

Rapport de synthèse

Répertoire de la protection contre la grêle

Recherches sur le danger de grêle et la résistance de l'enveloppe des bâtiments



Editeur

Tous droits réservés © 2007
Fondation de prévention des Etablissements cantonaux d'assurance
Bundesgasse 20
CH-3001 Berne
<http://www.praeventionsstiftung.ch>



Direction du projet «Répertoire de la protection contre la grêle»

Dr. Thomas Egli
Egli Engineering
Lerchenfeldstrasse 5
CH-9014 St. Gallen
<http://www.naturgefahr.ch>

Auteurs du présent rapport de synthèse

Maja Stucki et Dr. Thomas Egli, Egli Engineering, St. Gallen

Experts-conseil

Dörte Aller, Association des établissements cantonaux d'assurance incendie, Berne
Franco Oss, Etablissement d'assurance des bâtiments du canton de Zurich
Peter Hubacher, Assurance immobilière Berne

Le projet «Répertoire de la protection contre la grêle» regroupe les rapports sectoriels suivants:

- **Hagelstürme in der Schweiz:** Wiederkehrperioden von schadenbringenden Hagelkorngrossen – eine Abschätzung, Dr. Hans-Heinrich Schiesser, Zürich, 2006.
- **Hagelwiderstand der Gebäudehülle, Archivdaten der Empa 1970–2005,** Empa Dübendorf, 2005, responsable du projet: P. Flüeler.
- **Hagelwiderstand der Gebäudehülle, experimentelle Ermittlung des Hagelwiderstandes,** Empa Dübendorf, 2007, responsable du projet: P. Flüeler.
- **Schadenpotenziale,** Basler & Hofmann AG, Zürich, 2007, responsable du projet: Dr. A. Eckhardt Scheck.
- **Elementarschutzregister,** Egli Engineering, St. Gallen, 2007, responsable du projet: Dr. Th. Egli.

Ces rapports peuvent être commandés sous forme numérique (format pdf) auprès de la Fondation de prévention.



Coordination

Rolf Meier

Traduction

Dr. Christian Marro, Traductonet

Réalisation et production

Rickli + Wyss, Bern

Tirage

1500 exemplaires en allemand
400 exemplaires en français

ISBN

978-3-9523300-1-2

Prix

CHF 20.–

1	Avant-propos	4
2	Résumé et synthèse	5
3	Le danger de grêle en Suisse	6
3.1	Détermination du danger par radar météorologique	6
3.2	Résultats	6
3.3	Evolution future	8
4	Enveloppe des bâtiments: hier, aujourd'hui et demain	10
4.1	Enveloppes typiques – Evolution jusqu'à nos jours	10
4.1.1	Bâtiments résidentiels	10
4.1.2	Bâtiments administratifs	12
4.1.3	Bâtiments agricoles	14
4.1.4	Bâtiments industriels et artisanaux	15
4.2	Derniers développements concernant l'enveloppe des bâtiments	16
4.2.1	Evolution de l'enveloppe des bâtiments	16
4.2.2	Répercussions sur la vulnérabilité	16
5	Dommmages dus à la grêle	17
5.1	Vue d'ensemble des dommages dus à la grêle en Suisse	17
5.2	Chutes de grêle en 2002 et 2004	17
5.3	Critères d'estimation des dommages dus à la grêle	19
6	Résistance à la grêle de matériaux de construction	20
6.1	Dommmages causés par la grêle dans la nature et en laboratoire	20
6.2	Détermination de la résistance à la grêle par des essais en laboratoire	23
6.2.1	Appareillage et accessoires	23
6.2.2	Déroulement des essais	23
6.2.3	Appréciation	24
6.2.4	Résultats	25
7	Répertoire de la protection contre la grêle	26
7.1	Classification des produits de construction	26
7.2	Classes de résistance à la grêle	26
7.3	Définition des dommages	26
7.4	Test de la résistance à la grêle	28
7.4.1	Conditions générales d'essai	28
7.4.2	Modalités d'essai particulières aux éléments de construction	28
7.5	Résultats	29
8	Aperçu de la suite de la procédure	32
8.1	Mise à jour des normes de construction	32
8.2	Mise en œuvre du Répertoire de la protection contre la grêle	32
8.3	Mesures à prendre par les établissements cantonaux	32
8.4	Investigations complémentaires	33
9	Glossaire	34
10	Sources et bibliographie	35
10.1	Rapports sectoriels intégrés dans le présent rapport de synthèse	35

Du savoir à l'action

Les recherches prises en charge par la Fondation de prévention des Etablissements cantonaux d'assurance des bâtiments ont permis de combler des lacunes concernant le danger de grêle et la résistance de l'enveloppe des bâtiments. Grâce à ce projet réalisé entre 2005 et 2007, nous savons bien mieux que tout récemment encore où des orages de grêle peuvent se produire en Suisse et quelles sont leurs fréquences et intensités. Nous sommes en mesure de déterminer et de décrire systématiquement la résistance à la grêle d'éléments utilisés pour l'enveloppe des bâtiments et connaissons les dommages que la grêle peut causer. Ce projet a permis d'accumuler des enseignements qui se retrouveront dans un répertoire de la protection contre la grêle à l'attention des professionnels de la construction.

Il faut maintenant franchir le pas crucial entre savoir et agir. Un tel répertoire n'est utile que s'il est enrichi et appliqué systématiquement, de sorte que la résistance de l'enveloppe des bâtiments soit améliorée d'une manière durable et appropriée. Or il reste encore du pain sur la planche pour mettre en œuvre les connaissances acquises sur les plans technique et organisationnel. Il faut les intégrer dans les normes, les appliquer pour classer les éléments de construction en fonction des risques et les utiliser pour introduire une nouvelle pratique juridique en matière d'indemnisation des dommages aux bâtiments causés par la grêle.

Les maîtres d'ouvrages, les architectes et les fabricants de produits de construction trouveront dans ce rapport de synthèse des informations pratiques concernant la résistance à la grêle de différents matériaux utilisés dans le bâtiment. Ces nouvelles connaissances peuvent déjà être appliquées pour améliorer la prévention des dommages dus à la grêle et pour orienter le développement des produits de construction.

Le présent rapport de synthèse, charnière entre savoir et action, a pour but de faciliter les travaux de mise en application à réaliser dans un proche avenir.

Fondation de prévention des
Etablissements cantonaux d'assurance



Dr. Markus Fischer

Le risque occasionné par la grêle est en augmentation.

Les Etablissements cantonaux d'assurance des bâtiments le remarquent dans leurs statistiques sur les sinistres. Le présent projet de la Fondation de prévention s'est principalement attaché à poser des bases aidant à faire des choix. Les établissements cantonaux avaient déjà traité la question au cours des années 1970. Des normes sur l'étanchéité des toits plats en étaient ressorties et l'amélioration des produits en résultant avait permis de les assurer à nouveau.

La **charge de sinistres** observée ces dernières années impose désormais de connaître la résistance à la grêle de tous les matériaux utilisés pour l'enveloppe des bâtiments. Ils doivent être choisis en tenant dûment compte du risque généré par la grêle, car l'augmentation des dommages en résultant n'est pas imputable uniquement à une recrudescence des chutes de grêle.

Le présent rapport **synthétise les quatre rapports sectoriels du projet «Répertoire de la protection contre la grêle»**. Les recherches ont porté sur trois axes, le danger de grêle affectant la Suisse, le potentiel de dommages et la résistance à la grêle de l'enveloppe des bâtiments. Les données recueillies ont permis de poser les bases d'un répertoire de la protection contre la grêle, faisant l'objet du quatrième rapport sectoriel. Le but de ce répertoire est de classer les produits de construction en fonction de leur résistance à la grêle.

L'analyse du **danger de grêle** indique la fréquence et l'intensité des chutes de grêle auxquelles il faut s'attendre en un lieu donné. Elle est basée sur des données fournies par des radars météorologiques et sur de longues séries de mesures météorologiques.

Pour affiner les périodes de retour, la Suisse a été partagée en onze zones climatiques. Le Plateau a été subdivisé en zones «ouest», «centre» et «est»: si l'ouest est affecté tous les 100 ans par des grêlons de 30 mm de diamètre, la périodicité atteint 20 ans au centre et à l'est. L'observation sur une longue période révèle en outre une recrudescence des grandes cellules de grêle, générant des chutes plus intenses.

Le volet consacré au **potentiel de dommages** donne un aperçu de l'évolution architecturale du milieu du 20^e siècle jusqu'à nos jours. Il décrit la tendance que devrait suivre l'enveloppe des bâtiments et en estime les effets sur la vulnérabilité à la grêle. Pour les bâtiments résidentiels, aucune évolution générale susceptible d'influencer la vulnérabilité de manière décisive ne se dessine actuellement. Pour les immeubles de bureaux, elle augmentera vraisemblablement du fait de l'utilisation croissante d'éléments pare-soleil, de métaux et de matériaux synthétiques.

La **résistance effective à la grêle** de matériaux utilisés pour l'enveloppe des bâtiments a été testée en laboratoire. La projection de grêlons sur onze catégories d'éléments de

construction a permis d'obtenir un bon aperçu des différents dommages, du moment auquel ils apparaissent et de leur évolution. Les tirs ont été effectués d'une manière aussi réaliste que possible, en projetant pour la première fois des sphères de glace de différents diamètres au lieu de sphères en matière synthétique.

Le **Répertoire de la protection contre la grêle** distingue cinq classes de résistance à la grêle (RG). Les RG 1 à 5 se rapportent à des grêlons de diamètre 10 à 50 mm. **La classification se réfère à l'absence de dommage.** Un élément de construction peut remplir simultanément plusieurs fonctions, les deux plus fréquentes étant l'étanchéité et l'aspect. La résistance d'un élément donné peut donc varier selon la fonction considérée. Les conditions d'essai inhérentes au Répertoire de la protection contre la grêle mentionnent les fonctions assurées par les éléments de construction et à partir de quel moment ils sont considérés comme endommagés (critère d'endommagement). Le verre, les lés d'étanchéité et les tuiles en terre cuite comptent parmi les matériaux les plus résistants à la grêle en ce qui concerne l'étanchéité. Les volets roulants et les stores à lamelles figurent au nombre des éléments les moins résistants. On peut y ajouter quelques tôles et planches en bois pour ce qui est de l'aspect.

Ces recherches posent les bases requises pour mettre en œuvre le Répertoire de la protection contre la grêle, grâce auquel **la résistance à la grêle des matériaux de construction aura la transparence nécessaire.** L'idée de la prévention des dommages dus à la grêle devient ainsi une réalité.

3.1 Détermination du danger par radar météorologique

La Suisse dispose déjà d'une carte des périodes de retour (PR) des chutes de grêle, mais celle-ci ne tient pas compte de la taille des grêlons. Or il faut des informations sur la taille et sur la fréquence des gros grêlons pour être en mesure de mieux apprécier le risque de dommage. Aucune valeur mesurée n'étant disponible en Suisse, hormis les données provenant d'une expérience de défense contre la grêle et quelques tailles de grêlons observées localement, on a utilisé des informations fournies par les radars météorologiques opérationnels de MétéoSuisse (Albis, Dôle et Monte Lema). La plus forte intensité de précipitation repérable sur l'image radar correspond à la limite entre la pluie intense et la chute de grêle. Les surfaces décrivant l'intensité des précipitations sont générées par des cellules de grêle, que l'on peut assigner à onze zones climatiques en fonction du centre des tempêtes. Huit d'entre elles – l'est et l'ouest du Jura (JE, JW), l'est, le centre et l'ouest du Plateau (PE, PC, PW), l'est, le centre et l'ouest des Alpes (AE, AC, AW) – sont au nord des Alpes et une autre se trouve au sud des Alpes (AS). Les zones «Valais» et «Grisons» y ont été ajoutées.

Le recensement des tempêtes de grêle peut s'appuyer sur des données radar de 1992 à 2004 pour le nord des Alpes et de 1996 à 2004 pour le sud des Alpes. Ces données fournissent des valeurs importantes – durée des chutes de

grêle, surfaces potentiellement affectées, hauteur et vitesse de déplacement des cellules de grêle, position du centre des tempêtes, etc. – en tenant compte de la zone climatique. Des informations supplémentaires ont été apportées par un radar de recherches de l'EPFZ, qui a enregistré en détail toutes les cellules de grêle importantes de 1992 à 1996 dans un rayon de 100 km. Les séries temporelles relativement brèves, de 9 et 13 ans, ont été prolongées à l'aide d'une longue série (1881–2001) utilisée pour la classification des grandes situations météorologiques européennes et le nombre de tempêtes de grêle a été corrigé en fonction de leur appartenance à ces différentes situations.

