

GLOBAL 2000

WIR
KÄMPFEN
FÜR DAS
SCHÖNE.



DAS ATOMKRAFT- WERK KRŠKO

und seine mehrfache
Erdbebengefährdung

Dr. Roman Lahodynsky





EINLEITUNG

„Mehrfach erdbebengefährdet“ bedeutet: Der Standort des AKW Krško liegt in einer hochaktiven seismotektonischen Zone. Im Becken von Krško und an dessen Rändern verlaufen neotektonisch aktive Störungen. An ihnen können Starkbeben auftreten, die dann sehr hohe Bodenbeschleunigungen verursachen, für die das Atomkraftwerk nicht ausgelegt ist. Deshalb ist die

Sicherheit dieses Kraftwerks höchst gefährdet. Eine Laufzeitverlängerung für dieses Kraftwerk bedeutet, dass ein mögliches Starkbeben, stärker als das bei der Planung angenommene Auslegungsbeben, auf durch Alterungsprozesse geschwächte Materialien trifft, für welche die Auslegungs-Materialkennwerte nicht mehr gelten.

Autor: Dr. Roman Lahodynski, Geologe und ehemaliger Assistent am Institut für Risikoforschung der Universität Wien sowie am Institut für Sicherheits- & Risikowissenschaften der Universität für Bodenkultur Wien.

IMPRESSUM: Medieninhaberin, Eigentümerin und Verlegerin: Umweltschutzorganisation GLOBAL 2000, Neustiftgasse 36, 1070 Wien, Tel. (01) 812 57 30, E-Mail: office@global2000.at, www.global2000.at, ZVR: 593514598, Für den Inhalt verantwortlich: Roman Lahodynski, Redaktion: Carin Unterkircher, Reinhard Uhrig, Layout: flammen/Hannes Eder, Sabine Potuschak, Bilder: GLOBAL 2000-Archiv

STANDORTWAHL VON ATOMKRAFTWERKEN

Was die Standortwahl für Atomkraftwerke betrifft, so wurden diese in erster Linie dort situiert, wo ausreichend Kühlwasser zur Verfügung stand, also entlang von Flüssen. Wenig beachtet wurde die geomorphologische Tatsache, dass Flusstäler häufig tektonischen Störungslinien folgen. Die Möglichkeit einer Standortgefährdung durch „external hazards“, wie z. B. Erdbeben, wurden als „beyond design accidents“, also jenseits wirtschaftlicher Überlegungen und dementsprechend selten bzw. unwahrscheinlich eingestuft. Wissenschaftliche Untersuchungen und Publikationen, welche vor der Standortentscheidung für das jeweilige Gebiet eine Berücksichtigung stärkerer Erdbeben und höherer Bodenbeschleunigungen vertraten bzw. auf nicht beachtete Störungszonen hinwiesen, wurden verschwiegen bzw. als unkorrekt, unwissenschaftlich oder überholt abgetan. Traten dennoch im Zuge späterer Untersuchungen erneut Bedenken auf, meist von Experten benachbarter Länder vorgetragen, welche ein „upgrading“ auf höhere Bodenbeschleunigungen (bzw. auf die von der Internationalen Atomenergie Organisation IAEA empfohlenen Mindestwerte) nahelegten, wurden sie zunächst bekämpft, um später als Teil eines langjährigen Überprüfungsprozesses „auf die lange Bank geschoben“ zu werden.

Die IAEA empfahl generell, das stärkste historische Erdbeben der Region für die Annahme eines maximal möglichen Bebens (MCE) heranzuziehen, welches an dem standortnächsten Punkt einer tektonischen Störungsfläche auftreten könnte. Zur ungefähren Abschätzung der Intensität eines maximal möglichen Bebens wurde meist zur Intensität des stärksten historisch bekannten Bebens der Wert von 1 oder 1,5 addiert. Aus der Entfernung zwischen der Störung und dem Standort ergeben sich aber noch Abminderungen. Darüber hinaus ordnen die nationalen Regelwerke den Intensitätswerten verschieden hohe Beschleunigungswerte zu. Bei der Ausrichtung oder dem „upgrading“ auf höhere Intensitätswerte als 7°MSK trat jedoch auch das rechtliche Problem einer Unvereinbarkeit mit manchen nationalen Ausschließungskriterien für den Standort auf.

Die Argumente bzw. Vorgangsweisen, mit denen eine höhere Erdbebengefährdung bestritten und ein upgrading verschiedener Atomkraftwerke vermieden werden konnte, waren vielfältig und mitunter phantasievoll: Seismische Zonengrenzen hielten sich strikt an Staatsgrenzen oder querten willkürlich große tektonische Störungen, ein Gürtel kleiner Zonen mit schwacher Erdbebentätigkeit schob sich zwischen ein Gebiet stärkerer Erdbeben und der Standortregion und schwächte damit den Einfluss der aktiveren Region ab (Bohunice, Temelín, aber auch deutsche Kraftwerke im Oberrheingraben), Isoleisten bogen vor dem Standort ab, für Fernbeben wurden stark überhöhte Abminderungswerte verwendet (Temelín), tektonische Störungslinien endeten plötzlich vor Erreichen des Kraftwerkstandortes (Temelín) oder wichen dem AKW aus (Bohunice), bogen vor dem AKW fast rechtwinkelig ab (Mochovce), wurden bei der Standortwahl negiert oder blieben von vornherein unberücksichtigt (Krško).

