

## Beilage 6

### 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
Abbildung 10: Risikokurve in Bezug auf maximale horizontale Beschleunigungskurve .....	23
3. Sich nach oben öffnende Brüche.....	24
4. Zusammenfassende Bewertung des mikroseismologischen Monitoring.....	26
5. Die ingenieursgeologischen und geologischen Verhältnisse des Standortes.....	34
a) Grundlegende Basis .....	34
b) Situation der vorkommenden Böden, Bohr- und Schichtprofile.....	34
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.

Die Vorstudie zur Umweltverträglichkeitsprüfung wurde vom "Ungarischen Geologischen Dienst" begutachtet, der schließlich eine fachbehördliche Stellungnahme im Zusammenhang mit der Vorstudie zur Umweltverträglichkeitsprüfung herausgegeben hat. Im Interesse der Erfüllung der fachbehördlichen Erfordernisse kam es in den Jahren 2004 bis 2005 zu einer Reihe von Untersuchungen und Analysen.

Ein geologisch-hydrogeologisches Modell wurde für die Umgebung des AKW Paks angefertigt [10], die Ergebnisse des seit zehn Jahren laufenden mikroseismischen Monitoring wurde ausgewertet, das neotektonische Modell erneuert [8], die ingenieurgeologischen Daten der Betriebsstätte neu zusammengefasst und bewertet [9], wie nunmehr auch ein Bericht über die Anfertigung eines hydrogeologischen Modells für die weitere Umgebung des AKW im Rahmen des Programms zur Standortcharakterisierung vorliegt.

# 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

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

geführt.

Die Untersuchung erstreckte sich gemäß der IAEA-Richtlinie 50-SG-S1 (Rev 1) 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 Aufschließungen.

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 Göröcsöny 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 waagrechten 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 einen 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 Sümpfen 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 Flussanschwemmungen, 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 Bereiche, 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 Bogyiszló 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 abge bundenen 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 Lössdolinien, 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, kleingeratenen (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 Mezöföld 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 Sánc-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<sub>3</sub>-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, Dunaújváros 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

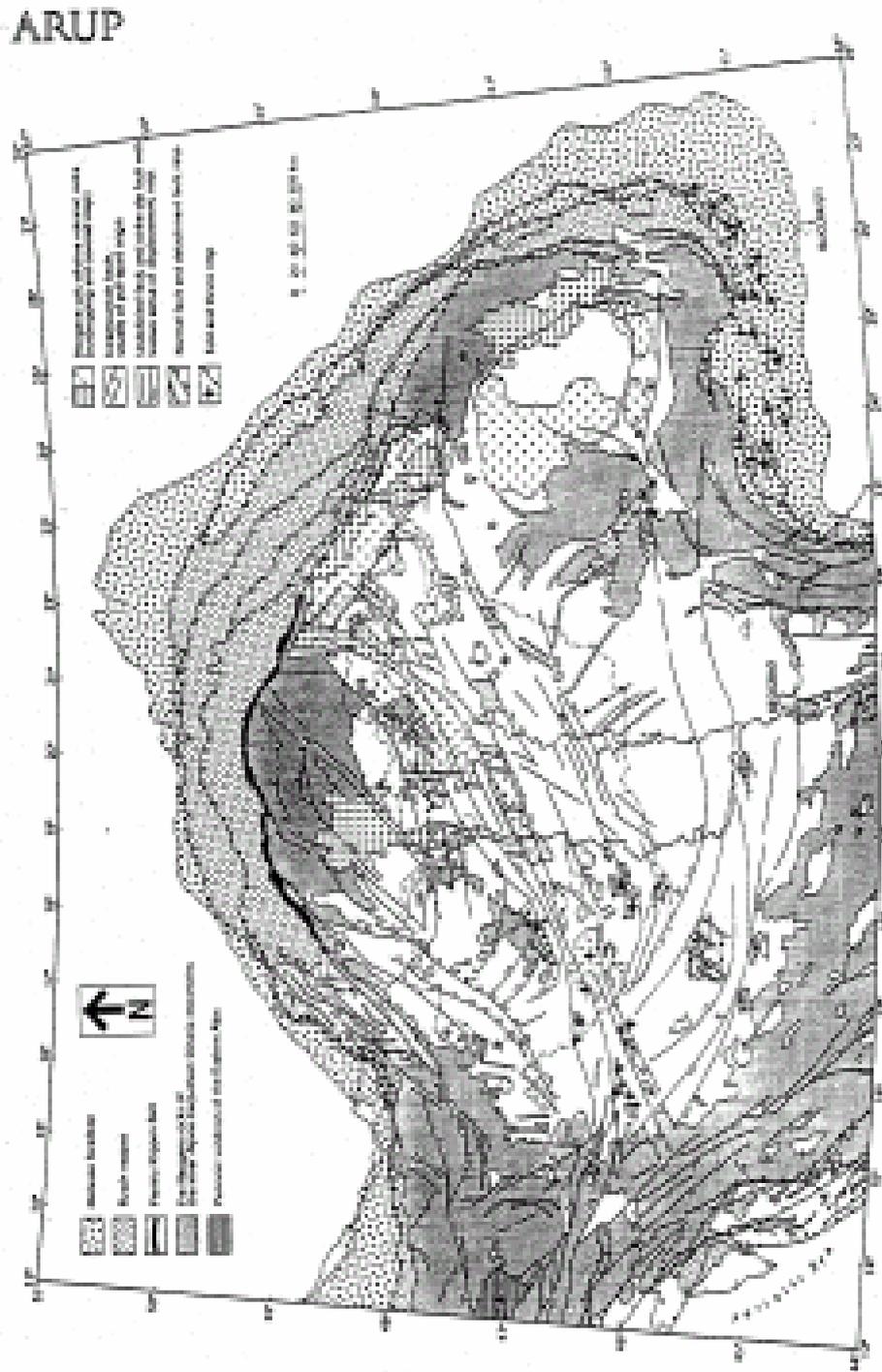
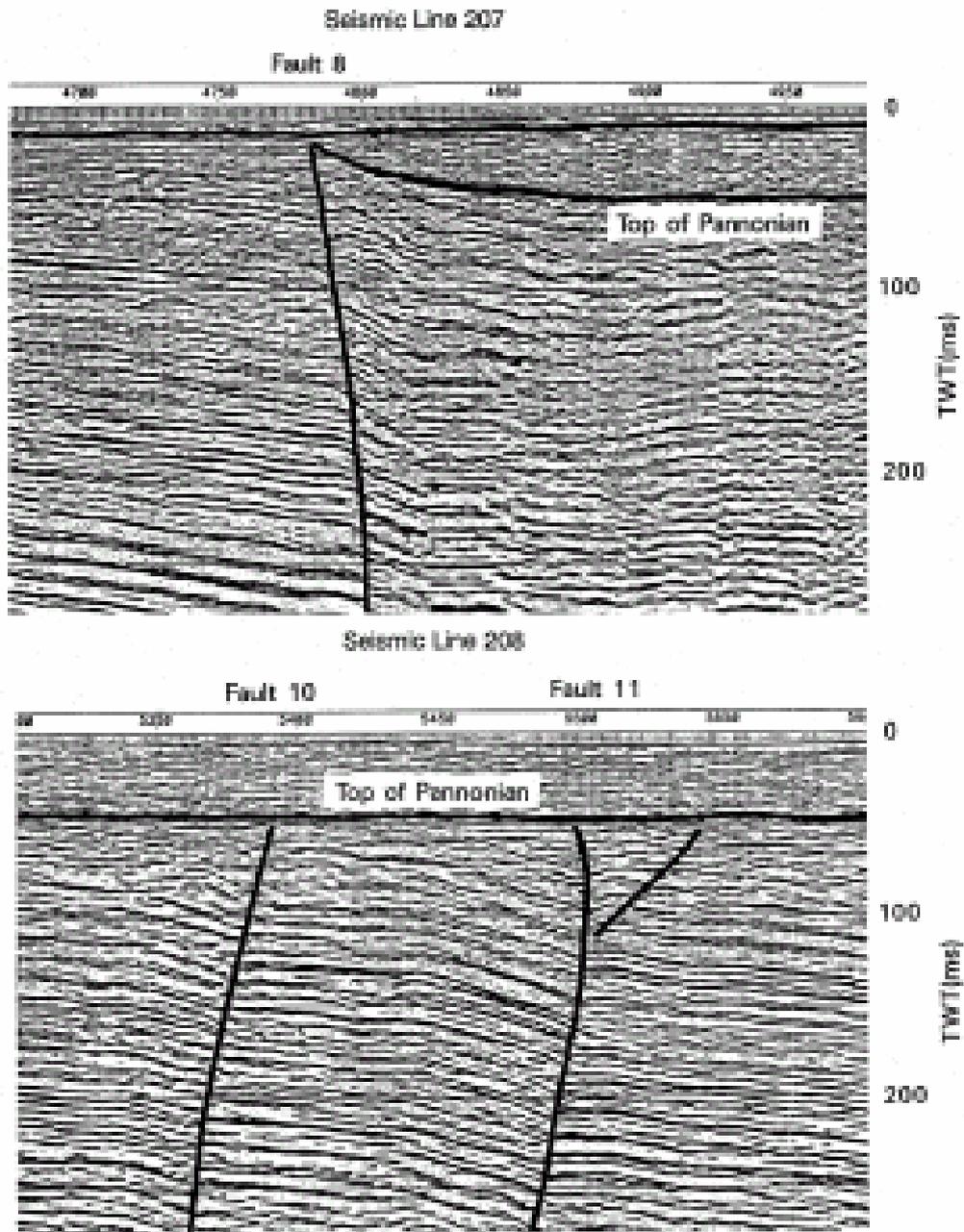


Fig. 4. Miocene tectonic map of the Pannonian basin and the surrounding Alpine-Carpathian-Dinaric mountains. Abbreviations assigning some of the main faults are as follows: B - Bolatón line; Bp - Bolyhary line; Bv - Bogdan Voila line; C7 - Corua-Jiu line; D - Drávas line; Da - Darvas line; De - Deveszka line; F3 - Fella-Sava line; AB - Hrubanovo-Dobojan line; Br - Borzna line; F - Idrja line; K - Kapos line; L - Lavanttal line; La - Lab line; M - Murath line; Mg - Mezőtölgy line; MD - Máltes-Drautal line; Mf - Mur-Món line; P4 - Pannonic-Graubühel line; Po - Pottendorf line; S - Sava line; SE - Salzachal-Eisenal line; Sr - Steinberg line; ST - South Transylvanian line; TR - Telegdi-Roth line; Za - Zagreb line; Zc - Zemplén line.

Fig. : 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<sup>o</sup> 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<sup>o</sup> gerechnet werde, während es alle vierzig bis fünfzig Jahre zu einem Erdbeben der Magnitude 8<sup>o</sup> 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 Wellenverbreitungsverhältnisse.

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.

Die neuesten Forschungsergebnisse bezüglich der unmittelbaren Umgebung des Standortes [8]:

Als Ergebnis der Erneuerung des neotektonischen Modells wurde eine neue neotektonische Landkarte der Umgebung des AKW Paks angefertigt (Abbildung 3). In der Umgebung des Atomkraftwerks sind bestimmte Teile stark deformiert, anderswo gibt es wiederum keinerlei Anzeichen einer neotektonischen Aktivität. Die jungen Brüche liegen verhältnismäßig nahe zueinander, sind relativ komplex in ihren Abläufen und gruppieren sich in Gürtel innerer Schnitte. In der Gegend von Paks bezeichnen die Serie grundlegend linksgängiger Verschiebungen einige breitere Schnittzonen. Eine der wichtigsten dieser ist die bereits früher identifizierte Kapos-Linie und ein davon in Nordost-Richtung abzweigender Zweig, der zum Teil neben und unter dem Kraftwerk vorbeizieht.

Wegen des geologischen Aufbaus ist die Bestimmung des Alters der neotektonischen Verwerfungen in der unmittelbaren Umgebung von Paks nur innerhalb sehr weiter Grenzen möglich, die Strukturen können als jünger als fünf bis sechs Millionen Jahre bezeichnet werden.

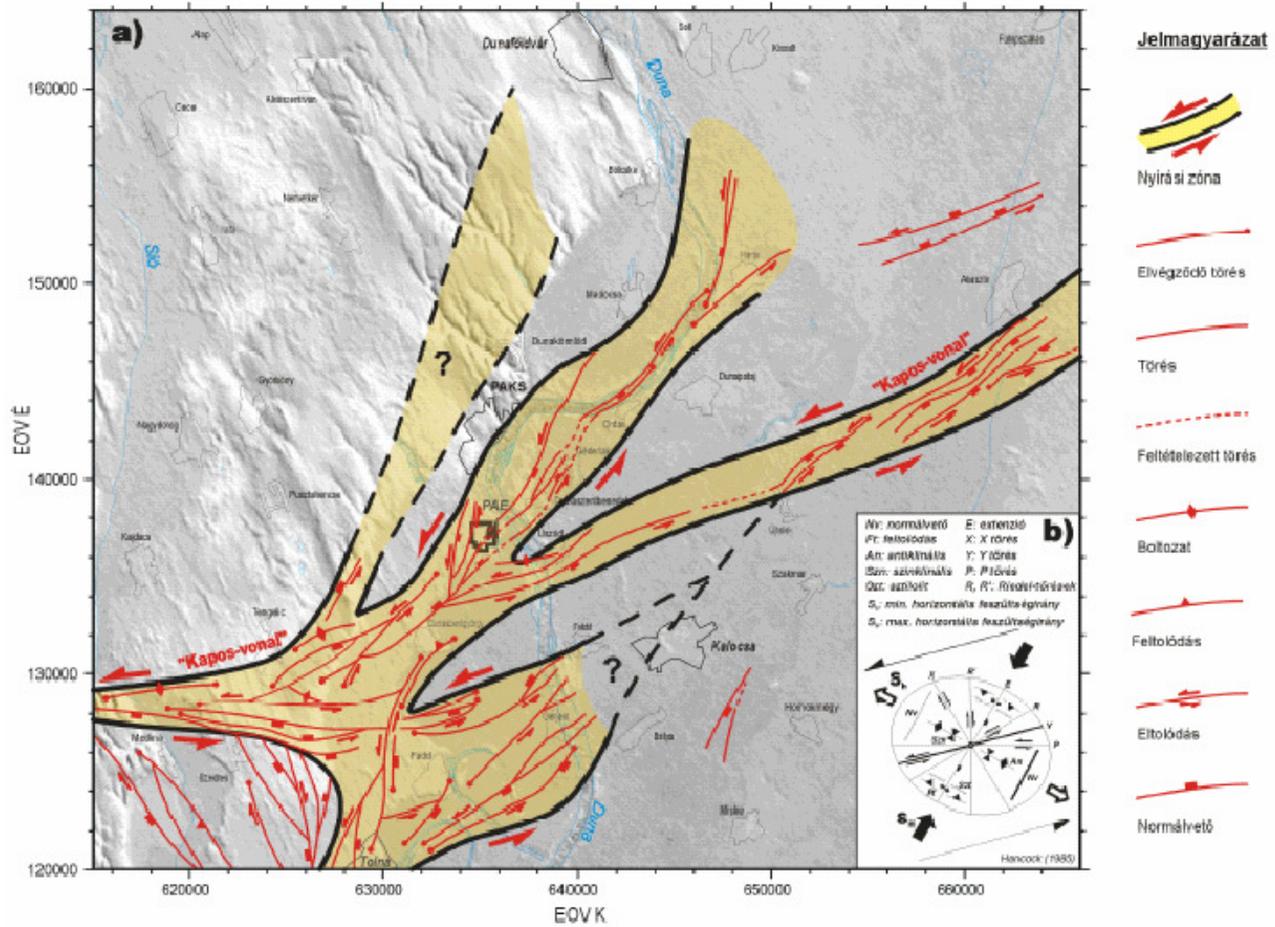
Aufgrund der Ergebnisse der Seismizität und der GPS-Bewegungsuntersuchungen ist die gegenwärtige Aktivität als mäßig zu bezeichnen. Nach den Beweisen der seismischen Abschnitte berühren die Brüche das Alluvium der Donau nicht. Aufgrund dessen ist feststellbar, dass es unterhalb der Donau in den vergangenen einigen zehntausend Jahren zu keinerlei Verwerfung bis an die Oberfläche geschehen ist, zumindest zeigen sich dafür keine Spuren.

## 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 Fachmensen 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.

Abbildung 3.: Neotektonische Landkarte des AKW Paks (2005)



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 Konservativismus bei den Schlussfolgerungen und der Ergebnisse führte. Den Konservativismus 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 Paks Standort. 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.

### **Erdbebengefährlichkeitsberechnungen**

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 Quellzonen 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 Quellenmodelle.

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 Aufbruchslinien 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 Übertragung 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 4 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 5 ersichtlich.

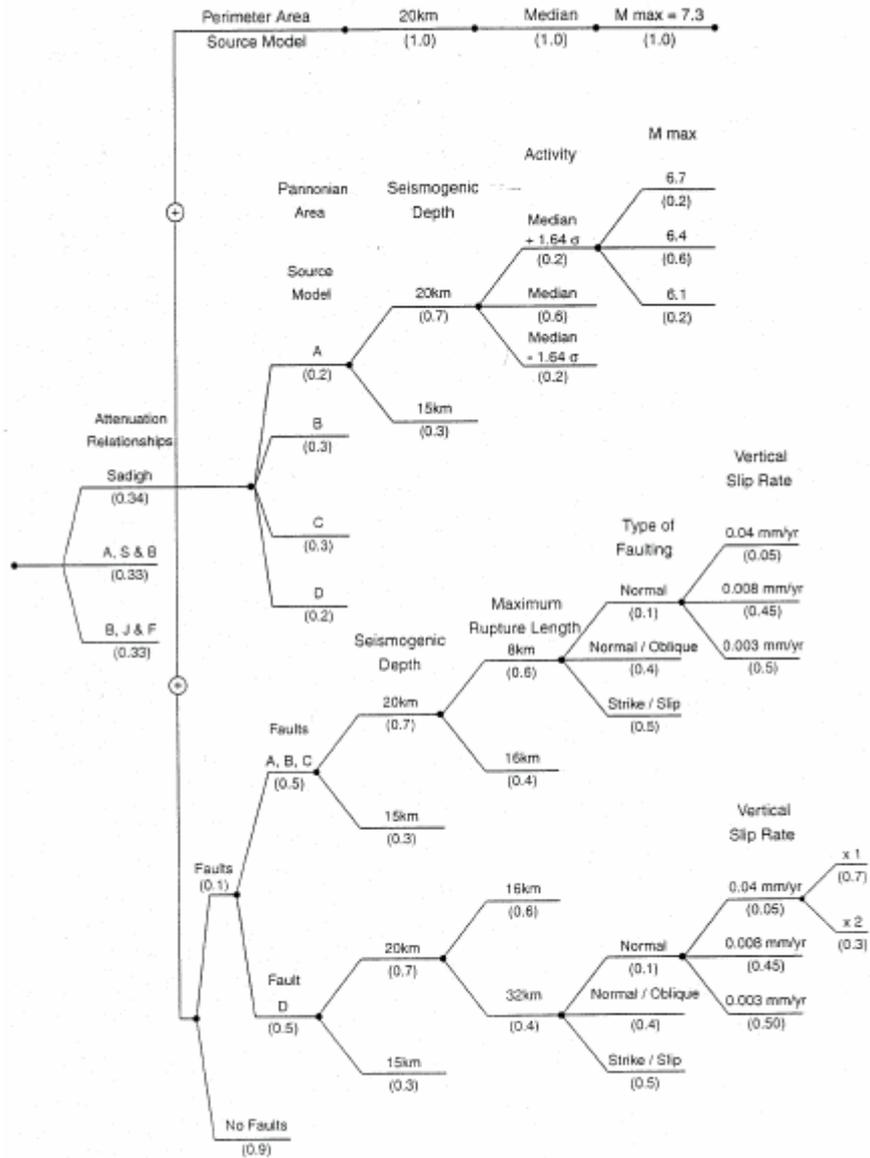
Die waag- und senkrechten Beschleunigungskomponenten-UHRS-e in einer 10.000jährigen Wiederkehrperiode eines Bebens sind auf Abbildung 5 dargestellt.

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.

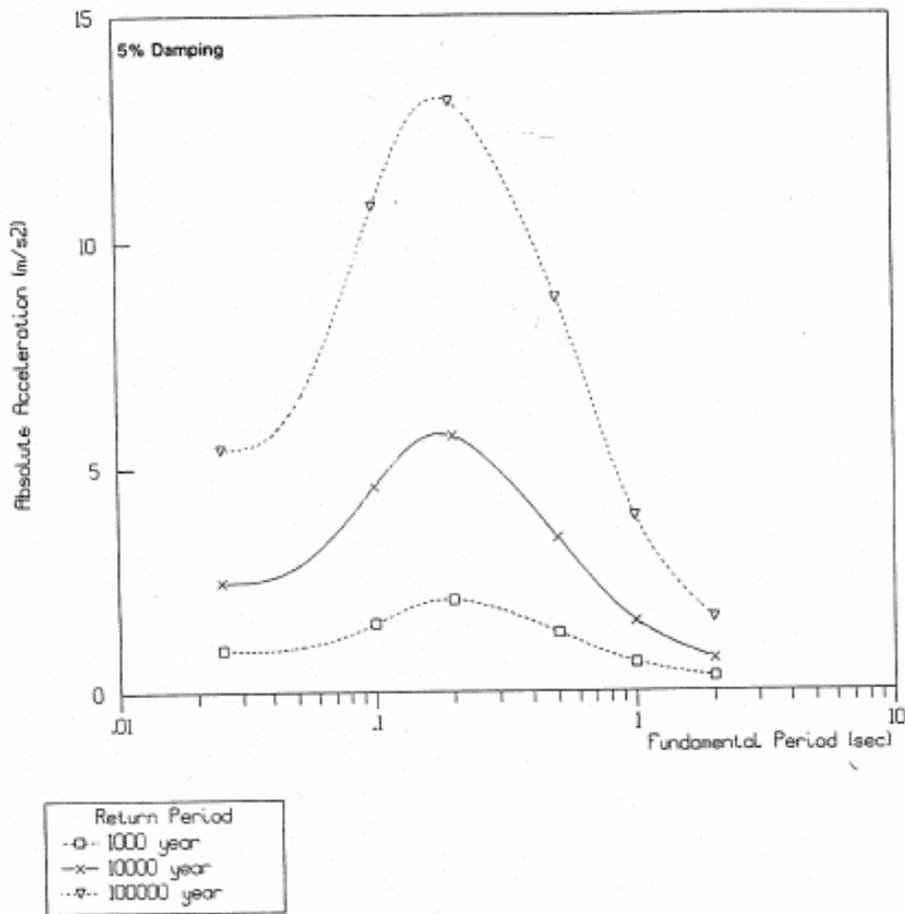
Die statistische Unwahrscheinlichkeit des Ergebnisses ist recht erheblich, es gibt eine zweieinhalbfache Abweichung zwischen der fünfprozentigen und der 95prozentigen Konfidenz und eine 1,7fache zwischen der 15- und 85prozentigen.

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.

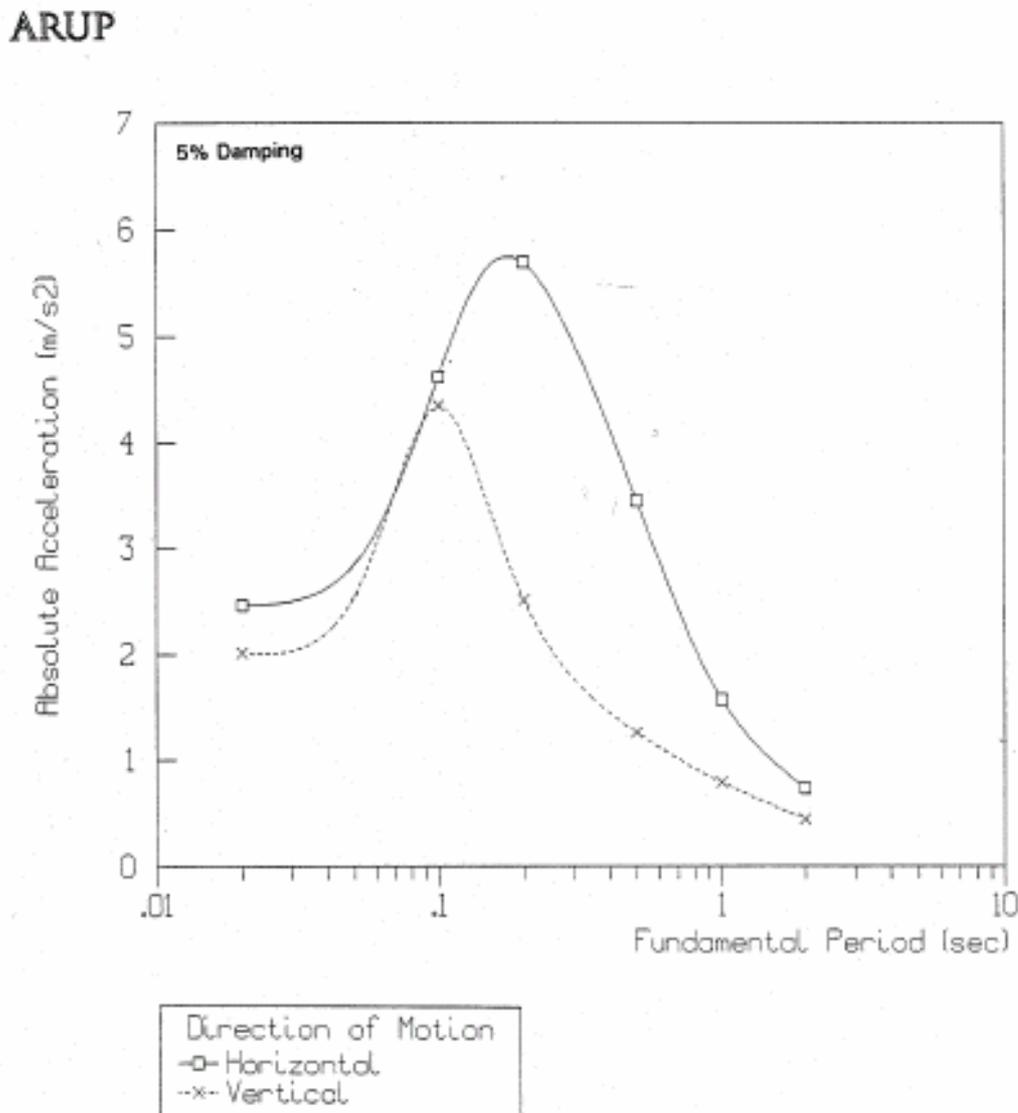
**Abbildung 4: Logikbaum des PSHA**



**Abbildung 5: UHRS bezogen auf eine Wiederkehrzeit von 1.000, 10.000 und 100.000 Jahren**



**Abbildung 6: UHRS-Werte der Beschleunigungskomponenten eines Erdbebens mit der Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren**



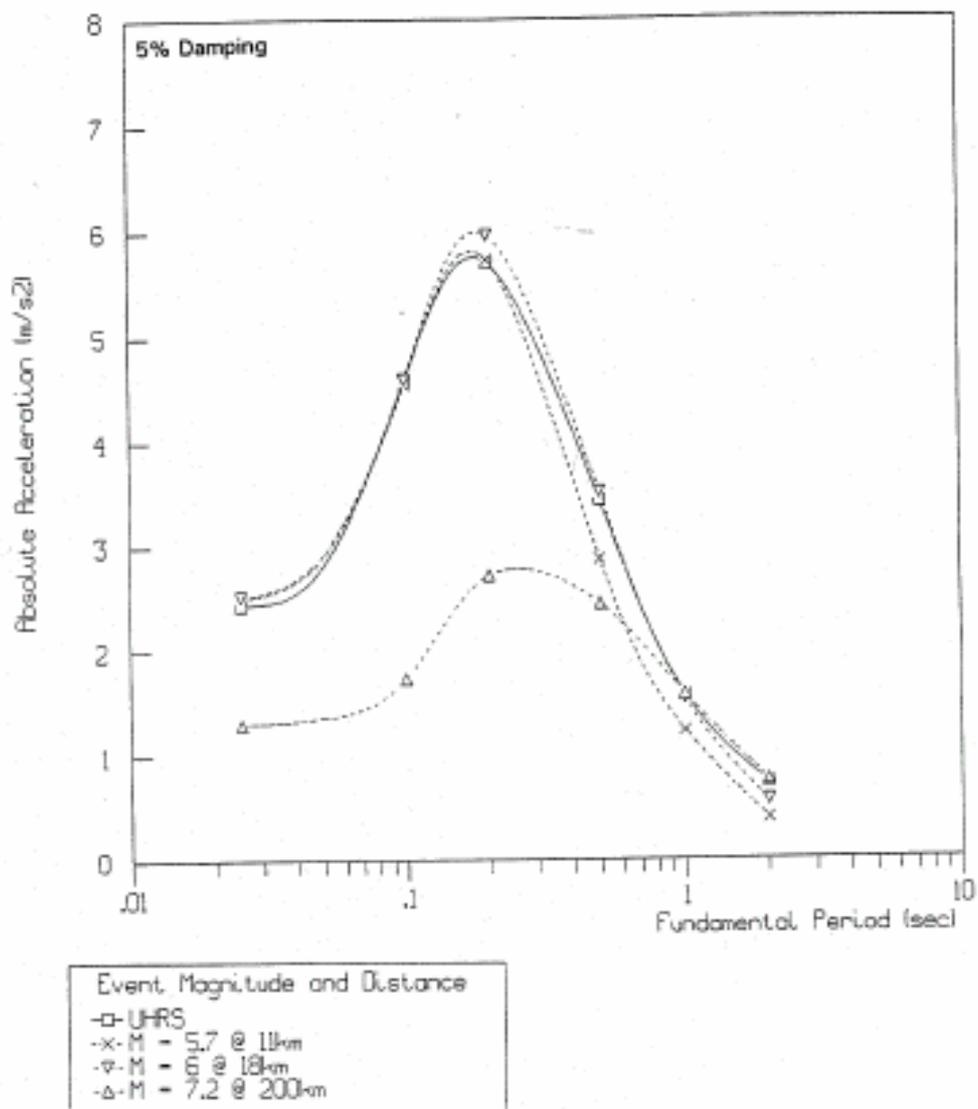
In Betracht zu ziehen, sind auch die Fernbeben, deren Beitrag zum Ergebnis größer als fünf Prozent ist. Entsprechend den Vorschriften von DG-1032 muss Beben in einer Entfernung von elf Kilometer mit einer Magnitude von 5,7, bzw. in einer Entfernung von achtzehn Kilometer mit einer Stärke von 6,0, weiters 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 7** zeigt, dass die Spektralamplituden 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 8.