3.2 Résultats

Les résultats sont présentés de trois manières différentes: selon les classes granulométriques des grêlons, selon que leur taille est supérieure ou égale à des valeurs données (≥ 1 , ≥ 2 , ≥ 3 et ≥ 4 cm) et selon des périodes de retour (PR) données. La présentation en fonction des PR est basée sur les valeurs du tableau «plus grand ou égal à», la taille de grêlon attendue dans chaque zone climatique étant fournie pour plusieurs PR de 1 à 300 ans (tableau 3.1). Il faut s'attendre à ce que des grêlons de taille supérieure ou égale à la valeur indiquée tombent au moins une fois durant la période considérée.

PR	AE	AC	AW	PE	PC	PW	JE	JW	AS	GR	VS
1	1	1		1	1		1	1			
5	1	2	1	2	2	1	2	1	1		
10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	
20	2	2	2	3	3	2	3	2	2	1	1
30	2	3	2	3	3	2	3	2	2	1	1
50	2	3	2	3	3	2	3	2	2	1	1
100	3	4	3	4	4	3	4	3	3	1	2
250	3	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2
300	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	2

Tableau 3.1: Tailles de grêlons minimales attendues (en cm) dans les diverses zones climatiques pour différentes périodes de retour (PR), augmentées d'estimations pour les Grisons et le Valais au titre de 10^e et 11^e zone climatique.

Les trois figures suivantes donnent un aperçu des intensités attendues, subdivisées selon la taille minimale des grêlons, pour les périodes de retour de 50, 100 et 300 ans.

Période de retour de 50 ans

Schweiz Suisse Svizzera Svizra

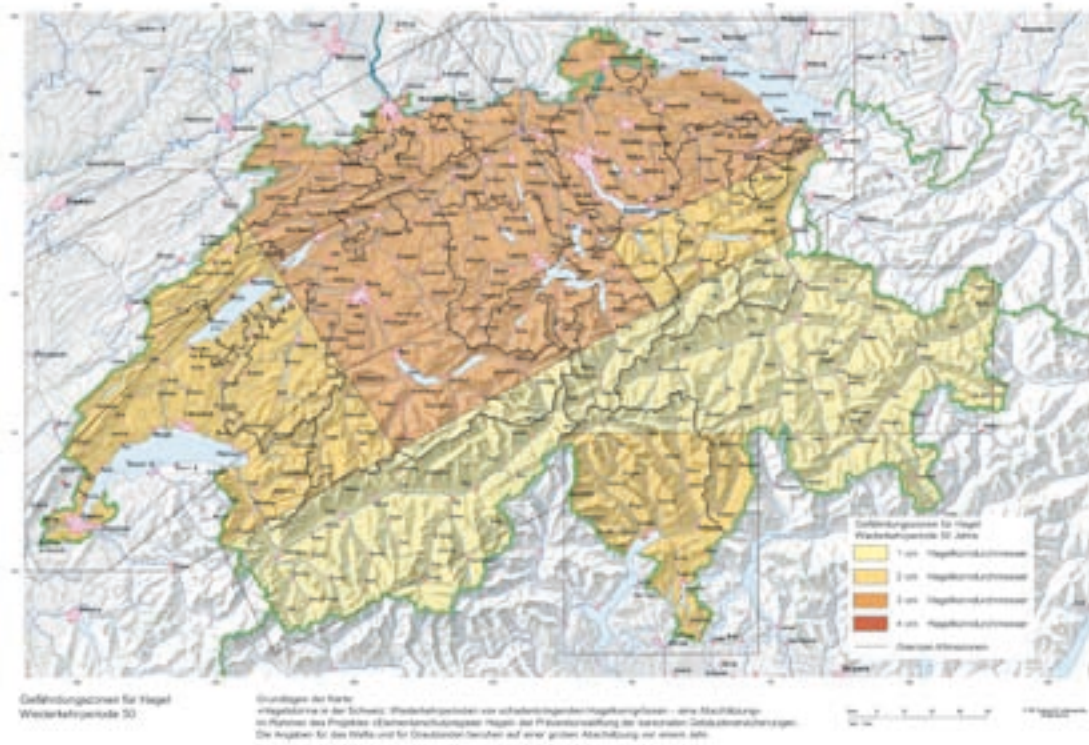


Figure 3.1: Intensité de la grêle en fonction du diamètre des grêlons pour une période de retour de 50 ans.

Période de retour de 100 ans

Schweiz Suisse Svizzera Svizra

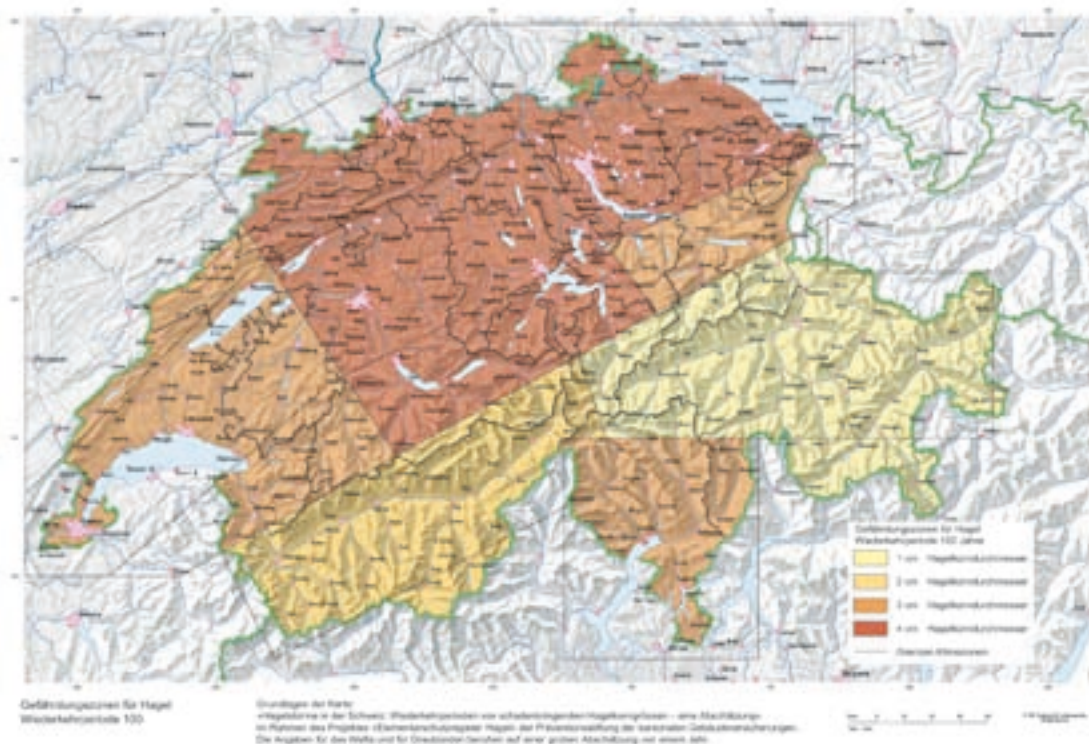


Figure 3.2: Intensité de la grêle en fonction du diamètre des grêlons pour une période de retour de 100 ans.

3 Le danger de grêle en Suisse

Période de retour de 300 ans

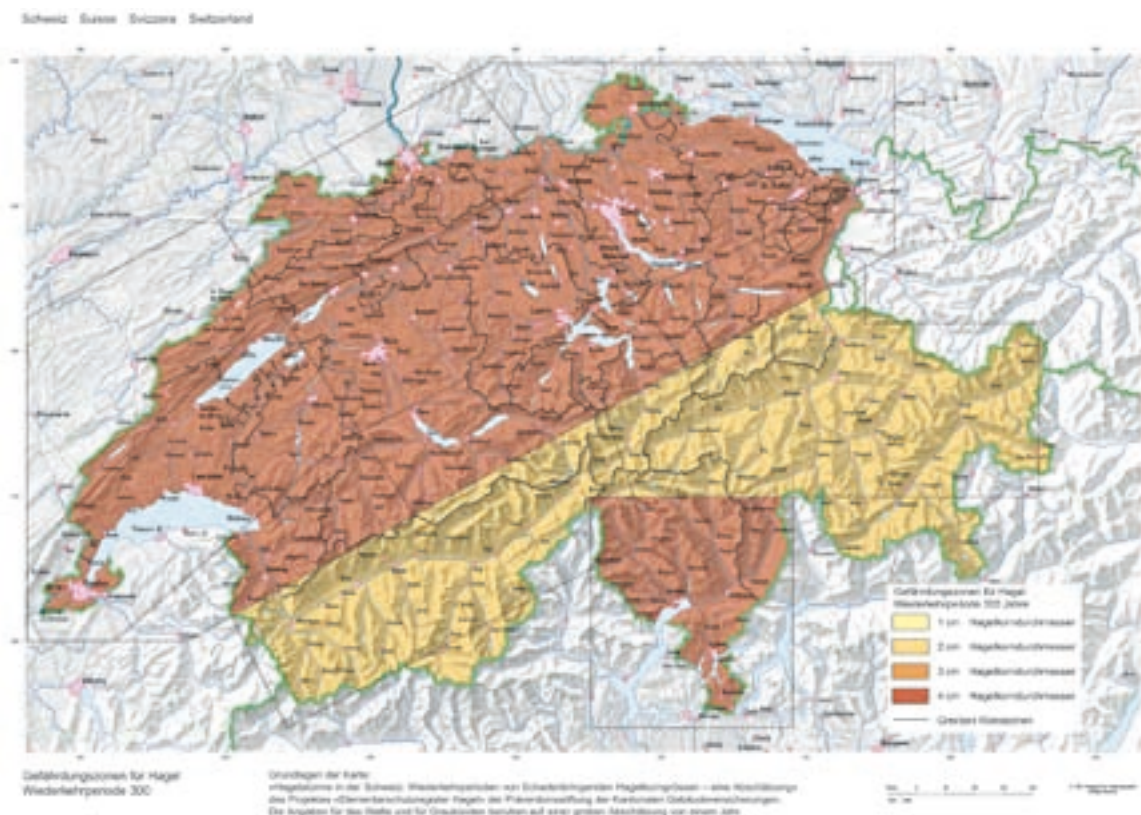


Figure 3.3: Intensité de la grêle en fonction du diamètre des grêlons pour une période de retour de 300 ans.

Les nouvelles cartes sont subdivisées en onze zones climatiques au lieu des cinq figurant dans la carte existante du danger de grêle régnant en Suisse (norme SIA 261/1). Elles indiquent également la période de retour pour différentes tailles de grêlons, ce qui permet d'obtenir des informations beaucoup plus ciblées concernant le danger de grêle.

A titre d'exemple, des grêlons de diamètre supérieur ou égal à 1 cm devraient tomber chaque année au centre et à l'est du Plateau ainsi qu'à l'est du Jura (PE, PC et JE). On s'y attend à la chute de grêlons d'au moins 2 cm tous les 5 ans, 3 cm tous les 20 ans et 4 cm tous les 100 ans. Ces trois zones comptent parmi les plus menacées. Le Valais et les Grisons sont les moins affectés; des grêlons de diamètre supérieur ou égal à 1 cm de diamètre tombent tous les 10 ans dans les Grisons et seulement tous les 20 ans en Valais. Pour une taille de 2 cm, les périodes de retour sont respectivement de 250 ans et de 100 ans.

répertoriées par radar: les enregistrements radar couvrant la période maximale de 22 ans dont nous disposons indiquent une tendance à la recrudescence des cellules de grêle de grande taille, dont la trajectoire a une longueur supérieure ou égale à 100 km (figure 3.4); mais aucun accroissement n'a été observé durant cette période pour les cellules de taille moindre. Il y a lieu de poursuivre systématiquement le monitoring des tempêtes de grêle par radar, nécessaire pour détecter une éventuelle modification marquée de leur activité.

