

Beilage 3

Geologische und hydrogeologische Formationen

Inhaltsverzeichnis

GEOLOGISCHE UND HYDROGEOLOGISCHE FOMATIONEN	2
1. Grundlegende geologische und seismologische Informationen	3
1.1. Die Datenbasis	3
1.2. Geologische Charakterisierung des Standortes	3
1.3. Geomorphologie, Oberflächengestaltung	5
a) Flusswassererosions- und Akkumulationsprozesse und -formen	5
b) Erosions- und Aufschichtungsarbeit des Windes, die von ihm geformten Oberflächenformationen	6
c) Senkung, Suffosion und Einsackungen	6
d) Ermessung der Bodenerosions- und Bodenbewegungs-(Bodenrutsch-)prozesse des Hügelgeländes und der Randzonen	6
e) Die geomorphologischen Prozesse der letzten hunderttausend Jahre	7
1.4. Grundsätzliche tektonische und seismologische Charakterisierung	7
2. Erdbebengefährdung des Standortes	12
3. Sich nach oben öffnende Brüche	25
4. Zusammenfassende Bewertung des mikroseismologischen Monitoring	27
5. Die ingenieursgeologischen und geologischen Verhältnisse des Standortes.....	33
6. Hydrogeologische Formationen.....	64
6.1. Beschreibung der hydrogeologischen Formationen.....	64
6.2. Wasserverwendung und Wasserbasen.....	69
6.3. Die im ersten Halbjahr 2003 bewertbaren Ergebnisse des "Monitoringsubprogramms über die Möglichkeiten der Verwendung der unterirdischen Gewässer im Rahmen des Standortcharakterisierungsprogramms bezüglich des umweltschützerischen, standortrechtlichen und wasserrechtlichen Genehmigungsverfahrens"	73
6.4. Untersuchung der hydrologischen Umgebung des Kraftwerkes mit einem Modell.....	77

GEOLOGISCHE UND HYDROGEOLOGISCHE FORMATIONEN

Die Auswahl des Standortes Paks folgte der für die sechziger Jahre kennzeichnenden Industrie Gründungspraxis, beim Bau und Betrieb der Einrichtungen spielten daher in erster Linie die technisch-wirtschaftlichen Voraussetzungen sowie soziale und politische Gesichtspunkte eine Rolle und weniger die Frage nach den natürlichen Faktoren, die die Sicherheit eines Atomkraftwerks beeinflussen könnten.

Die technische Planung erfolgte Anfang der siebziger Jahre, wofür man der damaligen sowjetischen Praxis entsprechend die für den Standort charakteristischen geologischen und seismologischen Verhältnisse untersuchen und klassifizieren musste. Die Datenerfordernisse waren den damaligen sowjetischen Regelungen entsprechend von der Norm SnIP II-A.12-69 vorgegeben. Für eine Erfüllung der damaligen Norm waren ausgedehnte geologische, tektonische und seismologische Untersuchungen nicht notwendig.

Die sowjetischen Regelungen entwickelten sich aber nach dem großen Erdbeben von Vrancea im Jahr 1977 und noch viel mehr Anfang der achtziger Jahre weiter, wurden strenger und schrieben nunmehr spezifische geologische Untersuchungen und eine gründlichere Bewertung der Seismizität des Standortes vor. Zur Zeit der Planung des AKW Paks befand sich die provisorische Norm VSN 15-78 in der Sowjetunion bereits in Kraft, die die Planung bzw. Auslegung eines AKW für ein Erdbeben bereits ähnlich wie die internationale Praxis handhabte. Diese Veränderung der sowjetischen Regulierung hatte aber noch kaum irgendwelche Auswirkungen auf die Planung des AKW Paks, eine, den modernen Erfordernissen entsprechende, geologische Bewertung des Standortes, die Bestimmung eines für den Standort charakteristischen, maßgeblichen Erdbebens wurde erst im Jänner 1996 abgeschlossen.

Zur Zeit der Vorbereitung und der Planung des Atomkraftwerkes gab es im wesentlichen noch keine ungarischen Bestimmungen oder Regelungen bezüglich einer geologischen Untersuchung eines Standortes eines AKW bzw. zur Bestimmung des entsprechenden planerischen Inputs. Die 1979 veröffentlichten "Sicherheitstechnischen Vorschriften für Atomkraftwerke" (ÁBSZ) deklarierte zwar ein Erfordernis der Sicherheit gegenüber den für den Standort charakteristischen Umweltauswirkungen und der adäquaten Planung, allein dies wurde nicht einmal in dem sehr ausführlichen vierten Band weiter konkretisiert. Die IAEA publizierte 1979 ihre Sicherheitsrichtlinien 50-SGI-S1 und 50-SG-S2, die die Erfordernisse bezüglich der Klassifizierung des Standortes und einer erdbebensicheren Planung zusammenfassten. Das Erscheinen dieser Richtlinien beeinflusste das ungarische Sicherheitsdenken nachhaltig, allein diese Dokumente waren – wegen ihres Rechtsstatus – nur informativen Charakters.

Die geologische Neubewertung des Standortes in Paks, seine Klassifizierung und die Festlegung eines maßgebenden Erdbebens zwischen 19896 und 1996 folgte – in Ermangelung spezifischer ungarischer Verordnungen und Regelungen – der von der IAEA repräsentierten internationalen Praxis und Regelung.

Der Prozess der Regelung setzte mit Dezember 1996 ein, mit der Kundmachung des Gesetzes CXVI. aus dem Jahr 1996 "Über die Atomenergie", nach der geologischen Neubewertung des Standortes.

Obwohl die geologische Neubewertung dem 1997 beginnenden Regelungsprozess gerade noch vorausgegangen war, ist dennoch festzustellen, dass die weiter unten zusammengefasste geologische Bewertung sowohl was die Untersuchungsmethoden betrifft als auch bezüglich der Kriterien und Schlussfolgerungen den gültigen ungarischen Bestimmungen voll und ganz entspricht. Dies ist dem zu verdanken, dass die geologische Neubewertung und die neuen ungarischen Bestimmungen den gleichen internationalen Muster, in erster Linie den Richtlinien der IAEA gefolgt sind.

1. Grundlegende geologische und seismologische Informationen

1.1. Die Datenbasis

Die geologische Charakterisierung des Standortes geht – über die zur Verfügung stehende Literatur hinausgehend – auf die Ergebnisse der zwischen 1986 und 1996 zielbewusst durchgeführten Forschungen zurück.

Die Forschungen wurden

- in der Großregion, in einem Umkreis von 320 Kilometer um den Standort,
- in der Region, in einem Umkreis von achtzig Kilometer um den Standort,
- in der weiteren Umgebung des Standortes, in einem Umkreis von zwanzig Kilometern,
- in der Gegend des Standortes, in einem Umkreis von fünf Kilometern,
- und in einem Umkreis von einem Kilometer um den Standort

geführt.

Die Untersuchung erstreckte sich gemäß der IAEA-Richtlinie 50-SG-S1 (Rev1) auf

- geologische,
- geomorphologische,
- geophysische,
- neotektonische und
- seismologische

Daten, je kleiner das untersuchte Gebiet wurde umso größer wurde die Auflösung vom Maßstab 1:1.000.000 bis zu einem von 1:1.000, in der Region IV und V zudem noch ergänzt mit den Daten der hydrologischen, hydrogeologischen und detaillierten geotechnischen Aufschliefungen.

Die wichtigeren Daten, die unterschiedlichen Interpretationen der Daten, die Synthesen der Analysen sind in

- dem zweibändigen, englischsprachigen Bericht über die in Sachen seismische Gefährdung des Standortes des AKW Paks ausgeführten Studien im Rahmen des "Regional Programme for Nuclear Safety, 4.2.1. VVER 440-213 Seismic Hazard Re-Evaluation" der PHARE, der von der Firma OVE ARUP verfasst wurde, sowie ferner
- in der 1997 unter der Redaktion der beiden Mitglieder der ungarischen Akademie der Wissenschaften beim Verlag der Akademie erschienenen Monographie, die unter dem Titel "Die Erdbebensicherheit des AKW Paks" erschienen ist, sich aber eher mit der geologischen Bewertung des Standortes von Paks beschäftigt,

enthalten. Das komplette Forschungsmaterial mit seiner mehr als hundert Titeln enthaltenden Bibliographie ist in den beiden oben erwähnten Werken zu finden.

1.2. Geologische Charakterisierung des Standortes

Im Raum des Kraftwerkes liegt das Basisgebirge gemäß der Bohrung Paks-2 und den geophysischen Untersuchungen zufolge im Verhältnis zur Erdoberfläche etwa 1.600 bis 1.700 Meter tief. Der Kreis der zur Verfügung stehenden Informationen bezüglich der Gesteinsentwicklung ist nicht ganz komplett, dem heutigen Wissensstand nach formieren in diesem Gebiet die aus der Gegend des Mecsek-Gebirges wohlbekannten, zu Granit gewordenen, metamorphen Formationen sowie der aus der Region Görösöny bekannte Muskovit-Biotit-Gneis die Basis des Tiefbeckens. Daten bezüglich einer zweifachen Ausbildung sind bezüglich des betroffenen Gebietes nicht aufgetaucht.

Die das Becken ausfüllenden Sedimente sind wohlbekannt, zum Teil wegen der im Bereich des Kraftwerkes noch vertieften Bohrung Paks-2, zum Teil wegen der im Detail untersuchten Daten weiterer Bohrungen. Auf dem Grundgebirge ruht eine Miozän-Formationsreihe beträchtlicher, fast tausend Meter Dicke, von der ein Teil

Meeres-, ein anderer Festlandsursprungs ist. Zu den Hauptgesteinsarten gehören Rhyolith, Rhyolithschwemmstein, Andesith, Lehmargel, Sandstein, Kalkstein. Die Formationen sind unterschiedlich tektonisiert, in einigen Fällen Neigungsdaten von bis zu dreißig Grad zu beobachten, mancherorts ist die Miozän-Formationsreihe lückenhaft, und berührt entlang der Strukturlinie ihre Abdeckung. Aus den zur Verfügung stehenden Daten über die Entwicklungs- und Faziesverhältnisse der Formationen aus dem Miozän kann eine Landkarte im Maßstab 1:200.000 angefertigt werden.

Der Bekanntheitsgrad der pannonischen Formationen erreicht inzwischen einen Genauigkeitsgrad von 1:100.000. Der untere Teil dieser Formationsgruppe (ca. 12 Millionen Jahre alt), die subpannonischen Formationen, sind in diesem Gebiet recht einheitlich ausgebildet. Ihre Schichteinheiten bestehend aus gesteinsmehligem Lehmargel, lehmargeligem Gesteinsmehl folgen zum Teil auf Schichtmängeln aus Auswaschungen unter Wasser, zum Teil tektonisch auf die älteren (größtenteils Badener) Formationen. In der hundert-hundertfünfzig Meter dicken Sedimenteinheit sind örtlich auch manchmal Einlagerungen vulkanischen Ursprungs zu beobachten, und über die in den Bohrungen in der Umgebung von Paks wahrgenommenen strukturellen Erscheinungen hinausgehend, sind auch in anderen Bohrungen die Spuren der tektonischen Ermüdung wahrzunehmen. Die Ablagerungen der oberen Teile der pannonischen Formation bilden sich überall laufend aus den liegenden Formationen heraus, in den meisten Fällen signalisiert der sprunghafte Anstieg der Sandschichtmengen die veränderten Faziesverhältnisse. Die obere pannonische Schichtreihe ist auf dem ganzen Gebiet durchschnittlich ausgebildet, besteht aus abwechselnd Sand-, Lehmargel und Margelgesteinsmehl in verschiedener Dicke, der obere Teil ist in allen Fällen stumpf, die Formationen aus dem Quartär liegen mit Erosionsdiskordanzen auf diesen. Die Dicke der oberen pannonischen Formationen beträgt in diesem Bereich ca. fünfhundert Meter. Ihre Ablagerung ist von ruhigen, fast waagrecht Neigungsdaten gekennzeichnet, doch können bei einigen Bohrungen die Spuren beträchtlicher struktureller Spannungen in den Formationen beobachtet werden. Das Alter der oberen pannonischen Formationen beträgt ca. fünf bis sechs Millionen Jahre.

Die oben charakterisierten Ablagerungen, die das Becken ausfüllen, sind unseren gegenwärtigem Wissensstand zufolge wie folgt entstanden:

Die ersten Ablagerungen gelangten zur Zeit des Perm auf den Untersatz und sind in der sandsteinartigen, eine oxidative Umgebung signalisierende Ausbildung des vom Fluss transportierten Materials zu finden. Auf dieser sandsteinartige Masse aus dem Perm lagert mit laufenden Übergängen die charakteristisch transgressive Schichtreihe aus dem unteren und mittleren Trias. Anfänglich ist auch hier noch die rote Farbe und der Flusswassercharakter vorherrschend, nur in den höheren Schichten zeigen sich auch zuerst grüne, dann graue Ablagerungen reduktiver Art. Den Delta-Seichtmeer-, dann lagunenartigen Ausbildungen folgen hypersaline Formationen, später werden die Meeresverhältnisse dauerhaft. Der beginnende Abschnitt des Zyklus, der mit einer Sedimentbildung neuerlich bedeutenden Ausmaßes einherging, der Sedimentsatz aus dem oberen Trias, ist in diesem Gebiet unbekannt, sein Vorhandensein könnte aber in den Lager- und Sohlschichten der Ausbildungen aus dem Jura im Bereich Tengelic und Tolnanémedi, die sich vom gegenständlichen Gebiet bereits absetzen, durchaus vorhanden sein – und es erscheint auch nicht ausgeschlossen, dass er auch in den Gegenden des Großen Ungarischen Tieflandes in den Sohlschichten der Juraformationen gefunden werden kann. Die wenigen Daten bezüglich der Ausformung der Ablagerungen aus dem Jura-Zeitalter scheint die Annahme einer ähnlichen Rolle bezüglich der Formationsumstände wie im Mecsekgebiet zu bestärken; es ist nicht ausgeschlossen, dass auf dem Beckengrund demnach dem Steinkohlbestand im Mecsekgebiet entsprechende Formationen zu finden sind. Lokal sind auch einige wenige Angaben zu finden, die auf eine vulkanische Tätigkeit und gleichzeitigen Ablagerungen in der Kreidezeit verweisen.

