



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

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

Risikokzept für Naturgefahren - Leitfaden

## **TEIL B:**

### **ANWENDUNG DES RISIKOKONZEPTS: PROZESS STURM**

Dörte Aller, Thomas Egli, Daniel Rüttimann, Maja Stucki



Villargiroud (Egli Engineering)

Dieser Teilbericht ist integraler Bestandteil des Gesamtberichtes bestehend aus:

Teil A: Allgemeine Darstellung des Risikokonzepts

Teil B: Anwendung des Risikokonzepts

Prozess Lawine

Prozess Hochwasser

Prozess Murgang

Prozess Sturz

Prozess spontane Rutschung / Hangmuren

Prozess permanente Rutschung

Prozess Erdbeben

Prozess Sturm

Prozess Hagel

Prozess Hitzewelle



# Kapitel 1

## Einleitung

Im folgenden Kapitel wird die Vorgehensweise einer Risikobeurteilung und Massnahmenplanung für Schutzprojekte gegen Sturm anhand des Risikokonzepts vorgestellt. Dabei werden die methodischen Arbeitsschritte Risikoanalyse, Risikobewertung, Massnahmenplanung und Massnahmenbewertung durchlaufen und in ihrer praktischen Umsetzung für Schutzprojekte vorgestellt. Die Kenntnis des gesamten Risikokonzeptes, wie es im Teil A dieser Publikation vorgestellt wurde, wird dabei vorausgesetzt (Kapitel 1, Seite 1ff). Da es sich beim Prozess Sturm um einen flächigen Prozess handelt und die Annahmen und Grundlagen sich von den bei gravitativen Prozessen unterscheidet, wird auf die Eigenheiten etwas ausführlicher eingegangen. Dieses Kapitel erhebt – anders als bei den gravitativen Naturgefahren – nicht den Anspruch auf eine vollständige Darstellung eines Fallbeispiels. Vielmehr wird der Schwerpunkt auf die Darstellung der methodischen Schritte gelegt. Die möglichen Zielgruppen für Abklärungen zum Sturmrisiko sind Gebäudeeigentümer, Planer, Versicherungen, Waldbesitzer, Betreibern von Freileitungen, Verkehrswegen/Brücken und hohen Schornsteinen.

Dieses Kapitel wird in die folgenden Abschnitte unterteilt:

- In einem einleitenden Abschnitt wird der Prozess Sturm charakterisiert;
- In einem zweiten Abschnitt werden bestimmte Eigenheiten bei den Schritten Risikoanalyse, Risikobewertung und Massnahmenplanung bzw. -bewertung beschrieben;
- Im dritten Abschnitt wird kurz ein Fallbeispiel vorgestellt;
- Im letzten Abschnitt wird ein Fazit zur Anwendung des Risikokonzepts aus praktischer Sicht gezogen.

### 1.1 Charakterisierung des Prozesses Sturm

Sturm ist eine atmosphärisch bedingte Luftbewegung von ausserordentlicher Heftigkeit. Schäden an Gebäuden werden durch die kurzzeitigen (wenige Sekunden dauernden) Böenspitzen verursacht (Abbildung 1.1). Die Einwirkung ist umso stärker, je grösser die Geschwindigkeit dieser Böenspitzen ausfällt und je besser die Eigenfrequenz des Gebäudes mit dem energiereichen Frequenzinhalt des Windes übereinstimmt. Es sind vor allem die Sogkräfte, welche die Ursache von



(a)

(b)

Abbildung 1.1: Stürme können sowohl Gebäude als auch Fahrzeuge auf Verkehrswegen beschädigen. Foto: C. Häflinger, Büren (a), Krisenstab Frutigen (b).

Schäden an Gebäuden darstellen. Der Anprall von fliegenden Trümmerteilen und umstürzende Bäume stellen weitere Einwirkungsarten bei Sturm dar.

In der Schweiz lassen sich folgende Ausprägungen von Sturm unterscheiden:

- Winterstürme: Ausdehnung von 1'000 bis 1'500 km; Böenspitzen von 39 – 56 m/s (140 – 200 km/h), auf Bergen höher;
- Gewitter: kleinräumige Ausdehnung, aber fortschreitend; begleitet von Sturmböen und Fallwinden (Downburst);
- Föhnstürme: heftiger Fallwind in sogenannten Föhntälern; Böenspitzen wie bei Winterstürmen;
- Tornados: sehr lokal, im Extremfall 140 m/s (500 km/h).

## 1.2 Risikoanalyse beim Prozess Sturm

s.a. Teil A, S. 9ff

### 1.2.1 Gefahrenanalyse

#### 1.2.1.1 Ereignisanalyse

Als Grundlage für die Ereignisanalyse bei Stürmen können die folgenden Informationsquellen dienen:

- Historische Daten (z.B. Messreihen, Ereignisberichte, historische Dokumente / Literatur);

- Geländeanalysen (z.B. Talverlauf, Geländeform und -rauigkeit, die den Wind beeinflussen);
- Klimatische Gegebenheiten (z.B. Windregime);
- Lokale Erfahrungen;
- Umgebungsanalysen: Beeinflussung durch andere Objekte, z.B. Tunneleffekte in Strassenzügen, Luv- und Leeeffekte bei Hochhäusern;
- Auf theoretische Grundlagen und allgemeine Erfahrungen gestützte Überlegungen zum Ausmass von Ereignissen;
- Einfluss des betrachteten Objekts auf andere Objekte, z.B. andere Gebäude oder Fussgänger vor einem Gebäude.

Im Gegensatz zu den räumlich klar definierbaren Prozessen, wie z.B. Lawinen oder Hochwasser, können Stürme überall auftreten; es gibt daher keine bekannten Ereignisräume. Grundsätzlich können alle Objekte in der Schweiz betroffen sein. Lokale Einflüsse können die Intensität verstärken oder auch vermindern.

Im Folgenden werden die wichtigsten Grundlagen für die Ereignisanalyse bei Stürmen vorgestellt. Die erwähnten Grundlagen erheben nicht den Anspruch der Vollständigkeit; sie müssen im Einzelfall durch Expertenwissen ergänzt werden.

