



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
SEKTION KR

Bericht vom 31. Oktober 2025

Neue Bemessungsgrundlage für die Bundesprämie gemäss Kernenergiehaftpflichtgesetzgebung mit expertenbasierten EVT-Modell

Datum: 31. Oktober 2025

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE, CH-3003 Bern, www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

Prime Re Solutions, Raingässli 1, CH-6300 Zug, www.prime-re-solutions.expert

BFE-Bereichsleitung: Sandra Knopp Pisi, sandra.knopppisi@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/300382.01

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich
die Autorenschaft verantwortlich.**

Bundesamt für Energie BFE

Pulverstrasse 13, CH-3063 Ittigen; Postadresse: Bundesamt für Energie BFE, CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Neue Bemessungsgrundlage für die Bundesprämie
gemäss Kernenergiehaftpflichtgesetzgebung
mit expertenbasierten EVT-Modell

31. Oktober 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Rechtliche Grundlagen	4
3	Expertenbasiertes EVT-Modell	8
4	Expertenszenarien	12
5	Kalibrierungen	16
6	Sensitivitäten	19
7	Plausibilisierungen	25
8	Annahmen	29
9	Tool Handhabung	33
10	Abkürzungen	35

1 Einleitung

Das Bundesamt für Energie (BFE) hat Prime Re Solutions beauftragt, eine neue Bemessungsgrundlage für die Bundesprämie zur Versicherungsdeckung der Schweizer Nuklearrisiken gemäss Kernenergiehaftpflichtgesetz (KHG) [1] zu entwickeln, und zwar auf Basis eines expertenbasierten EVT-Modells [2]. Dieser neue Ansatz wurde unabhängig validiert [3] und dient als Alternativlösung zu den derzeit noch gültigen Berechnungsformeln in den Anhängen 1 bis 3 der Kernenergiehaftpflichtverordnung (KHV) [4].

Die vorliegende Dokumentation fasst dieses EVT-Modell und dessen Implementierung zusammen. Sie zeigt auf, auf welchen rechtlichen (Abschnitt 2) und versicherungsmathematischen (Abschnitt 3) Grundlagen es aufgebaut ist und beschreibt die Expertenszenarien (Abschnitt 4), die zur Kalibrierung der Modellparameter dienen (Abschnitt 5). Um die Zuverlässigkeit des Modells zu untermauern, verdeutlicht sie ausserdem seine Robustheit gegenüber Modelländerungen (Abschnitt 6) und belegt seine Glaubwürdigkeit (Abschnitt 7) unter anderem durch Vergleiche mit den Vorjahresprämien des Bundes und der Privatversicherer. Nichtsdestotrotz basiert das EVT-Modell auf Annahmen, deren wesentlichste die Dokumentation ebenfalls kritisch bewertet (Abschnitt 8). Abschliessend erläutert sie kurz, wie das EVT-Modell mithilfe des zugehörigen Tarifierungstools anzuwenden ist (Abschnitt 9).

Sofern nicht anders angegeben, sind alle Geldbeträge in CHF ausgewiesen.

2 Rechtliche Grundlagen

Die Kernenergiehaftpflichtgesetzgebung (KHGG) [1, 4] unterscheidet zwischen 4 verschiedenen **Gefährdungsobjekten**, die mit unterschiedlichen Deckungen durch Privatversicherer und den Bund zu versichern sind:

1. Grosse Anlagen – die bis zu 1.2 GEUR zuzüglich 10% für Zinsen und gerichtlich zuerkannte Kosten gedeckt werden.
2. Kleine Anlagen – die bis zu 70 MEUR zuzüglich 10% für Zinsen und gerichtlich zuerkannte Kosten gedeckt werden.
3. Grosse Transporte – die bis zu 1.2 GEUR zuzüglich 10% für Zinsen und gerichtlich zuerkannte Kosten gedeckt werden.
4. Kleine Transporte – die bis zu 80 MEUR zuzüglich 10% für Zinsen und gerichtlich zuerkannte Kosten gedeckt werden.

Diese angegebenen Gesamtdeckungen werden im Folgenden als *detachment points* D bezeichnet.

Die KHGG unterscheidet ausserdem zwischen 5 verschiedenen **Schadenursachen**, die zu einem nuklearen Schaden führen und ebenfalls unterschiedlich durch Privatversicherer und den Bund gedeckt werden:

1. Unfall – bei dem nukleare Schäden durch betriebliche Ereignisse entstehen.
2. NatCat – bei dem nukleare Schäden durch ausserordentliche Naturvorgänge entstehen.
3. Terror – bei dem nukleare Schäden durch terroristische Gewaltakte entstehen.
4. Krieg – bei dem nukleare Schäden durch kriegerische Ereignisse entstehen.
5. Toleranz – bei dem nukleare Schäden trotz Einhaltung der Grenzwerte entstehen.

Schliesslich unterscheidet die KHGG zwischen 3 unterschiedlichen Arten, wie sich ein Schaden ausprägt. Auch hier decken die Privatversicherer und der Bund diese **Schadenarten** unterschiedlich:

1. P/S/V (Personen, Sach und Vermögen)
2. Umwelt
3. Verjährung¹

Für jede der 60 Kombinationen dieser 4 Gefährdungsobjekte mit den 5 Schadenursachen und 3 Schadenarten bestimmt die KHGG einen bestimmten Deckungsumfang, den die Privatversicherer (Schweizer Pool für die Versicherung von Nuklearrisiken SPN und European Liability Insurance for the Nuclear Industry ELINI) übernehmen müssen oder dürfen. Diese Privatdeckungen werden im Folgenden als *attachment points* A bezeichnet. Die restliche Deckung bis zum *detachment point* D übernimmt der Bund und besteht also aus der Differenz $D - A$. Falls $A = D$, übernehmen die

¹ Diese zusätzliche Unterscheidung der Schadenarten erfolgt nach dem Zeitpunkt der Anspruchserhebung: P/S/V- und Umweltschäden, für die später als zehn Jahre (Art. 7 Abs. 1 lit. c KHV), als zwanzig Jahre (Art. 7 Abs. 1 lit. d KHV) oder als dreissig Jahre (Art. 11 KHG) nach dem Ereignis Anspruch erhoben wird, werden als verjährte Schäden und Spätschäden resp. kurz als «verjährte Schäden» bezeichnet. Somit ergibt sich eine Aufteilung des gesamten nuklearen Schadens in die P/S/V-Schäden (vor «Verjährung/Spätschaden»), die Umweltschäden (ebenfalls vor «Verjährung/Spätschaden») und die verjährten Schäden.

Privatversicherer die volle Deckung, falls $A = 0$, übernimmt der Bund die volle Deckung, und in allen anderen Fällen übernimmt der Bund lediglich den oberen Teil des Bandes.

Zurzeit ist die Schweiz potenziell 8 verschiedenen **Kern-Risiken** ausgesetzt, die jeweils einem der obigen KHGG-Gefährdungsobjekte zugeordnet sind:

1. Die 3 noch aktiven Kernkraftwerke (KKW) Beznau, Leibstadt und Gösgen – die den grossen Anlagen zugeordnet sind.
2. Das Zwischenlager (ZWILAG) – das den grossen Anlagen zugeordnet ist.
3. Das ehemalige Kernkraftwerk Mühleberg in Stilllegung mit Brennelemente (KKW iSmB) – das den grossen Anlagen zugeordnet ist.
4. Das jetzige Kernkraftwerk Mühleberg in Stilllegung ohne Brennelemente (KKW iSoB) – das den kleinen Anlagen zugeordnet ist.
5. Das Paul Scherrer Institut (PSI) – das den kleinen Anlagen zugeordnet ist.
6. Der Forschungsreaktor CROCUS der École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) – der den kleinen Anlagen zugeordnet ist.
7. Die grossen Transporte
8. Die kleinen Transporte

Die Kombination dieser 8 Risiken mit den 5 Schadenursachen und 3 Schadenarten ergibt 120 verschiedene Tarife. Tabelle 1 fasst diese zusammen und zeigt die jeweiligen Deckungsstarts (*attachment points A*) und Deckungsenden (*detachment points D*), die der Bund versichert. Die CHF-Beträge widerspiegeln die oben für jedes Gefährdungsobjekt erwähnten, in der KHGG spezifizierten EUR-Werte, unter Verwendung des Umwandlungssatzes von 0.9298, von dem das BFE für die Festlegung der Prämien für das Jahr 2024 Gebrauch machte.

Die letzten 3 Spalten der Tabelle 1 geben ausserdem die Parameter an, die zur Modellierung der Schäden in Abschnitt 3 an die Expertenszenarien aus Abschnitt 4 in Abschnitt 5 kalibriert werden.

Tarif	Risiko	Schadenursache	Schadenart	A / CHF	D / CHF
1	EPFL	Unfall	P/S/V	71'594'600	71'594'600
2	EPFL	Unfall	Umwelt	71'594'600	71'594'600
3	EPFL	Unfall	Verjährung	-	71'594'600
4	EPFL	NatCat	P/S/V	71'594'600	71'594'600
5	EPFL	NatCat	Umwelt	71'594'600	71'594'600
6	EPFL	NatCat	Verjährung	-	71'594'600
7	EPFL	Terror	P/S/V	71'594'600	71'594'600
8	EPFL	Terror	Umwelt	71'594'600	71'594'600
9	EPFL	Terror	Verjährung	-	71'594'600
10	EPFL	Krieg	P/S/V	-	71'594'600
11	EPFL	Krieg	Umwelt	-	71'594'600
12	EPFL	Krieg	Verjährung	-	71'594'600
13	EPFL	Toleranz	P/S/V	71'594'600	71'594'600
14	EPFL	Toleranz	Umwelt	71'594'600	71'594'600
15	EPFL	Toleranz	Verjährung	-	71'594'600
16	KKW	Unfall	P/S/V	1'227'336'000	1'227'336'000
17	KKW	Unfall	Umwelt	1'227'336'000	1'227'336'000
18	KKW	Unfall	Verjährung	-	1'227'336'000
19	KKW	NatCat	P/S/V	1'227'336'000	1'227'336'000
20	KKW	NatCat	Umwelt	1'227'336'000	1'227'336'000
21	KKW	NatCat	Verjährung	-	1'227'336'000
22	KKW	Terror	P/S/V	1'227'336'000	1'227'336'000
23	KKW	Terror	Umwelt	1'227'336'000	1'227'336'000
24	KKW	Terror	Verjährung	-	1'227'336'000
25	KKW	Krieg	P/S/V	-	1'227'336'000
26	KKW	Krieg	Umwelt	-	1'227'336'000
27	KKW	Krieg	Verjährung	-	1'227'336'000
28	KKW	Toleranz	P/S/V	613'668'000	1'227'336'000
29	KKW	Toleranz	Umwelt	613'668'000	1'227'336'000
30	KKW	Toleranz	Verjährung	-	1'227'336'000
31	KKW iSmB	Unfall	P/S/V	1'227'336'000	1'227'336'000
32	KKW iSmB	Unfall	Umwelt	1'227'336'000	1'227'336'000
33	KKW iSmB	Unfall	Verjährung	-	1'227'336'000
34	KKW iSmB	NatCat	P/S/V	1'227'336'000	1'227'336'000
35	KKW iSmB	NatCat	Umwelt	1'227'336'000	1'227'336'000
36	KKW iSmB	NatCat	Verjährung	-	1'227'336'000
37	KKW iSmB	Terror	P/S/V	1'227'336'000	1'227'336'000
38	KKW iSmB	Terror	Umwelt	1'227'336'000	1'227'336'000
39	KKW iSmB	Terror	Verjährung	-	1'227'336'000
40	KKW iSmB	Krieg	P/S/V	-	1'227'336'000
41	KKW iSmB	Krieg	Umwelt	-	1'227'336'000
42	KKW iSmB	Krieg	Verjährung	-	1'227'336'000
43	KKW iSmB	Toleranz	P/S/V	613'668'000	1'227'336'000
44	KKW iSmB	Toleranz	Umwelt	613'668'000	1'227'336'000
45	KKW iSmB	Toleranz	Verjährung	-	1'227'336'000
46	KKW iSoB	Unfall	P/S/V	71'594'600	71'594'600
47	KKW iSoB	Unfall	Umwelt	71'594'600	71'594'600
48	KKW iSoB	Unfall	Verjährung	-	71'594'600
49	KKW iSoB	NatCat	P/S/V	71'594'600	71'594'600
50	KKW iSoB	NatCat	Umwelt	71'594'600	71'594'600
51	KKW iSoB	NatCat	Verjährung	-	71'594'600
52	KKW iSoB	Terror	P/S/V	71'594'600	71'594'600
53	KKW iSoB	Terror	Umwelt	71'594'600	71'594'600
54	KKW iSoB	Terror	Verjährung	-	71'594'600
55	KKW iSoB	Krieg	P/S/V	-	71'594'600
56	KKW iSoB	Krieg	Umwelt	-	71'594'600
57	KKW iSoB	Krieg	Verjährung	-	71'594'600
58	KKW iSoB	Toleranz	P/S/V	71'594'600	71'594'600
59	KKW iSoB	Toleranz	Umwelt	71'594'600	71'594'600
60	KKW iSoB	Toleranz	Verjährung	-	71'594'600