Bei nachträglichen Erdbebengefährdungsanalysen wurden die im Lauf der Zeit häufiger eingeforderten paläoseismologischen Untersuchungen nicht durchgeführt und der Schwerpunkt auf nicht adäquate Untersuchungsmethoden gelegt (Krško) oder die ungünstigen Ergebnisse eines großen Forschungsprojektes unter internationaler Beteiligung (Pegasos-Projekt der Schweiz) wurden einer langjährigen Abschwächung („refinement“) unterzogen.

Abschätzungen der Sicherheitsmargen erfolgten kaum, und wenn doch, dann stellten sich diese als extrem schmal heraus und übertrafen kaum das Design.

Gerade der langwierige Prozess der Durchsetzung des IAEA-Mindeststandards für aseismische Gebiete (!), nämlich eine Ausrichtung der gesamten Anlage auf eine Intensität von 7°MSK und einer maximalen Bodenbeschleunigung von 0,1 g PGA hat gezeigt, dass kein Sicherheitsspielraum mehr überblieb (Tschechien).

Das Atomkraftwerk Krško im ehemaligen Jugoslawien, nicht aus geologischen, sondern aus politischen Gründen

nahe der slowenisch-kroatischen Grenze situiert, wurde nach Bedenken des Kraftwerksherstellers Westinghouse auf eine maximale Bodenbeschleunigung von

0,3 g ausgelegt. Dieser Wert erschien bereits in den 90er-Jahren manchen Fachleuten als unzureichend, angesichts der historischen Starkbeben in der Region.

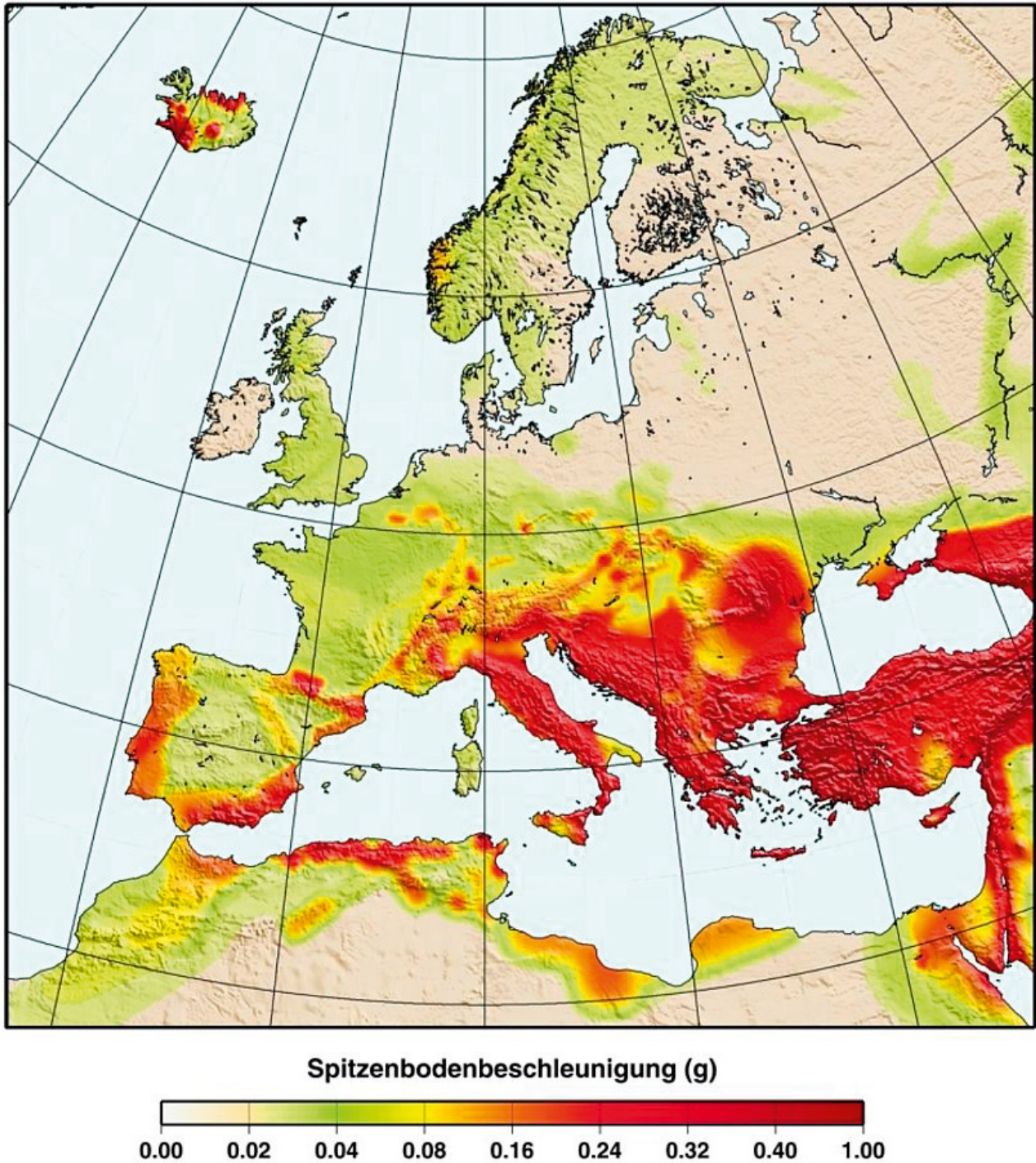


Abbildung 1: Karte der Spitzenbeschleunigungswerte (ESC Europ. Seismolog. Kommission, GFZ, Projekt Sesame). Deutlich zu erkennen sind einige Gebiete höherer Erdbebengefährdung: Friaul (im Nordwesten der Halbinsel Istrien) und die Region Zagreb-Krško (im Nordosten), das Gebiet der Kleinen Karpaten mit Bohunice NPP (nordöstl. des Neusiedlersees) und das Gebiet von Komarno/Komarom an der Donau – Giardini et al. 2003