**Historische Daten:** Die Ereignisdokumentation ist das wichtigste Instrument zur Analyse vergangener Ereignisse. Extremereignisse spielen hier ebenfalls eine massgebende Rolle um sich einen Überblick über die Gefahrensituation durch Stürme im Projektperimeter zu verschaffen.

**Geländeanalyse:** Die Geländeanalyse erfolgt durch eine Begehung, gegebenenfalls wird ein Windingenieur hinzugezogen oder sogar Windkanalexperimente durchgeführt. Spezielle Gegebenheiten, wie z.B. Ausrichtung von Talverläufen und eventuelle Verstärkungseffekte (z.B. Strassenzug- oder Föhneffekt) sind hier zu berücksichtigen.

**Klimatische Gegebenheiten:** Wesentliche Grössen für die Beurteilung der klimatischen Gegebenheiten sind die Hauptwindrichtung, die Windgeschwindigkeit und evtl. die Dauer. Statistische Analysen und Extrapolationen von Messdaten können helfen, potentielle Ereignisse zu definieren. Die Windgeschwindigkeit wird in 10-Minuten-Mittel oder in maximalen Böen angegeben. Die Böen stellen eine besondere Belastung für Objekte dar. Die kurzzeitige Windgeschwindigkeitsspitze kann Schwingungen und zyklische Beanspruchung verursachen.

**Lokale Erfahrungen und Expertenabschätzungen:** Für die Beurteilung von Sturmprozessen sind der Einbezug von Erfahrungen der lokalen Bevölkerung wie auch von Experten sowie auf theoretische und allgemeine Erfahrungen gestützte Überlegungen sehr hilfreich.

Diese Grundlagen werden dazu verwendet die massgebenden Szenarien festzulegen. Die Festlegung der Szenarien hat immer mit in Absprache mit dem Auftraggeber und in Übereinstimmung mit der Zielsetzung der Beurteilung zu erfolgen.

### 1.2.1.2 Wirkungsanalyse

In der Wirkungsanalyse werden die zu erwartenden Intensitäten durch die Verwendung von statistischen oder physikalischen Simulationsmodellen abgeschätzt.

Mit statistischen Verfahren können sowohl räumliche Interpolationen als auch Extrapolationen von Datenreihen erstellt werden. Dies sollte jedoch nur mit Experten (aus dem Bereich Statistik und Meteorologie) vorgenommen werden.

Für den Prozess Sturm sind verschiedene Simulationsmodelle verfügbar:

- Regionale Klimamodelle (Auflösung mehrere 10-Kilometer);
- Wettervorhersagemodelle (Auflösung mehrere Kilometer);
- Lokale Strömungsmodelle (Auflösung rund 1 km);
- Windtunnel-Experimente bzw. deren digitales Pendant.

Es ist zu beachten, dass die Detaillierung der Modelle mit dem gewünschten Zielmassstab übereinstimmt. Für die Wirkungsanalyse von Stürmen sind die folgenden Eingangsdaten zu berücksichtigen:

- Windrichtung;
- Windgeschwindigkeit (mittlerer Wind, Böen);
- Gegebenenfalls Dauer und Verlauf.

Die Kenntnis der Prozesse ist eine notwendige Voraussetzung für die richtige Auswahl der Modelle. Bei der Anwendung dieser Modelle ist die Kenntnis des Modellverhaltens, der massgebenden Parameter und ihrer Sensitivität sowie entsprechende Erfahrung in der Anwendung ebenfalls als Grundlage vorzusetzen.

In der Wirkungsanalyse wird die Intensität der als massgebend betrachteten Szenarien bestimmt. Für Stürme wird die Intensität über Windgeschwindigkeit – maximales 10-Minuten-Mittel oder maximale Böe (wenige Sekunden) definiert. Als Grundlage für die spätere Bestimmung der Schadenwirkungen wird in Anlehnung an bestehende Methoden die Intensität als Windstärke festgelegt:

**Einteilung der Intensitäten nach der Beaufort–Skala:** Die Windstärke wird am häufigsten nach der Skala von Admiral Beaufort (Beaufort 1806) eingestuft. Die für die Einteilung massgebenden Geschwindigkeiten entsprechen mittleren Windgeschwindigkeiten (10 Minutenmittel) und nicht Böenspitzen! Die Skala ist unterteilt nach 13 Stufen gemäss Tabelle 1.1. Windgeschwindigkeiten über 32.8 m/s (118 km/h) werden der höchsten Skalenstufe zugeordnet. Als Sturm gilt eine wetterbedingte Luftbewegung von mindestens Windstärke 9 nach Beaufort ( $\geq 21$  m/s (75 km/h) Windgeschwindigkeit).

Böen erreichen im Mittelland resp. Alpenvorland Werte über 42 m/s (150 km/h) und in Kammlagen des Alpenraums Werte über 70 m/s (250 km/h). Aus diesem Grund ist in der Konsequenzenanalyse zusätzlich die Torro Sturmwind Skala für Mitteleuropa wiedergegeben, welche die möglichen Schadenwirkungen in einem Bereich von 21 bis 139 m/s (75 bis 500 km/h) beschreibt.