Tarif	Risiko	Schadenursache	Schadenart	A / CHF	D / CHF
61	PSI	Unfall	P/S/V	71'594'600	71'594'600
62	PSI	Unfall	Umwelt	71'594'600	71'594'600
63	PSI	Unfall	Verjährung	-	71'594'600
64	PSI	NatCat	P/S/V	71'594'600	71'594'600
65	PSI	NatCat	Umwelt	71'594'600	71'594'600
66	PSI	NatCat	Verjährung	-	71'594'600
67	PSI	Terror	P/S/V	71'594'600	71'594'600
68	PSI	Terror	Umwelt	71'594'600	71'594'600
69	PSI	Terror	Verjährung	-	71'594'600
70	PSI	Krieg	P/S/V	-	71'594'600
71	PSI	Krieg	Umwelt	-	71'594'600
72	PSI	Krieg	Verjährung	-	71'594'600
73	PSI	Toleranz	P/S/V	71'594'600	71'594'600
74	PSI	Toleranz	Umwelt	71'594'600	71'594'600
75	PSI	Toleranz	Verjährung	-	71'594'600
76	Transport gross	Unfall	P/S/V	1'227'336'000	1'227'336'000
77	Transport gross	Unfall	Umwelt	1'227'336'000	1'227'336'000
78	Transport gross	Unfall	Verjährung	-	1'227'336'000
79	Transport gross	NatCat	P/S/V	1'227'336'000	1'227'336'000
80	Transport gross	NatCat	Umwelt	1'227'336'000	1'227'336'000
81	Transport gross	NatCat	Verjährung	-	1'227'336'000
82	Transport gross	Terror	P/S/V	1'227'336'000	1'227'336'000
83	Transport gross	Terror	Umwelt	1'227'336'000	1'227'336'000
84	Transport gross	Terror	Verjährung	-	1'227'336'000
85	Transport gross	Krieg	P/S/V	-	1'227'336'000
86	Transport gross	Krieg	Umwelt	-	1'227'336'000
87	Transport gross	Krieg	Verjährung	-	1'227'336'000
88	Transport gross	Toleranz	P/S/V	613'668'000	1'227'336'000
89	Transport gross	Toleranz	Umwelt	613'668'000	1'227'336'000
90	Transport gross	Toleranz	Verjährung	-	1'227'336'000
91	Transport klein	Unfall	P/S/V	81'822'400	81'822'400
92	Transport klein	Unfall	Umwelt	81'822'400	81'822'400
93	Transport klein	Unfall	Verjährung	-	81'822'400
94	Transport klein	NatCat	P/S/V	81'822'400	81'822'400
95	Transport klein	NatCat	Umwelt	81'822'400	81'822'400
96	Transport klein	NatCat	Verjährung	-	81'822'400
97	Transport klein	Terror	P/S/V	81'822'400	81'822'400
98	Transport klein	Terror	Umwelt	81'822'400	81'822'400
99	Transport klein	Terror	Verjährung	-	81'822'400
100	Transport klein	Krieg	P/S/V	-	81'822'400
101	Transport klein	Krieg	Umwelt	-	81'822'400
102	Transport klein	Krieg	Verjährung	-	81'822'400
103	Transport klein	Toleranz	P/S/V	81'822'400	81'822'400
104	Transport klein	Toleranz	Umwelt	81'822'400	81'822'400
105	Transport klein	Toleranz	Verjährung	-	81'822'400
106	ZWILAG	Unfall	P/S/V	1'227'336'000	1'227'336'000
107	ZWILAG	Unfall	Umwelt	1'227'336'000	1'227'336'000
108	ZWILAG	Unfall	Verjährung	-	1'227'336'000
109	ZWILAG	NatCat	P/S/V	1'227'336'000	1'227'336'000
110	ZWILAG	NatCat	Umwelt	1'227'336'000	1'227'336'000
111	ZWILAG	NatCat	Verjährung	-	1'227'336'000
112	ZWILAG	Terror	P/S/V	1'227'336'000	1'227'336'000
113	ZWILAG	Terror	Umwelt	1'227'336'000	1'227'336'000
114	ZWILAG	Terror	Verjährung	-	1'227'336'000
115	ZWILAG	Krieg	P/S/V	-	1'227'336'000
116	ZWILAG	Krieg	Umwelt	-	1'227'336'000
117	ZWILAG	Krieg	Verjährung	-	1'227'336'000
118	ZWILAG	Toleranz	P/S/V	613'668'000	1'227'336'000
119	ZWILAG	Toleranz	Umwelt	613'668'000	1'227'336'000
120	ZWILAG	Toleranz	Verjährung	-	1'227'336'000

Tabelle 1: 120 Tarife der 8 Risiken für ihre jeweiligen 5 Schadenursachen und 3 Schadenarten, einschliesslich ihrer *attachment points* und *detachment points* sowie ihrer kalibrierten Modellparameter.

3 Expertenbasiertes EVT-Modell

Zur Modellierung der versicherungstechnischen Prämie wird hier zwischen 3 verschiedenen Typen von Schäden unterschieden, die in einem beliebigen der 120 Tarife entstehen können:

Der volle Schaden X bezeichnet das wirtschaftliche Schadenausmass, das entsteht und letztlich unter allen beteiligten Parteien (Verursacher, Versicherer, Bund und Geschädigte) aufgeteilt wird. Er wird von Grund auf in Abschnitt 3.2.2 modelliert, auf der Grundlage der Verteilungen, die in Abschnitt 5.2 kalibriert werden.

Der versicherte Schaden Y ist der Teil des Schadens, der gemäss KHGG von den privaten Versicherern und/oder dem Bund getragen wird. Er entspricht dem Anteil des vollen Schadens X , der sich innerhalb des Deckungsumfangs befindet (13), wie in Abbildung 1 grafisch dargestellt.

Der gesamte Schaden S ist die Summe (3) aller versicherten Schäden Y , die innerhalb eines Versicherungsjahres anfallen.

3.1 Prämienkomponenten

Die jährliche Prämie P einer beliebigen Deckung aus Tabelle 1 wird auf Grundlage der Verteilung des gesamten Schadens S als Summe von zwei Komponenten ermittelt:

$$P = \mathbb{E}[S] + \rho \cdot \sqrt{\mathbb{V}[S]} \quad (1)$$

Die erste Komponente entspricht als Durchschnitt $\mathbb{E}[S]$ dem erwarteten Schaden über eine grosse Zahl von Jahren. Analog zu Naturkatastrophen wie Erdbeben tritt im Falle von Nuklearvorfällen in den allermeisten Jahren kein Schaden auf, doch ab und zu entsteht ein Ereignis, das aber dann diesen Erwartungswert bei Weitem übersteigt.

Die zweite Komponente dient als Risikozuschlag und wird hier der Einfachheit halber als proportional zur Standardabweichung (Wurzel der Varianz $\mathbb{V}[S]$) gewählt. Sie berücksichtigt, wie stark die Höhe eines Schadens, wenn er eintritt, vom Erwartungswert abweichen kann. Analog zu Naturkatastrophen wie Erdbeben überschreitet diese Zahl im Falle von Nuklearvorfällen den Erwartungswert um Grössenordnungen.

Der Proportionalitätsfaktor ρ bezeichnet die Risikoaversion des Versicherers. Für ein festgelegtes ρ wächst die zweite Komponente proportional zur Standardabweichung. Somit geht ein potentiell höherer Verlust mit einem höheren Risikozuschlag einher.

Das Modell verwendet den Wert

$$\rho = 25\% \quad (2)$$

Aus der Summe der beiden Glieder (1) ergibt sich die Marktprämie, die der Bund gemäss [1, Art. 12 Abs. 2] von den Betreibern der Schweizer Kernanlagen erheben muss.

3.2 Kollektivmodell

Zur Tarifierung von Grossschäden gilt das Kollektivmodell als aktuarieller Standard. Dabei wird der gesamte Schaden S als stochastische Summe der einzelnen versicherten Schäden Y_i , die im Laufe des Versicherungsjahres anfallen, berechnet:

$$S = \sum_i^N Y_i \quad (3)$$

wobei die Y_i einer gemeinsamen stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilung gehorchen und die Anzahl N dieser einzelnen Schäden einer diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilung folgt.

Ganz allgemein gilt: Sofern die stochastischen Variablen Y_i und N voneinander unabhängig sind und die Y_i untereinander unabhängig und identisch verteilt (iid) sind, gelten die Wald-Identitäten für den Erwartungswert $\mathbb{E}$ und die Varianz $\mathbb{V}$ des Schadens S :

$$\mathbb{E}[S] = \mathbb{E}[N] \cdot \mathbb{E}[Y] \quad (4)$$

$$\mathbb{V}[S] = \mathbb{V}[N] \cdot \mathbb{E}[Y]^2 + \mathbb{E}[N] \cdot \mathbb{V}[Y] \quad (5)$$

Diese fliessen in die Prämienformel (1) ein.

In den folgenden Abschnitten werden die analytischen Formeln für diese Erwartungswerte und Varianzen der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Schadenhäufigkeit N und der versicherten Schadensausmasse Y hergeleitet.

3.2.1 Verteilung der Schadenhäufigkeit

Da Nuklearvorfälle extrem selten sind und als voneinander unabhängig betrachtet werden können, liegt es nahe, N als Poisson-verteilt anzunehmen:

$$\mathbb{W}[N = n] = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} \quad (6)$$

wobei die Poisson-Intensität λ bei Nuklearvorfällen erfahrungsgemäss deutlich kleiner als 1 ist, d. h., dass die Verteilung pro Jahr in der Regel keinen Schaden generiert ($n = 0$), selten einen Schaden ($n = 1$) und fast nie mehrere Schäden ($n > 1$).

Für jeden Tarif aus Tabelle 1 gilt eine eigene Poisson-Intensität λ , die anhand der Expertenszenarien aus Abschnitt 4 in Abschnitt 5.1 kalibriert wird.

Da bei der Poisson-Verteilung gilt:

$$\mathbb{V}[N] = \mathbb{E}[N] = \lambda, \quad (7)$$

vereinfachen sich die Wald-Identitäten (4, 5) zu:

$$\mathbb{E}[S] = \lambda \cdot \mathbb{E}[Y], \quad (8)$$

$$\mathbb{V}[S] = \lambda \cdot \mathbb{E}[Y^2], \quad (9)$$

und die Prämienformel (1) lautet somit:

$$P = \lambda \cdot \mathbb{E}[Y] + \rho \cdot \sqrt{\lambda \cdot \mathbb{E}[Y^2]} \quad (10)$$

Daraus folgt, dass, wenn – wie im Falle von Nuklearvorfällen – die Poisson-Intensität λ sehr klein ist, dann gilt $\lambda \ll \sqrt{\lambda}$, und das zweite Glied dominiert: Der Risikozuschlag übersteigt dann in der Regel den erwarteten Schaden bei Weitem. Analog zu Naturkatastrophen wie Erdbeben ist dies auch bei Nuklearvorfällen der Fall.

3.2.2 Verteilung des vollen Schadens

Auf Grundlage der Extremwerttheorie (EVT) [5] liegt es nahe, den vollen Schaden X als Pareto-verteilt mit kumulativer Wahrscheinlichkeit

$$\mathbb{W}[X \leq x] = 1 - \left(\frac{T}{x}\right)^\alpha \quad (11)$$

anzunehmen. Die zugehörige Wahrscheinlichkeitsdichte lautet:

$$\frac{d\mathbb{W}}{dx} = \alpha T^\alpha x^{-\alpha-1} \quad (12)$$

Die beiden Parameter T und α bestimmen jeweils die Schwelle und den Exponenten der Verteilung.

Für jeden Tarif aus Tabelle 1 gelten unterschiedliche Parameter T und α , die anhand der Expertenszenarien aus Abschnitt 4 in Abschnitt 5.2 kalibriert werden.

3.2.3 Momente des versicherten Schadens

Der versicherte Schaden Y wird aus dem vollen Schaden X deterministisch abgeleitet, indem Letzterer in einem Intervall begrenzt wird, das beim *Attachment Point* A beginnt und beim *Detachment Point* D endet. Die entsprechende, sogenannte *Excess-of-Loss-Funktion* XL

$$Y(X) = XL_{A,D}(X) = \begin{cases} X \leq A : & 0 \\ A < X < D : & X - A \\ D \leq X : & D - A \end{cases} \quad (13)$$

wird in Abbildung 1 dargestellt.

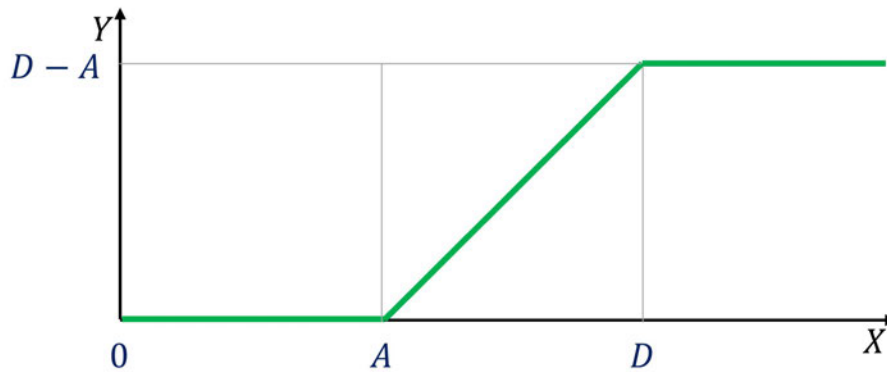


Abbildung 1: *Excess-of-Loss-Funktion*, die den versicherten Schaden Y aus dem vollen Schaden X erzeugt.

Das erste Moment des versicherten Schadens lautet

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[Y] &= \int_0^\infty dx Y(x) \frac{d\mathbb{W}}{dx} \\ &= \begin{cases} T \leq A: & \frac{T}{\alpha-1} \left[\left(\frac{T}{A}\right)^{\alpha-1} - \left(\frac{T}{D}\right)^{\alpha-1} \right] \\ T > A: & \frac{T}{\alpha-1} \left[1 - \left(\frac{T}{D}\right)^{\alpha-1} \right] + (T - A) \end{cases}\end{aligned}\quad (14)$$

und sein zweites Moment lautet

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[Y^2] &= \int_0^\infty dx Y(x)^2 \frac{d\mathbb{W}}{dx} \\ &= \begin{cases} T \leq A: & \frac{2T^2}{(\alpha-1)(\alpha-2)} \left[(\alpha-2) \left(\frac{A}{T}\right) \left(\frac{T}{D}\right)^{\alpha-1} - (\alpha-1) \left(\frac{T}{D}\right)^{\alpha-2} + \left(\frac{T}{A}\right)^{\alpha-2} \right] \\ T > A: & \frac{2T^2}{(\alpha-1)(\alpha-2)} \left[(\alpha-2) \left(\frac{A}{T}\right) \left(\frac{T}{D}\right)^{\alpha-1} - (\alpha-1) \left(\frac{T}{D}\right)^{\alpha-2} \right] + A^2 - \frac{2\alpha}{\alpha-1} AT + \frac{\alpha}{\alpha-2} T^2 \end{cases}\end{aligned}\quad (15)$$

Für jeden Tarif aus Tabelle 1 gelten sowohl unterschiedliche untere und obere Limiten A und D als auch unterschiedliche Parameter T und α . Letztere werden anhand der Expertenszenarien aus Abschnitt 4 in Abschnitt 5.2 kalibriert.