ERGEBNISSE

Ergebnisse der „Stresstest-Follow-Up-Prozedur“ im Fall Krško

Nach der Nuklear-Katastrophe vom 11. März 2011 in Fukushima, Japan, bei der es durch das Tohoku-Erdbeben und einen Tsunami zum Versagen der Kühlung, zu Kernschmelze und Zerstörung von 4 von 6 Reaktorblöcken samt Abklingbecken kam, sollte die Sicherheit aller europäischen Reaktoren überprüft werden. Ziel dieser „stress tests“ war die Neuabschätzung der Sicherheitsmargen der Atomkraftanlagen. Die nationalen Aufsichtsbehörden lieferten ihre Berichte an ENSREG, welche dann von internationalen Expertengruppen einer Überprüfung („peer review“) unterzogen wurden. Ein wichtiges Thema war dabei auch die Einschätzung der Erdbebensicherheit (www.ensreg.eu/EU-Stress-Tests). Aus der erwarteten Kritik erwuchs ein Follow-Up-Prozess mit mehreren Konferenzen (www.ensreg.eu/EU-Stress-Tests/Follow-up).

Im ersten Rapporteurs' Report 2013 (ENSREG, 2014) wurde die Implementierung des Upgradings der meisten Sicherheitsmaßnahmen für 2016 angekündigt, die Ausführung des Rests war bis 2018 vorgesehen. „The next steps for revision of the 2004 Seismic Probabilistic

Safety Assessment, which will probably be done after all ongoing additional investigations are complete, constitutes a challenge specific to Slovenia due to the seismic characteristics of the Krško site“.

Am 9. September 2013 fand im österreichischen Bundesministerium für Landwirtschaft und Umwelt (BMLFUW) ein Stakeholder-Workshop statt, bei dem die Ergebnisse der nationalen „Stresstests“ und der Beurteilung dieser durch internationale Arbeitsgruppen im Rahmen der ENSREG diskutiert wurden (Decker et al., 2013). Während die nationalen Berichte an die ENSREG die Situation der Erdbebengefährdung der jeweiligen Standorte weiterhin beschönigten, führten die Beurteilungen durch die unabhängigen Expertengruppen zu kritischen Stellungnahmen gegenüber den Kraftwerksbetreibern. Im Zuge des erwähnten Workshops wurde klar, dass es auch nach den Ereignissen von Fukushima nicht zu wesentlichen Verbesserungen bei der Beurteilung der seismischen Gefährdung gekommen war. Dieser Zustand gilt bis heute, 10 Jahre nach Fukushima.

Im Zuge der „Stress Test Follow-Up Actions“ wurde der „Nationale Aktionsplan“ Sloweniens von einem österreichischen Expertenteam durchgesehen und die

einzelnen Sachverhalte kommentiert und mit Empfehlungen ergänzt (Hirsch et al., 2014). Der geologisch-geophysikalische Themenbereich gliedert sich in die fünf Problemkreise seismische Gefährdungsabschätzung, paläoseismologische Belege für potente Störungen, geologische Einschätzung des Bauplatzes für das geplante neue AKW Krško 2, Abschätzung der Interaktion von Bodenaufbau und Antwortspektren, Bestimmung der Sicherheitsmargen seismisch qualifizierter Strukturen, Systeme und Komponenten. Danach folgen weitere technische Aspekte.

Weiterhin wurden neue wissenschaftliche Untersuchungsergebnisse negiert, die empfohlene Anwendung der Methoden der Paläoseismologie und Aktuatotektonik nur sehr beschränkt angewendet und die maximal zu erwartenden Magnituden und Bodenbeschleunigungen viel zu gering angenommen. Dies gilt besonders für die Kraftwerksstandorte in Slowenien, der Slowakei, aber auch in Tschechien. Die Nationale Aufsichtsbehörde Sloweniens blieb bei ihrer Meinung, dass keine weiteren dringenden Maßnahmen nötig wären. Zitat aus dem Final Rapporteurs' Report (ENSREG, 2015): „Additional seismic studies were done in recent years (2011 and 2013). From these analyses it was decided that no further immediate measures were necessary. Further investigations are planned for the next two years“.

Die Vorbehalte gegen die als unzureichend eingestufte Erdbebensicherheit des Atomkraftwerkes Krško verstärkten sich, nachdem nach den Stresstests in der Nähe des Kraftwerks mehrere aktive Störungen nachgewiesen wurden und damit die Auslegungsgrundlage für Erdbebenbelastungen als nicht mehr aktuell angesehen wurde. Deshalb wurden 2016 mehrere internationale Experten zu einem „Fact Finding Workshop on the Active Tectonics of the Krško Region“ eingeladen. Der Koordinator des Workshops, K. Decker, berichtet darüber: „Das Arbeitstreffen bestätigt, dass Krško in einer tektonisch und seismisch aktiven Zone liegt. Es bestätigt außerdem die Existenz von mehreren aktiven Störungen in der Nähe des Kraftwerks. Geologische Daten identifizieren die Orlica-, Artiče- und Libna-Störung sowie eine Überschiebung unter der Artiče-Falte als mögliche Erdbebenquellen. Eine korrekte Einschätzung der Aktivität dieser Störungen ist für eine verlässliche Einschätzung der Erdbebengefährdung von höchster Bedeutung. Unter den Expertinnen und Experten bestand größtenteils Einigkeit über die Existenz der Störungen. Ihre Aktivität wurde dagegen nicht einheitlich eingeschätzt. Letzteres wird auf das Fehlen von paläoseismologischen Daten zurückgeführt. Zahlreiche Expertinnen und Experten betonten daher die Wichtigkeit neuer Untersuchungen, um zweifelsfrei feststellen zu können, ob diese Störungen aktiv sind und um verlässliche Daten über die Geometrie der Störungen,

ihre Kinematik und Bewegungsgeschwindigkeit als Eingangswerte für eine Erdbebengefährdungsstudie zu gewinnen“ (Decker et al., 2017). Dieser Bericht enthält die Beiträge der am Workshop teilnehmenden internationalen Experten. Einige von deren Ergebnissen weisen deutlich auf die bisher unterschätzte Erdbebengefährdung hin.