3.3 Evolution future

La fréquence des situations météorologiques favorisant la formation d'importantes cellules de grêle a augmenté au cours des dernières décennies (série de grandes situations météorologiques portant sur 121 ans). On peut faire les constatations suivantes à propos du nombre de cellules

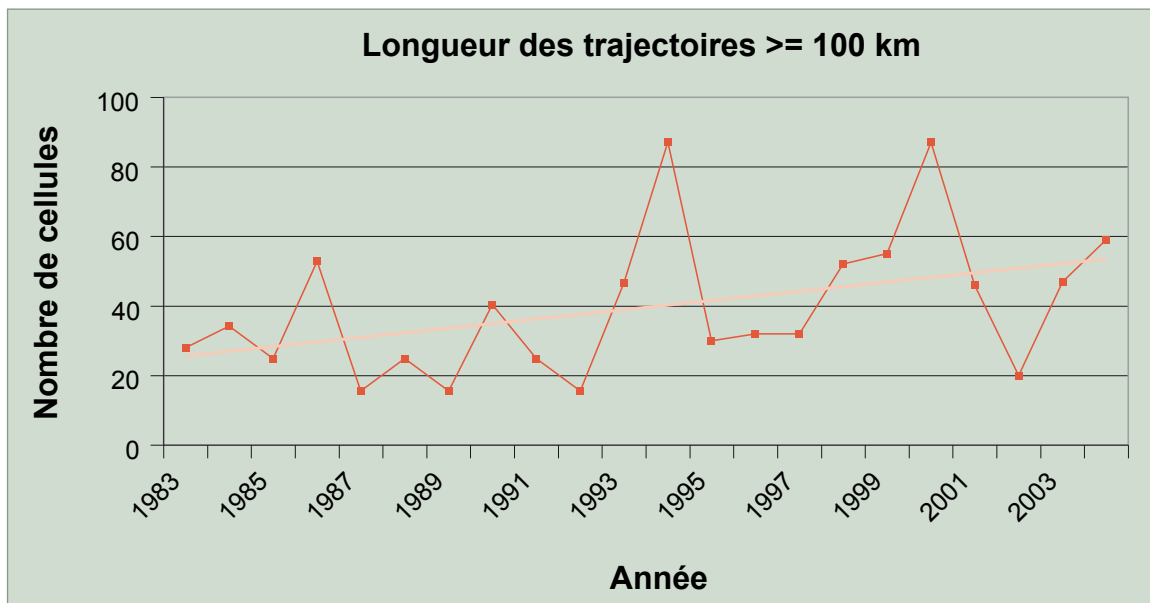


Figure 3.4: Nombre de cellules de grêle mesurées saisonnièrement (de mai à septembre) au nord des Alpes (huit zones climatiques), dont la trajectoire a une longueur supérieure ou égale à 100 km. Une droite de tendance a été superposée à la courbe, qui couvre toute la période disponible, y compris les années antérieures à 1992 où les images radar étaient enregistrées analogiquement sur film. Le nombre de cellules répertoriées durant les années précédant 1995 (radars d'ancienne génération) a été corrigé.

4 Enveloppe des bâtiments: hier, aujourd'hui et demain

4.1 Enveloppes typiques – évolution jusqu'à nos jours

Les dommages aux bâtiments dus à la grêle dépendent non seulement de la fréquence et de l'intensité des chutes de grêle, mais aussi de la vulnérabilité des matériaux utilisés pour les construire. C'est pourquoi l'évolution de l'enveloppe des bâtiments du milieu du 20^e siècle jusqu'à nos jours est retracée ci-après, sous forme de tableaux. Les différents types de bâtiments y sont traités séparément, selon les catégories

suyvantes: bâtiments résidentiels, comprenant les sous-catégories maisons individuelles et immeubles locatifs, bâtiments administratifs, comprenant les sous-catégories immeubles de bureaux, bâtiments culturels et bâtiments sportifs, bâtiments agricoles ainsi que bâtiments industriels et artisanaux. Cette dernière catégorie comprend les constructions liées aux transports, au commerce et à l'hôtellerie, les constructions annexes et divers autres bâtiments. En valeur assurée, les bâtiments résidentiels comptent pour moitié dans le parc de bâtiments suisse, qui a triplé depuis 1945.

4.1.1 Bâtiments résidentiels

Type de bâtiments	Autrefois	Années 1960–1970	Années 1980–1990	Actuellement
Maisons individuelles	Maçonnerie crépie, toit incliné en tuiles, portes et volets battants en bois peint, fenêtres à vitrage simple avec contre-fenêtres	Façades et toit en fibres-ciment, grandes surfaces vitrées, substitution des contre-fenêtres par des vitrages doubles puis par des vitrages isolants	Maçonnerie à deux peaux, l'externe en brique apparente, moellons calcaires apparents ou maçonnerie crépie, toit incliné en tuiles de terre cuite ou de béton	Isolation extérieure crépie, façades suspendues en bois ou en fibres-ciment, toit incliné comme auparavant

Tableau 4.1: Evolution des matériaux utilisés pour les maisons individuelles.



Figure 4.1: Photo Basler & Hofmann.

Maison individuelle construite vers 1935

Maçonnerie crépie massive, fenêtres en bois (avec contre-fenêtres), volets en bois, toit incliné recouvert de tuiles (flamandes).



Figure 4.2: Photo Basler & Hofmann.

Maison jumelée construite en 2004

Socle massif en béton apparent / planchéage horizontal en mélèze non traité, fenêtres en bois avec stores en toile, toit plat, attique avec revêtement métallique.

Type de bâtiments	Autrefois	Années 1960–1970	Années 1980–1990	Actuellement
Immeubles locatifs	Maçonnerie crépie, toit incliné en tuiles ou parfois plat avec lés d'étanchéité à base de bitume et couche de gravier, fenêtres à vitrage simple avec contre-fenêtres, revêtement des balcons en fibres-ciment	Ensembles à façades en béton apparent, balcons à balustrades massives en béton, isolation extérieure crépie, bois interdit par des prescriptions incendie	Maçonnerie à deux peaux, l'externe en brique apparente, moellons calcaires apparents ou maçonnerie crépie, fenêtres à vitrage isolant, façades et toit en fibres-ciment	Isolation extérieure crépie, constructions suspendue en panneaux de fibres-ciment, verre ou fibres-ciment, prédominance de toits plats

Tableau 4.2: Evolution des matériaux utilisés pour les immeubles locatifs.



Figure 4.3: Photo Basler & Hofmann.

Immeuble locatif construit vers 1940

*Maçonnerie crépie,
balustrades à panneaux de fibres-ciment,
fenêtres en bois à vitrage double,
volets roulants en métal,
toit légèrement incliné en tuiles.*



Figure 4.4: Photo Basler & Hofmann.

Immeuble locatif construit en 2005

*Façade revêtue de fibres-ciment
Fenêtres en matière synthétique avec stores à lamelles
Toit plat avec étanchéité à base de bitume.*

4 Enveloppe des bâtiments: hier, aujourd'hui et demain

4.1.2 Bâtiments administratifs

Type de bâtiments	Autrefois	Années 1960–1970	Années 1980–1990	Actuellement
Bâtiments administratifs et immeubles de bureaux	Maçonnerie crépie ou façades en pierre naturelle, toit en tuiles ou en tôle, constructions représentatives parées d'ornements artistiques en pierre naturelle	Revêtements en aluminium, fibres-ciment ou céramique avec éléments en béton apparent, toit plat avec lés d'étanchéité à base de bitume et couche de gravier, augmentation des surfaces vitrées et des installations antisolaire	Eléments en béton et façades métalliques suspendus, bâtiments représentatifs revêtus de pierres naturelles, accroissement des surfaces vitrées, toit plat avec lés d'étanchéité en matière synthétique	Grande proportion de surfaces éclairantes et d'installations antisolaire, formes et matériaux expérimentaux (plastique, céramique, etc.)

Tableau 4.3: Evolution des matériaux utilisés pour les bâtiments administratifs et les immeubles de bureaux.



Bâtiment administratif construit vers 1900

Socle massif en pierre naturelle, façade crépie ornementée, fenêtres en bois, toit en ardoises (fibres-ciment, récent).

Figure 4.5: Photo Egli Engineering.



Bâtiment administratif construit en 2004

Façade avec profilés en céramique horizontaux, fenêtres métalliques avec stores à lamelles, toit plat avec attique massif.

Figure 4.6: Photo Basler & Hofmann.

Type de bâtiments	Autrefois	Années 1960 à nos jours
Bâtiments culturels et bâtiments sportifs	Halles de gymnastique en maçonnerie crépie et à toit de tuiles, fenêtres à vitres de petite taille. Bâtiments culturels sous la forme de constructions crépies avec éléments en pierres naturelles, toit en tuiles ou recouvert de bandes de tôle	Bâtiments sportifs à façades en brique apparente, présence fréquente d'éléments éclairants en matière synthétique, remplacés de plus en plus souvent par du verre, revêtement des façades et couverture du toit en panneaux de fibres-ciment. Petits bâtiments sportifs (p.ex. vestiaires) similaires aux bâtiments résidentiels. Les bâtiments culturels construits dans les années 1960 à 1980 diffèrent peu des immeubles de bureaux représentatifs.

Tableau 4.4: Evolution des matériaux utilisés pour les bâtiments culturels et sportifs.



Figure 4.7: Photo Basler & Hofmann.

Halle de gymnastique construite en 1910

*Maçonnerie crépie,
fenêtres en bois,
toit couvert de tuiles «en queue de castor»,
éléments en saillie sur le toit revêtus de bardeaux
en fibres-ciment.*



Figure 4.8: Photo Basler & Hofmann.

Musée des beaux-arts construit en 1995

*Parois revêtues de verre profilé
Vitrages métalliques
Éléments en saillie sur le toit en verre, revêtus de tôle.*

4 Enveloppe des bâtiments: hier, aujourd'hui et demain

4.1.3 Bâtiments agricoles

Type de bâtiments	Autrefois	Années 1960–1980	Actuellement
Bâtiments agricoles	Différences régionales: Plateau, Valais et Appenzell plutôt en bois, Tessin, Jura et Engadine plutôt en pierre. Toit couvert de tuiles ou de dalles en pierre, façades souvent revêtues de panneaux en fibres-ciment ou de briques du côté exposé aux intempéries	Séparation entre partie habitée et partie exploitation, les bâtiments habités ne se distinguent presque plus des autres maisons individuelles en ce qui concerne les matériaux appliqués en surface	Parois des étables, écuries, granges et serres revêtues de fibres-ciment et de bois, éléments translucides en verre ou en plastique, toit en fibres-ciment ou en tuiles, toits plats rares. Retour croissant à des matériaux traditionnels pour les transformations et les extensions

Tableau 4.5: Evolution des matériaux utilisés pour les bâtiments agricoles.



Figure 4.9: Photo Egli Engineering.

Ferme historique appenzelloise

Partie habitée et partie exploitation revêtues de bois peint, portes et fenêtres en bois avec volets en bois, toit couvert de tuiles en terre cuite.



Figure 4.10: Photo Basler & Hofmann.

Ferme transformée en 2004

Partie exploitation transformée en habitation, béton apparent et revêtement en bois peint, fenêtres en bois, toit en tuiles, éléments en saillie sur le toit revêtus de tôle de cuivre.

4.1.4 Bâtiments industriels et artisanaux

Type de bâtiments	Autrefois	Années 1950–1990	Actuellement
Bâtiments industriels et artisanaux	Murs en brique apparente stabilisés par une ossature métallique, grandes fenêtres à vitrage simple et impostes, toit plat avec lés d'étanchéité à base de bitume, bâtiments représentatifs (p.ex. gares) avec maçonnerie crépie et pierre naturelle combinées, toit couvert de tôle ou de lés à base de bitume	Evolution vers des bâtiments purement utilitaires, enveloppe formée de panneaux métalliques (souvent en combinaison sandwich avec l'isolation thermique) ou d'éléments préfabriqués en béton, toits plats avec coupoles ou bandes vitrées, grandes portes en métal léger ou en matière synthétique; les bâtiments de bureaux attenants sont semblables aux immeubles de bureaux, les constructions liées aux transports ont subi la même évolution, hormis une grande proportion d'éléments translucides pour les abribus	Grande proportion de façades en métal ou en verre, utilisation accrue de matières synthétiques, abribus souvent avec forme et matériaux expérimentaux

Tableau 4.6: Evolution des matériaux utilisés pour les bâtiments industriels et artisanaux.



Bâtiment industriel construit vers 1870

Façade en brique apparente avec système porteur métallique, fenêtres de petite taille à vitrage simple, toit légèrement incliné avec revêtement à base de bitume.

Figure 4.11: Photo Basler & Hofmann.



Bâtiment industriel construit vers 1990

Façades et toit revêtus de panneaux en fibres-ciment, fenêtres en bois avec stores à lamelles, toit incliné avec revêtement de fibres-ciment.

Figure 4.12: Photo Basler & Hofmann.

4.2 Derniers développements concernant l'enveloppe des bâtiments

Des ingénieurs civils, des architectes et des entrepreneurs généraux ont été interrogés afin de dégager les tendances caractérisant l'évolution technique de l'enveloppe des bâtiments.

