

Grundzüge einer Risikoanalyse für einen österreichischen Kernkraftwerksstandort

Von L. Kumer, Wien

1. Die Rasmussen-Studie

Entscheidungen, die Kernenergie betreffend, werden mehr denn je durch die öffentliche Meinung geprägt. Die Möglichkeit einer radioaktiven Kontamination bei einem Reaktorunfall ist mit ein Grund für die überwiegend negative Einstellung der Öffentlichkeit zum Bau von Kernkraftwerken in Österreich.

Beim bisherigen Betrieb der Leichtwasserreaktoren kam es zu keiner Aktivitätsfreisetzung durch Überhitzung des Brennstoffs. Ein Großteil des im Reaktorkern enthaltenen Aktivitätsinventars kann nur für den hypothetischen Fall des Kühlmittelverlustes unter gleichzeitigem Versagen der Not- und Nachkühlsysteme freigesetzt werden. Aufgrund einer Wahrscheinlichkeitsberechnung – wie etwa der Rasmussen-Studie (WASH-1400) – kann das Risiko für Störfallabläufe von Sicherheitssystemen bestimmt werden.

Die Rasmussen-Studie [1] ist die bedeutendste und umfangreichste Berechnung dieser Art und wurde im Auftrag der USAEC, Vorläuferorganisation der *Nuclear Regulatory Commission* (NRC), unter der Leitung von N. Rasmussen 1972 begonnen und liegt seit dem Vorjahr in ihrer endgültigen Fassung auf. Die Konsequenzen aus den schwersten postulierten Störfällen, wie Kernschmelzen und Versagen des Sicherheitsbehälters, wurden an einem für die USA typischen Druckwasserreaktor (Surry-I, 788 MWe) und an einem Siedewasserreaktor (Peach Bottom-II, 1065 MWe) ermittelt.

Als Methoden zur systematischen und vollständigen Risikobestimmung wurden im wesentlichen die Fehlerbaum- und Ereigniskettenanalyse angewendet. Derart wurden mehr als 1000 unterschiedliche Unfallabläufe untersucht, von denen die jeweils signifikantesten in sogenannten „Freisetzungskategorien“ zusammengefaßt wurden. Diese Freisetzungskategorien charakterisieren die Abläufe und Wirkungen der Reaktorunfälle derart, daß Unfälle mit gleicher Art der Freisetzung von Radioaktivität aus dem Sicherheitsbehälter zusammengefaßt werden. Durch neun solcher Kategorien für den Druckwasserreaktor und fünf für den Siedewasserreaktor sind alle Möglichkeiten der Aktivitätsfreisetzung abgedeckt. Bei den meisten dieser Unfälle kommt es zum Schmelzen des Brennstoffs.

Zur Risikoermittlung selbst wurde dann jede Freisetzungskategorie mit bestimmten Umgebungsbedingungen – Wetter- und Bevölkerungsverteilung – kombiniert. Diese ergeben sich durch Mittelung der Daten von 66 amerikanischen Kernkraftwerksstandorten.

Anschrift des Verfassers:

Dr. L. Kumer, Kernkraftwerks-Planungsgesellschaft mbH, Jacquingasse 16-18, A-1030 Wien.

Die amerikanische Reaktorsicherheitsstudie WASH-1400, die unter Leitung von Prof. N. Rasmussen im Auftrag der damaligen USAEC durchgeführt wurde, ist immer noch die umfangreichste Abschätzung der Unfallrisiken kommerzieller LWR-Kernkraftwerke. Da diese Studie unter Zugrundelegung der in den USA vorliegenden Randbedingungen und Reaktortypen erstellt wurde, ist sie nicht ohne weiteres auf europäische Länder übertragbar. In der vorliegenden Arbeit wurden die Risikoberechnungen auf österreichische Gegebenheiten hin überarbeitet. Dabei wurden Änderungen in der Bevölkerungsdichte, der atmosphärischen Ausbreitungsbedingungen und der Reaktorsicherheitstechnik berücksichtigt. Daraus ergibt sich für den in Aussicht genommenen österreichischen Kernkraftwerksstandort Stein/St. Pantaleon eine Verminderung des kerntechnischen Risikos gegenüber der amerikanischen Studie.