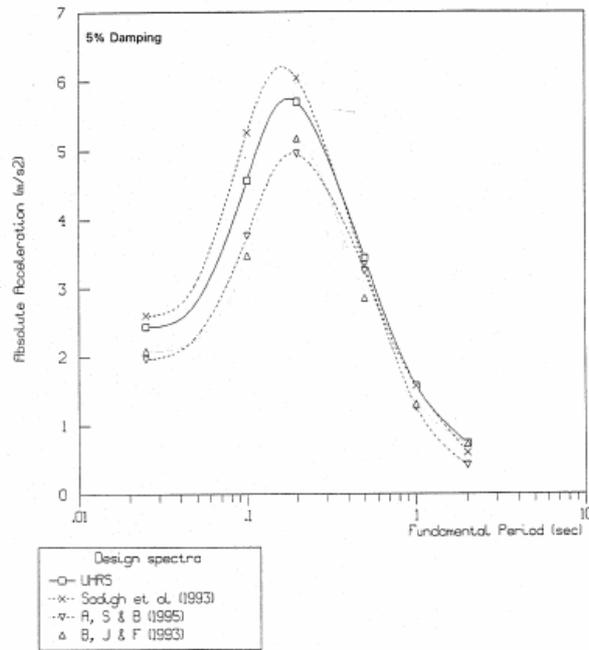
**Abbildung 8: Antwortspektren und PSHA-Ergebnisse der drei Kontrollebenen, Vergleich mit best-estimate PSHA**

ARUP



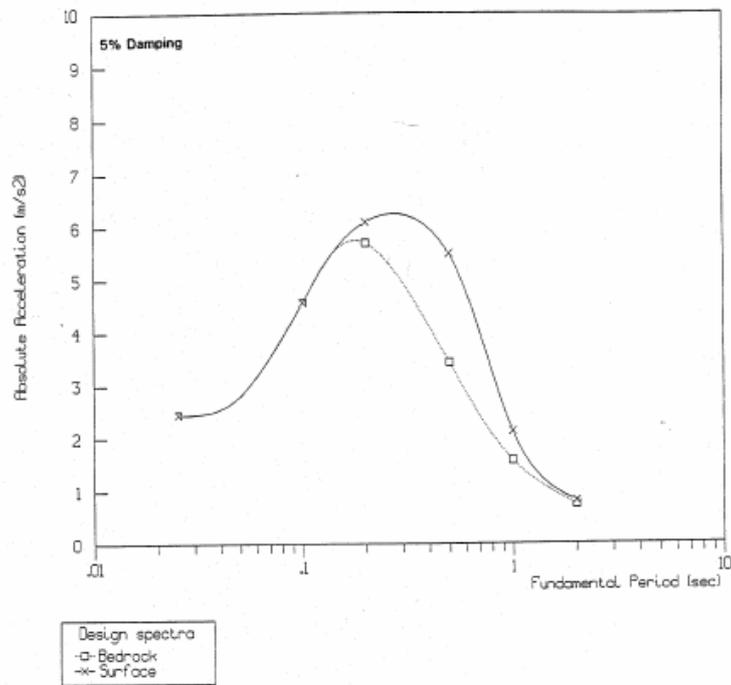
**Abbildung 8: Vergleich best-estimate PSHA und deterministisches Antwortspektrum**

ARUP



**Abbildung 9: 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 irgendetwelchem 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 (Wahrscheinlichkeitsberechnung) 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 Date des mikro-seismischen 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 mikro-seismischen 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  $1,5 \leq M1 \leq 3,5$

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  $4 \leq M1 \leq 5,5$  angepasste Zusammenhang beträgt 0,82, was sehr gut zu den obige Werten passt.

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

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

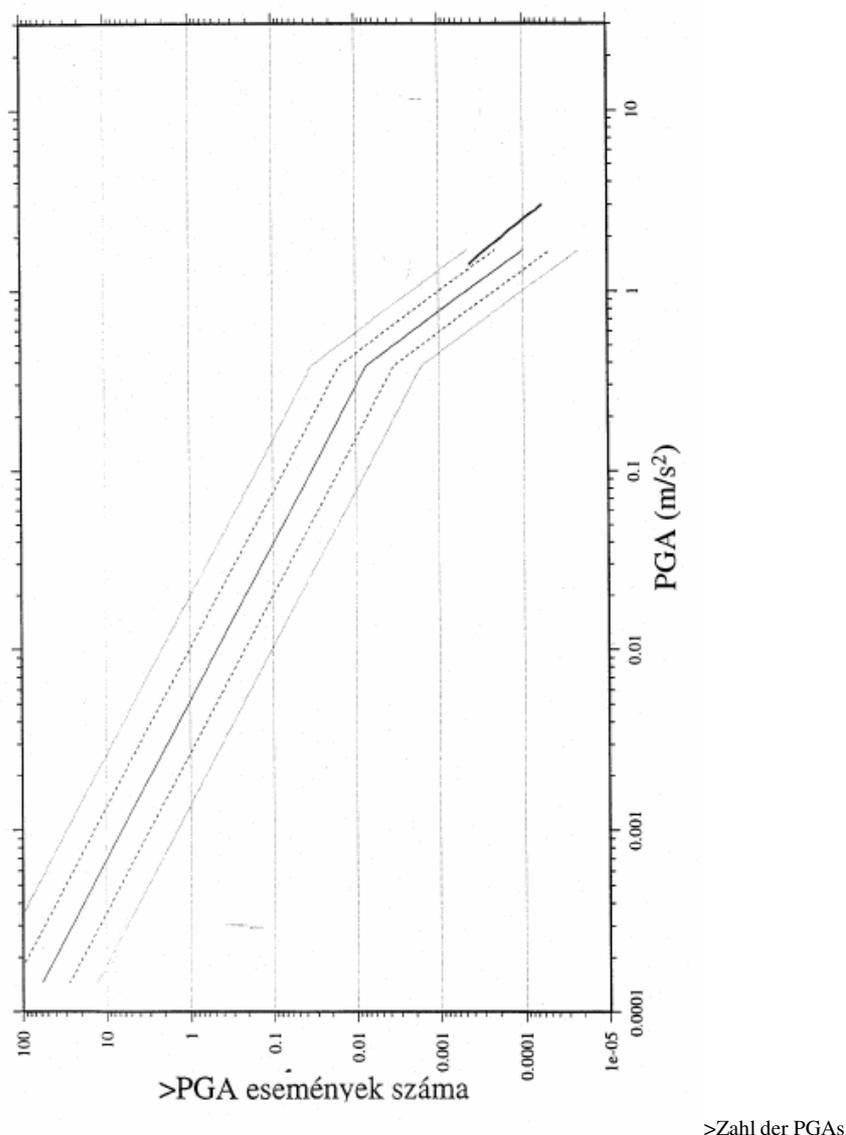
Wobei

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 Schnelligkeitswertes 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 10 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. Es darf nicht außer acht gelassen werden, dass die Häufigkeitskurve der Magnitude in der Nähe der größtmöglichen Magnitude ihre Linearität verliert.

**Abbildung 10: Risikokurve in Bezug auf maximale horizontale Beschleunigungskurve**

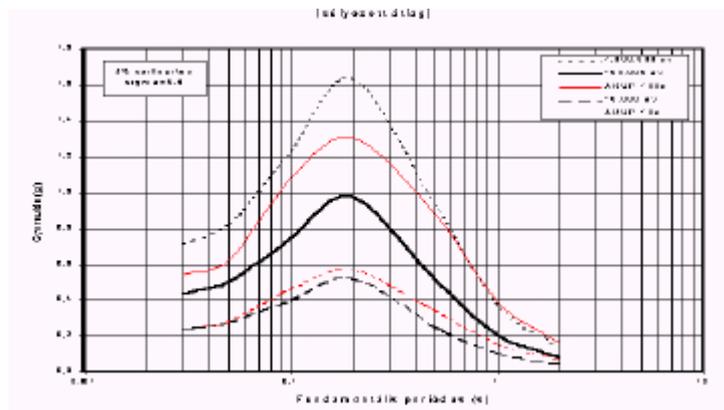


Die Neubewertung des Standortes der Seismizität war praktisch die erste und einzige entsprechende umfassende Standortcharakterisierung in Paks. Diese musste ohne Kompromisse ausgeführt werden, als wäre von der Klassifizierung eines neuen Kraftwerkstandortes die Rede. Grundlegende Richtlinien bot das 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  $10^{-1} \div 10^{-7}$ /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 NBSZ 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 11.: 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 befindlichen 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 führte. Die komplexe Auswer-

tung der Date 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).

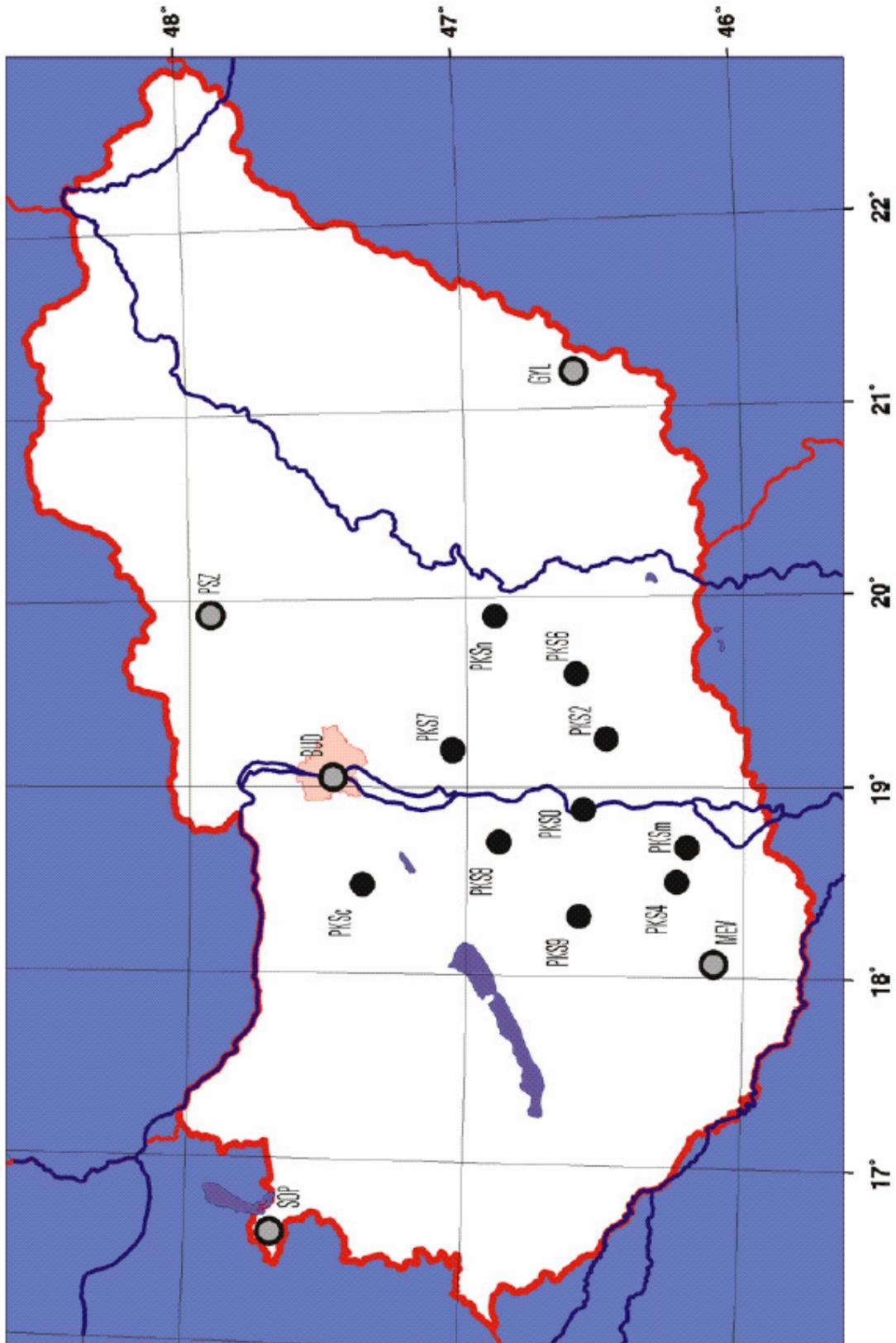
#### **4. Zusammenfassende Bewertung des mikroseismologischen Monitoring**

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 aufgenommen 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 12: Lokalisierung der Monitoringstationen



**Abbildung 13: Verteilung der Sensibilität der Monitoringstationen**

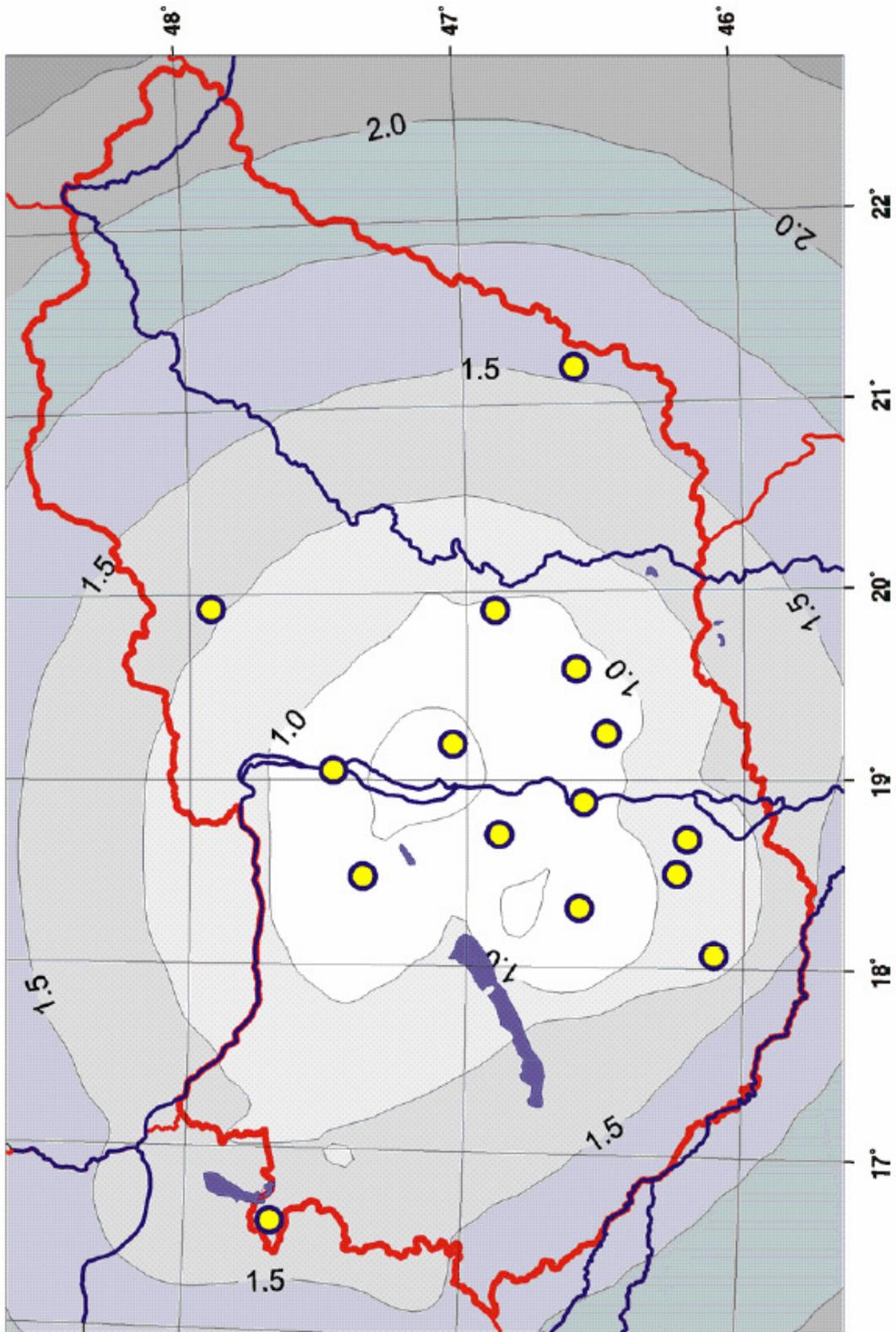
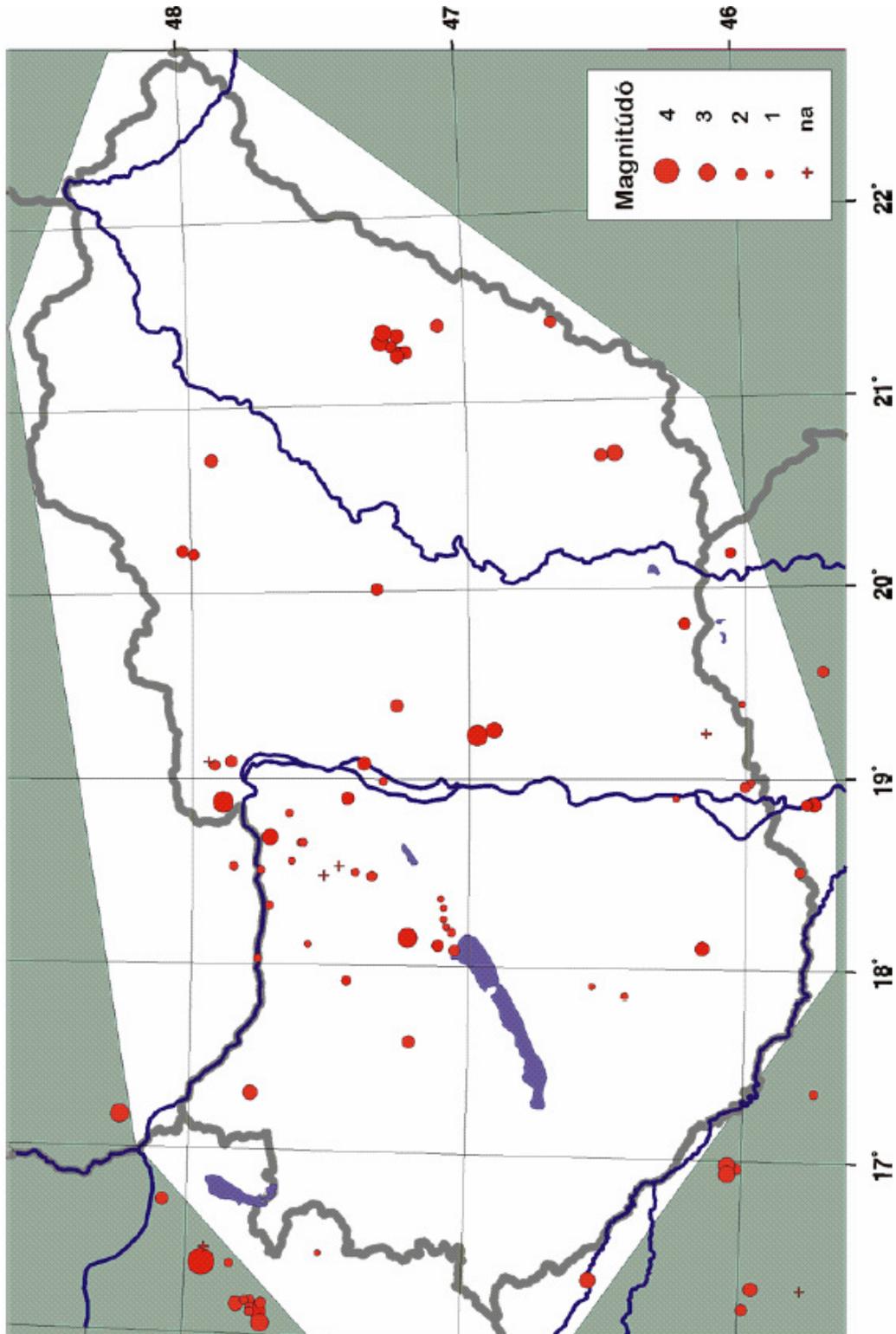


Abbildung 14: Verteilung der von Monitoringsystem wahrgenommenen Vorfälle



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 eine 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.

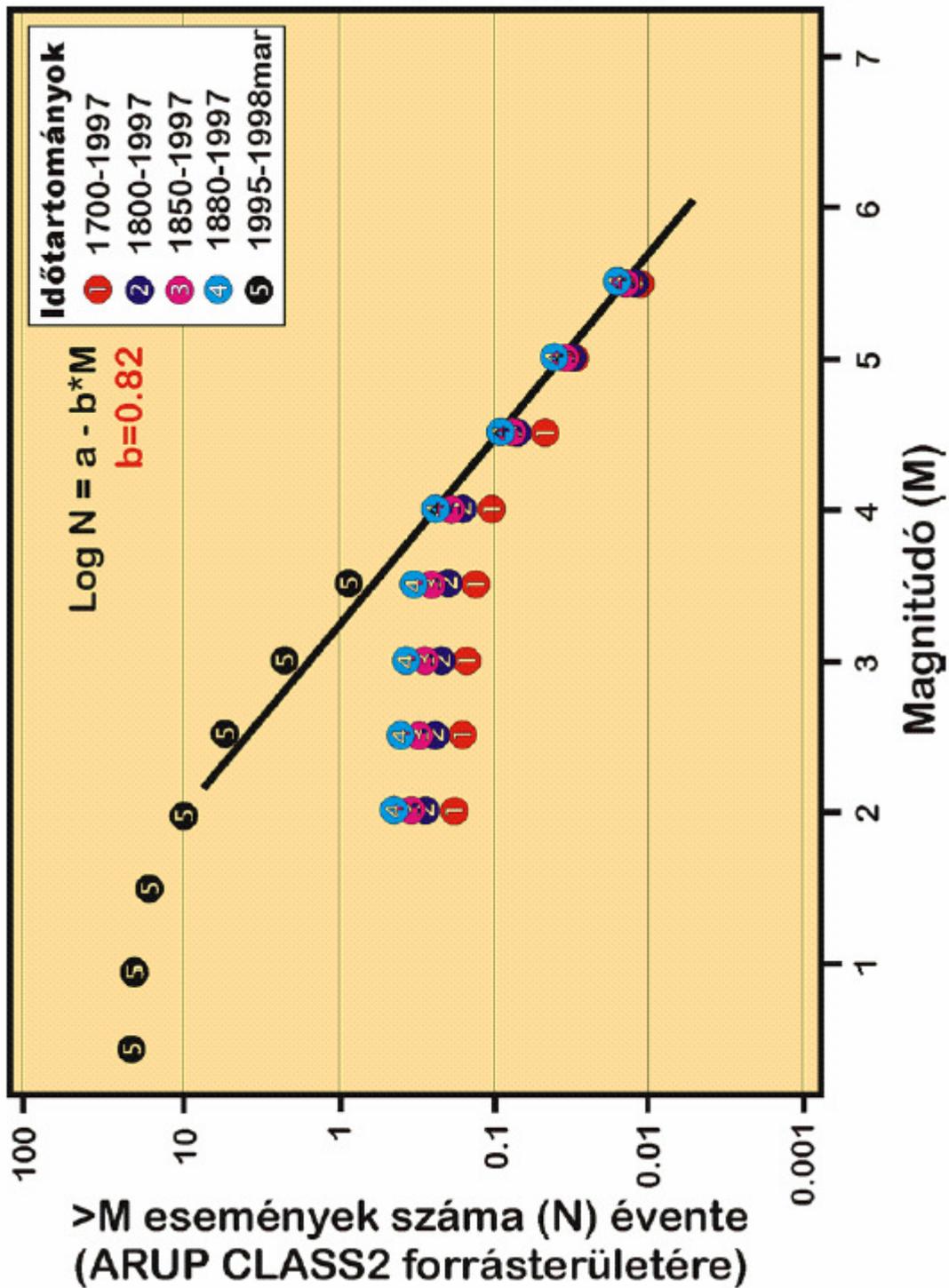
5. Aufgrund des Herdmechanismus der Erdbeben verlaufen die auf allgemeine Spannungszustände verweisenden Hauptachsen im Wiener Becken eindeutig in Nord-Süd –Richtung, im Bereich des Mittelgebirges in Transdanubien zeigt sich eher ein Verlauf in Richtung NO-SW als signifikant.
6. Im pannonischen Becken 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 präziserte Beziehung  $\log N = a - bM$  (Abbildung 15) 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 präziserte 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 15: Die als Ergebnis des Monitoring wesentlich präziserte Relation  $\log N = a - bM$



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 anzunehm-

men, 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. Tóth und F. Horváth's Diskussionsbeitrag in den Geologische Mitteilungen – "Földtani Közlöny" / "Geologische Mitteilungen" 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.

2005 bewertete die GeoRisk GmbH in ihrem Forschungsbericht die Ergebnisse von zehn Jahren mikroseismischen Monitoring. [8]

Bei einem Teil der mikroseismischen Beobachtungsstationen von Paks sind die geologischen Gegebenheiten sicherlich nicht ideal, die Wahrnehmungsfähigkeit des Netzes beträgt im 50-km-Umkreis von Paks um  $M_L$  1-1,5, ist aber in den meisten Landesteilen nicht größer als  $M_L$  2.

Das System hat in den vergangenen zehn Jahren für Ungarn und die unmittelbare Umgebung fast siebenhundert Erdbeben registriert. Ein großer Teil der Beben kann mit einer bekannte Quellzone in Verbindung gebracht werden. Unter Berücksichtigung, dass die Wahrnehmungsfähigkeit des Messnetzes auf die Gegend um Paks fokussiert, kann mit großer Sicherheit festgehalten werden, dass es während der Beobachtungszeit in der unmittelbaren Umgebung von Paks kein Erdbeben gegeben hat, dessen Magnitude den Wert von  $M_L$  1,0 erreicht hätte. Damit kann eine eventuelle Aktivität ("capability") der dortigen Strukturen mit steigender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Es kann festgehalten werden, dass die entscheidende Mehrheit der Beben in den Tiefenregionen zwischen fünf und fünfzehn Kilometer aufgetreten ist. Dank der Sensibilität des Netzes konnte auch der Nestmechanismus der kleineren Erdbeben festgemacht werden. Es kann weiters festgehalten werden, dass für das gesamt untersuchte Gebiet keine einzige charakteristische Spannungsrichtung, kein einziger Spannungsraumcharakter festgelegt werden kann – da alle drei Verwerfungstypen (Normalverwerfung, Querkluft, Aufschiebung) auftreten.