3.3 Aggregation

Alle oben genannten Grössen beziehen sich für jedes versicherte Risiko auf einen bestimmten Tarif mit seiner eigenen Schadenursache u und Schadenart a . Auf die explizite Verwendung dieser Indizes u und a wurde in den Formeln der Einfachheit halber verzichtet.

Zur Ermittlung der Gesamtprämie eines versicherten Risikos müssen diese 15 Deckungen (5 Schadenursachen, die jeweils zu 3 Schadenarten führen) aggregiert werden. Dazu wird das erste Glied der Prämie (10), das dem Erwartungswert entspricht, arithmetisch addiert. Ebenso werden im zweiten Glied die Varianzen über die verschiedenen Schadenursachen u arithmetisch addiert, da diese voneinander unabhängig sind. Für die verschiedenen Schadenarten a , die einer gleichen Schadenursache entspringen und somit stark voneinander abhängig sind, werden dagegen deren Standardabweichungen addiert.

Für jedes der 8 versicherten Risiken ergibt sich die Gesamtprämie somit aus der folgenden Aggregation der Prämien (10) der 15 Deckungen:

$$P = \sum_{u,a} \lambda_{ua} \cdot \mathbb{E}[Y_{ua}] + \rho \cdot \sqrt{\sum_u \left(\sum_a \sqrt{\lambda_{ua} \cdot \mathbb{E}[Y_{ua}^2]} \right)^2} \quad (16)$$

Gemäss KHGG wird diese Prämie ausserdem um weitere 10% erhöht, um den dem Bund entstehenden Schadenregulierungskosten Rechnung zu tragen.

4 Expertenszenarien

Für die meisten der 120 Tarife aus Abschnitt 2 und Tabelle 1 (8 Risiken $\times$ 5 Schadenursachen $\times$ 3 Schadenarten) haben swissnuclear-Experten verschiedene Szenarien entwickelt [6], die die derzeit vorstellbaren Nuklearvorfälle abdecken. Insgesamt sind es 383 Szenarien s , die jeweils mit den Schätzwerten und Schätzbreiten ihrer Schadenhäufigkeiten N_s und ΔN_s sowie ihrer Schadenausmasse X_s und ΔX_s angegeben werden. Diese werden in Abschnitt 5 verwendet, um die Statistiken (7, 14, 15) zu kalibrieren und damit die Prämien (10) bzw. (16) zu bestimmen.

Als Beispiel zeigt Tabelle 2 einige Expertenszenarien für KKW- und ZWILAG-Unfälle mit ihren Schadenhäufigkeiten und Schadenausmassen für die 3 Schadenarten P/S/V, Umwelt und Verjährung. Offenkundig teilen die Szenarien einer gleichen Schadenursache dieselben Schätzwerte und Schätzbreiten ihrer Schadenhäufigkeiten N_s und ΔN_s für alle 3 daraus resultierenden Schadenarten.

4.1 Veranschaulichung

Zur Veranschaulichung dieser zahlreichen Expertenszenarien zeigt Abbildung 2 in einer bilogarithmischen Darstellung, wie sich deren Schadenausmasse und Schadenhäufigkeiten streuen, in diesem Fall für die durch Unfälle verursachten P/S/V-Szenarien der derzeit 8 versicherten Risiken.

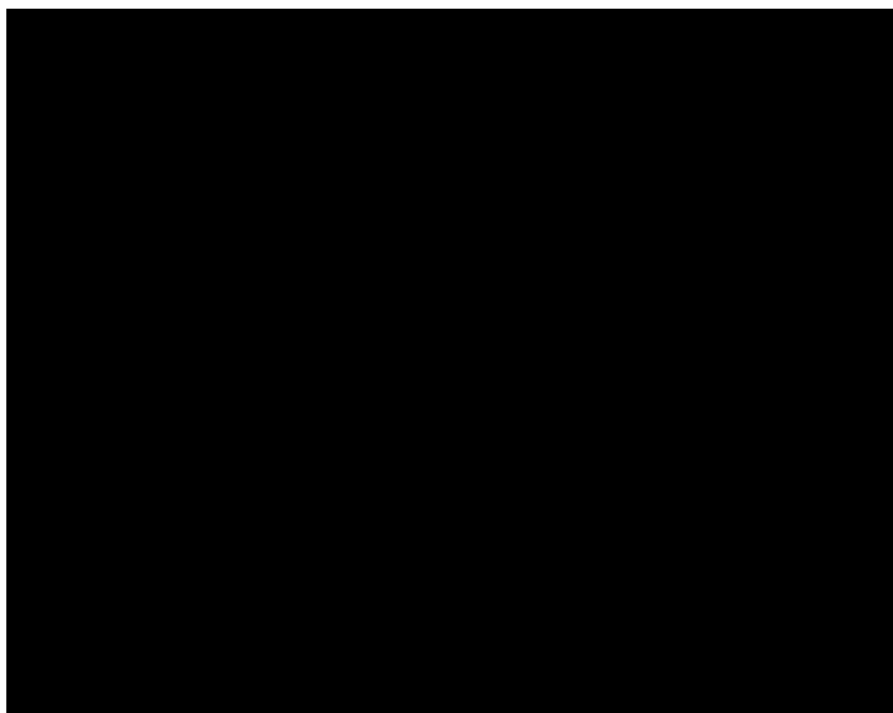


Abbildung 2: Expertenszenarien der durch Unfälle verursachten P/S/V-Schäden aller 8 versicherten Risiken. Dargestellt sind die Schadenausmasse (horizontale Achse) und die Schadenhäufigkeiten (vertikale Achse). Die gestrichelten Linien stellen die versicherten Deckungen (*detachment points*) dar. Die KNS-Schätzung des BABS [7] dient zum Vergleich.

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) hält in einem Gutachten zu den Expertenszenarien insgesamt „die Häufigkeitsdaten für Unfälle aus interner und natürlicher Ursache für

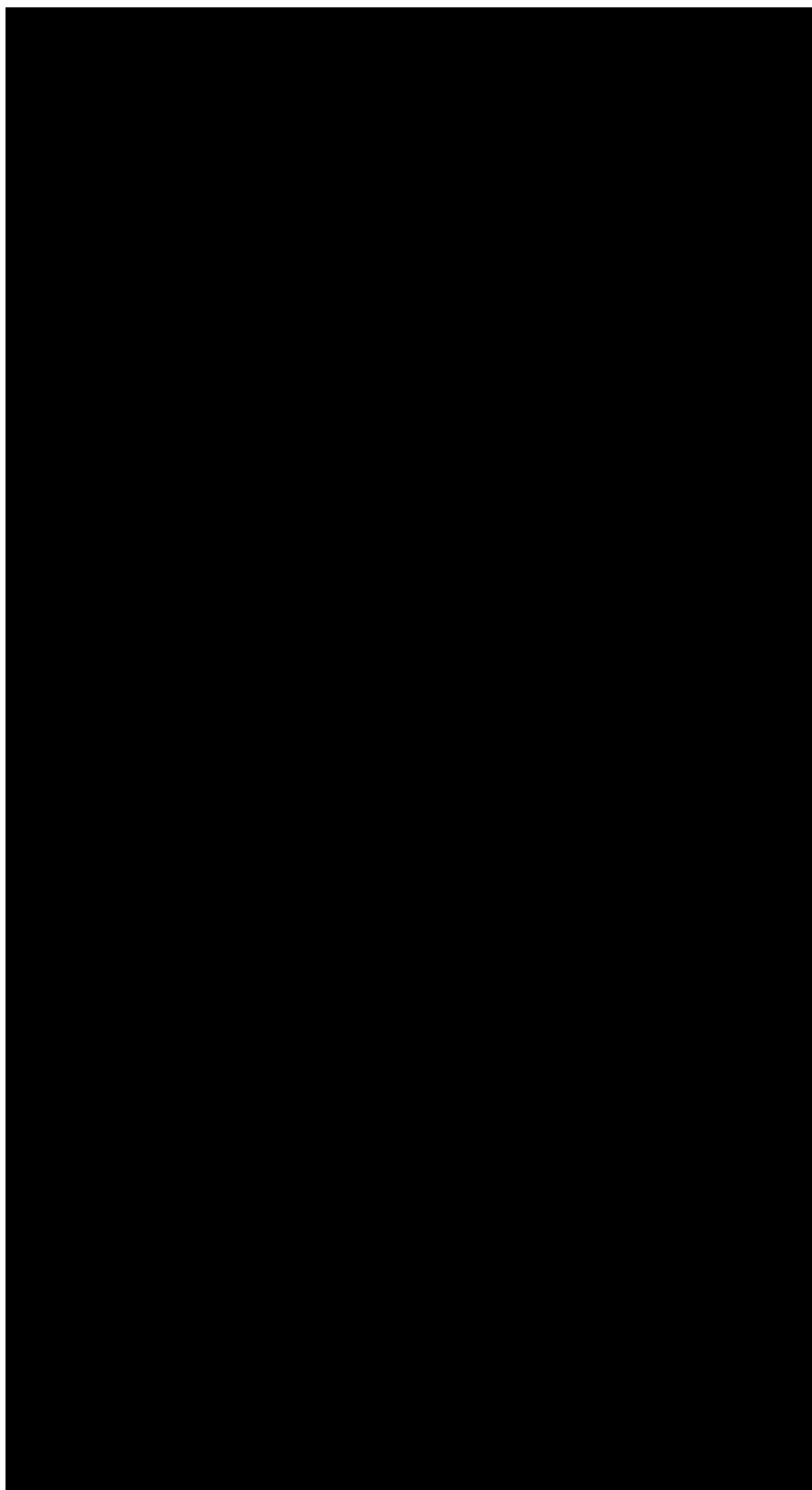


Tabelle 2: Auswahl von Expertenszenarien [6].

plausibel“ [8]. Es betont jedoch, dass es „zur Bestimmung des Schadensausmasses und der resultierenden Kosten [...] nur sehr begrenzt in der Lage ist, eine Beurteilung vorzunehmen.“

Wie erwartet, fallen die meisten grösseren Schäden tendenziell seltener aus als kleinere, jedoch mit einigen Ausnahmen, etwa bei Toleranzschäden, die bei KKW durch Unfälle entstehen und in Abbildung 3 dargestellt sind. Solche Expertenszenarien lassen sich nur schwer erklären und entsprechend schlecht kalibrieren.

Generell ist es schwierig, realistische Szenarien (bzw. Szenarien mit vernünftigen Eintrittswahrscheinlichkeiten) für Tarife mit Toleranz als Schadenursache oder Verjährung als Schadenart zu entwickeln. Deshalb wurden für einige der Tarife aus Tabelle 1 keine Szenarien entwickelt und somit auch keine Parameter geschätzt: Diese Tarife tragen entsprechend nicht zur Prämie bei, was angesichts ihrer verschwindend geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten unerheblich bleibt. Die swissnuclear-Experten schlagen daher alternativ vor, deren Prämien als geringe Prozentsätze der jeweils entsprechenden anderen Prämien zu bestimmen. Dieser Ansatz und die Bestimmung dieser Prozentsätze könnten in Zukunft gegebenenfalls durch ein befugtes Gremium überprüft werden.

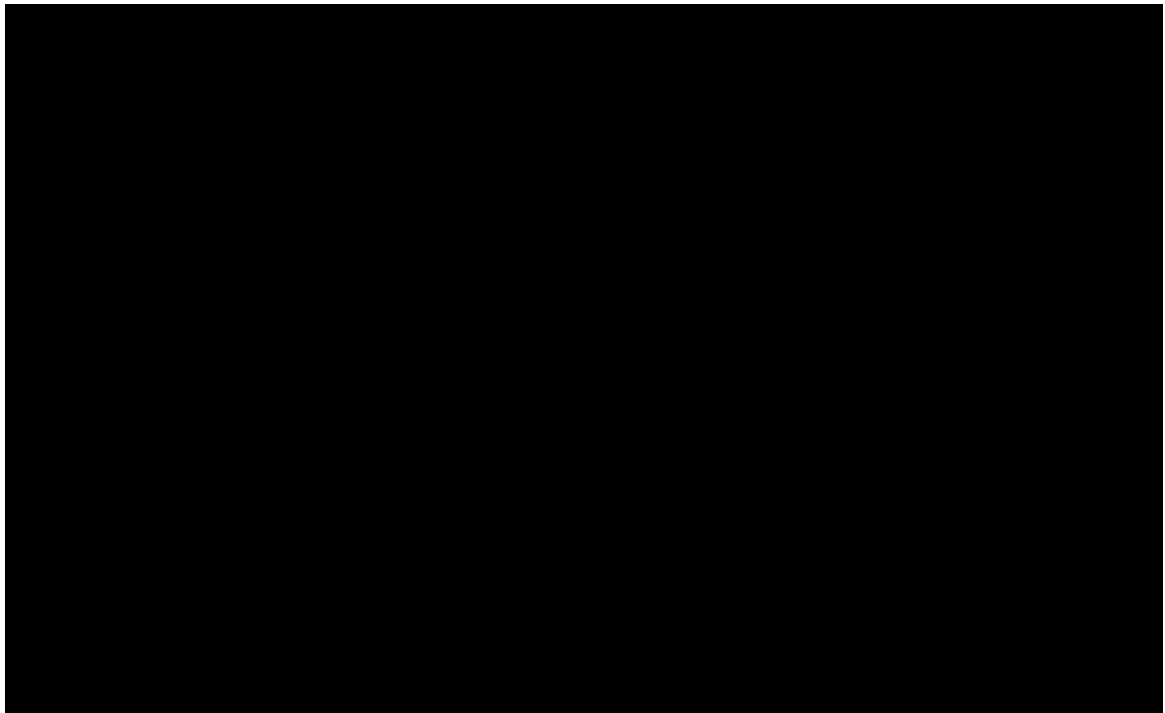


Abbildung 3: Experten-szenarien der bei KKW durch Unfälle verursachten Verjährungsschäden. Dargestellt sind die Schadenausmasse (horizontale Achse) und die Schadenhäufigkeiten (vertikale Achse). Die gestrichelte Linie stellt die versicherte Deckung (*detachment point*) dar. Die KNS-Schätzung des BABS [7] dient zum Vergleich.