Tabelle 1.1: Intensitäten nach der Beaufort-Windskala.

v [km/h]	v [m/s]	Skala	Bezeichnung	Merkmale
0 - 1	0 – 0.2	0	Windstille	Keine Luftbewegung
1 - 5	0.3 – 1.5	1	Leiser Zug	Windrichtung nur an ziehendem Rauch erkennbar
6 – 11	1.6 – 3.3	2	Leichte Brise	Wind im Gesicht fühlbar
12 - 19	3.4 – 5.4	3	Schwacher Wind	Blätter werden bewegt, leichte Wimpel gestreckt
20 – 28	5.5 – 7.9	4	Mässiger Wind	Kleine Zweige werden bewegt, schwere Wimpel gestreckt
29 – 38	8.0 – 10.7	5	Frischer Wind	Grössere Zweige werden bewegt, Wind im Gesicht schon unangenehm
39 – 49	10.8 – 13.8	6	Starker Wind	Grosse Zweige werden bewegt, Wind singt in der Takelage
50 – 61	13.9 – 17.1	7	Steifer Wind	Schwächere Bäume werden bewegt, fühlbare Hemmung beim Gehen gegen den Wind
62 – 74	17.2 – 20.7	8	Stürmischer Wind	Grosse Bäume werden bewegt, Zweige abgebrochen, beim Gehen erhebliche Behinderung
75 – 88	20.8 – 24.4	9	Sturm	Leichtere Gegenstände werden aus ihrer Lage gebracht, Dachziegel an exponierten Stellen können sich lockern
89 – 102	24.5 – 28.4	10	Schwerer Sturm	Gartenmöbel und leichtere Gegenstände werden umgeworfen, Windbruch an Bäumen
103 – 117	28.5 – 32.6	11	Orkanartiger Sturm	Leichte Schäden an Dachziegeln und Verblechungen, geringe Schäden an Leichtbauten
≥ 118	> 32.7	12	Orkan	Schwere Verwüstungen

**Einteilung nach Windstärkeklassen des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz):** Tabelle 1.2 veranschaulicht die Windstärkeklassen, wie diese bei Warnungen durch MeteoSchweiz verwendet werden. Diese Windstärkeklassen stellen die Zusammenhänge zwischen mittlerer Windgeschwindigkeit und Böen dar.

Die Ergebnisse der Ereignis- und Wirkungsanalyse werden kartographisch dargestellt. Als Resultat der Gefahrenanalyse erhält man somit Intensitätskarten für den Prozess Sturm. Diese Karten stellen die Voraussetzung für die weitere Risikobetrachtung, genauer für die Expositionsanalyse dar (siehe Abschnitt 1.2.2).

Tabelle 1.2: Windstärkeklassen der MeteoSchweiz.

Windstärke	Windart	v [km/h]	v [m/s]	Beaufortskala
schwach	Mittlerer Wind	$\leq 14$	$\leq 3.9$	ca. 1 – 2
	Böenspitzen	$\leq 26$	$\leq 7.2$	
mässig	Mittlerer Wind	14 – 28	3.9 – 8.1	ca. 3 – 4
	Böenspitzen	26 – 49	7.2 – 13.6	
stark	Mittlerer Wind	29 – 55	8.1 – 15.3	ca. 5 – 7
	Böenspitzen	50 – 89	13.9 – 24.7	
stürmisch	Mittlerer Wind	56 – 96	15.6 – 26.7	ca. 8 – 10
	Böenspitzen	90 – 149	25.0 – 41.4	
orkanartig	Mittlerer Wind	$> 96$	$> 26.7$	ca. 11 – 12
	Böenspitzen	$> 149$	$> 41.7$	

Die Grundlage der Windbemessung von Gebäuden bildet der Referenzstaudruck. Dieser kann der Karte in der SIA Norm 261 (2003), Anhang E entnommen werden und beruht sowohl auf Böen- und Richtungsmessungen (Messreihen von 20 bis 25 Jahren) als auch auf numerischen Simulationen historischer Ereignisse. Der Referenzstaudruck ist für die Geländekategorie freies Feld in 10 Metern Höhe angegeben. Die Wiederkehrperiode von 50 Jahren wurde in Anlehnung an die Euro-norm gewählt. Zusammen mit dem Lastbeiwert von 1.5 entspricht dies einer Wiederkehrperiode von 150 Jahren.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist der Unsicherheit entsprechend Rechnung zu tragen (siehe auch SIA Dokumentation D 0188 Wind, 2006).

Abbildung 1.2 ist der Norm SIA 261 entnommen und stellt den Referenzwert des Staudrucks dar.