Basierend auf einem „Topical Peer Review Report“ wurde 2017–2019 der Nationale Aktionsplan über das Management der Materialalterung von Strukturen, Systemen und Komponenten entwickelt. Den Vorschlag, ausgedehnte Shutdowns zur Kontrolle der Alterungsprozesse zu nützen, beantwortet der Kraftwerksbetreiber: „Krško NPP is operating for more than 30 years without any significant shutdowns, except regular outages or short shutdowns due to maintenance reasons. So far, Krško NPP hasn't had an extended shutdown. Also, Krško NPP doesn't plan any extended shutdowns in the future. In case the extended shutdown occurs, Krško NPP will prepare appropriate measures to control aging and other effects“ (SNSA 2019). Es ist nicht bekannt, ob im März 2020 nach dem erdbebenbedingten Shutdown solche Kontrollen begonnen wurden.

Die Position der Aufsichtsbehörde SNSA zur geplanten Laufzeitverlängerung: „Krško NPP shall review the new IAEA Safety Standard SSG-48 Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of NPP and verify that Krško NPP AMP program is in compliance with the standard as a part of PSR3. In case of incompliances, AMP program shall be updated.“ Seitens der Slowenischen Aufsichtsbehörde wird in einer prominent platzierten Grafik ohne Angabe der zeitlichen Einheiten offenbar angenommen, dass nach Ende der Laufzeit des Atomkraftwerks noch keine Verschleißphase mit ihrer steigenden Fehlerrate zu erwarten ist, sondern eine „Useful Life-Periode“ weiterläuft (SNSA, 2019, Deckblatt).

Das Fact Finding Workshop 2016 (Decker et al., 2017) fasst somit den letzten Stand der geologisch-geophysikalischen Untersuchungen und die Vorschläge für ein dringend erforderliche neue Erdbebengefährdungsstudie zusammen. Die wäre aber aus einem wichtigen Grund dringend erforderlich: Kaum beachtet wurde die erforderliche Berücksichtigung der durch Alterungsphänomene verursachten Schwächung der Strukturen, Systeme und Komponenten bei der seismischen Absicherung, die mit Auslegungs-Materialkennwerten erfolgt (z. B. Isar, Deutschland). Somit kommt sogar schwächeren Bebenereignissen eine erhöhte Bedeutung zu. Diese Bedenken treffen auf alle Laufzeitverlängerungen zu, also auch auf die geplante Fortsetzung der Energiegewinnung nach Ende der veranschlagten Laufzeit des Atomkraftwerkes Krško.

SEISMIZITÄT & SEISMOTEKTONIK

Seismizität & Seismotektonik im Grenzgebiet Alpen – Pannonisches Becken – Dinariden

Der Alpenbogen, dessen Vorland und die anschließenden Gebirgsketten wurden als eine Intraplattenregion angesehen, die durch geringe bis mittlere Seismizität charakterisiert wird. Extreme Starkbeben ereignen sich nur in großen Zeitabständen, wodurch sie, wenn sie sich nicht in jüngerer historischer Zeit ereignet haben, nicht aufgezeichnet und somit nicht in der Erdbebenstatistik erfasst sind. Eine landesweite instrumentelle Erfassung von Erdbeben reicht bestenfalls ein paar Jahrzehnte zurück. Historische Erbebenereignisse wurden in Chroniken, die ein paar Jahrhunderte in die Vergangenheit reichen, keinesfalls präzise beschrieben. Daher können die von den seismologischen Anstalten geführten Erdbebenkataloge weder alle tektonisch aktiven Störungszonen identifizieren, noch das größtmögliche Erdbeben (MCE) genau bestimmen und somit die tatsächliche Erdbebengefährdung nur ungenau abschätzen.

Weder kennen wir alle Erdbeben, die sich entlang bekannter Störungszonen ereigneten, noch wissen wir, ob es nicht weitere geologische Störungszonen gibt, welche seismisch aktiv waren oder wieder sein könnten. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass bei Gefährdungsabschätzungen manche aktiven Störungen nicht berücksichtigt wurden, oder sie wurden nicht als „capable fault“ bezeichnet.

Im Fall von Krško betrifft dies die Störungen des Medvednica Gebirges und einige Störungen des Krško-Beckens. Durch tektonische und seismotektonische Untersuchungen in den letzten beiden Jahrzehnten sind die Kenntnisse über die Tektonik und die seismische Gefährdung im Raum der Ränder der Mikroplatten Adria und Tisza (Pannonische Masse) jedoch stark angewachsen. Es hat sich herausgestellt, dass diese Region wegen ihrer plattentektonischen Lage zwischen Alpenkörper und Dinariden zu den am stärksten erd-

bebengefährdeten Gebieten Europas zählt und Starkbeben mit Magnituden um 6 mehrmals in wenigen Dekaden hintereinander auftreten. Dies war in den Jahren 1880 bis 1917 in der Region der Fall.