Als Ergebnis des Monitoring wurde  $\log N = a - bM$  Relation bezüglich der Häufigkeit von Erdbeben wesentlich zuverlässiger. Bezüglich langfristig wiederkehrenden Beben wiederum bietet die Erforschung der Paleobeben ergänzende Informationen. Aufgrund der bisherigen Beobachtungen ist es gelungen, im Umkreis von einhundert Kilometern um das Kraftwerk eine paleoseismische Tätigkeit und mindestens drei Ereignisse im Quartär zu identifizieren.

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.

## 5. Die ingenieurgeologischen und geologischen Verhältnisse des Standortes

Die geotechnischen Daten bezüglich des Standortes werden aus drei Quellen gespeist:

- Vor der Standortbestimmungen bzw. der im Zuge des Baus ausgeführten detaillierten bodenmechanischen und geotechnischen Bestimmung. Diese Festlegung entsprach den damaligen Baubedürfnissen. Die Bewegungen des Baus, seine Senkungen werden regelmäßig kontrolliert, woraus im wesentlichen festgestellt werden kann, dass die damalige bodenmechanische Datenaufnahme und die darauf beruhende Fundamentierung und die Planung korrekt waren.
- Eine zum guten Teil traditionelle, den ungarischen Baupraxis den Bauerfordernissen entsprechende bodenmechanische Untersuchung erfolgte auch im Bereich der KKÁT-Deponie. Im Falle der KKÁT war die maximale horizontale Bodenbeschleunigung für das größte Maßerdbeben 0,35 g. Deshalb musste man hier mit Erdfluss und einer beträchtlichen dynamischen Absenkung rechnen. Während der Fundamentierung erfolgte, um einen Erdfluss zu vermeiden, eine Geländestabilisierung. Neben den traditionellen bodenmechanischen Untersuchungen gab es auch eine Fülle dynamischen Sondierungen, da man aufgrund dieser Kriterien die Entsprechung der Geländestabilisierung beurteilte. Die dynamischen Untersuchungen wurden mittels des CPT-Verfahrens ("Cone Penetration Test") durchgeführt. Sowohl die Date des CPT als auch jene des traditionellen Sondierungsverfahrens werden in der Regel mit dem international angenommen, dynamischen Merkmalen SPT ("Standard Penetration Test") verglichen.
- Die Neubewertung der Seismizität des Standortes, die Bewertung der Möglichkeiten eines maximal bemessenen Maßerdbebens und der eines Erdflusses sowie die Wechselwirkungen zwischen Boden und Gebäude wurde eine ausgedehnte bodenmechanische Untersuchung durchgeführt, in erster Linie, um die von der Gestaltsveränderung abhängigen dynamischen Merkmale bestimmen zu können.

### a) Grundlegende Basis

Unter der oberen Humusschicht liegt eine fast fünfundzwanzig bis dreißig Meter dicke Schichteinheit aus dem Pleistozän, dessen obere, zwölf bis fünfzehn Meter dicke Schicht aus Überschwemmungsanschwemmungen eine feinere Schicht, klassifizierbaren Sand bildet. Die untere Schicht besteht aus Sandschotter, schottrigem, feinschottrigem Sand, dessen Dicke fünfzehn bis zwanzig Meter beträgt. Die obere Schicht hat die Donau im Holozän durchgewaschen und wiederum Sand, Schwemmschlamm, Schwemnton abgelegt. Die Schlammplatten der alten Donauarme in sieben bis neun Meter Tiefe wird von lokal vorkommenden organischen Schlammern und Gesteinslinsen charakterisiert. Unter den Schichten aus dem Pleistozän sind ober-pannonische Schichten unterschiedlicher Ausformung anzutreffen, die als Ursprung auf einen See verweisen. Sie bestehen aus feinkörnigem Sand, Gesteinsmehl, Ton, Tonmergel, sind in Sandbänke gegliedert. Diese Bänke zementieren und sind als Halbgestein zu betrachten.

### b) Situation der vorkommenden Böden, Bohr- und Schichtprofile

Das auf [Abbildung 16](#) sichtbare freie Gebiet nördlich von Block 4 wurde ingenieurgeologisch untersucht. Die Profile sind auf den [Abbildungen 17, 18, 19](#) zu sehen. Die vorkommenden Böden werden im folgenden aus ingenieurgeologischer Sicht wie folgt dargestellt:

Sandauffüllungen und Humussand wurde nur lokal in einer Dicke von 0,2 bis 0,5 Meter wahrgenommen. Bis zu einer Tiefe von 74-82 Meter baltischer Seehöhe wurden Sandschichten unterschiedlicher Farbe, die das Überschwemmungsgebiet formen, der fein- und mittelkörnig ist, gefunden. Im Sand wurden in großen Ausbreitungen organisches, spuren-organisches und weiches Material entdeckt. Die intermediären Schichten: weicher Ton, Schlamm, Schlamm sand, schlammiges Sandmehl, kompressierbare, weiche organische Stoffe und Schlamm. Die grobkörnigen Terrassensedimente werden vom Schottersand und Sandschotter vertreten. Oberfläche nicht gleichmäßig, die Oberflächen wurden von Bohrungen zwischen 74 und 82 Meter baltischer Seehöhe vermessen.

Entsprechend den Erfahrungen von Paks ist die Zusammensetzung der Körnigkeit des Materials stark veränderlich, der Schottergehalt zeigt eine starke Streuung. Die Bohrungen in dreißig bis fünfzig Meter Tiefe klären die Situation der Oberflächenzusammensetzung der pannonischen Schicht, die sich 21 bis 28 Meter tief unter dem Erdboden auf 69-73 Meter baltischer Seehöhe befindet. Auch entsprechend dem früheren Bild bezüglich der Schichtung dieser Schicht zeigt sich der schnelle Wechsel zwischen den einzelnen Schichten entsprechend den Umständen der Sedimentierung in einem See. Unmittelbar in der Nähe des Standorts ist von der Existenz der Lössfraktion nichts bekannt.

**Abbildung 16: Das ingenieurtechnologische, geotechnische Untersuchungsgebiet**

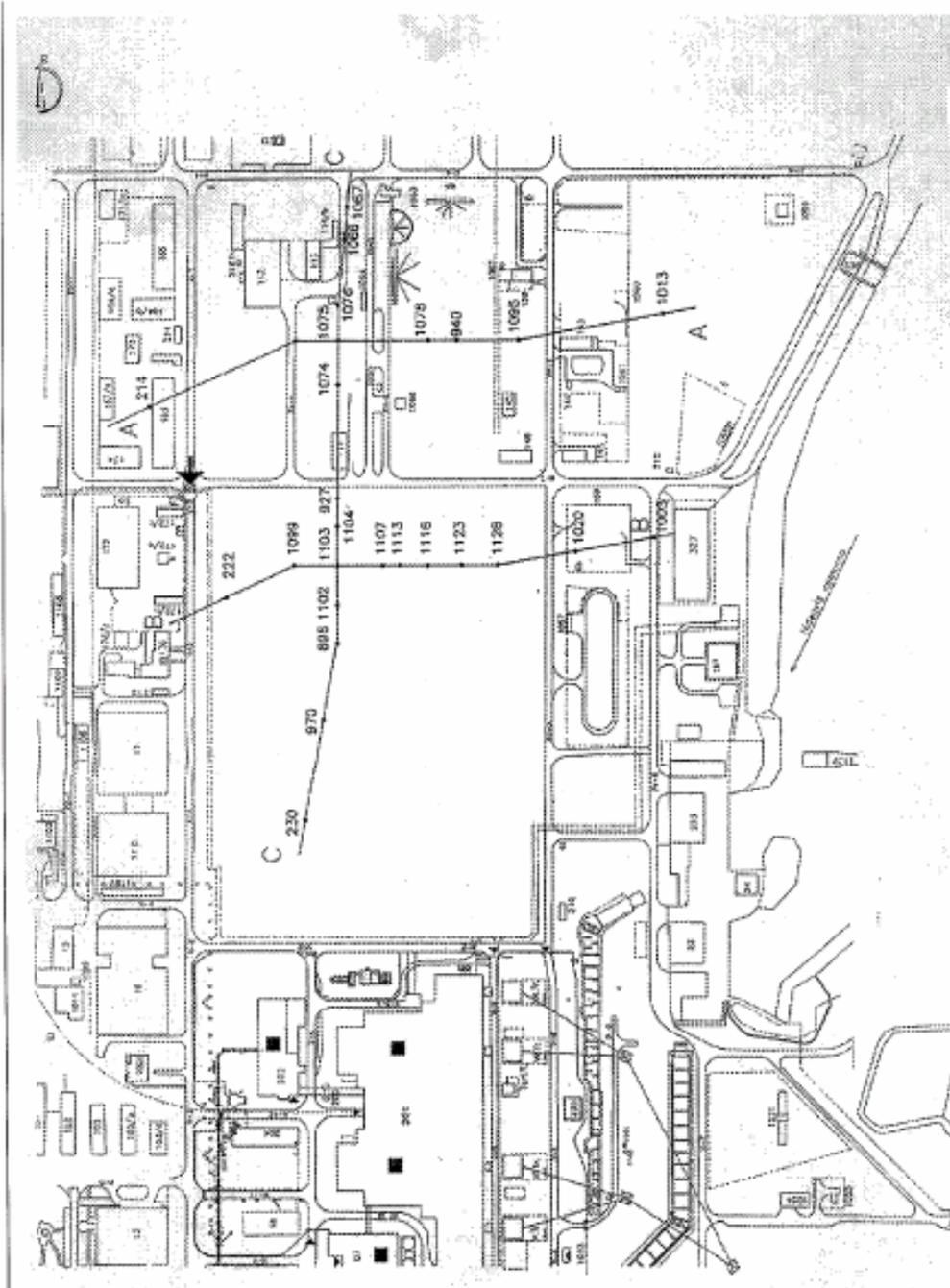


Abbildung 17: Ingenieurtechnologisches Profil

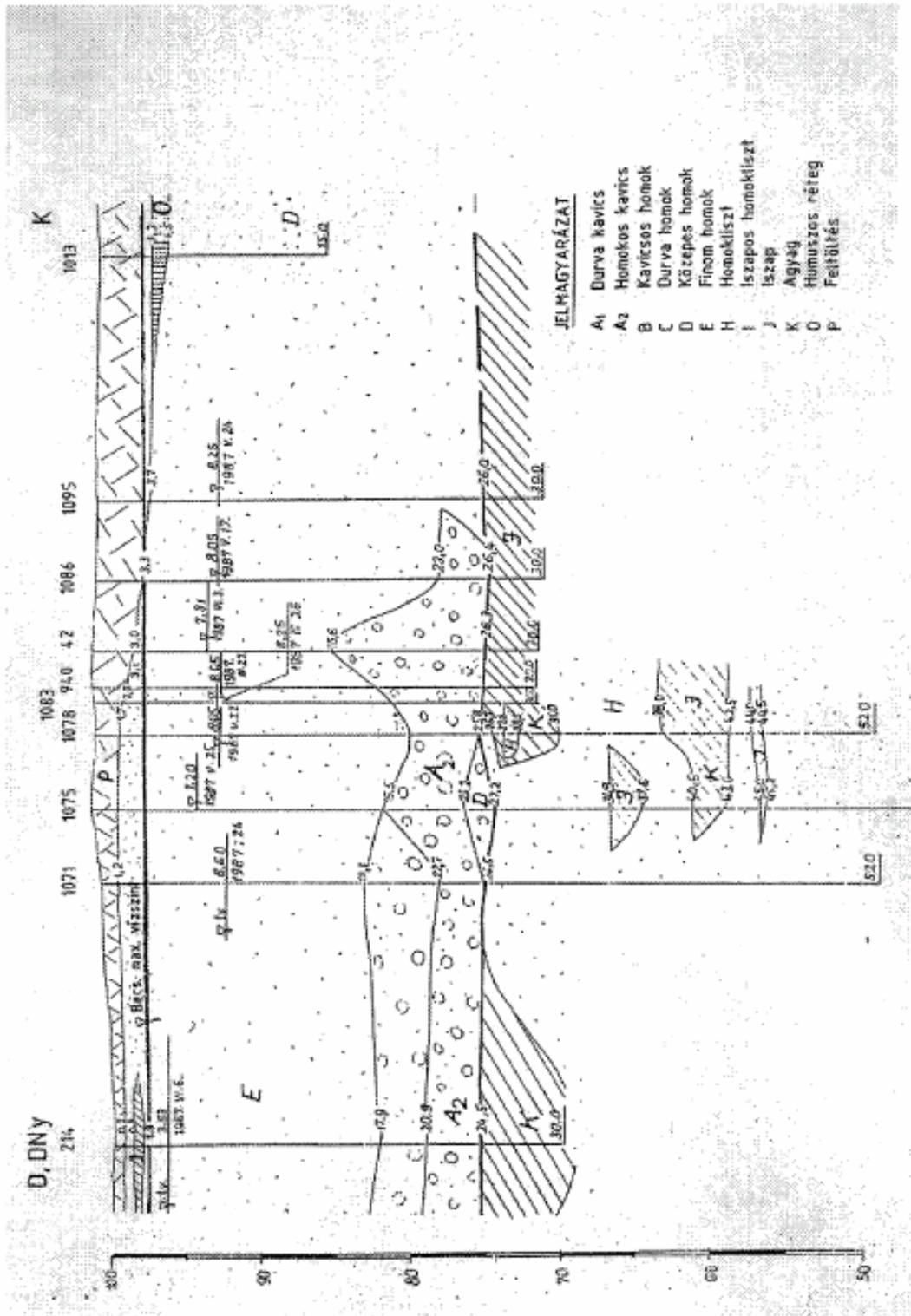


Abbildung 18: Ingenieurtechnologisches Profil

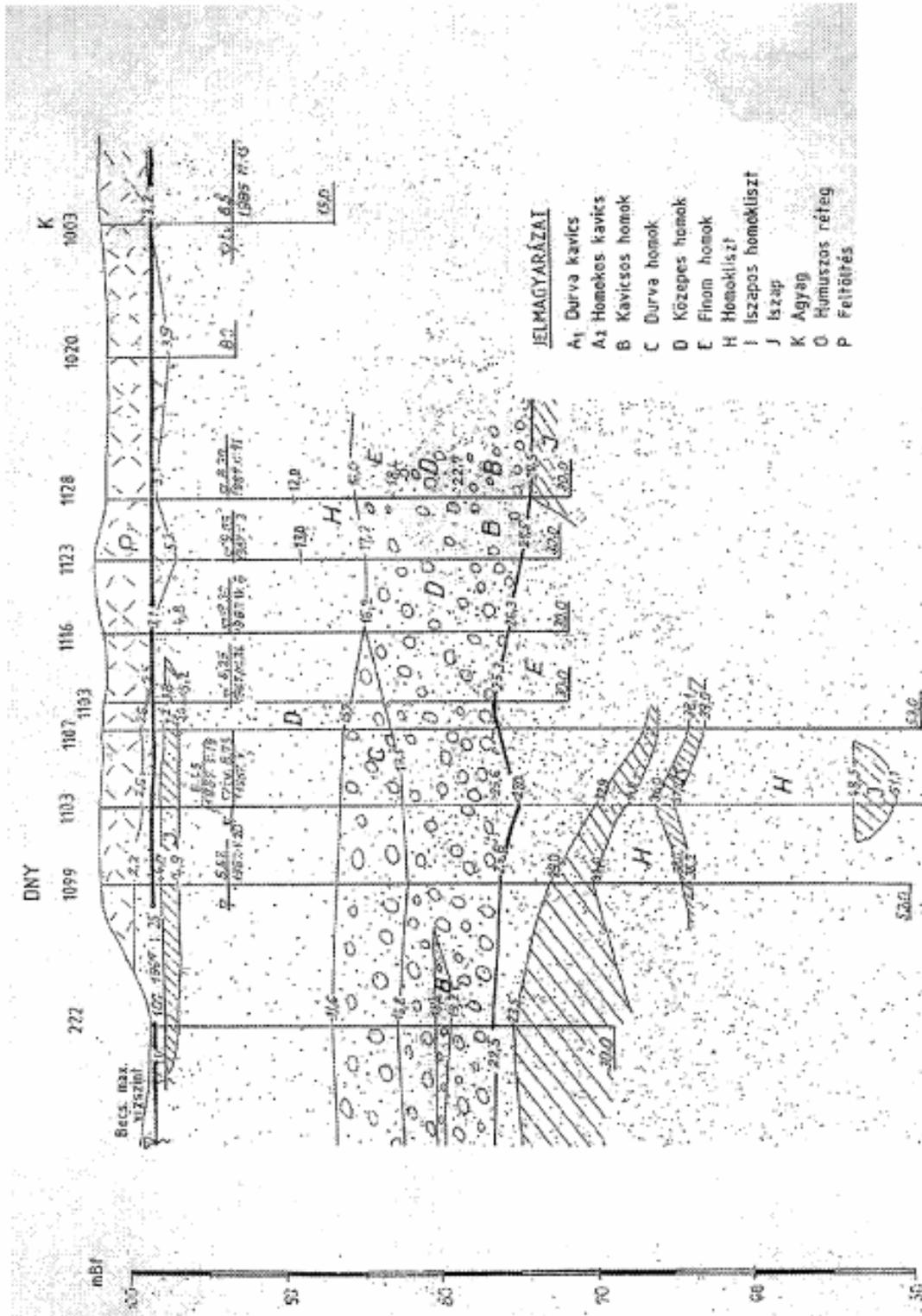
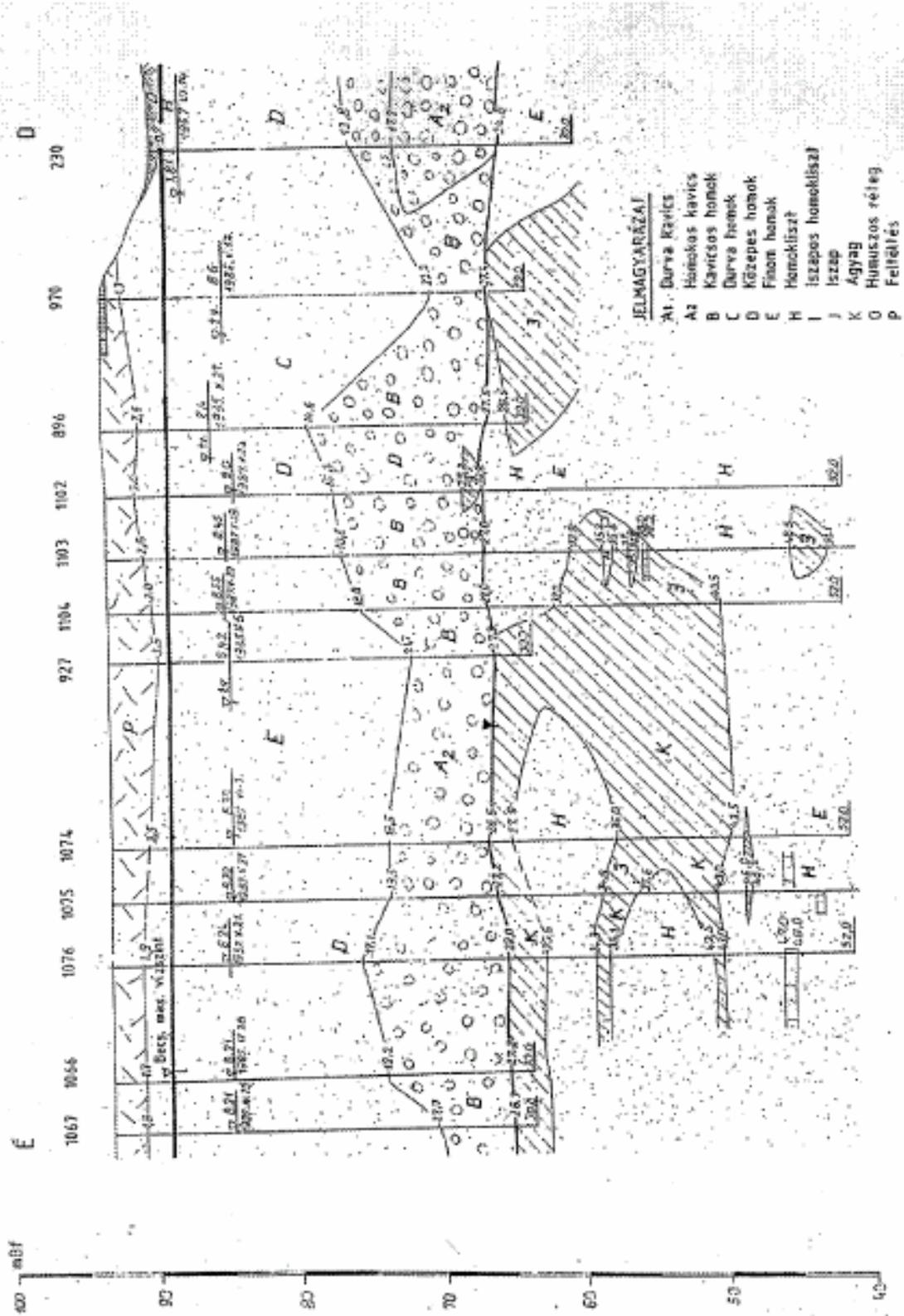


Abbildung 19: Ingenieurtechnologisches Profil



### Bodenphysikalische Charakterisierung einiger Böden

Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Böden wurden mit Laborversuchen, die Dichte der körnigen Böden mit dynamischen Untersuchungen vor Ort festgelegt. Wegen der Bodengegebenheiten ist die überwiegende Mehrheit der Laboruntersuchungen eine Untersuchung bezüglich der Kornverteilung, in kleinerem Maß die Bestimmung der plastischen Fähigkeiten. Letztere wurden mit dem Verfahren Casagrande durchgeführt, die Klassifizierung erfolgte nach ungarischer Norm (MSZ) mit dem Unterschied, dass die Kornverteilungskurven im Interesse der Interpretierbarkeit nach dem British Standard angegeben wurden. Die Scherfestigkeit der körnigen Böden wurde aus gestörten Proben ermittelt mit schnellen Scherversuchen (Schergeschwindigkeit 1,2 mm/Minute; Oberfläche der Proben 48 cm<sup>2</sup>, Porenziffer  $e=0,65$ ). Die Klassifikation der Bodenschichten wie folgt:

#### 1. Sandaufschüttungen und Humussand

locker, heterogene Zusammensetzung, Oberflächen nicht zur Fundamentierung geeignet

#### 2. Schichten aus dem Pleistozän

##### Obere Schichten

##### **Sand**

Aufgrund der Daten der Sondierungen und aufgrund des Bohrwiderstands mitteldicht, in tieferen Ebenen dicht. Feiner und mittlerer Sand, unter Grundwasser voller Zustand, wegen Körnigkeit erosionssempfindlich, Tendenz auf seismische Einwirkung zu zerfließen

Maßgebender Korndurchmesser  $d_m=0,11-0,29$  mm  
Ungleichmäßigkeitsfaktor  $U=1,9-9,9$

Praktisch schwammfrei, örtlich ein wenig schwammig (3-5 Prozent), Schwammknoten (9-15 Prozent), Volumendichte durch frühere geophysikalische Messungen bestimmt  $\rho=1,87-2,10$  t/m<sup>3</sup>

Reibungswinkel:  $\varphi=27-34^\circ$   
Kohäsion:  $c=0$   
Wasserdurchlässigkeitskoeffizient  $K=1,2 \times 10^{-2}-9,8 \times 10^{-3}$  cm/s (aus Kornverteilung bemessener Wert)

Der im Zuge einer statischen (Gravitations)belastungen feststellbare Wert des Verdichtungsmodulus ( $E_8$ ) beträgt aufgrund der 15jährigen statistisch aufgearbeiteten Ergebnisse der in situ Versuche für die obere Zone der Schicht  $E_8=18-23$  MN/m<sup>2</sup>, für tiefere Zonen  $E_8=25-33$  MN/m<sup>2</sup>. In der Praxis kann man die Größe der Absenkung von auf Sand fundierten Strukturen (letzten Endes den Modulus) aufgrund halbempirischer Zusammenhänge schätzen. Aus den durchschnittlichen Absenkungen des bestehenden Reaktorblocks (55,5 – 72,6 mm) errechnete durchschnittliche Modulus ergab sich auf den Wert  $E_8=85-11$  MN/m<sup>2</sup> (Grenztiefe 47 Meter).

##### Intermediäre Schichten

##### **Schlammiger Sandmehl**

Mitteldichter Boden mit kleiner Plastizität, eine Übergangsschicht zwischen körnigen und gebundenen Böden

Maßgebender Korndurchmesser:  $d_m=0,03-0,09$  mm  
Ungleichmäßigkeitsfaktor:  $U=4,2-21,0$   
Schlammgehalt: 10-38 Prozent  
Plastischer Index:  $I_p=4-10$  Prozent  
Konsistenzindex:  $I_c=0,8-1,0$  über Grundwasser  
 $I_c=0,3-1,0$  unter Grundwasser  
Volumendichte:  $\rho=1,90-1,97$  t/m<sup>3</sup>  
Porositätszahl:  $e=0,48-0,78$   
Reibungswinkel:  $\varphi=22-32^\circ$   
Kohäsion:  $c=0-8,8$  kN/m<sup>2</sup>  
Sättigung:  $S_r=0,86-0,99$

Wasserdurchlässigkeitskoeffizient:  $K=(1,2-3,6 \times 10^{-4} \text{ cm/sec})$

### Schlamm

Sich stark verändernde Konsistenz, kompressierbare Schicht

$I_p=12-16$ Prozent	$\varphi=30^0$ (Versuche)
$I_c=0,2-1,1$	$c=16,8 \text{ kN/m}^2$ (Versuche)
$\rho=1,95 \text{ t/m}^3$	$E_s=7,3 \text{ MN/m}^2$ (berechnet)
$e=0,85$	$E_s=6,8 \text{ MN/m}^2$ (Versuche)
$S_r=1,0$	

### Ton

Gleiche Eigenschaften wie Schlamm

$I_p=17-18$  Prozent  
 $I_c=0,5-0,8$   
 $E_s=5,7-10,6 \text{ MN/m}^2$  (berechnet)

Der niedrige Konsistenzindex ist nicht nur dem weichen Zustand, sondern auch der Probenentnahme aus dem Grundwasser als unumgängliche Auswirkung zuzuschreiben.