Die zivilisatorischen Auswirkungen eines Reaktorunfalles, u. a.

- frühzeitige Todesfälle,
- Todesfälle durch späte Krebserkrankungen,
- genetische Folgen,

können daraufhin unter Annahme der biologischen Strahlenwirkung ermittelt werden. Zur Bestimmung der frühzeitigen Todesfälle wird nach dem heutigen wissenschaftlichen Stand eine 100%ige Sterberate bei einer Ganzkörperbestrahlung von 600 rem und höher und eine lineare Rate zwischen 200 rem (keine Todesfolgen) und 600 rem angenommen.

Die Studie errechnet eine Eintrittswahrscheinlichkeit für den denkbar schwersten Kernkraftwerksunfall (das ist Kernschmelzen mit gleichzeitigem Versagen der Sicherheitshülle) von nur 10^{-9} . Die Zunahme in der Anzahl der Krebsfälle und der genetischen Schäden als Folge dieses größten Unfalls ist gegenüber der normalen statistisch erfaßbaren Häufigkeit überhaupt nicht erkennbar.

2. Übertragbarkeit auf österreichische Gegebenheiten

Die in der Reaktorsicherheitsstudie von Rasmussen ermittelten Ergebnisse können sicherlich nicht ohne weiteres auf ein Kernkraftwerk in Österreich übertragen werden. Die Auslegung der Reaktorsicherheitssysteme europäischer und amerikanischer Kernkraftwerke unterscheidet sich wesentlich voneinander. Nach der Freisetzung aus der Sicherheitshülle spielt die Verdünnung der Radioaktivität in der sich ausbreitenden Abluft eine wichtige Rolle. Die Diffusionsgeschwindigkeit ist stark von der gerade vorherrschenden Wetterlage abhängig, besonders von deren atmosphärischer Stabilität. Für ein österreichisches Kernkraftwerk sind die vorgegebenen Wetterlagen zur Ausbreitung und damit Verdünnung einer radioaktiven Wolke günstiger als jene, welche sich aus dem Mittel mehrerer Standorte im WASH-1400 ergibt. Die Begründung dafür liegt in den für Österreich vorherrschenden instabilen Wetterlagen mit hohen Windgeschwindigkeiten.

Die biologischen Auswirkungen eines großen Störfalles hängen aber letztlich von der Bevölkerungsdichte des betroffenen Gebietes ab. Ein Vergleich der kumulativen Population mehrerer deutscher und amerikanischer Standorte sowie des Standortes vom Gemeinschaftskernkraftwerk Tullnerfeld (GKT) und Stein (GKS) ist in Abb. 1 wiedergegeben. Die mittlere Bevölkerungsdichte der 66 amerikanischen Kernkraftwerksumgebungen ist gleich mit der von GKT und liegt um den Faktor 2 niedriger als jene von GKS.

Die Fehler der Ergebnisse der Reaktorsicherheitsanalyse werden durch die Unsicherheit der statistischen Werte

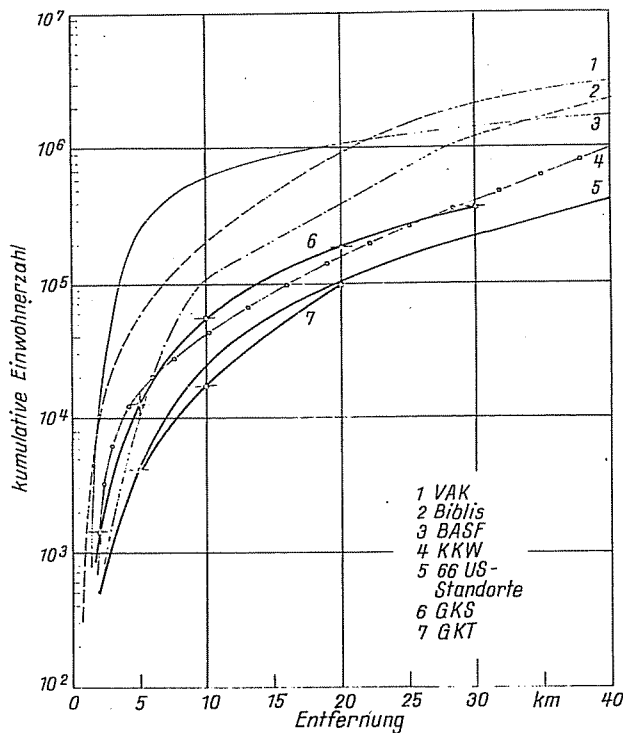


Abb. 1: Population innerhalb der Entfernung vom Kernkraftwerk für verschiedene Standorte.

