berges constituent un cas spécial de glissements spontanés.

Bases méthodologiques

- Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren (AGN), 2004: Gefahreneinstufung Rutschungen i.w.S. Entwurf [7].
- BWG, WSL, 2003: Oberflächennahe Rutschungen, ausgelöst durch die Unwetter vom 15.-16.7.2002 im Napfgebiet und vom 31.8.-1.9.2002 im Gebiet Appenzell. Projektbericht [26].
- BWW, BRP, BUWAL, 1997: Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Empfehlungen [17].
- Gamma, P. 1999: dfwalk – Ein Murgangsimulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. Inauguraldissertation Universität Bern [37].
- Rickli, C., Zürcher, K., Frey, W., Lüscher, P., 2002: Wirkung des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse. Schweiz. Z. Forstwes. 153 (2002) 11: 437-445 [55].

Périmètre

Subdivision du périmètre selon chapitre 2.7.

Contenu

L'évaluation des dangers de glissements comporte les étapes d'analyse suivantes:

Fig. 3.14 Méthodologie de l'analyse des dangers, processus majeur: « Glissements »

Identification des dangers									
1. Acquisition, examen et analyse des données de base existantes	• Cartes topographiques, modèle altimétrique de terrain. • Cartes géologiques, géotechniques, géomorphologiques et hydrogéologiques. • Données pluviométriques et nivométriques, mesures de l'écoulement. • Couverture du sol. • Cartes des dangers et autres investigations et rapports existants concernant la géologie et les dangers naturels. • Analyse de résultats de mesures et d'énoncés qualitatifs concernant les mouvements. • Photographies aériennes. • Documentations et analyses des événements. • Cadastre des ouvrages de protection et plans des ouvrages de protection existants. • Plans de constructions existantes. • Autres bases disponibles en fonction des indications du mandant.								
2. Analyse d'événements historiques	• Selon chapitre 3.1.								
3. Analyse de l'état géologique, géomorphologique, hydrogéologique (collecte de données de base sur le terrain)	• Carte des phénomènes (cf. chapitre 3.2). • Analyse de la prédisposition (activité, mécanismes de déclenchement, mode d'action) pour les trois processus de danger: glissements permanents, glissements spontanés, coulées de boues. • Coulées de boues: subdivision du territoire d'investigation en secteurs homogènes présentant une même prédisposition (= sources de processus) selon l'organigramme (DNG, 2004) et Fig. 3.15. La convention applicable est alors la suivante: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Probabilité selon DNG, 2004</th><th>Prédisposition de la source de processus</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>forte</td><td>grande</td></tr> <tr> <td>moyenne</td><td>moyenne</td></tr> <tr> <td>faible</td><td>faible</td></tr> </tbody> </table> • On tiendra compte du fait que les processus peuvent également provoquer des dégâts au-dessous de la chaussée (p. ex. glissements de terrain dans le talus aval,). • Les sources de processus doivent être désignées précisément. • Évaluation des zones de transit et de dépôt (pour les coulées de boues et les glissements spontanés).	Probabilité selon DNG, 2004	Prédisposition de la source de processus	forte	grande	moyenne	moyenne	faible	faible
Probabilité selon DNG, 2004	Prédisposition de la source de processus								
forte	grande								
moyenne	moyenne								
faible	faible								

4. Formulation des scénarios de base (scénarios de formation des dangers)	Définition de scénarios pour chaque source de processus en tenant compte de la documentation d'évènements disponible, des influences anthropiques et des ouvrages de protection existants: glissements permanents et tassements: un seul scénario est discuté. glissements spontanés: les scénarios sont discutés sur la base des facteurs suivants: évènements historiques, témoins muets, frottement interne, cohésion, pression d'eau interstitielle, ainsi que géométrie / topographie. Les scénarios d'accélération doivent faire l'objet d'une évaluation particulière. Coulées de boues:<table><tr><th>Probabilité selon la présente méthodologie</th><th>Fréquence [années]</th><th>Comprend les sources de processus présentant la prédisposition ci-dessous</th></tr><tr><td>très fréquente</td><td rowspan="2">0 – 30</td><td rowspan="2">grande</td></tr><tr><td>fréquente</td></tr><tr><td>rare</td><td>30 – 100</td><td>grande et moyenne</td></tr><tr><td>très rare</td><td>100 – 300</td><td>grande, moyenne et faible</td></tr></table>	Probabilité selon la présente méthodologie	Fréquence [années]	Comprend les sources de processus présentant la prédisposition ci-dessous	très fréquente	0 – 30	grande	fréquente	rare	30 – 100	grande et moyenne	très rare	100 – 300	grande, moyenne et faible
Probabilité selon la présente méthodologie	Fréquence [années]	Comprend les sources de processus présentant la prédisposition ci-dessous												
très fréquente	0 – 30	grande												
fréquente														
rare	30 – 100	grande et moyenne												
très rare	100 – 300	grande, moyenne et faible												
5. Inventaire et évaluation des mesures de protection existantes	Selon chapitre 3.1													
Analyse des effets														
6. Probabilité et ampleur des évènements possibles	Glissements permanents - La délimitation de la zone d'influence est réalisée sur la base de constatations faites sur le terrain; la classification de l'intensité est faite selon DNG, 2004, d'après les critères (cf. Fig. 3.16) suivants: - intensité, - potentiel de réactivation, - prédisposition aux mouvements différentiels - profondeur													
	Glissements spontanés - La zone d'action est délimitée sur la base d'évènements historiques et de valeurs comparatives tirées des publications spécialisées. - L'intensité des glissements spontanés est généralement forte ($E > 300$ kJ).													
	Coulées de boues - La zone d'influence (étendue) est délimitée sur la base d'évènements historiques comparables: - déclivité globale généralement comprise entre 20° à 40° (exceptionnellement jusqu'à 15°); - trajectoire d'écoulement max. 100 m, si la déclivité du versant est plus ou moins régulière et le volume de la coulée inférieur à $1'000$ m³; - en cas de transition abrupte vers un sol très plat, écoulement sur un tronçon court (de quelques mètres à 20 m env., si le volume de la coulée est inférieur à $1'000$ m³); - prise en compte des structures de la topographie; - prise en compte d'éléments anthropiques. - L'estimation de l'intensité se fait selon Figure 3.15. - Pour les analyses se référant à un objet précis, l'intensité est calculée à partir de la pression dynamique selon la recommandation du DNG (2004). Si l'on doit s'attendre à des blocs intégrés dans le dépôt, on utilisera la formule de pression selon [31].													
	- Par ailleurs, les paramètres suivants doivent être collectés dans le « Périmètre Potentiel de dommages »: - probabilité d'occurrence spatiale, selon la description ci-dessous:													

	• dans le cas de coulées de boues et de glissements spontanés: hauteur du dépôt; • dans le cas de glissement permanent: vitesse moyenne du glissement, potentiel de réactivation, mouvement différentiel, profondeur.
7. Présentation des résultats et des produits	• Cartes d'intensité pour le « Périmètre Potentiel de dommages » de chaque processus dangereux et de chaque source de processus pour toutes les périodes de retour sélectionnées. • Zone d'influence du processus pour le « Périmètre Évaluation des dangers » de chaque processus dangereux et de chaque source de processus pour toutes les périodes de retour sélectionnées. • Le minimum des produits à fournir est décrit au chapitre 3.8. Les produits à remettre en complément sont: • coulées de boues: description des différentes sources de processus selon Fig. 3.15 avec photo; • représentation cartographique des sources de processus sur la carte des phénomènes. • Le modèle de données est décrit dans un document séparé.

Source de processus Nom
Documentation Photo vue générale x, Carte des Phénomènes (Annexe xy)
N° des événements historiques a, b
Ouvrages de protection réf. au cadastre des ouvrages de protection
 Auteur
 Date visite de terrain

Caractéristique		Valeur	Effet *)
Pente	[°]		
témoins muets	[Oui/non]		
Ø Pente des phénomènes historiques (cadastre ou témoins muets)	[°]		
Présence d'une discontinuité hydrologique près de la surface	[Oui/non]		
	Profondeur [m]		
Forme de la topographie	[transition abrupte avec sol plat, convexe, concave, linéaire, irrégulier]		
Apports en eau	[grande, moyenne, faible, incertain, non pertinent]		
Etat de surface / utilisation du sol	non boisée: [surfaces d'érosion ouvertes, dégâts dus au passages du bétail, pâturages]		
	Forêt: [surfaces de dégâts, structure défavorable, rajeunissement insuffisante]		
Influences anthropogènes	p. ex.: Déviations d'eau, Drainages, talus très raide etc.		
Evaluation globale : prédisposition		[grande, moyenne, faible]	

Remarques

*) Effet sur la disposition des Hangmuren

XXX grand
 XX petit
 X aucune

Fig. 3.15 Évaluation de la prédisposition aux coulées de boues.

Fig. 3.16 Critères d'intensité pour le processus majeur « Glissements

Processus	intensité faible	intensité moyenne	intensité forte
1. Processus de glissement 1.1 Glissement continu, permanent	$v \leq 2 \text{ cm/an}$	$2 \text{ cm/an} < v < 10 \text{ cm/an}$	$v > 10 \text{ cm/an}$; (ou 1 m de déplacement par événement)
1.2 Glissement spontané	$M < 0.5 \text{ m}$	$0.5 \text{ m} < M < 2 \text{ m}$ $h < 1 \text{ m}$	$M > 2 \text{ m}$ $h > 1 \text{ m}$
2. Processus d'écoulement Coulée de boue	$M < 0.5 \text{ m}$ épandage d'alluvions (h) de quelques décimètres	$0.5 \text{ m} < M < 2 \text{ m}$ $h < 1 \text{ m}$	$M > 2 \text{ m}$ $h > 1 \text{ m}$

Critères pour la détermination de l'intensité des glissements. Voir les encadrés ci-dessous pour les abréviations et des explications complémentaires.

Légende:

v = vitesse moyenne de glissement à long terme [cm/an]

$v_{\max}$ = vitesse maximale de glissement [cm/an]

D = mouvement différentiel moyen sur la durée de service d'un ouvrage d'art ou d'un bâtiment concerné [cm/10 m]

T = profondeur de la surface de glissement [m]

M = épaisseur de la couche mobilisable (potentielle) [m]

h = épaisseur du dépôt dû au glissement spontané ou à la coulée de boue [m]

$v_{\max}$ = vitesse maximale de glissement [cm/an]

Une accélération des glissements de terrain augmente la dangerosité et implique par conséquent un degré de danger supérieur. $v_{\max}$ est défini par la vitesse maximale pendant une phase d'accélération ou après une phase de réactivation.

Définitions: $v_{\max 30}$ représente un événement de période de retour de trente ans; $v_{\max 100}$ représente un événement centennal ou une période de retour de 100 ans; $v_{\max 300}$ représente un événement avec une période de retour de 300 ans.

- Les valeurs de changement de vitesse de glissement ($v_{\max}$) pour passer d'une intensité faible à une intensité moyenne (flèche courte) sont : $v_{\max 30} > \text{env. } 30 \text{ cm/an}$ ou $v_{\max 100} > \text{env. } 50 \text{ cm/an}$ ou $v_{\max 300} > \text{env. } 60 \text{ cm/an}$.
- Les valeurs de changement de vitesse de glissement ($v_{\max}$) pour passer d'une intensité moyenne à une intensité forte (flèche courte) sont : $v_{\max 30} > \text{env. } 20 \text{ cm/an}$ ou $v_{\max 100} > \text{env. } 40 \text{ cm/an}$ ou $v_{\max 300} > \text{env. } 50 \text{ cm/an}$.
- Les valeurs de changement de vitesse de glissement ($v_{\max}$) pour passer d'une intensité faible à une intensité forte (flèche longue, " $v_{\max}$ élevée") sont : $v_{\max 30} > \text{env. } 50 \text{ cm/an}$ ou $v_{\max 100} > \text{env. } 70 \text{ cm/an}$ ou $v_{\max 300} > \text{env. } 80 \text{ cm/an}$.

Si une accélération est par exemple mesurée pendant un trimestre, la vitesse annuelle correspondante doit être calculée; la vitesse annuelle est obtenue en multipliant par 4 le

déplacement mesuré au cours du trimestre. Cette méthode s'applique par analogie pour un semestre ou trois trimestres.

Des données précises sur v et $v_{\max}$ ne sont souvent pas disponibles pour des analyses de danger portant sur l'ensemble d'un territoire. Par contre, des données géodésiques et les informations associées à des études détaillées ou à des glissements de terrain bien connus sont souvent disponibles et doivent être prises en considération. Les autorités cantonales et fédérales, ainsi que les géomètres sont souvent en mesure de fournir des données géodésiques et des vitesses de déplacement (voir aussi les données InSAR de l'OFEV, à titre indicatif). Compte tenu des évolutions envisageables et de l'influence du changement climatique, des accélérations possibles peuvent être définies en tant que scénarios correspondants, aussi en l'absence de mesures de déplacement.

D = mouvement différentiel

Les mouvements différentiels sont mesurés par le déplacement différentiel absolu, en centimètres, dans une zone uniforme de 10 mètres de largeur [cm/10 m]. La valeur différentielle est basée sur une durée de service d'un ouvrage d'art ou d'un bâtiment concerné. Elle est liée à la sécurité structurale et à l'aptitude au service (par exemple pour une durée de plus de 50 ans).

- Mouvement différentiel D pour le changement d'une classe d'intensité (flèche courte): $D=2-10 \text{ cm/10m}$.
- Mouvement différentiel D pour le changement de deux classes d'intensité (flèche longue, "D élevé" ou "DD"): $D>10 \text{ cm/10m}$.

T = profondeur de la surface de glissement

Pour une réduction de l'intensité, la surface de glissement la plus importante (la moins profonde) doit être au moins à 30 m sous le niveau du terrain. De plus, les trois conditions suivantes doivent être remplies cumulativement:

1. il s'agit d'un grand glissement profond avec une masse cohérente;
2. il existe des zones morphologiquement et dynamiquement homogènes sans surfaces de glissement secondaires;
3. les relevés géométriques ont confirmé une dynamique de mouvement homogène dans le temps.

Une réduction de l'intensité liée à la profondeur de la surface de glissement est acceptable pour des vitesses de glissement maximales de 20 cm/an, pour autant que les conditions 1 à 3 soient remplies.

Probabilité d'occurrence spatiale

La probabilité d'occurrence spatiale P_{Os} est déterminée, en fonction des spécificités de chaque cas, pour chaque source de processus, chaque période de retour et chaque type d'intensité. Elle peut varier au sein même d'une zone d'influence et on la détermine comme suit:

$$P_{Os} = \frac{\text{Largeur de dépôt en cas d'évènement [m]}}{\text{Largeur maximale qui peut être balayée par le processus [m]}}$$

$$P_{rA} = \frac{\text{Breite der Ablagerungen im Ereignisfall [m]}}{\text{Maximale Breite die vom Prozess bestrichen werden kann [m]}}$$

La largeur du dépôt peut être déduite p. ex. à partir des événements historiques ou par analogie lors d'événements dans une topographie similaire⁴.

3.7 Processus « Effondrement / Affaissement »

Introduction / Objectif

L'évaluation du processus majeur « Effondrement / Affaissement » se base sur la recommandation fédérale de 1997.

Pour le processus « Effondrement / Affaissement », il n'est pas possible, lors d'une étude de degré de détail moyen, d'élaborer des cartes d'intensité pour différentes périodes de retour. Dans ce contexte, l'évaluation des dangers doit comprendre au moins l'évaluation de la prédisposition, de la délimitation spatiale des processus ainsi que de leur ampleur.

Bases méthodologiques

- BWW, BRP, BUWAL, 1997: Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire.

Périmètre

Subdivision du périmètre selon chapitre 2.6.

Contenu

L'évaluation du processus "Effondrements / Affaissements" comprend les étapes d'analyse suivantes:

Fig. 3.17 Méthodologie de l'analyse des dangers, processus majeur: « Effondrement / Affaissement »

Identification des dangers	
1. Acquisition, examen et analyse des données de base existantes	• Cartes topographiques, modèle altimétrique de terrain. • Cartes géologiques, géotechniques, géomorphologiques et hydrogéologiques. • Cartes des dangers et autres investigations et rapports existants concernant la géologie et les dangers naturels. • Analyse de mesures et d'énoncés qualitatifs sur des phénomènes d'affaissement faits par les responsables de l'entretien. • Photographies aériennes. • Documentations et analyses des événements. • Cadastre des ouvrages de protection et plans des ouvrages de protection existants. • Plans de constructions existantes. • Autres bases disponibles en fonction des indications du mandant.
2. Analyse d'événements historiques	• Selon chapitre 3.1.

⁴ Le quantile de 75% de la largeur des coulées de boues tirée des analyses des événements de 2002 est de 15 m (forêt) resp 20 m (terrain libre). L'activité moyenne de glissement (et donc la probabilité d'occurrence spatiale) calculée à partir de ces études et d'env. 0.1.

3. Analyse de l'état géologique, géomorphologique, hydrogéologique (collecte de données de base sur le terrain) et formulation des scénarios de base (dits scénarios de formation des dangers)	• Carte des phénomènes (cf. chapitre 3.2). • Analyse de la prédisposition: délimitation des territoires présentant des signes avant-coureurs de phénomènes d'affaissement et de formation de dolines (karst). Délimiter également les territoires présentant une prédisposition à ces phénomènes. Délimiter les zones présentant une prédisposition uniforme en tant que sources de processus. • Les sources de processus doivent être désignées par un nom précis. • Aucune probabilité d'occurrence n'est attribuée au processus « Effondrements / Affaissements ».
4. Inventaire et évaluation des mesures de protection existantes	• Selon chapitre 3.1.
Analyse des effets	
5. Probabilité et ampleur des événements possibles	• La zone d'influence est délimitée sur la base de cartographies géologiques et d'investigations in situ. • L'échelonnement de l'intensité est déterminé comme suit : • faible intensité: sous-sol potentiellement karstique; la couverture du sous-sol potentiellement karstique autorise la possibilité d'affaissements à la surface du terrain; • intensité moyenne: sous-sol potentiellement karstique; des dolines / phénomènes d'effondrement sont présents à proximité immédiate. • Par ailleurs, les paramètres suivants doivent être collectés dans le « Périmètre Potentiel de dommages »: • probabilité d'occurrence spatiale, selon la description ci-dessous.
6. Présentation des résultats et des produits	• Cartes d'intensité pour le « Périmètre Potentiel de dommages » de chaque source de processus pour toutes les périodes de retour sélectionnées. • Enveloppe du processus pour le «Périmètre Évaluation des dangers». • Le minimum des produits à fournir est décrit au chapitre 3.8. Les produits à remettre en complément sont: • description des différentes sources de processus, avec photo; • présentation cartographique des sources de processus sur la carte des phénomènes. • Le modèle de données est décrit dans un document séparé.

Fig. 3.18 Critères d'intensité pour le processus Effondrement / Affaissement

Processus dangereux	Faible intensité	Intensité moyenne	Forte intensité
Affaissement, effondrement	Prédisposition existante	Présence de dolines ou événements connus	-----

Probabilité d'occurrence spatiale

La probabilité d'occurrence spatiale p_{Os} est déterminée, en fonction des spécificités de chaque cas, pour chaque source de processus, chaque période de retour et chaque type d'intensité. Elle peut varier au sein même d'une zone d'influence et elle est déterminée de la façon suivante:

$$p_{Os} = \frac{\text{Surface effectivement touchée par des phénomènes d'effondrement [a]}}{\text{Surface de processus délimitée [a]}}$$

$$p_{rA} = \frac{\text{Von Einsturzerscheinungen effektiv betroffene Fläche [a]}}{\text{Ausgeschiedene Prozessfläche [a]}}$$

On peut déduire la surface des phénomènes d'effondrement p. ex. à partir des événements historiques ou par analogie lors d'événements dans une topographie similaire.