Diese Erkenntnisse sind in den bisherigen Gefährdungsabschätzungen des AKW Krško unberücksichtigt geblieben, obwohl sie zu einem hohen Anteil von slowenischen und kroatischen Wissenschaftlern erarbeitet wurden. Deren Publikationen sind in den, die wissenschaftliche Problematik zusammenfassenden, Berichten von Sirovich et al. (2014), Hirsch et al. (2014) und Decker et al. (2017) angeführt. Hier werden nur Herak et al. (2009), Markusic & Herak (1999), Markusic et al. (2020), Poljak et al. (2000) und Tomljenovic & Csontos (2001) zitiert. Ganz wesentliche seismologische und seismotektonische Ergebnisse verdanken wir den „Altmeistern“ Vladimir Ribarič, Ljubljana und Eduard Prelogović, Zagreb.

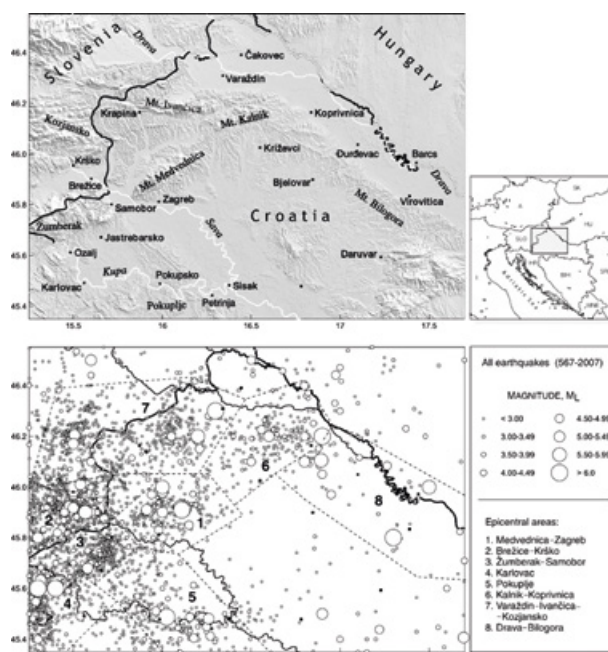


Abbildung 2: Karte der Erdbebenzonen und Magnituden im kroatisch-slowenischen Grenzgebiet (Herak et al. 2009)

ERDBEBENGEFÄHRDUNG DES ATOMKRAFTWERKS KRŠKO

Das Atomkraftwerk Krško liegt im Südosten Sloweniens am Nordrand des Krško-Beckens an der Save, unweit der kroatischen Grenze. Dieses Gebiet wird von den seismisch hochaktiven Plattenrändern zwischen der Adriatischen und der Tisza-Mikroplatte sowie der Eurasischen Platte umschlossen. Hier ereigneten sich mehrere historische Starkbeben – das stärkste (1670) erreichte die Intensität IX (Markusic & Herak, 1999). Das Beben von Brezice am 29.01.1917 erreichte eine Magnitude von 5,7 bis 6,2 bzw. eine Intensität $I_0 = VIII$.

Das ursprüngliche Auslegungsbeben (DBE) für Krško wurde mit 0,3 g pga festgelegt. Dieser Bodenbeschleunigungswert entspricht meist ungefähr einer Intensität von $I_0 = VII - VIII$ (z. B. nach der französischen SCSIN Norm). Bei dieser hohen Intensität können jedoch auch Beschleunigungswerte bis 1 g auftreten. In weiteren PSHAs (1994, 2004) wurden Erhöhungen auf 0,42 g und zuletzt auf 0,56 g empfohlen (SL-2 mit einer Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren). Beide PSHAs basieren lediglich auf den höchst unvollständigen historischen Erdbebendaten. Die sich meist sehr langsam (unter 1 mm/Jahr) bewegenden aktiven Störungszonen können jedoch Magnituden über 6 in zeitlichem Abstand von Jahrhunderten bis zu Jahrtausenden bewirken.

Die aktive Tektonik der Umgebung des Krško-Beckens wird von WNW bis NW streichenden dextralen Seitenverschiebungen bestimmt, darunter die Libna-Störung, weniger als 1 km vom Standort entfernt. Aktive Überschiebungen mit Faltenbildung, hervorgerufen durch Hebung der basalen Gesteine entlang der Randstörungen des Krško Beckens, verlaufen zwischen den Seitenverschiebungen.

In einem von der Europäischen Kommission finanzierten geophysikalischen Untersuchungsprogramm wurde versucht, die neotektonische Aktivität der Störungszonen bedeutungslos gegenüber einer plastischen Verformung des Gebietes darzustellen und behauptet, die meisten Bruchlinien wären inaktiv. Anstelle einer

wie sonst überall nachgewiesenen sprödetektonischen Verformung der Erdkruste wurde ein für das Holozän gültiges geodynamisches Modell präsentiert, in dem nur plastische Verformung aktiv ist, also Brüche nicht existieren. Im gleichen Bericht werden jedoch Seismik-Profile vorgestellt, in denen die tektonischen Verstellungen an verschiedenen Störungen erkennbar sind (Persoglia et al., 2000).

Poljak et al. (2000) hingegen bestreiten die rezente Aktivität der tektonischen Störungen: «In spite of geologic evidence of tectonic displacements along mentioned structures in the past, there is no surface expression of their recent activity».