Für die lange Periode zwischen Kreidezeit und Miozän gibt es keinerlei Hinweise in dieser Gegend bezüglich der Sedimentbildung. Zu den bedeutenden strukturellen Neuordnungen gesellte sich zudem auch eine starke Erosion. In den Mulden und Kesseln, die sich Anfang des Miozäns herausgebildet hatten, und die die Ablagerungen sammelten, setzte sich zuerst eine grobe, aus Schutt bestehende, terrestrische Sedimentreihe ab, auf dem sich wiederum eine auf eine sehr aktive vulkanische Tätigkeit verweisende Formationsreihe setzt: Formationen, die sich aus Vulkanit- und Vulkanosedimenten verschiedenster Art zusammensetzen, die auf verhältnismäßig naheliegende Ausbruchszentren verweisen tauchen in mehreren Schichten auf. Die Ablagerungen vulkanischer Formationen werden von Ort zu Ort von reduziert salzwasserhältigen, süßwasserhältigen Faziesedimenten durchsetzt. Später, im Laufe des Miozäns, tauchen auch die Ufer- und Meeresfazies des sich immer mehr ausbreitenden Meeres in diesem Bereich auf. Ersteren signalisiert der Lehmargel aus Foraminifera, letzteren Ansiedlungen aus Leithakalkstein und Kohlenstoffen. Im weiteren Verlauf reduzierte sich die Beckentiefe weiter, und gleichzeitig wurde auch die Verbindung zu anderen Sedimentsammlern abgebrochen. Zuerst sind hypersaline, örtlich verdunstende, lagunenartige Sedimentbildungsverhältnisse, dann die laufende Aussüßung charakteris-

tisch. Zwar war der Bereich laufend mit Wasser bedeckt, gingen die Umstände der Sedimentbildung mit bedeutenden Veränderungen, die das ganze Karpatenbecken betrafen, einher. Der frühere Wasseraustausch, der bis dahin mit den Gebieten über den Karpaten ein wechselseitiger war, wurde zuerst ein einseitiger und versiegte schließlich vollends. In dem Binnenmeer, dessen Wasserpegel sich erhöhte und dessen Salzgehalt sich reduzierte, legten sich zuerst lehmmergelige Formationen ab, das eindringende gröbere Geröllmaterial wurde von den Strömungen des Binnensees zerbreitet. Im späterem, zur Zeit der Bildung der Draufformationen, sedimentierten zuerst die unterhalb der Wellenbasis befindlichen Sätze, die eine größere Entfernung von den Uferabschnitten anzeigen, dann die im seichten Wasser befindlichen, vom Wellengang schon manchmal aufgewühlte und sich neu absetzende Ablagerungen. Zur Zeit der Herausbildung der ober-pannonischen Formation ging die Tiefe der Sedimentsammler weiter zurück, allein zur Herausbildung von Stümpfen kam es aber nicht. Die Sedimente vom Ende der ober-pannonischen Formation fehlen in dem betroffenen Gebiet zur Gänze, der Ablagerungssatz aus dem Pleistozän lagert auf überall mangelhaft ausgebildeten pannonischen Sedimenten.

Im Laufe des Quartärs war das vielleicht charakteristischste Moment der Sedimentbildung die Bildung des Löss, dessen Folgen im gegebenen Bereich in mehreren Ebenen und Ausprägungen bekannt sind. In Abhängigkeit von den Veränderungen der klimatischen und windenergetischen Umstände geriet Sand bzw. Gesteinsmehl großer Menge auf das Gebiet, der bzw. das im Laufe des späteren Verfalls in vielen Fällen in einer zweitrangigen Position gefunden werden kann. Die im Löss von Fall zu Fall und von Ort zu Ort sich ansiedelnden dünnen Tuffschichten sind gleichzeitig auch die Spuren von einer vulkanischen Tätigkeit. Ende des Pleistozäns tauchte schließlich der Donaustrom in diesem Gebiet auf, und als aufbauende und zerstörerische Kraft gleichzeitig, wurde er zum bestimmenden Faktor der sedimentbildenden Umstände eines großen Teils dieses Gebietes.

Die Umgebung des Kraftwerkes wird zur Gänze von Ablagerungen aus dem Quartär, Pleistozän und dem Holozän bedeckt. Aus den zur Verfügung stehenden Daten kann über deren genaue Ausbreitung eine Karte im Maßstab 1:50.000 angefertigt werden. Diese Formationen sind zum Teil Flussanschwellungen, zum Teil äolische und zum Teil Haldenablagerungen oder deren Kombination. Das Kraftwerk selbst ist auf dem Überschwemmungsareal der Donau erbaut, worunter und in dessen Umgebung auf den pannonischen Formationen eine ca. dreißig Meter Flusssedimentschicht lagert, überwiegend aus Schotter und Sand aufgebaut; von Ort zu Ort sind in kleinsten Mengen auch ältere lössartige Sedimente aus dem Pleistozän anzutreffen. Nach der C14-Altersbestimmungsmethode ist das Alter dieser dreißig Meter dicken Schicht nicht mehr als 45.000 Jahre. Die Formationen aus dem Pleistozän sind ruhig gelagert, Spuren bezüglich struktureller Auswirkungen können nur in beträchtlicher Entfernung zum Kraftwerk bei Formationen aus dem Quartär beobachtet werden.

1.3. Geomorphologie, Oberflächengestaltung

a) Flusswassererosions- und Akkumulationsprozesse und -formen

In dem breiten Überschwemmungsterrain außerhalb der Dämme wurde die von Zeit zu Zeit auftretende Aktivität des Hauptarmes eingestellt, womit in Richtung Oberflächenentwicklung in erster Linie die anthropogene Tätigkeit, die Bodenbildung und zu einem geringfügigeren Teil die Prozesse einer organogenen Sukzession wirken. Andererseits sind seit der Hochwasserregulierung innerhalb des von dem Schutzdämmen eingeschränkten Inundationsgebietes die hohen Wasserpegel gewissermaßen permanent geworden, die die Aktivität des Flusses erheblich steigern. Dies hat zur Ausschwemmung der Dämme geführt, zum Einströmen von Grundwasser in die hochwassergeschützten Bereich, zur Bildung von Binnengewässern – und dies beeinflusst auch den Entwicklungsgang der Fauna und des Bodens im Überschwemmungsgebiet. Im Bereich Paks fließt die Donau mäandierend, sich eingrabend. Nördlich von Paks behindert die Schotterschicht am Flussboden, dass sich der Fluss eingräbt und die Entwicklung freier Beugen, südlich von Paks gibt es solche Hindernisse nicht mehr, die Schotterschicht ist zehn bis fünfzehn Meter unter das heurige Bett abgesunken, womit sich Mäander und Biegungen der Donau frei entwickeln konnten.

Südlich von Paks hat die Donau in ihrem natürlichen Zustand (d. h. unbehindert von Dämmen und flussbettregulierenden Bauten) den abgestorbenen Biegungen und Armen bei Fadd und Bogyzsló vergleichbare Hochwasserarme und -beugungen ausgebildet. Von der Herausbildung eines so großen Mäanders bis zu dessen natürlichen Absterben bedurfte es in der Regel 150 bis 180 Jahre. Der abgeschnittene Mäander füllt sich in der Folge mit Geröll und natürlichen Sukzessionsstoffen auf und verändert sich im späteren zuerst zu einem ruhigen Altwasserarm, dann zu einem mit Pflanzen verwachsenem Sumpf und schließlich zu einem versumpften Moorwald.

Nach der Eindämmung wurden alle Überschwemmungsbereiche inzwischen aufgefüllt – die im Flutraum befindlichen Altwässer mit anorganischen, der Bereich der Beugungen, die außerhalb der Dämme und Deiche geraten waren – zwar erheblich langsamer – mit organischen Stoffen..

Die Sedimente und zusammenhängenden Schichtreihe der einst abgebundenen Mäander legen die Strömungsrichtung der unterirdischen Gewässer fest und bestimmen sie auch weiter. Damit ist die Ablafrichtung, das räumliche Netz der ehemaligen Flussläufe und -bette von grundlegender Wichtigkeit für die Kenntnis bezüglich der Strömungsverhältnisse des Grundwassers heute.

Das Grundwasser bildet über das Netz der ehemaligen Flussläufe und -bette ein zusammenfassendes System, und sein jeweiliger Pegel wird vom Wasserstand der Donau bestimmt. Der Grundwasserpegel zeigt in erster Linie bezüglich der Aufschüttungen jener Mäander Auswirkungen, die bezüglich ihres Stadiums der Auffüllung bereits weiter fortgeschritten sind und die von Zeit zu Zeit mit Wasser aufgefüllt werden, da es maßgeblich die Produktion und Anhäufung organischer Stoffe in den Mooren beeinflusst.

b) Erosions- und Aufschichtungsarbeit des Windes, die von ihm geformten Oberflächenformationen

In der untersuchten Region kam es in der Gegenwart wegen klimatischer und anthropogener Einflüsse zu einer gesteigerten Deflationstätigkeit bezüglich des Terrains, das sich früher aus den Sandablagerung des Flusses aufgebaut hatte, zu einer beträchtlichen Bewegung des Flugsandes – als deren Folge sich Formeneinheiten herausbildeten, die für Zonen mit halbgebundenem Flugsand typisch und eigen sind. Diese sind nicht nur landschaftsbildformende Faktoren, sondern sowohl ihr Material (Sand) als auch ihr Flächenprofil betreffend sind diese Formeneinheiten für die Raumnutzung vorgegebene Umweltbedingungen, die bei bzw. nach jedweder Inanspruchnahme oder Nutzung des Bodens, bei der Ansiedlung von Betrieben, bei Investitionen unbedingt in Betracht gezogen werden müssen.

c) Senkung, Suffosion und Einsackungen

In der Umgebung des Standortes sind in erster Linie ehemalige Überschwemmungsgebietformationen aus dem Holozän und dem Neoholozän sowie überwiegend mit Flugsand bedeckte Geröllkegel- und terrassenartig angelegte Oberflächen bestimmend, wo die in der Unterkapitelüberschrift angeführten Kleinformen nicht vorkommen.

In der Linie Ziegelfabrik Paks und Weinberge Tengelic verlaufen die zum südlichen Mezöföld gehörenden Lössplateaus und Talrücken, die mit Löss oder sandigem Löss bedeckt sind. Die dazugehörigen häufigen Mikroformen sind die von der Suffosion (Lösungserosion, Oberflächenlösung) ausgeformten Vertiefungen und Lössdolenen, die zu den karstigen Erosionsformen des Löss gehören. Solche sind am ehesten verstreut auf dem Plateau Paks-Dunakömlöd zu finden. Mit ihrer ovalen oder runden, kleingerateten (zehn bis zweihundert Meter) Ausbreitung und geringen (ein bis fünf Meter) Tiefe sind sie ein buntes Zusatzelement zu den großen Formen. Bei ihrer Entstehung spielt die Suffosion und die Makroporosität des Löss eine bedeutende Rolle.

An der Oberfläche zeigen sich keine rezenten Furchen, allein die früheren fossilen Senken haben die geomorphologischen Eigenheiten der weiteren Umgebung maßgeblich bestimmt.

d) Ermessung der Bodenerosions- und Bodenbewegungs-(Bodenrutsch-)prozesse des Hügelgeländes und der Randzonen

Rezente Massenbewegungen sind für die vertikalen Lössbruchfronten, die sich entlang der Donau an den Lössplateaus in der Ebene entlang der Donau befinden, charakteristisch. Bezüglich ihrer Erosion und ihrem Verschwinden sind natürliche Faktoren ebenso beteiligt wie anthropogene Wirkungen.

Stabilisierte, erdrutschgefährdete Böschungen kommen an den mit einer dicken Lössschicht bedeckten, abschüssigen Gebieten am Rande des Mezöfölds vor, wo die für das Pleistozän typischen Rutschungsformen und -formenreste charakteristisch sind. Das sich hier zeigende Auf und Ab der Oberfläche, die kuppen-, haufen- und buckelförmig gewölbten Abhänge verweisen auf alte Rutschungen im Pleistozän. Im Gegensatz zu den kleineren, individuellen Rutschungen sind in diesem Typus die großen Rutschungen im Übergewicht. Die Bewegungen der Rutschungen im Pleistozän hatten in erster Linie beim Abbau, bei der Zerstörung der Terrassen und

Stufen in den Randzonen ihren beträchtlichen Anteil. Eine vertikale, beträchtliche Bewegung von stabilisiertem Rutschungsböschungen ist an der Seite der kurzen, steilen Stelle gegenüber der Eisenbahnstation der Ziegelfabrik Paks zu studieren, wo das Ausmaß der mehrere Meter umfassenden Bewegung aufgrund der fossilen Bodenniveaus feststellbar ist.

Erdrutschgefährdete Böschungen sind jene von Rutschungen betroffenen Oberflächen, die wegen ihrer hydrogeologischen Gegebenheiten sowie wegen anthropogener Einwirkungen die Voraussetzung der Aktivierung der Rutschung in sich tragen. Abgesehen von den Hochuferabschnitte in den Randzonen wurden hier solche nicht vermessen.

Aktive Rutschungsböschungen lösen sich charakteristischerweise entlang von bogenrunden Bruchlinien oder aus alten Rutschungshaufen des Pleistozäns aus den steilen Abhängen heraus. Solche sind in einem Umkreis von fünf Kilometer nicht anzutreffen, sind praktisch inexistent.

e) Die geomorphologischen Prozesse der letzten hunderttausend Jahre

Die Betriebsstätte und deren unmittelbare Umgebung war bis zum Ende des Pleistozäns (vor ca. achtzig bis hunderttausend Jahren) organischer Bestandteil des Lössgebiets um Paks-Dunaszentgyörgy-Tengelic. Zu diese Zeit bildeten sich auch die aus dem Mezőföld in Richtung Tiefebene von Nordwest nach Südost verlaufenden Täler heraus.

Der Querschnitt der Oberflächen dieser Erosionskanäle und -sturzläche, die sich in die ausgetrockneten oberpannonischen Sedimente eingeschnitten hatten und in Richtung der Erosionsbasis – des sog. Levantesees – verliefen, ist aufgrund der Bohrungen im Öreghegy bei Dunaföldvár, dem Sác-hegy bei Dunakömlöd oder auch aufgrund der Bohrungen unterhalb des Kraftwerkes und der KKÁT-Deponie rekonstruierbar. Sie sind zum Teil mit umgeschichteten Geländesätzen, zum Teil mit Geländesätzen aus Rotton, die mit dem CaCO_3 -Horizont charakterisiert werden kann, ausgefüllt.

Aufgrund der Daten aus den Bohrungen beträgt die Breite der Erosionstäler fünfzig bis siebzig Meter, ihre Tiefe drei bis zehn Meter. Solche Vertiefungen, Täler mit einigen Grad kommen an zahlreichen Stellen vor, und in einigen Fällen, so zum Beispiel im Raum Dunaföldvár, Dunaujváros oder Dunakömlöd war mit Bohrungen belegbar, dass sich diese im Bereich des Rückens zwischen Donau und Theiß fortsetzen und in Richtung Osten auch auf der leicht abschüssigen Pannonischen-Pliozän-Oberfläche verfolgbar sind.

1.4. Grundsätzliche tektonische und seismologische Charakterisierung

Die Tektonik der Region ist komplex, die von der Subduktion der afrikanischen Platte unter die dinarische Gebirge bzw. von ihrem Zusammenprall mit der eurasischen Platte in der Alpenregion charakterisiert wird. Als Ergebnis dieser Prozesse ist das pannonische Becken entstanden, das mit der unter das Becken sinkenden eurasischen Platte ein sich verdünnendes Extensionsgebiet entlang der Karpaten ist. Vor ca. sechzig Millionen Jahren weitete sich das Becken in Richtung Osten aus und erreichte vor ca. zwölf Millionen Jahren seine heutige Ausdehnung. Bis heute ist die Subduktionszone im Raum Vrancea aktiv geblieben.

Die Spannungsrichtungen im pannonischen Becken sind verhältnismäßig konsistent und stimmen mit den plattentektonischen Richtungen überein. Der Großteil der in Ungarn bekannten Nestmechanismen ist strike-slip-artig. Im pannonischen Becken wird das Grundgestein von einer Sedimentschicht aus dem Neogen abgedeckt (jünger als 23 Millionen Jahre), die eine Dicke von sechs Kilometer erreichen kann. Diese Schichten aus dem Neogen bestehen aus beträchtlich brüchigen und verfalteten Sedimenten und Füllungen vulkanischen Ursprungs aus dem Alt- und Mittelmessozän (23-12 Millionen Jahre) und aus dem diese abdeckenden, weniger als zwölf Millionen Jahre alten pannonischen Ablagerungen. In der pannonischen Ablagerung befinden sich ähnlich jenen in den Schichten darunter strike-slip-Verwerfungen in Richtung Westsüdwest-Ostnordost, Eine mögliche tektonische Karte aus dem Neogen findet sich auf Abbildung 1.