3.8 Documentation: analyse des dangers et résultats à fournir

Cartes d'intensité sur papier

Les cartes d'intensité sont représentées sous forme synoptique pour chaque processus de danger et chaque période de retour. On choisira une échelle appropriée en fonction du problème et en concertation avec le mandant.

- En cas de chevauchement des zones concernées par les processus, on indiquera pour chacune d'elles l'intensité la plus élevée.
- Pour les endroits où l'on s'attend à des processus simultanés au-dessus, sur et au-dessous de la chaussée, les cartes devront présenter les effets sur la chaussée.
- Les zones de processus qui sont très rarement le cadre d'évènements sont également représentées sur des cartes sous forme numérique comme zone d'influence de processus.

On remettra également les données numériques de la présentation synoptique.

D'autre part, une carte comprenant toutes les sources de processus évaluées devra être élaborée. Cette carte doit permettre de voir si une analyse détaillée des dangers a été réalisée ou non selon la présente méthodologie et si ces sources de processus atteignent ou non le « Périmètre Potentiel de dommages ».

Données sous forme numérique

Conformément au modèle de données.

Rapport technique

Le rapport technique sert en particulier à assurer la traçabilité de l'évaluation et la transparence des procédures, des méthodes et des incertitudes. Les faits, les calculs et les interprétations doivent pouvoir être nettement distingués les uns et les unes des autres. Les incertitudes et les hypothèses doivent être mentionnées. D'autre part, le rapport doit préparer les bases et informations nécessaires aux phases suivantes (analyse des risques, planification des mesures).

Le contenu du rapport technique sur l'évaluation des dangers doit englober les points ci-dessous et être structuré selon le modèle de base suivant:

1. Introduction
2. Données de base utilisées
3. Renseignements généraux sur le périmètre d'investigation
4. Méthodologie d'investigation
5. Évaluation des dangers par processus et par source de processus, articulée comme suit:
 - nom de la source du processus;
 - délimitation de la zone du processus;
 - évènements historiques et traces d'évènements;
 - constatations significatives sur le terrain et évaluation de la prédisposition;
 - scénarios de base des différentes périodes de retour;
 - analyse des points faibles et scénarios des effets;
 - description des ouvrages de protection en place et évaluation de leur action pour chaque scénario;
 - ampleur et effets des processus;
 - documentation photographique.
6. Remarques finales (remarques particulières, s'il y a lieu).

Les pièces jointes et cartes à remettre en complément au rapport doivent être spécifiées dans les chapitres correspondants. Tous les produits papier doivent être également remis sous une forme numérique appropriée.

4 Analyse de l'exposition

4.1 Types de dommages possibles

Les scénarios des dommages possibles à prendre en compte sont à définir. Cette approche constitue une première évaluation des risques dont on tiendra compte et de ceux dont on ne tiendra pas forcément compte. Les scénarios des dommages possibles (= types de dommages possibles significatifs) pour le calcul des risques selon la présente méthodologie sont présentés dans la Fig. 4.1 pour ce qui concerne la chaussée et dans la Fig. 4.2 pour ce qui concerne les installations annexes.

Secteur chaussée

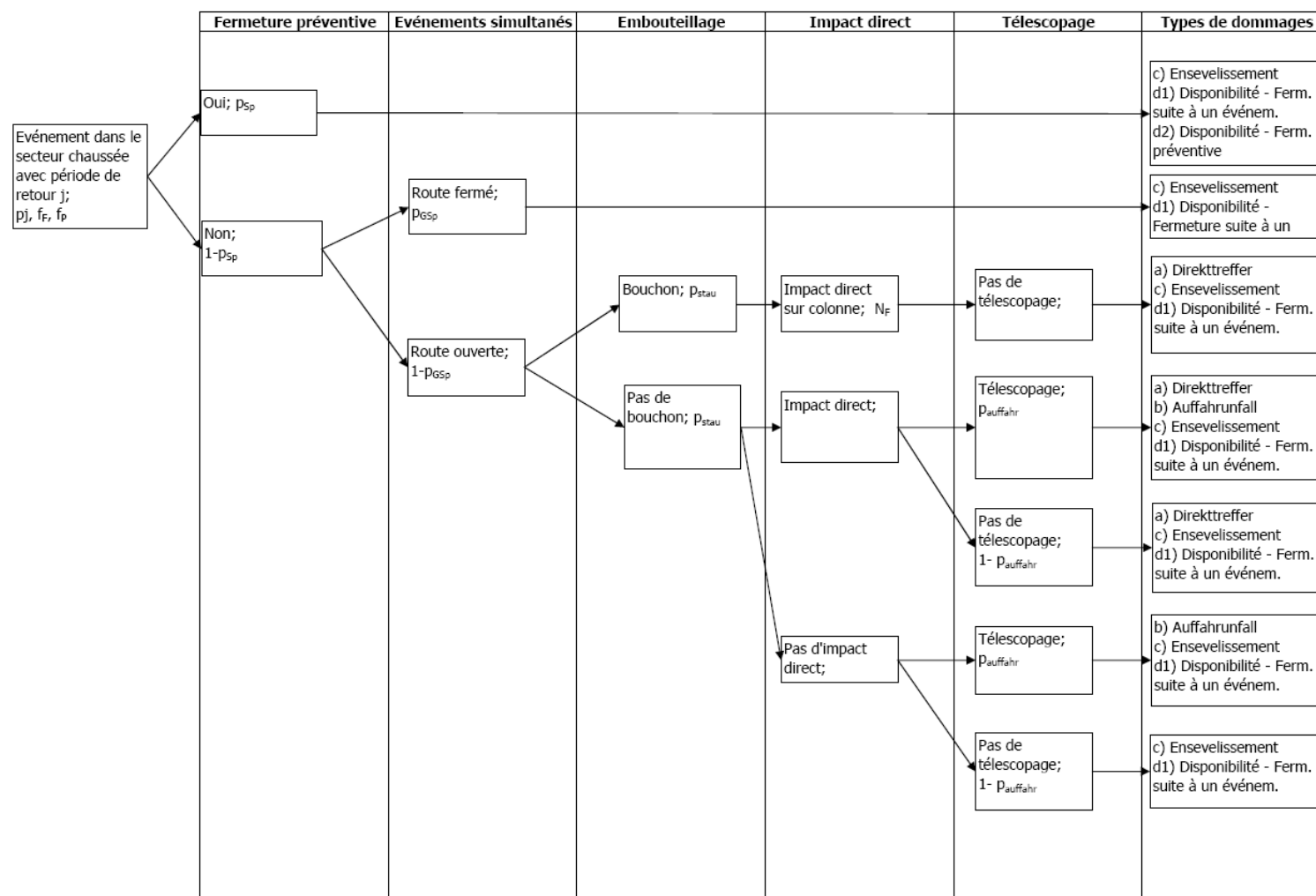


Fig. 4.1 Scénarios représentatifs de la formation de dommages Secteur chaussée.

a) « **Impact direct** »:

des personnes se trouvant sur l'axe de circulation sont directement touchées et tuées par le processus $\Rightarrow$ dommages aux personnes (victimes décédées; les blessés ne sont pas pris en compte séparément⁵).

b) « **Télescopage** »:

Des personnes subissent des dommages lors d'une collision avec un autre véhicule concerné par l'évènement dangereux ou avec un des dépôts de gravats consécutif à l'évènement naturel ou encore avec des débits de construction. Les personnes subissent un accident avec leur véhicule consécutivement à la disparition de tout ou partie de la chaussée ou de constructions. (emportées ou érodées par un processus) $\Rightarrow$ dommages aux personnes (victimes décédées; les blessés ne sont pas pris en compte séparément⁵).

c) « **Ensevelissement** »:

ensevelissement d'un axe de circulation par des gravats d'un processus, endommagement ou destruction de cet axe par les effets physiques du processus $\Rightarrow$ coûts de dégagement et de remise en état.

d) « **Disponibilité** »: un tronçon de route peut ne pas être disponible pour les raisons suivantes:

d1) « **Fermeture suite à un évènement** » pour travaux de déblaiement et de remise en état ou pour cause de danger persistant $\Rightarrow$ coûts pour route non disponible (coûts de déviation).

d2) « **Fermeture préventive** » d'une voie de circulation suite à un danger imminent $\Rightarrow$ coûts pour cause de route non disponible (coûts de déviation).

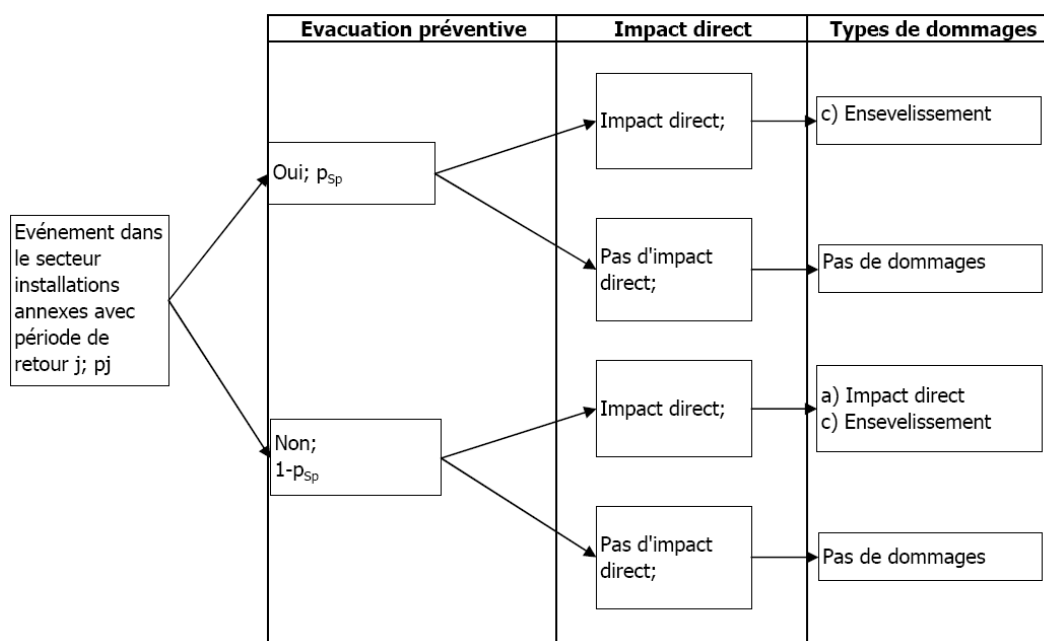
Secteur installations annexes

Fig. 4.2 Scénarios représentatifs de la formation de dommages Secteur installations annexes.

⁵ Les coûts subséquents causés par des blessés lors d'un accident peuvent être considérables. En raison du manque de valeurs empiriques permettant de déterminer le nombre de blessés et l'ampleur des blessures lors d'évènements naturels, seul le nombre de victimes décédées est pris en considération pour simplifier la prise en compte des conséquences.

a) « **Impact direct** »:

des personnes se trouvant sur des installations annexes sont directement touchées par le processus $\Rightarrow$ dommages aux personnes (victimes décédées; les blessés ne sont pas pris en compte séparément⁵).

c) « **Ensevelissement** »:

ensevelissement d'une installation annexe par un processus, endommagement ou destruction de l'installation par les effets physiques du processus $\Rightarrow$ coûts de déblaiement et de remise en état.

Précision

Pour ce qui est des processus de danger « Glissement permanent », « Inondations statiques » et « Effondrements/Affaissements », le scénario « Impact direct » n'a pas lieu d'être, ni dans le secteur « Chaussée », ni dans le secteur « Installations annexes ».

Le scénario « Télescopage » est inutile lorsque la hauteur des gravats ou de l'obstacle est inférieure à 15 cm et que l'intensité de l'évènement est en même temps classée comme « faible ».

Explication des paramètres **p_j = probabilité d'occurrence de l'évènement dans le scénario j**

Cette valeur découle de la période de retour d'un scénario attribuée par le ou la spécialiste des dangers naturels lors de l'analyse des dangers.

La probabilité p_j du scénario avec période de retour j est la probabilité que la valeur pour la période de retour j est certes atteinte ou dépassée, mais que celle pour la période de retour j+1 n'est pas dépassée. Par conséquent, la probabilité p_j du scénario j peut être décrite comme suit:

$$p_j = h_j - h_{j+1}$$

Probabilité	Occurrence	Période de retour j/ récurrence	p_j	Remarques
très forte	très fréquente	de > 0 à 10 ans inclus	$= \frac{1}{j} - \frac{1}{30}$	La valeur concrète de j est à déterminer sur la base du cadastre des événements.
forte	fréquente	de > 10 à 30 ans inclus	$= \frac{1}{30} - \frac{1}{100} = 0.0233$	
moyenne	rare	de > 30 à 100 ans inclus	$= \frac{1}{100} - \frac{1}{300} = 0.0067$	
faible	très rare	de > 100 à 300 ans inclus	$= \frac{1}{300}$	
très faible	extrêmement rare	> 300 ans		Correspond à un événement survenant encore plus rarement (p. ex. débit extrême [EHQ]); analyse des dangers uniquement pour les crues, pas de détermination des risques.

f_c = facteur chaussée

Les processus de dangers naturels n'affectent pas toujours toute la largeur de la chaussée, selon la situation, il se peut qu'ils s'arrêtent déjà sur la bande d'arrêt d'urgence ou au milieu de la chaussée. L'influence de cet aspect sur les différents types de dommages possibles est la suivante:

Fig. 4.3 Influence du facteur chaussée sur les différents types de dommages possibles

Type de dommages possibles selon Figure 4.1	Le processus concerne	Répercussion sur le type de dommages
A – Impact direct	toute la chaussée	Tout le Trafic Journalier Moyen (TJM) de la chaussée est affecté.
	une voie dans un sens	Situation normale: le TJM de la voie (= moitié du TJM de la chaussée) est affecté. Situation d'embouteillage: le nombre des véhicules touchés resp. des personnes doit être divisé par deux selon la formule de la page 53.
	la bande d'arrêt d'urgence	Pas d'impact direct.
B - Télescopage	toute la chaussée	Probabilité de télescopage selon Fig. 4.10.
	une voie dans un sens	Probabilité de télescopage moitié moins grande que dans Fig. 4.10.
	la bande d'arrêt d'urgence	Pas de télescopage.
C - Ensevelissement	toute la chaussée	Ampleur des dommages selon Annexe A
	une voie dans un sens	Ampleur des dommages moitié moins grande que dans Annexe A
	la bande d'arrêt d'urgence	Ampleur des dommages : un quart de la valeur indiquée dans Annexe A
D1 – Disponibilité: fermeture après événement	toute la chaussée	Temps de déviation supplémentaire et durée moyenne de fermeture selon Fig. 5.2.
	une voie dans un sens	Circulation alternée ⇒ temps d'attente supplémentaire (= temps de déviation supplémentaire) = 15 minutes.
	la bande d'arrêt d'urgence	Aucune atteinte à la disponibilité.
D2 – Disponibilité: fermeture préventive		Aucune influence sur l'ampleur des dommages dans ce type de dommages.

f_p = facteur position

Un processus de danger naturel peut aussi bien se dérouler à côté de la chaussée, sur la chaussée, au-dessus de la chaussée (p. ex. toit de galerie) et au-dessous de la chaussée (p. ex. ponts).

L'influence des différents types de dommages est la suivante:

Fig. 4.4 Importance de la position du processus de dangers naturels par rapport à la chaussée pour les différents types de dommages possibles

Position du processus de dangers naturels par rapport à la chaussée	Importance pour les types de dommages possibles suivants
A côté de la chaussée	Types de dommages A, B, C, D1: aucune importance. Type de dommages D2: importance à définir en fonction des particularités de l'objet.
Sur la chaussée	Importance selon la présente méthodologie.
Au-dessus de la chaussée	Types de dommages A, B et D1: importance, si une construction peut s'écrouler. Type de dommages C: importance, si une construction est endommagée ou peut s'écrouler. Type de dommages D2: importance à définir en fonction des particularités de l'objet.
Au-dessous de la chaussée	Types de dommages A, B et D1: importance, si une construction peut s'écrouler. Type de dommages C: importance, si une construction est endommagée ou peut s'écrouler. Type de dommages D2: importance à définir en fonction des particularités de l'objet.

p_{Ferm} = fermeture préventive (probabilité de fermeture p_{Ferm})

Ce paramètre tient compte du fait qu'un tronçon de route menacé est fermé préventivement avant l'apparition du processus dangereux, resp. du fait que des personnes peuvent être évacuées à temps des installations annexes concernées. Pour les sources de processus équipées d'un dispositif de mesure automatique et / ou pour les processus induits par les conditions météorologiques (neige, eaux et coulées de boues), la probabilité de fermeture doit être déterminée pour chaque source de processus et chaque scénario. Pour tous les autres cas, le paramètre à utiliser est p_{Ferm} = 0. Les probabilités de fermeture doivent être estimées en concertation avec les services responsables. Dans ce cas, on se servira de l'échelonnement suivant, en s'appuyant sur Fig. 4.5:

Fig. 4.5 Estimation de la probabilité de fermeture p_{Ferm}

Probabilité de fermeture p _{Ferm}	La fermeture de la route est
0.9	assez sûre
0.5	vraisemblable
0.1	peu vraisemblable
0	invraisemblable

Si l'on dispose de valeurs plus précises, basées sur des expériences antérieures, celles-ci seront à utiliser.

p_{FermS} = fermeture par suite d'événements simultanés: le cas pris en compte est celui d'un tronçon d'autoroute déjà ou encore fermé pour des événements consécutifs à un premier événement de même type, ou celui d'une installation annexe déjà touchée par un processus de même type agissant sur la même installation annexe. Pour ce faire, on tient compte, pour chaque scénario, du nombre de points de danger n entre deux sorties d'autoroute, qui seraient susceptibles d'apparaître suite à un même événement météorologique (neige, eaux et coulées de boues). La probabilité de fermeture par suite d'événements simultanés p_{FermS} est calculée comme suit⁶:

$$p_{FermS} = a \times \left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

$$p_{GSp} = a \times \left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

⁶ Exemple: Si 5 torrents traversent la route entre 2 sorties d'autoroute, pour chaque torrent
p_{FermS} = 0.75 x (1-1/5) = 0.6.

Fig. 4.6 Facteurs servant à déterminer la probabilité de fermeture suite à des événements simultanés

Abréviat-ion	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
a	Le facteur de réduction prend en compte le fait que dans la réalité, il est rare que toutes les sources de processus soient déclenchées par un seul et même événement météorologique, ou que les événements arrivent de manière tellement simultanée qu'il n'est plus possible de procéder à une fermeture entre les deux événements.	[]	Doit être déduite des événements historiques en coopération avec les responsables de l'évaluation des dangers et les services responsables. Si ce n'est pas possible, on utilisera $a = 0.75$. Plus la corrélation entre les différents points de danger est petite, plus on choisira un coefficient a petit.
n	Nombre de sources de processus qui peuvent être déclenchées par le même événement météorologique et qui sont la cause de la fermeture préventive d'un tronçon de route. Par tronçon de route, il faut comprendre le tronçon entre 2 jonctions en service.	[]	Évaluation des dangers.

Le facteur p_{FermS} doit être déterminé séparément pour chaque source de processus et chaque scénario. Si une autre répartition du premier ensevelissement peut être reconstituée sur la base de la documentation de l'évènement, ces valeurs devront être adaptées en conséquence.

Pour les processus « chute », « les glissements permanents » et les « glissements spontanés », ainsi que pour les processus « Effondrement / Affaissement », on utilise le facteur $p_{\text{FermS}} = 0$.

Différenciation des situations d'exposition

En ce qui concerne les risques pour les personnes, il est nécessaire de délimiter différentes situations d'exposition. On distingue deux situations d'exposition différentes: la situation normale et la situation d'embouteillage.