4.2.1 Evolution de l'enveloppe des bâtiments

Les tendances importantes suivantes ont été identifiées pour les prochaines années:

- amélioration constante de l'isolation thermique, d'où augmentation générale de la proportion d'isolations extérieures recouvertes de crépi;
- augmentation constante de la proportion de verre, principalement pour les immeubles de bureaux, avec les exigences en matière antisolaire que cela implique;
- recours croissant à des éléments translucides en matière synthétique pour les toits et les éléments de façade mobiles des immeubles de bureaux;
- recours croissant à des éléments métalliques pour les façades des immeubles de bureaux;
- utilisation croissante de bois, principalement pour les bâtiments résidentiels et les bâtiments communaux;
- grande importance accordée aux aspects esthétiques pour les immeubles de bureaux et les bâtiments administratifs, diverses expériences impliquant de nouvelles formes et matériaux;
- recours croissant à des revêtements nanotechniques, par exemple pour leurs propriétés autonettoyantes ou pour obtenir des effets de couleurs particuliers.

4.2.2 Répercussions sur la vulnérabilité

Les répercussions sur la vulnérabilité de l'enveloppe des bâtiments sont les suivantes:

- les matériaux traditionnellement utilisés en Suisse pour l'enveloppe des bâtiments – pierre naturelle, maçonnerie crépie, béton, briques et panneaux de fibres-ciment – présentent une résistance à la grêle relativement élevée;
- les immeubles de bureaux seront de plus en plus vulnérables à la grêle du fait de l'utilisation accrue d'éléments de protection antisolaire, de métal et de matières synthétiques; vient s'y ajouter l'application parfois expérimentale de nou-

veaux matériaux et éléments de façade, dont la résistance à la grêle est souvent certainement faible (p.ex. façades médiatisées ou revêtements nanotechniques);

- les bâtiments résidentiels ne suivent actuellement aucune évolution susceptible d'influencer considérablement la vulnérabilité à la grêle; elle n'augmente pas du fait du recours accru au bois;
- les immeubles de bureaux et – sur le long terme – les immeubles résidentiels pourraient bénéficier du développement de verres high-tech à fonction antisolaire intégrée, qui se substituerait aux stores à lamelles en réduisant la vulnérabilité de ces bâtiments;
- le tissu bâti suisse évolue lentement. Cela s'applique aussi à l'enveloppe des bâtiments, bien que leur cycle de rénovation soit plus court que pour l'ensemble du parc de constructions.

5 Dommages dus à la grêle

5.1 Vue d'ensemble des dommages dus à la grêle en Suisse

Depuis les années 1990, les dommages assurés dus à la grêle ont nettement augmenté (figure 5.1), pour les raisons suivantes: 1) extension des aires urbanisées dans des zones

menacées par la grêle, d'où des montants assurés plus élevés, 2) utilisation de matériaux plus vulnérables à la grêle et 3) occurrence éventuelle de tempêtes de grêle plus violentes ou plus étendues dans une atmosphère plus chaude et plus instable (figure 3.4).

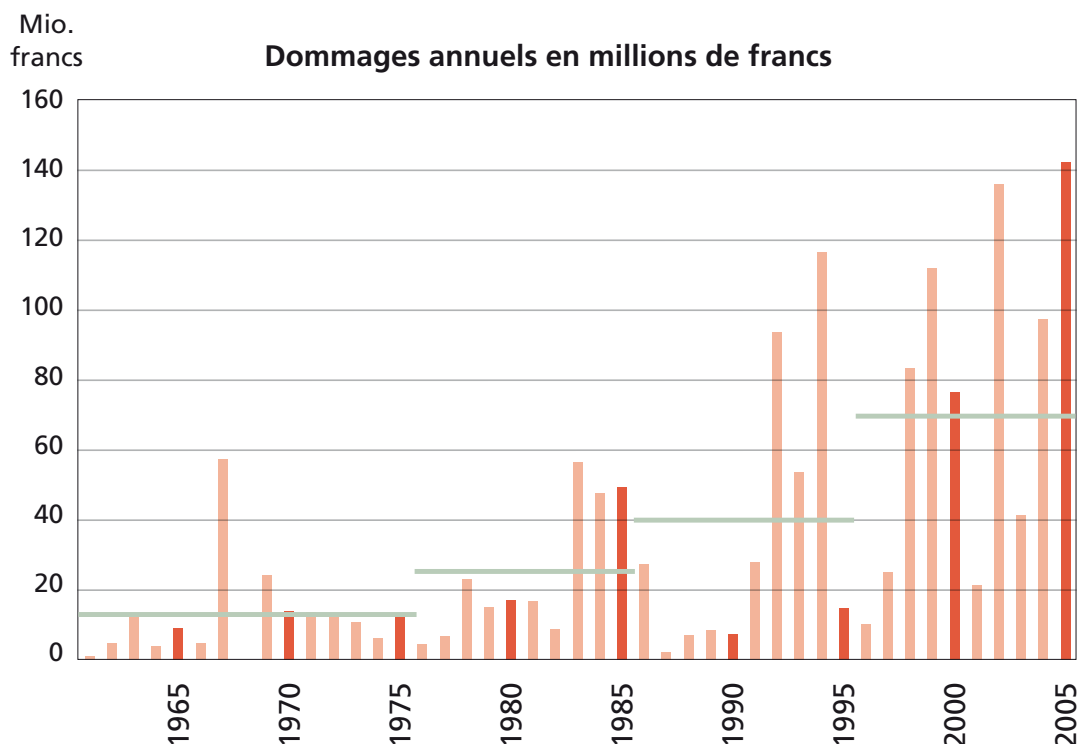


Figure 5.1: Dommages aux bâtiments dus à la grêle dans les cantons possédant une assurance immobilière de droit public, pour 1961 à 2005. Les traits horizontaux indiquent des moyennes pluriannuelles.

5.2 Chutes de grêle en 2002 et 2004

Le dommage financier est exposé à l'exemple de trois grosses chutes de grêle datant de 2002 et 2004. Les chiffres ont été collectés par l'établissement d'assurance des bâtiments du canton de Zurich, si bien qu'ils reflètent uniquement la

situation dans ce canton, pour ces trois événements, et ne sont pas représentatifs de l'ensemble de la Suisse. Le tableau 5.1 synthétise les dommages imputables à ces intempéries:

Événement	Nombre de cas	Demandes accordées	Demandes rejetées	Dommages en francs
2002 (24 juin)	10 640	9 309	1 331	65.4 Mio.
2004 (8 juillet)	5 314	4 730	584	23.5 Mio.
2004 (12 août)	3 584	3 346	238	15.6 Mio.
Total	19 538	17 385	2 153	104.5 Mio.

Tableau 5.1: Synthèse des dommages annoncés pour les chutes de grêle de 2002 et 2004 dans le canton de Zurich.

5 Dommages dus à la grêle

Les figures 5.2 et 5.3 présentent la répartition des dommages et des indemnisations en fonction des types de bâtiments.

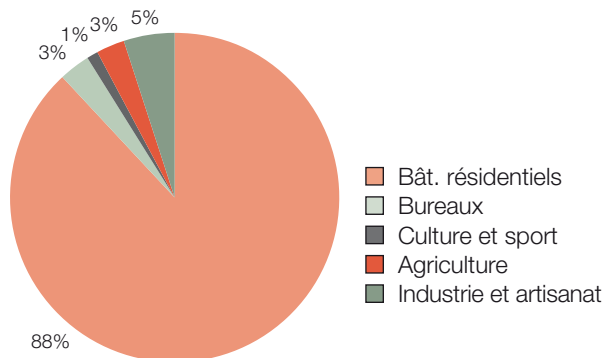


Figure 5.2: Parts du nombre de sinistres, subdivisés selon l'affectation des bâtiments, pour les chutes de grêle de 2002 et 2004 dans le canton de Zurich.

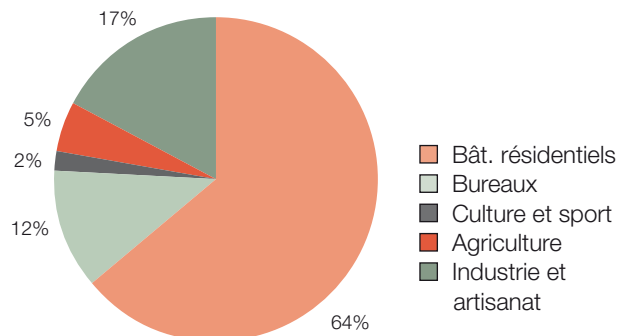


Figure 5.3: Parts de l'ensemble du dommage financier, selon les différents types de bâtiments, pour les chutes de grêle de 2002 et 2004 dans le canton de Zurich.

Les bâtiments résidentiels entrent pour 88 % dans le nombre de cas indemnisés et pour 64 % dans l'ensemble du dommage financier. 3 % des sinistres annoncés concernent des immeubles de bureaux, mais ils génèrent 12 % de la facture totale. Si l'on considère uniquement les immeubles de bureaux, les bâtiments agricoles, industriels et artisanaux, on constate que 11 % des sinistres annoncés représentent un tiers (34 %) du dommage financier.

L'étude de 80 dossiers concernant des bâtiments résidentiels, portant sur 399 752 francs de dommages, a révélé que 78 % de ces sinistres ont affecté des stores à lamelles et des volets roulants, pour une participation de 85 % à la facture totale. Les diagrammes circulaires ci-dessous fournissent quelques précisions à ce sujet.

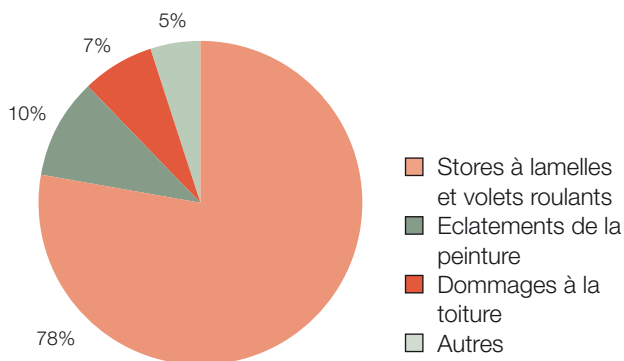


Figure 5.4: Parts des différents types de dommages par rapport au nombre total de cas annoncés suite à la chute de grêle du 8 juillet 2004 dans le canton de Zurich, distingués pour 80 bâtiments résidentiels.

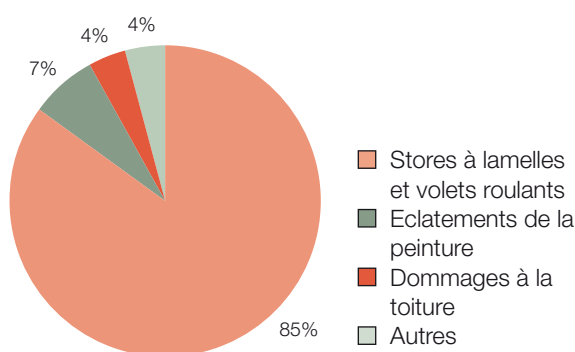


Figure 5.5: Parts des différents types de dommages par rapport au montant total des dommages occasionnés par la chute de grêle du 8 juillet 2004 dans le canton de Zurich, distingués pour 80 bâtiments résidentiels.

Une autre subdivision a été opérée en fonction du montant des dommages. 72 % des factures se montent à quelque 5000 francs et concernent un quart de l'ensemble des dommages. 34 % du montant total correspondent à des sommes de 20 000 à 250 000 francs, mais seulement à

4 % des cas. Les dommages relevant de ce segment ont principalement affecté des façades de grande taille munies de stores à lamelles et des établissements horticoles équipés de verre flotté ou de panneaux à deux âmes.

5.3 Critères d'estimation des dommages dus à la grêle

Tous les Etablissements cantonaux d'assurances des bâtiments ont été interrogés sur leur pratique en matière

d'indemnisation. Le tableau suivant a été dressé sur la base de ces informations, en regroupant systématiquement les critères d'évaluation des dommages.