Im pannonischen Becken gibt es auch zur Zeit eine Ansammlung von tektonischer Spannung, die sich entlang mehr oder weniger bekannter, struktureller Linien von Zeit zu Zeit lösen. Die Magnitude der so entstehenden Erdbeben hängt dabei davon ab, wie leicht sich die einzelnen Strukturelemente auf Wirkung dieser Spannung zueinander bewegen, entkeilen können. Aus den Lineamenten und den vielen kleinen, verstreuten Erdbeben lässt sich folgern, dass sich wegen der Brüchigkeit des Beckenbodens wohl kaum eine große Anspannung ansammeln

kann. Damit sind Beben, die eine Stärke von 5.5 überschreiten, eine Seltenheit, und die bis jetzt festgestellte Obergrenze der Magnitude beträgt 6.0. Die ausgeführten geophysikalischen Untersuchungen zeigen, dass die von Anomalien der Potenzialräume signalisierten tektonischen Verhältnisse einen engen Zusammenhang mit den Epizentren von Erdbeben zeigen. Erdbeben sind in erster Linie an die ausgeprägten Punkte (Treffpunkt von Enden, Richtungsänderungen und Brüchen) von durch Anomalien gekennzeichneten Brüchen gebunden.

Die Ansicht war nicht lange haltbar, dass sich der Standort in einem "geologisch betrachtet einheitlichen, großflächigen Block befindet, in einer Zone, in der es zu Erdbeben der maximalen Magnitude von $M \leq 5,0$ kommen kann". Die oben erwähnten für die pannonischen Sedimentierungen charakteristischen Strukturen zeigen sich auch unter dem Standort selbst. Eine grundsätzliche Frage ist, ob die sich in der Nähe des Standortes befindlichen, den älteren Strukturlinien folgenden pannonischen Verwerfungen zur Zeit des Quartärs aktiv waren oder nicht. Im Mittelpunkt der mehr als zehnjährigen Forschungsarbeit stand die genaue Ermessung der Natur dieser Bruchlinie. Grundannahme dabei war, dass man mit einem dem Beben von Kecskemét im Jahre 1911 ($7-7,5^0$ MSK – Mercalli-Sponhauer-Karnik Skala) an Magnitude vergleichbaren entlang des Kapos-Grabens und dessen nordöstlicher Verlängerung überall rechnen kann. Andererseits wurde auch eine jüngere tektonische Struktur in die Überlegungen einbezogen, entlang derer man wiederum ein Erdbeben vergleichbar der Intensität von jenem bei Mór in Jahre 1810 (8^0 MSK) für möglich annahm. Man nahm an, dass die Möglichkeit eines größeren Erdbebens im Raum Paks doppelt so hoch liegt wie im landesweiten Durchschnitt. Einigen Annahmen zufolge (Nemedi Varga, 1977) wird die östliche Verlängerung des Kapos-Grabens vom Bogen bei Paks ausgefüllt.

Im Lichte der neuesten Forschungen können wir diese Annahme dahingehend modifizieren, dass sich der Kapos-Graben mit der bei Paks vermessenen Verwerfungszone in einem En-echolon-System befindet. Dessen genauer Ablauf ist aber westlich von Paks nicht gut kartographiert und vermessen, wobei aber die Fortsetzung der Verwerfungszone Richtung Osten mit einem hohen Genauigkeitsgrad wohl bekannt ist. Gegen eine Aktivität im Quartär spricht, dass es im Raum Paks keinerlei Hinweise auf eine derartige Erdbewegung gibt, die ohne Zweifel klar belegbare tektonische Strukturen in den in Bodennähe detailliert untersuchten Schichten geschaffen hätte. Da in diesem Bereich das Quartär sich nur mit einer beträchtlichen Zeitlücke auf die pannonischen Sätze ablagert und überhaupt dessen Herausformung sich hier sehr abwechslungsreich gestaltet, kann die klassische Herangehensweise, das heißt die Bestimmung in wie weit die Wirkungen der die pannonischen Schichten eindeutig durchquerenden Verwerfungen nach oben dringen können, kein endgültiges und direktes Ergebnis bringen. Auf Abbildung 2 ist eine unter dem Standort befindliche Struktur ersichtlich, in einem auf der Donau aufgenommenen geringfügig seismischen Abschnitt.

Abbildung 1: Eine (mögliche) tektonische Landkarte des pannonischen Beckens im Neogen

ARUP

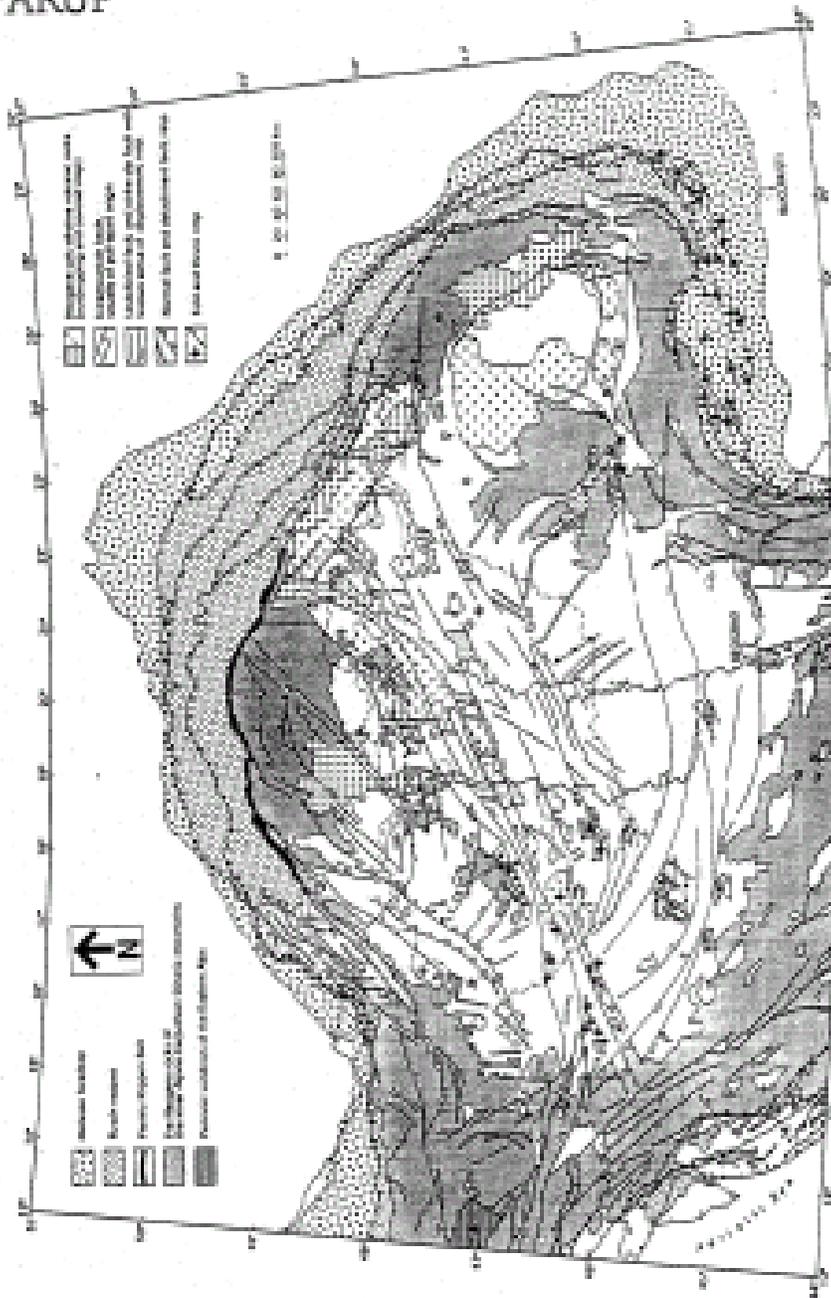
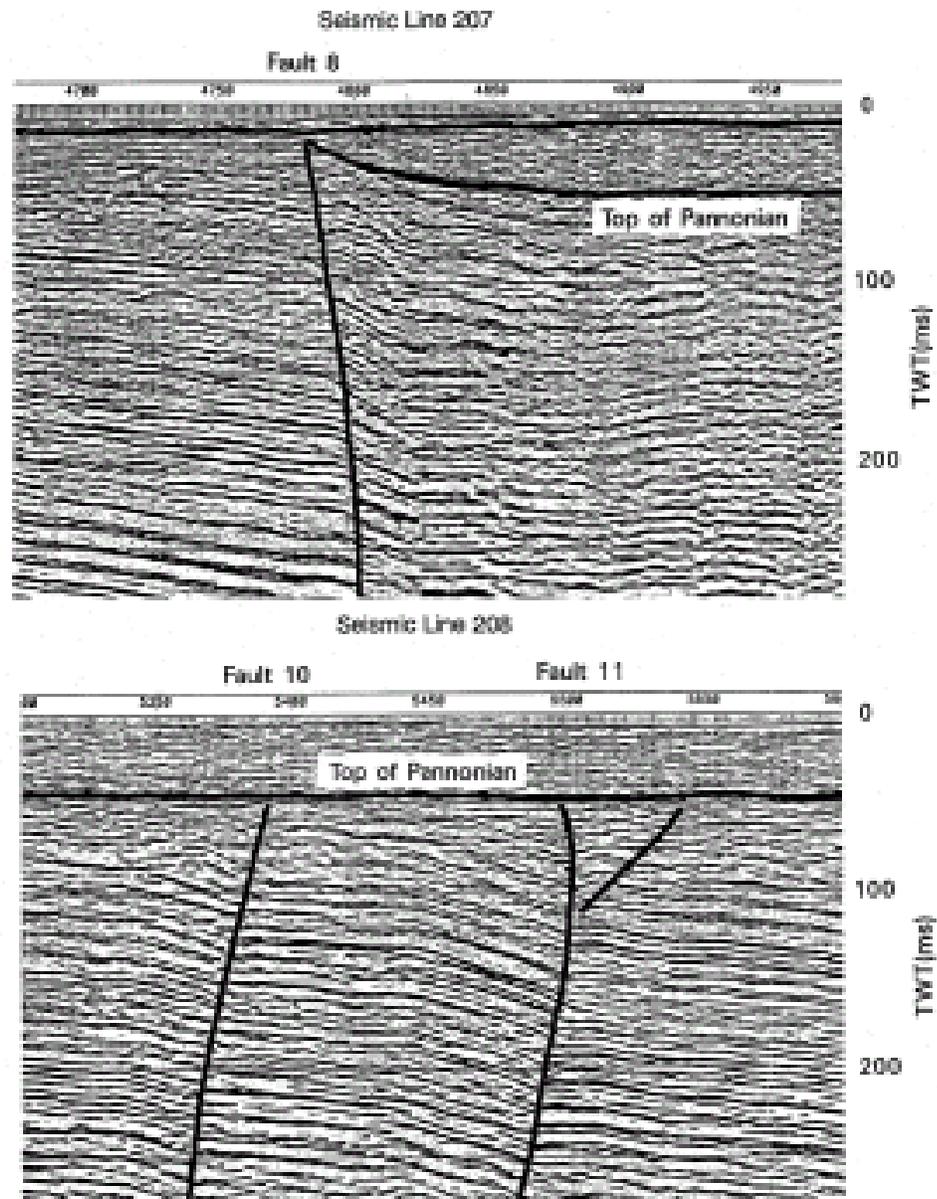


Fig. 4. Miocene tectonic map of the Pannonian basin and the surrounding Alpine-Carpathian-Dinaric mountains. Abbreviations assigning some of the main faults are as follows: B = Balaton line; Bu = Buhary line; BV = Bogdan Voda line; CV = Cerova-Ju line; D = Drava line; Du = Durnali line; Do = Donau line; DS = Fella-Sava line; HD = Humberovo-Dobrovo line; Hb = Horná line; J = Jajuga line; K = Kapos line; L = Lupa line; M = Murah line; Ma = Mecsek line; MD = Mészáros line; MDL = Mészáros-Dobrovo line; MÖ = Mur-Mörs line; P4 = Peričtrinc-Čaušević line; Po = Pettendorf line; S = Sava line; SE = Szászvár-Tornatal line; St = Steinberg line; ST = South Transylvanian line; TR = Telegdi-Roth line; Za = Zagreb line; Ze = Zemplén line.

Ref.: Horváth (1993)

Abbildung 2: Unter dem Standort befindliche Struktur, in einem auf der Donau aufgenommenen leicht-seismischen Abschnitt

ARUP



(See drawing D for location of section)

Ref : Tóth et al (1995)

Die Seismizität Ungarns ist alles in allem nur gering, dennoch kann es immer wieder zu starken – territorial sehr unsystematisch verteilten – Beben (mit epizentralen Intensitätswerten von 8^o nach MSK) kommen. Die Verteilung der Gebiete seismischer Aktivität ist nicht ganz homogen, es gibt Gebiete die weit aktiver sind (zum Beispiel bei Komárom, Graben bei Mór, Kapos-Linie, Eger, Jászság, nördlicher Teil des Komitats Zala). Als seismologisch ruhig kann aber der südliche Teil des Komitats Somogy, Mezőföld und der östlich der Theiß liegende Teil des Tieflandes bezeichnet werden, abgesehen von der Gegend um Békés. Unser früheres Bild von der Seismizität der pannonischen Region fußt fast ausschließlich auf die Verteilung der Epizentren der historischen Beben. Da uns bezüglich dieser Beben in der Regel nur makroseismische Daten zur Verfügung stehen, können alle anderen Merkmale nur aus diesen heraus geschätzt werden. Die Qualität des makroseismische Materials ist in zwischen sehr heterogen, und je tiefer wir in die Vergangenheit gehen umso mangelhafter wird das Material. Da es sich zudem auch immer um an die gegebenen Ortschaften geknüpfte Daten handelt, in denen sich die Siedlungsstruktur, Siedlungsdichte der jeweils gegebenen Zeit spiegelt, ist auch das makroseismische Epizentrum selbst immer recht ungenau (+/- 10 bis 50 Kilometer), die Wahrnehmungsschwelle recht hoch. Dies führt dazu, dass die Seismizität zeigt im pannonischen Becken einen diffusen Charakter zeigt (Gracsov, 1986), oder anders formuliert: Die bekannte Seismizität kann nur äußerst schwer mit der bekannten Tektonik in Relation gebracht werden (ARUP 1992). Im allgemeinen kann festgehalten werden, dass ein Konnex zwischen den bekannten tektonischen Elementen und den zur Verfügung stehenden seismologischen Daten nur in einigen Fällen aufgezeigt werden kann, in de meisten Fällen aber eine solche Verbindung nicht erkennbar ist. Bezüglich des Zusammenhangs zwischen diesen tektonischen Elementen und der Seismizität erbrachte das mikroseismische Monitoring neue Daten.

Die Herdtiefe der Erdbeben in Ungarn beträgt im allgemeinen zwischen neun und zwölf Kilometer. Der Herdmechanismus ist aber nur in einigen Fällen bekannt. Der Erdbebenherd des Erdbebens von Bérhida – der in dieser Hinsicht am besten bekannt und datenmäßig erfasst ist – war ein strike-slip-Beben.

Die zeitliche Verteilung der Erdbeben (die wir mit der kumulativen Zahl der Beben charakterisieren könnten) war ab der Mitte des 19. Jahrhunderts bis in die sechziger Jahre des 20. Jahrhunderts gleichmäßig, im Schnitt mit drei Beben per Jahr, ab 1960 ist die Zahl der spürbaren Erdbeben deutlich zurückgegangen und zeigt in den letzten Jahren wieder den langjährigen Durchschnittswert. Aufgrund der Häufigkeit der Beben im Zeitraum zwischen der Mitte des 19. Jahrhunderts bis heute muss auf dem Gebiet Ungarns praktisch jedes Jahr mit einem Erdbeben der Stärke 4^o gerechnet werde, während es alle vierzig bis fünfzig Jahre zu einem Erdbeben der Magnitude 8^o kommt.