Die Bedeutung paläoseismologischer Untersuchungen an tektonischen Störungszonen zur Gefährdungsabschätzung seltener Starkbeben mit langen Wiederkehrperioden wurde zusehends erkannt und ist seit langer Zeit ein wichtiger Bestandteil der Empfehlungen der IAEO. In der 2014 veröffentlichten Stress Test Follow-Up Aktion werden Neotektonik und Paläoseismologie ausführlich behandelt und von jüngst durchgeführten paläoseismologischen Untersuchungen berichtet, die einen Versatz an tektonischen Störungen sogar während der Hallstatt-Zeit ergeben haben (Hirsch et al., 2014, S. 15).

Die Verlässlichkeit der PSHA 2004 wird von seismologischen Daten herausgefordert, welche zwischen 1981 und 1989 eine maximale Bodenbeschleunigung von 0,5 g pga am Standort aufgezeichnet haben. Diese Bodenbewegung passierte bei einer Magnitude von lediglich $M=3,9!$

Die ICISA-Kommission empfahl in den 90er Jahren einen pga-Wert von 0,55 g. Eine moderne deterministische Gefährdungsanalyse (Panza et al., 2003), vorgestellt beim IAEO-Symposium in Wien, August 2003, kommt zum Schluss, dass das Atomkraftwerk Krško Erdbeben mit einer Magnitude M größer/gleich 6.5 ausgesetzt ist und Beschleunigungen von 0.8 bis

0.85 g zu erwarten sind! Dieser Wert liegt möglicherweise bereits jenseits der Sicherheitsspielräume für die Unversehrtheit des Reaktorkerns. Sirovich et al. (2014) geben einen umfassenden Überblick zur Seismotektonik und seismischen Gefährdung des Gebietes um das Atomkraftwerk Krško und halten eine maximale Magnitude von $M=7,2$ an der Orlica Störung für durchaus möglich. Sie verweisen auf vertikale Verstellungen im Spätglazial von 1 m, 2 km vom Kraftwerk entfernt, und von 4 m an der Artice Störung, 6 km entfernt.

Das 2020 Zagreb-Beben vom 22.03.2020 erreichte eine Magnitude von 5,4, was einer Intensität von $I=VIII$ bzw. maximalen Bodenbeschleunigungen von 0,4 g entspricht. In Krško, ca. 40 km vom Epizentrum entfernt, waren dadurch Bodenbeschleunigungen von 0,2 bis 0,3 g zu erwarten. Da Krško auf Schotterboden und nicht auf Festgestein gegründet ist, erscheint davon der höhere Wert durchaus realistisch. Dieses Beben stellte aufgrund seiner Entfernung keine Gefährdung für das Atomkraftwerk Krško dar.

Anders sieht es aus, sollte ein Beben mit einem solchen oder höheren Magnitudenwert an einer Randstörung

des Krško-Beckens, oder ganz in der Nähe des Atomkraftwerks auftreten. Da schon einmal ein Beben nahe Krško auftrat, dessen Magnitude von annähernd 4 einen pga-Wert von 0,5 g hervorrief, sind dann durchaus entsprechend höhere Werte zu erwarten, für die es keine Sicherheitsspielräume (safety margin) mehr gibt. Ein geplantes upgrading auf 0,6 g reicht somit zur Abwendung von einer Beschädigung des Reaktorkerns keinesfalls aus, wenn mit wesentlich höheren Werten zu rechnen ist.

Zusätzlich wären jedoch noch die Wirkung mehrfacher Gefährdungen durch gekoppelte Schadensereignisse zu berücksichtigen. Einerseits werden Starkbeben mit Bodenbeschleunigungen von 0,85 g und darüber erwartet, andererseits bedeutet die Laufzeitverlängerung für in die Jahre gekommene Anlage (Sprödbuchanfälligkeit) eine Erhöhung des Risikos. Somit stellt das Atomkraftwerk Krško das am stärksten erdbebengefährdete in Europa dar. Die Erdbebengefährdung spielte bei der politischen Standortwahl keine Rolle, weshalb es auch keine Laufzeitverlängerung für diesen von Anfang an ungeeigneten, höchst unsicheren Standort geben dürfte.

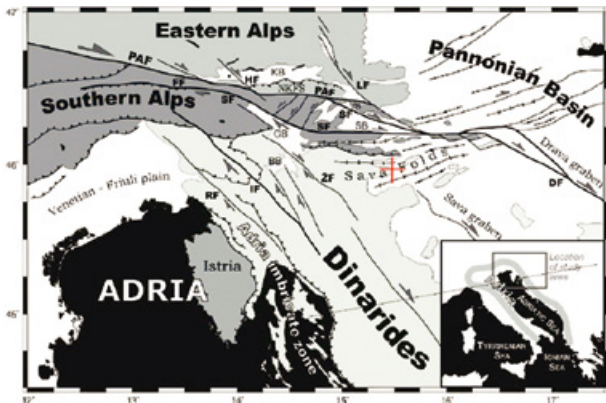


Abbildung 3: Vereinfachte tektonische Karte der Kollisionszone Adria-Alpen. Krško markiert (Sirovich et al., 2014)