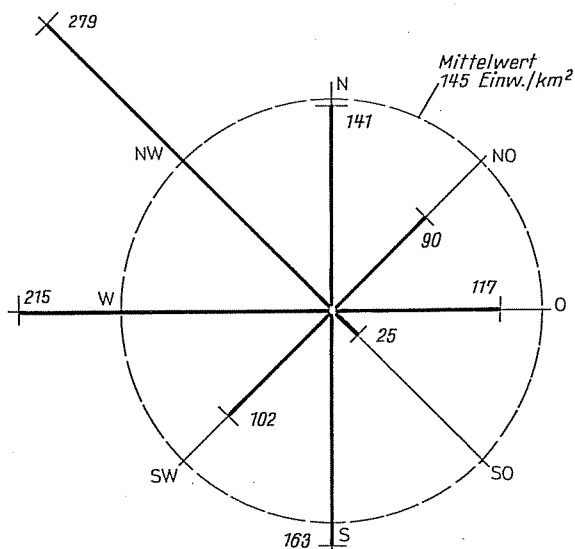


Abb. 2: Bevölkerungsverteilung (Einwohner/km²) in einem Umkreis von 20 km um Stein.
Mittelwert 145 Einw./km²

der Fehlerbaumanalyse bestimmt und durch die Anpassung an einen anderen Standort nicht erhöht.

3. Gegenüberstellung der Bevölkerungsdichte

3.1. Bevölkerungsdichten, über die Richtungen der Windrose gemittelt

Die aus den amerikanischen Kernkraftwerksstandorten ermittelte Bevölkerungsverteilung [1] ist in Tab. 1 wiedergegeben.

Tabelle 1: Rasmussen-Studie

Distanz (km)	8,05	16,1	32,2	80,5
Kumulative Bevölkerung · 10 ³	11	49	228	2413

Für den Standort Stein ergeben sich zunächst ohne Berücksichtigung azimuthaler Unterschiede die in Tab. 2 angegebenen Zahlenwerte.

Tabelle 2: Standort Stein

Distanz (km)	2	5	10	20
Kumulative Bevölkerung · 10 ³	1,407	13,108	56,677	182,951

In Abb. 2 ist die Bevölkerungsdichte des Standortes Stein mit jener der Rasmussen-Studie verglichen.

Wird für den betrachteten Bereich um das Kernkraftwerk eine gleichmäßige Besiedlung angenommen, so werden über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate die spezifischen Einwohnerzahlen mit

Rasmussen-Studie 71,9 Einwohner/km²,

GKS 145 Einwohner/km²

bestimmt.

Somit ergibt sich zunächst für den Standort GKS ein Aufwertungsfaktor 2,0 gegenüber den Rasmussen-Risikozahlen.

Die mittleren Populationsdichten – der USA mit 27 Einwohner/km² und Österreichs mit 85 Einwohner/km² – liegen noch deutlich unter jenen, welche für die Umgebung der amerikanischen Standorte bzw. für GKS berechnet wurden.

3.2. Bevölkerungsdichte unter Berücksichtigung der Windrichtung

Nach dieser generellen Möglichkeit des Vergleiches der Bevölkerungsverteilung werden im folgenden die für die acht Sektoren der Windrose maßgebenden Populationsdichten bei GKS in einem Umkreis von 30 km bestimmt. Dadurch kann eine Korrelation der azimuthal inhomogenen Bevölkerungsverteilung mit der Häufigkeit der Wetterlage durchgeführt werden. Die vorhandenen Daten [2] werden mit den Einwohnerzahlen von Steyr und Linz im Entfernungsbereich 20–30 km ergänzt.