### Organischer Schlamm

$W=51-93$ Prozent	$\rho=11,41 \text{ t/m}^3$
$W_L=53-166$ Prozent	$e=2,78$
$W_p=33-95$ Prozent	$S_r=0,91$
$I_p=19-21$ Prozent	$E_s=1,9 \text{ MN/m}^2$ (Versuche)
$I_c=1,1$	
Anteil an organischen Stoffen:	$I_{om}=4,2-25$ Prozent

### Organischer Ton

$W=39-115$ Prozent	$\rho=11,42-1,68 \text{ t/m}^3$
$W_L=60-178$ Prozent	$e=1,32-2,65$
$W_p=30-110$ Prozent	$S_r=0,90$
$I_p=28-68$ Prozent	$E_s=3,3-4,3 \text{ MN/m}^2$ (Versuche)
$I_c=0,6-0,9$	
Anteil an organischen Stoffen:	$I_{om}=5,9-30$ Prozent

Beide obigen Schichten sind kompressierbar, weich, sehr locker, wenig belastbar

### Organischer, organisch verschmutzter Sand

$U=2,9-3,1$   
 $d_m=0,14-0,15 \text{ mm}$   
 Anteil an organischen Stoffen:  $I_{om}=0,8-3,4$  Prozent

### Untere Schichten

Grobkörnige Schichten aus dem Pleistozän

### Schottersand, Sand mit Schotterspuren

Grobkörniger Sand mit 5-34 Prozent Schotteranteil, den Erfahrungen nach dicht, gut belastbar

$d_m=0,28-1,80 \text{ mm}$	$U=3,2-18,2$
$\varphi=30-34^0$ (Versuche)	$c=0$

$E_s=40-45 \text{ MN/m}^2$  (statistische Belastbarkeit aus früheren Versuchen)

### Sandschotter

dicht, gut belastbar

$U=3,8-47,4$   $d_m=0,42-11,26 \text{ mm}$   
 $E_s=60-80 \text{ MN/m}^2$  (statistische Belastbarkeit aus früheren Versuchen)

### 3. Schichten des pannonischen Bestands

#### Sand, schwach zementierter Sandstein

$U=2,1-2,4$   $d_m=0,11-0,16 \text{ mm}$   $\varphi=30^0$  ( $e=0,65$ )  
 Bruchfestigkeit (alter Versuch)  
 $R_c=125-227 \text{ kN/m}^2$

#### Sandstein

$E=0,34-0,73$   
 $S_r=0,61-0,84$   
 $\rho=1,89-2,13 \text{ t/m}^3$   
 Bruchfestigkeit:  $R_c=2096 \text{ kN/m}^2$  (Versuche)

#### Schlammiger Sandmehl

$U=2,3-10,4$   $d_m=0,04-0,08 \text{ mm}$   $\rho=2,13-2,14 \text{ t/m}^3$   
 $I_p=9$  Prozent  $\varphi=34^0$   
 $I_c=1,1$   $e=0,48$   
 $S_r=0,86-0,93$   
 $E_s=15,3 \text{ MN/m}^2$

#### Schlamm

$I_p=10-14$  Prozent  $E_s=11-18 \text{ MN/m}^2$   
 $I_c=1,3$  (aus Erfahrungswerten berechnet)

#### Rotstoff aus dem Pleistozän

$I_p=19-26$  Prozent  $\rho=1,87-2,10 \text{ t/m}^3$   
 $I_c=0,8-1,4$   $\varphi=24^0$   
 $e=0,53-0,90$   $c=31,9 \text{ kN/m}^2$   
 $S_r=0,83-0,97$   $E_s=11,2-28,9 \text{ MN/m}^2$

Aufgrund von Versuchen mit dem Pressiometer beträgt  $E_s=40 \text{ MN/m}$  für die oberen fünfzehn bis zwanzig Meter Teile der pannonischen Schichten, darunter wird der Gesamtdruckmodulus für statische Belastungen laufend höher. Der reduzierte Schwermodulus beträgt im Bereich  $G=123 \text{ MN/m}^2$ .

#### Die dynamischen Charakteristika der Bodenschichten

Einer der wichtigen früher in den ungarischen Forschungen des Untersuchungsprogramms 1994 bis 1995 vernachlässigten Bereiche war die Festlegung der geophysikalischen Merkmale des Standortes, die in besonderer Hinsicht auf die offenen Charakteristika eines Erdbebens nach Maß, bezüglich es Erdflusses und der Stabilität des Fundaments des Gebäudes unerlässlich sind.

Eine geotechnische Ermessung des Standortes hieß folgendes:

1. die Aufarbeitung, Ordnung und computermäßige Aufarbeitung aller vorhandenen bodenmechanischen Angaben (Bohrungen, dynamische Sondierungen, statische Charakteristika usw.)
2. SPT- und CPT-Profilaufnahmen im Rahmen neuer Untersuchungen, Schichtbeschreibungen, die Geschwindigkeit der Scherwelle, die Poisson-Faktoren, Scher-G-Modulus, die Festsetzung der Dämpfung nach Formänderung per Schicht, Körnung und Dichteverteilung, Festigkeitsmerkmale (Kohäsion,  $\varphi$ ).

Das Programm zur geotechnischen Vermessung des Standortes erfolgte nach den Vorschriften 50-SG-S9 der IAEA.

Die Untersuchungen wurden

- von der italienischen Firma ISMES unter technischer Kontrolle der OVE ARUP und der Techniker der AKW Paks AG
- von der belgischen Firma OREX unter der technischen Kontrolle der BELGATOM und der Techniker der AKW Paks AG

ausgeführt – mit der Beteiligung von ungarischen Firmen.

Die Untersuchungen wurden hundertfünfzig Meter nördlich des Blocks 4 auf einem Gebiet von 200 x 200 Meter ausgeführt, siehe Darstellung 15. Die auf Darstellung 15 umrissenen Ermessungsprogramme werden auf **Abbildung 20** erläutert.

Wie dies aus obigem auch ersichtlich ist, befindet sich unterhalb des geordneten Geländes in der baltischen Seehöhe von neun Meter eine ca. acht Meter dicke Füllung (baltische Seehöhe 96,84-97,18) aus abwechselnd lockerem Sand, Schlamm und losen Stoffen. Unter Seehöhe 92,63-96,34 befindet sich eine neunzehn Meter dicke, vom Fluss ausgestaltete, mitteldichte bzw. dichte aus Schlammsand bzw. in den tieferen Schichten aus Schotter-sand bestehende Schicht aus dem Quartär, dessen westlicher Teil eine Terrasse formt, Alter ca. 45.000 Jahre, unter baltischer Seehöhe 69,53-70,34 Meter sind pannonische Sedimente großer Dichte zu finden. Das Grundwasserniveau ändert sich mit dem Wasserstand der Donau, aber dessen Schwankungen sind gemäßiger, Minmalebene 85,2 Meter baltischer Seehöhe, Maximalstand 90,1 Meter, als Planungsniveau kann 89 Meter festgesetzt werden.

### **Übersicht über das Untersuchungsprogramm**

#### CPT-Tests

Die CPT-Tests wurden an 27, auf Abbildung 15 dargestellten Stellen, dupliziert, um dem Komplex der Blöcke 1-4 an 17 Stellen, verdreifacht ausgeführt. Die CPT-Sondierungen um die Blöcke 1-4 (**Abbildung 21**) geschahen aus dem Grund, dass

- die Daten der Messungen und Bohrungen, die unter dem Bau vorgenommen wurden, noch vor dem Bau überprüfbar sind,
- und auf die neu aufgenommenen geotechnischen Profile, Daten bzw. auf die daraus geschlossenen Konsequenzen anwendbar sind.

Die Proben wurden mit mechanischen und elektrischen Kegeln ausgeführt.

Abbildung 20: Verteilung der geotechnischen Untersuchungen nach Gebiet auf Abbildung 15

ARUP

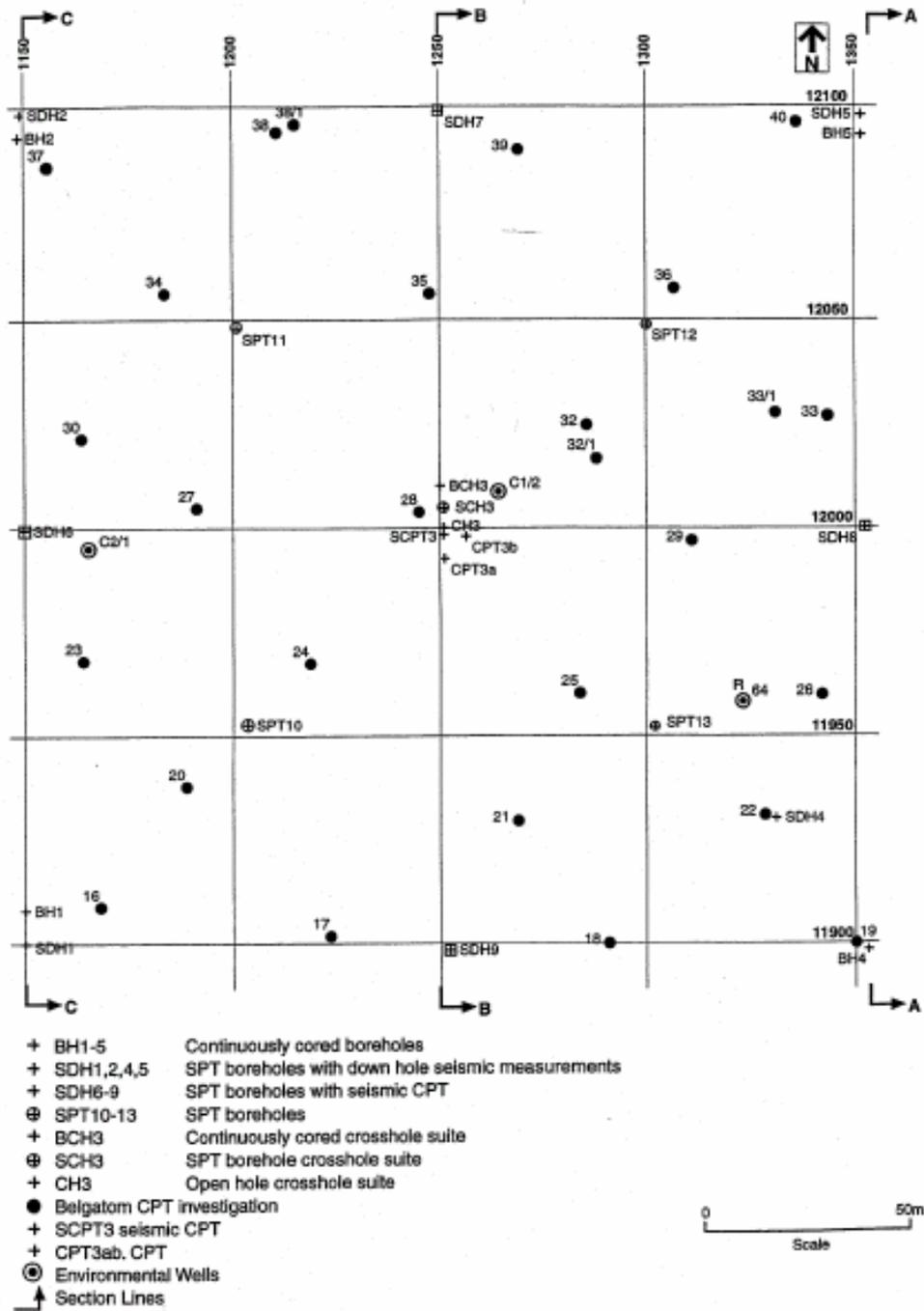
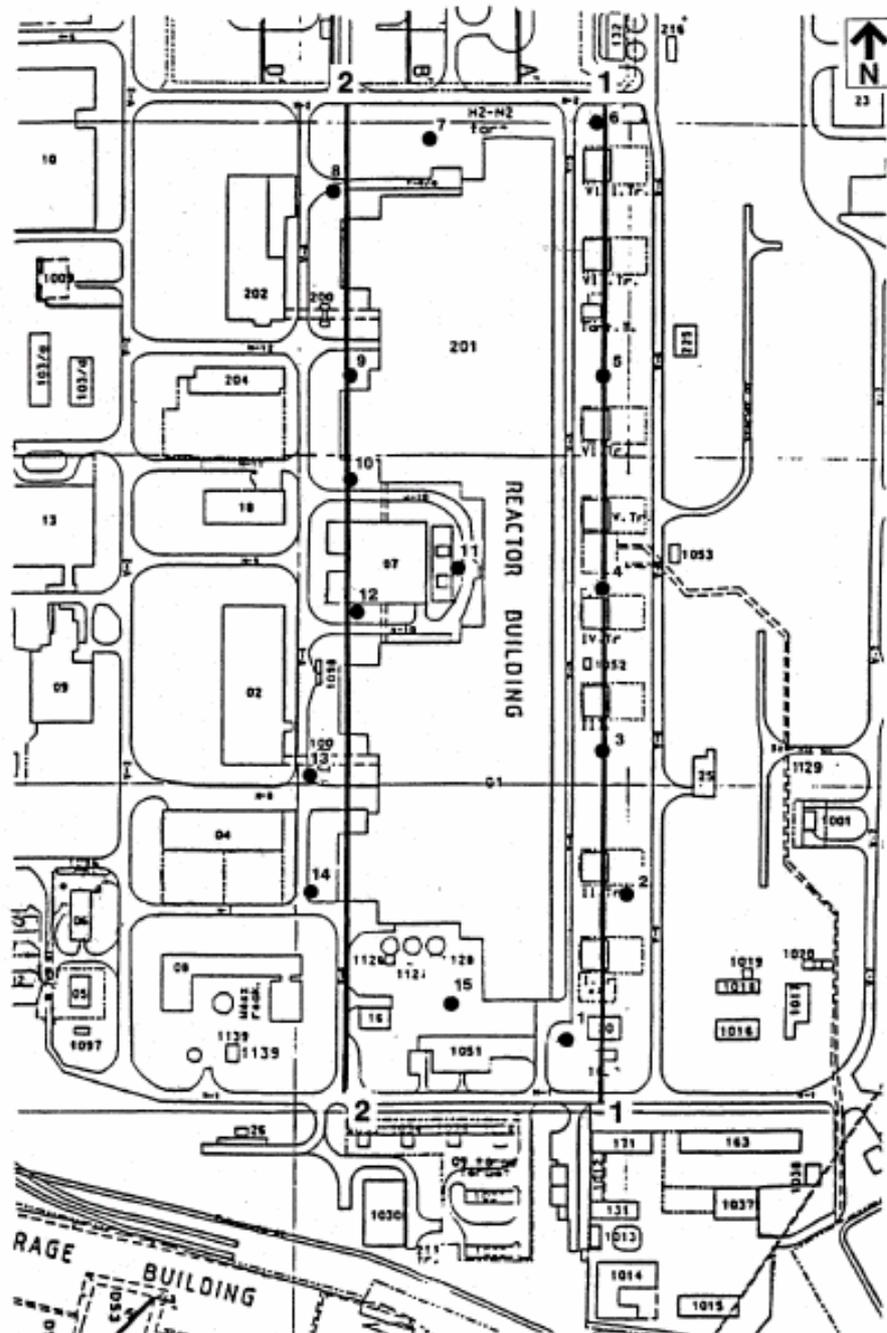


Abbildung 21: Ort der CPT-Test um den Komplex des Hauptgebäudes

ARUP



● Belgatom Cone Penetration Tests

Approximate Scale 1:3600

## Bohrungen

Ort und Art der Bohrungen sind auf Abbildung 19 dargestellt. Im untersuchten Gebiet wurden an festgelegten fünf Stellen je zwei Bohrungen durchgeführt: eine Bohrung zur laufenden Probenentnahme und eine Bohrung für die SPT-Tests. Die Bohrungen wurden auch zur Messung der Schwerkgeschwindigkeiten down-hole und press-hole verwendet. Die Korrelation zwischen den SPT- und CPT-Proben wurde mit der Nähe der beiden Stellen

zueinander gesichert. Eine Bohrung hatte eine Tiefe von einhundert Meter. In den Bohrlöchern wurde das ganze Spektrum der geophysikalischen Untersuchungen durchgeführt, die Untersuchungen zum  $\gamma$ -Hintergrund, zu der  $\gamma$ - $\gamma$ -Dichte, der Porosität, zu Potenzial und Widerstand, akustische Analysen usw. Die Untersuchungen erstreckten sich auf das Grundwasser und die Messung der Permeabilität.

#### Labor- und in-situ-Tests

Über die bereits erwähnten SPT-, CPT-, down-hole-, cross-hole- und seismischen Tests hinausgehend wurde auch die Verteilung der Körnung, die Attenberg-Grenze, die Dichteverteilung untersucht. Die Labortests erstreckten sich auf zyklische, triaxiale Resonanzsäulen und Permeabilitätsuntersuchungen.

#### **Vorstellung der erzielten Ergebnisse**

Wir sehen hier von der Wiederholung der traditionellen ingenieursgeologischen Charakterisierung des untersuchten Gebietes einmal ab. Die Feststellungen, vermessenen Charakteristika im vorigen Kapitel wurden von den Untersuchungen der IMES und der OREX mit ihren eigenen Mitteln im wesentlichen bestätigt. Hier werden nun im folgenden die Wechselwirkungsberechnungen, die geotechnischen Parameter, die für eine dynamische Analyse als Input nötig sind sowie die Daten zur Bewertung des Erdflusses.

Aus geotechnischer Sicht können am dynamischen Messort drei wesentliche Schichten identifiziert werden, diese sind

1. Typus: Flusswassersedimente aus dem Quartär, äolische Ablagerungen (eingeschlossen Auffüllungen), Dichte:  $1.900 \text{ kg/m}^3$
2. Typus: Flusswassersand und Schotter aus dem Quartär: Dichte  $2.000 \text{ kg/m}^3$
3. Typus: Flusswasserschotter aus dem Quartär: Dichte  $2.100 \text{ kg/m}^3$

Diese Schichten decken die pannonische Schicht zu, die mit einer Schergeschwindigkeit von  $500 \text{ m/s}$ , einer Dichte von  $2.100 \text{ kg/m}^3$  und einem Schermodulus von  $525 \text{ MpA}$  charakterisiert werden kann.

**In Tabelle 1 und Abbildung 22 werden die cross-hole-Scher- und P-Wellengeschwindigkeiten sowie die Tiefenverteilung des Poisson-Faktors dargestellt. Aus diesen bzw. aus den Laborergebnissen ist der Schermodulus, die Verteilung  $G_0$  bzw. dessen beste Schätzung feststellbar. Die von der Formveränderung abhängige Degradation des Schermodulus, die als normalisierte Kurve für alle Schichten angewandt werden kann, ist auf Abbildung 23 ersichtlich. Abbildung 24 wiederum zeigt die Formveränderungsabhängigkeit der Dämpfung.**

Die Ergebnisse der SPT in einer Tiefe von 0-30 Meter ist auf Abbildung 24 ersichtlich, die Korngröße auf Abbildung 25.

Der ganze Datensatz ist im Dokument der ISMES unter dem Titel "Paks NPP Site Investigation and Site Response and Liquefaction Potential, Final Report, 1995" zu finden, weiters im Dokument der BELGATOM unter dem Titel "Geotechnical Report on the Cone Penetration Test: Seismic Re-Evaluation of the Paks NPP, Interpretive Report, 1995".[3]

**Tabelle 1: Geotechnische Charakteristika des Standortes**

Ebene, m	Typus	$G_0$ , MP <sub>a</sub>	Schergeschwindigkeit	Poissonzahl
0	1	95,0	223,6	0,30
-1,5	1	114,5	245,5	0,30
-3,2	1	136,6	268,1	0,30
-5,0	1	160,6	290,2	0,30
-6,5	1	161,5	291,5	0,30
-8,0	2	163,0	285,5	0,30
-9,75	2	165,0	287,2	0,48
-11,5	2	167,0	289,0	0,48
-13,25	2	169,0	290,7	0,48
-15,0	3	171,0	285,4	0,48
-17,0	3	173,3	287,3	0,48
-19,0	3	175,6	289,2	0,48
-21,0	3	177,8	291,0	0,48
-23,0	3	180,0	292,8	0,48
-24,5	3	266,0	355,9	0,48

### Untersuchung zur Möglichkeit eines Erdflusses und zur Geländestabilisierung

Die SPT-Daten, aber im besonderen die Verteilung der Korngröße verweisen darauf, dass die feinen Sedimente, die den Standort abdecken, zum Erdfließen tendieren. Dies zeigt Abbildung 26.

Im Hinblick darauf, dass ein Erdfluss im nachhinein wohl nur schwer auszumerzen sein wird, muss das Problem mit den modernsten Methoden untersucht werden. Die gewählte Vorgangsweise gibt die Bewertung der Möglichkeit eines Erdflusses über die Festlegung der Häufigkeit der Wiederkehr (return period) eines Erdflusses an.

Grundlage der Bewertung des Erdflusses bietet das parametrisierte empirische Verhältnis zwischen dem Verhältnis der durchschnittlichen Körnchengröße und dem effektiven Druck (effektives zyklisches Scherdruckverhältnis) und der Körnchenverteilung bezüglich der Schlagzahl des SPT (siehe Abbildung 27 und 18). Bei der Anwendung dieses empirischen Zusammenhangs muss eine Korrektur nach Magnitude erfolgen. Die Berechnung der zyklischen Schergeschwindigkeit erfolgte mit dem Oasys SIREN Programm der OVE ARUP, die jährliche Wahrscheinlichkeitsberechnung der Entstehung eines Erdflusses mit dem Oasys LIQEFY Programm. Die kritischen Verhältnisse von Scher- und Normalspannung bezüglich eines Erdflusses sind in Abbildung 29 dargestellt. Es ist festzustellen, dass die Schicht in einer Tiefe zwischen zehn und zwanzig Meter Tendenzen zum Erdfluss zeigt. Für die zehn Meter tief gelegenen Schicht ist eine 11.900 Jahre, für die 12,5 Meter tiefe eine von 11.300, für die fünfzehn Meter tiefe eine von 11.700 Jahren best-estimate-Schätzung bezüglich eines Erdflusses charakteristisch. Nach den detaillierten Sensibilitätsuntersuchungen macht die Periode auf einer Konfidenzebene von 15 bzw. 85 Prozent 8.000 und 33.000 Jahre aus.

Abbildung 22: Tiefeverteilung der cross-hole Scher- und P-Wellengeschwindigkeiten sowie der Poisson-Faktoren

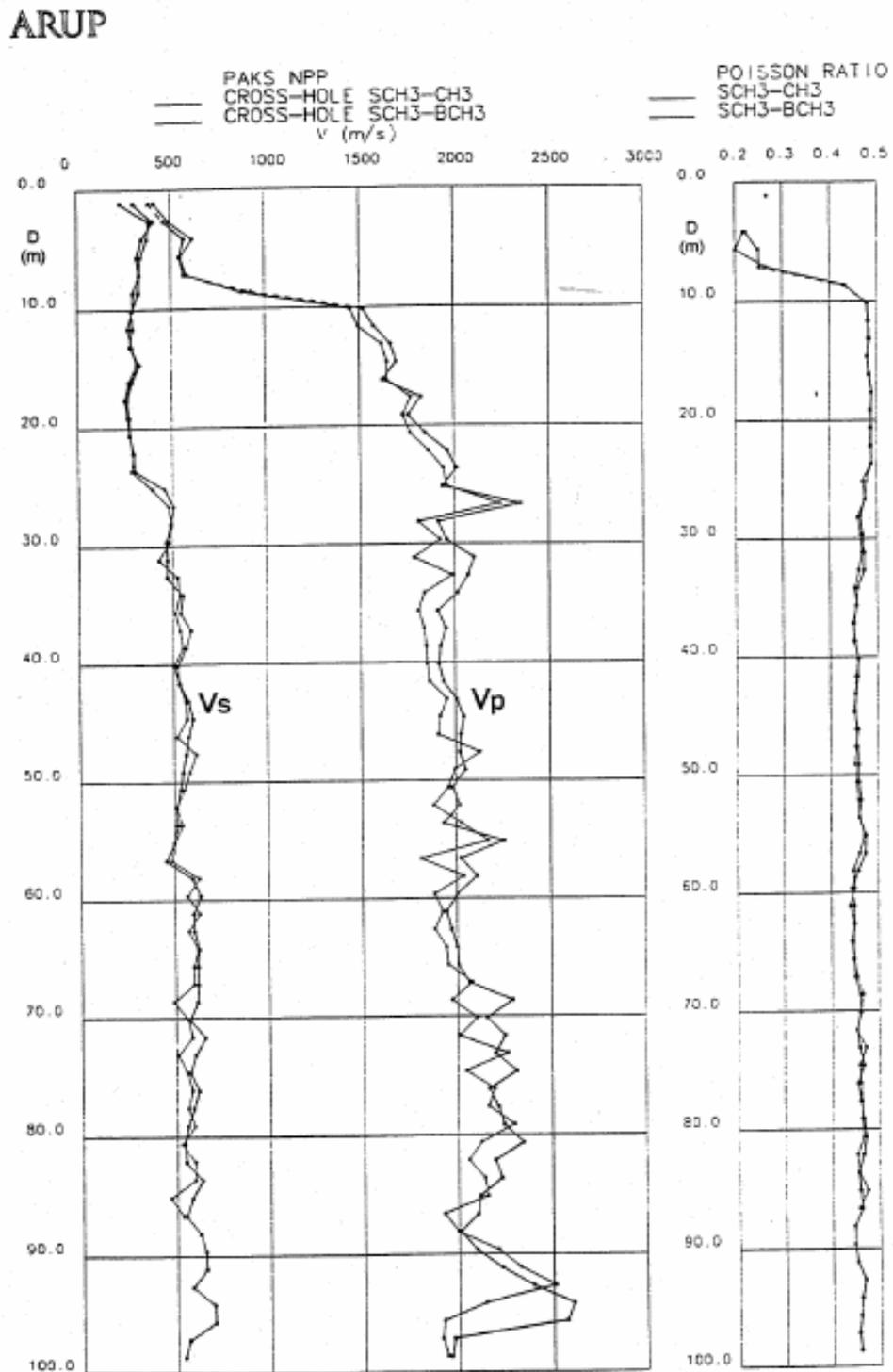
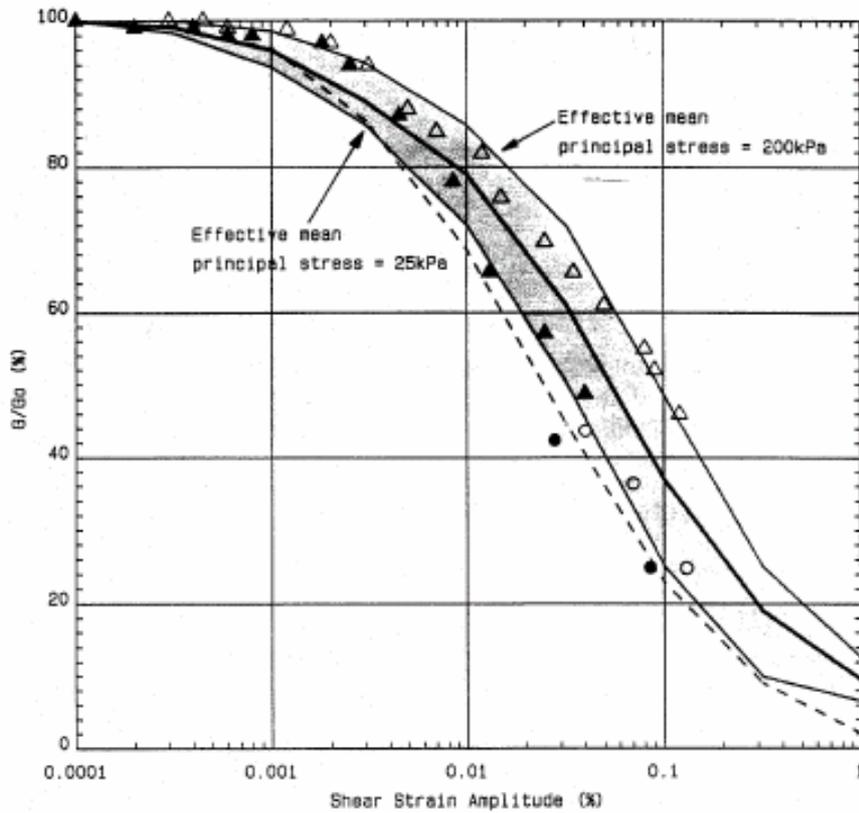


Abbildung 23: Funktion der abhängigen Degradation der Formveränderung des Schermodulus