Interessanterweise liegen bei allen 120 Tarifen die meisten Expertenszenarien unterhalb ihrer *Detachment Points D*, was bedeutet, dass deren erwartete Schäden kleiner als 1.2 GEUR sind. Zudem erscheint die Schätzung aus dem Bericht „Katastrophen und Notlagen Schweiz“ (KNS) des Bundesamts für Bevölkerungsschutz (BABS) [7] konservativer.

4.2 Transporte

Die Expertenszenarien für die Anlagen-Risiken verstehen sich pro Jahr. Bei Transporten gilt jedoch eine Mischrechnung, da die Häufigkeiten der Schadenursachen Unfall und NatCat eher proportional zu den gefahrenen Distanzen skalieren, während die Häufigkeiten der anderen Schadenursachen Terror, Krieg und Toleranz eher pro Fahrt gelten. Diese unterschiedlichen Risikoexponierungen erschweren die Ermittlung der Jahresprämie erheblich.

Es zeigt sich jedoch glücklicherweise, dass die Komponenten Unfall und NatCat kaum zur Prämie beitragen, und somit ist es eine gute Näherung, die Anzahl der Transporte als einziges Gefährdungsmass zu betrachten. Für die Prämienberechnung spielt es also keine Rolle, aus welcher Anlage zu welcher Destination ein Transport erfolgt, und die Schadenhäufigkeit skaliert proportional zur Anzahl Transporte. Da der Risikozuschlag die Prämie stark dominiert, skaliert diese also grob mit der Wurzel der Anzahl Transporte: Je mehr Transporte, desto kleiner die Prämie pro Transport.

Dabei gilt ausserdem bei den Szenarien ein Konvoi als ein Transport.

5 Kalibrierungen

Für jede der 120 Tarife aus Tabelle 1 werden die 3 Parameter λ , T und α (6, 11) anhand der Schätzwerte und -breiten der Schadenhäufigkeiten N_s und ΔN_s und Schadenausmasse X_s und ΔX_s ihrer Expertenszenarien s aus Abschnitt 4 (siehe z. B. Tabelle 2) bestimmt. Dies ermöglicht die Berechnung der Statistiken (7, 14, 15) und damit letztlich die Festlegung der Prämien (16).

5.1 Schadenhäufigkeit-Parameter

Da die Expertenszenarien als abdeckend gelten, ergibt sich, dass die Poisson-Intensität λ (7) aus der Summe der Schätzwerte der Schadenhäufigkeit N_s aller relevanten Szenarien s , die dem jeweiligen Tarif zugeordnet sind, geschätzt werden kann:

$$\lambda = \sum_s N_s \quad (17)$$

5.2 Schadenausmass-Parameter

Gegeben, dass ein Schaden einen bestimmten Tarif betrifft, ist die bedingte Wahrscheinlichkeit w_s jedes seiner Expertenszenarien s durch den Quotienten seiner Häufigkeit N_s zur gesamten erwarteten Anzahl Schäden λ (17) definiert:

$$w_s = \frac{N_s}{\lambda} \quad (18)$$

und die daraus resultierende kumulierte Schadenwahrscheinlichkeit:

$$W_s = \sum_{t=1}^s w_t \quad (19)$$

Die Pareto-Schwelle T und der Pareto-Exponent α (11) werden über die Minimierung der Devianz $\mathcal{D}$ geschätzt:

$$\mathcal{D} = \sum_s \left(\frac{X_s - \tilde{X}(W_s)}{\Delta X_s} \right)^2 + \left(\frac{W_s - \tilde{W}(X_s)}{\Delta W_s} \right)^2 \quad (20)$$

Für jedes Szenario s des jeweiligen Tarifs vergleicht diese Devianz die Experten-Schätzwerte des Schadenausmasses X_s und der kumulierten Schadenwahrscheinlichkeit W_s mit den Modellvorhersagen:

$$\tilde{X}(W_s) = T \cdot (1 - W_s)^{-\frac{1}{\alpha}} \quad (21)$$

$$\tilde{W}(X_s) = 1 - \left(\frac{T}{X_s} \right)^\alpha \quad (22)$$

und gewichtet deren Differenzen mit den jeweiligen Schätzbreiten ΔX_s und ΔW_s als Relevanzkriterium. Abbildung 4 veranschaulicht diese Grössen, die die Devianz (20) bestimmen.

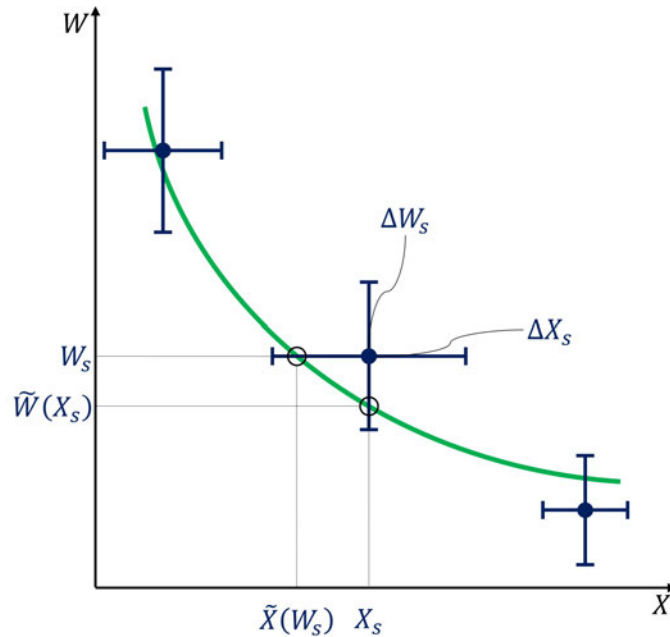


Abbildung 4: Graphische Veranschaulichung der Größen, die die Devianz (20) bestimmen. Dargestellt sind die Schadenausmasse (horizontale Achse) und die kumulierten Schadenwahrscheinlichkeiten (vertikale Achse).

ΔX_s wird direkt aus den Szenarien entnommen (z.B. Spalten 6, 8 und 10 in Tabelle 2), während ΔW_s indirekt über Fehlerfortpflanzung aus Gleichung (18) hergeleitet wird:

$$\Delta W_s = \frac{\Delta N_s}{\lambda} + \frac{N_s}{\lambda} \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta N_s}{\lambda} + \frac{N_s \sum_t \Delta N_t}{\lambda^2} \quad (23)$$

wobei ΔN_s direkt aus den Szenarien (4. Spalte aus Tabelle 2) entnommen wird.

Bei der Minimierung der Devianz (20) können die Pareto-Schwellen T jeden positiven Wert annehmen, während die Werte der Pareto-Exponenten α zwischen 1.0 und 3.0 begrenzt werden, also in dem Bereich, der weltweit typischerweise bei Versicherungsgrossschäden beobachtet wird.

Falls nur ein Szenario für den jeweiligen Tarif spezifiziert ist, kann die Devianz (20) nicht eindeutig minimiert werden. In diesem Fall wird die Pareto-Schwelle T auf den einzigen Schätzwert des Schadenausmasses gesetzt, und für den Pareto-Exponenten α wird der bei anderen grossen Haftpflichtschäden weltweit beobachtete Richtwert $\alpha = 2$ verwendet.

In einer bilogarithmischen Darstellung der Schadenwahrscheinlichkeit als Funktion des Schadenausmasses zeigt sich die Pareto-Verteilung (11) als Gerade. Abbildung 5 veranschaulicht dieses Verhalten für den Tarif 1, bei dem die Pareto-Kalibrierung optimal die Fehlerbalken der 19 Szenarien (siehe Tabelle 2) durchkreuzt.

5.3 Ergebnisse

Die auf die Expertenszenarien kalibrierten Werte der 3 Parameter λ , T und α sind für alle 120 Tarife in den 3 letzten Spalten der Tabelle 1 aufgezeichnet.

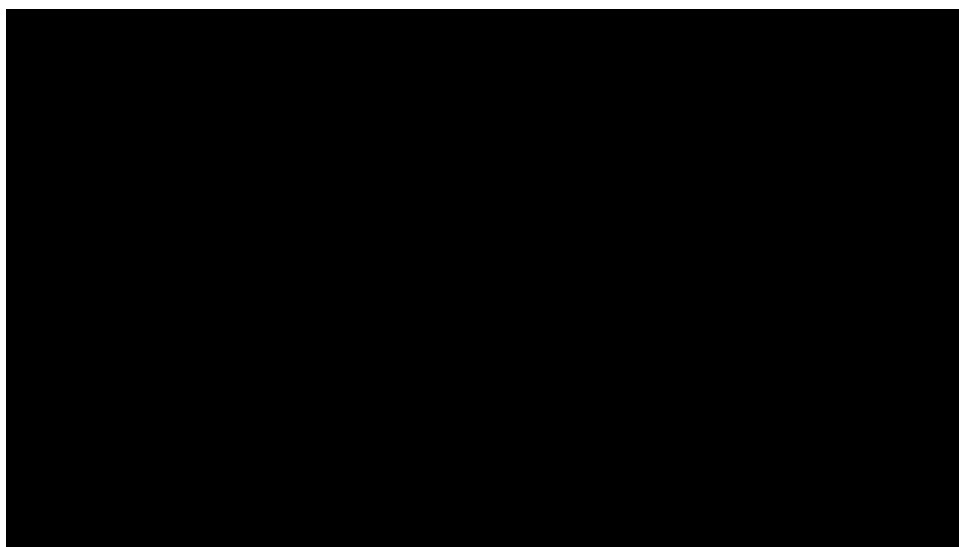


Abbildung 5: Szenarien des Tarifs 16 aus Tabelle 1 für durch Unfälle verursachte P/S/V-Schäden bei grossen Anlagen, einschliesslich ihrer Fehlerbalken und des Ergebnisses der Kalibrierung an einer Pareto-Verteilung (11). Dargestellt sind die Schadenausmasse (horizontale Achse) und die kumulierten Schadenwahrscheinlichkeiten (vertikale Achse).

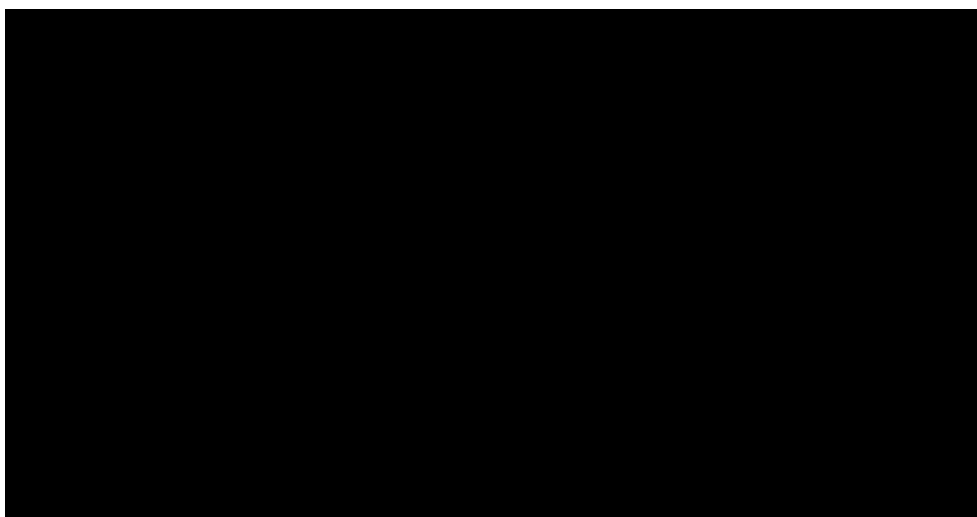


Abbildung 6: Szenarien des Tarifs 16 aus Tabelle 1 für durch Unfälle verursachte P/S/V-Schäden bei grossen Anlagen und deren empirische Stufen-Verteilung (34). Dargestellt sind die Schadenausmasse (horizontale Achse) und die kumulierten Schadenwahrscheinlichkeiten (vertikale Achse).

6 Sensitivitäten

Anhand des Formelwerks können folgende Aussagen zu den Sensitivitäten der EVT-Prämie P (10) bzw. (16) in Bezug auf die Parameter getroffen werden:

- $P \propto \sqrt{\lambda}$ – die Prämie skaliert näherungsweise mit der Wurzel der Poisson-Intensität (6)
- $P \propto T$ – die Prämie skaliert näherungsweise linear mit der Pareto-Schwelle (11)
- $P \propto e^\alpha$ – die Prämie skaliert näherungsweise exponentiell mit dem Pareto-Exponenten (11)

In den folgenden Abschnitten wird die Sensitivität genauer analysiert, anhand gezielter Abweichungen von den Prozeduren in Abschnitt 3 und 5.

6.1 Frequenzerhöhung

In Abschnitt 4 wird angenommen, dass die Expertenszenarien sämtliche möglichen Schadentypen mit korrekten Häufigkeiten abdecken. Diese Hypothese kann infrage gestellt werden, indem diese Häufigkeiten mit einem pauschalen *Events-Not-In-Data*-Faktor $ENID$ multipliziert werden. Dadurch erhöht sich die auf die Expertenszenarien kalibrierte Poisson-Intensität (17) zu:

$$\lambda = \sum_s N_s \cdot (1 + ENID) \quad (24)$$

Entsprechend ändern sich die bedingten (18) und kumulierten (19) Schadenwahrscheinlichkeiten zu:

$$w_s = \frac{N_s}{\lambda} \quad w_0 = \frac{ENID}{1 + ENID} \quad (25)$$

$$W_s = \sum_{t=0}^s w_t = \frac{ENID}{1 + ENID} + \sum_{t=1}^s w_t \quad (26)$$

Die Auswirkungen dieser Modellerweiterung werden in Abschnitt 6.4 näher analysiert.