Für die acht Richtungen der Windrose sind in Tab. 3 die Bevölkerungszahlen aufsummiert und in Abb. 3 die berechneten Populationsdichten bis zur Entfernung von 30 km um GKS dargestellt.

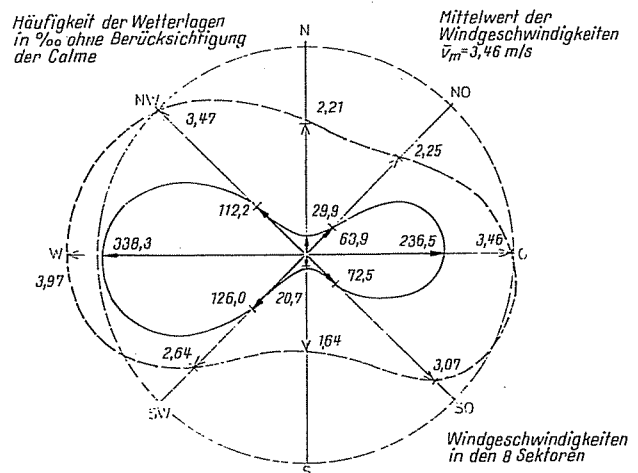


Abb. 3: Häufigkeit der Wetterlagen und Windgeschwindigkeiten in den 8 Sektoren.

Die gemittelte Windgeschwindigkeit über alle Richtungen beträgt $\bar{v}_m = 3,46$ m/s

Tabelle 3: Kumulative Bevölkerungszahlen für Stein ($\cdot 10^3$)

Entfernung bis	2 km	5 km	10 km	20 km	30 km
N	0,23	2,25	4,76	15,27	
NO	0,14	1,05	3,98	10,75	
O	0,14	1,80	5,03	14,16	
SO	0,10	0,10	0,51	7,55	
S	0,39	1,66	6,03	17,49	57,49
SW	0,10	0,80	6,18	20,82	
W	0,10	1,04	10,91	66,11	207,11
NW	0,22	4,41	19,28	30,81	
Summe	1,41	13,11	56,68	182,95	363,95

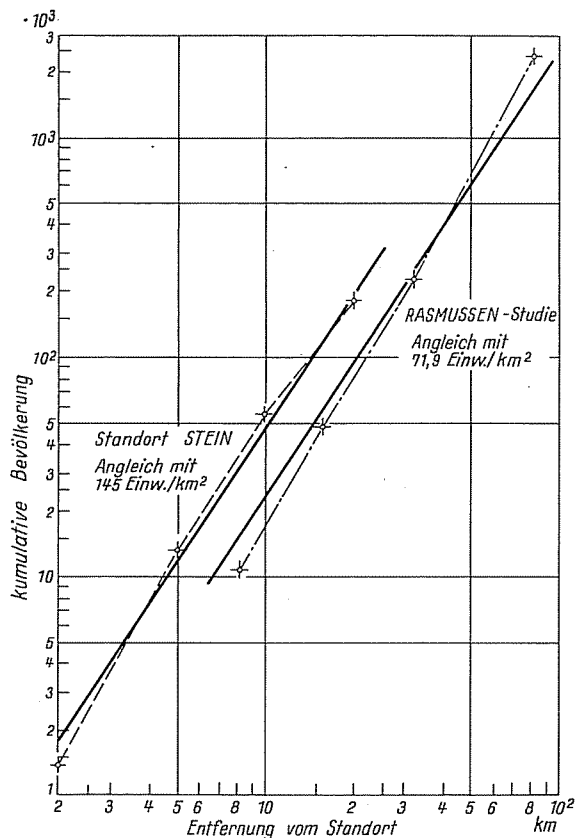


Abb. 4: Bevölkerungsdichte des Standortes Stein gegenüber der Rasmussen-Studie.

4. Häufigkeit der Wetterlagen für den Standort GKS

Die Häufigkeitsverteilung der Stabilitätsklassen für 30°-Sektoren und deren mittlere Windgeschwindigkeiten sind den meteorologischen Beobachtungen von Horsching (Flughafen Linz) entnommen [3]. Die Umlegung dieser Werte auf 45°-Sektoren – wie durch die Angaben über die Bevölkerungsverteilung vorgegeben – erfolgt durch anteilmäßige Berücksichtigung der geänderten Sektoreneinteilung.