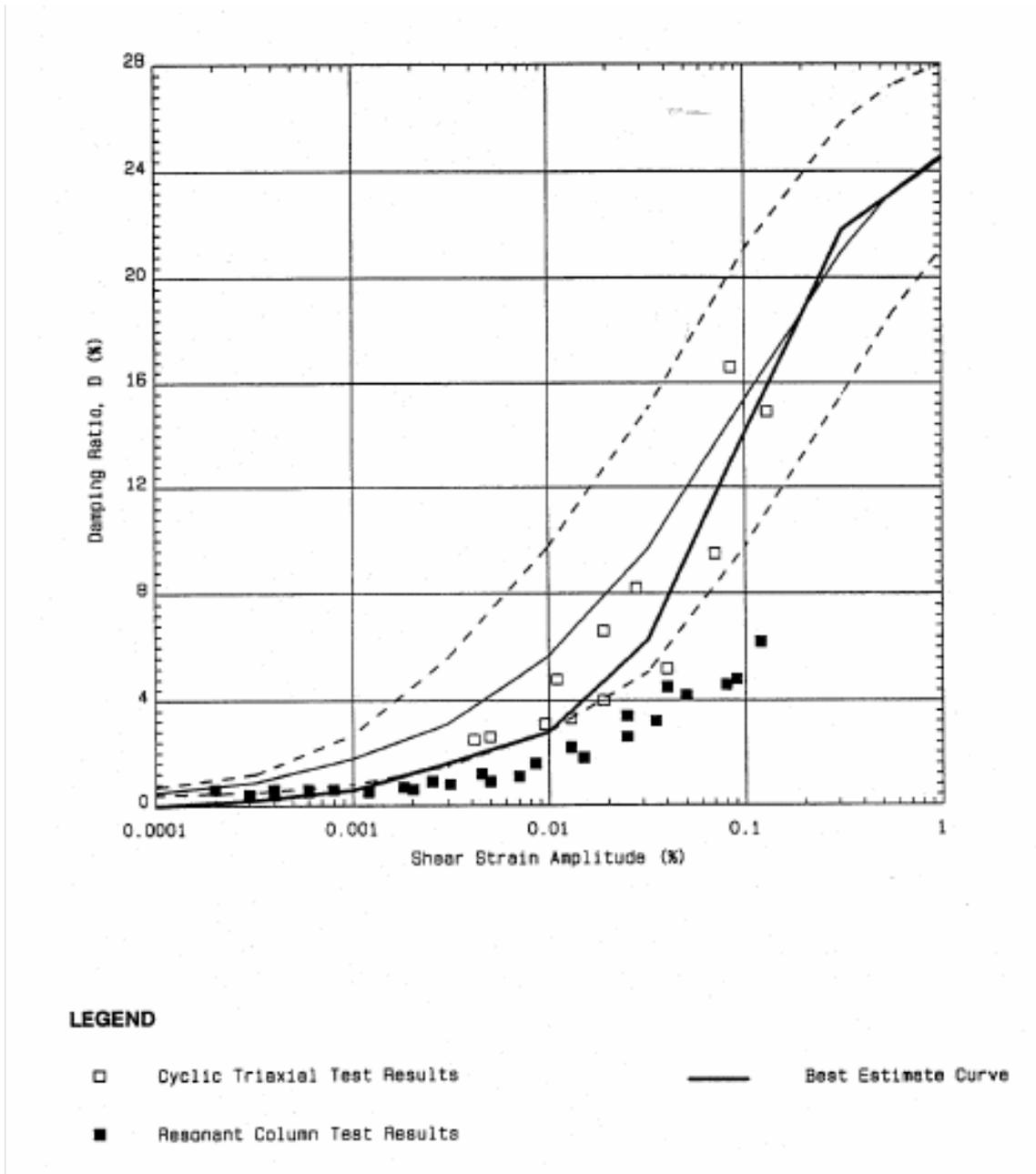
ARUP



LEGEND

- Iwasaki et al., 1976
- Best Estimate Curve
- - - Vucetic & Dobry, 1991: PI = 0
- Resonant Column Test Results
- △ BH4 at 11.79m Cell Pressure 300kPa
- ▲ BH3 at 11.0m Cell Pressure 185kPa
- Cyclic Triaxial Test Results
- BH4 at 11.79m Cell Pressure 300kPa
- BH4 at 11.79m Cell Pressure 100kPa

**Abbildung 24: Funktion der Gestaltsveränderung der Attenuation**



**Abbildung 25: SPT-Ergebnisse in 0 bis 30 Metern Tiefe**

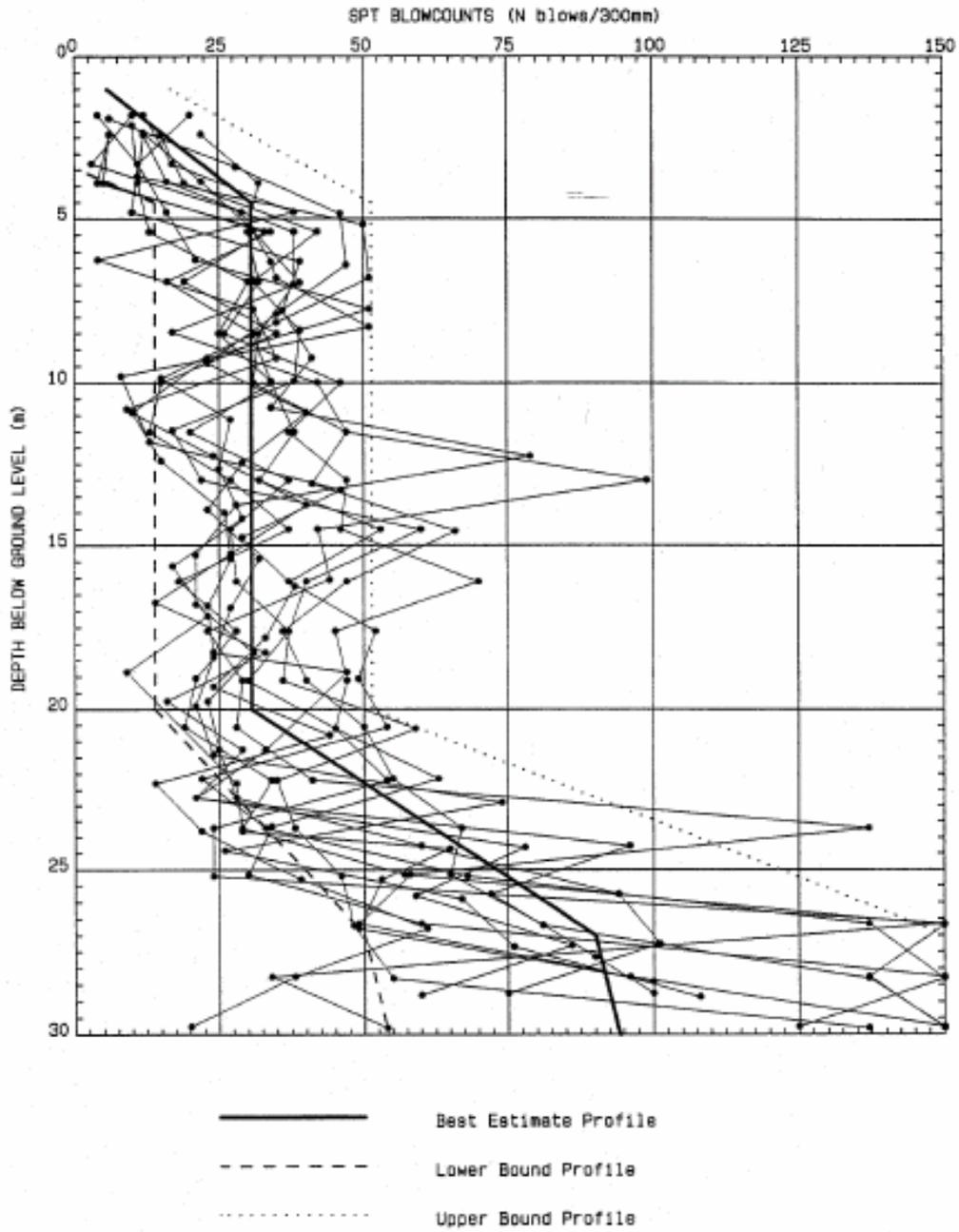
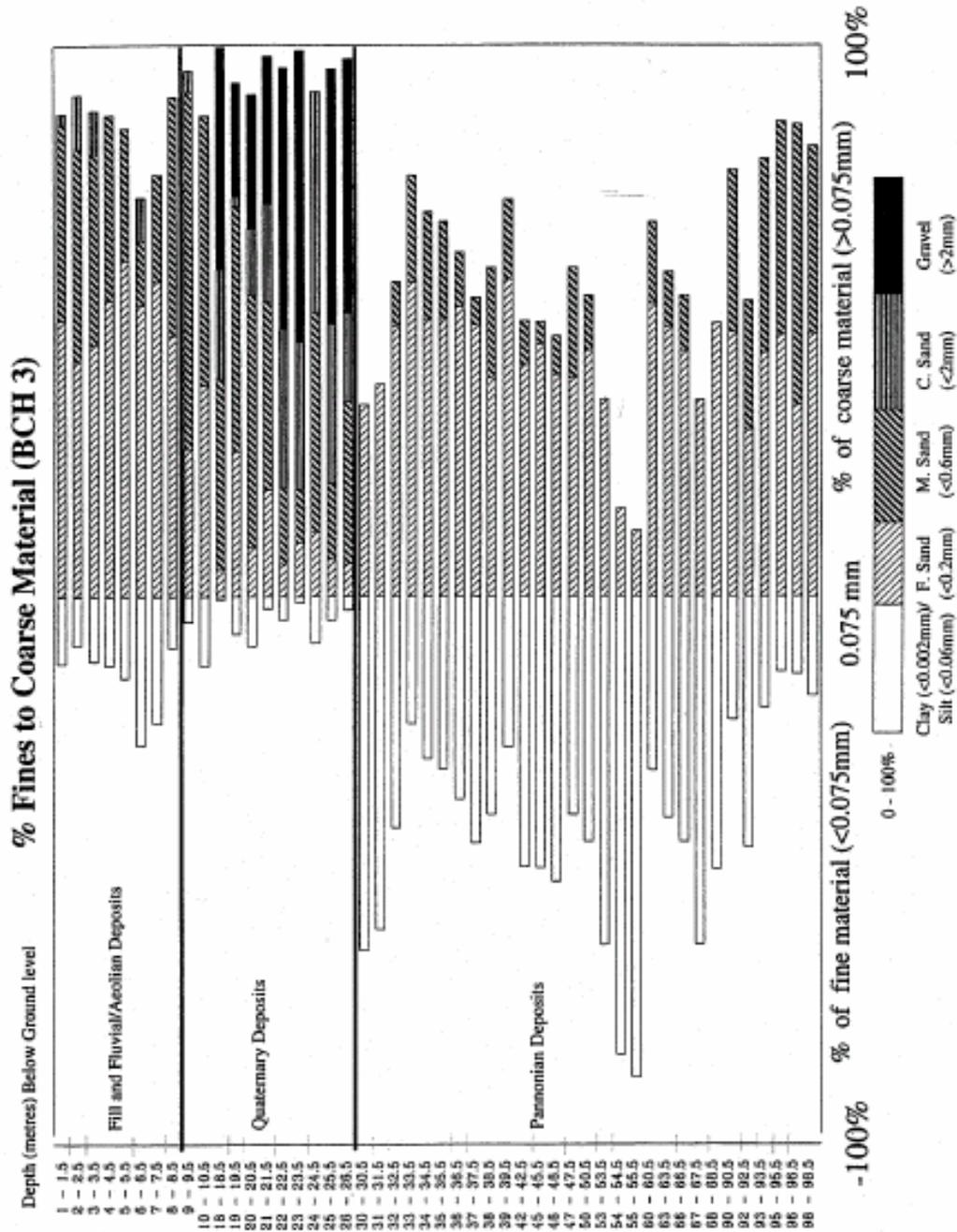


Abbildung 25: Verteilung der Teilchenmessung

ARUP



Der Basisdruck von 130 kPa verändert das Erdflusspotenzial. Dieses ist mit dem FLUSH-Programm zur Messung der Wechselwirkung von Gebäude und Boden bewertbar. Es lohnt sich anzumerken, dass FLUSH mit der Dekonvolution der Inputbewegung an der Oberfläche (0,25 g) bezüglich der Fundamenttiefe eine maximale Beschleunigung von 0,2 g ausgibt. Für die Berechnung des zyklischen, von der Wechselwirkung Gebäude-Boden veränderten Scherspannungsverhältnisses bei einer Bewegung mit der Wiederkehrzeit von 10.000 Jahren diente wiederum das Oasys LIQEFY-Programm als Grundlage. In einer Tiefe von –10 bis –20 Meter ist die best-estimate Wiederkehrperiode eines Erdflusses 14.800 Jahre, bei –15 Meter und bei der der Grundplatte am nächsten befindlichen Schicht 18.300 Jahre. Die Jahreshäufigkeit eines Erdflusses unter dem Hauptgebäude des Reaktors gibt Abbildung 30 an.

Nach den neuesten Ergebnissen ist mit einer Beschädigung der Fundamentierung nicht zu rechnen, wenn es über der zerfließenden Schicht eine entsprechend dicke, stabile Deckschicht gibt. Es ist feststellbar, dass unter dem Hauptgebäude mit einem globalen Erdfluss – als Grundlage eine Wahrscheinlichkeit von  $10^{-4}$  genommen – nicht zu rechnen ist. Die best-estimate-Rechnung gibt hier eine signifikant geringere Wahrscheinlichkeit aus, der Wert  $10^{-4}$  entspricht einem guten 85prozentigen Konfidenzniveau. Gleichzeitig beträgt der Wert einer Annäherung an eine Jahreswahrscheinlichkeit eines Erdflusses im Freien von unten um  $10^{-4}$ /Jahr, während die Schätzung mit einem Konfidenzniveau von 85 Prozent den Wert von  $2 \cdot 10^{-4}$  ergibt. Daraus folgt, dass im Falle des Gebäudes, das nach der Erdbebensicherheit unter Kategorie 1 fällt, unter Beachtung der Wechselwirkung von Gebäude und Boden ein Urteil abgegeben werden kann.

Die Untersuchung des Erdbeben ausgesetzten Gebäudes hinsichtlich Fundamentstabilität, der Belastbarkeit des Bodens, der Sicherheit gegen Erdfluss sowie der von einem Erdbeben verursachten Senkung erfolgte unter Berücksichtigung der Vorschriften (BS 8004, Draft Eurocode und Eurocode 8 Part 5 (1995)) für den Fall eines Erdflusses und für den Fall eines 10.000jährigen Maßerdbebens.

Die Grundplatte des Reaktorhauptgebäudes befindet sich unmittelbar über der Schicht, die zum Erdfluss tendiert, weshalb die Tragfähigkeit dieser Schicht nach einem Fluss kontrolliert werden musste. Es ist festzustellen, dass im Falle eines Sockeldruckes von 130 kPa die kritische Lasttragfähigkeit ausreichend für die Stabilität der Fundamentierung ist. Mit einem Abrutschen des Hauptgebäudes ist nicht zu rechnen. Wenn die unter der Grundplatte befindliche drei Meter dicke Bodenschicht infolge eines extremen Erdbebens zerfließe, betrüge die globale Senkung des Gebäudes sechzig Millimeter. Bei einem Erdbeben mit der Wiederkehrzeit von 10.000 Jahren ist eine Senkung von zwölf Millimeter zu erwarten.

Die das Planungsstadium überschreitenden Untersuchungen haben die Tendenzen zu einem Erdfluss unterhalb des Standortes sehr detailliert vermessen [5]. Au den Abbildungen 31 bis 32 sind die von einem Erdbeben verursachten Formveränderungen und Porendrucke bzw. Spannungsverteilungen im Boden ersichtlich. Auf den Abbildungen 33 bis 35 ist zu sehen, dass im Falle eines Erdbebens mit der Wiederkehrzeit von 10.000 Jahren, es noch beträchtliche Reserven für den Erdfluss gibt, während solche mit einer Wiederkehrzeit von 100.000 bis 1.000.000 Jahren umgehen zu einem führen. Aus dem im Abbildung 36 angeführten Antwortspektrum ist ersichtlich, dass ein Erdfluss den Charakter der Erdbewegungen an der Oberfläche drastisch verändern könnte.

Abbildung 27: Verteilung der Korngröße und Tendenz zum Erdfluss

ARUP

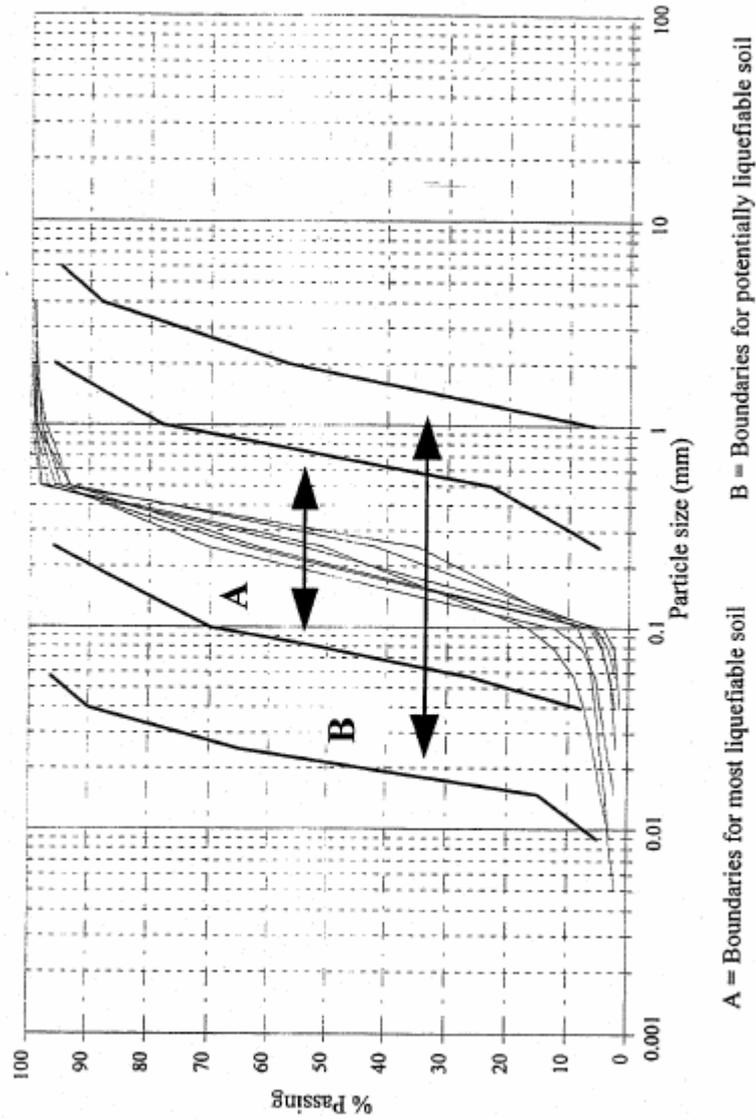


Abbildung 28: Korrigierte SPT-Schlagzahl und Verteilung der Körner

ARUP

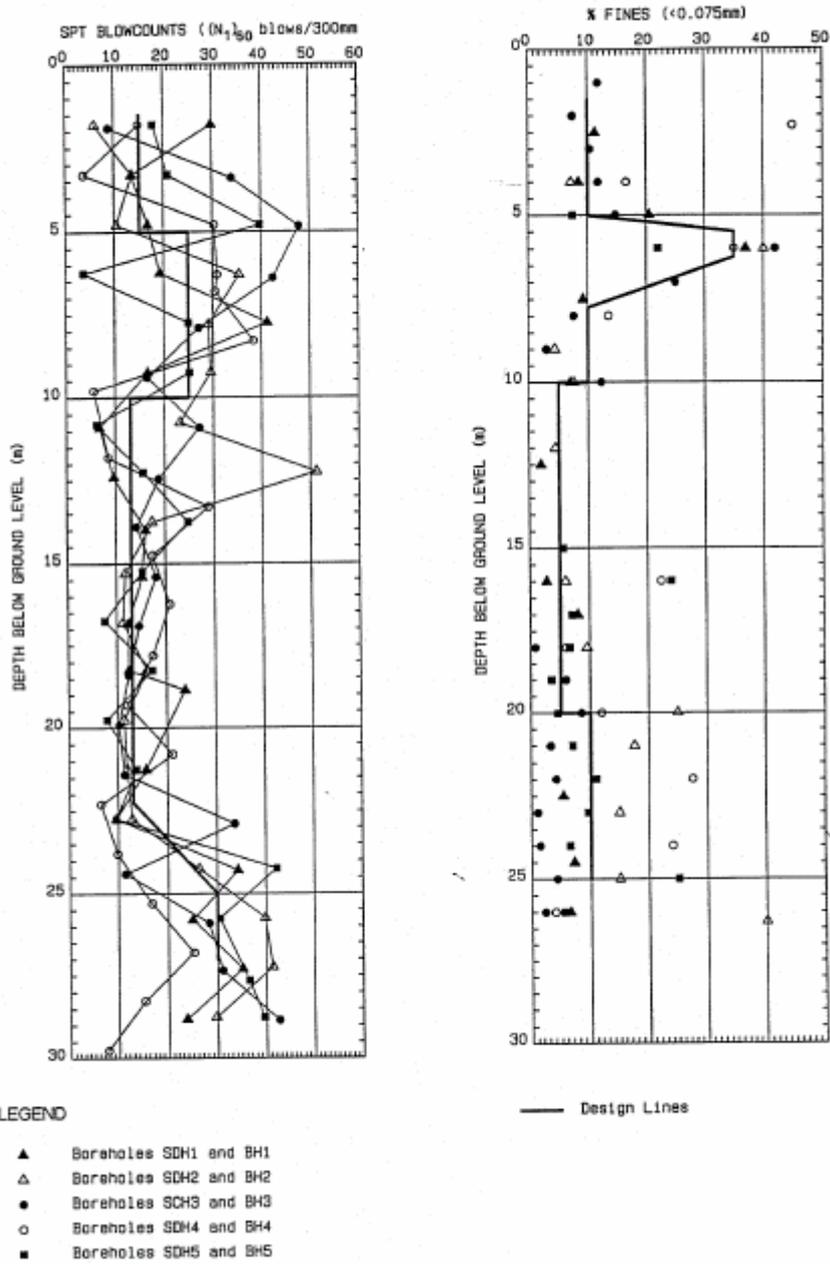
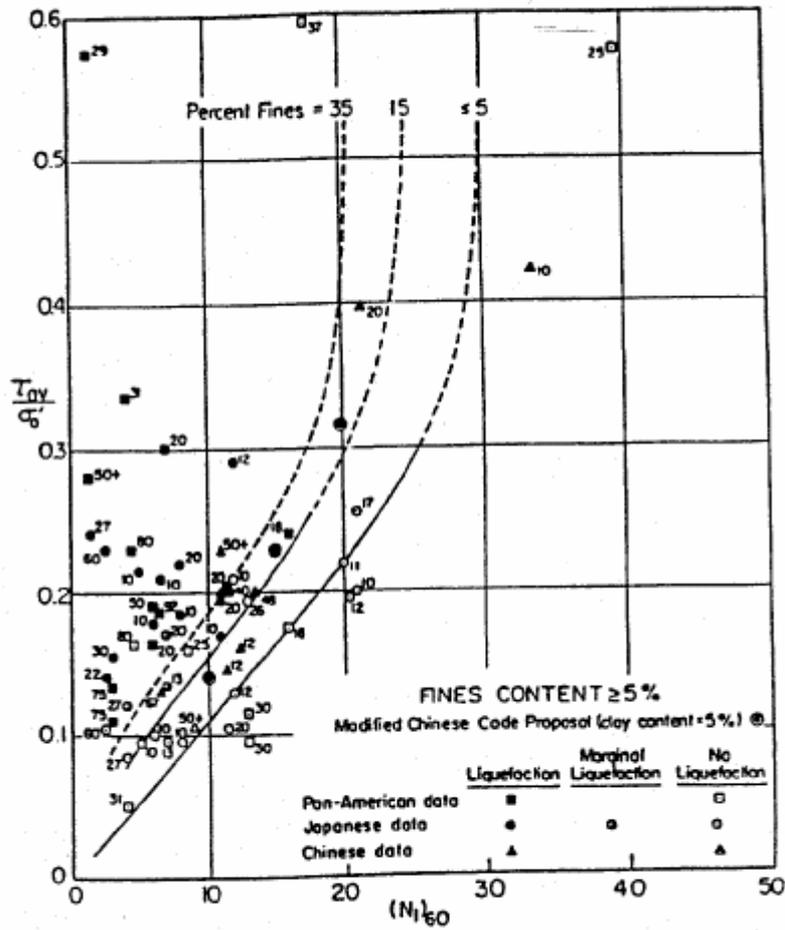


Abbildung 29: Empirischer Zusammenhang nach Seed

ARUP



Note: This figure is normalised for a magnitude 7.5 earthquake

Abbildung 30: Verteilung des kritischen Verhältnisses aus Sicht der Normal- und Scherspannung bei Erdfluss

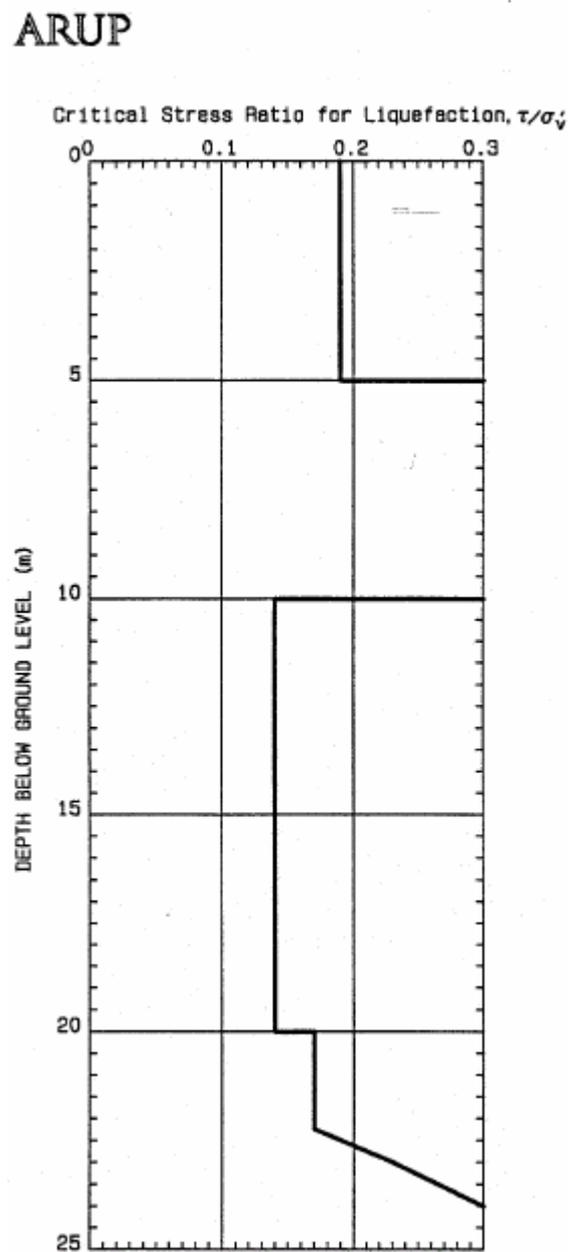


Abbildung 31: Ergebnis bezüglich Häufigkeit von Erdfluss unter Reaktorhauptgebäude