Critères	Définition	Exemples
Type de dommages: Dommages esthétiques/cosmétiques	Dommages visibles, fonctionnement de la partie de bâtiment pas entravé	Stores à lamelles bosselés, éclatements sur des tuiles en terre cuite
Dommages fonctionnels	Fonction du bâtiment ou de la partie de bâtiment entravée, bâtiment ou partie de bâtiment détruit	Stores à lamelles déformés: plus d'assombrissement; toit non étanche: perméable; verre brisé
Pas de dommages	Bâtiment touché par la grêle, dommages à peine visibles, fonctionnement pas entravé	Chute de grêle sur le toit, bosses invisibles à une distance de cinq mètres
Persistance des dommages: Permanents, irréversibles	Les dommages subsistent	Plastique perforé, verre éclaté, briques cassées, stores à lamelles bosselés
Réversibles	Le matériau «se restaure» sans intervention extérieure	Impacts de grêle sur du bois non traité, correspond à l'altération naturelle, certaines détériorations de la couleur
Particularité: en règle générale, les dommages réversibles ne sont pas indemnisés		
Type de bâtiment: Bâtiment représentatif	Bâtiment de prestige: dédié à la culture, bâtiment public	Musée, théâtre, église, etc. Immeuble de banque ou d'assurance
Bâtiment privé		Maison
Bâtiment non résidentiel		Fabrique, grange, etc.
Particularités: la représentativité est évaluée de cas en cas, elle dépend souvent du point de vue du propriétaire. La représentativité détermine la nature de l'indemnité		
Emplacement du dommage: Visible	Le dommage affecte un emplacement du bâtiment visible	Façade frontale ou entrée de maison
Peu visible	Le dommage affecte un emplacement du bâtiment peu visible	Gouttière, tuyau d'évacuation, façade arrière, étages supérieurs
Invisible	Le dommage est invisible dans le cadre d'une utilisation normale	Toit, gargouille
Particularité: l'emplacement du dommage détermine la nature de l'indemnité		
Matériaux critiques: Matériaux exclus	Réserve concernant les dommages dus aux éléments naturels: certains matériaux sont exclus de l'assurance grêle	Stores à lamelles fins, certaines matières synthétiques, stores antisolaire en textile, bardeaux à base de bitume, certains toits nus, verre flotté pour jardin, feuilles d'étanchéité
Bâtiment exclu ou partie de bâtiment exclu	Certains bâtiments ou parties de bâtiments ne sont pas assurés contre les éléments naturels	Bâtiments mal entretenus, toits plats détendus ou non protégés, feuilles d'étanchéité synthétiques cassantes
Vérification vis-à-vis de la grêle requise/cas rejetés	Fourniture d'une preuve (Empa) ou d'une attestation pour tout matériau nouveau ou inconnu	Attestation de la qualité du verre ou preuve que l'événement a atteint la capacité de résistance du verre, preuve pour tout bâtiment représentatif
Particularité: lorsqu'un dommage est dû à un défaut de construction, il n'est pas indemnisé		
Modes d'indemnisation: Remplacement à la valeur à neuf	L'objet ou la partie d'objet touché est remplacé à sa valeur à neuf	
Indemnité pour moins-value	L'objet touché est indemnisé à raison d'une partie de sa valeur à neuf	D'après l'ampleur des dommages (10 % à 2/3), souvent indemnité forfaitaire, indemnité pour moins-value pas appliquée dans tous les cantons, moins-value calculée sur plusieurs années, valeur actuelle doublée pour les bâtiments ayant beaucoup vieilli
Aucune indemnité	La grêle a causé des dommages uniquement parce que l'objet touché n'a pas été entretenu comme il convient ou par défaut d'entretien. Matériau exclu de l'assurance parce qu'il ne résiste pas à la grêle	Relâchement de la couverture de toits plats Feuilles d'étanchéité en matière synthétique
Particularité: les atteintes importantes à l'esthétique donnent souvent lieu à un remplacement complet, même si le fonctionnement n'est pas entravé.		

Tableau 5.2: Regroupement systématique des critères d'évaluation des dommages.

6.1 Dommages causés par la grêle dans la nature et en laboratoire

Les figures suivantes illustrent sur la gauche des dommages dus à des chutes de grêle naturelles et sur la droite les dommages subis par la même catégorie d'éléments de construction lors d'essais en laboratoire.

Nature



Figure 6.1: Tuiles flamandes, photo GVZ.

Laboratoire



Figure 6.2: Grande tuile plate, photo Empa.

Nature



Figure 6.3: Volet roulant, photo GVZ.

Laboratoire



Figure 6.4: Volet roulant, photo Empa.

Nature



Figure 6.5: Panneau en bois, photo GVZ.

Laboratoire

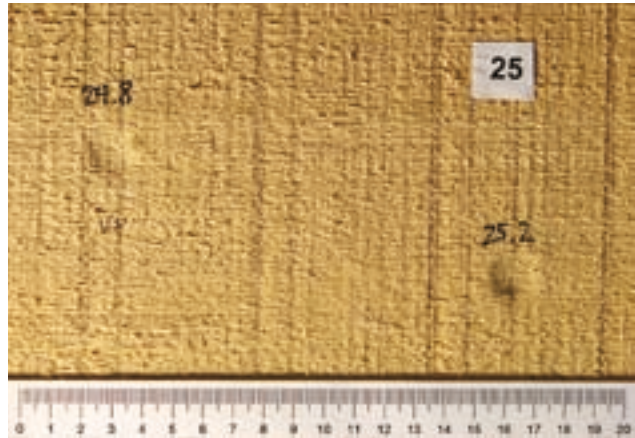


Figure 6.6: Planche en épicéa sciée et non revêtue, photo Empa.

Nature

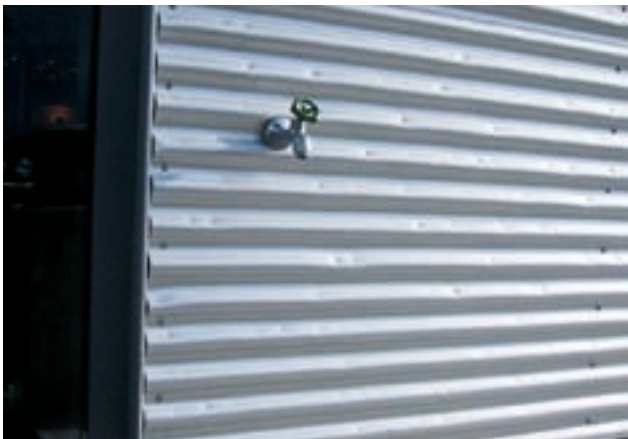


Figure 6.7: Tôle de façade, photo AVA.

Laboratoire



Figure 6.8: Tôle ondulée en aluminium, photo Empa.

Nature



Figure 6.9: Ardoises de façade en fibres-ciment, photo GVZ.

Laboratoire

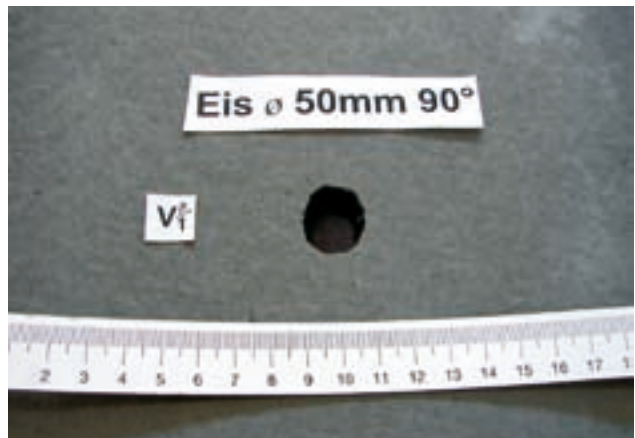


Figure 6.10: Panneaux de façade en fibres-ciment, photo Empa.

6 Résistance à la grêle de matériaux de construction

Nature



Figure 6.11: Crépi armé sur isolation extérieure, photo GVL.

Laboratoire

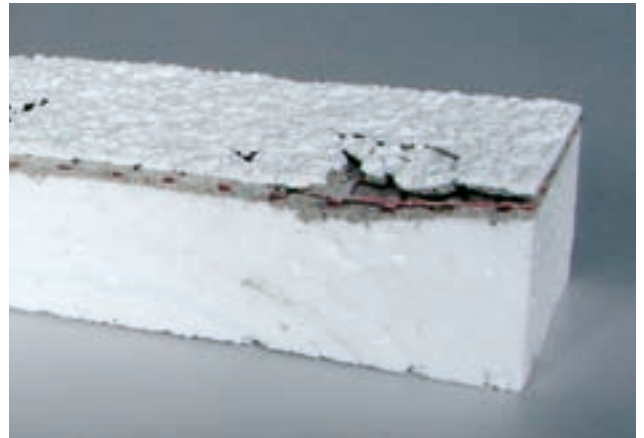


Figure 6.12: Crépi armé sur isolation extérieure en polystyrène, photo Empa.

Nature



Figure 6.13: Lé d'étanchéité vieilli, photo GVL.

Laboratoire



Figure 6.14: Lé d'étanchéité en PVC-P, photo Empa.

Nature



Figure 6.15: Coupole à deux couches, photo ECAB.

Laboratoire



Figure 6.16: Coupole à deux couches en PMMA photo Empa.

Nature



Figure 6.17: Panneaux de toiture en plastique, photo GVZ.

Laboratoire



Figure 6.18: Panneaux résilients à double nervurage, photo Empa.

6.2 Détermination de la résistance à la grêle par des essais en laboratoire

6.2.1 Appareillage et accessoires

Le principe des essais en laboratoire consiste à simuler des chutes de grêle naturelles en tirant des projectiles sphériques isolés sur des enveloppes de bâtiments.

Les tirs sont effectués au moyen d'un appareil d'essai ad hoc, équipé d'un dispositif pneumatique permettant de propulser verticalement des projectiles à une vitesse allant jusqu'à 120 m/s (figure 6.19). La vitesse est mesurée au moyen de cellules photoélectriques. Le dispositif permet de tirer des projectiles de 15 à 50 mm. Pour les essais décrits ici, on a utilisé des sphères de polyamide (PA 66) et – fait nouveau – des sphères de glace de diamètre 20, 30, 40 et 50 mm (figure 6.20). Les projectiles de polyamide étaient des sphères de précision préfabriquées de densité 1.14 à 1.16 g/cm³, tandis qu'une méthode particulière a été appliquée pour produire les projectiles de glace: des sphères peu poreuses et dépourvues de fissures ont été fabriquées à partir d'eau déminéralisée, puis stockées dans un congélateur à une température de -20° C. La densité de la glace ainsi obtenue,

Diamètre [mm]	Masse [g]	
	Densité du PA 66 $\rho = 1.14\text{--}1.16 \text{ g/cm}^3$	Densité de la glace 1 $\rho = 0.87 \text{ g/cm}^3$
20	4.8 ± 0.85%	3.6
30	16.1 ± 0.85%	12.3
40	38.8 ± 0.85%	29.2
50	74.9 ± 0.85%	56.9

Tableau 6.1: Masse des projectiles de différentes tailles.

qui peut varier quelque peu, est de 0.87 g/cm³. La masse des différents projectiles peut être calculée à partir de leur volume et de la densité de la glace. Le tableau 6.1 en fait la synthèse.

Remarque: les dommages causés par les grêlons dépendent de leur taille, mais aussi de leur forme. Les grêlons anguleux, en forme de masses d'armes, infligent à certains matériaux des dommages beaucoup plus importants que des grêlons sphériques. On a néanmoins utilisé uniquement des projectiles sphériques, pour s'assurer que les essais en laboratoire puissent être reproduits.

6.2.2 Déroulement des essais

Les matériaux étudiés peuvent être subdivisés sommairement en éléments de toiture et de façade. Les éléments de toiture ont été percutés selon un angle de 90° et les éléments de façade selon un angle de 45°. Comme les projectiles sont toujours tirés verticalement vers le bas, il faut incliner le matériau cible pour obtenir un angle de 45°. Les échantillons testés ont été montés en laboratoire, conformément aux usages propres aux différents matériaux, selon des spécifications prédéfinies.

Lorsqu'un élément testé était pourvu d'une structure (profilés ondulés, panneaux nervurés, etc.), il a été percuté sur ses différents points caractéristiques (sur les bosses et dans les creux, sur les nervures et entre celles-ci, etc.) afin de déceler dans tous les cas l'endroit le plus vulnérable à la grêle.

Les matériaux dont les propriétés varient en fonction de la température, essentiellement les matériaux à base de plastique, ont été préconditionnés de manière à être revêtus d'une pellicule de glace pendant trois minutes. Le but de cette mesure est de tenir compte de l'effet refroidisseur des chutes de grêle naturelles.