Tab. 4 und Abb. 4 zeigen die Häufigkeit der Wetterlagen (%) sowie die mittleren Windgeschwindigkeiten der einzelnen Richtungen:

Die angegebenen Wetterlagen wurden den Wetterkategorien nach Pasquill wie folgt zugeordnet:

labil	Pasquill B
labil/neutral	Pasquill C
neutral/stabil	Pasquill E
stabil	Pasquill F

Tabelle 4: Häufigkeit der Wetterlagen und mittlere Windgeschwindigkeit für acht Richtungen

Richtung	h_1 (‰)	h_2 (‰)	v_m (ms ⁻¹)
N	26,0	29,92	2,21
NO	55,5	63,87	2,25
O	205,5	236,48	3,46
SO	63,0	72,50	3,07
S	18,0	20,71	1,64
SW	109,5	126,01	2,64
W	294,0	338,32	3,97
NW	97,5	112,20	3,47
Calme	131,0	—	0
	1000,0	1000,15	$\bar{v}_m = 3,46$

h_1 ... Häufigkeit unter Berücksichtigung der Calme
 h_2 ... Häufigkeit auf 1,00 normiert (ohne Calme)
 v_m ... Mittlere Windgeschwindigkeit
 (über alle Richtungen gemittelt $\bar{v}_m = 3,46$ ms⁻¹).

Für die extrem stabile Wetterlage der Calme wird (zumindest für deren Dauer) keine Aktivitätsausbreitung angenommen. Sie soll daher im weiteren unberücksichtigt bleiben. In Tab. 5 sind die beobachteten Häufigkeiten der Wetterkategorien in den angegebenen Windrichtungen aufgezeigt.

Tabelle 5: Häufigkeit der Wetterkategorien in %

Richtung	B	C	E	F
N	2,80	4,21	14,5	8,41
NO	5,69	8,36	33,3	16,5
O	20,8	30,5	125	60,1
SO	6,63	9,62	37,1	18,8
S	2,35	3,30	8,94	6,12
SW	5,78	10,8	84,8	24,6
W	13,3	26,7	235	62,9
NW	5,17	9,69	75,2	22,2

5. Bestimmungen der Ausbreitungsparameter und der Strahlendosis

Zur Ermittlung der Aktivitätsausbreitung nach einem Reaktorunfall wurde die Dispersionsformel nach Pasquill angewandt. Dies ist in Übereinstimmung mit der in der Rasmussen-Studie angewandten Theorie über die Ausbreitung einer radioaktiven Wolke von Grundniveau:

$$Z(x) = \frac{Q}{c \cdot A \cdot u + \sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \pi \cdot f \cdot x \cdot \sigma_z(x) \cdot u \cdot \exp(h^2/2 \sigma_z^2)}$$

$Z(x)$ = Aktivitätskonzentration an der Stelle x (Ci s m⁻³)
 Q = Quellenstärke (Ci)
 f = Sektorenweite
 u = Windgeschwindigkeit (m s⁻¹)
 $\sigma_z(x)$ = vertikaler Diffusionsparameter (m)
 h = Emissionshöhe (m)
 cA = Geländefläche ($cA = 2000$ m² für $h = 0$ und $u \geq 1$ m s⁻¹; ansonst $cA = 0$)

Das additive Glied $c \cdot A \cdot u$ steht für die Korrektur der Ausbreitung vom Reaktorgebäude (einer Fläche) gegenüber der Ausbreitung von einer punktförmigen Quelle. Der Diffusionsparameter wird über

$$\ln \sigma_z(x) = \ln c_1 + c_2 \ln x + c_3 (\ln x)^2$$

mit den ebenfalls in [1] verwendeten Größen c_1 bis c_3 bestimmt.