La probabilité des différentes situations d'exposition peut se calculer comme suit:

Situation d'embouteillage:

$$p_{\text{bouchon}} = \left(\frac{\text{Nombre de bouchon par an}}{365} \right) \times \left(\frac{\text{Durée moyenne par bouchon [h]}}{24} \right)$$

$$p_{\text{Stau}} = \left(\frac{\text{Anzahl Staus pro Jahr}}{365} \right) \times \left(\frac{\text{Durchschnittliche Dauer pro Stau [h]}}{24} \right)$$

Situation normale:

$$p_{\text{norm}} = 1 - p_{\text{bouchon}}$$

$$p_{\text{Norm}} = 1 - p_{\text{Stau}}$$

4.2 Objets menacés

Nature des objets

Trois types d'objets sont a priori touchés lorsque des routes nationales sont affectées par des dangers naturels.

Fig. 4.7 Types d'objets menacés et types de dommages possibles

Type d'objet	Type de dommage
- Personnes qui, en cas d'évènement, se trouvent sur le tronçon de route touché ou peuvent s'y engager avec leur véhicule. - Personnes qui, en cas d'évènement, se trouvent dans l'une des installations annexes.	Décès de la personne
Chaussée et ouvrages d'art s'y rattachant selon le périmètre d'entretien (UH-Peri)	- Coûts de déblaiement et de remise en état - Coûts inhérents à une interruption du trafic (coûts de déviation) en raison d'un évènement ou d'une fermeture préventive dans l'attente d'un évènement
Installations annexes selon UH-Peri	Coûts de déblaiement et de remise en état

Nombre et probabilité de la présence de personnes menacées

Impact direct Chaussée

Le nombre des véhicules touchés N_V se calcule à partir du trafic journalier moyen (TJM). On y sélectionne les valeurs de TJM saisonniers en fonction de l'occurrence saisonnière des processus.

Processus de danger selon Figure 3.1	Le TJM des mois suivants est déterminant:
Avalanches coulantes et poudreuses, glissement de plaques de neige, chute de glace	De décembre à avril
Coulées de boues, débordement avec épandage alluvial, inondation, débordement de laves torrentielles, érosion des berges / affouillement	De mars à novembre
Chute de pierres, chute de blocs, éboulement, glissement permanent, glissement spontané, écroulement / affaissement	De janvier à décembre.

Le nombre N_V des véhicules se trouvant dans la zone du processus peut donc être calculé pour le scénario « Impact direct » comme suit:

Situation normale:

$$N_{Vnorm} = \frac{TJM \times lm}{v \times 24'000}$$

$$N_{FNorm} = \frac{DTV \times g}{v \times 24'000}$$

Formule en cas d'embouteillage:

$$N_{Vbouchon} = \frac{(\rho_{max} \times lm)}{1000}$$

$$N_{FStau} = \frac{(\rho_{max} \times g)}{1000}$$

Fig. 4.8 Facteurs servant à déterminer le nombre de véhicules dans la zone de danger

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Origine des données
l _m	Longueur du tronçon menacé sur la route par zone d'intensité	[m]	Carte d'intensité comme indiqué au chapitre 3.
v	Vitesse maximale signalisée	[km/h]	Selon les indications de MISTRA resp. des responsables régionaux.
TJM	Trafic journalier moyen	[véhicules/jour]	Postes de comptage automatique de la circulation routière.
ρ _{max}	Densité maximale des véhicules dans les situations d'embouteillage = 140 véh. / km et par voie de circulation.	[véhicules/km]	Hoffmann et Nielsen, 1993: Description des écoulements de trafic au niveau de nœuds routiers signalisés [39]. Cette valeur tient compte d'une part de 10% de poids lourds d'une longueur moyenne des véhicules légers de 5,5 m.

Complément au TJM: aux endroits où l'on ne dispose pas de chiffres TJM (p. ex. sorties et entrées, rampes) les valeurs doivent être fixées en concertation avec les services compétents et sur la base de réflexions concernant leur plausibilité.

Avec un taux d'occupation moyen β, le nombre de personnes menacées N_P peut être calculé comme suit:

$$N_P = N_V \times \beta$$

$$N_P = N_F \times \beta$$

Fig. 4.9 Facteurs servant à déterminer le nombre de personnes menacées dans la zone dangereuse

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Origine des données
N _P	Nombre de personnes touchées	[personnes]	
N _V	Nombre de véhicules touchés	[véhicules]	Déduction comme ci-dessus
β	Taux d'occupation moyen = 1.76	[Personnes/véhicule]	Tient compte dans le TJM d'une part de 0.5 % pour des autocars dont la moyenne d'occupants est de 25 personnes. Selon [21] et [59]

Impact direct Installations annexes

Le nombre de personnes N_P et la durée de présence T_P de personnes menacées se trouvant sur une installation annexe entre 6 h du matin et 22 h doivent être fixés en fonction des particularités de l'objet. Pour ce faire, on devra interroger les responsables des centres d'entretien tout comme les exploitants de restoroutes.

Télescopage Chaussée

Le fait qu'un véhicule entre en collision avec des gravats sur la chaussée resp. le fait qu'il puisse freiner à temps devant un dommage sur la chaussée causé par un processus dangereux est influencé par les facteurs externes suivants:

- visibilité, vitesse du véhicule, sinuosité et rayons des virages du tronçon, densité du trafic routier.

L'analyse des événements naturels sur les routes nationales du canton de Berne, enregistrés jusqu'à maintenant dans la base de données StorMe, a révélé que la probabilité de télescopage est d'environ 15% en cas d'évènement. C'est une valeur moyenne, indépendante du type de route.

Pour estimer la probabilité d'un télescopage $p_{\text{télescop}}$ sur un tronçon donné, il est nécessaire d'analyser les télescopages et leur répartition sur le réseau des routes nationales. A cet effet, chacun des tronçons de route à examiner sera affecté à l'une des trois catégories suivantes (Fig. 4.10):

Fig. 4.10 Probabilité de télescopage

Probabilité de télescopage en mots	Limites des catégories pour $p_{\text{télescop}}$	Valeur à utiliser pour $p_{\text{télescop}}$ dans l'analyse des risques
fréquente	> 0.2	0.25
moyenne	de 0.1 à 0.2	0.15
improbable	< 0.1	0.05

Le nombre de personnes touchées dans le scénario « Télescopage » est de $\beta = 1.76$ personnes.

Le scénario « Télescopage » n'est pertinent que pour la situation d'exposition « Situation normale ». D'autre part, ce scénario n'a pas à être pris en compte dans le cas d'une hauteur de gravats resp. d'un diamètre de bloc inférieur à 0.15 m associés à un événement de faible intensité.

Position et dimensions des objets stationnaires

L'analyse des risques tient compte des ouvrages d'infrastructure, placés sous la responsabilité de l'OFROU, suivants:

- la chaussée, rampes et voies d'accès comprises;
- les ponts;
- les galeries;
- les tunnels et leurs entrées;
- les installations annexes (restoroutes, aires de repos, centres d'entretien et de la police, postes de contrôle, etc.).

La position et la taille déterminantes des objets stationnaires sont celles indiquées dans le périmètre d'entretien (UH-Peri) ou par MISTRA.

Une adaptation de la valeur spécifique des objets à prendre en compte doit être discutée en amont avec le mandant.

Valeur des objets stationnaires

La valeur des objets a été déterminée sur la base d'enquêtes menées au sein de l'OFROU, elle tient également compte des données figurant dans les publications spécialisées (par exemple: [16], [30], [23], [45], [56], [59]). Ces valeurs sont présentées dans l'annexe A. Les valeurs de base des ouvrages d'art (ponts, tunnels, galeries et autres) doivent être déterminées en fonction des particularités de l'objet concerné. L'annexe A. donnent des valeurs indicatives à cet effet.

Frais entraînés par une interruption du trafic

La disponibilité d'une route ou d'un tronçon de route est essentielle pour le trafic routier. L'absence de cette disponibilité donne lieu à des coûts suite aux déviations du trafic et à des durées de trajet prolongées en conséquence. Ce dommage n'est certes pas subi par l'exploitant d'une route, mais, rétrospectivement, il constitue bien l'un des arguments les plus importants en faveur de la mise en place de mesures de protection le long des routes nationales. Les réactions de différents groupements d'intérêts suite à des événements naturels se sont, elles aussi, concentrées surtout sur l'argument de la non-disponibilité ou le nonaccès et sur les dommages subséquents qui en découlent.

Les coûts inhérents à une interruption du trafic peuvent être chiffrés approximativement en fonction du coût des embouteillages. Selon [20] les coûts des embouteillages diffèrent en fonction des pertes de temps, ainsi que des coûts touchant l'exploitation, les accidents et l'environnement par suite de l'embouteillage. Ceci ne permet certes pas de donner une image exacte de la non-disponibilité d'une route, mais les coûts des embouteillages permettent une approximation.

Un modèle développé par l'IVT-EPF permet d'estimer les coûts résultant des interruptions. Il couvre les pertes de temps consécutives aux déviations, le coût variable des accidents ainsi que les déplacements annulés dans le cadre du travail ou des loisirs.

5 Analyse des conséquences

5.1 Risques pour les personnes

Impact direct Chaussée

A l'exception des avalanches, les données manquent pour quantifier la vulnérabilité des personnes et des véhicules lors d'impacts directs sur la chaussée. L'analyse de l'histoire des accidents d'avalanches sur les routes donne selon [60] une létalité moyenne de 0.18, mais l'intensité de l'évènement n'a pas été vraiment mise en évidence.

Dans les bases méthodologiques éditées pour effectuer des analyses de risques au cours des dernières années, différentes valeurs concernant la létalité des usagers de la route ont été publiées. Toutes sont basées sur des hypothèses ainsi que sur des réflexions portant sur leur plausibilité. Ces valeurs diffèrent les unes des autres, parfois assez fortement. Elles partent en partie aussi d'hypothèses différentes et de types de dommages possibles différents (p. ex. avec ou sans prise en compte spécifique du type de dommage « Télescopage »). Étant donné qu'il n'existe actuellement pas de valeur précise sur la sensibilité (létalité) pour l'impact sur les personnes ou sur les véhicules, on utilisera les valeurs indiquées dans Annexe II (s'appuyant sur [16])⁷.

Télescopage Chaussée

Pour le scénario « Télescopage », on part de l'hypothèse que la létalité est analogue à la létalité d'un télescopage moyen sur l'autoroute, indépendamment du type et de l'intensité du processus. Selon SN 640 007⁸ celle-ci est de 0.0066.

Impact direct Installation annexe

Pour ce scénario d'accident, en ce qui concerne la vulnérabilité, il convient d'appliquer les mêmes règles que dans le scénario « Impact direct Chaussée ». On utilisera également dans ce cas les valeurs globales admises dans les publications spécialisées. On tiendra compte du fait que des personnes peuvent se trouver sur des installations annexes soit à l'extérieur, soit à l'intérieur des bâtiments. On utilisera les valeurs selon l'annexe II.

5.2 Risques matériels

Il existe deux méthodes pour analyser les risques matériels et leurs conséquences.

- l'intégration des données de l'analyse des dangers dans l'application KUBA-DB (banque de données des ouvrages d'art) selon [30]; les interfaces entre les deux méthodes n'ayant pas encore pu être définies avec plus de précision pendant la période de temps disponible, cette approche ne sera plus abordée en détail;
- utilisation d'approches globales analogues à celle de la létalité qu'on retrouve dans les méthodes utilisées jusqu'ici.

La deuxième méthode sera présentée en détail ci-après.

⁷ Pour les processus de danger: glissement permanent, inondation statique et écoulement / affaissement, le scénario « Impact direct » n'a pas lieu d'être.

⁸ Cette valeur a été déduite comme suit de SN 640 007 (accidents de la route):

12.7% des accidents sur les autoroutes et les routes entraînent des dommages aux personnes, 5.2% des dommages aux personnes sur les autoroutes et les routes sont mortels $\Rightarrow$ létalité $\lambda = 0.127 * 0.052 = 0.0066$

Ensevelissement: coûts de déblaiement et de remise en état

Ici encore, on manque de bases scientifiquement reconnues sur la manière dont l'ampleur des dommages pourrait être quantifiée pour le scénario « Ensevelissement ». Néanmoins, l'incertitude des données est un peu moins grande dans ce cas que dans celui de la létalité, puisque l'on dispose de certaines valeurs empiriques basées sur des événements historiques répétés. Ces événements n'ont toutefois pas été systématiquement analysés jusqu'à présent.

La détermination de l'ampleur des dommages pour le scénario « Ensevelissement » est effectuée à l'aide des valeurs selon l'annexe A. La vulnérabilité des ouvrages d'art (galerries, ponts, etc.) en sera déduite en fonction des spécificités de l'objet. Dans le cas de processus permanents, les valeurs des dommages attendus par an peuvent également être déduites des coûts d'entretien périodiques à l'aide des données existantes (p. ex. dans les zones présentant des affaissements réguliers).

Disponibilité : frais entraînés par une interruption du trafic

Comme décrit au chapitre 4, le risque concernant le cas de dommages possibles « Disponibilité » doit être converti en valeur monétaire au moyen du taux de coût des embouteillages. La vulnérabilité se compose des éléments suivants:

- durée de la fermeture de la route,
- durée de trajet supplémentaire par suite de déviation,
- coûts par heure supplémentaire de durée de trajet pour chaque véhicule (= taux de coût des embouteillages).

Durée de la fermeture de la route:

Ici, deux cas doivent être pris en compte:

- la fermeture préventive;
- la fermeture après un événement.

Fermeture préventive:

La durée de fermeture $d_{\text{Fermprév}}$ [en jours] et la fréquence de fermeture f_{Ferm} doivent être déterminées en collaboration avec les services responsables à l'aide de la Fig. 5.1 pour chaque scénario et chaque source de processus. Si des données plus précises, spécifiques à un objet sont disponibles, celles-ci devront être impérativement utilisées.

Fig. 5.1 Relation entre la probabilité de fermeture p_{Ferm} et la fréquence de fermeture nécessaire à cet effet.⁹

Probabilité de fermeture p_{Ferm}	La fermeture de la route est	Fréquence de fermeture nécessaire f_{Ferm} []	Durée moyenne de fermeture par fermeture $d_{\text{Fermprév}}$ [jours]
0.9	assez certaine	4	A déterminer en fonction des spécificités de l'objet ¹⁰
0.5	vraisemblable	2	
0.1	peu vraisemblable	1	

Ce facteur doit être déterminé séparément pour chaque source de processus et chaque scénario.

⁹ Selon [60], en cas d'avalanches (et vraisemblablement aussi en cas de laves torrentielles), on doit tenir compte du fait que, les fermetures préventives sont plus longues que celles qui sont consécutives à un événement. C'est également le cas lorsque les fermetures sont générées par des installations automatique de surveillance, qui peuvent occasionner des fausses alertes et pour lesquelles les valeurs-limites pour une mise en alerte sont paramétrées de manière plutôt conservatrice. On pourra prendre ceci en compte dans le scénario « Disponibilité – Fermeture préventive » avec la fréquence de fermeture > 1 .

¹⁰ L'expérience a montré que la durée des fermetures préventives excède rarement 24 heures. Mais dans certains cas justifiés, on devra pouvoir choisir également une valeur plus élevée.

Fermeture après un évènement

La durée d'une interruption du trafic (= durée de fermeture d_{Ferme}) peut, sur la base de la description qualitative des niveaux d'intensité dans [17], et en fonction de l'intensité de l'évènement¹¹, être décrite comme suit:

Fig. 5.2 Durée moyenne de fermeture d_{Ferme} en fonction de l'intensité de l'évènement pour le scénario d1) « Disponibilité – Fermeture après un évènement »

Intensité de l'évènement	Durée moyenne de fermeture	Valeurs pour d_{Ferme} [jours]
1 (faible)	1 h	1/24
2 (moyenne)	1 jour	1
3 (forte)	1 semaine	7

Est déterminant l'intensité maximale est déterminant par évènement intervenant sur la chaussée pour chaque source de processus et chaque scénario.

Coûts journaliers dûs à la fermeture de la route.

Pour le calcul de coûts de fermeture de la route, on utilise un modèle de trafic développé par l'IVT-ETHZ. Ce modèle permet de quantifier les coûts occasionnés par des fermetures de tronçons dans le réseau des routes nationales, en considérant :

1. le coûts de détour pour des voitures individuelles et des camions,
2. l'augmentation des coûts consécutive à l'augmentation du danger d'accidents,
3. la non-réalisation des voyages professionnels et de loisirs.

Pour des informations détaillées, voir [refer. Erath, A. (2011) Vulnerability assessment of road transport infrastructure, Ph.D. thèse, ETH Zurich, Zurich [35]].

Un scénario été et un scénario hiver ont été calculés. Le scénario hiver présuppose la non-disponibilité des cols habituellement fermés en hiver.

Si la route cantonale se situe dans un périmètre proche de la route nationale (= ou < à 50 m), on admet l'hypothèse que cette route cantonale est complètement fermée au trafic (dans les 2 directions).

Ce scénario pessimiste correspond à des évènements rares ou carrément irréalistes. Néanmoins, il s'agit de la seule méthode possible pour calculer les coûts de fermeture d'une manière standardisée et automatisée pour toute la Suisse (Cartes de risques et zones risques). Ainsi, on garantit la prise en compte de tous les évènements possibles y compris les évènements très rares. L'approche décrite ci-dessus est appliquée systématiquement sur l'ensemble du réseau des routes nationales pour l'évaluation des dangers naturels.

Ensuite, dans la phase « Appréciation des risques et des mesures », on fait une analyse détaillée de tous les hotspots résultant de cette approche systématique sur l'ensemble du réseau (contrôles de plausibilité) en considérant les conditions locales réalistes (déviation du trafic, disponibilité du réseau).

¹¹ En comparaison les CFF s'appuient sur les valeurs suivantes, selon [56]:

Intensité de l'évènement	Durée moyenne de fermeture
1 (faible)	0.5 jour
2 (moyenne)	10 jours
3 (forte)	50 jours

6 Calcul du risque

6.1 Généralités

Le risque se calcule en fonction de la source du processus, de la période de retour (scénario) et des types de dommages possibles, au moyen de la formule générale suivante:

$$R_{i,j} = ps_{i,j} \times S_{i,j}$$

$R_{i,j}$ = Risque de l'objet i dans le scénario j

$ps_{i,j}$ = Probabilité d'occurrence d'un dommage pour l'objet i selon le scénario j

$S_{i,j}$ = Ampleur du dommage pour l'objet i selon le scénario j

Avec

$$ps_{i,j} = p_j \times p_{i,j}$$

et

$$S_{i,j} = A_i \times v_{i,j}$$

la formule du risque peut également s'écrire comme suit:

$$R_{i,j} = p_j \times p_{i,j} \times A_i \times v_{i,j}$$

$$R_j = \sum_i R_{i,j}$$

$$R = \sum_j R_j$$

$R_{i,j}$ = Risque de l'objet i dans le scénario j

p_j = Probabilité du scénario j

$p_{i,j}$ = Probabilité que l'objet i soit exposé au scénario j

A_i = Valeur de l'objet i

$v_{i,j}$ = Vulnérabilité de l'objet i dans le scénario j

Dans ce qui suit, les formules de calcul de risque pour chaque type de dommage possible seront déduites de la probabilité d'occurrence et de l'ampleur du dommage. Dans tous les calculs ultérieurs, il conviendra de vérifier si le processus dangereux concerne la bande d'arrêt d'urgence, la voie de circulation dans un sens ou bien la totalité de la chaussée (les deux directions). Le nombre de personnes touchées, les possibilités de déviations ainsi que l'ampleur des dommages causés aux biens concernés doivent être adaptés en conséquence.

6.2 Type de dommage possible a: impact direct

Chaussée

Ce type de dommage est pertinent pour les processus « Chute », « Coulées de boues », « Glissements de terrain spontanés », « Avalanches », « Inondation dynamique » ainsi que pour les « Laves torrentielles / débordements » avec épandage alluvial touchant la chaussée.