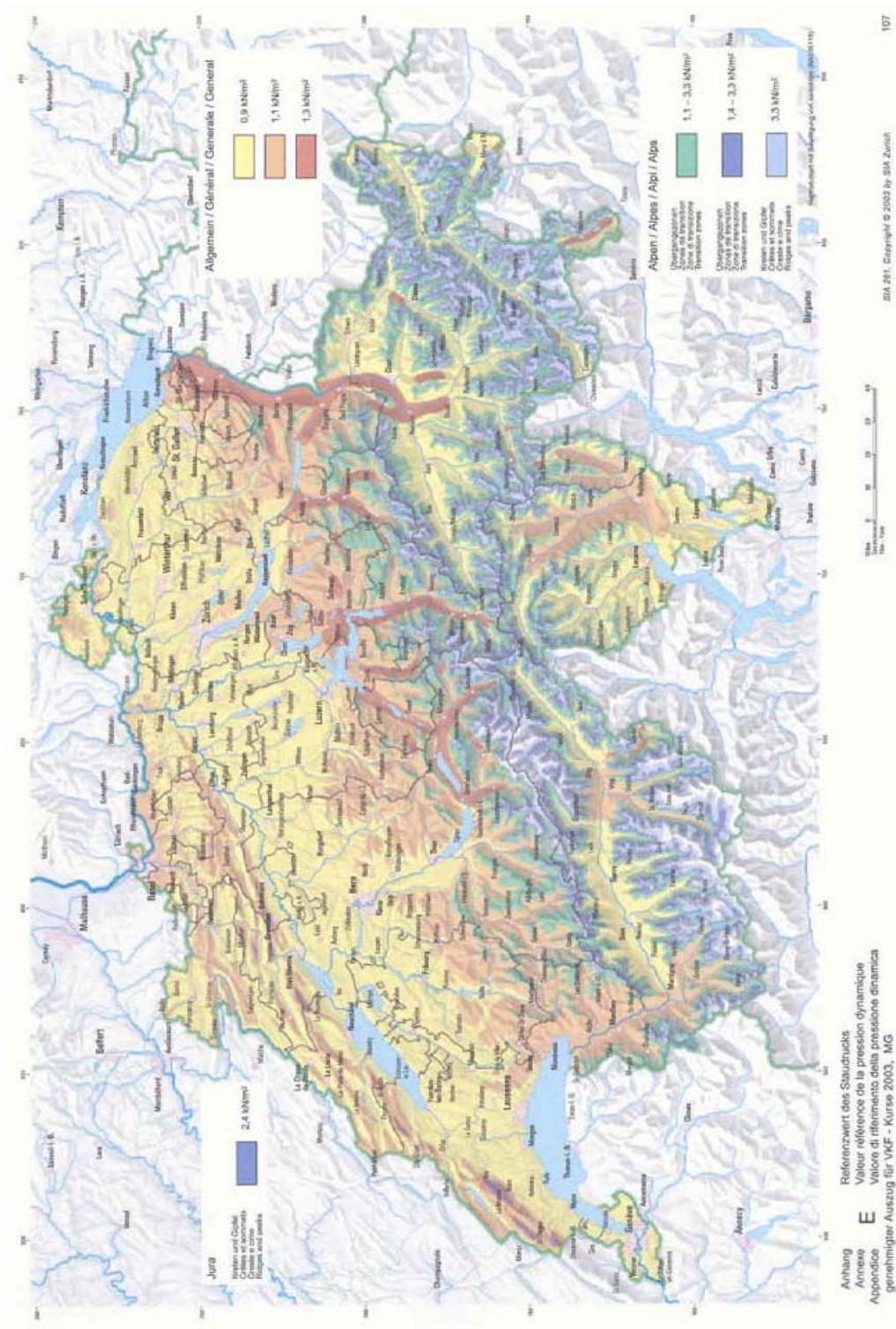


Abbildung 1.2: Referenzwert des Staudrucks. Quelle: SIA 261.

## 1.2.2 Expositionsanalyse

Stürme können mit ihrer Zerstörungskraft Gebäude (z.B. Wohngebäude, Industriegebäude, Hotel, Schule, Bahnhof, Spital, etc.), Sonderobjekte (z.B. Hochhaus) aber auch Flächenobjekte, wie landwirtschaftliche Flächen, Grünanlagen, Wald beschädigen oder zerstören. Dabei können auch Personen in Gebäuden, auf Verkehrswegen oder im Freien gefährdet sein.

In Bezug auf **Gebäude und Infrastruktur** sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

**Lage der Gebäude und Infrastrukturanlagen:** Der Wind wird im ebenen Gelände durch die Reibung an der Erdoberfläche gebremst. Die Rauigkeit der Geländeoberfläche beeinflusst die Bremswirkung und das Mass der Turbulenz. Die Geländekategorien (Seeufer, freies Feld, Ortschaften, grossflächige Stadtgebiete, etc.) und ihr Einflussfaktor sind in der SIA-Norm 261 (2003) angegeben. Gebäude an Kuppen- und Kamm-Lagen sowie im Gebirge sind laut SIA Norm 261 (2003) speziell zu berücksichtigen.

**Art und Nutzung der Gebäude und Infrastrukturanlagen:** Die Art der Gebäude kann entweder mit Hilfe vorhandener Datensätze oder mit Hilfe von Informationen der Gebäudeversicherungen erhoben oder aber im Feld bestimmt werden. Es ist zu bestimmen, wie ein Gebäude genutzt wird (z.B. Wohnnutzung). Angaben über Art und Nutzung von Infrastrukturanlagen sind über die Gemeinde oder kantonale Behörden erhältlich.

**Konstruktion der Gebäude:** Diese Daten sollen einen Rückschluss auf die Verletzlichkeit der Gebäudestruktur (Tragwerk und Gebäudehülle) und des Gebäudeinhalts erlauben. Die Erhebung dieser Daten stellt oft die grösste Schwierigkeit bei der Expositionsanalyse dar. Diese Informationen liegen in der Regel nicht vor. Vorhandene Daten bei Gebäudeversicherungen können das Schadenausmass eingrenzen. Die konkrete Frage der Verletzlichkeit kann nur aufgrund von Bauakten (Ausführungspläne, Statische Nachweise) beurteilt werden. Liegen diese Bauakten nicht vor, ist eine Einzelerhebung im Feld notwendig. Diese kann jedoch die Verletzlichkeit nur grob eingrenzen.

**Wert der Gebäude und des Gebäudeinhalts sowie der Infrastrukturanlagen:** Als Gebäudewerte wurden im Rahmen von Vereinheitlichungen (EconoMe) Pauschalwerte definiert, die für diese Zwecke genutzt werden können. Denn nur in seltenen Fällen kann auf konkrete Gebäudewerte z.B. vom Grundbuchamt oder von der Versicherung zurückgegriffen werden (Datenschutz).

**Personen** sind bei Sturm insbesondere auf Verkehrsachsen und im Freien durch umstürzende Bäume und weggerissene Teile (Trümmeranprall) gefährdet. Die Identifikation dieser Objekte richtet sich nach statistischen Daten (z.B. durchschnittlicher täglicher Verkehr auf einer Verkehrsachse) und nach Schätzungen (z.B. Anzahl Spaziergänger auf Waldweg bei Sturm).

In einigen Fällen sind auch andere, **nicht ortsfeste Objekte** im untersuchten Gebiet vorhanden, deren Präsenz sich über die Zeit ändern kann. Dazu zählen z.B. Nutztiere, Fahrzeuge und andere Güter. Der Aufenthaltsort und die Anzahl von anwesenden (Nutz-)Tieren und Objekten müssen bestimmt werden. Tiere können sich dabei in Gebäuden (Ställe), aber auch im Freien aufhalten.

### 1.2.3 Konsequenzenanalyse

Die Schadenempfindlichkeit durch Sturm kann anhand der für Mitteleuropa angepassten Sturmschaden Skala (Fujita- und Torro-Skala) abgeschätzt werden<sup>1</sup>. Die Böen werden zu den Schadenfolgen in Beziehung gesetzt. Anhand dieser Skala (Tabelle 1.3) können die Schadenfolgen von Stürmen abgeschätzt werden. Bei der angegebenen Windgeschwindigkeiten handelt es sich um Böen.