Die Annahme der Strahlenwirkung (lineare Zunahme der Todesrate zwischen 200 und 600 rem) geht mit der amerikanischen Risikostudie konform. Somit kann eine Umrechnung der Folgen eines Reaktorunfalls auf den

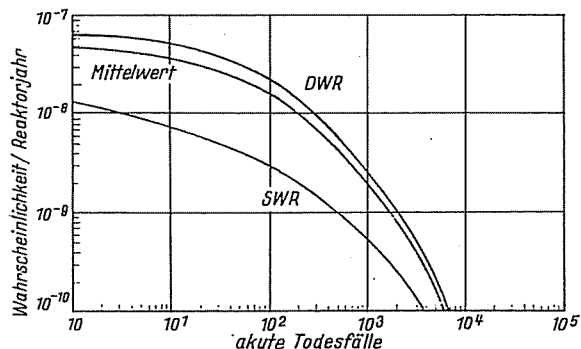


Abb. 5: Wahrscheinlichkeitsverteilung für akute Todesfälle pro Reaktorjahr.

Die Unbestimmtheit ist durch die Faktoren $1/4$ und 4 auf der Abszisse (Konsequenzen) bzw. die Faktoren $1/5$ und 5 auf der Ordinate (Wahrscheinlichkeiten) gegeben

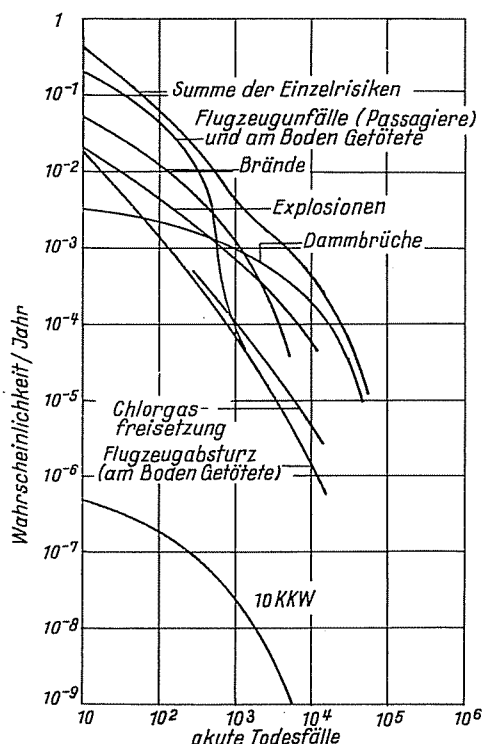


Abb. 6: Risiko und Ausmaß zivilisatorisch bedingter Ereignisse im Vergleich zu zehn Kernkraftwerken.

österreichischen Kernkraftwerksstandort durchgeführt werden. Unter Korrelation der Bevölkerungsdichte mit den Wetterlagen sowie deren Häufigkeit in den einzelnen Windrichtungen wird eine Erhöhung der Anzahl kurzfristig Sterbender um den Faktor 1,8 gegenüber der Rasmussen-Studie berechnet [4].

6. Probabilistische Analyse

Die Abänderung der Risikozahlen der Rasmussen-Studie bezieht sich auch auf die gegenüber den Referenzanlagen geänderten Systeme der Aktivitätsrückhaltung und deren Ausfallwahrscheinlichkeiten. Die Berücksichtigung der neueren Kraftwerkstechnik bei der Risikoermittlung erfordert die Festlegung der durch die Gebäudetechnik bestimmten internen Aktivitätsausbreitung und eine Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit aller möglichen Reaktorunfälle.

Das Laboratorium für Reaktorregelung und Anlagensicherung (LRA) hat gemeinsam mit dem Institut für Reaktorsicherheit (IRS) vom BMI den Auftrag zur Durchführung der deutschen Risikostudie über Reaktorsicherheit erhalten. Aufgrund der dort bisher durchgeführten groben Abschätzungen wird eine Verminderung der Unfallhäufigkeit um 10–50 erwartet [5]. Es ist somit eine konservative Annahme, wenn im folgenden für die Übertragbarkeit der Rasmussen-Wahrscheinlichkeitszahlen auf GKS mit dem Faktor 10 gerechnet wird.