Probabilité de dommage $p_{S_{Dchaussée}}$ en situation d'embouteillage:

$$p_{S_{Dchaussée} \text{ Bouchon}} = p_j \times (1 - p_{Ferm}) \times (1 - p_{FermS}) \times p_{Bouchon}$$

$$p_{S_{Dfahrbahn} \text{ Stau}} = p_j \times (1 - p_{Sp}) \times (1 - p_{GSp}) \times p_{Stau}$$

et en situation normale:

$$p_{S_{Dchaussée} \text{ Norm}} = p_j \times (1 - p_{Ferm}) \times (1 - p_{FermS}) \times p_{Norm}$$

$$p_{S_{Dfahrbahn} \text{ Norm}} = p_j \times (1 - p_{Sp}) \times (1 - p_{GSp}) \times p_{Norm}$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
p_j	Probabilité du scénario j.	[1 / ans]	Valeur selon la page 49.
P_{Ferm}	Probabilité de fermeture préventive, à définir séparément pour chaque source de processus.	[]	Valeur selon Fig. 4.6 page 51.
P_{FermS}	Probabilité de fermeture en raison d'événements simultanés; à définir séparément pour chaque source de processus.	[]	Voir formule page 52.
$p_{Bouchon}$	Probabilité de situation d'embouteillage.	[]	Déduction, voir page 52..
p_{Norm}	Probabilité de situation normale.	[]	Déduction, voir page 52..

Ampleur des dommages $S_{Dchaussée}$

$$S_{Dchaussée} = N_P \times \lambda \times p_{Os} \times f_C$$

$$S_{Dfahrbahn} = N_P \times \lambda \times p_{rA} \times f_F$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
N_P	Nombre de personnes touchées par scénario	[]	Calcul selon la formule page 53 pour chaque situation d'exposition.
p_{Os}	Probabilité d'occurrence spatiale par rapport à l'ensemble de la surface de dépôt	[]	Valeur définie par l'expert en dangers selon le chapitre 3.
λ	Létalité en cas d'évènement	[]	Valeur liée à la nature et à l'intensité du processus selon Annexe II.
f_C	Facteur lié à la chaussée	[]	Déduction, voir page 50.

Le risque $R_{Dchaussée;Qj}$ encouru par des personnes sur la chaussée en raison de l'impact direct peut se calculer, pour chaque source de processus Q et chaque scénario j, de la façon suivante:

$$R_{DchausséeQ,j} = (S_{DchausséeBouchon} \times pS_{DchausséeBouchon}) + (S_{DchausséeNorm} \times pS_{DchausséeNorm})$$

$$R_{Dfahrbahn;Q,j} = (S_{Dfahrbahnstau} \times pS_{Dfahrbahnstau}) + (S_{DfahrbahnNorm} \times pS_{DfahrbahnNorm})$$

Installation annexe

Ce type de dommage est pertinent pour les processus « Chute », « Coulées de boues », « Glissements de terrain spontanés », « Avalanches », Inondation dynamique ainsi que Laves torrentielles / débordement avec épandage alluvial touchant des personnes se trouvant sur des installations annexes.

Probabilité de dommage $pS_{Dannexe}$:

$$pS_{Dannexe} = p_j \times (1 - p_{Sp}) \times (1 - p_{GSp}) \times 0.67$$

$$pS_{Dnebenanlage} = p_j \times (1 - p_{Sp}) \times (1 - p_{GSp}) \times 0.67$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
p_j	Probabilité du scénario j	[1 / ans]	Valeur selon la page 49.
p_{Sp}	Probabilité d'évacuation préventive, à définir séparément pour chaque source de processus et chaque scénario.	[]	Voir Fig. 4.5 page 51.
p_{GSp}	Probabilité d'évacuation suite à des événements simultanés; à définir séparément pour chaque source de processus et chaque scénario.	[]	Voir formule page 52.
0.67	Ceci permet de tenir compte du fait que page 53, la moyenne du nombre de visiteurs a été déterminée entre 6 h du matin et 22 h, car 95 % du TJM se déroule à ces heures. Simultanément, l'hypothèse admise est que la probabilité d'évènement ne varie pas en fonction de l'heure de la journée.	[]	$0.95 \times \frac{16}{24} = 0.67$

Ampleur des dommages $S_{Dannexe}$:

$$S_{Dannexe} = N_P \times \frac{F}{F_N} \times \lambda \times p_{Os}$$

$$S_{Dnebenanlage} = N_P \times \frac{F}{F_N} \times \lambda \times p_{rA}$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
N_P	Nombre de personnes touchées par scénario	[]	Détermination selon la page 54.
F	Surface au sein de F_N balayée par le processus dans le scénario j	[m ²]	A déterminer en fonction de l'évaluation du danger.
F_N	Surface de l'installation annexe sur laquelle se trouvent N_P personnes	[m ²]	A déterminer en fonction de la définition de N_P .
p_{Os}	Probabilité d'occurrence spatiale par rapport à l'ensemble de la surface de dépôt	[]	Valeur définie par l'expert en dangers selon le chapitre 3.
λ	Léthalité en cas d'évènement	[]	Valeur liée à la nature et à l'intensité du processus selon Annexe II

Le risque $R_{Dannexe;Q,j}$ encouru par des personnes sur des installations annexes en raison de l'impact direct peut se calculer, pour chaque source de processus Q et chaque scénario j, de la façon suivante:

$$R_{DannexeQj} = (S_{Dannexe} \times pS_{Dannexe})$$

$$R_{Dnebenanlage;Q,j} = (S_{Dnebenanlage} \times pS_{Dnebenanlage})$$

6.3 Type de dommage possible b: télescopage

Le type de dommage « télescopage » est pertinent pour tous les processus concernant la chaussée. Il n'est pas nécessaire d'en tenir compte lorsque l'intensité du processus est faible et que la hauteur des gravats resp. la taille des blocs est < 0.15 m. Le type de dommage « télescopage » ne doit pas non plus nécessairement être pris en compte lors des processus « Glissement permanent » et « Effondrement / affaissement » de faible intensité. Il n'est pertinent que lors d'un écoulement normal du trafic, dans la mesure où l'on suppose que les obstacles apparaissant dans les situations d'embouteillage sont identifiés à temps.

Étant donné que la probabilité de télescopage a été obtenue par déduction pour chaque événement naturel, conformément à la page 55, le risque de ce type de dommage se calcule par source de processus et par scénario, pour être ensuite, dans le scénario j, réparti uniformément sur le tronçon de route concerné par cette source de processus

Probabilité de dommage $pS_{télescop}$:

$$pS_{télescop} = p_j \times (1 - p_{Sp}) \times (1 - p_{GSp}) \times p_{télescop} \times f_C \times (1 - p_{Bouchon})$$

$$pS_{auffahr} = p_j \times (1 - p_{Sp}) \times (1 - p_{GSp}) \times p_{auffahr} \times f_F \times (1 - p_{Stau})$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
p_j	Probabilité du scénario j	[1 / ans]	Valeur selon la page 49.
p_{Sp}	Probabilité de fermeture préventive, à définir séparément pour chaque source de processus et chaque scénario.	[]	Voir Fig. 4.5 page 51.
p_{GSp}	Probabilité de fermeture suite à des événements simultanés; à définir séparément pour chaque source de processus et chaque scénario.	[]	Voir formule page 52.
$p_{télescop}$	Probabilité de télescopage suite à un événement naturel sur le tronçon de route concerné	[]	Valeur conformément au Fig. 5.1.
f_C	Facteur lié à la chaussée	[]	Déduction, voir page 50.
$p_{Bouchon}$	Probabilité d'embouteillage	[]	Déduction, voir page 48.

Ampleur des dommages $S_{télescop}$:

$$S_{télescop} = N_p \times \lambda$$

$$S_{auffahr} = N_p \times \lambda$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
N _P	Nombre de personnes touchées par scénario	[]	1.76 (taux d'occupation moyen d'un véhicule d'après la page 54)
λ	Létalité en cas d'évènement	[]	0.0066 d'après la page 57

Le risque $R_{\text{télésco};Q,j}$ encouru par des personnes sur la chaussée par suite d'un télescopage avec un obstacle peut se calculer, pour chaque source de processus Q et chaque scénario j, de la façon suivante:

$$R_{\text{télésco};Q,j} = (S_{\text{télésco}} \times pS_{\text{télésco}})$$

$$R_{\text{auffahr};Q,j} = (S_{\text{auffahr}} \times pS_{\text{auffahr}})$$

6.4 Type de dommage possible c: ensevelissement

Chaussée

Le type de dommage « ensevelissement de la chaussée » est pertinent pour tous les processus examinés dans l'analyse des dangers touchant la chaussée proprement dite. Il est également pertinent pour tous les processus examinés dans l'analyse des dangers susceptibles de dégrader les ouvrages d'art qui se trouvent au-dessus ou au-dessous de la chaussée, comme indiqué au chapitre 2.7.

Probabilité de dommage pS_{ensev} :

$$pS_{\text{ensev}} = p_j$$

$$pS_{\text{verschütt}} = p_j$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
p _j	Probabilité du scénario j	[1 / ans]	Valeur selon la page 49

Ampleur des dommages S_{ensev} :

$$S_{\text{ensev}} = g \times W \times SE \times p_{Os} \times f_C$$

$$S_{\text{verschütt}} = g \times W \times SE \times p_{rA} \times f_F$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
g	Longueur du tronçon de route effectivement touché par zone d'intensité	[m]	Carte d'intensité de l'évaluation des dangers
W	Valeur de base d'un objet touché (tronçons touchés, ouvrages d'art)	[CHF / m]	Valeur conformément à Annexe A
SE	Vulnérabilité d'un objet touché (tronçons touchés, ouvrages d'art)	[]	Valeur liée à la nature de l'objet ainsi qu'à la nature et à l'intensité du processus selon Annexe I
p _{os}	Probabilité d'occurrence spatiale d'un processus	[]	Valeur définie par l'expert en dangers selon le chapitre 3
f _c	Facteur lié à la chaussée	[]	Déduction, voir page 50.

Le risque $R_{\text{ensev};Q,j}$ encouru par la chaussée par suite de travaux de déblaiement et de remise en état peut se calculer, pour chaque source de processus Q et chaque scénario j, de la façon suivante:

$$R_{\text{ensev};Q,j} = (S_{\text{ensev}} \times pS_{\text{ensev}})$$

$$R_{\text{verschütt};Q,j} = (S_{\text{verschütt}} \times pS_{\text{verschütt}})$$

Installations annexes

Le type de dommage « ensevelissement des installations annexes » est pertinent pour tous les processus examinés dans l'analyse des dangers qui touchent les installations annexes d'après la page 55.

Probabilité de dommage ps_{ensev} :

$$ps_{ensev} = p_j$$

$$ps_{verschütt} = p_j$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
p_j	Probabilité du scénario j	[1 / ans]	Valeur selon la page 49

Ampleur des dommages S_{ensev} :

$$S_{ensev} = F \times W \times SE \times p_{Os}$$

$$S_{verschütt} = F \times W \times SE \times p_{rA}$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
F	Surface de l'objet effectivement touché par zone d'intensité	[m ²]	Carte d'intensité de l'évaluation des dangers.
W	Valeur de base d'un objet touché (bâtiment, parking ou similaire)	[CHF / m ²]	Valeur conformément à Annexe I
SE	Vulnérabilité d'un objet touché (bâtiment, parking ou similaire)	[]	Valeur liée à la nature de l'objet ainsi qu'à la nature et à l'intensité du processus Annexe I
p_{Os}	Probabilité d'occurrence spatiale d'un processus	[]	Valeur définie par l'expert en dangers selon le chapitre 3.

Le risque $R_{ensev;Q,j}$ encouru par les installations annexes en raison de travaux de déblaiement et de remise en état peut se calculer, pour chaque source de processus Q et chaque scénario j, de la façon suivante:

$$R_{ensev;Q,j} = (S_{ensev} \times ps_{ensev})$$

$$R_{verschütt;Q,j} = (S_{verschütt} \times ps_{verschütt})$$

6.5 Type de dommage possible d1: disponibilité – fermeture après évènement

Le type de dommage « disponibilité – fermeture après évènement » est pertinent pour tous les processus examinés dans l'analyse des dangers touchant la chaussée proprement dite. Il est également pertinent pour tous les processus examinés dans l'analyse des dangers se déroulant au-dessus ou au-dessous de la chaussée selon chapitre 2.7 et susceptibles de dégrader les ouvrages d'art qui s'y trouvent. Il convient de déterminer pour chaque objet si la remise en état des ouvrages d'art touchés entraîne ou non une interruption de la chaussée (ex. piles de ponts affouillées, toits de galeries endommagés). Si des ouvrages d'art sont touchés, on clarifiera pour chaque objet s'il faut prévoir des durées de fermeture plus longues.

Dans la mesure où seule l'intensité maximale prévisible de l'évènement est déterminante pour chaque source de processus et chaque scénario, le risque « disponibilité – fermeture après évènement » est calculé par source de processus et par scénario pour être réparti ensuite uniformément sur le tronçon de route concerné par cette source de processus.

Si dans le scénario j , plusieurs zones de processus touchent la chaussée sur un même tronçon de route (entre deux sorties d'autoroute) et que ces processus peuvent être déclenchés par le même évènement météorologique (neige, eau et coulées de boues), le risque à calculer sera alors celui de la source de processus qui est la cause de la fermeture de la chaussée au trafic dans le scénario donné. Si n zones de processus présentent la même intensité dans le scénario j , le risque se répartit alors sur les n sources de processus.

Probabilité de dommage ps_{dispoE} pour la neige, l'eau et les coulées de boues:

$$ps_{dispoE} = \left(p_j \times \frac{1}{n} \right)$$

$$ps_{verfügE} = \left(p_j \times \frac{1}{n} \right)$$

Probabilité de dommage ps_{dispoE} pour les autres processus:

$$ps_{dispoE} = p_j$$

$$ps_{verfügE} = p_j$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
p_j	Probabilité du scénario j	[1 / ans]	Valeur selon la page 49
n	Nombre de sources de processus qui peuvent être déclenchées par le même évènement météorologique et qui sont la cause de la fermeture préventive d'un tronçon de route. Par tronçon de route, il faut comprendre le tronçon entre 2 jonctions en service.	[]	Évaluation des dangers

Ampleur des dommages S_{dispoE} :

$$S_{dispoE} = d_{SpE} \times K_{ferm\ été / hiver}$$

$$S_{verfügE} = d_{SpE} \times K_{Sp\ Sommer / Winter}$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
d_{FermE}	Durée de fermeture après l'évènement.	[jours]	Déduction en fonction de l'intensité maximale de l'évènement à prévoir d'après la Fig. 5.2.
$K_{ferm\ été / hiver}$	Taux de coût de fermeture au trafic été / hiver.	[CHF / jour]	modèle IVT-ETH

Le risque $R_{dispoE;Q,j}$ menaçant le tronçon en raison de sa fermeture après un évènement peut se calculer, pour chaque source de processus Q et chaque scénario j, de la façon suivante :

$$R_{dispoE;Q,j} = (S_{dispoE} \times pS_{dispoE})$$

$$R_{verfügeE;Q,j} = (S_{verfügeE} \times pS_{verfügeE})$$

6.6 Type de dommage possible d2: disponibilité – fermeture préventive

Le type de dommage « disponibilité – fermeture préventive » est pertinent pour toutes les sources de processus examinées dans l'analyse des dangers au moyen d'un dispositif de mesure automatique et / ou pour les processus d'origine météorologique (neige, eau et coulées de boues) touchant la chaussée proprement dite. Dans tous les autres cas, ce type de dommage n'est pas pertinent.

Dans la mesure où la probabilité et l'ampleur des dommages par source de processus et par scénario sont indépendants des autres paramètres relevés lors de l'analyse des dangers, le risque lié à la « disponibilité – fermeture préventive » sera calculé pour chaque source de processus et chaque scénario pour être réparti ensuite uniformément sur le tronçon de route concerné par cette source de processus.

Si n zones présentant des processus de même nature touchent la chaussée sur un même tronçon (entre deux sorties d'autoroute) et qu'il est possible de le fermer à titre préventif, on devra alors établir, avec les services responsables, quelle est la source de processus principalement à l'origine de la fermeture préventive. Le risque relatif à la fermeture préventive est alors attribué à cette source de processus. Si cette attribution est impossible, le risque calculé (une fois par scénario) devra alors être réparti sur les n sources de processus.

Probabilité de dommage $pS_{dispoFerm}$:

$$pS_{dispoFerm} = \left(p_j \times h_{Ferm} \times \frac{1}{n} \right)$$

$$pS_{verfügeSp} = \left(p_j \times h_{Sp} \times \frac{1}{n} \right)$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
p_j	Probabilité du scénario j	[1 / ans]	Valeur selon la page 49
n	Nombre de sources de processus qui peuvent être déclenchées par le même évènement météorologique et qui sont la cause de la fermeture préventive d'un tronçon de route. Par tronçon de route, il faut comprendre le tronçon entre 2 jonctions en service.	[]	
h_{Ferm}	Fréquence de la fermeture préventive.	[]	A établir d'après la page 58 et suiv.

Ampleur des dommages $S_{dispoFerm}$:

$$S_{dispoFerm} = d_{Fermprév} \times K_{ferm\ été / hiver}$$

$$S_{verfügSP} = d_{SPvorsorg} \times K_{Sp\ Sommer/Winter}$$

Abbréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
$d_{Fermprév}$	Durée par fermeture	[jours]	Détermination de la durée de fermeture d'après la page 59 et suiv.
$K_{ferm\ été/hiver}$	Taux de coût de fermeture au trafic été/hiver.	[CHF / jour]	modèle IVT-ETH

Le risque $R_{dispoFerm;Q,j}$ relatif au tronçon en raison d'une fermeture préventive peut se calculer pour chaque source de processus Q et chaque scénario j de la façon suivante:

$$R_{dispoFerm;Q,j} = (S_{dispoFerm} \times ps_{dispoFerm})$$

$$R_{verfügSp;Q,j} = (S_{verfügSp} \times ps_{verfügSp})$$

Le risque découlant de la non-disponibilité du tronçon $R_{dispo;Q,j}$ peut donc s'obtenir par l'addition suivante:

$$R_{dispo;Q,j} = R_{dispoE;Q,j} + R_{dispoFerm;Q,j}$$

$$R_{verfüg;Q,j} = R_{verfügE;Q,j} + R_{verfügSp;Q,j}$$

6.7 Addition de risques

Risques collectifs

Les risques des différents types de dommages par source de processus et par scénario sont présentés séparément. Ils s'additionnent par type de dommage et par source de processus sur l'ensemble des scénarios. Le risque encouru par les personnes sur la chaussée s'obtient en additionnant les risques des types de dommage « impact direct » et « télescopage ». Le risque global de « disponibilité » d'un tronçon se compose du risque lié à une fermeture après un événement et du risque lié à une fermeture préventive.

Lorsque l'on compare et que l'on additionne les risques des différents types de dommages d'une même source de processus pour chaque scénario ou bien pour l'ensemble des scénarios, tous les risques sont alors convertis dans l'unité [CHF / an]. En outre, les risques pour les personnes sont multipliés par les coûts marginaux conformément au concept de risque de PLANAT [48] (5 Mio. de CHF).

Les risques par source de processus peuvent ensuite être additionnés aux risques par tronçon (p. ex. d'une bretelle d'autoroute à une autre).

Les risques des différentes sources de processus se rapportent au tronçon et y sont représentés en tant que [risque / unité de tronçon]. Les risques qui se superposent sont additionnés par couches.

Risques individuels

Le risque individuel de décès est examiné pour les tronçons parcourus quatre fois par jour par un pendulaire moyen. Les tronçons déterminants à cet égard doivent être précisés par le mandant.