Tabelle 1.3: Sturmschadenskala (Fujita- und Torro-Skala).

v [km/h]	v [m/s]	Skala	Merkmale
76 ± 14	17 – 25	T0	Schadensatz: $S_{leicht} = 0.05 \%$ , $S_{massiv} = 0.01 \%$ Leichte Gegenstände werden vom Boden abgehoben. Äste beginnen abzubrechen, in Getreidefeldern ist der Zugweg erkennbar. Baugerüste können umstürzen, leichte Schäden an Markisen und Zelten. Dachziegel an exponierten Stellen können sich lockern. Keine Schäden an Gebäudeträgwerken.
104 ± 14	25 – 33	T1	Schadensatz: $S_{leicht} = 0.10 \%$ , $S_{massiv} = 0.05 \%$ Gartenmöbel und leichtere Gegenstände werden umgeworfen und können durch die Luft gewirbelt werden. Holzzäune werden umgeworfen. Windbruch an Bäumen. Leichte Schäden an Dachziegeln und Verblechungen. Geringe Schäden an Leichtbauten; keine strukturellen Schäden.
135 ± 16	33 – 42	T2	Schadensatz: $S_{leicht} = 0.25 \%$ , $S_{massiv} = 0.10 \%$ Auch schwerere Gegenstände werden vom Boden aufgehoben und können zu gefährlichen Geschossen werden. Fahrzeuge und Anhänger können umgeworfen werden. Ziegel- und ungesicherte Flachdächer werden teilweise abgedeckt. Geringe bis mittelschwere Schäden an Leichtbauten; erste Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten möglich. An Bäumen werden einzelne starke Äste abgebrochen oder geknickt, kleine Bäume entwurzelt.
167 ± 16	42 – 51	T3	Schadensatz: $S_{leicht} = 0.80 \%$ , $S_{massiv} = 0.25 \%$ Einzelne grössere Bäume werden entwurzelt. Zahlreiche Fahrzeuge und Anhänger werden umgeworfen. Ziegel- und ungesicherte Flachdächer erleiden grössere Schäden. Mittelschwere Schäden an Leichtbauten; einzelne Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten. Fahrende Autos werden von der Strasse gedrückt.

<sup>1</sup>Dotzek et al., 2000. Die Bedeutung von Johannes P. Letzmanns «Richtlinien zur Erforschung von Tromben, Tornados, Wasserhosen und Kleintromben» für die heutige Tornadoforschung. Meteorologische Zeitschrift, 9, 165 - 174

Tabelle 1.3: Sturmschadenskala (Fujita- und Torro-Skala). ... Fortsetzung ...

<b>v [km/h]</b>	<b>v [m/s]</b>	<b>Skala</b>	<b>Merkmale</b>
202 ± 18	51 – 61	T4	Schadensatz: $S_{leicht} = 3 \%$ , $S_{massiv} = 0.80 \%$ Schwerer Windbruch an freistehenden Bäumen und in Wäldern. Grosse Schäden an Fahrzeugen und Anhängern. Hohe Gefährdung und Schäden durch herumfliegende Teile. Ganze Dächer werden abgedeckt. Schwere Schäden an Leichtbauten; zunehmend Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten, Einsturz von Giebelwänden möglich.
238 ± 18	61 – 71	T5	Schadensatz: $S_{leicht} = 10 \%$ , $S_{massiv} = 3 \%$ Schwere Schäden an Dächern und Anbauten. Schwere Schäden an Leichtbauten; weiter zunehmende Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten. Vollständiger Einsturz einzelner Gebäude, vor allem landwirtschaftlich genutzter Konstruktionen und Lagerhallen. Kraftfahrzeuge werden hochgehoben.
275 ± 20	71 – 82	T6	Schadensatz: $S_{leicht} = 30 \%$ , $S_{massiv} = 10 \%$ Leichtbauten werden in grösserem Umfang zerstört. Schwere Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten. Einsturz einzelner Gebäude. Schwere Kraftfahrzeuge werden hochgehoben.
315 ± 20	82 – 93	T7	Schadensatz: $S_{leicht} = 90 \%$ , $S_{massiv} = 30 \%$ Verbreitet völlige Zerstörung von Leichtbauten und schwere Schäden an Massivbauten. Einsturz zahlreicher Gebäude. Deutliche Entrindung stehen bleibender Bäume durch umherfliegende Trümmer.
356 ± 22	93 – 105	T8	Schadensatz: $S_{leicht} = 100 \%$ , $S_{massiv} = 60 \%$ Schwere Schäden an Massivbauten. Verbreiteter Einsturz von Gebäuden, deren Einrichtung weit verstreut wird. Kraftfahrzeuge werden über grosse Strecken geschleudert.
400 ± 22	105 – 117	T9	Schadensatz: $S_{leicht} = 100 \%$ , $S_{massiv} = 80 \%$ Überwiegend Totalschäden an Massivbauten. Züge werden von den Schienen gerissen. Totale Entrindung stehengebliebener Baumstämme.
445 ± 23	117 – 130	T10	Schadensatz: $S_{leicht} = 100 \%$ , $S_{massiv} = 90 \%$ Überwiegend Totalschäden an Massivbauten.
491 ± 23	130 - 143	T11	Schadensatz: $S_{leicht} = 100 \%$ , $S_{massiv} = 95 \%$ Überwiegend Totalschäden an Massivbauten. Unvorstellbare Schäden entstehen.

**Schadenempfindlichkeitswerte** für Personen und Sachwerte auf Verkehrsachsen, für Personen und Sachwerte entlang Bahnlinien und für andere Infrastruktureinrichtungen fehlen und müssen im Einzelfall abgeschätzt werden. Ebenso wenig Angaben sind für Flächenobjekte, wie landwirtschaftliche Flächen, Wald und Grünflächen vorhanden. Eine Schadenfolgeneinstufung für Holzgewächse in Bezug auf die Torro-Skala findet sich in Hubrig (2002)<sup>2</sup>. Die anderen Werte müssen basierend auf Erfahrungswerten abgeschätzt werden.