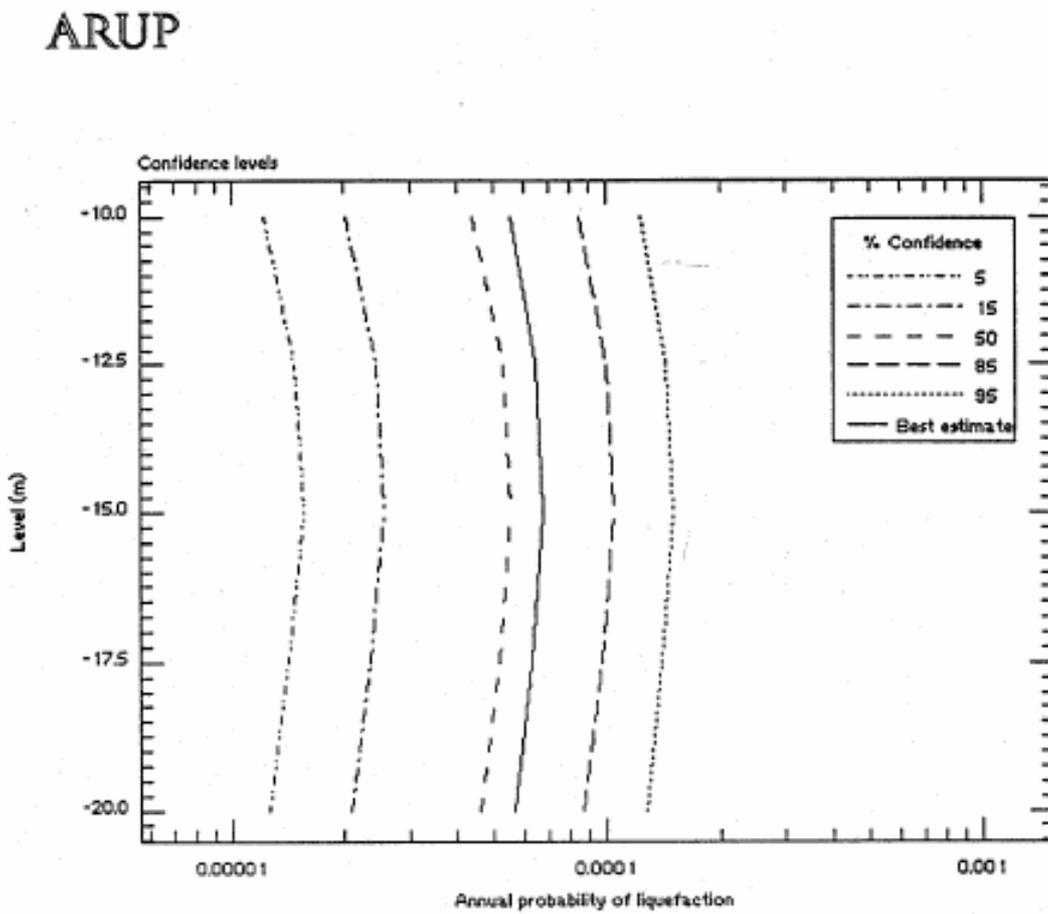


Abbildung 33: Spannungsfeld in Boden bei 10.000jährigem Erdbeben

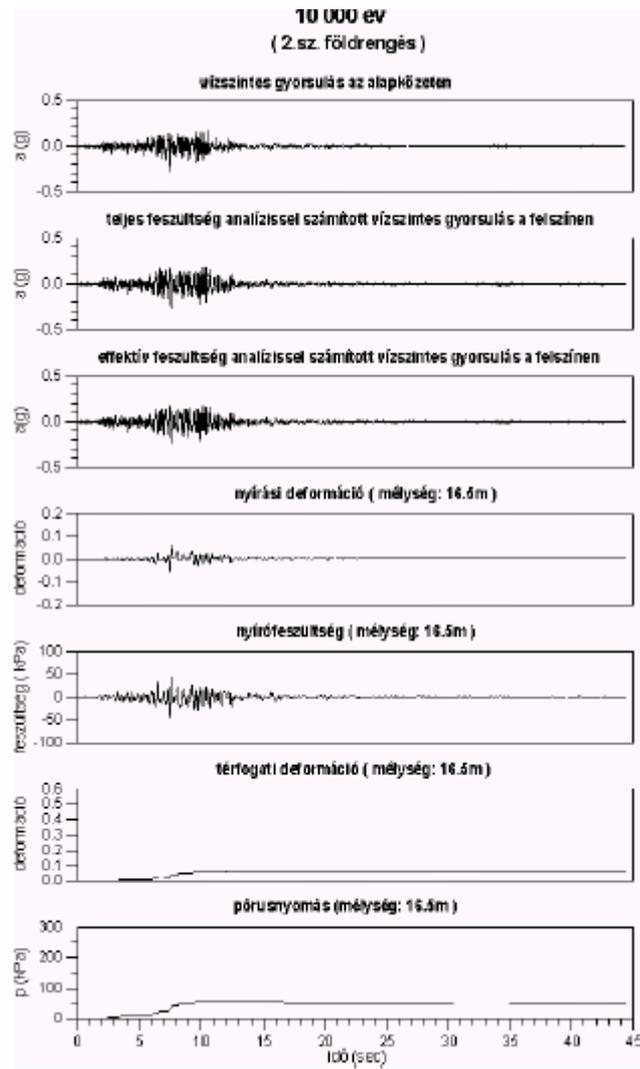


Abbildung 33: Spannungsfeld in Boden bei 100.000jährigem Erdbeben

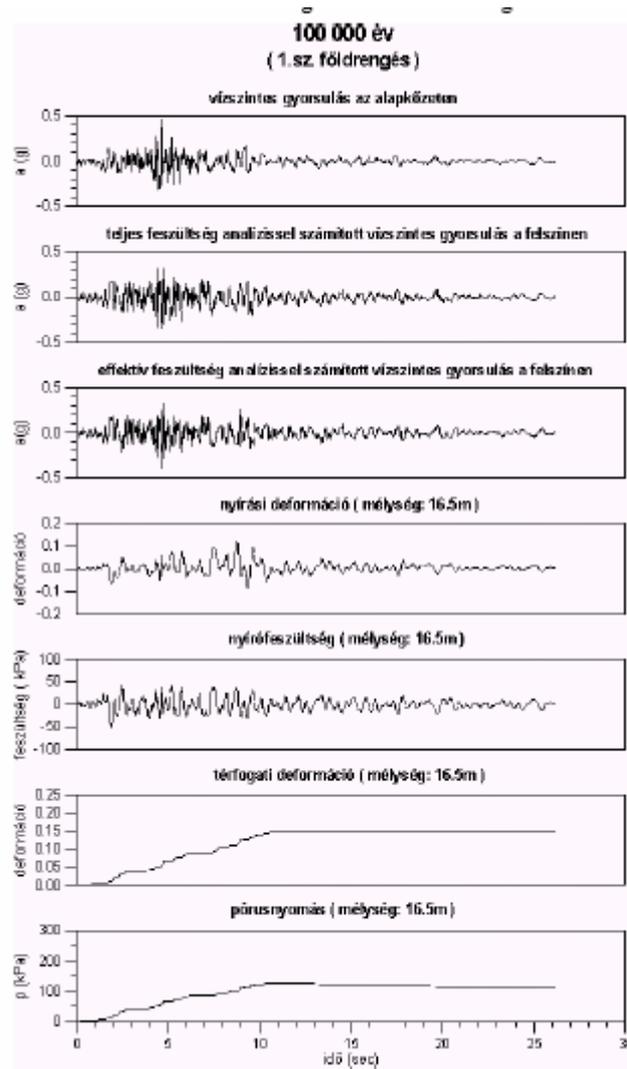


Abbildung 34: Entstehung von Erdfluss auf Niveau 10.000 Jahre

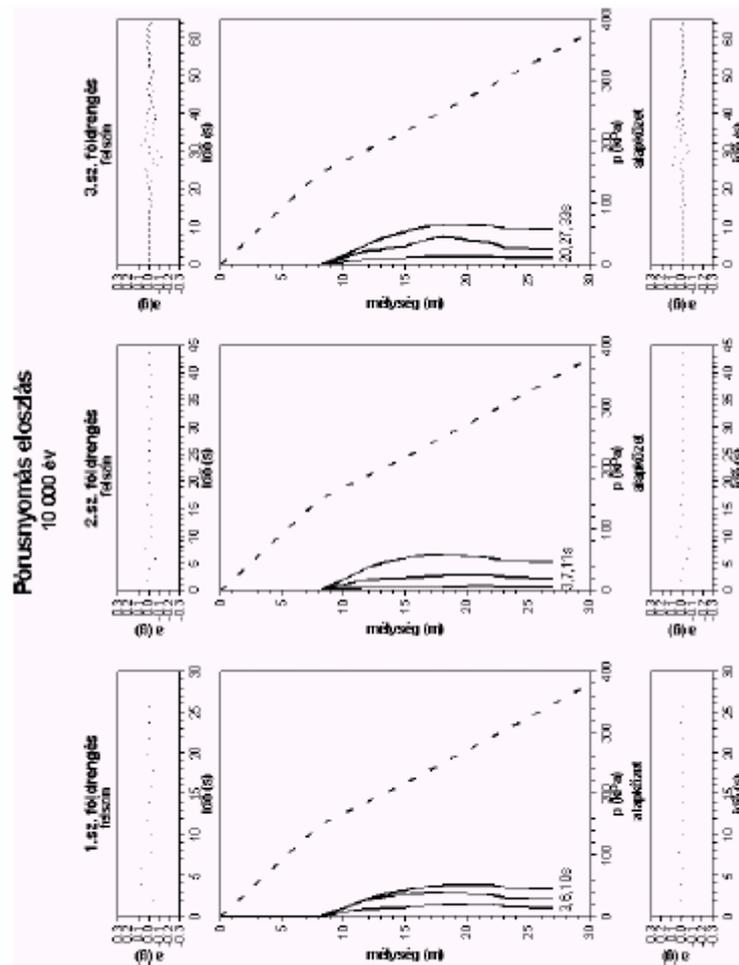


Abbildung 35: Entstehung von Erdfluss auf Niveau 100.000 Jahre

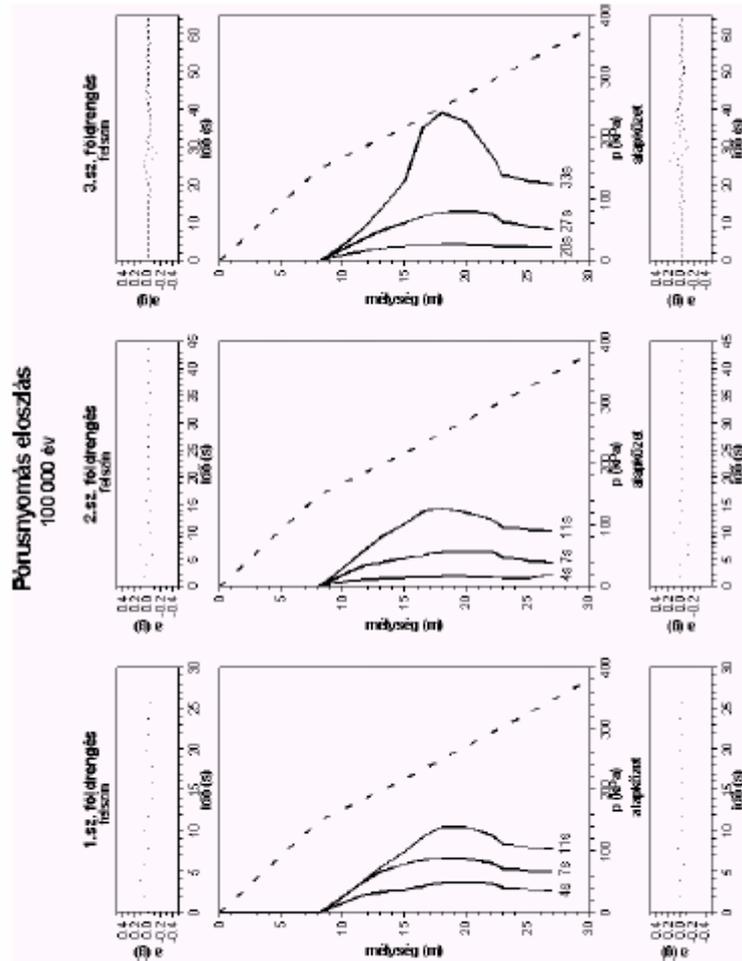


Abbildung 36: Entstehung von Erdfluss auf Niveau 1,000.000 Jahre

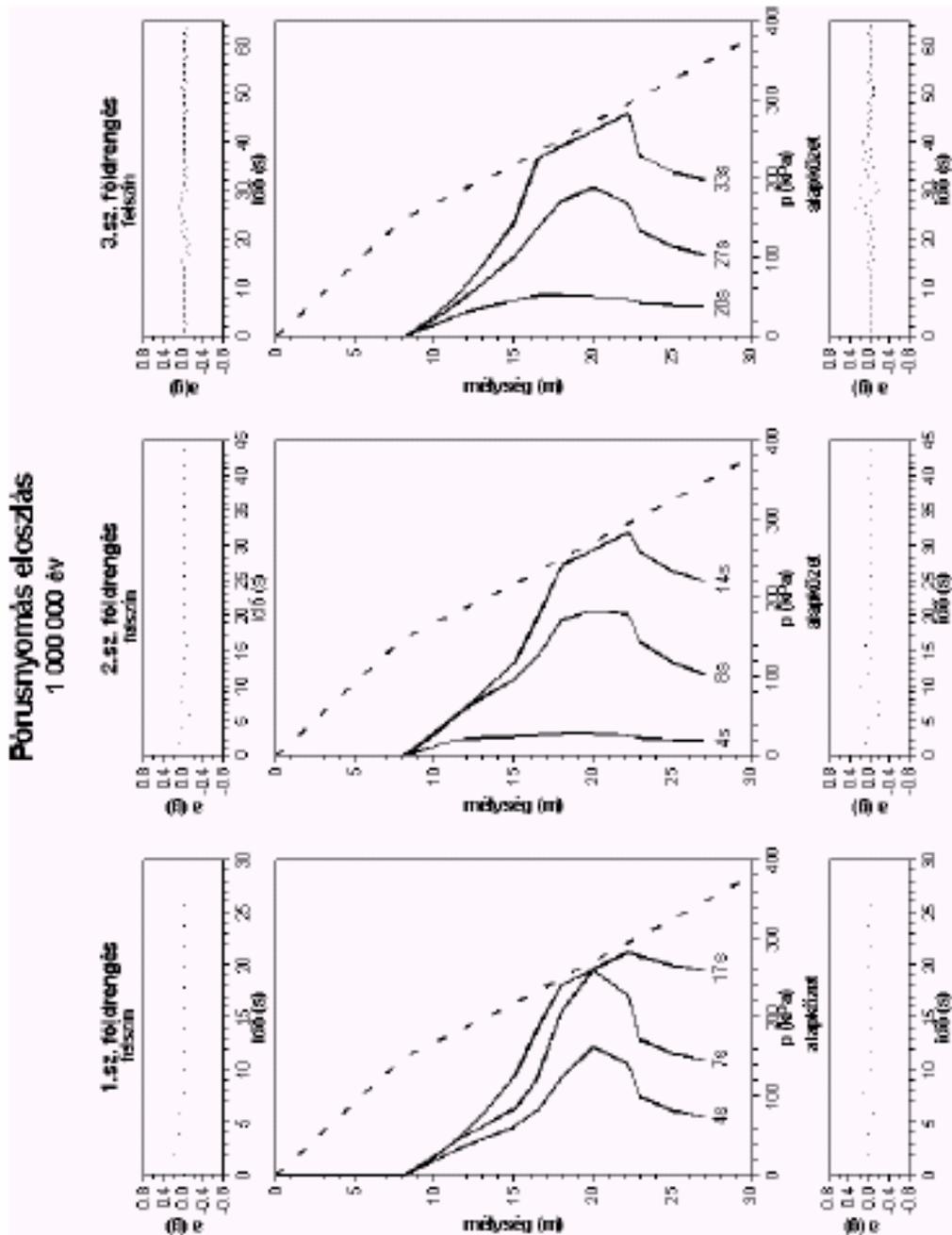
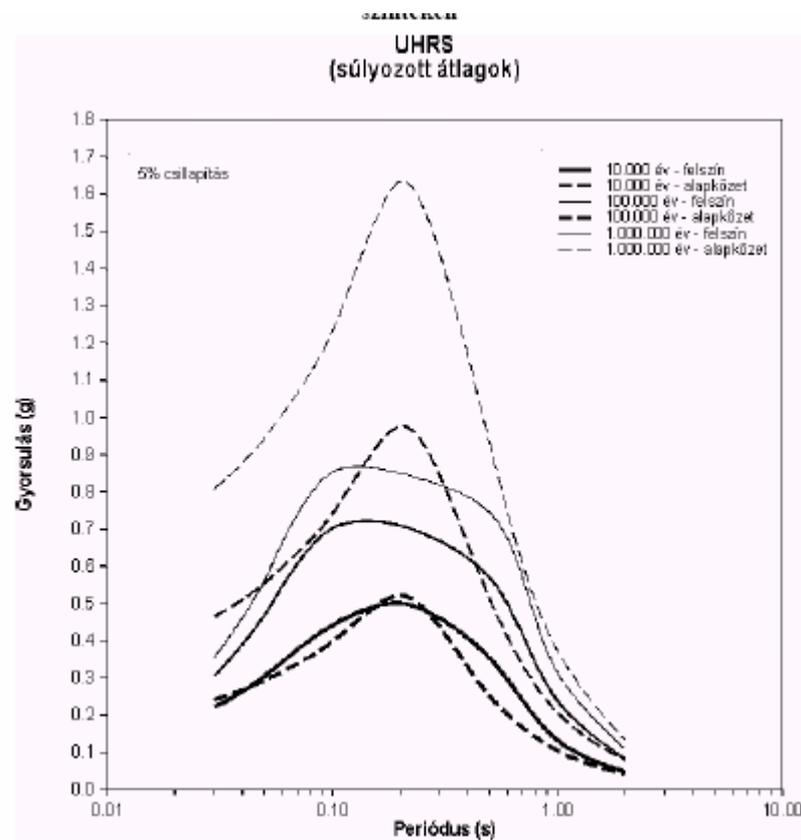


Abbildung 37: Antwortspektrum an der Oberfläche auf Häufigkeitsebene  $10^{-4}$ ,  $10^{-5}$ , und  $10^{-6}$ /Jahr

#### Vergleich der in der Umgebung des Kraftwerks durchgeführten ingenieurgeologischen und geotechnischen Untersuchungen und der gegenwärtig in Kraft befindlichen Richtlinien

Die Studie zu Zusammenfassung der ingenieurgeologischen Daten der Betriebsstätte und der geotechnischen Bewertung wurde von der Firma GeoRisk GmbH angefertigt. [9] In dieser wurde über die Zusammenfassung und Systematisierung der früheren ingenieurgeologischen und geotechnischen Untersuchungen und Ergebnisse hinausgehend untersucht, inwieweit die in diesen angewandten Methoden und Berechnungen den neuen, veränderten Richtlinien entsprechen.

In der Studie wurden die ab Mitte der 1960er Jahre bis 1993 und 1994-1995 durchgeführten Studien zusammengefasst und aufgrund dieser die ingenieurgeologischen und geotechnischen Merkmale angegeben. Präsentiert wurde auch die Studie der OVE AVRUP aus dem Jahr 1996 über die Erdbeben maßgeblich modifizierende Auswirkung der Schichtenreihe aus dem Quartär, die sich auf ein Wahrscheinlichkeitsniveau von  $10^{-4}$ /Jahr bezog. Im Jahr 2000 weitete die GeoRisk GmbH schließlich diese Untersuchungen auf ein Wahrscheinlichkeitsniveau von  $10^{-4}$  -  $10^{-6}$  aus.

Die Erforschung, Qualifizierung der Betriebsstätte und die Festlegung eines Normerdbebens erfolgte in den Jahren 1986 und 1996 nach der internationalen Praxis und der Regelung der IAEA.

In den Jahren 1994-1996 koordinierte die OVE AVRUP die Erforschung der Betriebsstätte und die Neubewertung der Erdbebengefährdung bzw. führte diese auch aus. Der vom Projekt verfasste Abschlussbericht wurde von der IAEA überprüft: Es wurde festgestellt, dass die Arbeit den diesbezüglichen Richtlinien der IAEA entspreche, und dass die Ergebnisse ausreichend konservativ seien, so dass sie als Grundlage einer Bewertung der Erdbebengefährdung und für die nötigen Verstärkungen dienen können.

In Ungarn traten die Verordnungen bezüglich der Sicherheit von Atomkraftwerken 1996 in Kraft. Da deren Grundlage die rechtswirksamen Richtlinien der IAEA waren, kann festgestellt werden, dass die Untersuchungsmethoden, Schlussfolgerungen auch den gültigen ungarischen Rechtsregelungen entsprechen.

Im Zuge der Erdbeben, die sich in den fast zehn Jahren seit Beginn der ersten Untersuchungen ereigneten, wurden zahlreiche Erscheinungen im Zusammenhang mit Erdflüssen erfahren und untersucht, was zu einer Weiterentwicklung der Methoden zur Vorhersage nach sich zog. Die endgültigen europäischen Normen von "Eurocode 7" und "Eurocode 8" wurden angenommen, wie auch in den Jahren 2002 bis 2004 die früheren Richtlinien der IAEA von neuen abgelöst wurden (NS-G-3.3., NS-G-3.6)

Zusammenfassend kann bezüglich eines Vergleichs der auf der Betriebsstätte durchgeführten geophysikalischen und geotechnischen Messungen und Berechnungen mit den Vorschriften der Richtlinien folgendes festgestellt werden:

- die auf der Betriebsstätte durchgeführten geophysikalischen und geotechnischen Messungen und Forschungen entsprechen größtenteils den Vorschriften der neuen Norm, werden an vielen Stellen sogar eher übererfüllt,
- die durchgeführten Berechnungen entsprechen weitestgehend den Vorschriften bezüglich der Methode zur Untersuchungsmethode von örtlichen Wirkungsveränderungen,
- die Untersuchungsmethoden bezüglich des Erdflusspotenzials erfüllen ebenfalls die Vorschriften der Richtlinien.

Summa summarum kann damit festgestellt werden, dass die durchgeführten geotechnischen Messungen und die angewandten Berechnungen mithilfe der damals modernsten Verfahrensweisen durchgeführt wurden und im wesentlichen auch den neuesten Vorschriften der IAEA entsprechen. Weitere Untersuchungen würden das Bild über die Wahrscheinlichkeit und Ausbildung von Erdfluss und der modifizierenden Wirkung der Schichtenreihe aus dem Quartär zwar verfeinern, aber im Kern mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht weiter beeinflussen.

## 6. Hydrogeologische Formationen

Bezüglich des untersuchten Gebietes und der weiteren Umgebung wurden in mehreren Phasen mehrere hydrogeologische Bewertungen getroffen. Der Ausbau der hydrogeologischen Messstationen begann 1967 mit dem Ausbau der bodentechnischen Bohrungen zu Brunnen. Die Ausgestaltung des gegenwärtigen Netzes begann 1982. Die neuesten Elemente des Monitoringsystems wurden im Rahmen des Programms zur Charakterisierung des Standorts bezüglich der Umwelt-, Standort- und wasserrechtlichen Fragen im Genehmigungsverfahren aufgebaut.

In der Region gibt es zweierlei unterirdische Gewässer: Schichtwasser in den pannonischen Sandschichten, das sich tief unter den wasserundurchlässigen Schichten befindet, und darüber, dass im Pleistozän-Holozän entstandene Grundwasser.

Der bis zum Grundwasser sich erstreckende Bestand ist eine Auffüllung aus den Sandwerken, unter den sich Schwemmschlamm, Schwemmsand und Schwemmtone aus dem Neoholozän ansiedelt, die alle aus den Überschwemmungen der Donau herrühren. Je mehr man sich vom Bett der Donau entfernt, umso mehr bedeckt Flugsand aus dem Altholozän die ehemalige Erdoberfläche. Darunter befinden sich Gesteinsmehl, Feinsand und ein feinkörniger Bestand aus Flusssedimenten. Durch die oben beschriebenen Schichten sickernd, gelangen die Niederschläge in das Grundwasser

### 6.1. Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Die in der Region entstandenen Grundwasserströmungen sind nur in ein regionales System integriert verständlich. Die Erosionsbasis des Raumes bildet die Donau. Der Wasserstand der Donau charakterisiert die Strömungsverhältnisse.

In den die Donau begrenzenden Streifen sind folgende eigenständige Einheiten voneinander abzugrenzen:

Die Donau begrenzenden niedrigliegenden Überschwemmungsgebiete werden von Sedimenten aufgebaut, von Schwemmsand und Schwemmschlamm. Es wird von aufgefüllten ehemaligen Mäandern dominiert. Gegenwärtig

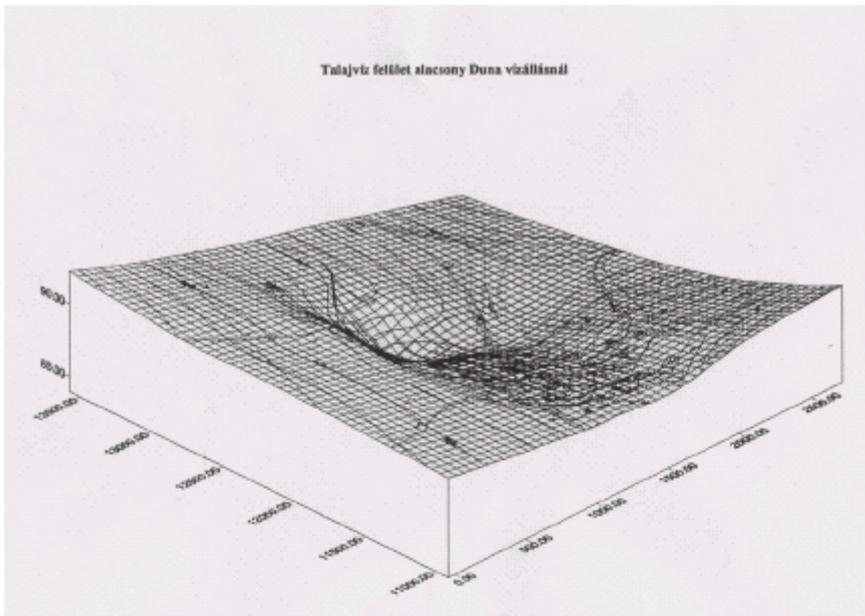
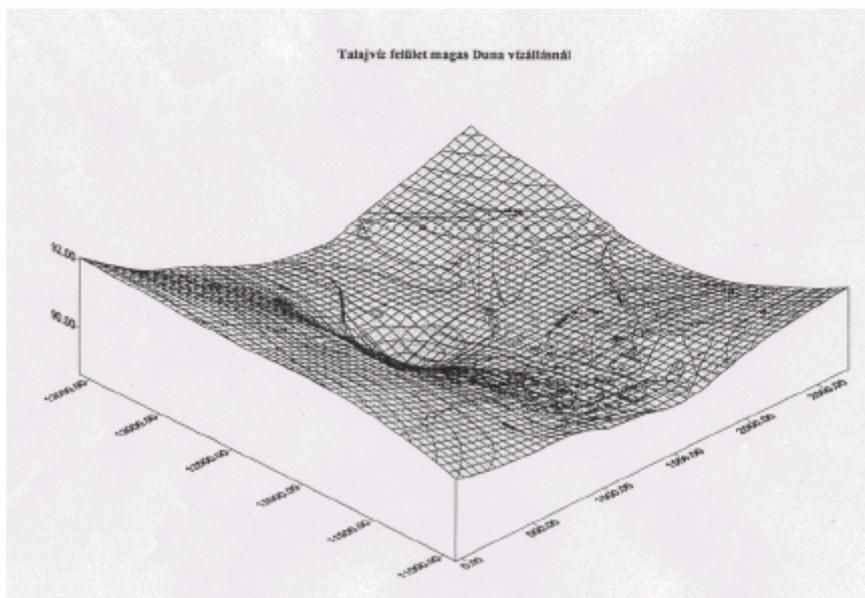
ist dieser Bereich von Dämmen in 96-97 Meter baltischer Seehöhe vor Überschwemmung geschützt, aber die Wasserstandsveränderungen der Donau – in erster Linie über die abgeschnürten ehemaligen Flussbette – beeinflussen das Grundwasser noch immer in einem erheblichen Ausmaß. Die Abbildungen 37 und 38 zeigen den Zusammenhang zwischen hohem und niedrigem Pegelstand der Donau und dem Grundwasser.

Über das Alluvium der Donau erheben sich in sechs bis acht Meter die Terrassen der Donau aus dem Neopleistozän. Ihre Oberfläche sind grießige Schotterebenen und Flusssand. Ganz oben befindet sich zudem eine Flugsandschicht. Den Grundwasserstand dieser Terrassen kann die Donau nicht mehr maßgeblich beeinflussen.

Das Donautal wird bis zu einer Höhe von 160 bis 180 Meter baltischer Seehöhe in nordwestlicher Richtung von einem Lössplateau begleitet. Die auf die Oberfläche des Lössplateaus fallenden und in es eindringenden Niederschläge sammeln sich über der Lehmschicht und geraten über die poröseren Schichten in Richtung Erosionsbasis. Dies ist die Nährzone des Grundwassers im Donautal. Die Sohle des Grundwasserbestands bilden die Sedimente des pannonischen Sees. Das AKW ist im wesentlichen auf den mit Flugsand bedeckten Flussterrassen entstanden.

### **Wechselseitige Beeinflussung von Grundwasser und Oberflächengewässern**

In den Tälern wird das wenig durchlässige Grundgestein im allgemeinen von durchlässigen alluvialen Sedimenten gebildet, womit der Wasserlauf des Grundwassers der den Fluss begleitenden Ebenen wesentlich von den Oberflächengewässern bestimmt wird. An den äußeren Rändern der Talsohle befindet sich das Grundwasser mit den die höher gelegenen Bereiche aufbauenden Schichten. Wo diese Schichten nicht vollkommen wasserundurchlässig sind, hat das Grundwasser der Ebene entlang des Flusses einen Einfluss auf das Grundwasser der Umgebung.

**Abbildung 38: Grundwasseroberfläche bei Wasserniedrigstand der Donau****Abbildung 39: Grundwasseroberfläche bei Wasserhochstand der Donau****38. ábra: Talajvíz felület magas Duna vízállásnál**

In jenen Fällen, wenn die Veränderungen des Wasserpegels des Flusses beträchtlich sind, verändert sich die Strömungsrichtung des Grundwassers im Uferbereich. Zur Zeit von Hochwässern ist der Wasserstand im Bett höher als der Wasserspiegel des Grundwassers in der Umgebung. In dieser Zeiten nährt der Fluss das Grundwasser innerhalb dieser Zone, so lange die Stauwirkung des Flusses wirkt (Bereich der unmittelbaren Auswirkung des Flusses).