6.2 Lomax-Verteilung

Alternativ zur Pareto-Verteilung aus Abschnitt 3.2.2 (auch gelegentlich Pareto-Typ 1 genannt) kann die Lomax-Verteilung verwendet werden (auch gelegentlich Pareto-Typ 2 genannt). Die Wahrscheinlichkeitsverteilung und -dichte (11, 12) ändern sich dann zu:

$$\mathbb{W}[X \leq x] = 1 - \left(\frac{T}{T+x} \right)^\alpha \quad (27)$$

$$\frac{d\mathbb{W}}{dx} = \alpha T^\alpha (T+x)^{-\alpha-1} \quad (28)$$

und die beiden Momente (14, 15) werden zu:

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[Y] &= \int_0^\infty dx Y \frac{d\mathbb{W}}{dx} \\ &= \frac{T}{\alpha - 1} \left[\left(\frac{T+A}{A} \right)^{\alpha-1} - \left(\frac{T+A}{D} \right)^{\alpha-1} \right]\end{aligned}\quad (29)$$

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[Y^2] &= \int_0^\infty dx Y^2 \frac{d\mathbb{W}}{dx} \\ &= \frac{2T^2}{(\alpha-1)(\alpha-2)} \left[(\alpha-2) \left(\frac{T+A}{T} \right) \left(\frac{T}{T+D} \right)^{\alpha-1} - (\alpha-1) \left(\frac{T}{T+D} \right)^{\alpha-2} + \left(\frac{T}{T+A} \right)^{\alpha-2} \right]\end{aligned}\quad (30)$$

Die Auswirkungen dieser Modellanpassung werden in Abschnitt 6.4 näher analysiert.

6.3 Fixierte Pareto-Exponent

Alternativ zur Minimierung der Devianz (20) kann der Pareto-Exponent pauschal auf den bei anderen grossen Haftpflichtschäden weltweit (grob) beobachteten Wert $\alpha = 2$ fixiert werden, und die Pareto-Schwelle T mittels einer Momentenkalibrierung über den Erwartungswert des Schadenausmasses

$$\mathbb{E}[X] = \frac{\sum_s N_s X_s}{\sum_s N_s} \quad (31)$$

bestimmt werden. Für die Pareto- und Lomax-Verteilungen (11, 27) ergeben sich dann die Momentenschätzer:

$$\text{Pareto: } T = \mathbb{E}[X] \cdot \left(\frac{\alpha-1}{\alpha} \right) \quad (32)$$

$$\text{Lomax: } T = \mathbb{E}[X] \cdot (\alpha-1) \quad (33)$$

Die Auswirkungen dieser Modellvereinfachung werden in Abschnitt 6.4 näher analysiert.

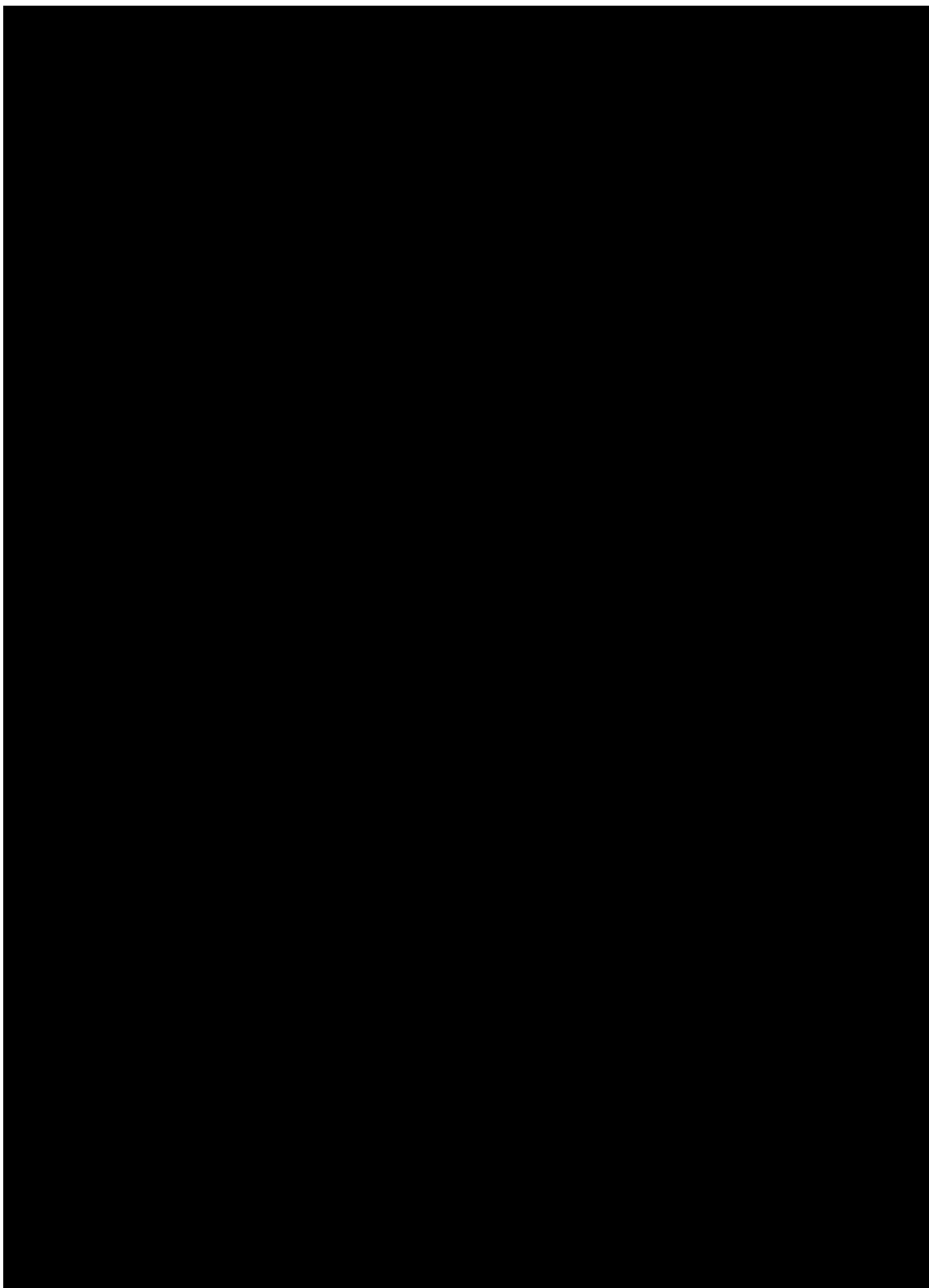
6.4 Sensitivitätsanalyse

Abbildungen 7 und 8 vergleichen für jedes versicherte Risiko die Prämien der vollen Deckungen ($A = 0$) aller 15 Kombinationen aus 5 Schadenursachen und 3 Schadenarten für die folgenden Modellalternativen:

- Pareto-Verteilung (Abschnitt 3.2.2)
- Pareto-Verteilung (Abschnitt 3.2.2) mit $ENID = 50\%$ (Abschnitt 6.1)
- Lomax-Verteilung (Abschnitt 6.2)
- Lomax-Verteilung (Abschnitt 6.2) mit $ENID = 50\%$ (Abschnitt 6.1)

Während Abbildung 7 die Vergleiche mit der Kalibrierung aus Abschnitt 5.2 durchführt, verwendet Abbildung 8 die vereinfachte Prozedur aus Abschnitt 6.3 und fixiert den Pareto-Exponenten $\alpha = 2$.

In beiden Abbildungen zeigen die geringen Unterschiede die Robustheit der expertenbasierten EVT-Modellierung.



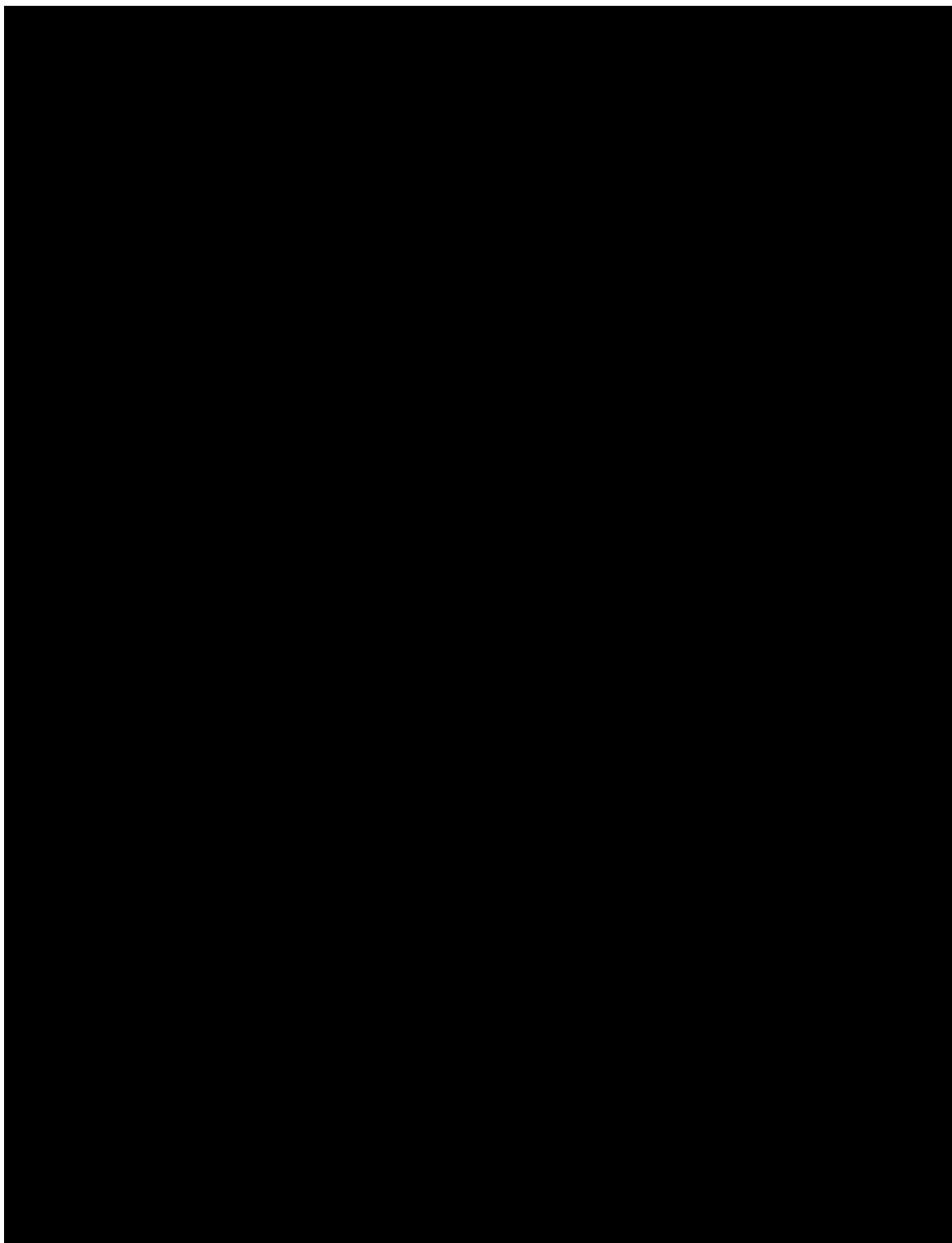
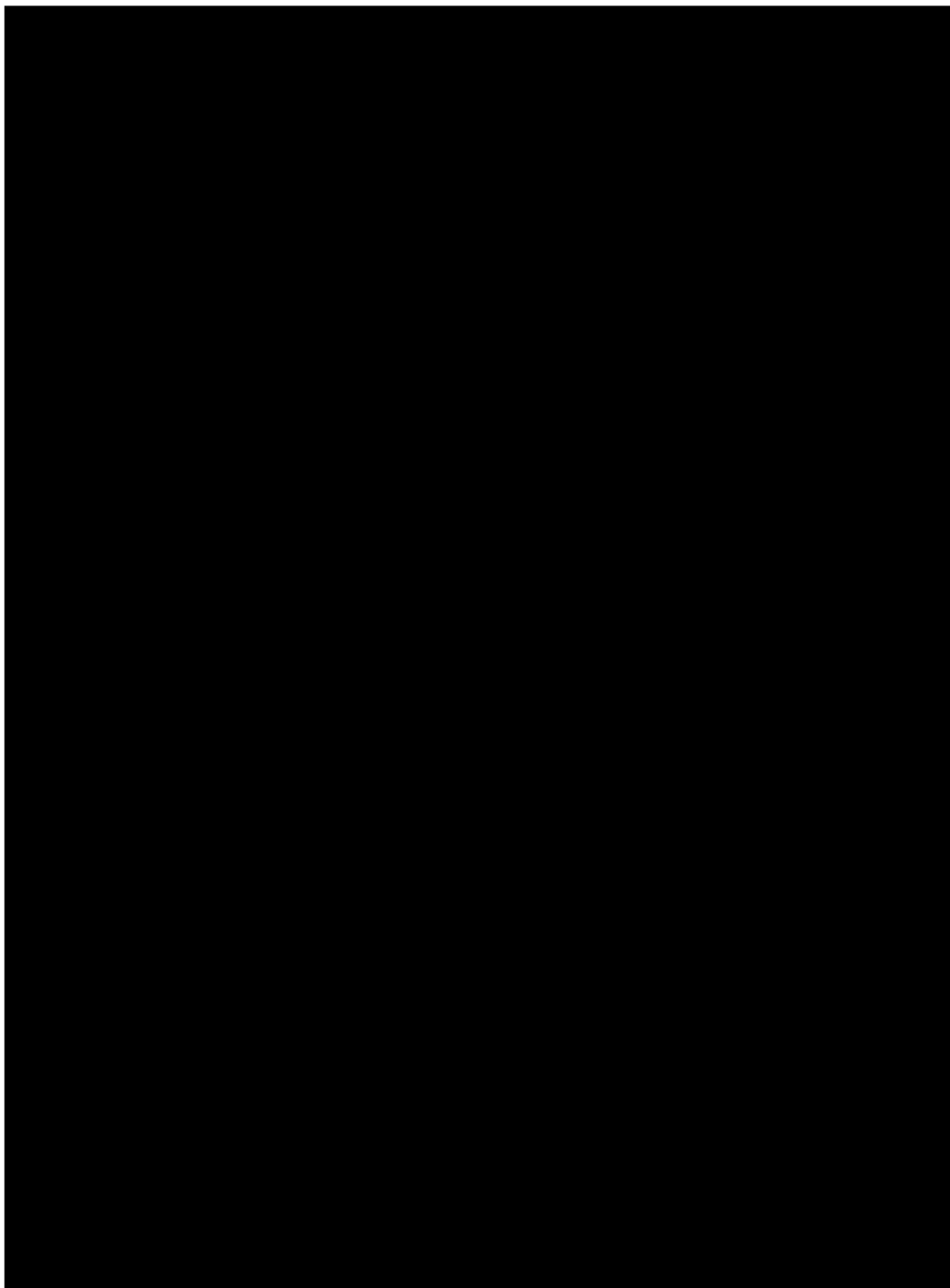


Abbildung 7: Prämien in CHF der vollen Deckungen der verschiedenen versicherten Risiken für unterschiedliche Modellalternativen. Paretotyp 1 entspricht der Pareto-Verteilung (11) und Paretotyp 2 der Lomax-Verteilung (27). Der Pareto-Exponent α und die Pareto-Schwelle T sind wie in Abschnitt 5.2 bestimmt.