La vitesse à laquelle un grêlon tombant naturellement percute l'enveloppe d'un bâtiment dépend entre autres de sa taille. Elle est de l'ordre de 8 à 30 m/s pour un diamètre de 20 à 50 mm. On a généralement soumis les échantillons à sept tirs de grêlons isolés, animés d'une vitesse de 5 à 35 m/s, afin d'obtenir un large éventail de données et de pouvoir estimer l'évolution générale des dommages. Les différentes vitesses ont été obtenues en faisant varier la pression dans le dispositif de tir. La taille des projectiles a été choisie de manière à ce que la vitesse occasionnant les premiers dommages corresponde sensiblement à leur vitesse d'impact dans la nature. Sachant qu'un projectile de plus grande taille occasionne généralement des dégâts plus importants, on a procédé comme suit: si, par exemple, un projectile de 40 mm de diamètre (vitesse d'impact dans la nature env. 28 m/s) ne provoque aucun dommage jusqu'à 35 m/s, l'essai se poursuit avec une sphère de 50 mm de diamètre. Mais si un dommage survient déjà à 15 m/s, l'essai continue avec une sphère de 30 mm de diamètre.

On a essayé de définir à 1 m/s près la vitesse à laquelle les premiers dommages apparaissent. L'attention a principalement porté sur le comportement des matériaux percutés par des sphères de glace. Mais on a aussi procédé à des essais de tir avec des sphères de polyamide de mêmes taille et vitesse pour pouvoir établir des comparaisons. Cette démarche a permis de calculer des facteurs servant à tirer des conclusions concernant les tirs avec des sphères de polyamide.



Figure 6.19: Canon à grêle avec des tuiles montées, photo Empa.

6.2.3 Appréciation

Une distinction est faite entre l'évolution générale d'un dommage et l'apparition du premier dommage significatif. L'impact d'un grêlon génère typiquement une bosse, dont la taille augmente avec la vitesse du projectile. Cet accroissement de volume correspond à l'évolution générale du dommage «bosse». Le premier dommage revêt la forme d'une fissure, rupture, perforation, bosse, éclatement de matériau, etc. Il peut porter atteinte à une fonction importante d'un élément de construction, comme l'étanchéité. La vitesse à laquelle ce premier dommage apparaît est nommée «vitesse d'endommagement» (v_g). Les dommages ont été analysés, mesurés et photographiés à l'issue des tirs.

Les résultats sont représentés en fonction de l'énergie cinétique (en joules). Calculée au moyen de la formule $E_{\text{cin}} = mv^2/2$, avec m pour la masse du projectile sphérique et v pour sa vitesse, elle est nommée «travail d'endommagement» (w_g). 48 nouveaux produits, répartis en onze catégories d'éléments de construction, ont été étudiés. Les essais ont porté sur des matériaux neufs. Les résultats ont permis de distinguer cinq classes de résistance à la grêle et de classer les matériaux testés en conséquence (*chapitre 7 et tableau 7.3*).

Jusqu'à présent, les essais de grêle recouraient à des sphères normalisées en polyamide, comme exposé dans la norme SIA 280 sur les lés d'étanchéité en matière synthétique. Dans le cas présent, des sphères de glace semblables à des grêlons ont été fabriquées selon un processus reproductible. Les résultats divergent considérablement, car la glace et le polyamide ont des propriétés différentes (densité, température, mode de rupture, etc.). Aux éléments résistants à la flexion, compacts et modulaires, comme les tuiles ou les matériaux en fibres-ciment, les sphères de glace causent les mêmes dommages que les sphères de polyamide, mais sous une énergie notablement plus élevée. Une comparaison avec les dommages observés dans la nature révèle que les tirs de sphères de glace ont des effets similaires, tandis que les projections de sphères de polyamide peuvent fournir des résultats éloignés de la réalité selon les matériaux testés.

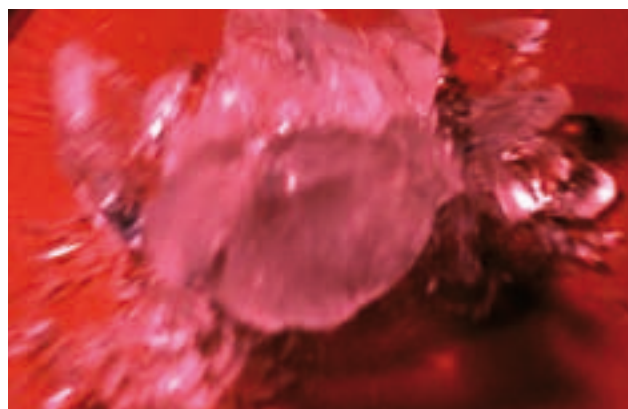


Figure 6.20: Grêlon éclatant sur une tuile, photo Empa.

6.2.4 Résultats

Les résistances déterminées dans le cadre de ce projet ont une valeur indicative. Provenant de producteurs et de distributeurs standards, les matériaux sélectionnés fournissent des points de repère pour leur catégorie d'élément de construction.

Les valeurs de résistance peuvent varier considérablement selon le type de matériau, le montage, le façonnage de la surface et le mode de fixation. Le graphique suivant indique, en joules, les travaux d'endommagement correspondant à l'apparition du premier dommage.

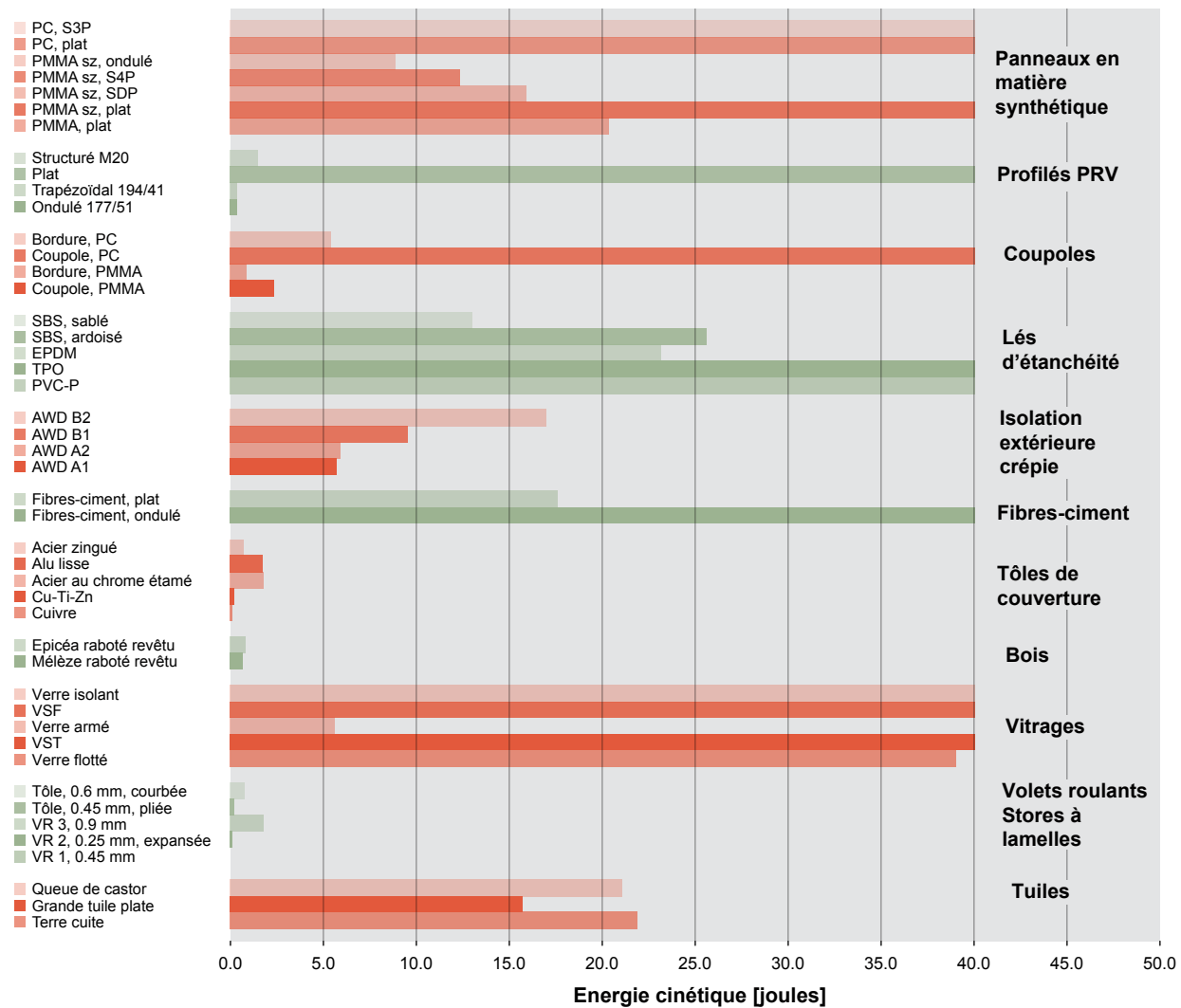


Figure 6.21: Travail d'endommagement par des sphères de glace de diamètre 20–50 mm, pour un angle de tir de 45° ou 90°.

7.1 Classification des produits de construction

Le Répertoire de la protection contre la grêle est un instrument permettant de classer les éléments de construction en fonction de leur résistance à la grêle. Cette classification est établie au terme d'une procédure d'essai normalisée. Les résultats des études en laboratoire exposées au chapitre précédent ont été interprétés en conséquence. Un critère important pour assigner un élément de construction à une classe de résistance est le dommage qu'il subit, si bien qu'il faut définir à partir de quand il y a dommage (critère d'endommagement). Sachant qu'un élément de construction assure parfois plusieurs fonctions, caractérisées par différents critères d'endommagement, il peut apparaître à plusieurs reprises pour une fonction donnée. La procédure d'essai a été normalisée afin que les projections de grêle soient uniformes et reproductibles; en plus des conditions générales d'essai, des modalités particulières ont été fixées pour chaque élément.

7.2 Classes de résistance à la grêle

On a défini cinq classes de résistance à la grêle (RG 1–5), la RG 1 correspondant à une résistance très faible et la RG 5 à une résistance très élevée. La classification est basée sur l'énergie cinétique dégagée par un grêlon de taille donnée lorsqu'il percute une enveloppe de bâtiment: la classe inférieure RG 1 comprend par exemple des éléments qui restent intacts sous l'impact d'un grêlon de 10 mm de diamètre mais sont endommagés par un grêlon de 20 mm. Les éléments seulement endommagés sous l'effet d'un grêlon de 30 mm

de diamètre sont rangés dans la classe RG 2, tandis que les éléments de la classe RG 5 subissent sans dommage l'impact d'un grêlon de 50 mm. Ainsi, la classe de résistance à la grêle définit l'énergie sous laquelle l'élément considéré reste intact. Les calculs de masses et de vitesses partent du principe que les grêlons sont sphériques. Ils appliquent une densité de la glace égale à 870 kg/m³, valeur atteinte tant par la grêle naturelle que par les sphères de glace fabriquées en laboratoire. Ainsi, la masse des grêlons peut être calculée à partir de leur densité et du volume correspondant à leur diamètre. La vitesse d'impact au sol d'un grêlon de taille donnée est tirée de la formule suivante:

$$v_i = \sqrt{\frac{4 \cdot \rho_{gl} \cdot d_{gr} \cdot g}{3 \cdot \rho_{air} \cdot c_w}}$$

v_i : vitesse d'impact [m/s]

ρ_{gl} : densité de la glace = 870 [kg/m³]

d_{gr} : diamètre du grêlon [m]

g : accélération gravitationnelle [m/s²]

ρ_{air} : densité de l'air = 1.2 [kg/m³]

c_w : coefficient de résistance de l'air = 0.50 [-]

Le tableau 7.1 regroupe les diamètres, masses, vitesses de chute et énergies cinétiques des grêlons pour les cinq classes de résistance à la grêle. Les énergies indiquées correspondent à des limites supérieures. Si un élément de construction est endommagé à 3.4 joules, il est assigné à la RG 2, tandis qu'il entre dans la RG 3 s'il est endommagé à 3.6 joules. Comme ces classes recouvrent de larges plages d'énergies, il faut toujours fournir l'énergie d'endommagement entre parenthèses après la mention de la classe. Exemple: RG 3 (3.6).

Résistance à la grêle	Diamètre [mm]	Masse [g]	Vitesse [m/s]	Limite de classe [J]
RG 1	10	0.5	13.8	0.04
RG 2	20	3.6	19.5	0.7
RG 3	30	12.3	23.9	3.5
RG 4	40	29.2	27.5	11.1
RG 5	50	56.9	30.8	27.0

Tableau 7.1: Classes 1 à 5 de résistance à la grêle.