Le risque individuel de décès par source de processus Q dans le scénario j se calcule de la façon suivante:

$$r_{ind,Q,j} = \frac{(4 \times R_{Dchaussée;Q,j} + 4 \times R_{téléscope;Q,j})}{(TJM \times \beta)}$$

$$r_{ind,Q,j} = \frac{(4 \times R_{Dfahrbahn;Q,j} + 4 \times R_{auffahr;Q,j})}{(DTV \times \beta)}$$

Les risques individuels de décès s'additionnent pour toutes les sources de processus sur ce tronçon et pour tous les scénarios.

6.8 Documentation relative au calcul du risque et produits à remettre

La détermination et la représentation du risque ont pour but de répondre aux questions suivantes et de mettre à disposition les produits graphiques (cartes, tableaux) correspondants:

- analyse et représentation du risque collectif en fonction des différents types de dommages possibles et des situations d'exposition au moyen de tableaux et de graphiques;
- analyse et représentation des risques collectifs en fonction de la source de processus et des différents types de dommages possibles au moyen de tableaux et de graphiques;
- analyse et représentation des risques collectifs et individuels en fonction des tronçons et sous-tronçons;
- représentation du risque global en fonction des tronçons sur une carte au 1/5'000, standardisée avec des tronçons de 100 m;
- représentation du risque par source de processus sous forme de diagrammes « camembert » sur la carte ci-dessus, répartis selon le type de dommage possible;
- représentation du risque en fonction des tronçons sous forme d'histogrammes cumulés avec kilométrage, réparti par processus principal;
- rapport technique avec représentation et discussion des bases de données et des résultats déterminants;
- D'autres résultats pourront être fournis en concertation avec le mandant.

Des exemples de représentation des risques figurent dans l'annexe D.

7 Appréciation des risques et des mesures

7.1 Généralités

L'appréciation des risques et des mesures permet d'une part de vérifier si les risques identifiés peuvent ou non être supportés par les exploitants des installations et par la société. Cette vérification s'effectue en appliquant des valeurs limites.

Elle fixe, d'autre part, des procédés et des critères permettant d'examiner et d'optimiser les coûts et l'utilité de différentes combinaisons et variantes de mesures de réduction des risques.

L'appréciation des risques et des mesures s'applique à des tronçons adaptés à la situation de risque concernée (délimitation du système). Les tronçons correspondants peuvent être délimités par des zones de processus simples et combinées, par des données liées à l'infrastructure routière (ex. bretelles, options de déviation) ou bien par des besoins particuliers de l'exploitant ou de l'utilisateur (p. ex. pendulaires). La plus petite unité judicieuse est constituée d'une seule zone de processus. À l'opposé, il est théoriquement possible d'inclure la totalité du réseau des routes nationales et de ses connexions au-delà des frontières. Cette délimitation s'opère au cas par cas, en fonction des problématiques et des données.

Les mesures considérées comme optimales dans le processus d'appréciation doivent correspondre aux conditions générales existantes en termes de législation, de normes, de directives (externes et internes), etc.

Les éléments de l'appréciation du risque et des mesures de la présente méthodologie sont:

- les critères d'examen pour les risques existants et persistants,
- le schéma de détermination des zones à risque nécessitant une planification prioritaire,
- les critères d'efficience et d'efficacité pour déterminer les mesures simples ou combinées optimales.

Les différents risques liés aux personnes, aux objets et à la disponibilité ne sont pas pondérés différemment. Les risques liés aux personnes se traduisent par le montant des frais de sauvetage (coûts marginaux), ce qui permet de les comparer aux autres risques et de les utiliser dans l'analyse coût/efficacité (voir également le chapitre 6.7).

Les risques définis dans l'analyse des risques ne sont pas évalués avec des facteurs d'aversion.

7.2 Critères de contrôle

En théorie, il est concevable de fixer des objectifs de protection quantitatifs pour les risques individuels et collectifs liés aux personnes, aux objets et à leur disponibilité. Fixés dans l'absolu, ces objectifs de protection seraient alors à atteindre impérativement et quels que soient les coûts des mesures correspondantes.

Par ailleurs, dans la pratique actuelle, les objectifs de protection sont souvent compris comme des valeurs cibles à atteindre, à condition de réaliser un rapport coût/efficacité $KW \geq 1$.

Critère 1 : Risque individuel de décès

Le critère de contrôle fixé par l'OFROU est une valeur limite de probabilité de décès de $1 \cdot 10^{-5}$ par an. Cette valeur s'applique aux usagers empruntant régulièrement un parcours défini par l'OFROU (exemples : pendulaire faisant la navette quatre fois par jour sur un parcours donné). Cette valeur sert de critère de contrôle et non d'objectif de protection absolu. Elle garantit que les tronçons présentant des risques individuels accrus pour les

personnes sont reconnus comme tels. Sur ces tronçons, on devra faire impérativement l'évaluation de mesures de réduction des risques et contrôler leur efficacité et leur efficacité. Les mesures ne seront mises en œuvre que si ces critères sont remplis.

La valeur limite de la probabilité de décès de $1 \cdot 10^{-5}$ par an est déduite de la probabilité moyenne de décès de toutes les personnes âgées de 15 ans en Suisse. L'hypothèse retenue est un risque de décès dû aux dangers naturels de 10 à 100 fois inférieur à celui considéré comme acceptable par la société. Conformément au concept de risque de PLANAT [48], c'est la valeur de $1 \cdot 10^{-5}$ qui est choisie.

Pour les risques individuels liés aux objets ou à la disponibilité, aucun objectif de protection ou critère de contrôle assorti de valeurs limites n'est fixé. Ces risques ne font pas l'objet d'objectifs de protection assortis de valeurs limites plausibles et fixes, car elles sont difficiles à définir.

Outre le critère 1 décrit ci-dessus, les 2 critères suivants basés sur les risques collectifs sont à considérer :

Critère 2 : Risque sur le tronçon $> 100 \text{ CHF} / \text{m} \cdot \text{an}$

Critère 3 : Risque par zone de processus ou par installation annexe $> 10'000 \text{ CHF} / \text{an}$

Les risques collectifs ne font pas l'objet d'objectifs de protection. L'appréciation de ces risques est effectuée lors de l'optimisation de la décision concernant les mesures à prendre afin de réduire le risque (efficacité et efficacité des mesures).

7.3 Efficience et efficacité des mesures

L'appréciation des risques collectifs s'effectue par l'évaluation de la mesure ou des mesures combinées optimales pour réduire ces risques. Parmi les différentes actions possibles (mesures combinées) au sein du système examiné (tronçon, région, etc.), il s'agit d'identifier celles dont l'efficacité et l'efficacité sont optimales [10].

Lors de cette appréciation, les risques liés aux personnes et aux objets sont considérés comme équivalents dans l'évaluation des mesures. Aucune préférence n'est accordée à la réduction d'un risque ou d'un autre.

L'efficacité et l'efficacité des mesures envisageables sont évaluées au moyen de leur coût (MK) et de leur utilité (ΔR) (analyse coût/efficacité): $KW = \Delta R / MK \geq 1$

- les mesures ne sont mises en œuvre que lorsque le rapport coût/efficacité $KW = \Delta R / MK \geq 1$, ce qui signifie que l'utilité nette est > 0 ;
- parmi les mesures et combinaisons de mesures qui remplissent la condition ci-dessus, la combinaison retenue est celle qui offre l'efficacité la plus élevée (différence utilité – coût) (c'est-à-dire qui optimise l'utilité nette et minimise le coût global).

Conformément à [60], les coûts pris en compte sont les coûts réels directs (ex. frais d'investissement, d'entretien et de réparation). Ils peuvent être évalués aux prix du marché.

L'appréciation de l'utilité repose sur les dommages évités, c'est-à-dire sur la différence entre le risque avant les mesures et le risque après les mesures. L'évaluation financière des différents risques a été exposée dans les chapitres précédents consacrés à l'analyse des risques. L'appréciation de l'utilité doit se rapporter à l'ensemble des risques pris en compte. Si le choix d'une mesure accroît un risque donné (p. ex. des frais de déviation plus élevés dus à la sélection du concept de fermeture choisi), il doit être pris en compte comme une baisse d'utilité.

Lors de l'analyse, de l'appréciation et de la comparaison de différentes mesures on tiendra compte de leur coût et de leur utilité pour différentes durées temporelles. Pour simplifier, et conformément à [48] et [59], les flux de coûts et d'utilité dans le temps sont sup-

posés constants. On applique une évaluation statique des coûts, qui ne tient pas compte de l'amortissement. D'après [48], cela peut se justifier par le fait que a) l'utilité n'est pas actualisée et b) les incertitudes de la méthode d'évaluation des coûts se trouvent dans le même intervalle d'incertitude que l'ensemble de l'analyse.

Techniquement, les mesures de réduction des risques sont évaluées en fonction des critères d'efficience et d'efficacité. Cependant, la décision de les mettre en œuvre dépend souvent d'autres facteurs (d'ordre politique, écologique ou économique p. ex.).

7.4 Procédé de planification et d'appréciation des mesures

Les résultats de l'analyse et l'appréciation du risque jettent les bases de la planification et l'appréciation des mesures. Le but de la planification des mesures est de trouver la mesure ou le train de mesures aboutissant à une réduction optimale des risques individuels et collectifs au sens des critères susmentionnés.

Dans le cadre d'une gestion intégrale des risques, la planification des mesures doit comprendre toutes les mesures envisageables et judicieuses aux trois niveaux de prévention, d'intervention et de remise en état. Par ailleurs, il convient d'envisager des mesures organisationnelles au sein de l'OFROU, coordonnées avec la gestion des risques (activités internes), ainsi que des mesures au niveau de l'information et de la sensibilisation (voir Annexe V).

Procédé

La planification des mesures comprend les étapes de travail ci-dessous (voir également Fig. 7.3).

- Évaluation des mesures et combinaisons de mesures techniquement possibles (faisabilité, effets sur la nature et l'environnement). Les mesures possibles se répartissent dans les quatre groupes suivants:
 - mesures d'aménagement du territoire: la zone exposée ne doit pas être utilisée ou bien l'utilisation actuelle doit être adaptée. Pour les voies de communication, cette option signifie, par exemple, contourner les zones dangereuses ou bien déplacer les éléments de construction sensibles (p. ex. les piles de ponts), ou alors limiter dans la mesure du possible la circulation sur les tronçons très exposés;
 - mesures techniques de construction: à cet égard, on distingue les mesures de protection agissant contre un événement naturel afin d'en diminuer le danger ou d'exercer une influence substantielle sur son déroulement ou sur sa probabilité d'occurrence (les exemples étant les ouvrages paravalanches, les aménagements de torrents, les digues de protection, etc.), et les mesures de protection appliquées à un objet afin de réduire les dommages sans pour autant influencer le déroulement de l'événement naturel (les exemples étant les galeries de protection, etc.);
 - mesures biologiques: l'effet stabilisateur des plantes sert à éviter, ou au moins à limiter, l'apparition et l'extension de processus notamment gravitationnels. L'exemple le plus connu est celui de la forêt de protection;
 - mesures organisationnelles: la préparation aux situations critiques, l'alerte préalable et l'intervention en cours d'évènement réduisent les dommages possibles. Les exemples sont les avis de tempête, les plans de fermeture, l'exploitation de systèmes de mesure, etc.
- L'entretien des ouvrages de protection existants fait également partie des mesures techniques de construction.
- Appréciation de l'efficacité des mesures (effet sur le déroulement du processus et / ou sur les biens exposés) et réappréciation de la situation de risque après réalisation des mesures (utilité = risque avant mesure – risque après mesure).
- Estimation des frais d'investissement, d'exploitation, d'entretien et de réparation et calcul des frais annuels par déduction de ce résultat.
- Comparaison des coûts annuels avec l'utilité annuelle (risques globaux réduits).

- Choix de la variante optimale parmi celles présentant un rapport $KW = \Delta R/MK \geq 1$ (valeur maximum du rapport coût/efficacité).
- Si la valeur limite du risque de décès individuel sur le tronçon concerné est dépassée, les autres risques individuels liés aux personnes sont examinés et d'autres mesures peuvent au besoin être envisagées tant que l'équation $KW = \Delta R/MK \geq 1$ se vérifie.
- Lorsque l'équation $KW = \Delta R/MK < 1$ se vérifie pour l'ensemble des variantes, les mesures doivent être revues ou abandonnées.
- Proposition de mesure.

Les résultats de l'analyse et de l'appréciation des risques ne sont toutefois qu'un des facteurs de la planification des mesures. Entrent également en ligne de compte:

- des critères écologiques (compatibilité avec l'environnement et le paysage);
- des critères de société (pas de report des coûts sur les générations futures, pas de discrimination d'un groupe de population par rapport à un autre);
- le déroulement de la planification de l'entretien sur les routes nationales;
- les capacités.

La présente méthodologie ne permet pas d'intégrer systématiquement ces derniers critères dans le sens de la durabilité. Pour cela, il existe d'autres instruments (p. ex. les analyses de la valeur utile).

Estimation de l'efficacité et de l'utilité

L'efficacité d'une mesure doit être estimée pour chaque objet susceptible d'être endommagé. Elle s'évalue pour chaque source de processus et se distingue en fonction du scénario, de la situation d'exposition et des types de dommages possibles. Ainsi, compte tenu de son effet sur la situation de risque, une mesure peut être classée comme suit:

- en termes d'effet sur le processus, la mesure agit sur:
 - la probabilité d'occurrence (p. ex. nettoyage de rochers, clouage de parois),
 - l'envergure (ex. minage préventif d'avalanches),
 - la portée (ex. digue de protection) ou
 - l'intensité d'un événement (p. ex. forêt de protection contre les chutes de pierres);
- en termes d'effet sur le potentiel de dommages, la mesure agit sur:
 - la probabilité de présence de personnes exposées (p. ex. fermeture, limitation ou déviation de la circulation),
 - la vulnérabilité d'un objet (p. ex. galerie de protection, amélioration des options de déviation).

L'évaluation de l'efficacité des mesures techniques de construction peut être réalisée selon [48], dans la mesure où l'on évalue l'effet d'une mesure sur la probabilité d'occurrence et l'ampleur de l'événement. D'autres règles de dimensionnement propres aux objets devront également être prises en compte (p. ex. [1])

En principe, les mesures biologiques peuvent, elles aussi, être évaluées par la manière dont elles influencent l'importance et la probabilité d'occurrence de l'événement. Cependant, les approches quantitatives sont encore partiellement insuffisantes dans ce domaine.

Pour les mesures organisationnelles, il n'existe pas encore d'approches systématiques permettant d'évaluer leur efficacité. Elles sont déduites au cas par cas, en fonction de l'objet et sur la base de valeurs empiriques, du savoir des experts et des extrapolations tirées des résultats de la recherche.

L'évaluation des mesures d'aménagement du territoire doit contenir une analyse du risque pour l'objet *i* sur son nouvel emplacement, en tenant compte de tous les processus dangereux pertinents d'après la présente méthodologie.

Sur la base de l'efficacité ainsi déterminée, la situation de risque fait l'objet d'un nouvel examen en fonction de mesures pour chaque scénario et chaque situation d'exposition pertinents. A cet égard, il faut tenir compte du fait que, pour certaines mesures (p. ex.

fermetures de routes), les risques de certains types de dommages possibles (p. ex. la disponibilité) peuvent augmenter. La hausse de risque correspondante sera à prendre en compte lors du calcul des risques par mesure. L'utilité de la mesure correspond à la réduction de risque obtenue et s'exprime en tant que différence entre le risque initial et le risque restant après la mesure.

$$\Delta R_m = R_0 - R_m$$

$$N_m = R_0 - R_m$$

ΔR_m = utilité de la stratégie de la mesure m

R_0 = risque de la variante zéro (risque initial)

R_m = risque de la stratégie de la mesure m

Estimation des coûts

Les coûts annuels d'une mesure de protection se décomposent comme suit:

- **coûts d'investissement** (= coûts du capital): ils sont composés des coûts de l'amortissement et des intérêts; l'échéance des coûts du capital se déduit de la durée de vie de la mesure;
- **frais courants**: ils sont composés des coûts d'exploitation, d'entretien et de réparation.

On applique un calcul des coûts statique, tel qu'il est proposé dans [59] (annuité).

Ainsi, les coûts annuels K_j peuvent se décrire comme suit:

$$C_{an} = C_{ex} + C_{en} + C_r + C_a + C_i$$

$$K_j = K_b + K_u + K_r + K_a + K_z$$

Avec

$$C_a = \frac{(I_0 - L_n)}{n}$$

$$K_a = \frac{(I_0 - L_n)}{n}$$

et

$$C_i = \left[L_n + \frac{(I_0 - L_n)}{2} \right] \times \left(\frac{p}{100} \right) = \left(\frac{(I_0 + L_n)}{2} \right) \times \left(\frac{p}{100} \right)$$

$$K_z = \left[L_n + \frac{(I_0 - L_n)}{2} \right] \times \left(\frac{p}{100} \right) = \left(\frac{(I_0 + L_n)}{2} \right) \times \left(\frac{p}{100} \right)$$

L'équation de base ci-dessus peut ainsi s'écrire:

$$C_{an} = C_{ex} + C_{en} + C_r + \frac{(I_0 - L_n)}{n} + \left(\frac{(I_0 + L_n)}{2} \right) \times \left(\frac{p}{100} \right)$$

$$K_j = K_b + K_u + K_r + \frac{(I_0 - L_n)}{n} + \left(\frac{(I_0 + L_n)}{2} \right) \times \left(\frac{p}{100} \right)$$

Abréviation	Explication	Unité de mesure	Valeur et origine des données
C_{an}	Coûts annuels	[CHF / an]	
C_{ex}	Coûts d'exploitation: par exemple frais de personnel, frais d'éclairage de galeries, frais d'exploitation de systèmes de mesure, etc.	[CHF / an]	A déduire au cas par cas ou selon Annexe III
C_{en}	Coûts d'entretien: par exemple coûts des travaux d'entretien annuels tels que la vidange des pièges à alluvions ou des filets pare-pierres, etc.	[CHF / an]	A déduire au cas par cas ou selon Annexe III
C_r	Coûts de réparation: par exemple coûts de remise en état après des événements.	[CHF / an]	A déduire au cas par cas ou selon Annexe III
C_a	Coûts d'amortissement	[CHF / an]	D'après l'équation ci-dessus
C_i	Coût des intérêts	[CHF / an]	D'après l'équation ci-dessus
I_0	Coûts d'investissement	[CHF]	A définir au cas par cas
L_n	Valeur résiduelle	[CHF]	A déduire au cas par cas ou selon Annexe III
n	Échéance	[années]	A déduire au cas par cas ou selon Annexe III
p	Coût des intérêts	[%]	2 (d'après [60])

Estimation de la combinaison de mesures optimale

Évaluation d'une mesure individuelle:

- évaluation financière et addition des risques,
- estimation des coûts annuels, de l'utilité (= réduction du risque) et des risques résiduels (prendre en compte la différence d'efficacité sur les différents types de risque),
- mise en œuvre lorsque le rapport coût/efficacité $KW = \Delta R/MK \geq 1$,
- vérification du respect de la condition de base (risque individuel de décès).