Die **räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit** muss im Einzelfall abgeschätzt werden. Es sind keine generellen Werte vorhanden.

## 1.3 Risikobewertung

*s.a. Teil A, S. 39ff*

Da beim Prozess Sturm Personen und Sachwerte betroffen sein können, müssen die Personen- und die Sachwerte bewertet werden. Bei den Personen sind jeweils die kollektiven und die individuellen Risiken zu bewerten.

## 1.4 Massnahmenplanung und Massnahmenbewertung

*s.a. Teil A, S. 49ff.*

Beim Neubau wird die Schadenempfindlichkeit durch Sturm durch folgende Planungskriterien beeinflusst:

- Gebäudestandort
- Gebäudehöhe
- Gebäudeausrichtung
- Gebäudeform
- Dachform

### 1.4.1 Mögliche Massnahmen

Es stehen zwei Arten von Massnahmen zur Verfügung: (i) Verstärkungsmassnahmen und (ii) Abschirmungen.

#### 1.4.1.1 Verstärkungsmassnahmen

Bestehende Gebäude können durch folgende Massnahmen geschützt werden:

---

<sup>2</sup>Hubrig, M. 2002. Tornado- und Downburstschadenskala für Holzgewächse, basierend auf der Skalierung nach TORRO angepasst für Mitteleuropa (TorDACH). In: Zweites Forum Katastrophenvorsorge, Extreme Naturereignisse - Folgen, Vorsorge, Werkzeuge, Leipzig.

- Tragwerksverstärkungen
- Dachverstärkungen
- Fassadenverstärkungen
- Verstärkungen von Öffnungen

#### **1.4.1.2 Abschirmungen**

Folgende Massnahmen reduzieren die Wirkung des Windes auf Gebäude:

- Dachverschalungen
- Verschalung von Öffnungen

#### **1.4.2 Bestimmen der Wirksamkeit**

Die Schutzmassnahmen verhindern, dass Teile der Gebäudehülle weggerissen werden oder selbst das ganze Bauwerk einen Kollaps erleidet. Die Bemessungsgrösse wird durch SIA 261 vorgegeben.

Zur Planung der Schutzmassnahmen sind die globalen und die lokalen Druck- und Sogkräfte, welche auf das Gebäude einwirken, als Eingangsgrössen zu ermitteln.

Die Beurteilung der Wirksamkeit erfolgt fallspezifisch. Es ist kein generelles Vorgehen bekannt.

#### **1.4.3 Berechnen der Kosten**

Aufgrund der Massnahmenvorschläge können deren Kosten abgeschätzt werden. Dabei sind nicht primär die reinen Investitionskosten ausschlaggebend, sondern die darauf basierenden jährlichen Kosten. Diese setzen sich aus den Abschreibungen der Investitionskosten sowie den Kosten für Betrieb und Unterhalt zusammen. In Teil A wird das Vorgehen zur Berechnung der jährlichen Kosten von Massnahmen erläutert (Formel 5.1, Abschnitt 5.6, Seite 57ff).

#### **1.4.4 Ermitteln optimaler Massnahmenkombinationen**

Eine nach ökonomischen Kriterien optimale Massnahme wird nach der Methode des Grenzkostenansatzes bestimmt. Dazu werden mehrere Massnahmen bezüglich ihrer Kostenwirksamkeit miteinander verglichen und die jeweils kostenwirksamsten Massnahmen werden aufeinander aufbauend definiert. Dies bedeutet, dass jede weitere Massnahme auf der vorherigen Massnahme aufbauen muss. Anhand der Risikoreduktion und der zugehörigen Kosten kann die gewählte Massnahmenkombination in ein Risiko-Kosten-Diagramm eingetragen werden. Werden jeweils nur die kostenwirksamsten Massnahmen ausgewählt, dann kommen die Punkte im Diagramm auf einer Kurve zu liegen, die als untere Begrenzung aller möglichen Massnahmen im Risiko-Kosten-Diagramm definiert ist (siehe auch Teil A, Abbildung 5.2, Seite 60). Der Redundanz von verschiedenen Massnahmen ist dabei die nötige Beachtung zu schenken.

Ist die Ausscheidung einer Variante gemäss dem Grenzkostenansatz nicht möglich (z.B. zu wenige Massnahmen, Kombination nicht möglich), dann wird das Nutzen-Kosten-Verhältnis einer Massnahme oder einer Massnahmenkombination bestimmt. Die Beurteilung nach Kostenwirksamkeit sollte jedoch der Beurteilung nach Grenzkostenansatz nachgeordnet sein, da sie nicht zwangsläufig zur ökonomisch optimalen Massnahme führt.

#### **1.4.5 Bewertung von Massnahmen**

Wird die Massnahmenoptimierung nach dem Grenzkostenkriterium vorgenommen, stellt sich die optimale Massnahme als der Punkt auf der Risiko-Kosten-Kurve dar, bei dem eine Tangente mit Steigung -1 (bei gleichen Einheiten auf beiden Achsen), die Kurve berührt.

Wird die Effizienz nicht nach dem Grenzkostenprinzip sondern nach dem Nutzen-Kosten-Verhältnis bestimmt, so muss das Nutzen-Kosten-Verhältnis grösser oder gleich 1 sein, damit eine Massnahme als kostenwirksam beurteilt werden kann.

Dieses Vorgehen wird im folgenden Kapitel anhand eines Fallbeispiels aufgezeigt.





## Kapitel 2

# Fallbeispiel Sturmauswirkungen auf Industriebetrieb im Mittelland

### 2.1 Einleitung

Als konkretes Fallbeispiel wird der Umbau einer Montagehalle mit Blechdach eines Industriebetriebs in der Region Mittelland betrachtet.