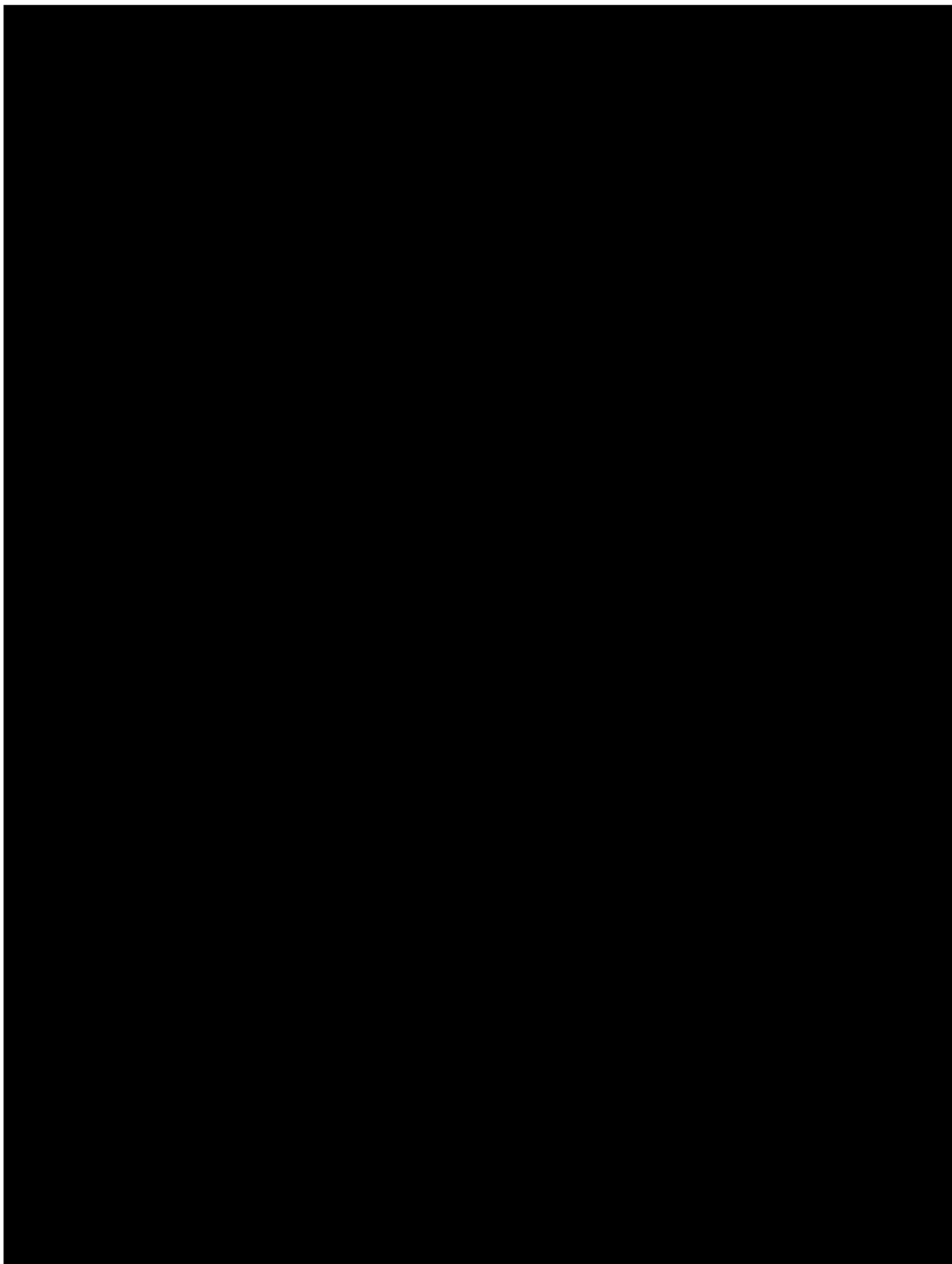


Abbildung 8: Prämien in CHF der vollen Deckungen der verschiedenen versicherten Risiken für unterschiedliche Modellalternativen. Paretotyp 1 entspricht der Pareto-Verteilung (11) und Paretotyp 2 der Lomax-Verteilung (27). Der Pareto-Exponent $\alpha = 2$ ist fixiert und die Pareto-Schwelle T wird wie in Abschnitt 6.3 bestimmt.

7 Plausibilisierungen

7.1 Empirische Stufen-Verteilung

Zum Vergleich können die Tarife ebenfalls mit der empirischen Stufen-Verteilung der Expertenszenarien berechnet werden. Sie bildet das einfachste expertenbasierte Modell, das lediglich die Expertenszenarien unverändert übernimmt. Eine Summe singulärer Dirac-Verteilungen δ ersetzt dann die Wahrscheinlichkeitsdichte (12):

$$\frac{d\mathbb{W}}{dx} = \sum_s w_s \cdot \delta(x - X_s) \quad (34)$$

wobei X_s die Schadenausmasse der Expertenszenarien des betrachteten Tarifs sind, und sich die Wahrscheinlichkeiten w_s (18) weiterhin aus den Schadenhäufigkeiten der Expertenszenarien ableiten. Abbildung 6 veranschaulicht diese Stufen-Verteilung, die die 19 Szenarien des Tarifs 1 (siehe Tabelle 2) genau durchkreuzt.

Die Schadenhäufigkeiten (17) bleiben somit unverändert, aber die Momente (14, 15) ändern sich zu:

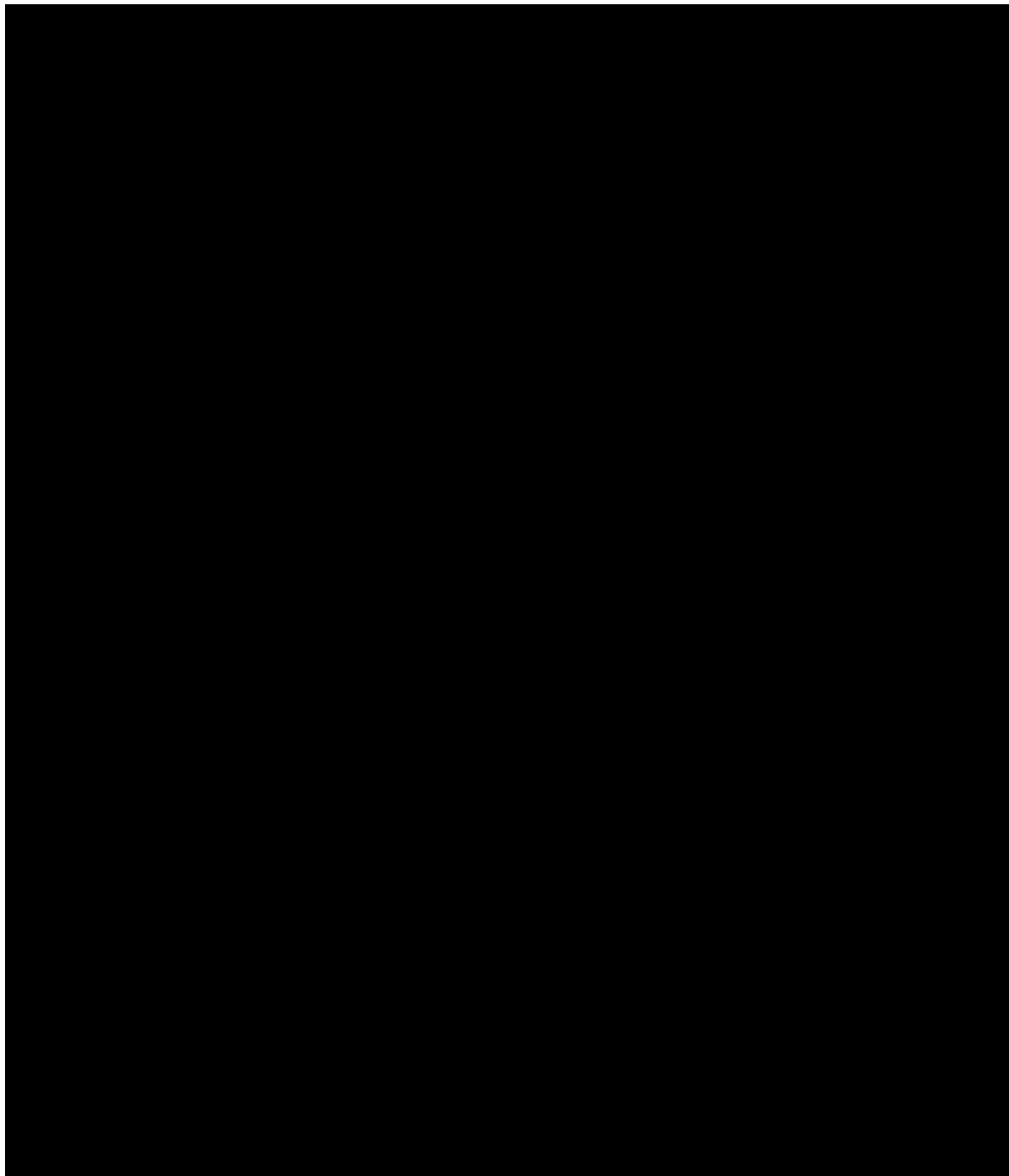
$$\mathbb{E}[Y] = \int_0^\infty dx Y(x) \frac{d\mathbb{W}}{dx} = \sum_s w_s \cdot XL(X_s) \quad (35)$$

$$\mathbb{E}[Y^2] = \int_0^\infty dx Y(x)^2 \frac{d\mathbb{W}}{dx} = \sum_s w_s \cdot XL(X_s^2) \quad (36)$$

Da die empirische Stufenverteilung im Grunde als „Schablone“ zur Kalibrierung der Pareto-Verteilungen dient, sollten die resultierenden Statistiken nicht allzu stark von jenen der EVT-Anpassung abweichen und in der Regel zumindest derselben Grössenordnung entsprechen. Dies wird auch tatsächlich bei allen versicherten Risiken in Abbildung 9 beobachtet, die die Erwartungswerte und Standardabweichungen der vollen Deckungen ($A = 0$) des expertenbasierten EVT-Modells mit jenen des empirischen Stufenmodells vergleicht: Die Konzentration der Punkte, die die 15 Kombinationen aus 5 Schadenursachen und 3 Schadenarten repräsentieren, in der Nähe der Diagonalen (die einer perfekten Übereinstimmung entspricht), zeigt, dass das EVT-Modell nicht grundsätzlich von den Expertenszenarien abweicht.

7.2 Vergleiche

Es ist ausserdem instruktiv, die vom expertenbasierten EVT-Modell resultierenden Prämien mit jenen zu vergleichen, die im Jahr 2024 tarifiert wurden. Die Differenzen zu den Prämien der Privatversicherer sollten nicht allzu gross ausfallen, da diese ebenfalls mittels versicherungsmathematischer Modelle berechnet wurden. Im Gegensatz dazu wäre es nicht überraschend, wenn sich die EVT-Prämien deutlich von jenen des Bundes unterscheiden, da letztere auf einer weniger stabilen Grundlage ermittelt wurden. Auch der Vergleich der Transportprämien ist nur bedingt aussagekräftig, da die Privatversicherer zusätzlich zur relativ geringen individuellen Prämie pro Transport eine hohe Basisprämie für alle Transporte verlangen, die sie auf die einzelnen Transporte verteilen. Dieses Verfahren verzerrt den Vergleich mit der in Abschnitt 4.2 vorgestellten klareren Pro-Transport-Tarifierung.