Diese Erschütterungsverhältnisse Ungarns werden bis zu einem gewissen Grad auch von der Seismizität der Nachbarländer bestimmt. Zu nennen sind hier in erster Linie Kroatien und Slowenien, das Wiener Becken (entlang der sog. Thermenlinie) mit dem kleinen Karpatenbogen, das Banat und die Karpato-Ukraine. Die Auswirkungen dieser Zonen auf Ungarn sind nicht einheitlich, von besonderer Bedeutung ist die Seismizität Kroatiens und Sloweniens, die große Teile des westungarischen Transdanubiens betrifft. Die von einzelnen ausländischen Erdbebenzonen beobachteten Auswirkungen in Ungarn zeigen maßgebliche territoriale Veränderungen im Bereich der Wellenbreitungsverhältnisse.

Die Erdbebenhäufigkeit an einigen Randzonen des pannonischen Beckens überschreitet wesentlich jene im mittleren Teil. Die auf die ganze Zone umgelegte Häufigkeit zeigt eine zehnfach höhere Aktivität als jene, die sich auf das Innere des Beckens bezieht. Die im Vergleich zu den Randzonen geringe allgemeine Aktivität könnten die geologischen Besonderheiten des Gesteins der im Inneren des Beckens befindlichen Erdkruste erklären. Im pannonischen Becken ist der terrestrische Wärmefluss und aus diesem Grund auch der geothermische Gradient wesentlich höher als in den umliegenden Regionen. Aus dieser höheren Temperatur ergibt sich auch, dass der sich brüchig verhaltende Bereich der Erdoberfläche weniger tief erstreckt, was im allgemeinen mit weniger und schwächeren Erdbeben einhergeht.

In seiner Gesamtheit ist die Erdbebengefährdung Ungarns moderat, wesentlich größer als die der britischen Inseln, aber geringer als die der umliegenden Länder, und ist damit mit der Gefährdung der Ostküste der USA vergleichbar. Aus all dem geht hervor, dass die Neubewertung der Seismizität des Standortes Paks eine wichtige fachwissenschaftliche Frage ist, die auch auf die Frage der Sicherheit Einfluss hat.

Eine Synthese des obigen Wissensstandes findet sich im Landkartenanhang 1., 2., 3. und 4. – in einer entsprechenden Aufgliederung für die regionale Ebene und die des Standortes.

2. Erdbebengefährdung des Standortes

Die Seismizität des Standortes war die in den letzten Jahrzehnten am meisten beforschte, ist seit dem Bau und der Inbetriebnahme des Atomkraftwerkes grundlegend neu bewertet worden und ein die Sicherheit des Kraftwerkes beeinflussendes Charakteristikum der Betriebsstätte. Bezüglich der maßgeblichen Festlegungen im Bereich von Erdbeben waren die wichtigsten Aufgaben der jüngsten Forschungen, alle Möglichkeiten abzuklären und auszuschließen, ob eine Verwerfung an die Oberfläche dringen kann, und zu belegen, dass der Standort entsprechend ausgewählt ist.

Aufgrund des Vorberichtes über eine Überprüfung der Fachleute der IAEA kam es am 7. und 8. Oktober 1993 unter internationaler Beteiligung (eingeladene englische, französische und italienische ExpertInnen) und unter der Beteiligung aller maßgeblicher ungarischer Institutionen (MÁFI, ELGI, GGKI, ELTE) und Fachmenschchen zu einer Fachkonferenz, in deren Rahmen die AKW Paks AG das notwendige Forschungsprogramm bezüglich des Abschlusses der Standortüberprüfung zusammenstellte. Anbetracht dessen aber, dass die Meinung der ungarischen WissenschaftlerInnen bezüglich der Prioritäten einigermaßen gespalten war, wurde das Programm schließlich von der unabhängigen Firma OVE ARUP kontrolliert, die an der konkreten Durchführung nicht beteiligt, aber im Thema bewandert war, und zu einem einheitlichen Programm spezifiziert.

Ab September 1993 lief die Arbeit bis Jänner 1995 im Rahmen von drei voneinander unabhängigen Teilprojekten, die eine Basis für eine international akzeptierte Bewertung der Seismizität des Standortes schuf:

- Durchführung geologischer(geologischer, geophysikalischer, seismologischer) Untersuchungen, zum Teil, um die bestehenden Daten zu kontrollieren, zum Teil um diese Daten zu ergänzen,
- Aufbau eines mikroseismischen Monitoringsystems und Organisation der Datensammlung, Aufarbeitung,
- Geotechnische Untersuchungen über die dynamischen Eigenschaften des Bodens, Festlegung der Möglichkeiten von Erdfluss.
-

Die Realisierung des Projekts wurde

- im Rahmen des "Regional Programme for Nuclear Safety, 4.2.1. VVER 440-213 Seismic Hazard Re-Evaluation" der PHARE (unter der Leitung der englischen Firma OVE ARUP),
- in belgisch-ungarischer Kooperation von BELGATOM,
- und im Rahmen des technischen Hilfsprogramms von der IAEA

gefördert.

Die IAEA beaufsichtige die Durchführung des Programms regelmäßig mit international anerkannten Fachleuten (September 1993, Jänner, Juni, November 1995 sowie Jänner 1996), bewertete es und gab bezüglich der Durchführung immer wieder Empfehlungen ab.

Das Programm wurde von der AKW Paks AG gemanagt, zu den ungarischen Teilnehmern gehörte die ELTE-Universität, die MÁFI (Landesinstitut für Geologie), MTA GGKI (Wirtschaftsforschungsinstitut der ungarischen Akademie der Wissenschaften), das Geographische Institut der ungarischen Akademie der Wissenschaften, die GEORISK Ges. m. b. H. bzw. herausragende einzelne Experten der einzelnen Themenbereiche.

Die von der Firma OVE ARUP zusammengestellte Studie wurde auf der Basis und unter Anwendung von Material und Daten angefertigt, das als ausreichend qualifiziert wurde, und gibt Antwort auf die drei grundsätzlichen Fragen bezüglich der Gefährdung des Standortes (an die Oberfläche dringende Falte, maßgebende, standortspezifische Erdbebencharakteristik, Erdfluss).

Aufgrund der von den ungarischen Institutionen bereitgestellten Daten und aufgrund der Beratungen der ungarischen Fachleute fertigte die Firma OVE ARUP bis 31. Dezember 1995 einen zusammenfassenden Bericht und ein seismotechnisches Modell, das als Grundlage für weitere Berechnungen diente, an und führte weiters die maßgebenden (Häufigkeit per 1/10.00 Jahren) Antwortspektren bezüglich von Erdbebe, sowie die Berechnungen bezüglich einer maximalen waagrechten Beschleunigung aus. Die bei der Bewertung von der Firma OVE ARUP ausgewählte Wahrscheinlichkeitsmethode bot eine Möglichkeit, eventuell unzureichende, unsichere Daten und widersprüchliche Interpretationen der Daten einzubeziehen, was natürlich zu einem Konservatismus bei

den Schlussfolgerungen und der Ergebnisse führte. Den Konservatismus der Daten wird zudem noch dadurch verstärkt, dass aufgrund der Entscheidung der AKW Paks AG die Bewertung nicht bezüglich der restlichen Lebensdauer des Kraftwerkes erfolgte, sondern auf der Grundlage der Errichtung eines komplett neuen Kraftwerkes mit voller Lebensdauer erfolgte. Es wurde festgestellt, dass der Wert der von einem maßgebenden Erdbeben verursachte maximalen Oberflächenbeschleunigung $0,25g$ beträgt, mit einem globalen Erdfluss auf Basis 10.000 Jahre ist nicht zu rechnen.

Im Jänner 1995 wurde schließlich der Abschlußbericht der Firma OVE ARUP von der IAEA überprüft und festgestellt, dass die Arbeit erfolgreich abgeschlossen werden konnte, die diesbezüglichen Vorschriften der IAEA komplett eingehalten worden sind. Die Ergebnisse erwiesen sich als ausreichend konservativ, dass sie als Input für eine Bewertung der Erdbebensicherheit des AKW Paks und für die Verstärkung der Erdbebensicherheit dienen kann. Die IAEA schlug gleichzeitig eine Fortsetzung des mikroseismischen Monitorings vor.

1997 erschien beim Verlag der ungarischen Akademie der Wissenschaften die von den beiden Mitgliedern der Akademie Sándor Marosi und Attila Meskó redigierte Monographie bezüglich der geologischen Bewertung des Paker Standortes. In dieser Arbeit fassen siebzehn namhafte WissenschaftlerInnen und ExpertInnen die wissenschaftlichen Grundlagen der ungarischen wissenschaftlichen Ergebnisse zusammen, das Wesen der mehreren hundert Forschungsberichte und -studien.

Bei der Übersicht muss sicherlich gesondert auf das mikroseismische Monitoring eingegangen werden. Bei den Erfordernissen des Monitoringsystems wurden die Vorschriften der IAEA bezüglich der minimalen Sensibilität und der Lokalisationsgenauigkeit (in einem Umkreis von hundert Kilometer um Paks müssen alle Beben mit einer Magnitude höher als 2 mit einer Herdbestimmung von einer Genauigkeit von einem Kilometer wahrgenommen werden) befolgt. Den Installierungsplan des Systems wurde von inländischen und ausländischen (z. B.: British Geological Survey) ExpertInnen und dem IAEA befundet. Die Planung, Installation und der Betrieb sowie die Datenaufarbeitung wurden bzw. werden im Auftrag der AKW Paks AG von der Firma GEORISK Ges. m. b. H. durchgeführt. Wissenswert ist auch weiters, dass es im Land keine andere der Einrichtung der AKW Paks AG vergleichbare, dieselbe Leistung darbringende Einrichtung gibt. Die Merkmale des Systems sind derart, dass es nicht nur der Standortforschung dient, sondern auch allgemeine wissenschaftliche Zwecke erfüllt. Die AKW Paks AG lässt die Ergebnisse jährlich zum Zweck der weiteren Forschung veröffentlichen.

1998 wurde auch in der Zusammenarbeit von sechzehn Fachleuten (GEORISK, ELGI und ELTE) jener zusammenfassende Forschungsbericht verfasst, der aufgrund der Aufarbeitung der mikroseismischen Daten und deren Bewertung die konservative Bewertung der Seismizität des Standortes und die maßgeblichen Charakteristika eines Erdbebens neuerlich bestätigt.

Erdbebengefahrenberechnungen

Die Grundlage der Zusammenfassung liefern die in Sache seismischer Gefährdung des Standortes des AKW Paks durchgeführten Studien im Rahmen des "Regional Programme for Nuclear Safety, 4.2.1. VVER 440-213 Seismic Hazard Re-Evaluation" der PHARE bzw. die darüber angefertigte zweibändige, aus vier Hauptteilen bestehende englischsprachige Zusammenfassung. Im weiteren werde die Untersuchungen und deren Ergebnisse zusammengefasst.

Berechnungen bezüglich einer wahrscheinlichen Erdbebengefährdung bedürfen dreier grundlegender Informationen:

- Modelle der seismotektonischen Zonen, eigentlich der Quellenzonen von Erdbeben,
- die für diese Zonen typischen Parameter, sowie Zusammenhang zwischen Größe und Häufigkeit von Erdbeben, Herdtiefe, maximale Magnitude, Art des Faltenbruchs, Länge des Aufbruchs, die Geschwindigkeit der Verschiebung entlang der Bruchkanten usw.
- die Beruhigungs-, Attenuationsfunktion des Bebens.

Aus diesen Daten kann mittels statistischer Methoden die einer gegebenen Wiederkehrperiode Amplitude einer zuordenbare Beschleunigung (Verschiebung) errechnet werden. Die Unsicherheit der Daten und der Modellierung kann in einer logischen Baumform formuliert bzw. behandelt werden. Den alternativen Werten der Inputparameter – sich auf die Daten stützend – können geschätzte Gewichtungen zugeordnet werden. Der gewichtete Durchschnitt der berechneten Werte ist die beste Schätzung des ausgewählten Merkmals (z. B. Antwortspektrum).

Zur Durchführung einer PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment) wurden vier alternative regionale Quellenmodelle zur Charakterisierung der Seismizität, Geologie und Tektonik des Karpatenbeckens angefertigt. Ein eigenes Modell dient der Beachtung der Auswirkungen der Quellgebiete, die das Becken umgeben. Die Abbildung der in der Umgebung des Standortes identifizierten Strukturen geschieht mittels zweier linearer Quellmodelle.

Eine Zone des Quellenmodells A umfasst fast das ganze Gebiet der heutigen Republik Ungarn, ausgenommen die südöstliche Ecke des pannonischen Beckens, die was Falten und Brüche betrifft, anders aufgebaut ist. Das große homogene Quellgebiet repräsentiert im Vergleich zur diffusen Seismizität und der Umgebung eine dünnere, gleichmäßig dickere Erdoberfläche. Dieses Modell wird mit 0,2 gewichtet.

Das Quellmodell B, mit 0,3 gewichtet, kombiniert die Verteilung und die geologischen Besonderheiten von registrierten Erdbeben. Das Modell besteht aus vier SW-NO Streifen.

1. Die Zone des Flusses Raab, ist ein Senkungsbereich mit geringer Seismizität,
2. der Bereich des Mittelgebirges mit einer moderaten, gleichmäßig verteilten Seismizität, ein sich anhebendes Gebiet,
3. ein mit linken, lateralen Extensionsbrüchen kennzeichnbarer mittlerer Streifen, der auch den Standort selbst umfasst, angeschlossen an die Haupteinheit Theiß und Szolnok, von einer niedrigen und ausreichend ausgeglichenen Seismizität gekennzeichnet repräsentiert die hervorstechenden Berge und das in südlicher Richtung absinkende Becken.
4. das südöstliche Eck des Beckens, das von einer beträchtlichen Senkung und von nordwestlich verlaufenden Bruchlinien gekennzeichnet ist, Seismizität moderat.

Das ebenfalls mit 0,3 gewichtete Modell C ist im wesentlichen ein verfeinertes Modell B, in dem der mittlere Streifen der unterschiedlichen Dicke der Ablagerungen aus dem Quartär in zwei Teile geteilt wird, die südöstliche Ecke ebenfalls in zwei, entsprechend den Vorkommen der normalen Verwerfungen.

Das Modell D gibt die territoriale Verteilung der Erdbeben wieder, mit einer Gewichtung von 0,2.

Die Häufigkeit von Beben (N) wird in den Zonen von der Gutenberg-Richter-Funktion: $\log N = a - bM$, wobei M die Magnitude der Erdbeben ist. Für die im pannonischen Becken befindlichen Quellzonen sind die Werte a und b aus den zur Verfügung stehenden Katalogwerten ermittelbar. Die Unsicherheit Aktivität kann mit der entsprechenden Gewichtung (mit Median 0,6 Gewichtung, 5 Prozent bis 95 Prozent, Gewichtung 0,2).

ARUP hat bezüglich der unterschiedlichen Quellzonen die Wiederkehrzeit von Erdbeben mit der Spezifizierung der Relation $\log N = a - bM$ definiert. In deren Verlauf hat die Firma in allen Fällen den Wert $b = 0,82$ verwendet und festgelegt, wie groß das auf dem Gebiet zu erwartende größte Beben sein kann. An der den Alpen, Dinar und den Südkarpaten zugewandten Seite des pannonischen Beckens beträgt dieser Wert $M_{\max} = 7,3$, an den Randgebieten verändert er sich zwischen $M_{\max} = 6,1 - 6,7$, der Wert 6,1 mit einer Gewichtung von 0,2, der Wert 6,4 mit einer Gewichtung 0,6, und jener von 6,7 mit einer Gewichtung von 0,2. Bezüglich der Herdtiefe wurde die Annahme getätigt, dass er zwischen null und fünfzehn km (Wahrscheinlichkeit 30 %) bzw. null bis zwanzig km (Wahrscheinlichkeit dreißig Prozent) liegen wird.