Optimisation de plusieurs mesures et de mesures combinées:

- évaluation des mesures individuelles (voir ci-dessus),
- constitution de combinaisons de mesures au moyen de mesures individuelles pour lesquelles le rapport coût/efficacité $KW = \Delta R/MK \geq 1$,
- estimation des coûts annuels, de l'utilité (= réduction du risque) et des risques résiduels des différentes combinaisons. A cet égard, il faut absolument tenir compte de la redondance en matière d'efficacité (utilité) et de coûts. Pour les combinaisons, à moins que des motifs techniques n'imposent de faire autrement, la mesure présentant le meilleur rapport coût-utilité est toujours mise en œuvre en premier,
- maximisation de l'utilité nette $\Delta R_{N,m}$:

$$\Delta R_{N,m} = \Delta R_m - C_{j,m}$$

$$N_{N,m} = N_m - K_{j,m}$$

$\Delta R_{N,m}$ = utilité nette de la stratégie de mesure m

ΔR_m = utilité de la stratégie de mesure m conformément à la Fig. 7.3

$C_{j,m}$ = coûts annuels de la stratégie de mesure conformément à la Fig. 7.3

- représentation de l'utilité et des coûts d'après le graphique ci-dessous Fig. 7.1.
- représentation des droites d'efficacité passant par le point zéro,
- estimation de la parallèle à l'enveloppe la plus éloignée.
- vérification du respect de la condition de base (risque individuel de décès)

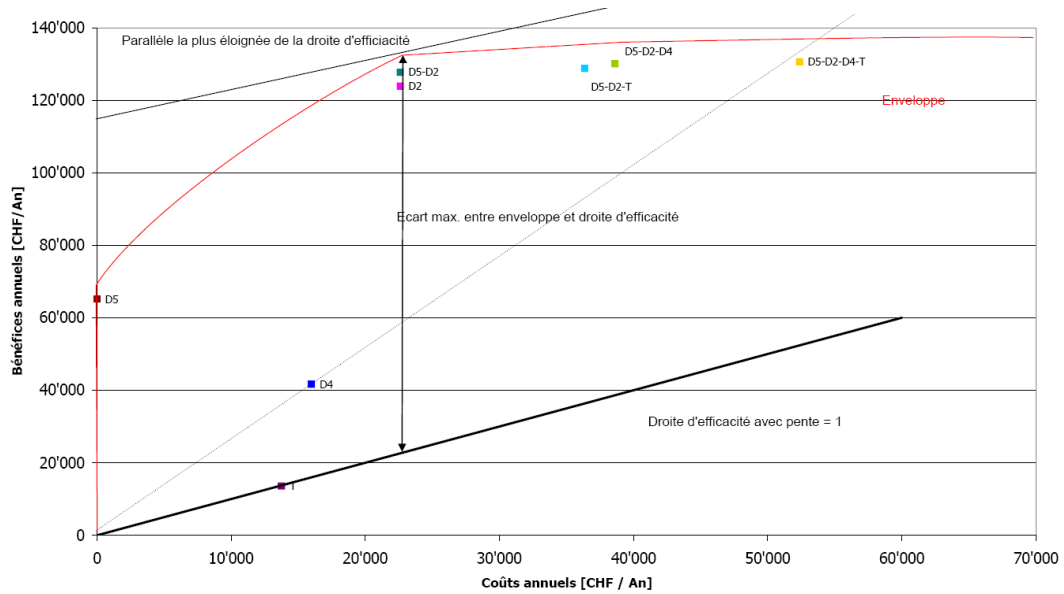


Fig. 7.1 Détermination de la stratégie optimale de mesures à l'aide d'un exemple pratique avec les variantes de mise en œuvre séparées des mesures D2, D4, D5 et T et leurs combinaisons. Dans ce cas, la combinaison optimale de mesures est D5-D2.

Pour déterminer la stratégie optimale de mesures, il est également possible, d'après [60], de minimiser le coût global K_G (voir Fig. 7.2):

$$C_{G,m} = R_m + C_{j,m}$$

$$K_{G,m} = R_m + K_{j,m}$$

$C_{G,m}$ = coût global de la stratégie de mesures m
 R_m = risque de la stratégie de mesures m
 $C_{j,m}$ = coût annuel de la stratégie de mesures m

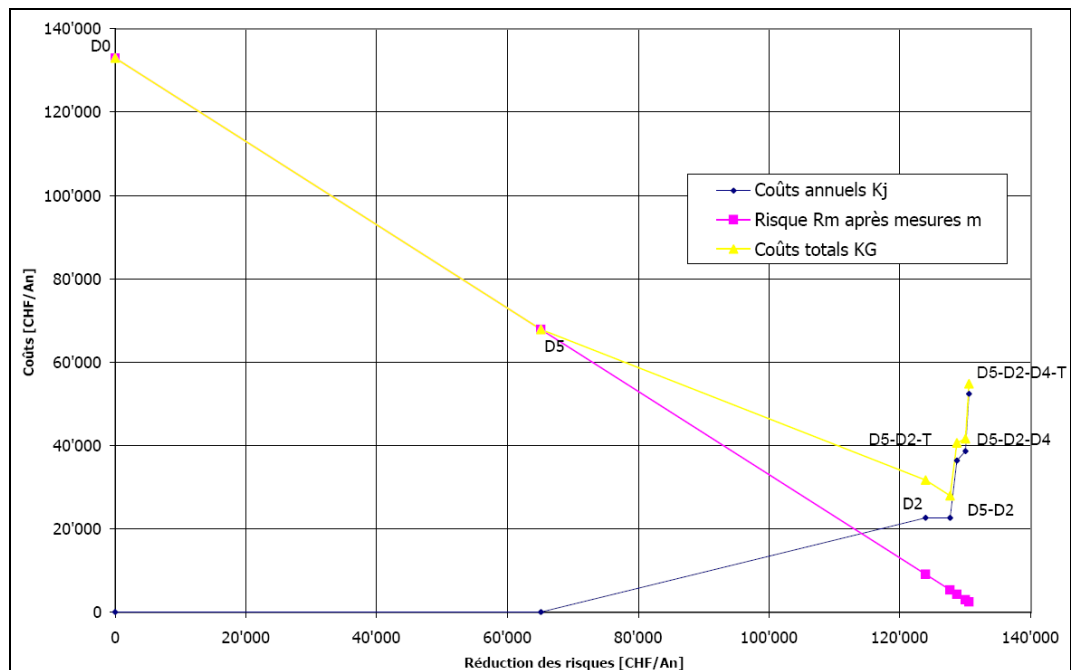


Fig. 7.2 Détermination de la stratégie optimale de mesures au moyen de la minimisation du coût global C_G .

7.5 Synthèse du procédé

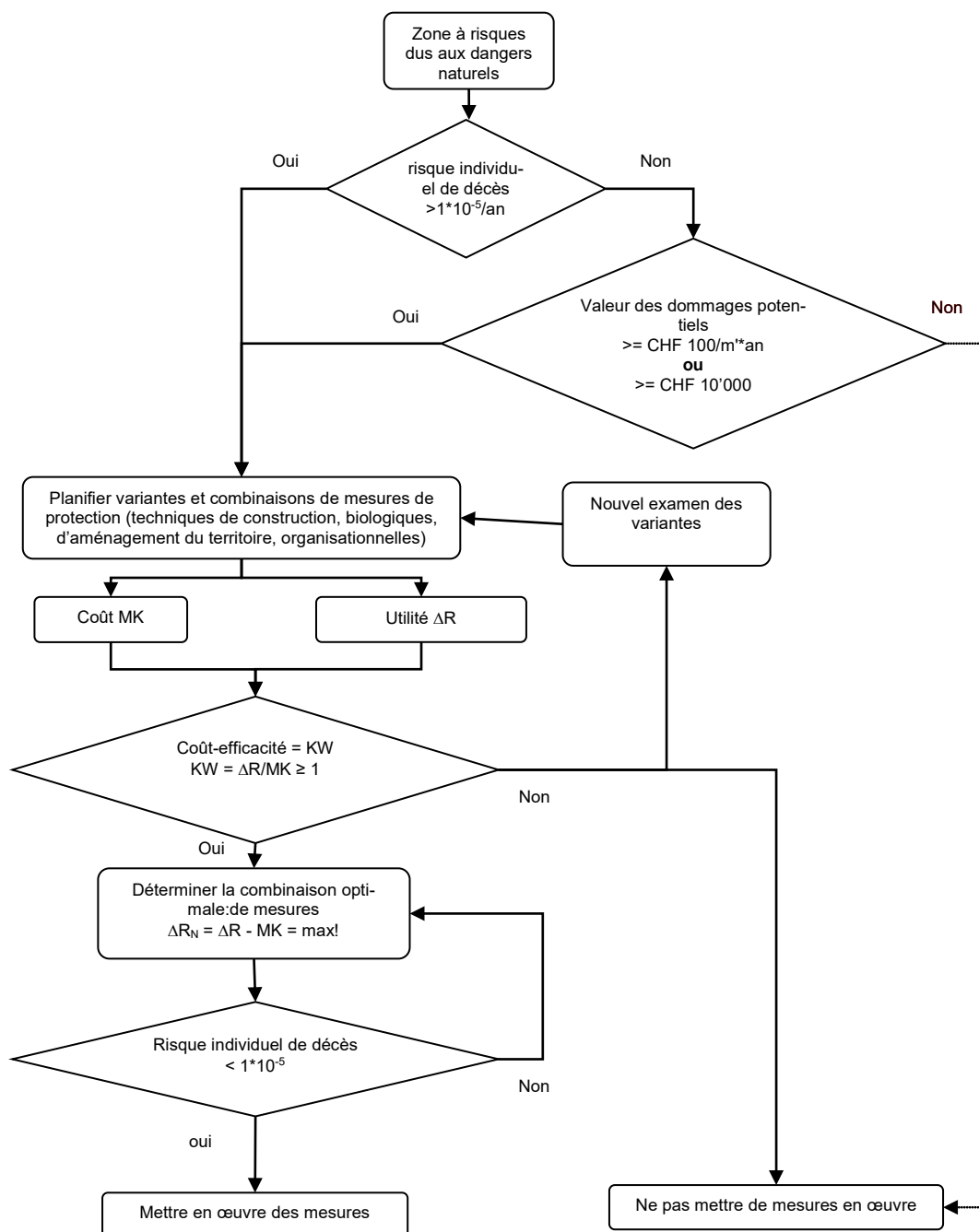


Fig. 7.3 Procédé d'appréciation des risques et de définition des priorités pour la planification de mesures contre les risques individuels liés aux personnes.

Annexes

I	Annexe A: Valeurs de base de différents objets.....	81
II	Annexe B: Valeurs létalité on fonction du type de processus et son intensité	84
III	Annexe C: Coûts d'exploitation d'entretien et de réparation, valeur résiduelle et échéance des mesures de protection.	86
IV	Annexe D: Carte des risques et zones des risques	89
V	Annexe E: Structure d'organisation « Gestion des dangers naturels » à l'OFROU .	92

I Annexe A: Valeurs de base de différents objets

Annexe A1: valeurs de base de différents objets composant les tronçons¹²

Sources:

[1]: EconoMe, 2008

[2]: Birdsall / Hajdin, 2008

[3]: Wilhelm, 1999

[4]: Valeurs empiriques OFROU

Objets	Valeur en [CHF / 'm]	Source
Chaussée		
Plusieurs voies, sens de circulation séparés	9'500.00	[1]
Semi-autoroute, 2 voies, sens de circulation séparés	7'500.00	déduit de [1]
Voies d'entrée et de sortie	5'000.00	déduit de [1]
Ponts		
Plusieurs voies, sens de circulation séparés	80'000.00	[2], [3] et [4]
Semi-autoroute, 2 voies, sens de circulation séparés	50'000.00	déduit de [2], [3] et [4]
Voies d'entrée et de sortie	40'000.00	déduit de [2], [3] et [4]
Tunnel (creusé)		
Plusieurs voies, sens de circulation séparés	80'000.00	[4]
Semi-autoroute, 2 voies, sens de circulation séparés	50'000.00	[4]
Voies d'entrée et de sortie	30'000.00	[4]
Tunnel (tranchée couverte)		
Plusieurs voies, sens de circulation séparés	53'000.00	[4]
Semi-autoroute, 2 voies, sens de circulation séparés	33'000.00	[4]
Voies d'entrée et de sortie	20'000.00	[4]
Galerie paravalanche		
Plusieurs voies, sens de circulation séparés	60'000.00	déduit de [3]
Semi-autoroute, 2 voies, sens de circulation séparés	36'000.00	[3]
Voies d'entrée et de sortie	24'000.00	[3]
Galerie pare-pierres		
Plusieurs voies, sens de circulation séparés	87'000.00	[4]
Semi-autoroute, 2 voies, sens de circulation séparés	50'000.00	déduit de [4]
Voies d'entrée et de sortie	46'000.00	[4]

¹² Pour les objets représentant des surfaces (installations annexes telles que les aires de repos, les centres d'entretien, etc.), les valeurs de base doivent être fixées conformément à EconoMe.

Annexe A2: Vulnérabilité – objets linéaires¹³

Objet: chaussée - plusieurs voies, sens de circulation séparés

Sources:

[1]: OFEV, 2008: EconoMe

[2]: Birdsall et Hajdin, 2008

[3]: Valeurs empiriques OFROU

		Valeur en [CHF / 'm]	Part de la valeur de base	Source	Remarques
Valeur de base		9'500	1.00	[1] et [3]	
Processus	Intensité				
Avalanches	faible	47.5	0.005	[1]	
	moyenne	950	0.10	[1]	
	forte	1'900	0.20	[1]	
Éboulements	faible	950	0.10	[3]	Avec ces valeurs, on tient compte du fait qu'en général, les blocs tombés ne parviennent pas à toucher et à endommager la totalité de la chaussée.
	moyenne	1'900	0.50	[3]	
	forte	9'500	1.00	[3]	
Glissement permanent; tassement; écoulement / affaissement	faible	95	0.01	[1]	L'entretien annuel permet de déduire des valeurs plus précises pour chaque objet.
	moyenne	950	0.10	[1]	
	forte	9'500	1.00	[1]	
Coulées de boues, glissements spontanés	faible	950	0.10	[1]	
	moyenne	1'900	0.20	[1]	
	forte	2'850	0.30	[1]	
Laves torrentielles (débordement)	faible	--	--		
	moyenne	2375	0.25	moyenne des valeurs de [1] et [2]	
	forte	4275	0.45	moyenne des valeurs de [1] et [2]	

¹³Pour les objets représentant des surfaces (installations annexes telles que les aires de repos, les centres d'entretien, etc.), les valeurs de base doivent être fixées conformément à EconoMe.

Inondation / épan- dage alluvial - dy- namique ($v > 1 \text{ m / s}$)	faible	47.5	0.05	moyenne des va- leurs de [1] et [2]	
	moyenne	475	0.05	moyenne des va- leurs de [1] et [2]	
	forte	3325	0.35	moyenne des va- leurs de [1] et [2]	Il faut s'attendre à un défonce- ment du revê- tement.
Inondation / épan- dage - statique ($v > 1 \text{ m / s}$)	faible	0	0	moyenne des va- leurs de [1] et [2]	L'ampleur des dégâts dépend moins de la hauteur de l'inondation que de sa durée.
	moyenne	95	0.01	moyenne des va- leurs de [1] et [2]	
	forte	950	0.1	[3]	
Érosion des berges	forte	9'500	1.0	[3]	

Pour les autres objets de la chaussée, l'ampleur des dégâts se déduit à partir des valeurs de base de l'annexe A1 et de la part de valeur de base du présent tableau.

En principe, les valeurs de la chaussée s'appliquent également aux tronçons de ponts ou de galeries touchés, dans la mesure où seule la chaussée proprement dite est concer-
née.

Dans le cas des tronçons de tunnels, il convient de tenir compte du fait que l'entrée de l'eau peut endommager l'électronique, ce qui coûte cher (ordre de grandeur 2'000 CHF/m').

Lorsque des ponts, des tunnels ou des galeries sont globalement menacés par des pro-
cessus de dangers naturels, les valeurs des dommages potentiels sont à fixer pour
chaque objet. Les valeurs de base de l'annexe A1 représentent les valeurs maximales
des dommages potentiels sur une construction neuve.

II Annexe B: Valeurs létalité on fonction du type de processus et son intensité

Annexe B1: Létalité en cas d'impacts directs d'évènements naturels sur les véhicules

Sources

Pour les avalanches, les éboulements, les glissements et les laves torrentielles: OFEV, 2008.

Pour les inondations et l'érosion des berges: les auteurs.

Processus	Intensité		
	faible	moyenne	forte
Avalanches	0.00025	0.1	0.2
Éboulements	0.1	0.8	1
Glissements permanents; écroulement / affaissement	pas d'impact direct		
Laves torrentielles (débordement)	0	0.1	0.3015
Coulées de boues, glissements spontanés	0.05	0.1	0.3
Inondation / épandage alluvial; dynamique	0	0.00025	0.0315
Inondation / épandage alluvial; statique	0	1E-10	0.0001
Érosion des berges			0

En principe, les valeurs dans les tunnels, les galeries ou sur les ponts ne sont pas différentes de celles-ci lorsque le processus se manifeste effectivement sur place.

Lorsque l'ouvrage est menacé dans son ensemble, les conséquences sont à déterminer en fonction de chaque objet (nombre de véhicules, conséquences).

Annexe B2: Létalité en cas d'impacts directs d'évènements naturels sur les installations annexes

Sources

Pour les avalanches, les éboulements, les glissements et les laves torrentielles: OFEV, 2008; EconoMe.

Pour les inondations et l'érosion des berges: les auteurs.

Objets **Espaces verts et parkings (= parcs de stationnement)**

Processus	Intensité		
	faible	moyenne	forte
Avalanches	0.0002	0.1	0.48
Éboulements	0.1	0.08	1
Glissements permanents; effondrement / affaissement	pas d'impact direct		
Laves torrentielles (débordement)	0.015	0.56	0.8
Coulées de boues, glissements spontanés	0.015	0.56	0.8
Inondation / épandage alluvial; dynamique	0	0.02975	0.3
Inondation / épandage alluvial; statique	pas d'impact direct		
Érosion des berges			1

Objet	Bâtiments ¹⁴ (= bâtiments industriels et commerciaux)		
	Intensité		
Processus	faible	moyenne	forte
Avalanches	0.00025	0.1	0.2
Éboulements	0.1	0.8	1
Glissements permanents; effondrement / affaissement	pas d'impact direct		
Laves torrentielles (débordement)	0	0.1	0.3015
Coulées de boues, glissements spontanés	0.05	0.1	0.3
Inondation / épandage alluvial; dynamique	0	0.00025	0.0315
Inondation / épandage alluvial; statique	0	1E-10	0.0001
Érosion des berges	0	0.1	0.3015

¹⁴ La létalité dans d'autres bâtiments s'établit conformément aux classes d'objets selon EconoMe.

III Annexe C: Coûts d'exploitation d'entretien et de réparation, valeur résiduelle et échéance des mesures de protection.