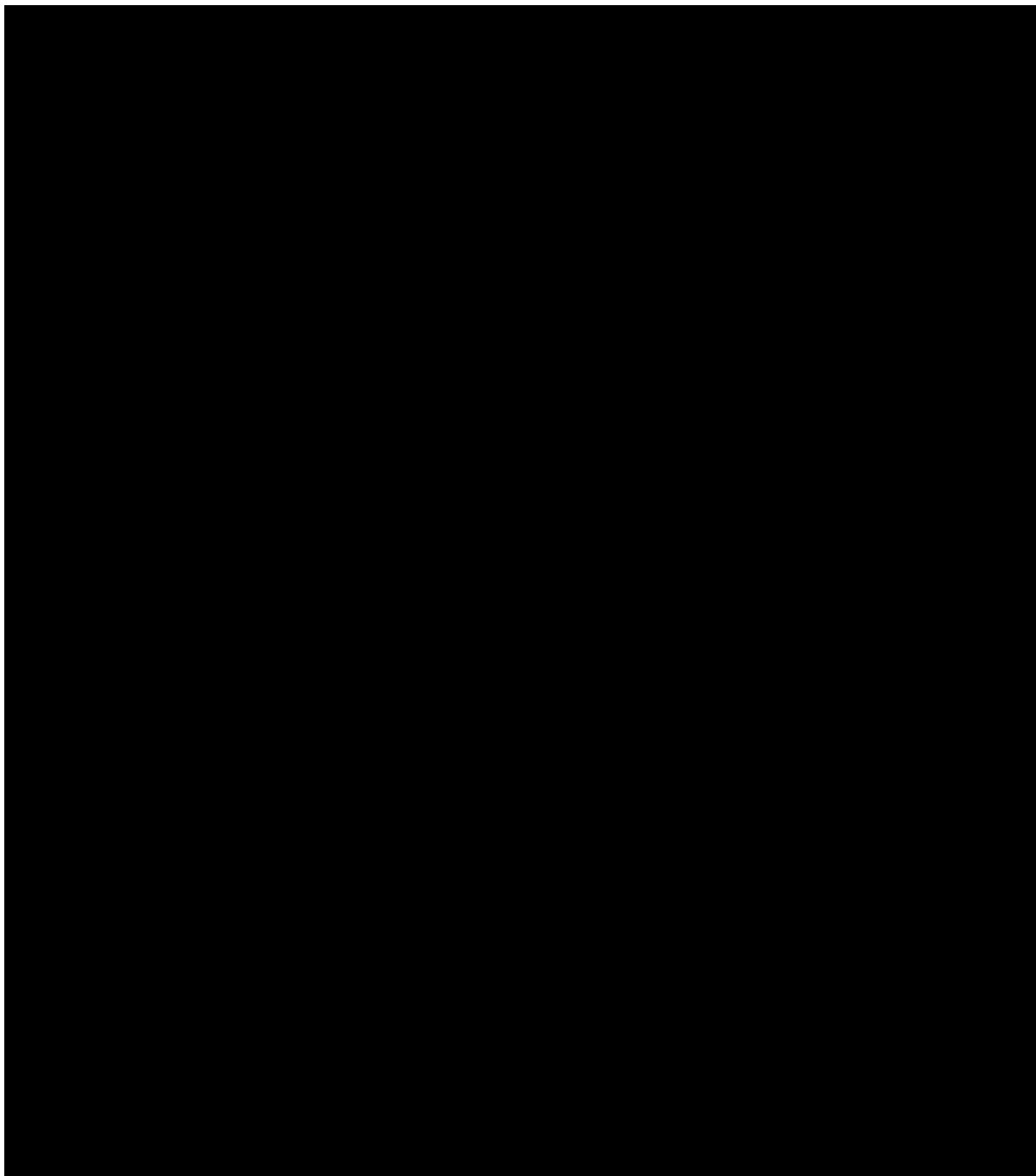


Abbildung 9: Vergleich der Erwartungswerte (links) und Standardabweichungen (rechts) der 15 Deckungen (blaue Punkte) im EVT-Modell (vertikale Achse) und im Stufenmodell (horizontale Achse) für die 8 versicherten Risiken.

Diese Erwartungen bestätigt Abbildung 10, die die Prämien des EVT-Modells der 8 versicherten Risiken mit jenen aus dem Jahr 2024 des Bundes (blaue Punkte) und der Privatversicherer (grüne Quadrate) vergleicht. Tatsächlich zeigt sich eine deutliche Konzentration der Punkte rund um die Diagonale, die einer perfekten Übereinstimmung entspricht, mit einer leichten Tendenz zu tieferen Prämien im EVT-Modell.

Die meisten Prämienunterschiede liegen innerhalb einer Grössenordnung. Angesichts der hohen Unsicherheiten, mit denen die Expertenszenarien behaftet sind, ist dies als positives Ergebnis zu werten. Nur die Prämien der kleinen Anlagen PSI und EPFL liegen deutlich unter jenen, die der Bund im Jahr 2024 tarifiert hatte, was den Erwartungen der betroffenen Parteien entspricht.

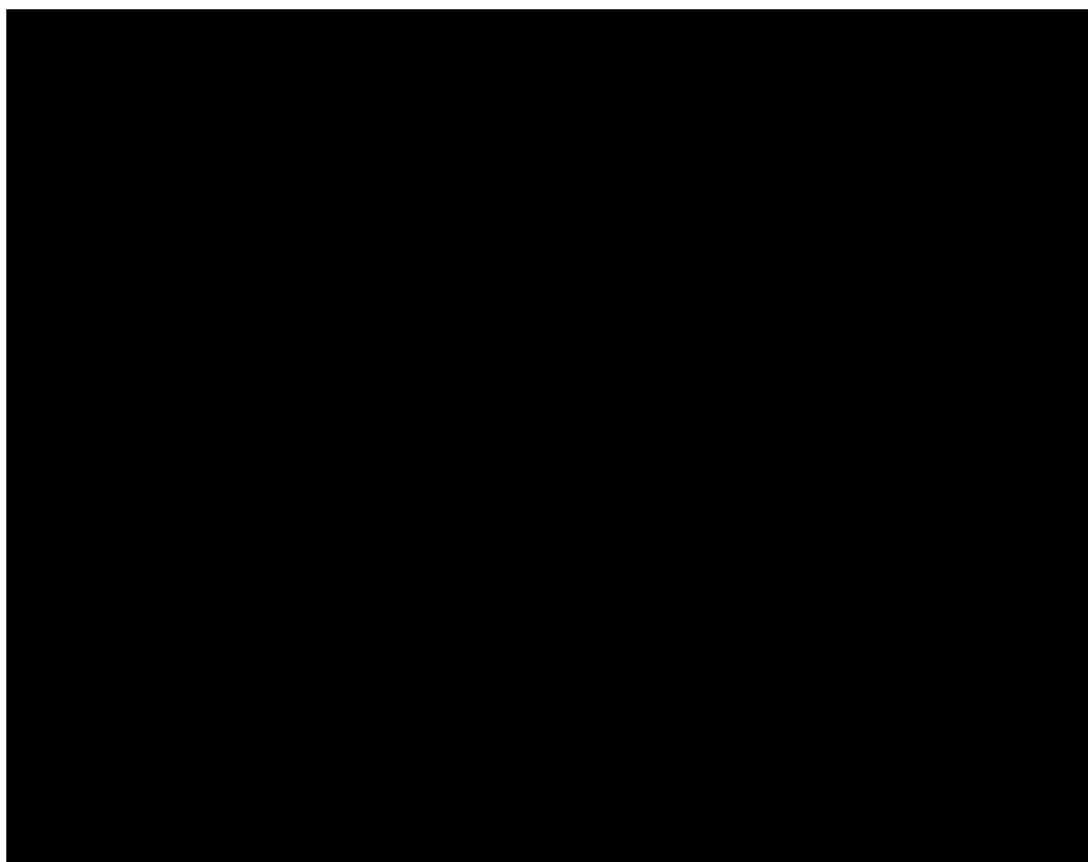


Abbildung 10: Vergleich der Prämien in CHF der 8 versicherten Risiken im expertenbasierten EVT-Modell (vertikale Achse) und der im Jahr 2024 vom Bund sowie von den Privatversicherern tarifierten Werte (horizontale Achse).

8 Annahmen

Wie alle Modelle stützt sich auch das expertenbasierte EVT-Modell auf Annahmen und Vereinfachungen, die eine Beschreibung der Realität überhaupt erst ermöglichen, ohne sie jedoch übermässig zu verzerren. Die folgenden Abschnitte sollen die wesentlichsten Annahmen identifizieren und kritisch bewerten.

8.1 Expertenszenarien

Die gesamte Methodik der vorangehenden Abschnitten basiert auf der fundamentalen Annahme, dass die Szenarien aus Abschnitt 4 den Raum der Möglichkeiten vollständig abdecken und realistisch sind.

Dies ist eine essenzielle Annahme, von der alles in expertenbasierten Modellen abhängt. Eine unabhängige Validierung zur Bestimmung der Schadensausmasse als Komplettierung des ENSI-Gutachtens [8] wäre insofern sinnvoll.

8.2 Risikozuschlag

Zur Finanzierung dieser Deckungen der Nuklearrisiken stehen dem Bund grundsätzlich zwei entgegengesetzte Optionen zur Verfügung: solidarisch oder marktkonform.

Bei einer **solidarischen Risikoübernahme** würde er als Prämie lediglich den erwarteten Schaden verlangen. Als Beispiel einer erwünschten Solidarität bietet sich die Kreditanalogie an, bei der der Bund in Corona-Zeiten der Privatwirtschaft zinslose Darlehen anbot. Es ist aber nicht davon auszugehen, dass die Steuerzahler bereit sind, sich mit den KKW-Betreibern zu solidarisieren. Ausserdem würde in diesem Fall der Bund die Privatversicherer stark unterbieten und somit unerwünscht in den Markt eingreifen und ihn verzerren.

Bei einer **marktkonformen Risikoübernahme** würde der Bund als Prämie zusätzlich zum erwarteten Schaden einen Risikozuschlag verlangen, der der hohen Volatilität angemessen Rechnung trägt. Als Beispiel bietet sich erneut die Kreditanalogie an, wenn der Bund bei Bankrettungen einen geeigneten Zins verlangt, der als Risikozuschlag dient. In diesem Fall würde der Bund wie die Privatversicherer eine Marktprämie verlangen.

Gemäss [1, Art. 12 Abs. 2] wendet der Bund letzteren Ansatz an², der sich im zweiten Glied der versicherungstechnischen Prämie (1) manifestiert.

Der Erwartungswert ist der Schaden, der im Schnitt über längere Zeit erwartet wird. Da im Ereignisfall der Schaden wesentlich höher ausfallen wird, berücksichtigt die Standardabweichung die Streuung um den Erwartungswert, und bestimmt das Kapitalpolster, auf welches zurückgegriffen werden muss, wenn im Ereignisfall viel mehr Kapital erforderlich ist als erwartet. Die Kosten dieses Sicherheitspolsters fliessen in den Risikozuschlag.

Beim Risikozuschlag, der zum Erwartungswert hinzugeschlagen wird, handelt es sich also um einen versicherungsmathematischen Zuschlag und nicht um einen Gewinnzuschlag. Er berücksichtigt die Kosten für die Rückstellung von Kapital. Dieses Kapital ist gebunden und kann nicht für

²“Der Bundesrat legt die Bemessungsgrundlage für die Höhe der Beiträge fest. Diese muss versicherungstechnischen Grundsätzen entsprechen und das jeweilige Risiko der Anlage oder des Transports berücksichtigen.”

andere Zwecke verwendet werden. Die Eidgenössische Finanzmarktaufsicht (FINMA) hat hierzu in ihrem Schweizer Solvenztest (SST) [9] verbindliche Regeln aufgestellt.

Der Bund muss das Kapital nicht zur Verfügung halten. Tritt jedoch der Ereignisfall ein, so hat der Bund die zusätzlichen finanziellen Mittel zur Verfügung zu stellen und der entsprechende Betrag kann nicht für andere Aufgaben eingesetzt werden. Würde der Bund bei der Prämienberechnung nur den Erwartungswert berücksichtigen, dann würden schlussendlich die Steuerzahlenden die über den Erwartungswert hinausgehenden Kosten übernehmen, was diesen gegenüber nicht gerecht wäre. Aus aktuarieller Sicht wäre eine Prämie, die nur gestützt auf den Erwartungswert berechnet wird, zu tief, weil sie die SST Solvenzkriterien nicht erfüllt.

In Abschnitt 3.1 wird der Risikozuschlag mit dem Standardabweichungsprinzip bestimmt. In der Praxis können und werden auch andere Zuschlagsprinzipien angewendet (*Value-at-Risk*, SST, Wang, und weitere), die jedoch numerisch berechnet werden müssen. Die Verwendung der Standardabweichung erlaubt es jedoch, einfache analytische Formeln herzuleiten und die Aggregation der verschiedenen Deckungen pragmatisch durchzuführen.

Die Risikoaversion ρ (2) wird grundsätzlich abhängig vom Risikoappetit eines Versicherungsunternehmens gewählt, das dieses Standardabweichungsprinzip zur Tarifierung anwendet. In der Regel behalten sie deren Wert aus unternehmerischen Gründen geheim. Erfahrungsgemäss variiert er in der Praxis zwischen 10% und 100%. Vom BFE wurde er auf $\rho = 25\%$ festgelegt, damit der resultierende Risikozuschlag bei Kollektivmodellen (3) mit ähnlichen Schadenfrequenzen und Pareto-Verteilungen wie in Abschnitt 3.2 in etwa dem Risikozuschlag entspricht, den ein SST [9] ergeben würde.

Dieser Wert wurde im Rahmen der unabhängigen Validierung [3] als plausibel bestätigt, und spiegelt die Prämien der Privatversicherer im Schnitt gut wider, wie in Abbildung 10 ersichtlich.

Dies ist ein angemessenes Vorgehen, das Verhältnismässigkeit und Transparenz sinnvoll kombiniert.

8.3 Kollektivmodell

In Abschnitt 3.2 werden die versicherten Schäden Y bzw. die ihnen zugrunde liegenden vollen Schäden X als iid angenommen. Dies unterstellt, dass alle Schäden eines bestimmten Tarifs homogen sind.

Innerhalb der jeweiligen 15 verschiedenen Deckungen jedes versicherten Risikos ist dies wahrscheinlich eine gute Annahme.

8.4 Verteilungen

In Abschnitt 3.2.1 wird die Poisson-Verteilung zur Modellierung der Schadenhäufigkeiten verwendet. Diese Wahl ist naheliegend, da sie die Seltenheit von Nuklearvorfällen mit nur einem Parameter gut abbildet. Alternative diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilungen, wie z. B. die Bernoulli-Verteilung, würden nahezu identische Ergebnisse liefern.

In Abschnitten 3.2.2 und 6.2 werden Pareto-Verteilungen zur Modellierung des Schadenausmasses verwendet. Diese Wahl ist angemessen, da sie die Extremereignisse von Nuklearvorfällen gut

beschreibt. Tatsächlich muss zwingend eine EVT-Verteilung verwendet werden, sowohl aus theoretischen Gründen [5], als auch weil dieses Verhalten in allen Versicherungsbranchen bei Grossschäden beobachtet wird [10]. Ausschlaggebend ist das Verhalten des Verteilungsendes, das im Limes der Grösstschäden Pareto-verteilt sein muss. Alternative stetige Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die derselben sogenannten Fréchet-Anziehungsdomäne angehören, wie z. B. die Lévy-Verteilung, würden im Verteilungsende nahezu identische Ergebnisse erzeugen.