Die in der Gegend befindlichen, identifizierten, mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht aktiven Strukturen werden von zwei linearen Quellmodellen repräsentiert. Im Einklang mit der tektonischen Charakterisierung des Standortes und seiner Umgebung ist die Wahrscheinlichkeit der Aktivität dieser Quellen gleich 0,1. Das eine Linearmodell bildet die in der Umgebung des Standortes in den seismischen Abschnitten identifizierte Strukturen ab, die andere hingegen die unter den Bruchzonen angenommenen, in der Basis des pannonischen Becken befindlichen Bruchlinien ab. In Ermangelung einer Charakterisierung der linearen Quellen, konkreter Aktivitätsdaten und anderer geomorphologischer Evidenzen dienen die Annahmen bezüglich der Herdtiefe, der Art des Bruches, der Länge der Aufbruchlinien und der Geschwindigkeit einer Verschiebung bzw. die daraus ableitbare maximale Magnitude und Aktivität. Die maximalen Magnitudewerte (6,0-6,5 bzw. 6,1-6,6) und die dazugehörigen Gewichtungen (gemeinsam mit der 0,1; Wahrscheinlichkeit der Aktivität der Linearmodelle) befinden sich im Einklang mit der Behauptung, dass die Strukturen in der Gegend des Standortes befindlichen Falten nicht nach oben durchdringen.

Die Beruhigung, Attenuation der Beben ist – wie dies auch die ungarischen Forschungen bestätigen – sehr hoch, da die Übertagung des dünnen, gebrochenen Basisgesteins nur gering ist. Die Berechnungen geschahen auf der Basis der den ungarischen Erfahrungen entsprechenden Beruhigungsfunktion mit gleicher Gewichtung.

Der Logikbaum der Berechnungen ist auf Abbildung 3 dargestellt. Die Berechnungen fanden mit dem Programm Oasys SISMIC der Firma ARUP statt.

Die Berechnung bezog sich auf den maximalen horizontalen bzw. vertikalen Beschleunigungswert auf die Festsetzung eines Antwortspektrum (UHRS), das einer gleichmäßigen Gefährdung eine fünfprozentigen Beruhigung an einer Gesteinsentblößung entspricht. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit der Amplitude der UHRS ist bei allen Periodenwerten gleich. Die Wiederkehrperiode von 100, 10.000 und 100.000 Jahren bezüglich der UHRS ist aus Abbildung 4 ersichtlich.

Die waag- und senkrechten Beschleunigungskomponenten-UHRS-e in einer 10.000jährigen Wiederkehrperiode eines Bebens sind auf Abbildung 5 dargestellt.

Lehrreich ist Abhängigkeit des best-estimate maximalen waagrechten Beschleunigungswertes von der Wiederkehrzeit: In einem Intervall zwischen 1.500 und 16.900 Jahren beträgt der GPA zwischen 0,12 und 0,30 g, im Falle von 5.700 Jahren 0,20g.

Die statistische Unwahrscheinlichkeit des Ergebnisses ist recht erheblich, es gibt eine zweieinhalbfache Abweichung zwischen der fünfprozentigen und der 95prozentigen Konfidenz und eine 1,7fache zwischen der 15- und 85prozentigen.

Die Verwendbarkeit des best-estimate UHRS, die sich auf eine 10.000jährige Wiederkehrzeit bezieht, als Planungsgrundlage kann gemäß DG-1032 auf Grundlage der Überprüfung eines Kontrollerdbebens entschieden werden. Demzufolge sind zwei den Standort erschütternde Erdbeben festzulegen, von denen einer den entscheidenden Anteil der Erdmassenbewegungen im Bereich 5-10 Hz, der andere im Bereich 1-2,5 Hz abgibt.

Abbildung 4: UHRS bezogen auf eine Wiederkehrzeit von 1.000, 10.000 und 100.000 Jahren

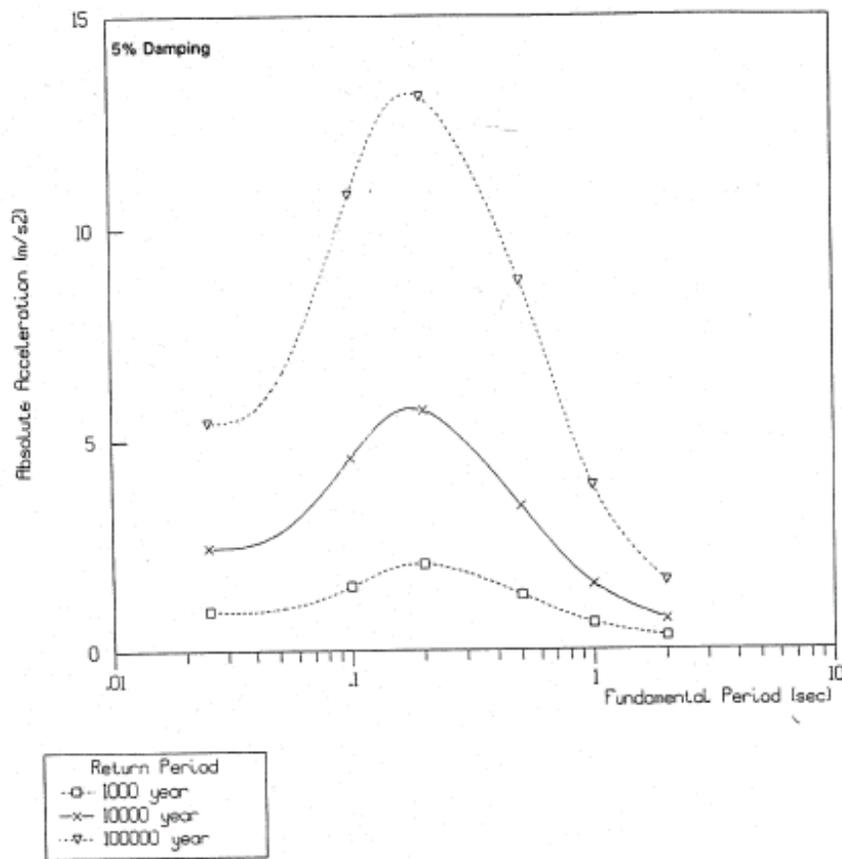
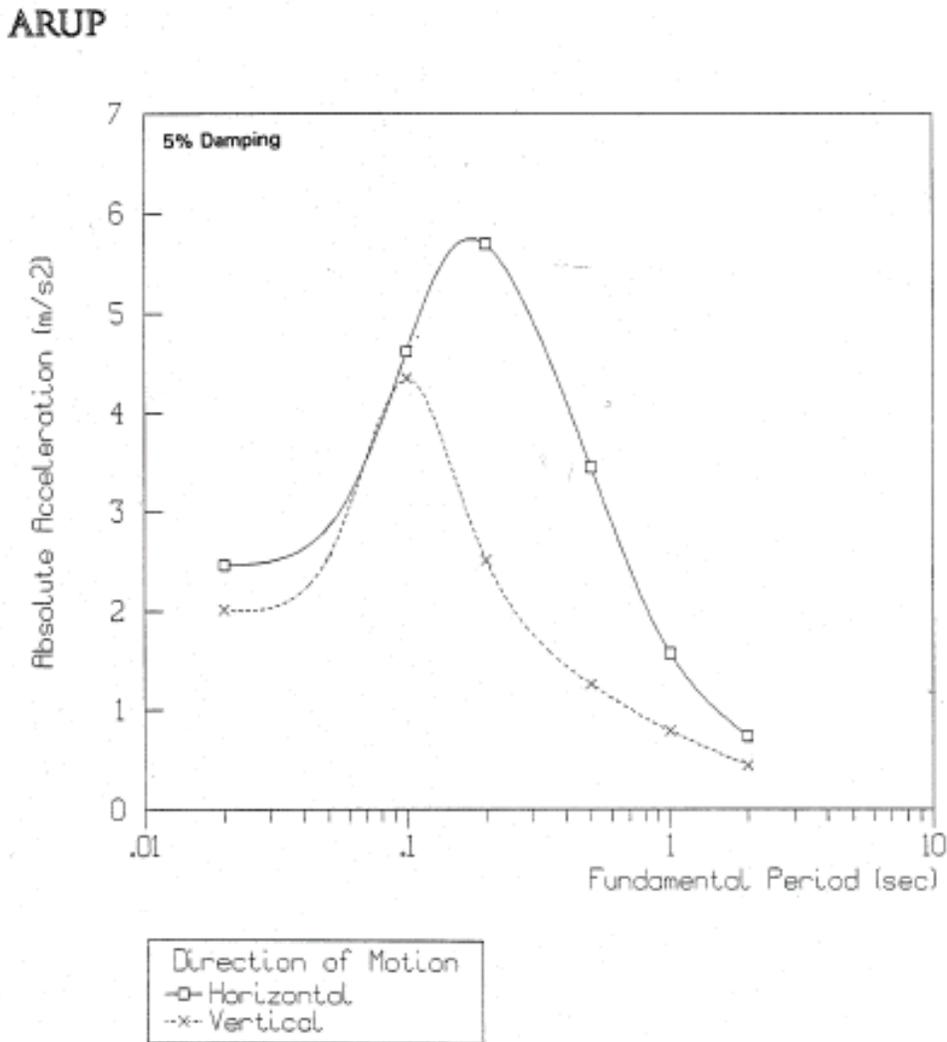


Abbildung 5: UHRS-Werte der Beschleunigungskomponenten eines Erdbebens mit der Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren



In Betracht zu ziehen, sind auch die Fernbeben, deren Beitrag zum Ergebnis größer als fünf Prozent ist. Entsprechend den Vorschriften von DG-1032 muss Beben in einer Entfernung von elf Kilometer mit einer Magnitude von 5,7, bzw. in einer Entfernung von achtzehn Kilometer mit einer Stärke von 6,0, weiters Beben in einer Entfernung von zweihundert Kilometer mit einer Stärke von 7,2 als Kontrollbeben untersucht werden, und mit dem UHRS-Wert der Antwortspektren am Standort verglichen werden. Abbildung 6 zeigt, dass die Spektralampplituden der drei Kontrollbeben bei den charakteristischen Perioden mit der best-estimate UHRS-Amplituden gut übereinstimmt, dass also die UHRS als Planungsgrundlage durchaus glaubwürdig und anwendbar ist.

Die Ergebnisse der PSHA können auch mit einem Vergleich der Antwortspektren deterministisch festgelegter maßgebender Erdbeben überprüft werden. Dies wurde auch von den Fachleuten der IAEA vorgeschlagen. Die deterministische Bewertung erfordert aber im Falle des Standortes Paks ein gewisses Feingefühl, genauere Überlegungen. Der Vergleich macht wenig Sinn, wenn wir annehmen, dass ein maximales Erdbeben direkt unter dem Standort geschieht. Eine solche Berechnung würde alle Wahrscheinlichkeit nach bei allen Perioden zu Extremamplituden führen. In den Regionen mit einer Paks vergleichbaren seismischen Aktivität (zum Beispiel die Ostküste der USA) muss man die durchschnittliche Wirkung des in der Region beobachteten stärksten Bebens nehmen, angenommen, dass es in einem Umkreis von 25 Kilometer überall zu einem Erdbeben kommen kann. Diese

durchschnittliche Wirkung wird von einem fünfzehn Kilometer entfernten Erdbeben mit einer Attenuation einer 84prozentigen Konfidenz repräsentiert, dessen Ergebnis eine 85prozentige Konfident ist. Die Berechnung für Paks erfolgte unter Annahme des größten Bebens im Raum (1832 Érmellék) und drei Attenuationszusammenhängen unter einer Konfidenz von 84 Prozent. Die so erhaltenen Antwortspektren bestätigen im Vergleich mit dem best-estimate UHRS für 10.000 Jahre die Anwendbarkeit für die Planung, siehe Abbildung 7.

Abbildung 6: Antwortspektren und PSHA-Ergebnisse der drei Kontrollebenen, Vergleich mit best-estimate PSHA

ARUP

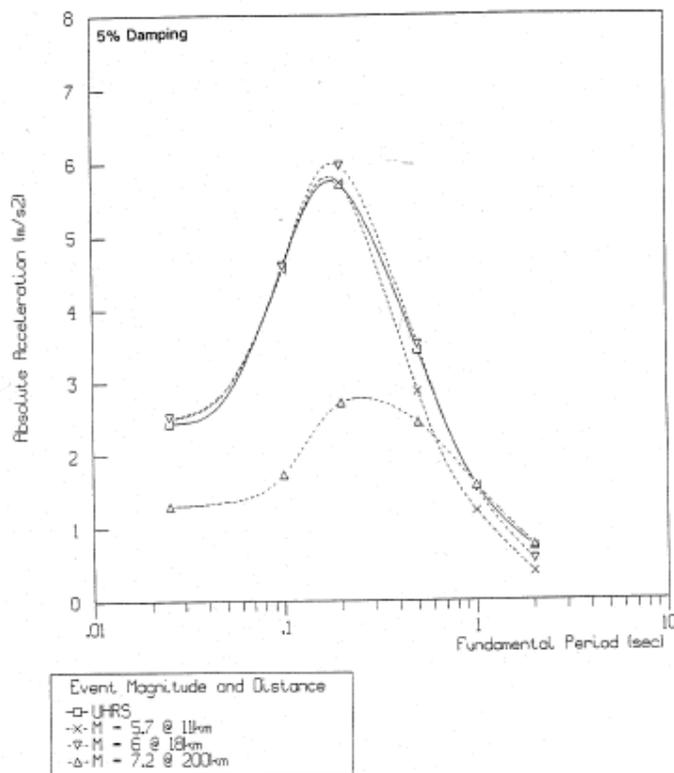


Abbildung 7: Vergleich best-estimate PSHA und deterministisches Antwortspektrum

ARUP

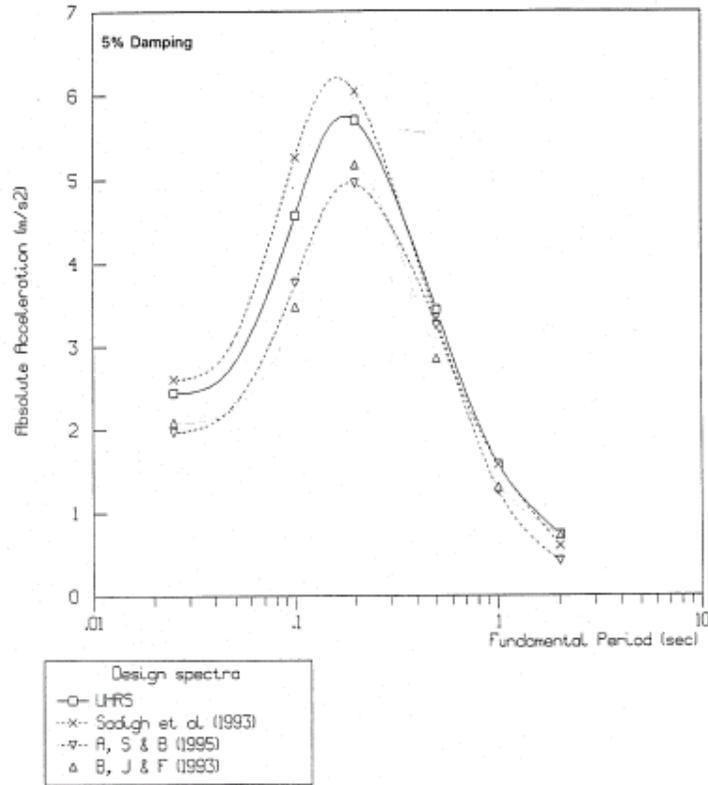
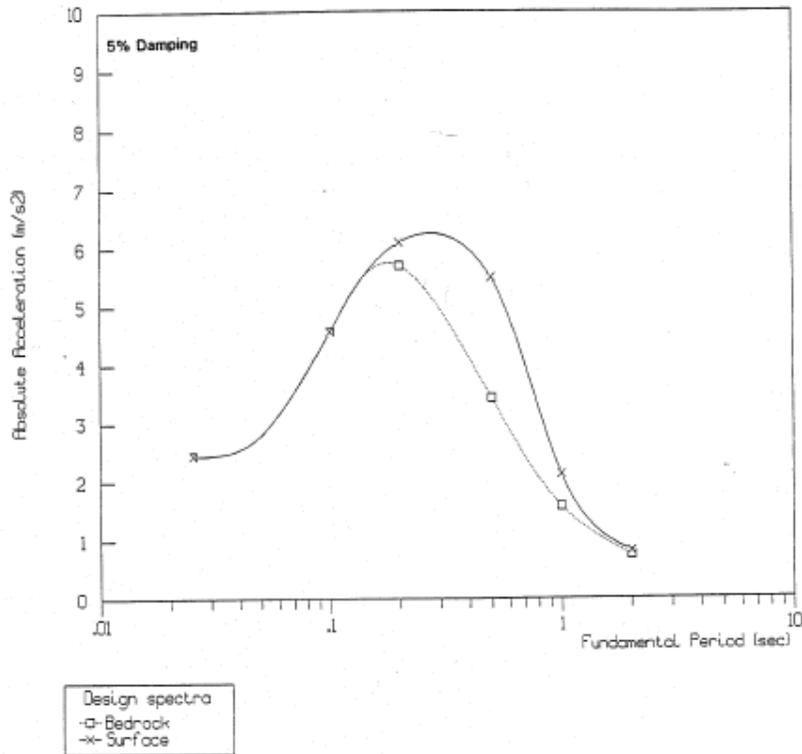