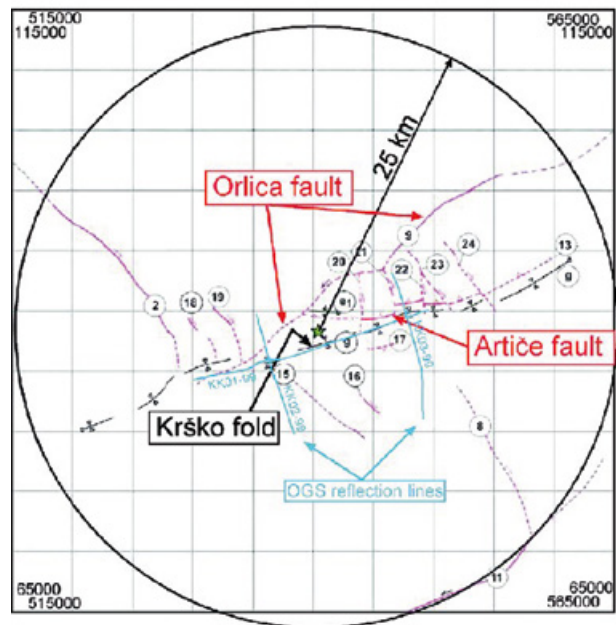


Abbildung 4: Bekannte oder vermutete, im Quartär aktive, tektonische Störungen der Region (Sirovich et al., 2014)



ZUSAMMENFASSUNG

Das slowenische Atomkraftwerk Krško ist das am stärksten erdbebengefährdete Atomkraftwerk Europas. Es liegt am Nordrand des Krško-Beckens, unweit der kroatischen Grenze in einer tektonisch hochaktiven Zone zwischen drei plattentektonischen Einheiten: Adriatischer Sporn, Pannonische /Tisza Mikroplatte und der Eurasischen Platte. Sowohl das Krško-Becken als auch die ca. 40 km südöstlich von Krško gelegene kroatische Hauptstadt Zagreb waren in historischer Vergangenheit von schweren Erdbeben betroffen.

Eine umfassende paläoseismologische Untersuchung fand bis heute nicht statt. Die seitens der unabhängigen ICISA-Kommission empfohlene Aufrüstung des Atomkraftwerkes von 0,3 g auf 0,55 g wurde in einer jüngeren Publikation einer italienischen Arbeitsgruppe (Panza et al., 2003) auf 0,85 g erhöht. Diese Empfehlungen der Erhöhung der Erdbebensicherheit wurden nie umgesetzt.

Neuere Forschungsergebnisse zeigen hingegen, dass die Risiko-Annahmen, unter denen das AKW errichtet wurde und auch die seither empfohlenen „upgradings“ nicht mit den tatsächlich zu erwartenden Starkbeben und Verstellungen an Bruchlinien in der Nähe des Reaktors und dem daraus abgeleiteten Risiko vereinbar sind.

Krško wurde auf einen Spitzenwert der horizontalen Bodenbeschleunigung von 0,3 g ausgelegt. Das Beben der Stärke 5,4 (Intensität VII) vom 22.03.2020 bei Zagreb entsprach einer maximalen Bodenbeschleunigung von 0,4 g. Im 40 Kilometer vom Epizentrum entfernten Krško waren dadurch 0,2 bis 0,3 g zu erwarten. Das Gebiet von Krško wurde jedoch in historischer Zeit von mehreren Starkbeben erschüttert, deren stärkstes (1640) die Intensität IX hatte. Das Beben von Brezice (1917) erreichte die Magnitude 5,7–6,2 (Intensität VIII), das Beben von Zagreb 1880 die Magnitude 6,3. Von solchen Starkbeben an den Randstörungen des Krško-Beckens oder in der Nähe des Reaktors sind daher wesentlich höhere Bodenbeschleunigungen zu erwarten, für die das gealterte Atomkraftwerk Krško keine Sicherheitsspielräume mehr hat. Sirovich et al. (2014) halten eine maximale Magnitude von 7,2 an der Orlica-Störung für möglich.

Da die schon seit 1995 empfohlenen höheren Werte für eine Nachrüstung des Reaktors nicht berücksichtigt wurden, hingegen jetzt ein geplanter weiterer Reaktor am Standort und ein Brennelemente-Lager auf 0,78 g – für einzelne Bauteile sogar auf 1,2 g – ausgelegt werden soll, ist ein Weiterbetrieb des Atomkraftwerkes Krško über die abgeleistete Laufzeit hinaus offenkundig unverantwortlich.

ANHANG

Glossar

- **capable fault:** Tektonische Störung, die imstande ist, einen Versatz von Gesteinsschichten zu bewirken, wodurch eine Gefährdung des Kraftwerks möglich ist. Kein tektonischer Begriff. Als aktiv gilt eine Störung dann, wenn an ihr in den letzten 50.000 Jahren eine tektonische Bewegung erfolgte.
- **DBE design base earthquake, auch SSE safe shutdown earthquake:** Auslegungsbeben
- **ENSREG:** European Nuclear Safety Regulators Group
- **SL-2 safety level 2 =** Sicherheitsstufe 2 der PSA (Probabilistic Safety Analysis)
- **ICISA:** International Commission for Independent Safety Analysis
- **Isoseisten:** Isolinien, die Orte gleicher Intensitäten eines Erdbebens verbinden.
- **MCE (Maximum Credible Earthquake):** größtmögliches Erdbeben
- **MSK-Skala (Medwedew-Sponheuer-Karnik-Skala):** gibt die Intensität eines Erdbebens in zwölf Stärkegraden an
- **pga (Peak Ground Acceleration):** Spitzenwert horizontaler Bodenbeschleunigungen
- **PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment):** Wahrscheinlichkeitsabschätzung der seismischen Gefährdung. Diese sollte auf jeden Fall durch deterministische Untersuchungen ergänzt werden, z. B. durch paläoseismologische Untersuchungen von tektonischen Störungen, wodurch Spuren von Starkbeben in historischer oder prähistorischer Vergangenheit entdeckt werden können, aus denen tatsächlich auf ein maximal mögliches Beben geschlossen werden kann.