### 2.2 Gefahrenanalyse

#### 2.2.1 Ereignisanalyse

Für das Fallbeispiel der Montagehalle im Mittelland waren zunächst die lokalen topographischen Gegebenheiten zu evaluieren. Die Halle steht am Siedlungsrand angrenzend an eine unverbaute, weite Talebene. Dieses Objekt konnte daher der Geländekategorie «freies Feld» zugeordnet werden. MeteoSchweiz erstellte Analysen und Aufzeichnungen zu vergangenen Ereignissen. Damit konnte, neben der Intensitätskarte, abgeschätzt werden, welche Ereignisse bereits stattgefunden haben und was diese am betreffenden Ort allenfalls für Schäden angerichtet haben.

Es wurden ein 20-, ein 50-, ein 100- und ein 300-jährliches Szenario angenommen.

#### 2.2.2 Wirkungsanalyse

In der Wirkungsanalyse wurde die konkrete Windbelastung dieses Objektes ermittelt. Gemäss SIA 261, Anhang E (Abbildung 1.2), ist mit einem Referenzwert des Staudrucks  $q_{p0}$  von  $0.9 \text{ kN/m}^2$  zu rechnen. Die Gebäudehöhe der Montagehalle ist  $10 \text{ m}$  und die Geländekategorie ist Klasse III (freies Feld). Daher resultierte für den Staudruck  $q_p$  dieses Objektes  $0.9 \text{ kN/m}^2$ .

## 2.3 Expositionsanalyse

### 2.3.1 Ermittlung der exponierten fixen Objekte

Die Expositionsanalyse bei der Montagehalle im Mittelland konzentrierte sich auf die Ermittlung der Verletzlichkeit der Baustruktur. Bei der Überprüfung der Befestigung des bestehenden Blechdaches zeigten sich Mängel. Als Verbindungsmittel zwischen Konterlattung und Sparrenpfetten wurden anstelle der notwendigen Schraubenverbindungen glattschaftige Nägel verwendet. Dadurch konnten Kosten an Arbeit und Material von rund CHF 3'000.- eingespart werden. Die Verletzlichkeit des Daches gegenüber Sturm (Sogwirkung) wurde dadurch erhöht.

### 2.3.2 Ermittlung der exponierten Personen

Durch die Systemabgrenzung wurde nur die Montagehalle betrachtet. Direkte Auswirkungen des Sturmes auf Personen in Hallennähe wurden nicht untersucht. Jedoch können herumfliegende Teile eine Gefährdung für Personen darstellen. Dies floss in die Analyse ein.

Ein Feldweg führt in unmittelbarer Nähe östlich an der Halle vorbei. Dieser wird von Spaziergängern genutzt. Die weitere Umgebung besteht aus der Zufahrtsstrasse zum Betrieb sowie Ackerflächen.

Es wurde angenommen, dass sich pro Tag 12 Personen während 1.5 min im gefährdeten Bereich aufhalten. Diese Annahme galt für alle Szenarien.

## 2.4 Konsequenzenanalyse

Aufgrund des ermittelten Staudrucks  $q_p$  von  $0.9 \text{ kN/m}^2$  konnten die Windkräfte und die Winddrücke an der Montagehalle ermittelt werden. Hierbei sind die Angaben gemäss SIA 261 massgebend. Es zeigte sich, dass das bestehende Blechdach ungenügend gegen Sogkräfte bemessen ist.

Für die Berechnung des Schadenausmasses wurden folgende Annahmen getroffen (Tabelle 2.1):

Tabelle 2.1: Annahmen zur räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit  $p_{rA}$  und zur Letalität  $\lambda$  von Personen.

Parameter	Sz20	Sz50	Sz100	Sz300
$p_{rA}$	0.05	0.2	0.4	0.5
$\lambda$	0.1	0.2	0.33	0.5

Daraus lässt sich das in Tabelle 2.2 dargestellte Schadenausmass errechnen.

Tabelle 2.2 zeigt, dass bei einem Windereignis der Wiederkehrperiode von 20 Jahren mit ersten Sachschäden im Betrag von rund CHF 20'000.- am Blechdach zu rechnen ist. Diese steigen auf rund CHF 80'000 für ein 50-jährliches Ereignis, auf CHF 100'000.- für ein 100-jährliches Ereignis und auf CHF 150'000.- für ein 300-jährliches Ereignis. Das weggerissene Blechdach gefährdet

Tabelle 2.2: Schadenausmass für das 20-, 50-, 100- und 300-jährliche Szenario. Das Schadenausmass für Personen wurde mit 5 Mio. CHF pro verhindertem Todesfall monetarisiert.

Kategorie	Sz20	Sz50	Sz100	Sz300
Sachwerte [CHF]	20'650	80'000	116'500	151'500
Personen [Tf]	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-3}$	$6.3 \cdot 10^{-3}$
Personen [CHF]	6'500	5'000	16'500	31'500
Gesamt [CHF]	27'150	85'000	133'000	183'000

zudem Personen im Freien. Aufgrund der Annahmen zur örtlichen Präsenz von Personen, der Verletzlichkeit und der Trefferwahrscheinlichkeit wurde das Schadenausmass ermittelt.

## 2.5 Risikoermittlung

### 2.5.1 Kollektive Risiken

Durch Verknüpfung des Schadenausmasses mit der Häufigkeit der angenommenen Szenarien konnte das kollektive Risiko für Personen und Sachwerte berechnet werden. Das gesamte kollektive Risiko beträgt rund 3'200 CHF/a. Die Personenrisiken wurden dazu mit 5 Mio. CHF pro verhindertem Todesfall monetarisiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