Abbildung 8: Berechnetes maßgebendes Oberflächenantwortspektrum

ARUP



Die Charakteristika des stärksten bemessenen Erdbebens

Das Antwortspektrum des maßgebenden Erdbebens muss für die Oberfläche berechnet werden, da die Erdbebensicherheitsanalysen und -planungen ebenfalls diesen Input erfordern

Die Analyse erfolgte unter Verwendung der detaillierten geotechnischen Daten (Gestaltsänderung abhängig G usw) mit dem mit eindimensionaler, nichtlinearer hysteretischer Dämpfung arbeitenden Programm Oasys SIRREN, das die Antwort der aus waagrechten Schichten bestehenden Bodensäulen angibt. Diesen Berechnungen zufolge führt dies in der Umgebung der 0,5 s Periode der oberen Bodenschicht zu einer 1,5fachen Erhöhung der Amplitude. Der dominante Frequenzbereich liegt an der Oberfläche bei drei Hz, gegenüber einer Verstärkung um fünf Prozent bei den Gesteinsöffnungen. Diese Wirkung ist bei der oberen, im Durchschnitt dreißig Meter dicken, lockeren Gesteinschicht aus dem Quartär zu erwarten. Das berechnete maßgebliche Antwortspektrum an der Oberfläche ist in Abbildung 8 dargestellt.

Im Falle der vertikalen Komponenten ist die verändernde Wirkung der oberen Bodenschichten den Analysen zufolge vernachlässigenswert, somit kann das in Darstellung 5 befindliche vertikale Antwortspektrum als Antwortspektrum an der Oberfläche der vertikalen Komponenten aufgefasst werden.

Die maximale horizontale Beschleunigung des maßgebenden Erdbebens an der Oberfläche beträgt 0,25 g, die der vertikalen Komponenten 0,2 g.

Die für den Standort charakteristische Risikokurve

Die für den Standort charakteristische Risikokurve gibt Antwort darauf, in welchem irgendwelchem Zeitraum wie groß das größte Erdbeben oder jene Bodenbeschleunigung (GPA) ist, bei der oder dem bei einer gegebenen Wahrscheinlichkeit kein größeres/keine größere möglich ist. Im Falle verschiedener Bodenbewegungswerte ist diese Antwort zielführenderweise mit der sog. Risikokurve (hazard curve) repräsentierbar. Die Risikokurve gibt jenen Wert an, dass irgendeine Erdbewegung in einer gegebenen Zeit mit welcher Wahrscheinlichkeit ein gegebenes Niveau erreicht oder überschreitet.

Im Sinne der Verordnung des Industrieministeriums IKIM 62/1997 vom 26. XI. bzw. von Band 3 des NKSZ (*Abkürzung unklar*) ist im Falle von S-2, d.h. bei einem Maximalerdbeben nach Maß die Periode von 10.000 Jahren der Grenzfall für einen störungsfreien Betrieb, damit ist für den Fall eines S-1 Erdbebens diese Periode zielbringend mit hundert Jahren anzusetzen. Der Datenanspruch des seismischen PSA (Wahrscheinlichkeitssicherheitsberechnung) erfordert aber nicht nur die Merkmale dieser beiden Niveaus, sondern alle Massendaten von ganz kleinen Bodenerschütterungen bis hin zu jenen des größten für den gegebenen Ort vorstellbaren Beben maximaler Stärke oder die Kenntnis der Verteilung der Beschleunigungshäufigkeit, der sogenannten Risikokurve (hazard curve).

Die primäre seismologische Information ist die Funktion der Stärke und der Häufigkeit. Aus den Daten des mikroseismischen Monitoring ist diese Funktion im Bereich der kleinen Magnituden feststellbar. Die Verteilung der Häufigkeit von großen Beben am Standort kann man den Berichten der ARUP entnehmen. Im Zeitraum der mikroseismischen Beobachtungen gab es im Bereich $ML=0,6-3,6$ 88 Erdbeben im untersuchten Bereich zwischen nördlicher Länge 45,5-49,0 und östlicher Breite 16,0-23,0, aufgrund derer die Zusammenhangsparameter nach Gutenberg-Richter bestimmbar sind. Für den gesamten Monitorbereich beträgt dies im Magnitudebereich $1,5 \leq M \leq 3,5$

für den ganzen Monitorbereich $\log N=2,66-0,75M$

für die Quellzone ARUP Class 2 $\log N=2,55-0,78M$.

Die von der ARUP bezüglich der historischen Beben für den Bereich $4 \leq M \leq 5,5$ angepasste Zusammenhang beträgt 0,82, was sehr gut zu den obigen Werten passt.

Die Berechnung der Verteilung der Erdbebenhäufigkeit nach der Verteilung der horizontalen Beschleunigung erfolgt, vergleichbar obigem, mittels der Aufarbeitung der mikroseismischen Geschwindigkeitsrekorde und der Festsetzung des Zusammenhanges zwischen Magnitude M , epizentraler Entfernung R , der maximalen horizontalen Beschleunigung A . Dieser Zusammenhang lautet:

$$\log A = -2,747 + 0,683M - 1,690 \log[(R^2 + 2,2 \cdot 10^2)^{0,5}] + 0,417S + S + 0,330P \quad 0,5 < M < 4,0$$

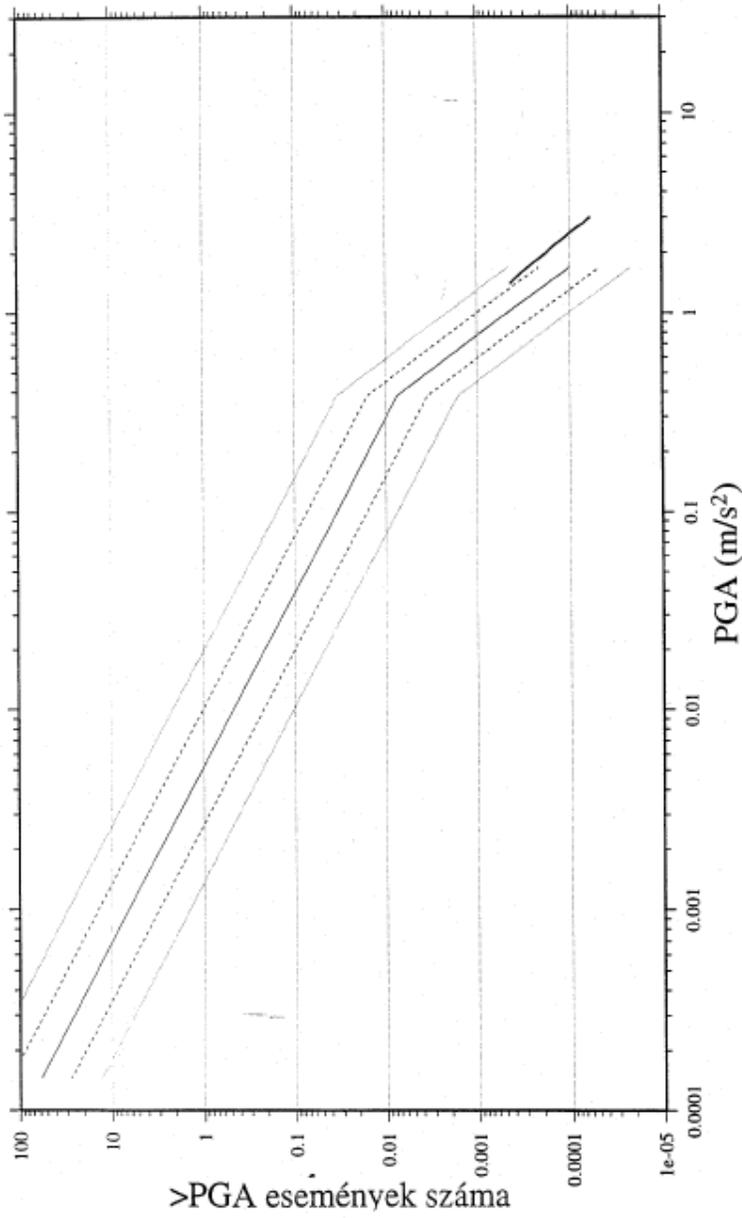
Wobei

S abhängig von den seismologischen Verhältnissen der Umgebung der Station ist, Wert 0, wenn Gestein konsolidiert, 1 wenn lockere Sedimente,

Wert von P gleich 0, wenn die Wahrscheinlichkeit dessen, dass der aufgrund des Zusammenhangs geschätzten Schnelligkeitwertes größer als der echte ist, fünfzig Prozent ist, gleich 1, wenn dies bei 84 Prozent liegt, 2, wenn dieser 98 Prozent beträgt.

Die berechneten Ergebnisse sind auf Abbildung 9 zu sehen, wo die aus der Studie der OVE ARUP entnommene Verteilungsfunktion bezüglich des Bereiches zwischen 0,1 und 0,3 g ebenfalls wiedergegeben wird. Es wäre aber ein Fehler gewesen, die Verteilung irgendeines der beiden Abschnitte auf den anderen zu extrapolieren. E darf nicht außer acht gelassen werden, dass die Häufigkeitskurve der Magnitude in der Nähe der größtmöglichen Magnitude ihre Linearität verliert.

Abbildung 9: Risikokurve in Bezug auf maximale horizontale Beschleunigungskurve

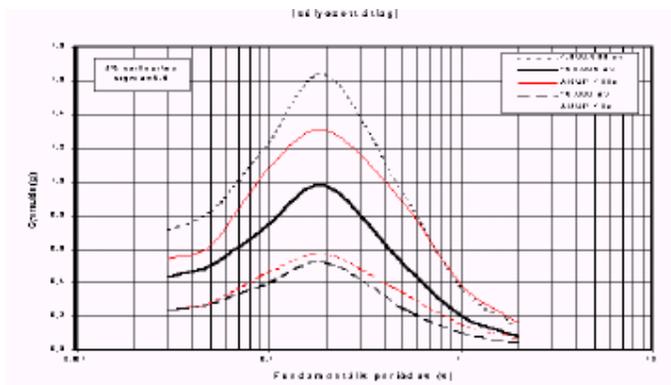


>Zahl der PGAs

Die Neubewertung des Standortes der Seismizität war praktisch die erste und einzige entsprechende umfassende Standortcharakterisierung in Paks. Diese musste ohne Kompromisse ausgeführt werden, als wäre von der Klassifizierung eines neuen Kraftwerkstandortes die Rede. Grundlegende Richtlinien bot das Dokument der IAEA 50-SG-S-1 Rev 1. (In der Praxis mehrerer Mitgliedstaaten muss ein Erdbeben der Häufigkeit von 10^{-4} /Jahr – mit einer Wiederkehrzeit von 10.000 Jahren – bestimmt werden.) In Hinsicht auf die Eigenheiten des Standortes erfolgte die Bewertung der Erdbebengefährdung mit Wahrscheinlichkeitsmethoden. 1996 wurde die Grundlagenforschung bezüglich der Bewertung der Erdbebengefährdung des Standortes abgeschlossen, und die Bewertung bezüglich des größtmöglichen Erdbebens bzw. des Erdflusses abgeschlossen [2], [3], [4], die von der Behörde auch abgenommen wurden. Die komplette Gefährdungskurve für das Intervall 10^{-1} – 10^{-7} /Jahr, eingeschlossen die Untersuchungen bezüglich des Erdflusses wurde im Jahr 2000 fertiggestellt. [5] Diese letztere Untersuchung reproduzierte ebenfalls sehr gut die Ergebnisse bezüglich des größtmöglichen Erdbebens (MMF), das Gegenstand der Bestimmungen des NBS war und auch schon vorher akzeptiert worden war.

Die Studie der OVE ARUP veröffentlichte aber auch Ergebnisse (Antwortspektren, GPA-s) bezüglich der Häufigkeiten geringer als 10.000 Jahre, obwohl die Bewertungen sich nicht darauf spezialisiert hatte. Diese sind auf der Abbildung 10 dargestellt und boten eine Referenz für eine erweiterte Untersuchung der Gefährdung. Es ist festzustellen, dass die Studie der OVE ARUP die Häufigkeit der unter dem Wiederkehrwert von 10.000 Jahren liegenden Erdbeben (obwohl die Repräsentativität des ungarischen Erdbebenkatalogs gerade für diese Kategorie gut ist) unterschätzt, während sie die Wahrscheinlichkeit jener über einem Wiederkehrwert von 100.000 Jahren ein wenig überschätzt, gegenüber der die neuesten Ergebnissen, so auch die mikroseismischen Untersuchungen und neotektonischen Ergebnisse beachtenden neuen Studie. [5]

Abbildung 10 Best-estimate Antwortspektren gleichmäßiger Risiken, fünfprozentige Attenuation, Wiederkehrzeit zwischen 10.000 und 1.000.000 Jahren



3. Sich nach oben öffnende Brüche

Nach dem Dokument 50-SG-S1 (Rev1) der IAEA ist ein ausschließender Grund für die Befähigung eines Standortes die Möglichkeit eines nach oben ausbrechenden Bruches. Die Definition eines sich nach oben öffnenden Bruches und die grundlegenden Erfordernisse zur Bewertung wird von den Paragraphen 604 bis 608 des Dokuments gegeben. Dementsprechend war bei der komplexen geologischen Neubewertung des Standortes eine zentrale Frage, ob die in der Gegend des Standortes befindlichen Strukturen im Laufe des gegenwärtigen tektonischen Regimes (2,5 Millionen Jahre) aktiv waren, d.h. dass in den beim Standort und in den aufgenommen seismischen Abschnitten der Umgebung in der pannonischen Schicht zahlreiche Bruchlinien zu sehen sind, die auf Bewegungen von vor sechs Millionen Jahren verweisen, und ob diese im Quartär aktiv waren oder nicht. Aufgrund der Daten kann angenommen werden, dass die Bruchlinien im allgemeinen in Richtung WSW-ONO verlaufen, einige SW-NO.