7.3 Définition des dommages

Le point à partir duquel il y a dommage doit être défini pour chaque élément de construction. Une difficulté réside dans le fait qu'un élément assure souvent plusieurs fonctions. Les fonctions élémentaires suivantes ont été identifiées pour les onze types d'éléments étudiés:

- Etanchéité l'élément prévient la pénétration d'eau
- Translucidité l'élément laisse passer la lumière
- Assombrissement l'élément retient la lumière

- Mécanique l'élément comprend un mécanisme
- Aspect l'élément joue un rôle esthétique

La limite entre l'absence et la présence d'un dommage est nommée «critère d'endommagement». Comme ces critères diffèrent d'une fonction à l'autre, un élément de construction peut appartenir à plusieurs classes RG. Le tableau 7.2 énumère les fonctions assurées par les divers éléments ainsi que les critères d'endommagement et les méthodes de mesure correspondantes.

Éléments	Fonction	Critère d'endommagement	Méthode de mesure
Tuiles	Étanchéité	Fissure	Essai au son
	Aspect	Eclatement > 1 cm ²	Examen visuel
Volets roulants	Assombrissement	Fente lumineuse > 1 mm	Mesure de la longueur
	Mécanique	Défaillance du système de remontée	Rentrer et ressortir 5x
	Aspect	Bosse	Examen visuel en lumière oblique
Stores à lamelles	Assombrissement	Fente lumineuse > 1 mm	Mesure de la longueur
	Mécanique	Défaillance du système de remontée ou de l'actionnement des lamelles	Rentrer et ressortir 5x, incliner les lamelles 5x
	Aspect	Bosse	Examen visuel en lumière oblique
Vitrages	Étanchéité	Rupture	Examen visuel
	Aspect	Altération de la surface	Examen visuel en lumière oblique
Tôles	Étanchéité	Fuite dans un délai d'une heure	Noyer le point d'impact, en position horizontale, sous 10 mm d'eau
	Aspect	Bosse	Examen visuel en lumière oblique
Fibres-ciment	Étanchéité	Fissure > 0.02 mm, rupture	A la loupe (agrandissement 6x)
	Aspect	Bosse	Examen visuel en lumière oblique
Crépi	Étanchéité	Fissure	A la loupe (6x) en lumière frontale
	Aspect	Bosse, altération de la surface	Examen visuel en lumière oblique
Bois	Étanchéité	Non revêtu: fissure > 0.5 mm Revêtu: fissure	Mesure Examen visuel en lumière oblique
	Aspect	Non revêtu: bosse > 0.5 mm Revêtu: bosse	Mesure Examen visuel en lumière oblique
Lés	Étanchéité	Perforation	Norme EN 13583
Panneaux en matière synthétique	Étanchéité	Perforation, fissure	Norme EN 13583
	Translucidité	Cassure blanche, défaillance à l'intérieur du matériau	Examen visuel en lumière oblique à contre-jour
	Aspect	Altération de la surface	Examen visuel en lumière oblique
Coupoles	Étanchéité	Fissure, rupture	Examen visuel
	Translucidité	Cassure blanche	Examen visuel à contre-jour
	Mécanique	Défaillance du système de fermeture	Ouvrir et refermer 5x
	Aspect	Altération de la surface, rupture ou fissure dans la couche interne	Examen visuel en lumière oblique

Tableau 7.2: Éléments de construction avec leurs fonctions ainsi que les critères d'endommagement et les méthodes de mesure correspondantes.

7.4 Test de la résistance à la grêle

7.4.1 Conditions générales d'essai

Une procédure d'essai normalisée a été définie pour s'assurer que les tests se déroulent dans des conditions homogènes. Elle permettra de tester de nouveaux éléments de construction et de les assigner aux classes RG de résistance à la grêle. En plus des conditions générales d'essai, des modalités particulières concernant la configuration d'essai, l'angle de tir, etc., ont été fixées pour chaque élément. Les conditions générales sont les suivantes:

- **Principe des essais:** Simulation de l'action naturelle de la grêle en tirant des grêlons isolés, fabriqués artificiellement, sur des matériaux constitutifs de façades et de toitures.
- **Appareillage d'essai:** Dispositif accélérant le projectile jusqu'à la vitesse désirée; la direction du tir peut être choisie de manière quelconque, mais l'angle de tir spécifique à l'élément considéré doit être respecté. Il en résulte un tir contrôlé, d'un projectile unique, sur un échantillon monté comme il se doit pour ce type d'élément de construction.
- **Angle de tir:** Angle entre la direction du tir et le plan de l'échantillon. Les matériaux de toiture sont percutés sous un angle de 90° et les éléments de façade sous un angle de 45°.
- **Point d'impact:** Point le plus faible de l'échantillon; il dépend de l'élément considéré et de son usage.
- **Projectile:** Sphère de glace peu poreuse, dépourvue de fissures, fabriquée selon une méthode particulière puis stockée à une température de -20° C. Son diamètre va de 10 à 50 cm au maximum. Sa forme peut être autre que sphérique, mais elle doit alors être décrite précisément dans le procès-verbal d'essai.
- **Conditions climatiques de l'essai:** Température ambiante de $23 \pm 2^\circ \text{C}$ et humidité relative de $50 \pm 10\%$.
- **Préstockage de l'échantillon:** Spécifique à l'élément de construction considéré, il décrit le stockage de l'échantillon pendant la période précédant l'essai.
- **Prétraitement de l'échantillon:** Spécifique à l'élément de construction considéré, il décrit les manipulations de l'échantillon juste avant l'essai.
- **Grandeur mesurée:** Sont mesurées la masse et la vitesse du projectile. La masse est déterminée dans les deux minutes précédant le tir et la vitesse est mesurée à 300 mm de l'échantillon cible. Ces deux grandeurs servent à calculer l'énergie cinétique déployée, puis à déterminer la classe de résistance à la grêle.
- **Tolérance de mesure:** Elle est de $\pm 2\%$ pour la masse du projectile et de $\pm 1\%$ pour sa vitesse.
- **Déroulement de l'essai:** Pour tester une résistance donnée à la grêle, l'échantillon est percuté avec l'énergie cinétique correspondant à cette classe de résistance (tableau 7.1). Il est recommandé de réaliser le tir sous une énergie légèrement supérieure, afin d'atteindre avec certitude l'énergie correspondant à la limite de la classe testée. On y parvient

en choisissant une vitesse de tir conférant une énergie supérieure à cette limite. Les projectiles doivent avoir le diamètre correspondant à chaque classe de résistance à la grêle: le test relatif à la RG 1 requiert des projectiles de 10 mm de diamètre; il sera de 20 mm pour la RG 2, 30 mm pour la RG 3, 40 mm pour la RG 4 et 50 mm pour la RG 5. Si l'échantillon est endommagé lors d'un tir, un nouvel échantillon est soumis à un tir de vitesse correspondant à la limite de classe immédiatement inférieure. Si l'échantillon reste intact, le test est réitéré avec quatre autres échantillons au minimum (au moins cinq échantillons au total). Lorsque les échantillons demeurent intacts à l'issue des tirs, l'élément de construction testé est assigné à la classe de résistance à la grêle correspondante. Les points suivants doivent être respectés:

- o Les échantillons sont testés directement l'un après l'autre.
- o Un seul et même échantillon peut être soumis à plusieurs tirs dans la mesure où les modalités particulières à l'élément testé concernant le point d'impact peuvent être respectées et si l'on peut exclure toute influence défavorable due aux tirs précédents.
- o La masse des projectiles peut varier à l'intérieur de la marge de tolérance.
- o La vitesse appliquée lors du minimum de cinq tirs doit rester à l'intérieur de la plage de variation de 1 m/s, ce qui signifie que l'écart entre la vitesse minimale et la vitesse maximale ne doit pas dépasser 1 m/s.
- **Appréciation de l'essai:** L'énergie de percussion est calculée pour tous les cinq échantillons, ou davantage, et arrondie à la première décimale. Cette énergie est ajoutée entre parenthèses à la classe de résistance.
- **Fonction de l'élément** de construction: L'élément considéré assure plusieurs fonctions pouvant être affectées directement par le tir. L'énergie du projectile nécessaire pour causer un dommage dépend de l'élément de construction et de sa fonction.
- **Critère d'endommagement:** Critère définissant à partir de quel point une fonction de l'élément considéré ne peut plus être assurée; cet élément est alors endommagé en regard de cette fonction.
- **Méthode de mesure:** Manière de vérifier la fonction de l'élément considéré. S'il assure plusieurs fonctions, plusieurs méthodes de mesure sont appliquées.
- **Procès-verbal d'essai:** Document contenant des informations sur l'appareillage utilisé, l'élément de construction testé, le projectile tiré, la configuration de l'essai, son déroulement et son résultat.

7.4.2 Modalités d'essai particulières aux éléments de construction

Les modalités d'essai particulières aux éléments de construction comprennent toutes les indications complémentaires ne figurant pas dans les conditions générales d'essai. Il s'agit

de précisions concernant la nature et la taille de l'élément à tester, la configuration de l'essai, le préstockage et le prétraitement de l'échantillon (si nécessaire), le point d'impact, les fonctions de l'élément ainsi que le critère d'endommagement et la méthode de mesure correspondante.

7.5 Résultats

Les résultats obtenus en laboratoire dans le cadre du projet sectoriel «Hagelwiderstand» ont permis d'assigner les onze

enveloppes de bâtiments typiques considérées aux différentes classes de résistance à la grêle; les résultats sont synthétisés dans le tableau 7.3. Les échantillons testés ont été choisis au hasard dans une large gamme de produits. Les examens ont été réalisés en appliquant principalement la méthode proposée dans le rapport «Elementarschutzregister», qui a été finalisée au terme des tests en laboratoire. Les résultats sont des valeurs indicatives applicables aux différentes catégories d'éléments de construction. Elles varient selon l'exécution, la qualité et le fabricant.

7 Répertoire de la protection contre la grêle

Catégorie d'élément	Produit		Epaisseur [mm]	Application	Fonction	RG
Tuiles	Queue de castor (terre cuite)	sans rainure		Toit	Etanchéité	4
		Aspect	4			
	Tuile plate (terre cuite)	avec rainure		Toit	Etanchéité	4
		Aspect	4			
Volets roulants	Profil creux (métallique)		0.45	Façade	Aspect	1
	Profil creux (métallique)	métal expansé	0.25	Façade	Aspect	1
	Profil creux (métallique)	tout métal	0.9	Façade	Aspect	2
Stores à lamelles	Tôle pliée (métal)		0.45	Façade	Aspect	1
	Tôle courbée (métal)		0.6	Façade	Aspect	1
Vitrages	Verre flotté		4.0	Toit	Etanchéité	5
	Verre armé		7.0	Toit	Etanchéité	3
	Verre de sécurité trempé (VST)		6.0	Toit	Etanchéité	5
	Verre de sécurité feuilleté (VSF)		8.0	Toit	Etanchéité	5
	Verre isolant		24.0	Façade	Etanchéité	5
Tôles	Couverture	Cuivre	0.6	Toit	Aspect	1
				Façade	Aspect	2
		acier au chrome étamé	0.5	Toit	Aspect	2
				Façade	Aspect	2
		cuivre-titane-zinc	0.7	Toit	Aspect	2
				Façade	Aspect	2
	Ondulées	acier zingué	0.7	Façade	Aspect	2
Trapéz.	aluminium	0.7	Façade	Aspect	1	
Panneaux en fibres-ciment	Ondulés	non revêtus	5.5	Toit	Etanchéité	4
					Aspect	4
	Plats	revêtement transparent	6.0	Façade	Etanchéité	5
					Aspect	5
Crépi sur isolation	Crépi synthétique sur EPS			Façade	Etanchéité	3
					Aspect	3
	Crépi silicaté sur laine minérale			Façade	Etanchéité	3
					Aspect	3
	Crépi synthétique sur laine minérale			Façade	Etanchéité	4
					Aspect	4
Planches en bois	Mélèze	rabotées, non revêtues	25.0	Façade	Aspect	2
		sciées, non revêtues	25.0	Façade	Aspect	2
		rabotées, revêtues	25.0	Façade	Aspect	1
		sciées, revêtues	25.0	Façade	Aspect	2
	Epicéa	rabotées, non revêtues	25.0	Façade	Aspect	2
		sciées, non revêtues	25.0	Façade	Aspect	2
		rabotées, revêtues	25.0	Façade	Aspect	2
		sciées, revêtues	25.0	Façade	Aspect	2