Coûts d'exploitation	[% des coûts d'investissement]
Coûts d'entretien	[% des coûts d'investissement]
Coûts de réparation	[% des coûts d'investissement]
Valeur résiduelle	[% des coûts d'investissement]
Échéance	[années]

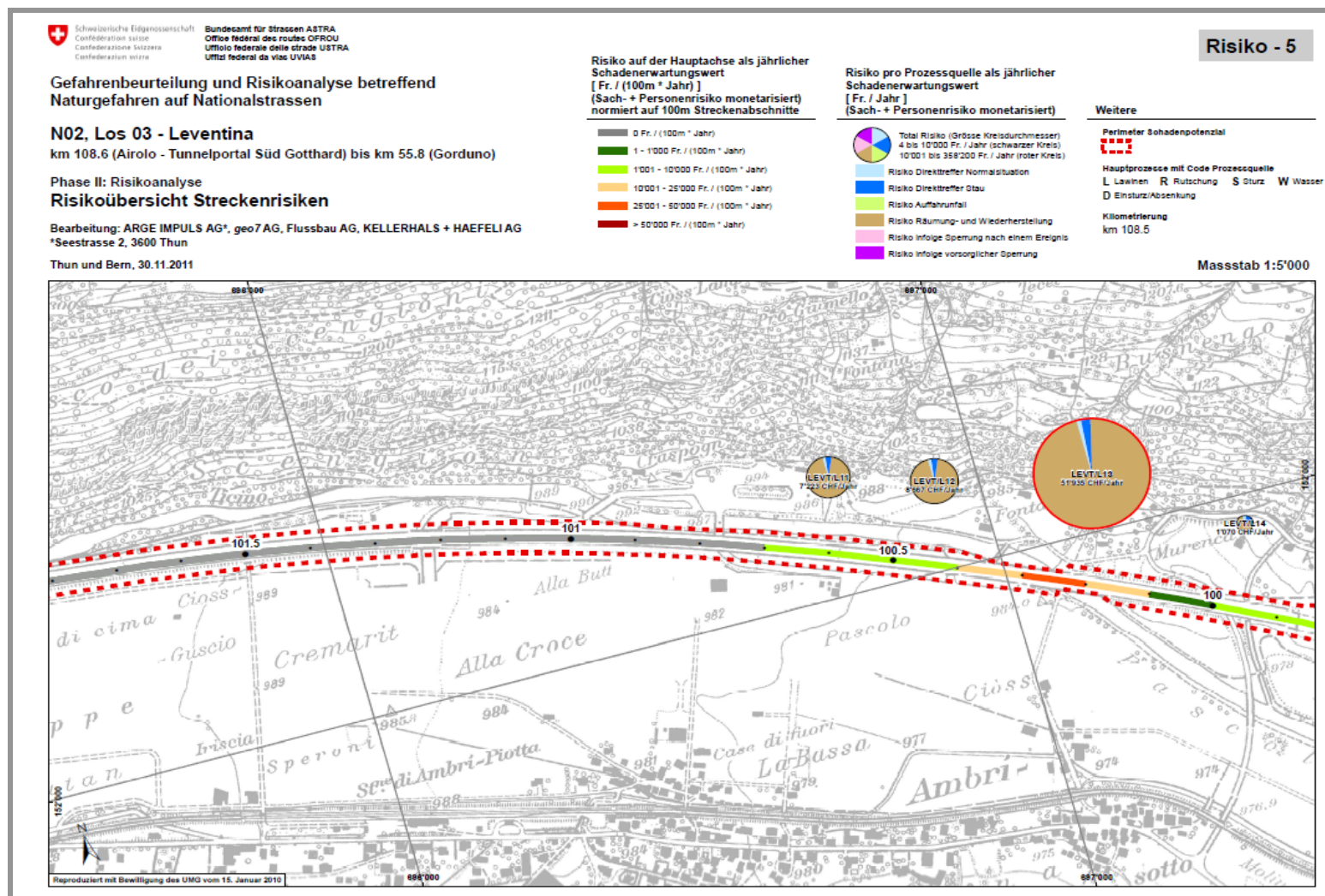
Sources	[1]: EconoMe
	[2]: Wilhelm, 1999
	[3]: CFF, 2004 SBB, 2004

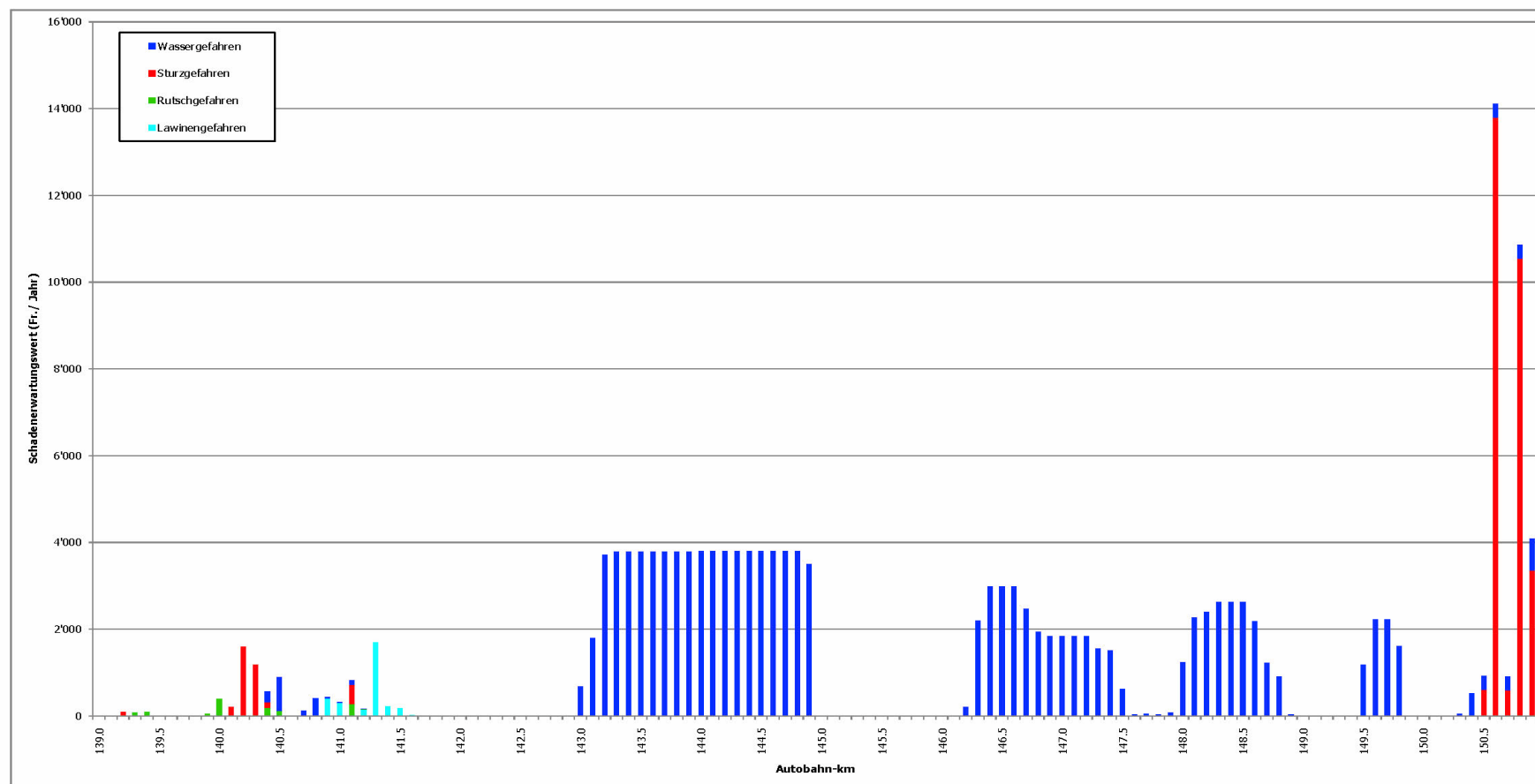
Mesure		Valeur	Source
Digues	Coûts d'exploitation	0	[1], [2], [3]
	Coûts d'entretien+réparation	0.5	[1], [2], [3]
	Valeur résiduelle	0	[1], [3]
	Échéance	100	[1], [2], [3]
Filet de protection contre les chutes de pierres	Coûts d'exploitation	0	[1]
	Coûts d'entretien+réparation	2	[1]
	Valeur résiduelle	0	[1]
	Échéance	50	[1]
Filets de protection de parois rocheuses	Coûts d'exploitation	0	[3]
	Coûts d'entretien+réparation	2	[3]
	Valeur résiduelle	0	[3]
	Échéance	30	[3]
Systèmes d'alarme	Coûts d'exploitation	1.5	[2]
	Coûts d'entretien+réparation	2.5	[2]
	Valeur résiduelle	0	[2]
	Échéance	10	[2]
Galerie	Coûts d'exploitation	0	[2], [1]
	Coûts d'entretien+réparation	1.5	[1]
	Valeur résiduelle	0	[1]
	Échéance	80	[1]

Tunnel	Coûts d'exploitation	0.5	[1]
	Coûts d'entretien+réparation	2	[1]
	Valeur résiduelle	0	[1]
	Échéance	80	[1]
Râtelier paravalanche	Coûts d'exploitation	0	[1], [2], [3]
	Coûts d'entretien+réparation	1	[1], [3]
	Valeur résiduelle	0	[1], [2], [3]
	Échéance	80	[1]
Dispositifs de minage	Coûts d'exploitation	5	[1]
	Coûts d'entretien+réparation	4	[1]
	Valeur résiduelle	0	[1]
	Échéance	20	[1]
Construction temporaire	Coûts d'exploitation	0	[1], [2], [3]
	Coûts d'entretien+réparation	2	[1]
	Valeur résiduelle	0	[1], [3]
	Échéance	30	[1], [2], [3]
Ouvrages de soutènement (caissons en bois, gabions)	Coûts d'exploitation	0	[1], [3]
	Coûts d'entretien+réparation	1	[1]
	Valeur résiduelle	0	[1], [3]
	Échéance	50	[1]
Seuils, barrages en bois dans les torrents	Coûts d'exploitation	0	[1]
	Coûts d'entretien+réparation	2	[1]
	Valeur résiduelle	0	[1]
	Échéance	30	[1]
Seuils, barrages en béton dans les torrents	Coûts d'exploitation	0	[1]
	Coûts d'entretien+réparation	2	[1]
	Valeur résiduelle	0	[1]
	Échéance	50	[1]
Filets de protection contre les laves torrentielles	Coûts d'exploitation	1	[1]
	Coûts d'entretien+réparation	3	[1]
	Valeur résiduelle	0	[1]
	Échéance	30	[1]

Grilles en bois	Coûts d'exploitation	2	[1]
	Coûts d'entretien+réparation	1	[1]
	Valeur résiduelle	0	[1]
	Échéance	50	[1]
Barrages dans les rivières et pièges à gravier en béton	Coûts d'exploitation	1	[1]
	Coûts d'entretien+réparation	1	[1]
	Valeur résiduelle	0	[1]
	Échéance	80	[1]
Galerias d'évacuation de crues	Coûts d'exploitation	0.5	[1]
	Coûts d'entretien+réparation	0.5	[1]
	Valeur résiduelle	0	[1]
	Échéance	100	[1]

IV Annexe D: Carte des risques et zones des risques

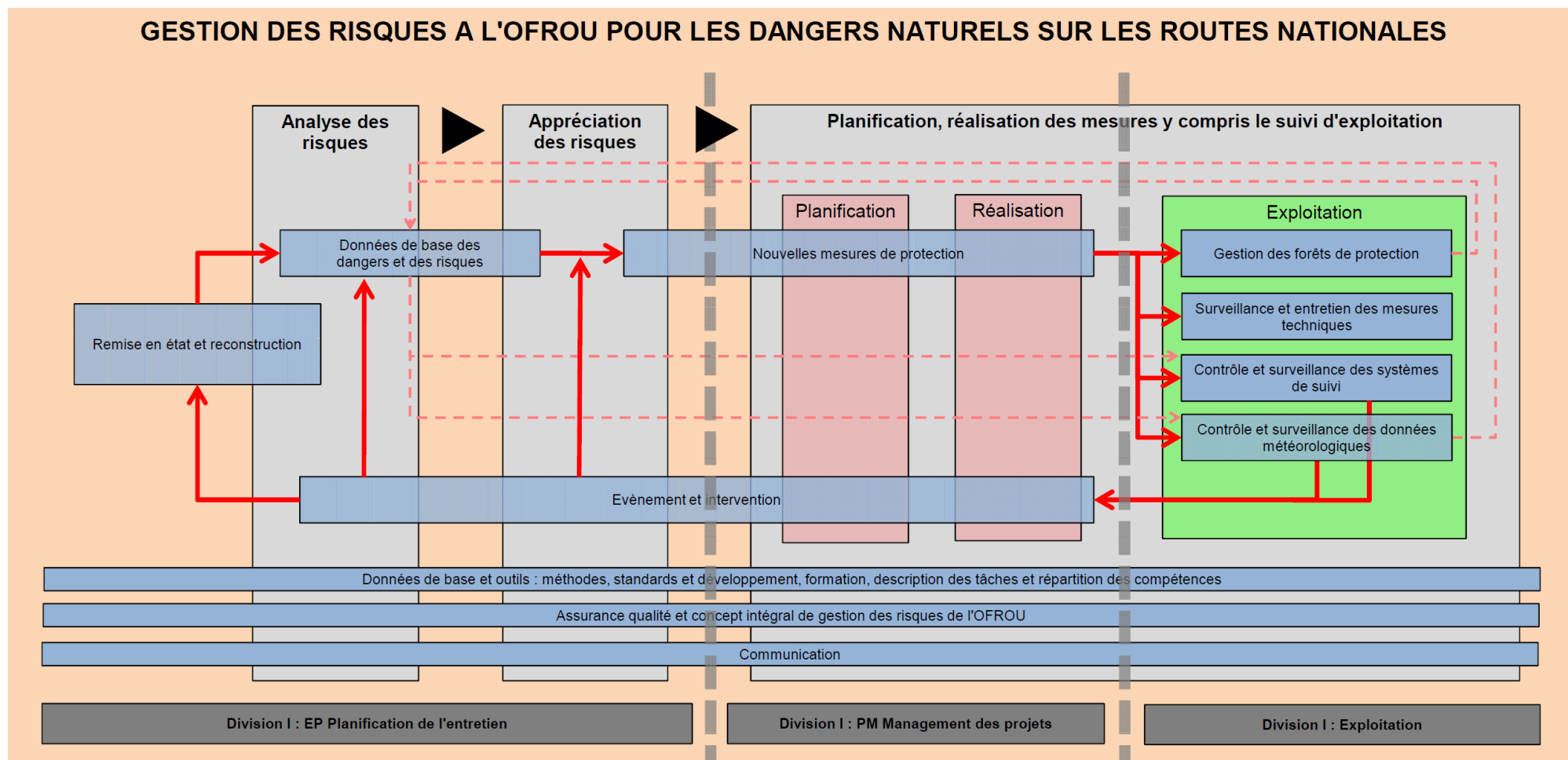




	Risque Impact direct – Situation normale	Risque Impact direct – Bouchon	Risque Impact direct Total	Risque Télé- scopage	Risque pour les personnes Total	Risque pour les personnes monétarisé avec Fr. 5 Mill.	Coûts de déblaiement et de remise en état	Frais entraînés par une interruption du trafic (fermeture suite à un événement.)	Frais entraînés par une interruption du trafic (fermeture préventive)	Risques matériels Total	Risque Total
	(Prob./ An)	(Prob./ An)	(Prob./ An)	(Prob./ An)	(Prob./ An)	(Fr./ An)	(Fr./ An)	(Fr./ An)	(Fr./ An)	(Fr./ An)	(Fr./ An)
N02/rstu/L/1a	4.6E-05	0.0E+00	4.6E-05	2.5E-06	4.8E-05	200	30	400	0	430	630
N02/rstu/L/2a	2.2E-04	0.0E+00	2.2E-04	1.4E-05	2.3E-04	1'100	1'000	60	0	1'060	2'160
N02/rstu/R/3a	5.9E-06	1.0E-10	5.9E-06	0.0E+00	5.9E-06	30	100	10	0	110	130
N02/rstu/R/6a	3.3E-05	6.5E-10	3.3E-05	1.9E-07	3.4E-05	200	300	600	0	900	1'100
N02/rstu/S/1	5.7E-06	1.3E-10	5.7E-06	4.0E-06	9.7E-06	50	20	20	0	40	90
N02/rstu/S/10	5.7E-04	4.2E-09	5.7E-04	6.0E-05	6.3E-04	3'100	500	11'200	0	11'700	14'800
N02/rstu/S/11	2.5E-04	1.9E-09	2.5E-04	3.6E-05	2.9E-04	1'400	200	12'400	0	12'600	14'000
N02/rstu/S/6	2.1E-04	4.0E-09	2.1E-04	2.0E-05	2.3E-04	1'200	400	2'000	0	2'400	3'600
N02/rstu/S/9a	3.0E-06	1.2E-10	3.0E-06	4.0E-06	7.0E-06	30	10	80	0	90	120
N02/rstu/W/102	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.6E-06	3.6E-06	20	2'000	100	400	2'500	2'520
N02/rstu/W/103	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0	600	10	100	710	710
N02/rstu/W/104	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.3E-06	1.3E-06	10	40'400	600	100	41'200	41'210
N02/rstu/W/105	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.3E-06	1.3E-06	10	900	600	100	1'600	1'610
N02/rstu/W/106	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.3E-06	1.3E-06	10	1'000	600	100	1'700	1'710
N02/rstu/w/108	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	7.9E-06	7.9E-06	40	70'500	7'200	800	78'400	78'440
N02/rstu/W/111	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	8.5E-06	8.5E-06	40	300	500	200	1'000	1'040
N02/rstu/W/114	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	7.9E-06	7.9E-06	40	4'000	1'100	900	6'000	6'040
N02/rstu/W/115	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.2E-06	1.2E-06	10	700	90	100	890	900
N02/rstu/W/12	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	9.0E-07	9.0E-07	0	30	40	500	570	570
N02/rstu/W/14	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0	10	10	100	120	120
N02/rstu/W/9	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	9.1E-07	9.1E-07	0	300	50	700	1'050	1'050
Total	1.3E-03	1.1E-08	1.3E-03	1.8E-04	1.5E-03	7'600	123'300	37'800	4'200	165'200	172'800

Remarque : exemple calculé avec coûts marginaux à 5 Mio. Pour les projets, considérer la valeur recommandée par l'Office fédéral du développement territorial ARE (*Value of statistical life (VOSL) : empfohlener Wert der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos in der Schweiz*)

V Annexe E: Structure d'organisation « Gestion des dangers naturels » à l'OFROU



Thèmes et éléments de la gestion des risques liés aux dangers naturels au sein de l'OFROU

(I = Division Infrastructure; R = Division Réseaux; F = Filiale; UT = Unité territoriale; Manuel RPT = Manuel de gestion des événements RPT; GP = Gestion du patrimoine; CIO = Chef d'intervention OFROU)

Thème	Éléments	Responsabilité au sein de l'OFROU	Description	Interfaces vers d'autres thèmes ou éléments de la gestion des dangers naturels	Interfaces vers des thèmes ou éléments similaires au sein de l'OFROU	Interfaces en dehors de l'OFROU
Évènement et intervention					selon le « Manuel de gestion des événements RPT »; gestion générale des événements	
	Appréciation de l'évènement	d'après le Manuel RPT		Contrôle et surveillance des dispositifs techniques de mesure et des données météorologiques		Services cantonaux spécialistes des dangers naturels, OFEV; CENAL; plate-forme commune d'information sur les dangers naturels (GIN); services d'intervention
	Alarme	d'après le Manuel RPT		Contrôle et surveillance des dispositifs techniques de mesure et des données météorologiques		Services cantonaux spécialistes des dangers naturels, OFEV; CENAL; plate-forme commune d'information sur les dangers naturels (GIN); services d'intervention
	Organisation des disponibilités OFROU	d'après le Manuel RPT		Contrôle et surveillance des dispositifs techniques de mesure et des données météorologiques		Services d'intervention (pompiers, police, ambulance, etc.)