7. Darstellung der Ergebnisse und Vergleich mit anderen Risiken

Die Anpassung der Rasmussen-Studie an den Standort Stein/St. Pantaleon führt unter der alleinigen Berücksichtigung der Bevölkerungsdichte zur Erhöhung der Unfallfolgen (Soforttote) um den Faktor 2,0. Werden die meteorologischen Verhältnisse von GKS mitberücksichtigt, vermindert sich dieser Faktor auf 1,8. Letzteres ist auf die vorwiegend günstigere atmosphärische Ausbreitung bei instabiler Wetterlage zurückzuführen.

Die gegenüber den beiden älteren Referenzanlagen der Rasmussen-Studie abgeänderte und verbesserte Sicherheitstechnik der Not- und Nachkühlsysteme führt nach vorläufigen Abschätzungen zur Verminderung der Eintrittswahrscheinlichkeit großer Reaktorunfälle um mindestens den Faktor 10.

Aufgrund dessen lassen sich die Ergebnisse der Rasmussen-Studie einem österreichischen Standort anpassen (Abb. 5). Das nukleare Risiko durch zehn Kernkraftwerke den anderen zivilisationsbedingten Risiken gegenübergestellt, zeigt Abb. 6. Letztere wurden unter Berücksichtigung des Quotienten der Einwohnerzahlen USA zu Österreich ebenfalls der Rasmussen-Studie entnommen. Desgleichen sind in Abb. 7 die Risikozahlen von zehn Kernkraftwerken den natürlichen Ereignissen mit Todesfällen gegenübergestellt. Die Umrechnung der Risikoindizes der amerikanischen Studie auf österreichische Verhältnisse erfolgt hier sinngemäß mit dem Quotienten Fläche der USA zu Fläche von Österreich.

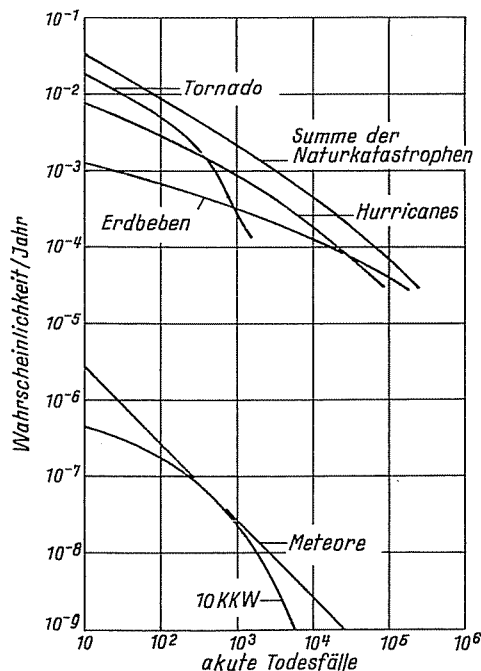


Abb. 7: Risiko und Ausmaß von natürlichen Ereignissen im Vergleich zu zehn Kernkraftwerken.

Ein großer Reaktorunfall wäre sicher ein schwerwiegendes Ereignis, doch keinesfalls ein Unfall von noch nie dagewesenem Ausmaß, wie manche Kritiker der Kernenergie noch immer fälschlich behaupten. So zeigt etwa dieser Risikovergleich, daß die Gefahr eines Dammbruches um fünf Größenordnungen höher liegt als jene eines Reaktorunfalles.

★

Herrn Dipl.-Ing. H. *Hintermayer* danke ich sowohl für die Anregung zu dieser Arbeit als auch für die zahlreichen nützlichen Diskussionen.

Literatur

- [1] N. Rasmussen: Reactor Safety Study, An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power-Plants; WASH-1400 USAEC (Final Report – Oct. 1975).
- [2] Bevölkerungsverteilung und Meteorologie am Standort Stein (St. Pantaleon), SGAE TB-I-200, Juni 1973.
- [3] K. Cihak: Meteorologisches Gutachten vom 19. 11. 1973, Zl. 2012/73.
- [4] Hintermayer, Kumer: KKWP-Bericht, A.2.02.1160 vom 3. 3. 1976.
- [5] Kafka, LRA (München), Vortrag vom 14. 5. 1976, gehalten am Atominstitut der Österr. Hochschulen.

DK 621.311.25 (436):621.039.583