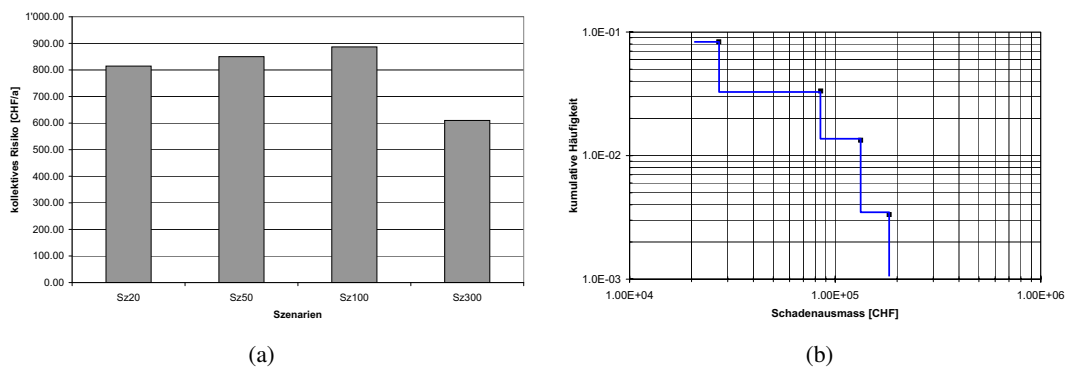


Abbildung 2.1: Verteilung der kollektiven Risiken auf die Szenarien (a) und das Wahrscheinlichkeits-Ausmass Diagramm der Risiken für das Fallbeispiel Montagehalle Mittelland (b).

### 2.5.2 Individuelle Risiken

Für die Bestimmung des individuellen Risikos wurde angenommen, dass die am stärksten exponierte Person während einer Sturmsituation den Weg entlang der Halle vier Mal täglich begeht. Daraus errechneten sich individuelle Risiken in den einzelnen Szenarien von  $1.1 \cdot 10^{-5}$  bis  $2.1 \cdot 10^{-6}$ .

## 2.6 Risikobewertung

### 2.6.1 Kollektive Risiken

Die Verteilung der kollektiven Risiken (Abbildung 2.1 (a)) zeigt, dass das 100-jährliche Szenario am meisten zum gesamten Risiko beiträgt, gefolgt vom 50- bzw. 20-jährlichen Szenario. Das 300-jährliche Szenario trägt am wenigsten zum Gesamtrisiko bei. Dies deutet darauf hin, dass vor allem die Risiken, die durch häufigere Ereignisse verursacht werden, verringert werden mussten.

### 2.6.2 Individuelle Risiken

Bei der Bewertung der berechneten individuellen Risiken musste von einem hohen Grad der Freiwilligkeit ausgegangen werden, da es sich um einen Spaziergänger handelt. Daher lagen die individuellen Risiken der stark exponierten Person in der Grösse von  $1.1 \cdot 10^{-5}$  bis  $2.1 \cdot 10^{-6}$  unter den Grenzwerten (vgl. Teil A, Tabelle 4.2, Seite 43). Somit ergab sich aus Sicht des individuellen Risikos kein zusätzlicher Handlungsbedarf.

## 2.7 Mögliche Schutzmassnahmen

Das Beispiel der Montagehalle zeigte, dass aus Gründen des Sachrisikos zusätzliche Schutzmassnahmen notwendig waren. Beim Umbau wurde entschieden, die vorhandene Befestigung des Blechdaches zu ersetzen, so dass selbst ein Sturm der Wiederkehrperiode von 300 Jahren zu keiner Beschädigung führt.

**Technische Massnahmen.** Die Befestigung des Daches wurde ersetzt, so dass Ereignisse mit einer Jährlichkeit von 300 Jahren schadlos überstanden werden.

## 2.8 Wirksamkeit

Die Dimensionierung der Massnahme wurde so ausgelegt, dass eine 100%-ige Wirksamkeit gewährleistet ist. Die Risiken wurden damit auf nahezu 0 CHF/a reduziert. Die verbleibenden Restrisiken sind vernachlässigbar klein und können nicht quantifiziert werden. Es konnte daher von einer Risikoreduktion von rund 3'200 CHF/a ausgegangen werden.

## 2.9 Kosten

Es war mit Investitionskosten in Höhe von 30'000 CHF zu rechnen. Die Lebensdauer der Massnahme wurde mit 50 Jahren angenommen; es waren keine Unterhalts- und Reparaturkosten während der Lebensdauer zu erwarten. Die Berechnung der jährlichen Kosten erfolgte nach der Methode, die im Teil A erläutert wurde (Abschnitt 5.6, Seite 57ff). Dabei wurde ein Diskontsatz von 2% angenommen. Es errechneten sich jährliche Kosten in Höhe von 900 CHF.

## **2.10 Massnahmenbewertung**

Da es sich bei der vorgeschlagenen Massnahme um eine Einzelmassnahme handelte, konnte kein Risiko-Kosten-Diagramm gezeichnet werden. Es war lediglich eine Überprüfung der Kostenwirksamkeit möglich. Da die Risikoreduktion hier als alleiniger Nutzen definiert wurde, betrug das Nutzen-Kosten-Verhältnis der Massnahme 3.5. Die Massnahme zeigte damit ein gutes Nutzen-Kosten-Verhältnis. In diese Beurteilung waren Sekundärschäden, beispielsweise durch eindringendes Regenwasser, die mit der gleichen Massnahme ebenfalls behoben wurden, nicht eingerechnet. Damit würde das Nutzen-Kosten-Verhältnis nochmals ansteigen.



## **Kapitel 3**

### **Fazit**

Das Fallbeispiel zeigt, dass eine risikobasierte Planung von Massnahmen gegen Sturm nach dem Risikokzept in den Grundsätzen möglich ist. Die Abschätzung von Szenarien ist – wie bei allen Prozessen – mit gewissen Unsicherheiten verbunden. Ebenso ist die Schadenempfindlichkeit von Objekten vielfach nur unzureichend bekannt und muss abgeschätzt werden.

Das Rechenbeispiel zeigte deutlich, dass trotz der relativ hohen Kosten für die Sanierung des Daches die Schutzmassnahmen lohnend sind, da ein noch höherer Schaden verhindert werden kann. Hier zeigt sich auch deutlich, dass die beim Bau eingesparten Kosten von 3000 CHF gegenüber den heute fälligen 30'000 CHF Investitionskosten gut eingesetzt gewesen wären.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass bei allen Unsicherheiten, die bei einer solchen Beurteilung inhärent sind, ein nachvollziehbarer Entscheid gewährleistet werden kann.