Zur selben Zeit stoppt der hohe Wasserstand des Flusses auch die von außen einströmende Grundwasserströmung. Die eintreffende Wassermenge wird also in der Ebene entlang des Flusses gelagert, und hebt dort den Wasserstand des Grundwassers an. Damit wird hier auch die Verdunstung stärker, die einen Teil des ankommenden Wassers auch dezimiert. (Bereich der mittelbaren Auswirkung des Flusses). Sobald sich wieder ein niedriger Pegelstand einstellt, gerät der Wasserstand des Flusses unter das Niveau des Grundwassers. Dieser Prozess entleert vorerst jene Wassermengen, die sich zur Zeit des Hochwassers in den Poren der Schichten hier angesammelt hatten. Danach uferdieser Prozess auch auf die außerhalb der unmittelbaren Beeinflussungszone liegenden Bereiche aus und senkt den Grundwasserspiegel auch in einer weiteren Entfernung ab. Schließlich bildet sich am Ende wieder ein Gleichgewicht heraus, wenn die Wassermenge, die von außen in die Flussebene gerät, gleich ist der Menge die verdunstet oder in den Fluss gelangt.

Die zahlenmäßigen Daten dieses sehr komplizierten Prozesses werden von den örtlichen Gegebenheiten beeinflusst. Es ist daher sehr schwierig, eine Verfahrensweise anzugeben, mit der die mittel- und unmittelbar vom Fluss beeinflusste Zone berechenbar wäre. Im allgemeinsten Fall können die aufgrund der Wahrnehmungen der entlang des Flusses aufgestellten Beobachtungsbrunnen gemachten Wasserstandskurven bzw. eine Analyse dieser die Entfernungen geschätzt werden – oder aber mittels der Anwendung eines Strömungsmodells.

Zur zahlenmäßigen Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Donau und dem Grundwasser wurde eine Wasserstandskurve zwischen den Amplituden der Hochwässer der Donau und dem relativen Pegelanstieg, der in den Beobachtungsbrunnen gemessen wurde, gezeichnet. Da die Hochwässer der Donau unter unterschiedlichen hydrologischen Umständen zustande kommen – es kann sich um kleine ebenso handeln wie um Hochwässer die das ganze Bett überfluten – zeigen die Messdaten eine sehr große Streuung um die auf Grundlage der Daten ermittelte Regressionslineare. Aufgrund dieser Berechnungen können aber dennoch einige Gesetzmäßigkeiten festgestellt werden. Je mehr man sich von der Donau entfernt, umso mehr sinkt auch der absolute Wert der Kennzahl, welche die Linearität misst. Dieser enge Zusammenhang wird geringer, löst sich dann schließlich vollends auf. Die Steile der Funktion verändert sich dieser Regel entsprechend ebenso. In der Nähe der Donau beträgt der Richtungstangens um 0,7, d.h. einer zehn Meter hohen Überflutung entspricht eine sieben Meter hohe Wasserstandsänderung in den Uferpartien.

Entlang des Kaltwasserkanals reduziert sich die Größe der Überschwemmungswelle in einem Streifen von zweihundert bis fünfhundert Meter auf ein Drittel ( $m \approx 0,3$ ). In einer weitere Entfernung kann diese Auswirkung gar nicht mehr nachgewiesen werden. Als Beispiel sei zu erwähnen, dass ein auf einen KÖV (*Abkürzung unklar*) auffahrende Überschwemmung von fünf Metern 250 bis 500 Meter vom Ufer entfernt erst in zwei bis vier Tagen wahrgenommen wird.

Mittels der Parameter der Korrelationslinearen ist jede Anhebung des Grundwasserspiegels im Bezug auf ein beliebig hohes Hochwasser im Bereich eines gegebenen Beobachtungsbrunnens schätzbar. Mit der Steigerung der Wahrnehmungsperiode und der Steigerung der Zahl der einbezogenen Hochwässer ist eine geringfügige Verbesserung des Wertes der Korrelationskennzahl zu erwarten.

Die Weitergabe des Spitzenstandes von Hochwässern ( $\approx v=100\text{m/d}$ ) erlaubt die Schlussfolgerung, dass sich diese über die unterste Schotterschicht in der Form der Weitergabe des Druckes abspielen. Das System funktioniert als ein System unter Druck. Die Wasserleitungsfunktionen spielen sich in den Schotterzonen mit den besten Sickereigenschaften ab. Die fünfzehn bis null Meter dicke Schicht aus Gesteinsmehl, Feinsand und Sand funktioniert als wasserundurchlässige Schicht, führt aber das von der Oberfläche eindringende Niederschlagswasser bis zum zusammenhängenden Grundwasserpegel ab.

In Kenntnis dessen, können bezüglich des Bereiches des Kraftwerkes folgende hydrologische, geohydrologische Feststellungen getroffen werden:

- Das Wasserdurchlässigkeitspotenzial des Dreiphasensystems oberhalb des Grundwasserspiegels ist gering, ist in vertikaler Richtung zur Wasserströmung langsam, bei einer eventuellen Verschmutzung steht ausreichend Zeit zur Verfügung ein Weitersickern zu unterbinden.

- Die Strömungsgeschwindigkeit des Zweiphasensystems unterhalb des Grundwasserpegels ist je nach Schicht um Größenordnungen unterschiedlich, beträgt in vertikaler Richtung zur Wasserströmung zirka zwei Drittel der Geschwindigkeit in horizontaler Richtung.
- Das Schichtwasser des pannonischen Schichtbestandes bildet ein unabhängiges System, frischt sich nicht aus den Wasserbestand der Sedimente des Flusswassers auf, eine Wasserübergabe ist nur in Richtung aufwärts vom Schichtwasser in Richtung Grundwasser möglich.
- Aufgrund der Altersfeststellung des Wassers mithilfe der Radioisotopenmethode ist das Frischwasser der Flusswassersedimente entsprechend der Entfernung von der Donau – wegen der Verbindung mit der Donau – tritiumhältig. Das Wasser der pannonischen Schicht ist alt, enthält kein Tritium.
- Aufgrund einer punkttartigen Verschmutzungsquelle verbreitet sich die Verschmutzung im Grundwasser mit einem Schweif, der einen Öffnungswinkel von ca.  $60^\circ$  hat.
- Die Reihe der Brunnen in der unmittelbaren Umgebung des Hauptgebäudes – vom Ort einer potenziellen Verschmutzung gemessen und abstandsmäßig annähernd gleichmäßig verteilt – kann eine Verschmutzung registrieren
- Die Verschmutzung gerät unter einigen extremen hydrologischen Bedingungen bis an die untere Schottererschicht, wo die Strömungsgeschwindigkeit um eine Größenordnung höher ist als in den oberen Schichten.
- Die Wahrnehmungen müssen – im ganzen Kraftwerksbereich – sich auf die zweite Wahrnehmungszone erstrecken, auch auf die sich zwischen achtzehn und zweiundzwanzig Meter befindliche Schotterzone

### Eigenheiten der unterirdischen Gewässer

Bei den unterirdischen Gewässern sind das Grundwasser und die Schichtwässer zu unterscheiden. Im Bereich Kalocsa Sárköz, also auf der östlichen Seite der Donau, beträgt die durchschnittliche Tiefe der Grundwässer in der Nähe der Flussbettaufschüttungen sechs bis acht Meter, etwas weiter vier bis fünf Meter. Der Nachschub erfolgt aus Niederschlagswasser oder zum Großteil über die Gewinne zur Zeit von Hochwässern der Donau.

Die Menge des Grundwassers erreicht hier 3-4 l/s.km<sup>2</sup>, entlang der Donau 7 l/s.km<sup>2</sup>. Chemisch gesehen enthält es Kalziumhydrogenkarbonat, während in den tieferen Regionen bereits unter den Kationen das Natrium dominiert. Der Sulfatgehalt beträgt nördlich von Paks 300 mg/l, anderswo 60 mg/l. Vom zwei bis drei Kilometer breiten Streifen von der Donau entfernt beträgt der Salzgehalt 250 mg/l, das Grundwasser ist daher für eine Bewässerung ungeeignet. Sein Härtegrad erreicht 25-35 nk<sup>0</sup>.

Das Material der tiefer, weniger als einhundert Meter dicken, wasserspeichernden Sedimentschicht ist in erster Linie pannonischer Sand. Die Menge des hier lagernden Wassers ist 1-1,5 l/s.km<sup>2</sup>.

Die Brunnen liefern in der Regel eine Wassermenge von 200l/p, aber es besteht ein beträchtlicher Unterschied zwischen den einzelnen Brunnen. Bezüglich der chemischen Zusammensetzung kommen die Typen mit der Zusammensetzung aus Kalzium, Magnesium, Natrium, Wasserstoffkarbonat annähernd gleichmäßig vor, mancherorts aber auch Chloride. In fünfzig Prozent der Fälle ist das Wasser härter als 18 nk<sup>0</sup>, in siebzig Prozent der Fälle enthalten sie mehr als 0,5 mg/l Eisen.

Anders zusammengesetzt sind die Schicht- und Grundwässer im südlichen Mezőföld. Zusammenhängende Grundwasserbestände kommen hier nur in den Tälern zwischen den Lössrücken vor, sowie südwestlich von Paks in der sich verbreiternden, höher gelegenen Hochwasserzone. Hier befindet sich das Grundwasser in zwei bis drei Metern Tiefe, während es sich unter den Lössrücken – wenn überhaupt vorhanden – in einer Tiefe von acht bis zehn Metern befindet, in den Hochuferbereichen der Donau sogar in einer Tiefe von 25 bis dreißig Metern.

Die Menge kann im Schnitt auf 1,5-2 l/s.km<sup>2</sup> geschätzt werden, es ist zu achtzig Prozent kalzium-, magnesium- und wasserstoffkarbonathältig. In abgeschlosseneren Zonen kann auch Natrium auftreten. Damit geht auch ihr hoher Härtegrad – 25-35 nk<sup>0</sup> – einher.

Die Tiefe der Schichtwässer lagernden pannonischen Sandschichten erreicht auch hier hundert Meter. Die Menge der Schichtwässer wird auf 1 l/s.km<sup>2</sup> geschätzt. Die spezifische Wassermenge der Brunnen macht 100 l/p.m aus. Chemisch gesehen sind sie kalzium-, magnesium- und wasserstoffkarbonathältig, ihr Härtegrad erreicht 18 nk<sup>0</sup>. Ihr Eisengehalt übersteigt fünfzig Prozent, erreicht in der Hälfte sogar 2 mg/l.

### **Aggressivität und Zusammensetzung der unterirdischen Gewässer**

Die Grundwässer im Bereich des AKW sind aus den weitreichenden Wasserproben der geländemechanischen Vermessung zur Zeit der Vorbereitung des AKW-Baus bzw. dank der zur Beobachtung des Grundwassers gebauten Beobachtungsbrunnen bekannt. Im späteren wurden vor der Ausführung der geplanten Ausbauarbeiten ebenfalls im Rahmen der geotechnischen Vermessungsarbeiten zahlreiche Wasserproben gezogen.

Im überwiegenden Teil der Untersuchungen wurden entsprechen den diesbezüglichen technische Bestimmungen der Kalzium-, Magnesium, Natrium-, Kalium-, Ammonium-, Nitrat-, Laugen-, Wasserstoffkarbonat-, Chlorid-, Sulfatgehalt, der pH-Wert, freies und kalkaggressives Kohlendioxid bzw. der gelöste Sauerstoffgehalt bestimmt. Die Qualität des Schichtwassers ist aus den Probeentnahmen der Schichten zwischen fünfzig und zweihundert Meter bekannt (KÖJÁL).

Der Chloridgehalt steigt mit der Tiefe an. Gemäß den Untersuchungen ist im Bereich Paks und beim Kraftwerk weder im Grundwasser noch im aus den pannonischen Schichten stammenden Schichtwasser eine Chloridanomalie auszuweisen. Ein Hochströmen von Salzwasser ist damit im Großraum nicht zu erwarten.

### **Grundwasserqualität der Schotterschichten aus dem Pleistozän**

Aufgrund der Untersuchungen der im Rahmen der geländemechanischen Vermessungen entnommenen Wasserproben ist, abgesehen von lokalen kleineren Abweichungen, im wesentlichen als einheitlich zu erachten.

- pH leicht basisch, zwischen 7,0 und 8,01, charakteristisch zwischen 7,5 und 7,9,
- Anteil der gelösten Stoffe niedrig oder mittel, zwischen 270-926 mg/l, charakteristisch zwischen 300-400 mg/l,
- Gesamthärtegrad 11,8-43,2 nk<sup>0</sup>, im Schnitt 15-25 nk<sup>0</sup>
- Natrium 1-104 mg/l,
- Kalium 0-19 mg/l,
- Kalzium 55,7-145,3 mg/l,
- Eisen 0,17-10 mg/l, im Schnitt 0,5-1,0 mg/l,
- Mangan 0,3-1,9 mg/l, im Schnitt 0,3-0,8 mg/l,
- Ammonium 0-14 mg/l, im Schnitt 0,1-0,3 mg/l,
- Nitrat 0-125 mg/l,
- Chlorid 3,2-70 mg/l charakteristisch 20-30 mg/l,
- Sulfat 10-400 mg/l, charakteristisch 100-150 mg/l,
- Wasserstoffkarbonat 229,9-495 mg/l,
- Freies Kohlendioxid 20-108 mg/l, charakteristisch 40 mg/l,
- kalkaggressives CO<sub>2</sub> 0,0 mg/l,
- Gelöster Sauerstoff 0-2,5 mg/l

Das Grundwasser des Pleistozäns ist bezüglich von Eisenbeton- und Betonstrukturen nicht aggressiv.

Das Wasser einiger Beobachtungsbrunnen zeigt sich bei Verwendung von Strukturstoffen mit Zementbindung leicht aggressiv. Es zeigt sich gegen Eisen im Falle eines pH-Wertes von <7,6, - da keine kalkaggressive Kohle-säure vorhanden ist – leicht aggressiv. Aufgrund der Messungen ist mit einer Sulfataggressivität des Grundwas-sers nicht zu rechnen.

### **Wasserqualität der Schichtgewässer in den pannonischen Schichten**

Die Qualität dieser Schichtgewässer ist aus den Wasserqualitätsuntersuchungen der Wasserbrunnen im Kataster 64 und 65 bei Csámpa bekannt. Die in geringerer Tiefe gefilterten Gewässer von Brunnen 64 enthält wenig ge-löste Stoffe von Magnesium, Kalzium und Wasserstoffkarbonaten, Chlorid-Ionkonzentration gering, Sulfat nur in Spuren feststellbar.

- pH 7,8,
- Kalzium 5,71 mg/l,
- Magnesium 60,8 mg/l
- Eisen 1,58 mg/l,
- Mangan 0, 05 mg/l,

- Nitrat in Spuren
- Chlorid 15,5 mg/l,
- Sulfat in Spuren,
- Wasserstoffkarbonat 164,7 mg/l,
- freies Kohlendioxid 8,31 mg/l,
- kalkaggressive CO<sub>2</sub> 0,0 mg/l,
- Gelöster Sauerstoff 0, 0 mg/l

Das Wasser aus den pannonischen Schichten in einer Tiefe von 149-211 Meter des Brunnens 65 enthält bereits mehr gelöste Stoffe, ist natrium-wasserstoffkarbonathaltig. Die Chloridkonzentration ist zwölfmal so hoch, die Wasserstoffkarbonatkonzentration mehr als das vierfache von Brunnen 64.

- pH 7,9,
- Kalzium 28,6 mg/l,
- Magnesium 10,9 mg/l
- Eisen 5,7 mg/l,
- Mangan 0, 15 mg/l,
- Nitrat 0,0 mg/l,
- Chlorid 188,5 mg/l,
- Sulfat 0,0 mg/l,
- Wasserstoffkarbonat 720,0 mg/l,
- freies Kohlendioxid 0,0 mg/l,
- kalkaggressives CO<sub>2</sub> 0,0 mg/l,
- Gelöster Sauerstoff 2, 01 mg/l

## 6.2. Wasserverwendung und Wasserbasen

Die Verwendung des Wassers geschieht in der mittelbaren und unmittelbaren Umgebung des Kraftwerkes in erster Linie durch die Trinkwassergewinnung aus Filterbrunnen entlang des Donauufers. Das der Oberfläche am nächsten liegende Grundwasser wird nur von den in den Höfen der Häuser und in den Gärten von Privatpersonen gebohrten Brunnen mit einer Tiefe von 20 bis 25 Meter Tiefe genutzt. Die in unmittelbarer Nähe befindlichen Wasserwerke sind auf der Abbildung 39 ersichtlich. (Die Wasserwerke größerer Kapazität reichen bis in die Schichtwässer hinunter).

Die Filterwasserbasen am linken Donauufer unter dem Kraftwerk sind die folgenden; in Betrieb: Kalocsa – Baráka, Stadt Baja, Dunafalva, Pécs –Mohács, Wasserbasen in Zukunft: Bática-Nord, Bática-Fajsz-Dusnok, Sükösd-Nord, Leneskert, Insel Bezerédi, Újmohács-Süd.

Abbildung 40: Skizze der Wasserentnahmemöglichkeiten



Die im Betrieb befindlichen und potenziellen Wasserentnahmestellen sind in Tabelle 2 angeführt:

Folyópart	Vizbázis neve	flum	Fedő vastagság [m]	Vizadó vastagság [m]	Vizadó fekü [m]	Potenciális hozam [1000 m <sup>3</sup> /nap]
Bal	Kalocsa-Baráka	1521-1524	3-5	20-40	35-40	45
Bal	Baja	1480-1484	2-6	30-45	30-50	40
Bal	Szeremle-E	1474-1477	5-8		25-35	50-100
Bal	Szeremle-D	1465-1468	4-7		20-30	200
Bal	Pécsi-Mohácsi regionális	1449-1463	5-10	15-30	25-35	150
Bal	Homorud	-1447	5-12		25-35	
Jobb	Gerjen-E	1516-1523	5-10	25	25-45	40
Jobb	Dombori	1507-1512	5-20	35-40	25-55	52
Jobb	Bogyviszló	1500-1506	5-20	20-40	25-55	60
Jobb	Gerebec	1489-1493	15-25	15-30	30-55	36
Jobb	Koppány	1480-1487	15-25	20-25	30-50	42
Jobb	Cimerfok	1469-1475	15-25	15-20	30-40	36
Jobb	Bata	1465-1467	5-15	10-15	15-30	36
Jobb	Kolked	1438-1446	5-10	20-25	30-40	25
Jobb	Erdőfü	1433-1436	5-10	25	30-40	25

Die Gesamtkapazität der in Betrieb befindlichen Wasserbasen macht 83.000 m<sup>3</sup>/Tag aus, die geschätzte Leistung aller geplanten Wasserbasen in Zukunft macht 140.000 m<sup>3</sup>/Tag aus. Die zum Kraftwerk am nächsten befindliche Basis ist Kalocsa-Baráka, die sich ca. drei bis sechs Kilometer vom Einlass des Warmwasserkanals befindet (Wasserbasis bei Laufkilometer 1420,5-1523, Warmwasserkanaleinlass bei 1526,160). Diese Wasserbasis sichert das Wasserversorgungsnetz der Wasserwerke der Kleinregion Kalocsa und der angeschlossenen fünfzehn Gemeinden.

Größter Industrieabnehmer in der unmittelbaren Umgebung ist das AKW Paks. Die Quelle der folgenden Wassersysteme ist unterirdisches Wasser: Im Falle des Trinkwassers sind dies die Brunnen von Csámpa, im Falle von Nutz- und Löschwasser die Brunnenanlage am Ufer.

### Verwendung der unterirdischen Gewässer im Bereich des Kraftwerks

#### *Paks*

In Paks hat sich der Wasserverbrauch der Bevölkerung seit 1995 nicht viel verändert und schwankt zwischen 572-578 Tausend m<sup>3</sup>. Dies entspricht einem Wasserverbrauch von 10m<sup>3</sup>/Jahr pro Person bzw. entspricht einem spezifischen Wasserverbrauch von 28-29l/Person/Tag.

Die totale der Stadt zur Verfügung gestellte Wassermenge ist zwischen 1995 und 1998 von 992.000 m<sup>3</sup> auf 895.000 m<sup>3</sup> zurückgegangen, was einen Rückgang von zehn Prozent innerhalb von drei Jahren bedeutet. Dies ist in erster Linie mit dem Rückgang des Verbrauchs von Wasser für den wirtschaftlichen Bereich zu erklären.

Das am südlichen Ende der Stadt befindliche Wasserwerk hat eine tägliche Wasserproduktionskapazität von 11.000 m<sup>3</sup>, was den täglichen Wassergebrauch der Stadt von 7.800 m<sup>3</sup> um vierzig Prozent übertrifft. Dem AKW dient – als größtem Wasserverbraucher – eine eigene Infrastruktur, darüber hinaus liefert auch das im Außenbereich von Paks befindliche Wasserwerk von Felső-Csámpa dem Kraftwerk Wasser.

Die größten kommerziellen VerbraucherInnen der Stadt zur Zeit der Wende – das AKW nicht gerechnet – waren die Staatswirtschaft Paks, die Konservenfabrik Paks und die landwirtschaftliche Produktionsgenossenschaft "Dunamente". Davon sind heute nur (zum Teil) die LPG geblieben, die sich mit Viehzucht, Landwirtschaft, Weinbau und Wein beschäftigt, darüber hinaus gibt es noch in den Außenbezirken von Paks die Weinkellerei bei

Biritó, bei Gyapa die GYAFIK-Betriebe. Innerhalb der Stadt gehören das Strandbad und die Schwimmhalle zu den größten Verbrauchern. Der Jahreswasserverbrauch der größten Verbraucher außer der Bevölkerung macht 320-360.000 m<sup>3</sup> aus.

#### *Dunaszentbenedek*

Der jährliche Wasserverbrauch betrug in Dunaszentbenedek noch Anfang der neunziger Jahre wesentlich mehr als 30.000 m<sup>3</sup>. Der Rückgang der Bevölkerungszahl, aber noch eher ein Anheben der Wassergebühren ließen diese Menge 1995 auf 28.000m<sup>3</sup> 1997 auf 27.000 m<sup>3</sup> zurückgehen, was sich auch 1998 nicht änderte. Dies entspricht einem Wasserverbrauch von 28,5m<sup>3</sup>/Jahr pro Person bzw. entspricht einem spezifischen Wasserverbrauch von 77,1l/Person/Tag. Zu dieser Menge kommen noch 14-18.000 m<sup>3</sup> Wasser für Bewässerung, das aus anderen Quellen, in erster Linie gebohrten Brunnen kommt, gegrabene Brunnen kommen in der Siedlung nur mehr selten vor, sie wurden schon Anfang der achtziger Jahre stillgelegt.

Die größte kommerzielle Verbraucherin ist die LPG "Neuer Morgen", die die Felder von Dunaszentbenedek und Gederlak bebaut. Der Wasserverbrauch der örtlichem LPG, die sich mit Viehzucht – Rinder und Schweinen – beschäftigt von vier- bis fünftausend m<sup>3</sup> wird durch zwei Wassertürme südöstlich der Gemeinde gesichert.

Die Gemeinde mit Trinkwasser versorgenden Wasserwerke befinden sich in der Hand der Kalocsavíz, 19 Gemeinden der östlichen Hälfte des Komitats Bács-Kiskun – darunter Dunaszentbenedek, Géderlal und Úszód – sind von einem eigenen Wassersystem versorgt. Zu dieser Gesellschaft gehört das 3,5 Kilometer südöstlich von Úszód errichtete Wasserwerk Baráka mit einer Kapazität von 16.400 m<sup>3</sup>, dessen zwölf Brunnen u.a. auch Dunaszentbenedek mit Wasser versorgen. Das hier gewonnene Wasser wird zuerst vom Eisen und Mangan befreit, danach in die örtlichen Netze eingespeist.

#### *Dunaszentgyörgy*

Der jährliche Wasserverbrauch des jährlichen Wasserverbrauchs zeigt einen erheblichen Rückgang. Vom jährlichen Wasserverbrauch im Jahr 1995 in der Höhe von 87.000 m<sup>3</sup>, ging dieser a1996 auf 61.000 m<sup>3</sup>, 1997 auf 59.000 m<sup>3</sup> zurück, was einem Rückgang von 33 Prozent bedeutet. Dies heißt, dass der spezifische Wasserverbrauch des Jahres 1995 von 31,7 m<sup>3</sup>/Bewohner auf 21,7 m<sup>3</sup>/Bewohner im Jahr 1997 zurückgegangen ist. Die Bevölkerung nutzt noch weitere – geschätzte – 30 bis 40.000 m<sup>3</sup> Wasser (zum Teil aus gebohrten Brunnen) für die Bewässerung. Die ausgehobenen Brunnen sind für die Bewässerung unbedeutend.

Größte örtliche Verbraucherin ist die örtliche LPG. Der geschätzte jährliche Wasserverbrauch der sich mit Viehzucht beschäftigenden LPG beträgt 8 bis 9.000 m<sup>3</sup>. Der Wasserturm befindet westlich der Ortschaft.

Das kommunale Wasserwerk befindet sich im Ort, Besitzerin ist die lokale Selbstverwaltung, Verwalterin die Wasserwerke "Tolna" mit Sitz in Tolna. Die Kapazität des Werkes, das sich westlich der Ortschaft befindet ist 800 m<sup>3</sup>/Tag. An die Brunnen ist eine Anlage zur Arsenklärung angeschlossen, um das Arsen aus dem aus 150 Meter Tiefe gewonnen Wasser zu neutralisieren.

#### *Géderlak*

Der Wasserverbrauch der letzten Jahre ist in den letzten Jahren mit 32-34.000 m<sup>3</sup> stabil geblieben. Dementsprechend ist der jährliche pro Kopfverbrauch nur ein wenig zurückgegangen (1995: 29,8 m<sup>3</sup>/ Person; 1997: 28,9 m<sup>3</sup>/Person). Auf den täglichen Wasserverbrauch umgelegt, heißt das, dass ein/e BürgerIn von Géderlak täglich 79-81 Liter Wasser konsumiert. Aufgrund von Schätzungen stammen weitere 10-12.000 m<sup>3</sup> aus gebohrten Brunnen – für Bewässerungszwecke.

Die größte kommerzielle Verbraucherin ist die LPG "Neuer Morgen", deren Rinderzucht jährlich 4 bis 5.000 m<sup>3</sup> Wasser verbraucht. Der Kreis der Landwirte verbraucht 1-1,5.000 m<sup>3</sup>.

Die Wasserwerke die Géderlak versorgen ist die KALOCSAVÍZ in Kalocsa, die hier ein mit dem Netz von Dunaszentbenedek vergleichbares Netz aufgebaut hat – nähere Angabe siehe dort.

*Uszód*

Der Wasserverbrauch der Bevölkerung von Uszód zeigte bereits Anfang der neunziger Jahre Werte weit über 40.000 m<sup>3</sup>, wonach aber die Bevölkerungszahlen zurückgingen. 1997 und 1998 verbrauchte die Gemeinde 37.000 m<sup>3</sup> Wasser aus der Leitung, was einem Wasserverbrauch von 32,8 m<sup>3</sup>/Person – umgerechnet auf den Tag 89,9 l/Person – gleichkommt. Dazu kommen noch weitere 16-18.000 m<sup>3</sup> Wasser für die Bewässerung, das in erster Linie aus Brunnen gewonnen wird. Gegrabene Brunnen werden in der Gemeinde nicht mehr verwendet.

Größte Wasserverbraucherin vor Ort ist die LPG "Zusammenhalt", die im östlichen Teil der Ortschaft einen Wasserturm unterhält. Für die Tränkung des Viehbestandes werden im Jahr so 6-7.000 m<sup>3</sup> Wasser verwendet. Die örtlichen Landwirte konsumieren geschätzt noch weitere 3-4.000 m<sup>3</sup> Wasser,

Die Wasserwerke die Géderlak versorgen ist die KALOCSAVÍZ in Kalocsa, die hier ein mit dem Netz von Dunaszentbenedek vergleichbares Netz aufgebaut hat – nähere Angabe siehe dort.