Die hier gewählten Pareto- und Lomax-Verteilungen sind angebracht, weil sie die meisten Expertenszenarien mit nur 2 Parametern gut anpassen. Bei deren Kalibrierung in Abschnitt 5.3 spiegelt die Beschränkung ihrer Exponenten auf das Intervall $1 \leq \alpha \leq 3$ die weltweite Erfahrung der Versicherungsindustrie mit Grossschäden wider und ergänzt insofern die Expertenszenarien um eine versicherungsmathematische Kreditabilität.

Dies sind angemessene Annahmen, die solide durch die weltweite Erfahrung der Rückversicherungsbranche bei Grossschäden untermauert sind.

8.5 Parameterungenauigkeit

In Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 wird die Unsicherheit um den Erwartungswert, die den Risikozuschlag bestimmt, ausschliesslich durch die Prozessvarianz (statistischen Fehler) der Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben. Nichtsdestotrotz sollte der Risikozuschlag sämtliche Unsicherheiten berücksichtigen, also auch die Parameterungenauigkeit (systematischen Fehler).

Die Parameterungenauigkeit der Schadenhäufigkeiten könnte berücksichtigt werden, indem die Unsicherheit ΔN der Häufigkeiten der (unabhängigen) verschiedenen Expertenszenarien

$$\Delta N^2 = \sum_s (\Delta N_s)^2 \quad (37)$$

zur Poisson-Varianz (7) addiert würde:

$$\mathbb{V}[N] = \lambda + \Delta N^2 \quad (38)$$

Das zweite Glied kann jedoch vernachlässigt werden, weil in der Regel ΔN derselben Grössenordnung wie λ ist. Da $\lambda \ll 1$ gilt, folgt $\Delta N^2 \ll \lambda$.

Die Parameterungenauigkeit des Schadenausmasses kann nur numerisch geschätzt werden und wird hier ebenfalls vernachlässigt.

Insofern wird die aktuarielle Prämie leicht unterschätzt.

8.6 Aggregation

In Abschnitt 3.3 werden die Prämien der 15 verschiedenen Tarife eines versicherten Risikos aggregiert. Dabei werden deren Erwartungswert-Komponenten arithmetisch addiert und ihre Standardabweichungs-Komponenten entweder arithmetisch oder quadratisch addiert, abhängig davon, ob die Deckungen dieselbe Schadenursache teilen oder nicht.

Die arithmetische Summierung der Standardabweichungen unterstellt eine komonotone Abhängigkeit der Schadenarten, wenn sie aus derselben Schadenursache resultieren: Dies ist eine leicht konservative Annahme, die für eine analytische Formulierung der Prämien notwendig ist.

Insofern wird die aktuarielle Prämie leicht überschätzt.

8.7 Kumule und Deckelung

In Abschnitt 3.3 berücksichtigen die Summierungen der Prämienkomponenten nicht, dass der Deckungsbetrag der einzelnen Tarife zugleich als Gesamtdeckungssumme des versicherten Risikos dient (*annual aggregate limit*). Es kann also vorkommen, dass bei seltenen Grossereignissen die Summe der Schäden der verschiedenen Schadenarten die Deckelung durch die Gesamtdeckungssumme überschreitet. Solche Ereignisse können nur numerisch berücksichtigt werden und werden in dieser analytischen Formulierung der Prämien vernachlässigt.

Insofern wird die aktuarielle Prämie leicht überschätzt.

8.8 Skalierung der Transporte

In Abschnitt 4.2 wird festgestellt, dass die Unfall- und NatCat-Expertenszenarien, deren Häufigkeiten proportional zu den gefahrenen Distanzen skalieren, wesentlich weniger zur Prämie beitragen als die anderen Expertenszenarien zu Terror, Krieg und Toleranz, deren Häufigkeiten proportional zur Anzahl der Fahrten skalieren. Aufgrund der Dominanz des Risikozuschlags skaliert die Jahresprämie für Transporte also in guter Näherung mit der Wurzel ihrer Anzahl.

Dies ist angesichts der grossen Unsicherheiten, die allgemein mit den Expertenszenarien verbunden sind, eine angemessene Näherung, die Verhältnismässigkeit und Transparenz sinnvoll kombiniert.

8.9 Kalibrierung

In Abschnitt 5 werden die Parameter des EVT-Modells an die Expertenszenarien angepasst. Für die Schadenhäufigkeitsverteilungen geschieht dies mit dem Momentenschätzer, der bei Poisson-Verteilungen asymptotisch unverzerrt ist. Für die Schadenausmassverteilungen geschieht dies durch die Minimierung der Devianz, die die Unsicherheiten der Expertenszenarien berücksichtigt.

Dies sind angemessene Schätzer, die einfach zu handhaben sind und Verzerrungen weitgehend vermeiden.

9 Tool Handhabung

Das expertenbasierte EVT-Modell ist in einem Excel®-Tarifizierungstool implementiert [11]. Es besteht aus 3 Reitern, die – bis auf orange markierte Eingabefelder – schreibgeschützt sind. Dieser Schreibschutz dient lediglich der Vermeidung von Fehlmanipulationen und kann bei Bedarf (z. B. bei einer Überarbeitung der Expertenszenarien) jederzeit ohne Passwort aufgehoben werden.

Der erste, grün markierte Reiter **Tarifierung** dient der jährlichen Tarifierung und ist mit wenigen Eingaben einfach zu bedienen. Die beiden anderen, rot markierten Reiter **Szenarien** und **Berechnungen** dienen der Ermittlung der expertenbasierten EVT-Prämien und sollten in der Regel nur bei Änderungen der Szenarien oder des Modells von erfahrenen Spezialisten bearbeitet werden.

9.1 Jährliche Tarifierung

9.1.1 Grüner Reiter Tarifierung

Die Ermittlung der Gesamtjahresprämien der verschiedenen versicherten Risiken erfordert kein Spezialwissen. Sie benötigt lediglich die Eingabe weniger aktualisierter Angaben in den orange markierten Eingabefeldern:

<u>Eingabefeld</u>	<u>Funktion</u>
Tarifierungsjahr	Dient lediglich der Angabe des Tarifierungsjahr.
Wechselkurs CHF/EUR	Dient zur Umrechnung der in EUR gesetzlich festgelegten Deckungslimiten in CHF.
Versicherter	Dient der Kennzeichnung der versicherten Parteien, von denen der Bund die berechnete Prämie verlangt.
Risiko	Dient zur Festlegung der zu versichernden Risiken. Diese Liste besteht derzeit aus den in Abschnitt 1 aufgelisteten 8 Risiken, kann aber beliebig erweitert oder verkürzt werden, sofern die entsprechenden Szenarien mit demselben Namen im roten Reiter Szenarien spezifiziert sind.
Anzahl	Dient zur gegebenenfalls erforderlichen Bestimmung der Anzahl der jeweiligen Transporte. Wie in Abschnitt 4.2 erläutert, skaliert die Jahresprämie proportional zu Wurzel der Anzahl Transporte, wobei ein Konvoi als ein Transport gilt. Das Feld erscheint nur orange, wenn das Risiko ein Transport ist, und soll nur dann gefüllt werden.
Privatanteile	Dient zur Spezifizierung der Deckungen der jeweiligen $4 \times 5 \times 3 = 60$ Kombinationen von Gefährdungsobjekten, Schadenursachen und Schadenarten aus Abschnitt 1, die von den Privatversicherern im Tarifierungsjahr übernommen werden. Einige Werte sind durch die KHGG nicht zugelassen und würden ggf. deutlich rot hervorgehoben werden. Diese Anteile bleiben in der Regel über Jahre hinweg unverändert und müssen nur gelegentlich angepasst werden.

Die resultierenden Gesamtjahresprämien werden für die festgelegten Risiken unter der Rubrik **Prämie Bund / CHF** ausgewiesen.

Bei Bedarf können für jedes Risiko die einzelnen $5 \times 3 = 15$ Prämienkomponenten pro Schadenursache und -art im Abschnitt **EVT-MODELL** des roten Reiters **Berechnungen** nachvollzogen werden.

9.2 Ausserordentliche Neukalibrierungen und Modellanpassungen

Das Tarifierungstool beinhaltet ein VBA-Makro, das dazu dient, die Kalibrierung zu automatisieren. Insofern handelt es sich um eine Excel[®]-.xslm-Datei, sodass der Nutzer im Falle einer Neukalibrierung deren Ausführung unter Umständen explizit erlauben muss. Zudem benötigt das Tarifierungstool bei einer solchen Neukalibrierung das aktivierte **Solver-Add-in**, um die numerische Minimierung der Devianz (20) zu ermöglichen.

9.2.1 Roter Reiter Szenarien

Der rote Reiter **Szenarien** beinhaltet die Verknüpfungen zu den Expertenszenarien aus den swiss-nuclear-Excel[®]-Dateien [6], sowie deren Verarbeitung, um die relevanten Schätzwerte und -breiten der Schadenhäufigkeiten und -ausmasse herauszufiltern und zu berechnen. Er sollte in der Regel nicht verändert werden, ausser durch erfahrene Spezialisten, typischerweise im Falle einer Überarbeitung der Expertenszenarien.

9.2.2 Roter Reiter Berechnungen

Der rote Reiter **Berechnungen** führt die Berechnung der Prämien durch, einschliesslich der Kalibrierung der Parameter an die Expertenszenarien. Auch dieser Reiter sollte in der Regel nicht verändert werden, ausser durch erfahrene Spezialisten, typischerweise im Falle einer Neukalibrierung an überarbeiteten Expertenszenarien.

10 Abkürzungen

Allgemein

BABS	Bundesamt für Bevölkerungsschutz
BFE	Bundesamt für Energie
EFV	Eidgenössische Finanzverwaltung
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
EVT	Extremwerttheorie (<i>Extreme Value Theory</i>)
FINMA	Eidgenössische Finanzmarktaufsicht
iid	unabhängig und identisch verteilt (<i>independent and identically distributed</i>)
KHGG	Kernenergiehaftpflchtgesetzgebung
KHG	Kernenergiehaftpflchtgesetz
KHV	Kernenergiehaftpflchtverordnung
KNS	BABS Studie zu Katastrophen und Notlagen Schweiz
SST	Schweizer Solvenztest

Risiken

EPFL	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
KKW	Kernkraftwerk
KKW iSmB	Kernkraftwerk in Stilllegung mit Brennelemente
KKW iSoB	Kernkraftwerk in Stilllegung ohne Brennelemente
PSI	Paul Scherrer Institut
ZWILAG	Zwischenlager

Literatur

- [1] *Kernenergiehaftpflichtgesetz vom 13. Juni 2008.*
(Fassung vom 1. Januar 2022; SR 743.44).
<https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2022/43/de>.
- [2] *Bericht zur Überprüfung der Bemessungsgrundlagen für die Bundesprämie nach Kernenergiehaftpflichtgesetzgebung.*
Prime Re Solutions, 31. Oktober 2024.
PRS_BFE_Bericht_Bemessungsgrundlagen_KHV.pdf.
- [3] Denis Sudakov.
Unabhängige Validierung des experten-basierten EVT-Modells.
27. Oktober 2025.
Validierungsbericht.pdf.
- [4] *Kernenergiehaftpflichtverordnung vom 25. März 2015.*
(Fassung vom 1. Januar 2022; SR 732.441).
<https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2021/860/de>.
- [5] Paul Embrechts, Claudia Klüppelberg, and Thomas Mikosch.
Quantitative Risk Management: Concepts, Techniques and Tools.
Springer Verl., ISBN 3-540-60931-8, 2015.
- [6] Jens-Uwe Klügel.
Expertenszenarien und deren Dokumentation.
swissnuclear, April–Dezember 2025.
KHV_Transporte_Gross_Extern_15_10_2025.xlsx
Z1_Szenarien_Transporte_Klein_EXTERN_22_09.xlsx
Z2_Kleine_Anlagen_KKM_Extern_14_10_2025.xlsx
Z2_KKM_Extern_27_11_2025.xlsx
Z5_KHV_ZWILAG_Szenarien_Extern_27_11_2025.xlsx
Z6_KHV_Grosse_Anlagen_Szenarien_EXTERN_22_09_2025.xlsx
Z8_Kleine_Anlagen_PSI_Extern_15_10.xlsx
Datengrundlagen_KHV_Detailliert_Rev_5.pdf
Datengrundlagen_KHV_Zusatzbericht_Rev5.pdf
Datengrundlagen_KHV_Bericht_PSIb_14_10_25.pdf
Datengrundlagen_KHV_Erläuterung_Schadenumfang_Rev1.pdf.
- [7] *Katastrophen und Notlagen Schweiz 2020 / Gefährdungsdossier KKW-Unfall.*
Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS, November 2020.
<https://backend.babs.admin.ch/fileservice/sdweb-docs-prod-babsch-files/files/2023/12/12/f6a0f256-0f9f-40de-b461-39e15f9097c4.pdf>.
- [8] *Plausibilisierung des Datenmaterials der Swissnuclear.*
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, 1. September 2025.
NeuesModellfürdieBemessungderBundesprämienachKHG-PlausibilisierungdesDatenmaterialsderSwissnuclear.pdf.
- [9] *Schweizer Solvenztest SST.*
Eidgenössische Finanzmarktaufsicht FINMA.
<https://www.finma.ch/de/ueberwachung/versicherungen/spartenuebergreifende-instrumente/schweizer-solvenzttest-sst/>.
- [10] Peter Antal.

Mathematical Methods in Reinsurance.

ETH, 15. Mai 2009.

[https://test.actuaries.ch/de/downloads/aid!b4ae4834-66cd-464b-bd27-1497194efc96/
id!96/Reinsurance_Script2009_v2.pdf](https://test.actuaries.ch/de/downloads/aid!b4ae4834-66cd-464b-bd27-1497194efc96/id!96/Reinsurance_Script2009_v2.pdf).

[11] *Tarifierungstool des Expertenbasierten EVT-Modells.*

Prime Re Solutions, 31. März 2026.

PRS_BFE_Expertenbasiertes_EVT_Modell_Tarifierung.xlsm.