Die aus den früheren Untersuchungen 1994 zur Verfügung stehenden Daten waren widersprüchlich:

- Nach einer sehr eindeutigen Konzeption war die Fortsetzung des Bruches von Kecskemét, als eine Fortsetzung des neotektonischen Bruchsystems bis in den Standortraum anzunehmen,
- in den am Standort selbst und in seiner unmittelbaren Umgebung aufgenommen seismischen Abschnitten sind in der pannonischen Schicht Bruchlinien zu sehen, die auf Bewegungen von vor sechs Millionen Jahren verweisen, und die im Quartär aktiv gewesen sind,
- die auf eine Aktivität im Quartär verweisenden bis dato aufgenommen leicht-seismischen Abschnitte wurde auch von zwei unabhängigen Fachleuten (einem Italiener und einem Engländer) ausgewertet, die feststellten, dass die Qualität der vorliegenden Abschnitte keine weitreichenden Folgerungen zulässt,
- gegen eine Aktivität im Quartär sprach, dass es laut den Feldstudien, den geoelektronischen und Bodenradarmessungen im Quartär, zumindest in dessen oberen Zeitregionen und im Holozän – d.h. in den vergangenen mehr als 45.000 Jahren – keine Erdbewegungen im Raum Paks gegeben hatte, die nachweislich und zweifelsfrei tektonische Strukturen nahe der Erdoberfläche in den detailliert untersuchten Schichten geschaffen hätten.

Erkannt wurde auch, dass nachdem das Quartär nur mit einer beträchtlichen Zeitverschiebung sich auf die pannonische Schicht sedimentierte und auch dessen Entwicklung sehr abwechslungsreich ist, die klassische Annäherung, d.h. die Bestimmung der die pannonischen Schichten eindeutig durchquerenden Verwerfungen keine direkten oder endgültig beruhigenden Ergebnisse bringen kann, weshalb auch mittelbare Untersuchungen nötig waren. Offensichtlich war dabei, dass neben einer aufwändigen abschnittswisen Untersuchung der geringfügig seismische Schichten auch die genaue Kenntnis jenes Abschnittes der Verwerfungszone zu einem Ergebnis führen könnte, wo die Sedimentreihe an der Grenze zwischen pannonischer Schicht und Quartärschicht eine laufende ist, dass man also aus der Untersuchung der bekannten pannonischen Schichten und der Aktivität im Quartär auf indirekte Weise neue Kenntnisse erlangen könnte. Es war offensichtlich, dass dem mikroseismischen Monitoring in der Entscheidung dieser Frage eine wichtige Rolle zukommt, allein dazu bedarf es einer langjährigen Datensammlung.

Aufgrund der durchgeführten Analysen lauten die mittelbaren und unmittelbaren Belege dafür, dass man eine Aktivität im Quartär ausschließen kann, wie folgt:

Die von F. Horváth und KollegInnen 1995 in der Donau aufgenommenen Abschnitte haben belegt, dass die in den pannonischen Schichten liegende Bruchlinie die jüngeren Schichten nicht durchquert, in keinem einzigen seismischen Abschnitt dringen diese Bruchlinien in die oberen, mindestens 45.000 Jahre alte Schicht aus dem Quartär ein. Wegen des jungen Alters der Sedimente aus dem Quartär, die den Standort bedecken, kann aber nicht endgültig bewiesen werden, dass diese Bruchlinien nicht aktiv wären, da schon allein definitionsgemäß der Begriff des "gegenwärtigen tektonischen Regimes" bei weitem 45.000 Jahre überschreitet.

Bezüglich der Wahrnehmungsgrenze ist eine Bewegungsgeschwindigkeit der im Gebiet befindlichen Bruchlinien von 0,05 bis 0,1mm/Jahr aufgrund der zur Verfügung stehenden geologischen und geophysikalischen Daten nicht auszuschließen, wird aber gleichzeitig von keinen regionalen geomorphologischen Daten bestätigt. Sicherlich stehen vorerst nur wenige Daten zur Verfügung, aber auch in dem westlich vom Standort befindlichen älteren Löss ist keine einzige Bruchlinie aus dem Quartär zu finden. Gleichzeitig können die Bewegungsgeschwindigkeiten der Quartärschichten an Betrachtung des auf ca. 0,9 Millionen Jahre anzusetzenden Alters der Lössschichten nicht größer sein als 0,02 mm/Jahr.

Die im Umkreis des Standortes bzw. am Standort selbst durchgeführten detaillierten geologischen, geophysikalischen Untersuchungen zeigen, dass es keine offensichtlichen Hinweise auf Verwerfungen aus dem Quartär gibt. Dort, wo detaillierte Daten zur Verfügung stehen, sind die Ablagerungen aus dem Quartär störungsfrei.

Es war zu keiner einzigen pannonischen Struktur eine in irgendeiner Weise messbare Aktivität zuzuordnen (auch wenn man dies wegen der geringen Daten, die zur Verfügung stehen, auch nicht ganz vollständig ausschließen kann, so kamen hier die Informationen aus dem auch zur Zeit noch laufenden mikroseismischen Monitoring.) Die bei der Betriebsstätte in der pannonischen Schicht aufgearbeiteten Strukturen sind nicht einzigartig, es gibt zahlreiche solche in einem Umkreis von dreißig bis vierzig Kilometer in nördlicher und südlicher Richtung von der Betriebsstätte. Die mit Sedimenten aus dem Quartär bedeckten pannonischen Verwerfungen, die in einem Umkreis von hundertfünfzig Kilometer untersucht wurden, durchbrachen nicht die Schichten aus dem Quartär.

Aus der Auswertung der mittelbaren und unmittelbaren Daten haben die in- und ausländischen Fachleute festgestellt, dass es keinerlei geologische oder geomorphologische Belege für die Aktivität der sich unter dem Standort ziehenden Bruchlinie gibt. In der Folge kann festgestellt werden, dass die in den pannonischen Schichten befind-

lichen Strukturen bei der Betriebsstätte Paks und Umgebung mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht aktiv sind, und daher in der Folge mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit keine nach oben an die Oberfläche dringende Brüche verursachen.

Die Untersuchung der Umgebung des AKW Paks entwickelte sich im vergangenen Jahrzehnt zu einer komplexen geologischen Forschung, die zu zahlreichen neuen wichtigen Erkenntnissen führten. Die komplexe Auswertung der Daten des mikroseismologischen Monitoring und deren Vergleich mit den neuesten Ergebnissen der neotektonischen Forschungen zeigen, dass man – obwohl das rezente Benehmen der Gegend, ja des ganzen Beckens Gegenstand weiterer Forschungen ist – die Möglichkeit eines sich nach oben hin öffnenden Bruchs am Standort ausschließen kann (im Detail siehe im folgenden).

4. Zusammenfassende Bewertung des mikroseismologischen Monitoring

Die Kapazitäten des seismologischen Netzes in Ungarn gingen bis vor kurzem auf dem Grossteil des Gebietes des Landes nicht tiefer als die Ebene eines spürbaren Erdbebens. Die in den Katalog aufgenommenen Daten, die der Ausgangspunkt aller späteren Untersuchungen zur Seismizität darstellen, fußten bis 1995 ausschließlich auf makroseismischen Beobachtungen. Die internationale Erfahrung hat gezeigt (Schweiz, skandinavische Länder), dass nach dem Ausbau eines äußerst sensiblen seismologischen Beobachtungssystems sich ein Bild bezüglich der Erdbebenaktivität einer ganzen Region, der Existenz und Lokalität aktiver Strukturen, über rezente Spannungsverhältnisse grundlegend verändern kann.

Die internationale Praxis der IAEA bezüglich einer Standortkontrolle schreibt ein mikroseismisches Monitoring als Bewertung für einen Standort als Datenquelle zwingend vor, und dieser Praxis folgt auch die ungarische Regelung.

Zur Abklärung der gegenwärtigen Seismizität im weiteren Umfeld des AKW Paks kam es – entsprechend den Empfehlungen der IAEA – zum Ausbau eines mikroseismischen Beobachtungsnetzes mit zehn Stationen in einem ca. fünfzig Kilometer großen Umkreis des Kraftwerkes. Die modernen digitalen Messstationen wurden im März 1995 in Betrieb genommen, seither ist die Datensammlung kontinuierlich, neben der laufenden Verfeinerung der Parameter. Die genauen Örtlichkeiten dieser Monitoring-Stationen sind auf Abbildung 11 angeführt, die Sensibilitätsverteilung auf Abbildung 12. Eine detaillierte Beschreibung des technischen Systems und eine komplexe Auswertung der bis März 1998 gesammelten Daten ist in dem Bericht der GEORISK Ges. m. b. H. vom Juli 1999 unter dem Titel "Mikroseismische Beobachtungen des Standort des AKW Paks und seiner Umgebung. Zusammenfassende Bewertung" zu finden. Die Planung, der Aufbau und der Betrieb und die Auswertung der Daten ist unter breitester Einbeziehung von ungarischen – und über das PHARE-Programm – auch ausländischen Fachleuten, nach den international akzeptierten seismologischen Standard, auf eine vollkommen transparente Weise erfolgt.

Abbildung 11: Lokalisierung der Monitoringstationen

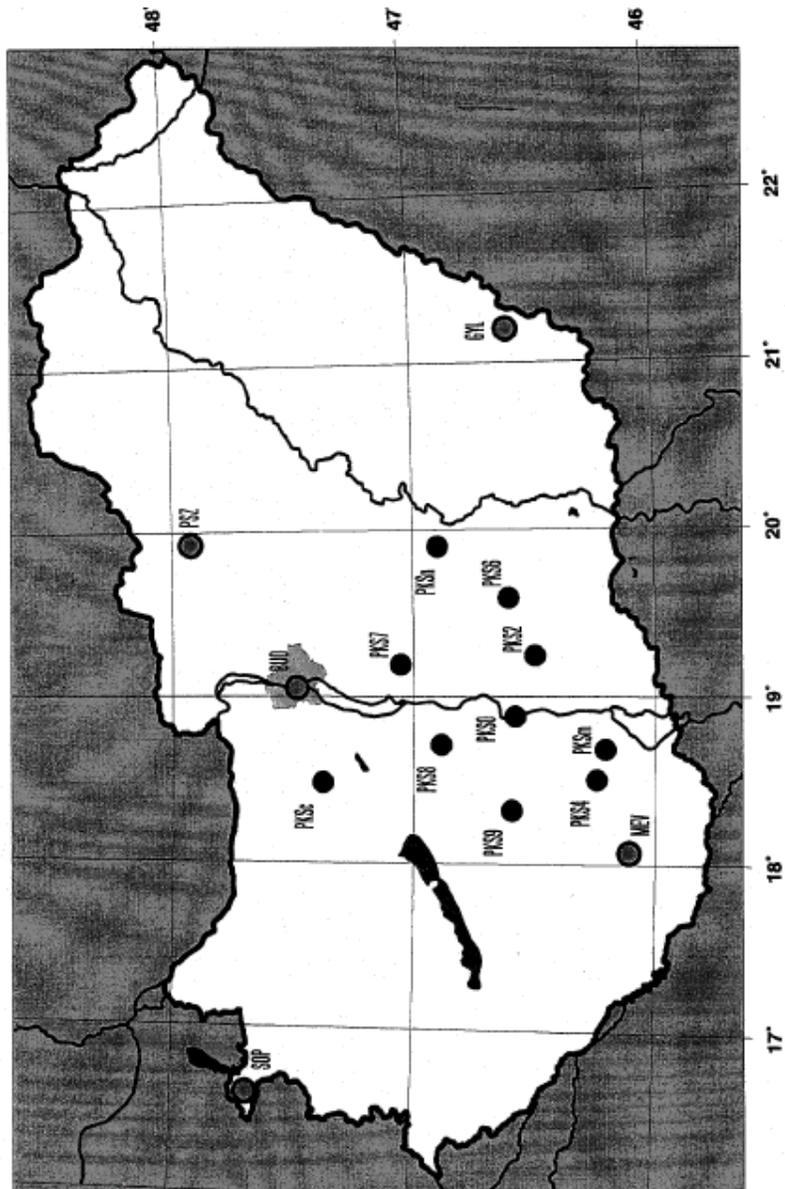
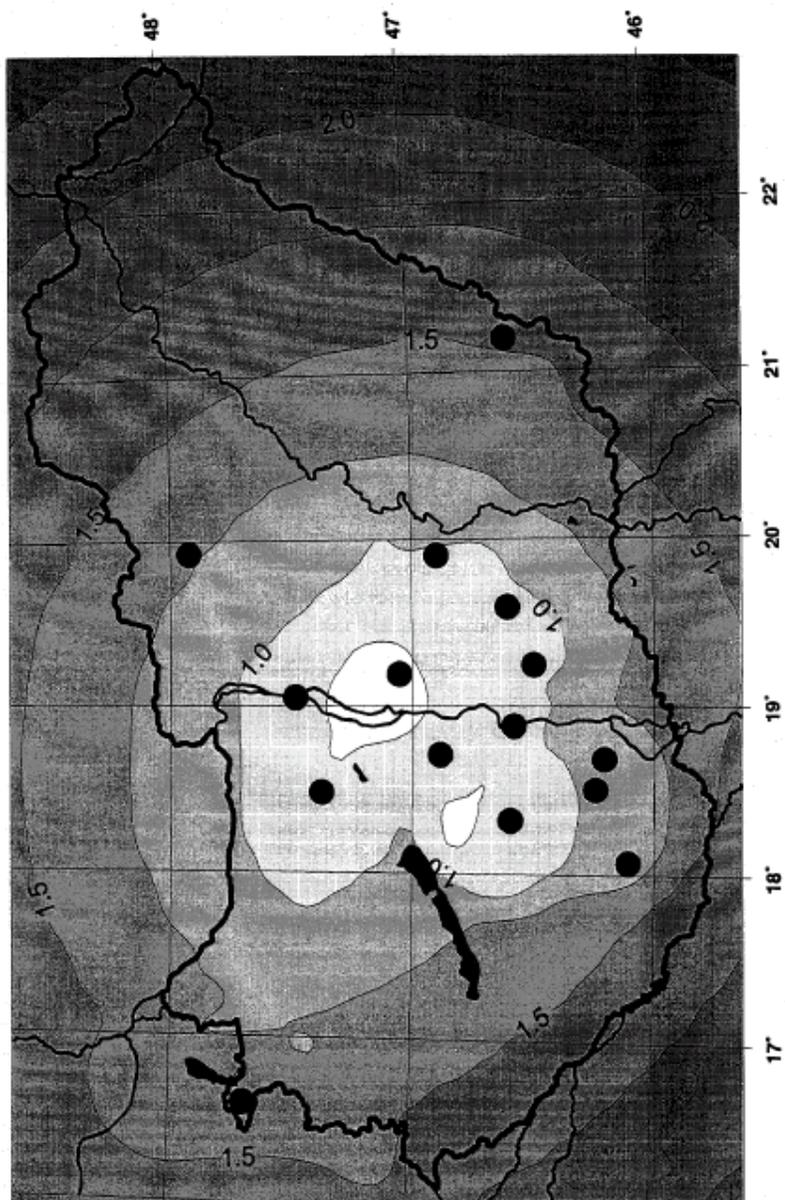


Abbildung 12: Verteilung der Sensibilität der Monitoringstationen



Das mikroseismologische Beobachtungssystem des AKW Paks ist in erster Linie dazu berufen, die Erdbeben in Ungarn bzw. entlang der Grenze zu beobachten, fokussiert aber vor allem auf einen Umkreis von einhundert Kilometer des Standortes selbst. Dieser Umkreis ist mit den Koordinaten nördlicher Breite 45.5.-49.0 und östlicher Länge 16.0-23.0 einzugrenzen. In der weiteren Umgebung von Paks war es – an Betracht der historischen Seismizität – durchaus zu erwarten, dass es jährlich zu mindestens sechs bis dreißig Erdbeben kommt, deren Magnitude $M \geq 2$ ist. Im angeführten Bereich kam es zwischen Jänner 1995 und März 1998 zu 88 Erdbeben im Bereich einer Stärke von $ML=0,6-3,7$, in sechs Fällen ist es nicht gelungen, die Magnitude zu bestimmen. Die von der ARUP definierte Class 2, oder Quellzone D ist etwas kleiner als das vorhin definierte Fenster, enthält nicht die Österreichs östliche Hälfte über das Wiener Becken in Richtung Slowakei durchziehende verhältnismäßig aktive Zone, die Aktivität in Slowenien um Koprivnica, kleinere Bereiche in Kroatien und die im das rumänische Temesvar liegenden Banater Quellen. In dem in der ARUP-Studie als "Class 2" definierten Bereich gab es 66 Vorfälle. Die Zahl der jährlichen Beben zeigt folgende Tabelle:

Zeitraum	Zahl der Erdbeben
1995	9
1996	18
1997	51
1998, Jänner bis März	10

Die Verteilung der vom mikroseismologischen Monitoring-System wahrgenommenen Vorfälle werden in Abbildung 13 angeführt.