Literatur

- Decker, K. (coord.) et al., 2017: Fact Finding Workshop on the Active Tectonics of the Krško Region. Technical Workshop, Klagenfurt / Celovec, 07. April 2016, Rep-0612, BMLFUW www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0612.pdf
- Decker, K., Hirsch, H. & Tomic, B., 2013: Issue Papers on Stress Test Follow Up Actions, 20130904, BMLFUW
- ENSREG, 2012: Peer Review Report on EU Stress Tests for Slovenia, Country report SI final. <http://www.ensreg.eu/sites/default/files/Country%20Report%20SI%20Final.pdf>
- ENSREG, 2012: Peer Review Final Report. Stress Tests performed on European nuclear Power Plants. 53p. http://www.ensreg.eu/sites/default/files/EU%20Stress%20Test%20Peer%20Review%20Final%20Report_0.pdf
- ENSREG, 2013: Rapporteurs` Report Slovenia, ENSREG National Action Plans Workshop. <http://www.ensreg.eu/sites/default/files/SL%20final%20Draft%20rapporteurs%20report%20Slovenia%202013%2004%2025.pdf>
- ENSREG, 2015: 2nd National Action Plan Rapporteurs` Report Slovenia <http://www.ensreg.eu/sites/default/files/SI%20-%20FINAL%20Rapporteurs%20Report.pdf>
- Giardini, D. (ed.) 1999: The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP). Annali di Geofisica, Vol.42, no.6

- Giardini, D., Jimenez, M. & Grünthal, G., 2003: European Mediterranean seismic hazard map. IGCP Project 382 ESC-Sesame
- Herak, D., Herak, M. & Tomljenovic, B., 2009. Seismicity and earthquake focal mechanisms in North-West Croatia. *Tectonophysics*, 465, 212- 220. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195108006173?casa_token=mvlQGo-XbSJ8AAAAA:1h28LVXKdGG4yae6sS-CVNfVhZF-1cB3ZlvG_kGdTdcAJchkD9-z2gxogG201kVYKpHS-19wG32SQ
- Hirsch H., Decker, K. & Tomic, B., 2014: Issue Paper for Slovenia – Stress test Follow-Up Actions. SLO_Consolidated Final Report, BMLFUW https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/nuklearpolitik/euratom/stresstest.html
- IAEA, 2010: Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Specific Safety Guide No. SSG-9, Vienna 2010. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1448_web.pdf
- IAEA, 2015: The Contribution of Paleoseismology to Seismic Hazard Assessment in Site Evaluation for Nuclear Installations. IAEA TECDOC No. 1767, Vienna, 2015. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE-1767_web.pdf
- ICISA, 1995: Evaluation of Seismic Risk of the Site, Components and Structures at Krško NPP. ICISA Documentation IV, Academic Senate of The University of Vienna, Project Nuclear Safety
- Markusic, S. & Herak, M., 1999: Seismic Zoning of Croatia. *Natural Hazards* 18:269-285 https://www.researchgate.net/publication/226979999_Seismic_Zoning_of_Croatia
- Markusic, S., Stanko, D., Korbar, T., Belic, N., Penava, D. & Kordic, B., 2020: The Zagreb (Croatia) M5.5 Earthquake on 22 March 2020. *Geosciences*, 10/7 <https://www.mdpi.com/2076-3263/10/7/252/htm>
- Panza, G. F., Peresan, A., Gorshkov, A. I. & Aoudia, A., 2003: Earthquake preparedness; the contribution of deterministic hazard and earthquake prediction research. Internat. Symposium on Seismic Evaluation of Existing Nuclear Facilities. IAEA, August 2003, Vienna
- Persoglia, S., Gosar, A., Millahn, K., Nicolich, R., Nieto, D., Poljak, M., Vesnaver, A., Wardell, N., 2000: Geophysical research in the surroundings of the Krško NPP. Final report. European Commission – PHARE/TACIS, 68 pp. (unpublished report).
- Poljak, M., Zivcic, M. & Zupancic, P., 2000: The seismotectonic characteristics of Slovenia. In: Seismic Hazard of the Circum-Pannonian Region, 37–55, Birkhäuser, Basel
- Senato della Republica. Ufficio di Presidenza integrato, 13. Commissione permanente (Territorio, ambiente, beni ambientali). Audizione sulla Pericolosità sismica della Centrale Nucleare Slovena „Krško“. Decker, K., Sirovich, L. & Suhadolc, P., Roma 2016 https://www.senato.it/application/xmanager/projects/leg17/attachments/documento_evento_procedura_commissione/files/000/004/453/Documentazione_Krsko.pdf
- Sirovich, L. Suhadolc, P., Costa, G. & Pettenati, F., 2011: A review of the seismotectonics of the Krško plant area (SE Slovenia). 30° Convegno Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida GNGTS, Trieste, 14 –17 Novembre 2011, Abstract volume, 240–242. http://www3.ogs.trieste.it/gngts/files/2011/S21/Riassunti/2.1_Sirovich.pdf
- Sirovich, L. Suhadolc, P., Costa, G. & Pettenati, F., 2014: A review of the seismotectonics and some considerations on the seismic hazard of the Krško NPP area (SE Slovenia). *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*. Vol.55,n.1,175–195 http://www3.ogs.trieste.it/bgta/provavpage.php?id_articolo=614
- Tomljenovic, B. & Csontos, L., 2001: Neogene-Quaternary structures in the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian Basin (Hrvatsko zagorje and Karlovac Basins, Croatia). *Int. J. Earth sciences (Geol. Rundsch)* 90:560–578 <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s005310000176.pdf>