Catégorie d'élément	Produit		Epaisseur [mm]	Application	Fonction	RG
Lés d'étanchéité	Chlorure de polyvinyle plastifié (PVC – P)	rigides	1.5	Toit	Etanchéité	5
		souples	1.5	Toit	Etanchéité	5
	Polyoléfine thermoplastique (TPO)	rigides	1.6	Toit	Etanchéité	5
		souples	1.6	Toit	Etanchéité	5
	Caoutchouc éthylène-propylène-diène (EPDM)	rigides	1.5	Toit	Etanchéité	5
		souples	1.5	Toit	Etanchéité	4
	Lés SBS ardoisés	rigides	5.2	Toit	Etanchéité	5
		souples	5.2	Toit	Etanchéité	4
Lés SBS sablés	rigides	3.7	Toit	Etanchéité	5	
	souples	3.7	Toit	Etanchéité	4	
Panneaux en matière synthétique	Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	panneaux normaux	4	Toit	Etanchéité	4*
					Translucidité	4*
		panneaux résilients	4	Toit	Etanchéité	5*
					Translucidité	4*
		pann. résilients SDP 16		Toit	Etanchéité	4*
					Translucidité	4*
	pann. résilients S4P 32		Toit	Etanchéité	4*	
				Translucidité	3*	
	pann. résilients WP 76/18	4	Toit	Etanchéité	4*	
			Façade	Etanchéité	3*	
	Polycarbonate (PC)	panneaux S3P 16	4	Toit	Etanchéité	5*
				Toit	Etanchéité	5*
	Polycarbonate (PC)	panneaux trapézoïdaux	1.4	Toit	Etanchéité	2*
					Aspect	1*
				Façade	Etanchéité	3*
					Aspect	1*
panneaux ondulés		1.4	Toit	Etanchéité	3*	
				Aspect	1*	
			Façade	Etanchéité	3*	
				Aspect	2*	
panneaux structurés	2.0	Toit	Aspect	2*		
			panneaux plats	5.0	Façade	Etanchéité
Aspect	3*					
Coupolés	Couches extérieure et intérieure en polyméthacrylate de méthyle (PMMA)		3.0/2.0	Toit	Etanchéité	2*
	Couche extérieure en polycarbonate (PC), couche extérieure en PMMA		3.0/2.0	Toit	Etanchéité	5*
					Aspect	3*

Tableau 7.3: Enumération des éléments de construction avec leur fonction et la classe RG à laquelle ils appartiennent.

* Cette classification est valable uniquement pour de nouveaux produits. Pour ces matériaux de construction, la résistance à la grêle diminue de façon significative en quelques années en raison du vieillissement naturel des matériaux.

8.1 Mise à jour des normes de construction

La présente étude fournit pour la première fois des données détaillées concernant l'intensité locale de la grêle en Suisse pour différentes périodes de retour. En vertu de la norme SIA 261/1, la grêle doit déjà être considérée en tant qu'action sur les ouvrages. Mais désormais, le danger dû à la grêle peut être établi avec la même précision que les dangers dus au vent ou à la neige selon la norme SIA 261. Il y a lieu d'intégrer les compléments pertinents dans la norme SIA 261/1.

Sur le moyen ou le long terme, toutes les normes sur les produits utilisés dans la construction de l'enveloppe des bâtiments devront inclure une classification tenant compte de la résistance à la grêle. D'ici là, les concepteurs et les assureurs pourront utiliser le Répertoire de la protection contre la grêle pour combler cette lacune.

8.2 Mise en œuvre du Répertoire de la protection contre la grêle

Les recherches ont révélé combien il est impératif de mettre en œuvre le «Répertoire de la protection contre la grêle» dans la pratique. Son introduction bénéficie désormais d'une base essentielle. La suite de la procédure, jusqu'au début des inscriptions au répertoire, peut s'articuler comme suit:

- déterminer l'organisation du projet «Répertoire de la protection contre la grêle»;
- discuter de prescriptions d'essai applicables aux matériaux de construction sur le modèle du projet de prévention et les soumettre à une consultation externe;
- discuter de classes de résistance à la grêle sur le modèle du projet de prévention et les adopter;
- réglementer les demandes d'inscription au répertoire des matériaux testés et la certification des matériaux proposés;
- définir le contenu et la présentation des inscriptions au répertoire, ainsi que le logiciel à utiliser.

8.3 Mesures à prendre par les établissements cantonaux

Les mesures suivantes représentent un éventail de possibilités offertes aux Etablissements cantonaux d'assurance des bâtiments (ECA) pour prévenir les dommages dus à la grêle:

- *Intensification d'échanges spécialisés entre les Etablissements cantonaux d'assurance des bâtiments concernant la pratique actuelle d'indemnisation des dommages dus à la grêle.* Le résultat de tels échanges pourrait être un guide à l'intention des estimateurs de dommages, qui se concentrerait sur les aspects esthétiques en se basant sur les critères d'estimation exposés au paragraphe 5.3. Il faut

en outre que les experts des ECA aient plus souvent l'occasion d'échanger des expériences, par exemple lors de séminaires et de cours de perfectionnement supracantonaux durant lesquels des cas concrets seraient discutés. L'objectif consisterait à mettre au point une pratique basée sur les restrictions légales, selon laquelle les dommages prévisibles et évitables moyennant un investissement raisonnable ne seraient pas indemnisés.

- *Information et sensibilisation des maîtres d'ouvrages, spécialistes du bâtiment et fabricants de matériaux de construction,* en mettant l'accent sur un mode de construction résistant aux intempéries. L'introduction du Répertoire de la protection contre la grêle pourrait donner lieu à l'organisation de manifestations spécialisées et à la diffusion de documents d'information traitant également de dangers naturels autres que les chutes de grêle, comme les pluies intenses et les tempêtes.
- *Information et sensibilisation des propriétaires et utilisateurs de bâtiments,* en mettant l'accent sur l'utilisation correcte des installations antisolaires, des volets roulants et des stores à lamelles. Cette action pourrait consister à diffuser un dépliant à large échelle. Il est aussi important de publier des comptes rendus ciblés dans les médias.
- *Conseil aux maîtres d'ouvrages.* Lors de la première estimation et des réévaluations périodiques des bâtiments, les estimateurs des ECA signalent systématiquement les conditions favorables et les possibilités d'améliorer la protection contre la grêle (et d'autres dangers naturels).
- *Action proactive des ECA en ce qui concerne les nouveaux matériaux.* Les développements dans le domaine des matériaux de construction devraient être suivis activement par l'Association des établissements cantonaux d'assurance incendie (AEAI), afin qu'elle puisse les infléchir précocement dans un sens favorable. Un thème actuel serait par exemple les revêtements nanotechniques.
- *Elargissement du Répertoire de la protection contre la grêle.* A l'avenir, le répertoire tiendra également compte du vieillissement des éléments de construction ainsi que de formes particulières sous lesquelles certains matériaux sont utilisés (p.ex. Eternit ondulé et non en panneaux), par exemple en assortissant les produits subissant un vieillissement intense de commentaires ou de directives concernant leur durée d'utilisation. Le Répertoire de la protection contre la grêle inclura aussi des peintures, laques, vernis et autres revêtements. Il sera harmonisé avec des registres et dispositions comparables concernant d'autres dommages dus aux éléments naturels.
- *Certificat de «construction résistant aux intempéries».* Les ECA favorisent l'introduction d'un certificat de «construc-

tion résistant aux intempéries» (titre de travail), qui pourrait être obtenu par les architectes, les entreprises générales et les ingénieurs civils.

8.4 Investigations complémentaires

Il est très important de savoir comment les matériaux de construction vieillissent et pendant combien de temps ils offrent une résistance suffisante à la grêle. Mais ces questions n'ont pas pu être traitées de manière suffisamment approfondie dans le cadre du présent projet. Des recherches complémentaires doivent être entreprises. Elles pourront bénéficier partiellement d'anciennes études de l'Empa à Dübendorf. Il faut également réaliser des tests complémentaires pour déterminer les conditions d'essai applicables à d'autres matériaux de construction.

Les sociétés d'assurance devraient poursuivre systématiquement le monitoring des tempêtes de grêle par radar et leur interprétation, pour pouvoir dresser des cartes détaillées et percevoir des modifications sur le moyen terme.

Angle de tir: Angle entre la direction du tir et le plan de l'échantillon. Il est de 90° pour les éléments de construction utilisés pour la toiture et de 45° pour les éléments appliqués sur les façades.

Cassure blanche: Les actions mécaniques exercées sur les matières synthétiques y génèrent des tensions internes. La translucidité est altérée dans le cas des matériaux transparents et la surface est éclaircie dans le cas des matériaux colorés.

Catégorie d'élément de construction: Les éléments de construction sont regroupés en catégories. La catégorie «vitrage» comprend par exemple les éléments «verre armé», «verre flotté», «verre de sécurité trempé» (VST), «verre de sécurité feuilleté» (VSF) et «verre isolant».

Classe de dommages: Classification permettant de répertorier systématiquement les dommages subis par les éléments de construction du fait de la grêle. On distingue les dommages à la surface, à la forme et à la structure. Les classes de dommages sont subdivisées en types de dommages. Elles ne permettent de tirer aucune conclusion sur la classe de résistance à la grêle.

Classe de résistance à la grêle: Classification déterminée par l'énergie cinétique des grêlons percutant des éléments de construction. La première classe de résistance à la grêle (RG 1) correspond à l'énergie d'un grêlon rond de 10 mm de diamètre. La classification va jusqu'à la classe RG 5, qui correspond à un grêlon de 50 mm de diamètre.

Critère d'endommagement: Critère définissant à partir de quel point une fonction de l'élément considéré ne peut plus être assurée; cet élément est alors endommagé en regard de cette fonction.

Direction du tir: Déterminée par la configuration de l'appareillage d'essai, la direction du tir peut être choisie de manière quelconque; elle est verticale pour les essais effectués dans le cadre de ce projet.

Élément de construction: Élément d'enveloppe de bâtiment, composé d'un ou plusieurs matériaux.

Façade: La façade comprend tous les éléments de bâtiments verticaux à $\pm 10^\circ$ près.

Fonction de l'élément de construction: Un élément de construction assure une ou plusieurs fonctions, telles qu'étanchéité ou assombrissement. Ces fonctions doivent être définies pour chaque élément.

Nominal: D'après les données du fabricant.

Point d'impact: Lieu où le projectile percute l'élément de construction testé. Dans l'essai normalisé, le point d'impact dépend de l'élément de construction et de son usage.

Radar météorologique: Emission dans l'atmosphère, sous la forme de brèves impulsions très énergétiques, d'un rayonnement électromagnétique de longueur d'onde valant 1 à 10 cm.

Série de tirs: Plusieurs points d'impact alignés, généralement distants entre eux de 150 mm au moins et distants du bord de l'élément testé de 75 mm au moins.

Toit: Le toit comprend tous les éléments de bâtiments disposés horizontalement ou en position redressée jusqu'à un angle $< 80^\circ$.

Travail d'endommagement (w_s): Energie cinétique (joules) sous laquelle un premier dommage apparaît, calculée selon la formule $E_{\text{cin}} = mv^2/2$, avec m = masse et v = vitesse.

Type de dommages: Subdivision d'une classe de dommages. La classe «dommages à la forme» comprend par exemple les types de dommages «bosses» (F 1) et «déformations» (F 2). Le type de dommages ne permet de tirer aucune conclusion sur la classe de résistance à la grêle.

Vitesse d'endommagement (v_s): Vitesse (m/s) à laquelle un premier dommage apparaît.

Vitesse d'impact: Vitesse d'un grêlon lors de l'impact.

10.1 Rapports sectoriels intégrés dans le présent rapport de synthèse

Teilprojekt «Hagelstürme in der Schweiz: Wiederkehrperioden von schadenbringenden Hagelkorngrossen – eine Abschätzung», Dr. Hans-Heinrich Schiesser, Zürich, 2006

Teilprojekt «Hagelwiderstand der Gebäudehülle, Archivdaten der Empa 1970–2005», P. Flüeler, A. Staudenmaier, Empa Dübendorf, 2005

Teilprojekt «Hagelwiderstand der Gebäudehülle, experimentelle Ermittlung des Hagelwiderstandes», P. Flüeler, M. Stucki, Empa Dübendorf, 2007

Teilprojekt «Schadenpotenziale», Dr. A. Eckhardt Scheck, P. Wörndle, M. Leonarz, P. Lattmann, Basler & Hofmann AG, Zürich, 2007

Teilprojekt «Elementarschutzregister», Dr. P. Vanomsen, Dr. Th. Egli, Egli Engineering, St. Gallen, 2007