Die AKW Paks AG hat über die auswertenden "statistischen" Berichte, die die Daten des Monitoring regelmäßig präsentieren, auch ein komplexe Analyse im Umfeld der aktuellen Ergebnisse bezüglich der seismischen Aktivität im Quartär ausführen lassen. Es ist zu sehen, dass die Bewertung des Standortes Paks, die die damaligen neotektonischen Kenntnisse integrierte, der Erforschung der gegenwärtigen Aktivität neuen Schwung verliehen hat. Neue Forschungsergebnisse bezüglich der Entstehung des pannonischen Beckens kamen im Bereich der weltraum-geodäsischen Bewegungsforschung, der Analyse der Spannungen und im Bereich der Neotektonik ans Tageslicht. Natürlich befinden sich diese Forschungen erst im Stadium fachlicher Werkstattgespräche, gleichzeitig haben sie – gemeinsam mit den mikroseismologischen Ergebnissen – in ihrer Gänze nur die Richtigkeit des ARUP-Berichtes bestärkt. Im weiteren zitieren wir die Hauptaussagen der zusammenfassenden Bewertung:

1. Die Planung, der Aufbau und der Betrieb und die Auswertung der Daten ist unter breitester Einbeziehung von ungarischen – und über das PHARE-Programm – auch ausländischen – British Geological Survey, OVE ARUP – Fachleuten, nach den international akzeptierten seismologischen Standard, auf eine vollkommen transparente Weise erfolgt.
2. Das Beobachtungsnetz hat sich als fähig erwiesen, das gesetzte Ziel der Wahrnehmung, Identifizierung von Erdbeben $ML \geq 2,0$ und deren Hypozentrum über einen hundert Kilometer Umkreis um Paks hinausgehend, sich fast auf das ganze Land erstreckend wahrzunehmen. Dies war bereits indiziert, als sich die ursprüngliche Annahme, diese würde wegen der erwarteten Hintergrundgeräusche nicht empfindlich genug sein, als unwahr erwies und wird durch die aus dem Messergebnissen berechnete Stärke-Häufigkeitskurve nur bestätigt.
3. Aufgrund der im Laufe des Programms identifizierten Vorfälle ist – obwohl wegen der verhältnismäßig gemäßigten Seismizität die Messdaten nicht gerade viel sind – feststellbar, dass die meisten gegenwärtigen Beben an bereits bekannte Quellen gebunden sind. Die Mehrheit dieser zeigt auch gegenwärtig eine durchaus messbare Aktivität. Bis dato sind keine neuen Kenntnisse aufgetaucht, die ein Überdenken der Quellzonen, die bei der Berechnung der Erdbebenrisiken bis jetzt zum Einsatz gekommen war, als angebracht oder begründet erscheinen lässt.

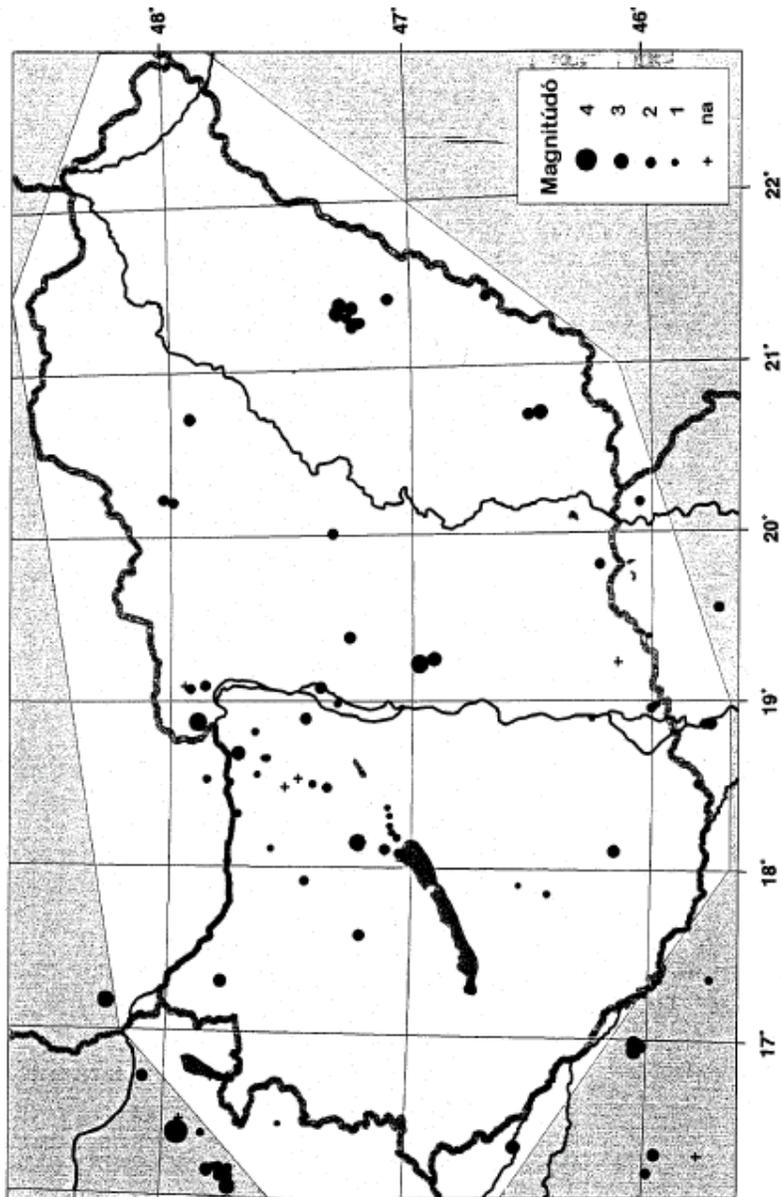
4. Bezugnehmend darauf, dass die Wahrnehmungssensibilität des Messnetzes auf die Gegend um Paks fokussiert, ist mit großer Sicherheit feststellbar, dass es im Beobachtungszeitraum im Umkreis von fünfzig Kilometer, kein Erdbeben gegeben hat, dessen Stärke den Wert $ML \geq 1,0$ erreicht hätte.
5. Aufgrund des Herdmechanismus der Erdbeben verlaufen die auf allgemeine Spannungszustände verweisenden Hauptachsen im Wiener Becken eindeutig in Nord-Süd –Richtung, im Bereich des Mittelgebirges in Transdanubien zeigt sich eher ein Verlauf in Richtung NO-SW als signifikant.
6. Im pannonischen Becken gibt es auch zur Zeit einen Stau von Spannungen, der sich von Zeit zu Zeit entlang der bekannten Linien und Brüche entlädt. Die Größe dieser Erdbeben hängt davon ab, wie sich die einzelnen Strukturelemente infolge dieser Entladung zueinander bewegen können. Gemäß unseren früheren tektonischen und seismologischen Kenntnissen können wir darauf schließen, dass sich am Beckengrund wegen seiner starken Gebrochenheit eine starke Spannung nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit ansammeln kann. Damit ist auch die Seltenheit von Erdbeben, deren Stärke 5,5 übersteigt, und die Obergrenze der Stärke von 6 erklärbar. Die als Folge des Monitoring wesentlich präzisierete Beziehung $\log N = a - bM$ (Abbildung 14) macht aber gleichzeitig deutlich, dass die Wiederkehrhäufigkeit eines Bebens der Stärke 6 zwei- bis dreihundert Jahre beträgt. Die Untersuchungen zeigen auch, dass die von den Anomalien der Potenzialräume signalisierten tektonischen Verhältnisse einen engen Zusammenhang mit den Epizentren von Erdbeben zeigen. Erdbeben sind in erster Linie an die ausgeprägten Punkte (Treffpunkt von Enden, Richtungsänderungen und Brüchen) von durch Anomalien gekennzeichneten Brüchen gebunden.
7. Das pannonische Becken befindet sich im Zustand der tektonischen Reaktivierung im Zuge des Quartärs. Die jüngsten tektonischen und geodäsischen Forschungsergebnisse sowie seismische Interpretationen bestätigen diese Annahme eindeutig, ja sie lassen es sogar als wahrscheinlich erscheinen, dass die rezente Durchschnittsgeschwindigkeit sowohl der vertikalen als auch der horizontalen Bewegungen sich in der Größenordnung von mm/Jahr befinden. Dieser Wert ist um ein bis zwei Größenordnungen größer, als dies bei der Risikoanalyse der OVE ARUP bezüglich der slip rate, der Bewegungsgeschwindigkeit der Verwerfungen angenommen wurde. Daraus kann man noch keine weitgehenden Konsequenzen bezüglich der seismischen Gefährdung des Standortes des AKW Paks ableiten, weil das Monitoring das zuversichtliche Bild zeigt, dass es in einem bedeutenden Umkreis des Standortes innerhalb des Untersuchungszeitraumes zu keiner die Wahrnehmungsgrenze übersteigenden seismischen Aktivität gekommen ist.
8. Die Ergebnisse des mikroseismischen Beobachtungsnetzes wurden – über die unmittelbare industrielle Verwertung hinausgehend – auch in zahlreich wissenschaftliche Programme eingebaut und sorgen auch für einen Beitrag für die ganze ungarische Geologie, was sich in zahlreichen Zitaten in den Fachpublikationen niederschlägt.
9. Sowohl die bereits in Betrieb befindlichen als auch am Standort Paks und in der Umgebung der Region geplanten neuen Objekte machen eine weitere Verfeinerung der Erkenntnisse bezüglich der seismischen Risiken erforderlich, eine laufende Datensammlung – unter laufender Beachtung der wissenschaftlichen und methodischen Entwicklungen. Dafür bietet das mikroseismische Beobachtungsnetz einen einzigartigen Input. In Eintracht mit den Empfehlungen des PHARE-Programms halten wir einen weiteren Betrieb des Erdbebenmonitoringsystems für unumgänglich.

Die bereits fertiggestellte Zusammenfassung der Bewertung kommentierend, können wir folgendes feststellen:

Punkt 3 der Zusammenfassung bestätigt die Richtigkeit der Quellzoneneinteilung des Berichtes der OVE ARUP aufgrund der mikroseismischen Ereignisse. Punkt 4 hält aber fest, dass man im Umkreis des Standortes keine mikroseismische Aktivität feststellen konnte. Beide Behauptungen sind bezüglich der Richtigkeit der damaligen Bewertungen der OVE ARUP von kardinaler Bedeutung.

Punkt 5 und 6 bestätigen gemeinsam das seismotektonische Bild des Berichtes der Firma OVE ARUP. Die aufgrund der mikroseismischen Ereignisse präzisierete Verteilung der Häufigkeits-Magnitude ist festzuhalten, dass die in der Bewertung dieser in der Bewertung der Seismizität eine grundlegende Rolle spielende Zusammenhang in den Bewertungen der OVE ARUP richtig und konservativ ist, was sich zum Beispiel auch in der konservativen Darstellung der Magnitudewerte der maximal möglichen Erdbeben niederschlägt.

Abbildung 13: Verteilung der von Monitoringsystem wahrgenommenen Vorfälle



Die siebte Folgerung bedarf einer ausführlicheren Erläuterung. Die Behauptung bezüglich einer tektonischen Reaktivierung des pannonischen Beckens unter dem gegenwärtigen tektonischen Regime bezieht sich auf die Entwicklung im Quartär. Diese Theorie scheint auch ein neuerliche geringfügig-seismische Profilierung und über die Analysen der Spannungen hinaus, auch eine Bewegungsmessung der ganz Transdanubien in NS-Richtung durchmessenden Basisline mit weltraum-geodäsischen Methoden zu bestätigen. Daraus ist anzunehmen, dass es im Inneren des Beckens etwas schnellere Geschwindigkeiten gibt, als etwa früher angenommen. Die AutorInnen halten es aber nicht für wichtig, den Bericht der ARUP an diesem Punkt zu überprüfen. Ein Grund dafür ist, dass es noch jahrelanger Forschung bedarf, um einerseits das Datenmaterial zu vervollständigen, es zu präzisieren, etwa um die mit weltraum-geodäsischen Methoden festgestellten Bewegungen zu kartographieren; andererseits gibt es nicht unbedingt einen Widerspruch bezüglich der konkreten Verschiebungsdaten der ARUP, die für die Strukturen im Umfeld des Standortes bestimmt worden sind, und den aus den neuesten Messungen sich ergebende Hinweise auf ein globales Benehmen des Beckens. Die Ergebnisse des mikroseismischen Monitoring haben eben ergeben, dass die ursprünglichen Annahmen im Raum Paks korrekt sind. Im Bericht der ARUP kam die unter dem Standort befindliche lineare Quelle in den Wahrscheinlichkeitsberechnungen nur mit einer kleinen Gewichtung vor, womit die ungarischen Fachleute weitestgehend konform gehen (siehe Z. Ballas, T. Tóths und F. Horváths Diskussionsbeitrag in den Geologische Mitteilungen – Földtani Közlöny 1999). Der Bekanntheitsgrad der Neotektonik des pannonischen Beckens hat sich in den vergangenen Jahren sehr viel weiter entwickelt, ist im Stadium einer intensiven Werkstättenarbeit – dennoch erwarten sich die Fachleute in den nächsten Jahren keinerlei allseits abgesicherte neue Erkenntnisse, wegen denen der robuste und konservative Charakter der Bewertungen des ARUP-Berichtes in irgendeiner Weise hinterfragt werden könnte.

Summa summarum: die Ergebnisse des mikroseismischen Monitoring haben jene früheren Schlussfolgerungen bestärkt, dass am Standort eine rezente Aktivität auszuschließen ist, weiters auch die bei den Bewertungen eines maximalen Erdbebens angenommenen Modells und Charakterisierungen.

Tatsache ist, dass das mikroseismische System das einzige landesweite mikroseismische Beobachtungsnetz ist und sich daran ein fundamentales wissenschaftliches Interesse knüpft. Auch einzusehen ist, dass sich im Zuge der Weiterentwicklung der Geologie noch weitere Debatten bezüglich der Aktivität des Quartärs und in der Sache der Seismizität ergeben werden. In diesen Debatten wird dem mikroseismologischen Monitoring eine entscheidende Rolle zukommen. Aus obigen Gründen wird die AKW Paks AG das System weiter fortsetzen.