	Mise à disposition de ressources	UT, en cas d'évènements de plus grande envergure F	Le CIO bénéficie du soutien spécialisé d'un géologue pour le secteur des dangers naturels	Contrôle et surveillance des dispositifs techniques de mesure et des données météorologiques		
	Mesures d'urgence	UT voire F				Services d'intervention (pompiers, police, ambulance, etc.)
	Relevé et évaluation de l'évènement	UT et F	UT rend compte aux supérieurs; premier relevé et triage par UT; évaluation et analyse par F	Données de base des dangers et des risques: cadastre des dangers		Services cantonaux spécialistes des dangers naturels, OFEV, bureaux spécialisés, instituts de recherche
	Mesures immédiates	UT voire F	Selon l'ampleur des dommages	Nouvelles mesures de protection: mesures immédiates		Acteurs concernés
	Remise en état provisoire (= petit entretien de construction)	UT voire F	Selon l'ampleur des dommages			
	Projets	F				Acteurs concernés

Thème	Éléments	Responsabilité au sein de l'OFROU	Description	Interfaces vers d'autres thèmes ou éléments de la gestion des dangers naturels	Interfaces vers des thèmes ou éléments similaires au sein de l'OFROU	Interfaces en dehors de l'OFROU
Remise en état et re-construction					Remise en état / reconstruction lors d'évènements similaires	
	Analyser l'évènement et la vulnérabilité	F		Évènement et intervention: relevé et évaluation de l'évènement		
	Mise à disposition de ressources	F				
	Planification	F				
	Réalisation	F				

Thème	Éléments	Responsabilité au sein de l'OFROU	Description	Interfaces vers d'autres thèmes ou éléments de la gestion des dangers naturels	Interfaces vers des thèmes ou éléments similaires au sein de l'OFROU	Interfaces en dehors de l'OFROU
Données de base des dangers et des risques						
	Tenue d'un cadastre des événements	UT	Formation par l'OFEV de 2 fois 1 journée	Relevé et analyse de l'évènement		
	Mise à disposition de ressources	I				
	Définition de données de base des dangers	I / F	Projet pour les dangers naturels sur les routes nationales TP4			Services cantonaux spécialistes des dangers naturels et des aménagements hydrauliques, OFEV
	Définition de données de base des risques	I / F	Projet pour les dangers naturels sur les routes nationales TP4	Objectifs de protection / critères de contrôle	Gestion des risques au sein de l'OFROU	
	Mise à jour générale régulière des données de base	I / F	Projet pour les dangers naturels sur les routes nationales TP6	Objectifs de protection / critères de contrôle; lien avec la politique de risque de l'OFROU: rapport	Gestion des risques au sein de l'OFROU	Services cantonaux spécialistes des dangers naturels et des aménagements hydrauliques, OFEV
	Contrôle et mise à jour après réalisation de mesures de protection ou après évènement	I / F	Projet pour les dangers naturels sur les routes nationales TP6	Planification de nouvelles mesures de protection; lien avec la politique de risque OFROU: rapport	Gestion des risques au sein de l'OFROU	Services cantonaux spécialistes des dangers naturels et des aménagements hydrauliques, OFEV

Thème	Éléments	Responsabilité au sein de l'OFROU	Description	Interfaces vers d'autres thèmes ou éléments de la gestion des dangers naturels	Interfaces vers des thèmes ou éléments similaires au sein de l'OFROU	Interfaces en dehors de l'OFROU
Nouvelles mesures de protection					UPlaNS; mesures immédiates	
	Mise à disposition de ressources	I	Dans le cadre de plans sur 10 ans			
	Mesures immédiates	F ou UT	Selon l'ampleur des dommages (petit entretien de construction)	Évènement et intervention: mesures immédiates		
	Planification des mesures	F	Voir schémas de procédure ci-joints	Données de base des dangers et des risques; objectifs de protection / critères de contrôle		Acteurs concernés (communes, autres moyens de transport, services cantonaux spécialistes des dangers naturels et des aménagements hydrauliques)
	Réalisation des mesures	F	Voir schémas de procédure ci-joints	Surveillance et entretien des ouvrages de protection existants		Acteurs concernés (communes, autres moyens de transport, services cantonaux spécialistes des dangers naturels et des aménagements hydrauliques)
	Contrôle et mise à jour des données de base des dangers et des risques	I / F	Projet pour les dangers naturels sur les routes nationales TP6	Données de base des dangers et des risques: contrôle et mise à jour des données de base des dangers et des risques	Gestion des risques au sein de l'OFROU	

Thème	Éléments	Responsabilité au sein de l'OFROU	Description	Interfaces vers d'autres thèmes ou éléments de la gestion des dangers naturels	Interfaces vers des thèmes ou éléments similaires au sein de l'OFROU	Interfaces en dehors de l'OFROU
Surveillance et entretien des ouvrages de protection existants					Surveillance et entretien d'ouvrages d'art	
	Établir et mettre à jour un cadastre des ouvrages de protection	F par l'intermédiaire de GP	A vérifier		Base de données des ouvrages d'art	Services cantonaux spécialistes des dangers naturels et des aménagements hydrauliques
	Clarifier les responsabilités avec les acteurs concernés	F par l'intermédiaire de GP				Acteurs concernés (communes, autres moyens de transport,...)
	Effectuer des contrôles	UT	Voir schémas de procédure ci-joints	Données de base des dangers et des risques	Surveillance et entretien d'ouvrages d'art	
	Engager les mesures	UT	Voir schémas de procédure ci-joints	Nouvelles mesures de protection: mesures immédiates ou planification de mesures	Surveillance et entretien d'ouvrages d'art	
	Garantir la réalisation	F par l'intermédiaire de GP			Surveillance et entretien d'ouvrages d'art	

Thème	Éléments	Responsabilité au sein de l'OFROU	Description	Interfaces vers d'autres thèmes ou éléments de la gestion des dangers naturels	Interfaces vers des thèmes ou éléments similaires au sein de l'OFROU	Interfaces en dehors de l'OFROU
Gestion des forêts de protection				Surveillance et entretien des ouvrages de protection existants		
	Inventaire des forêts de protection significatives	I	Établi dans le cadre de TP4	Données de base des dangers		Propriétaires forestiers; services cantonaux spécialistes des forêts (plans régionaux de développement forestier, projets de restauration sylvicole)
	Clarifier les responsabilités avec les acteurs concernés	F		Surveillance et entretien des ouvrages de protection existants		Acteurs concernés (communes, autres organismes responsables de la circulation, propriétaires forestiers...)
	Mise à disposition de ressources	I				
	Garantir la gestion des forêts de protection	F avec UT	Vérifier la réalisation	Surveillance et entretien des ouvrages de protection existants		

Thème	Éléments	Responsabilité au sein de l'OFROU	Description	Interfaces vers d'autres thèmes ou éléments de la gestion des dangers naturels	Interfaces vers des thèmes ou éléments similaires au sein de l'OFROU	Interfaces en dehors de l'OFROU
Contrôle et surveillance des dispositifs techniques de mesure				Contrôle et surveillance des données météorologiques; évènement et intervention	« Gestion des événements selon la RPT »	
	Clarifier les responsabilités avec les acteurs concernés	F				Acteurs concernés (communes, autres organismes responsables de la circulation,...)
	Définir les valeurs seuil	I et F (GP)		Données de base des dangers et des risques; nouvelles mesures de protection		Bureaux spécialisés;
	Procéder aux mesures	F				
	Vérifier les valeurs mesurées	F ou UT				
	Organisation du système d'alerte et de l'intervention d'urgence	CIO et UT		Évènement et intervention		Services cantonaux spécialistes des dangers naturels et des aménagements hydrauliques, OFEV; CENAL; plate-forme commune d'information sur les dangers naturels (GIN); services d'intervention
	Mesures immédiates	UT		Nouvelles mesures de protection: mesures immédiates		

Thème	Éléments	Responsabilité au sein de l'OFROU	Description	Interfaces vers d'autres thèmes ou éléments de la gestion des dangers naturels	Interfaces vers des thèmes ou éléments similaires au sein de l'OFROU	Interfaces en dehors de l'OFROU
Contrôle et surveillance des données météorologiques				Contrôle et surveillance des dispositifs techniques de mesure; événement et intervention	« Gestion des événements selon la RPT »	
	Clarifier les responsabilités avec les acteurs concernés	F				Acteurs concernés (communes, autres organismes responsables de la circulation,...)
	Définir les valeurs seuil	F		Fondements des dangers		
	Organisation du système d'alerte et de l'intervention d'urgence	CIO et UT		Évènement et intervention		Services cantonaux spécialistes des dangers naturels et des aménagements hydrauliques, OFEV; CENAL; plate-forme commune d'information sur les dangers naturels (GIN); services d'intervention
	Consulter les données	F, CIO				

Thème	Éléments	Responsabilité au sein de l'OFROU	Description	Interfaces vers d'autres thèmes ou éléments de la gestion des dangers naturels	Interfaces vers des thèmes ou éléments similaires au sein de l'OFROU	Interfaces en dehors de l'OFROU
Données de base et outils						
	Méthodes, normes, instruments	N	Projet pour les dangers naturels sur les routes nationales TP6		Normes, recherche, sécurité	
	Formation continue et stages	I			Formation continue et stages au sein de l'OFROU	
	Perfectionnement	R	Projet pour les dangers naturels sur les routes nationales TP6		Normes, recherche, sécurité	
Lien avec la politique de risque de l'OFROU						
	Garantir un rapport avec des méthodes de gestion de risques comparables	F et R	F fournit les données, R les agrège	Préparation des données de base des dangers et des risques	Gestion des risques au sein de l'OFROU	
	Objectifs de protection / définir et vérifier les critères de contrôle	R	TP3	Préparation des données de base des dangers et des risques	Gestion des risques au sein de l'OFROU	

Thème	Éléments	Responsabilité au sein de l'OFROU	Description	Interfaces vers d'autres thèmes ou éléments de la gestion des dangers naturels	Interfaces vers des thèmes ou éléments similaires au sein de l'OFROU	Interfaces en dehors de l'OFROU
Assurance qualité	Procédures et processus				Assurance qualité au sein de l'OFROU	
Communication liée aux risques	En cas d'évènement	I en collaboration avec l'information et la communication	Nécessite une formation		Gestion des événements selon la RPT	

Bibliographie

Instructions et directives de l'OFROU

- [1] Office fédéral des routes OFROU (2008), « **Action de chutes de pierres sur les galeries de protection** » Directive ASTRA 12006, V2.31, www.astra.admin.ch.
- [2] Office fédéral des routes OFROU, Chemins de fer fédéraux suisses CFF (2007), « **Action d'avalanches sur les galeries de protection** » Directive 12007, V2.00, www.astra.admin.ch.
- [3] Office fédéral des routes OFROU (2004), « **Vérification des galeries existantes** », Documentation ASTRA 82005, www.astra.admin.ch.
- [4] Office fédéral des routes OFROU, Chemins de fer fédéraux suisses CFF (1998), « **Planification construction et entretien de galeries de protection contre les chutes de pierres et avalanches** », Documentation ASTRA 82004, www.astra.admin.ch.

Normes

- [5] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (1999), « **Strassenverkehrsunfälle – Unfallzahlen, Unfallstatistiken, Unfallkosten** », SN640 007.
- [6] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (1998), « **Strassenverkehrsunfälle – Lokalisierung und Rangierung von Unfallschwerpunkten** », SN 640 009.

Documentations

- [7] Group de travail Danger naturel et Géologie AGN (2004), « **GefahrenEinstufung Rutschungen i.w.S** », Entwurf.
- [8] ARGE WSL.VWI.GWW (2004), « **Korridorplanung Brig – Oberwald: Verkehr, Naturgefahren. Technischer Bericht** ».
- [9] Office fédéral des routes OFROU, Office fédéral des transports OFT, L'Office fédéral de l'économie des eaux OFEE, Chemins de fer fédéraux suisses CFF (1998), « **Sicherheit von Bauwerken im Wasser. Empfehlung für die Überwachung und Hinweise für den Neubau** ».
- [10] Office fédéral des routes OFROU (2008), « **Effektivität und Effizienz von Massnahmen** », Commande de recherche AGB 2005/104, *Rapport de recherche Nr. 620*.
- [11] Office fédéral des routes OFROU (2008), « **Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung** », Commande de recherche AGB 2005/102, *Entwurf Stand Juli 2008*.
- [12] Office fédéral des routes OFROU (2008), « **Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken infolge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten** », Commande de recherche AGB2002/020, *Rapport Nr. 630*, VSS Zürich.
- [13] Office fédéral des routes OFROU (2003), « **Steinschlag – Naturgefahr für die Nationalstrassen** », *Rapport finale de la groupe d'experts de l'OFROU*.
- [14] Office fédéral des routes OFROU (1999), « **Standardisierte Bewertungsmethode für die Beurteilung von Projekten bzw. Projektbestandteilen mit Hilfe der Kostenwirksamkeitsanalyse** », *Handbuch*.
- [15] Office fédéral des routes OFROU et INFRAS (1998), « **Staukosten im Strassenverkehr** », *Rapport final*, Zürich.
- [16] Office fédérale de l'environnement OFEV (2008), « **EconoMe** ».
- [17] L'Office fédéral de l'aménagement du territoire OFAT, L'Office fédéral de l'économie des eaux OFEE, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP (1997), « **Empfehlungen zur Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten** ».
- [18] L'Office fédéral de l'aménagement du territoire OFAT, L'Office fédéral de l'économie des eaux OFEE, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP (1997), « **Empfehlungen zur Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten** ».
- [19] Bundesamt für Forstwesen, Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (1984), « **Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten** ».
- [20] Office fédérale du développement territorial ARE (2007), « **Staukosten des Strassenverkehrs in der Schweiz** » *actualiser 2000/2005*.
- [21] Office fédéral de la statistique, Office fédérale du développement territorial ARE (2007), « **Mobilität in der Schweiz Ergebnisse des Mikrozensus zum Verkehrsverhalten** », *Factsheet*.
- [22] Office fédéral des eaux et de la géographie OFEG (2003), « **Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten** », *Praxishilfe*.
- [23] Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP (1999), « **Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren** », Methode, Fallbeispiele und Daten, *Umweltmaterialien Nr. 107/I und II, Naturgefahren*.
- [24] Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP (1998) « **Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren** », *Umwelt Materialien Nr. 85*.
- [25] Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP (1992), « **Handbuch III zur**

Störfallverordnung StFV », Richtlinien für Verkehrswege.

[26] Office fédéral des eaux et de la géographie OFEG, Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF (2003), « **Oberflächennahe Rutschungen, ausgelöst durch die Unwetter vom 15.-16.7.2002 im Napfgebiet und vom 31.8.-1.9.2002 im Gebiet Appenzell** », *Rapport de projet*.

[27] Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP, L'Office fédéral de l'économie des eaux OFEE (1995), « **Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene** ».

[28] Office fédéral des eaux et de la géographie OFEG (2001), « **Hochwasserschutz an Fließgewässern** », *Wegleitung*.

[29] Office fédéral des eaux et de la géographie OFEG (2002), « **EDV-Legende für die digitale Kartographie (Arc-Gis, MapInfo, MicroStation, AutoCard)** ».

[30] Birdsall, J. D., Hajdin, R. (2008), « **Vulnerability of individual Infrastructure Objects Subjected to Natural Hazards** ».

[31] Egli, T. (2005), « **Wegleitung Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren** », *Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (vkf)*.

[32] Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (1999), « **Neue Berechnungsmethoden in der Lawinengefahrenkartierung** ».

[33] Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (1990), « **Berechnung von Fliesslawinen, eine Anleitung für Praktiker** », *Mitteilungen*.

[34] WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF, Gerber, W. (1994), « **Beurteilung des Prozesses Steinschlag** », *Kursunterlagen der Forstlichen Arbeitsgruppe Naturgefahren, Poschiavo*.

[35] Erath, A. (2011), « **Vulnerability assessment of road transport infrastructure** », ETH Zürich, Zürich.

[36] Frick, E., Hiller, R., Kienholz, H., Romang, H., in Vorbereitung (2008), « **SEDEX – Sediments and Experts** », *Eine praxistaugliche Methodik zur Beurteilung der Feststofflieferung in Wildbächen*.

[37] Gamma, P. (1999), « **dfwalk – Ein Murgangsimulationsprogramm zur Gefahrenzonierung** », *Inauguraldissertation Universität Bern*.

[38] Hess, J. (2008), « **Schutzziele im Umgang mit Naturrisiken in der Schweiz** », *Entwurf Stand Februar 2008*.

[39] Hoffmann und Nielsen (1993), « **Beschreibung von Verkehrsabläufen an signalisierten Knotenpunkten** ».

[40] Hollenstein, K. (1997), « **Analyse, Bewertung und Management von Naturrisiken** ».

[41] IMPULS (2008), « **Methodik für eine risikobasierte Gefahrenbeurteilung, -prävention und –bewältigung** », *Bericht zur Situationsanalyse und zu den Zielen*.

[42] IMPULS (2008), « **Gefahrenbeurteilung, Risikoanalyse und Massnahmenplanung Naturgefahren, Nationalstrassen Kanton Bern, Phase 2: Risikoanalyse** », *Technischer Bericht*.

[43] IMPULS (2005), « **Gefahrenbeurteilung, Risikoanalyse und Massnahmenplanung Naturgefahren, Nationalstrassen Kanton Bern. Phase 1: Gefahrenbeurteilung – Methodik** », *Beilage zum Pflichtenheft*.

[44] IMPULS (2004), « **Gefahrenbeurteilung, Risikoanalyse und Massnahmenplanung Naturgefahren, Nationalstrassen Kanton Bern** », *Schutzziele*.

[45] Kanton St. Gallen (2003), « **Wegleitung Naturgefahrenanalyse im Kanton St. Gallen** ».

[46] Landeshydrologie und –geologie (1996), « **Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen** », *Mitteilung Nr. 4*.

[47] Merz, H. A., Schneider, Th., Bohnenblust, H. (1995), « **Bewertung von technischen Risiken. Beiträge zur Strukturierung und zum Stand der Kenntnisse** », *Modelle zur Bewertung von Todesfallrisiken*.

[48] PLANAT (2009), « **Testversion Risikokzept für Naturgefahren – Leitfaden** », *Strategie Naturgefahren Schweiz, Umsetzung des Aktionsplan PLANAT 2005 – 2008*.

[49] PLANAT (2009), « **Testversion Wirkung von** », *Strategie Naturgefahren Schweiz, Umsetzung des Aktionsplans PLANAT 2005 – 2008*.

[50] PLANAT (2007), « **Schutzziele, Aktionsplan der PLANAT** », *Einzelprojekt B2.2 Schlussbericht*.

[51] PLANAT (2005), « **Risikobewertung bei Naturgefahren** », *Schlussbericht*.

[52] PLANAT (2004)b, « **Strategie Naturgefahren Schweiz. Teilprojekt B: Methodenevaluation** », *Interner Schlussbericht*.

[53] PLANAT (2004)a, « **Strategie Naturgefahren Schweiz** », *Synthesebericht*.

[54] PLANAT, Office fédéral des eaux et de la géographie OFEG, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP (2000) « **Vom Gelände zur Karte der Phänomene** » *Kompodium*.

[55] Rickli, C., Zürcher, K., Frey, W., Lüscher, P. (2002), « **Wirkung des Waldes auf oberflächennahe Rutschprozesse** », *Schweiz. Z. Forstwes.* 153 (2002) 11: 437-445.

[56] Chemins de fer fédéraux suisses CFF (2005), « **Pflichtenheft Risikoanalysen Naturgefahren** », *SBB. Interne Arbeitsgrundlage. Version 20.5.2005*.

[57] Schneider, T. (1984), « **Das Risikokzept** ».

[58] Wilhelm et al. (2001), « **Mobilität und Naturgefahren. Beiträge zu einem integralen Risikomanagement** », *Conference Paper STRC (Swiss Transport Research Conference)*.

-
- [59] Wilhelm, Chr. (1999), « **Kosten-Wirksamkeit von Lawinenschutzmassnahmen an Verkehrsachsen. Vorgehen, Beispiele und Grundlagen der Projektevaluation** », *Vollzug Umwelt, Praxishilfe*.
- [60] Wilhelm, Chr. (1997), « **Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz. Methodik und Erhebungen zur Beurteilung von Schutzmassnahmen mittels quantitativer Risikoanalyse und ökonomischer Bewertung** », *Mitt. Eidg. Inst. Schnee- Lawinenforsch.*
-

Liste de modifications

Édition	Version	Date	Modifications
2012	2.20	28.11.2018	Adaptation des coûts marginaux.
2012	2.10	19.12.2013	Adaptations des annexes I, II, III.
2012	2.00	03.05.2013	Adaptations du modèle de calcul pour la fermeture au trafic, définition univoque du rapport coût/efficacité $KW = \Delta R / MK$, améliorations formelles et adaptations d'annexes.
2011	1.31	23.03.2011	Traduction italien et révision de la traduction française.
2009	1.30	17.12.2009	Révision et nouvelle présentation.
2009	1.20	01.07.2009	Adaptations suite aux expériences tirées du projet pilote du Reusstal.
2009	1.00	01.01.2009	Publication.