Die Wasserverbrauchszahlen der Bevölkerung im fünf bis sechs Kilometerumkreis des AKW gibt Tabelle 3 an.

**Tabelle 3. Wasserverbrauch der Bevölkerung im Umkreis des AKW Paks, 1997**

Siedlung	Bevölkerung 1997	Leitungswasser für Bevölkerung, 1000 m <sup>3</sup>			Leitungswasser- verbrauch/Kopf m <sup>3</sup> /Jahr
		1995	1996	1997	
Paks	21.022	574	578	572	27,2
Dunaszentbenedek	959	28	29	27	28,1
Dunaszentgyörgy	2.709	87	61	59	21,7
Géderlak	1.105	34	34	32	28,9
Uszód	1.227	41	39	37	32,8
Summe	29.019	764	741	727	25,0

### **6.3. Die im ersten Halbjahr 2003 bewertbaren Ergebnisse des "Monitoring-subprogramms über die Möglichkeiten der Verwendung der unterirdischen Gewässer im Rahmen des Standortcharakterisierungsprogramms bezüglich des umweltschützerischen, standortrechtlichen und wasserrechtlichen Genehmigungsverfahrens"**

#### *Überblick über und Ziel des Ausbaus des 2002 geschaffenen Umweltschutz-Monitoringsystems*

Das am Ufer gefilterte Wasser besteht aus der Mischung des zu einem größeren Teil aus dem Wasser der Donau, bestehenden, zu einem geringeren Teil aus dem Hintergrundwasser bestehenden Wassermenge. Die Qualität des Wassers steht im ursächlichen Zusammenhang mit der Qualität des Flusswassers und dem Wasserstand des Flusses. Der Strömungsraum zwischen Wasserfluss und den wasserspendenden Schichten ist mikrobiologisch aktiv, sein wichtigster Abschnitt ist die Grenze der Sedimentoberfläche. Zur Herausbildung dieser Oberflächje bedarf es eines langanhaltenden Gleichgewichts. Was die chemische Zusammensetzung betrifft, sind bei dem Uferfiltersystem die Filter zahlreiche feste Bestandteile, zum Beispiel Tonminerale, Eisen-, Mangan und Aluminiumhydroxide – organische Stoffe wiederum können die unter der Wasseroberfläche dissoziierten und nicht dissoziierten Bestandteile binden.

Ein vollausgebauter Abschnitt besteht aus zwei am linken und rechten Ufer installierten Abschnitten. Die beiden Halbabschnitte sind nicht zwingendermaßen gegenüber aufgebaut. Ein Halbabschnitt besteht so aus im Wellenbereich installierten vertikalen oder horizontalen Sonden und aus – etwas weiter aufgebauten - Beobachtungsbrunnen. Die horizontale Sonde dient in 2,5 Meter Tiefe unter dem Donaubeet der Beobachtung der wasserchemischen und mikrobiologischen Auswirkungen unter dem Wärmeschweif bzw. jener, die zwischen Wärmeschweif und Ufer ablaufen.

Die vertikale Sonde nimmt die mikrobiologischen und wasserchemischen Wechselwirkungen zwischen dem Donauufer und dem unmittelbar dahinter befindlichen Grundwasser im Hintergrund wahr.

### **Prinzipien der Installierung der vertikalen Sonden**

Die Installierung der vertikalen Sondenpaare (Abbildung 40) wurde davon bestimmt, dass die Nachschubbedingungen für den das Grundwasser aufnehmenden Bestand ungleich den höher oder tiefer gelegenen Schichten sind.

Der poröse Sand nahe der Oberfläche erhält den Wassernachschub unmittelbar aus dem Bett der Donau, womit die "Filterdauer" der so nachkommenden Wasserteilchen sich reduziert und damit zu erwarten ist, dass sich auf diesem Niveau die Auswirkungen, die sich aus der biologischen Aktivität und aus der organischen Verschmutzung ergeben, d.h. die natürlichen Umstände der Auswirkung des Donauwassers, stärker zeigen. Die "seichteren" vertikalen Sonden wurden bis zu einer Tiefe von zehn bis fünfzehn Meter installiert.

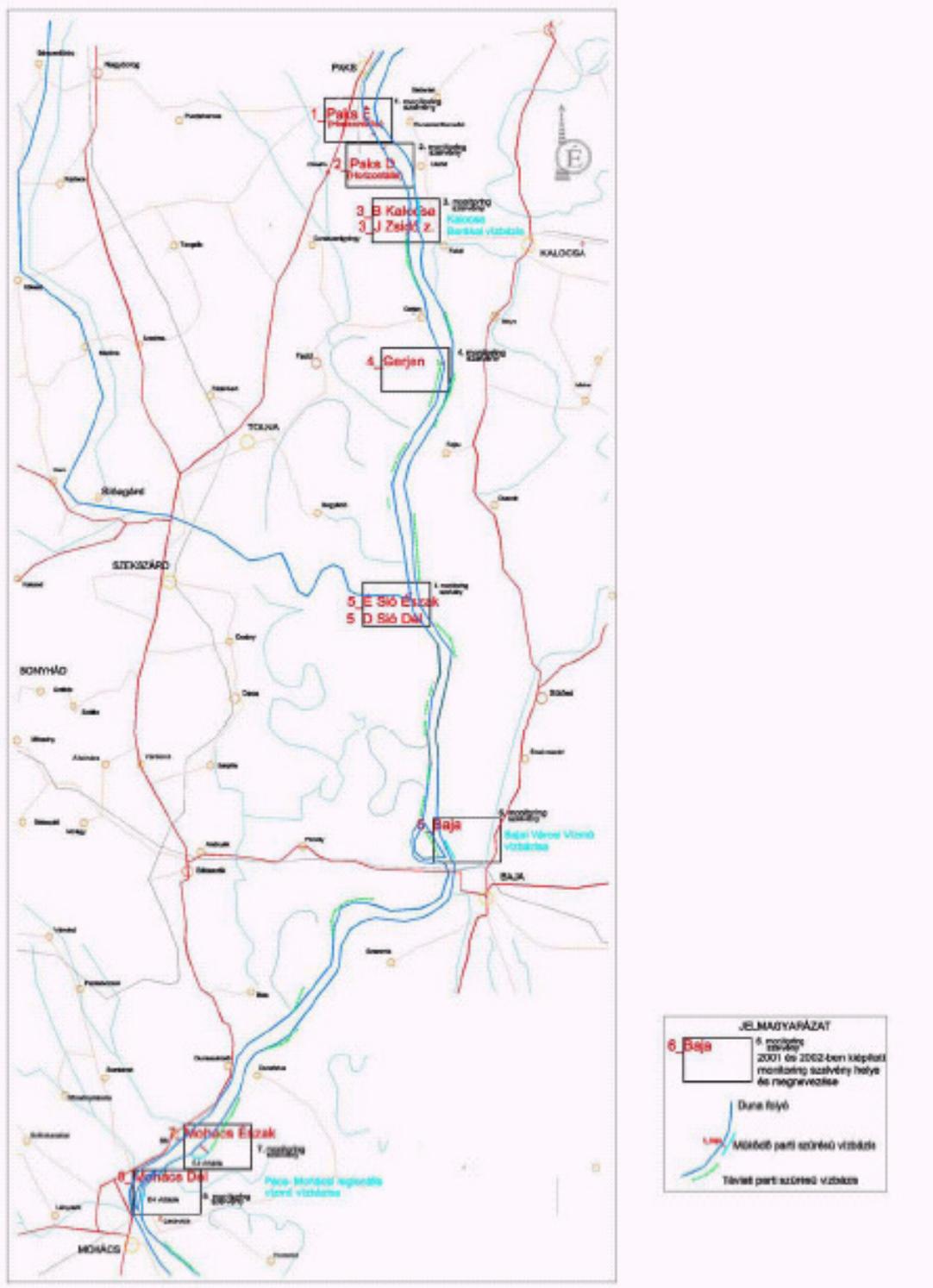
Unmittelbar daneben wurden die "tieferen" vertikalen Sonden installiert, dessen Sohlentiefe bei 25 bis 28 Meter liegen.

Diese Tiefe sichert, dass die tieferen Sonden die physikochemischen und mikrobiologischen Umstände des wasserlagernden alluvialen Bestandes aus porösem Sandschotter wahrnehmen. In diesem Tiefenbereich geschieht der Wassernachschub von der Uferlinie entfernend aus der Hauptströmung des Bettes heraus. Mit der Installierung der vertikalen Sonden werden die einzelnen Tiefenniveaus analysierbar und damit auch die Veränderungen im Bereich der Wasserqualität der Flussbettabschnitte in einer Entfernung zum Ufer.

Im Zuge der Untersuchungen der Auswirkungen der Erwärmung des Wärmeschweifs auf das Wasser der Donau, bei der Analyse der bestehenden und potenziellen Auswirkungen auf die Uferwasserfilteranlagen wurden damit drei Grundsituationen mithilfe des installierten Monitoringsystems untersucht: der von der Wasserbasis unmittelbar beeinflusste Flutraum (Wasserbasis Baja), der von der Wasserbasis mittelbar beeinflusste Flutraum (Kallocsa-Baráka, Mohács, Insel Mohács), sowie der natürliche Zustand (an den Stellen der potenziellen Wasserbasen am rechten Donauufer).

Bei der Untersuchung der Mündung der Sió wurden nördlich und südlich natürliche Zustände registriert, bei denen bereits die Einflüsse anderer Oberflächengewässer (Sió-Kanal) wirksam werden.

Abbildung 41: Übersichtsdarstellung der Monitoringprofile



### *Kreis der durchgeführten Wasseruntersuchungen*

- Wasserchemische Untersuchungen (Zahl der 2002 durchgeführten Untersuchungen: 74)
- Wassertoxikologische und mikroskopische biologische Untersuchungen (Zahl der 2002 durchgeführten Untersuchungen: 66+53)
- Tritiumuntersuchungen (Zahl der 2002 durchgeführten Untersuchungen: 12)
- Die Untersuchungen wurden von der wasserchemischen und hydrobiologischen Abteilung des "Zentralen umweltanalytischen Labors" des "III. Instituts für Wasserqualitätsschutz" der VITUKI AG ausgeführt.
- Bakteriologische Untersuchungen (Zahl der 2002 durchgeführten Untersuchungen: 43)
- Die Untersuchungen wurden "Umweltmikrobiologischen Labor" des "Biologielabors für öffentlichen Gesundheitsschutz" des staatlichen amtärztlichen Dienstes (ÁNTSZ) durchgeführt.

Die chemischen Untersuchungen der Wasserproben vor Ort wurden von der Firma Kék Csermély ausgeführt. [12]

### **Bewertung der Ergebnisse**

#### Zusammenfassende Bewertung der Untersuchungen zur Wasserqualität

Die Ergebnisse zusammenfassend ist festzustellen, dass das Wasser der meisten Flussbettsonden, Brunnen und Beobachtungsbrunnen qualitativ eher geringer Qualität ist oder qualitativ nicht entspricht – in erster Linie wegen seines hohen Mangan- Ammonium- und Nitritgehalts. In einigen Fällen ist auch ein hoher Nitratgehalt feststellbar, was vorherige Behauptung nur stützt.

Bei den anderen Faktoren, bei KOI und Nitrit, die eine organische Verschmutzung signalisieren, sowie bei den anderen Komponenten, die im Bezug auf die Wasserqualität keine Grenzwert verfügen, wurden keine hervorsteckend hohen Werte gefunden.

Im besonderen muss auf die hohe Menge von Eisen- und Manganionen aufmerksam gemacht werden (ganz besonders letztere Zahl), weshalb die meisten untersuchten Wasserproben in die Qualitätsklasse III bis V (MSZ – Ungarische Industrienorm 12749:1994) gehören. Demgegenüber stieg der Manganwert im Jahr 2004 ein wenig an, an einigen Stellen wurde sogar ein herausragender Wert gemessen, was Wasserqualitätsklasse V bedeutet.

#### Zusammenfassende Bewertung der ökotoxikologischen Untersuchungen

Gemäß den gültigen MSZ EN ISO Normen kann untersuchtes Wasser nicht beanstandet werden, wenn in diesem der Exitus der Tiere nicht fünfzig Prozent überschreitet, bei Trinkwasser liegt dieser Wert bei zehn Prozent, was an der Fehlergrenze liegt.

Die Ergebnisse der auf unterschiedliche Weise gewonnenen Wasserproben vergleichend, kann festgestellt werden, dass in den Gewässern mit den horizontalen Sondern (Paks, Kalt- und Warmwasserkanal, Donauwasser Baja) und in den vertikalen Sonden die Mortalität der Tiere sehr gering war, in vielen Fällen war gar keine feststellbar, aber dieser Wert veränderte sich maximal zwischen drei und sieben Prozent, was auch nach Trinkwassernorm nicht zu beanstanden ist. Im Jahr 2004 war die Mortalität der Tiere höher als im Vorjahr, mehrere Male wurde eine Rate von dreißig bis vierzig Prozent festgestellt. Im Raum Kalocsa war die Mortalitätsrate im August 53 Prozent, was bereits zu beanstanden ist.

In den Beobachtungs- und Produktionsbrunnen ist demgegenüber eine höhere Mortalität zwischen drei und vierzig Prozent feststellbar. Dies ist zwar noch immer nicht zu beanstanden, doch zeigt dies bereits die Anwesenheit von verseuchten, eventuell leichten Giftstoffen im Wasser.

Aufgrund des Vergleichs mit den Ergebnissen der im Vorjahr durchgeführten toxikologischen Untersuchungen ist feststellbar, dass 2004 in den vertikalen Flussbettsonden besonders im Sommer (Juni-August) und im Herbst (Oktober, November) die Mortalität der Versuchstiere höher lag. Im Raum Paks, weiters in den Produktionsbrunnen (Raum Baja) hat sich aber das Maß der Mortalität gleichzeitig praktisch nicht verändert. Die andere Beobachtung ist noch, dass das oben erwähnte Ausmaß der Mortalität der Tiere im Wasser jener Brunnen höher liegt, in denen viel braunfärbiger, wahrscheinlich Eisen- oder Manganhydroxid-Niederschlag zu finden ist.

### Zusammenfassende Bewertung der mikroskopischen biologischen Untersuchungen

Für die artenmäßige Zusammensetzung des Phytoplanktonbestandes der Donau ist die Dominanz der Kieselalgen charakteristisch, in den Nieder- und Warmwasserperioden steigt neben den Kieselalgen auch die Einzelzahl der Grünalgen, die aber nicht dominant werden. Die Präsenz von Blaualgenarten ist nachweisbar, deren Einzelzahl ist aber in diesem Donauabschnitt unbedeutend.

Allgemein kann festgestellt werden, dass die Zahl der Algen in den verschiedenen Wasserproben im Vergleich zu Donau außergewöhnlich gering war, sie betrug lediglich 0,1 bis ein Prozent. Die festgestellten Arten gehören zu den dominierenden Arten der Donau. Das meiste Wasser entspricht demnach den Trinkwasserkriterien.

Die in einzelnen horizontalen und vertikalen Sonden, in den Beobachtungs- und Produktionsbrunnen gefundenen große Mengen an organischen Stoffe, an Bakterienkulturen und Fadenbakterien, Eisen- und Manganhydroxid-Niederschläge macht aber darauf aufmerksam, dass die Effizienz der Filterschichten nicht entsprechend ist. Die Absonderung des Eisen- und Manganhydroxids ist mit der Veränderung der Sauerstoffsituation des Wassers erklärbar (Veränderungen der aerob-anaerob-Situation). Es wäre angebracht in Hinkunft, die möglichen Gründe dafür weiter zu untersuchen.

### Zusammenfassende Bewertung der bakteriologischen Untersuchungen

Aus bakteriologischer Sicht zeigt die Donau jährlich einen Wandel. Aus dem Vergleich der Daten im Untersuchungszeitraum geht hervor, dass sowohl positive als auch negative Abweichungen vorkommen: Die heterotrophen Kolonienzahlen waren 2003 höher, während die ENDO-Zahl, die das Niveau der kommunalen Verschmutzungen angibt, wiederum 2002 höhere Werte zeigte.

Wenn man die Zahlen der Ergebnisse der 2004 durchgeführten Untersuchungen mit jenen der früheren Jahren vergleicht, ist feststellbar, dass im Fall der meisten Flussbettsonden und Beobachtungsbrunnen der bakteriologische Zustand des Wassers aufgrund der untersuchten Parameter sich in einem kleineren oder größeren Ausmaß verschlechtert hat, eine Verbesserung oder ein gleichwertiger Zustand nur bei einem kleinen Teil festgestellt werden kann.

### Ergebnisse der Tritiumuntersuchungen

Aus den Tritiumuntersuchungen können folgenden allgemeine Zusammenhänge abgeleitet werden:

- Der Tritiumwert der aus den horizontalen Flussbettsonden gewonnen Wässer ist niedriger als jener der Donau. (Diese Tatsache belegt den laufenden hydraulischen Kontakt zwischen den Hintergrundgewässern und dem lebendigen Gewässer der Donau, das Verhältnis der gemessenen Werte wiederum verweist auf Strömungsrichtung und -ausmaß.)
- Die saisonalen Veränderungen der Größenordnung der von den horizontalen Flussbettsonden gemessenen Tritiumwerte sind direkt proportional zur Tritiumkonzentration der Donau und den Veränderungen der Druckwellen.
- Im Falle der vertikalen Flussbettsonden ist der in tieferen Schichten gemessene Tritiumgehalt geringer als jener, der in den höheren Sandschichten gemessen wird. Dies verweist auf einen Unterschied zwischen der hydraulischen Flussbettverbindung des Schotterschicht und der sie abdeckenden Feinsandschicht. Bei operierenden Wasserwerken kann sich dieser Unterschied zum Teil ausgleichen.
- Bei einem Flussströmungsbild, dass nicht von Wasserwerken beeinflusst wird, ist der Tritiumgehalt der Beobachtungsbrunnen für die Hintergrundgewässer in jedem Fall geringer. Unterschiede zeigen sich in den einzelnen Uferabschnitten – eine Erklärung dafür könnte die Lage des Wärmeschweifs und die Veränderung der Werte des von diesem transportierten Tritiums, die Hauptströmungslinie der Donau sowie der Zustand des untersuchten Uferabschnittes (ausgewaschen, aufgefüllt, hohl/konkav), weiters die Auswirkungen der Hintergrundgewässer oder deren hydraulische Verbindung mit der Donau sein.

## 6.4. Untersuchung der hydrologischen Umgebung des Kraftwerkes mit einem Modell

Zur Modellierung der Umgebung des Kraftwerkes kam das Programmpaket Visual MODFLOW zur Anwendung. Das Paket besteht aus vier eigenständigen Programmen, die Visual MODFLOW miteinander verbindet:

1. MODFLOW, dient der Ausarbeitung eines Strömungsmodells,
2. MODPATH, berechnet Teilchenverläufe, Geschwindigkeiten, Erreichzeiten aufgrund des mit MODFLOW erstellten Strömungsmodell
3. ZONEBUD Berechnung des Wasserhaushalts
4. MT3D, Transportkode, das aufgrund des Strömungsmodells, die Ausbreitung der in den Boden geratenden Schadstoffe berechnet (Materialtransport)

### MODFLOW

Mithilfe von MODFLOW kann für das gegebene Gebiet ein dreidimensionales hydrologisches Modell erstellt werden. Die Bewegung des Grundwassers im porösen Material kann mit einer partialen Differentialgleichung dreidimensional beschrieben werden, dessen analytische Lösung nur in Ausnahmefällen möglich ist, bzw. wofür man eine numerische Annäherung anwenden kann. MODFLOW rechnet mit der sog. Methode des Enddifferentials: Es löst die Differentialgleichungen in einem aufgrund einer der Landkarte des Gebietes und der hydrologischen Abschnitte geschriebenen dreidimensionalen Netz in der Mitte der einzelnen Zellen numerisch auf und verwendet dafür die einkommenden Daten als Initial- und Grenzbedingungen. Als Ergebnis der Berechnungen erhalten wir die räumliche Anordnung der piezometrischen Linien des Gebietes, die räumliche Verteilung der Wassergeschwindigkeiten (nach Richtung und Größe). Eine feinere Aufteilung hat eine feinere Annäherung zur Folge, die Auflösung wird allein vom Speicherplatz des Rechners und der Rechenzeit beschränkt.

Mithilfe von MODFLOW ist eine Simulation ausführbar, die statisch (steady state) ist oder den Zeitfaktor in Rechnung stellt. Für das statische Modell bedarf es einer einzigen Datenreihe, dieser Ausgangspunkt wird in der Folge als ständig erachtet und die Strömungsverhältnisse dementsprechend dargestellt. Das transiente Modell berücksichtigt die im Bereich geschehenen Veränderungen. In diesem Fall erhalten wir eine sich verändernde piezometrische Landkarte. Im Fall beider Modelltypen vergleicht das Modell die in den Beobachtungsbrunnen gemessenen Wasserstandswerte mit den berechneten Daten, womit wir die Richtigkeit des Modells überprüfen können.

### MODPATH

Das Programm berechnet Teilchenverläufe, Geschwindigkeiten, Erreichzeiten aufgrund des mit MODFLOW erstellten Strömungsmodells. Der Geschwindigkeitsvektor der Teilchen steht quer zu den piezometrischen Linien, die Höhe der Geschwindigkeit wird von der Differenz des hydraulischen Potentials bestimmt. Mit ihrer Hilfe kann festgestellt werden, wo sich eine in einem gegebenen Zeitpunkt an einem gegebenen Ort zu findende konservative Verschmutzung nach einer gewissen Zeit befinden wird, wohin sie fließt, und wieviel Zeit sie braucht, damit sie eine gewisse Distanz erreicht. Oder umgekehrt. Woher sie gekommen sein könnte und wie viel Zeit sie gebraucht hat, um an die gegebene Stelle zu kommen. Das Programm braucht außer den Daten des Programms MODFLOW keine anderen Daten, es ist nur festzulegen, wo sich diese Teilchen befinden, deren Bewegungen zu verfolgen sind.

### ZONEBUD

Dient der Berechnung vom Wasserhaushalt. Berechnet für das ganze Modell, einzelne Schichten oder markierte Zonen die Menge des einlangenden und ausgehenden Wassers, womit kontrolliert werden kann, ob aus der Sicht des Gleichgewichts (des Wasserhaushalts) bei der Ausarbeitung des Strömungsmodells die Grenzbedingungen (Niederschlag, Verdunstung, Produktionsbrunnen, Wasser von Flüsse und Seen) richtig angegeben worden sind.

Zum Paket Visual MODFLOW sind auch weitere Programme hinzuzufügen, darunter auch der dreidimensionale Transportkode MT3D.

### MT3D

Reaktiver Transportkode, organisch mit MODFLOW verbunden, nur mit diesem Programm gemeinsam zu benutzen. Das Programm dient der Simulation der Advektion und Sorption von Verschmutzungen, die in das Grundwasser gelangt sind und der Bindung, die im Gefolge der chemischen Reaktionen erfolgt. Bei der Berechnung der Ausbreitung der Verschmutzung ist auch der radioaktive Zerfall bzw. die Biodegradation in Rechnung stellbar.

Notwendige Eingangsdaten:

1. Anfängliche Verschmutzungskonzentration, kann in verschiedenen Bereichen des Untersuchungsgebietes unterschiedlich sein.
2. Später hinzugefügte oder laufen hineinratende Konzentration, kann mit der ständigen Konzentration, Niederschlägen hinzukommende Verschmutzung sein, Verdichtung durch Verdunstung, können getrennt und zusammen auftreten, kann in den verschiedenen Teilbereichen unterschiedlich sein.
3. Gesteinsdichte in den einzelnen Schichten
4. Kennzahl für Sorption, bei radioaktiven und biologischen Schadstoffen, Zerfallkonstanten
5. Longitudinale, transversale und vertikale Dispersionsfaktoren, Diffusionskonstanten bezüglich der einzelnen Schichten
6. Die in den Beobachtungsbrunnen gemessene Schadstoffkonzentration, die nicht für das Programm selbst, sondern für die Kontrolle dient.

As Programm arbeitet je nach Wahl mit linearer oder nicht-linearer Sorption. Sofern annehmbar ist, dass die Menge des gebundenen Material direkt proportional zur Konzentration des im Wasser gelösten Materials ist, kann mit einer linearen Sorption gerechnet werden (dünne Lösungen). Bei den nichtlinearen Annäherungen nimmt die Freundlich-Isotherme eine exponentielle Verbindung zwischen der Menge des gebundenen und gelösten Materials an, während die Langmuir-Isotherme in Achtung stellt, dass ein Gestein über eine gewisse Menge hinausgehend nicht mehr Stoffe binden kann. Dies ist bei dichten Lösungen von Bedeutung, bei dünnen Lösungen fällt sie mit der linearen Annäherung zusammen.

Mittels MT3D können statische und transiente Simulationen durchgeführt werden. Für ein transientes Modell können auch hier verschiedene Eingabeparameter bezüglich der einander folgenden Stressperioden eingegeben werden, allein die Perioden müssen den in MODFLOW eingegebenen Zeiten entsprechen. Sofern wir das Ganze als transientes Modell laufen lassen, wird das Programm die Verbreitung der Schadstoffe nur für den geprüften Zeitraum anzeigen. Im Falle eines statischen Modells ist eine Schätzung bezüglich der weiteren Ausdehnung und Verbreitung der Schadstoffe möglich.

## **Die Adaptierung von Visual MODFLOW für die hydrologische Umgebung des Atomkraftwerks**

### *Voraussetzungen*

Erster Schritt bei der Ausarbeitung des Modells war die Herstellung eines dreidimensionalen Netzes aufgrund einer digitalen Landkarte des Kraftwerks und seiner Umgebung und der von den Beobachtungsbrunnen begrenzten Schichten. Die räumliche Ausbreitung des Modells beträgt nach den lokalen Koordinaten -400-4600 in OW-Richtung und 10.500-14.000 in NS-Richtung. Dies wurde in 35 Zeilen x 50 Spalten umfassendes Netz platziert, welches in der Umgebung des Kraftwerkes in einer Auflösung von 50 x 50 Meter noch weiter verfeinert wurde. Für eine genaue Beschreibung der Oberflächen der einzelnen Schichten standen keine ausreichenden Daten zur Verfügung, womit als Annäherung die Ausarbeitung von Ebeneabgrenzungen und geschätzte durchschnittliche Schichtdicken erfolgte. Die Wasserstandswerte der Beobachtungsbrunnen standen seit 1984 zur Verfügung, daraus konnte festgestellt werden, dass der Wasserstand des Grundwassers nirgends die Höhe von 92 Meter baltischer Seehöhe erreicht hatte. Da MODFLOW "trockene" Schichten in seine Berechnungen nicht einbeziehen kann, wurde die Oberfläche damit mit 92 Meter baltischer Seehöhe angesetzt. Aus den von den einzelnen Brunnen begrenzten Schichtdicken ist festzustellen, dass sich die Dicke der obersten Sandschicht zwischen acht und fünfzehn Meter bewegt, eine durchschnittliche Dicke von zwölf Meter also. Dementsprechend war der Boden der Sandschicht im Modell bei 85 Meter baltischer Seehöhe anzusetzen (zwölf Meter ab wirklicher Oberfläche berechnet, ab 97,15 Meter baltischer Seehöhe). Unter ähnlichen Gesichtspunkten wurde der Boden der Schotter-sandschicht bei 78,5 Meter baltischer Seehöhe, die Schotter-schicht bei 57 baltischer Seehöhe angesetzt. Der Brunnen R-63 begrenzte zwischen 63 und 57 baltischer Seehöhe die Gesteinsmehlschicht, darunter befindet sich wieder eine Sandschicht. Der zirka 250 Meter neben Brunnen R-63 befindliche Brunnen R-64 durchquert keinen

Ton, womit sich die wasserundurchlässige Schicht hier tiefer befindet. Aufgrund der Wasserstandsmessungen ist ersichtlich, dass die in Brunnen R-63 gemessenen Pegelstände wesentlich höher sind als die im Brunnen R-64 gemessenen, ja sie übersteigen sogar den Wasserstand der Donau. Der Wasserstand dieses Brunnens wird nicht vom Grundwasser, sondern vom Druck des Schichtwassers unter der Tonschicht bestimmt. Ältere  $\delta^{18}$ -Messungen haben bereits darauf verwiesen, dass es in diesem Bereich beträchtliche Aufströmungen des Schichtwassers gibt. Deshalb erschien es gerechtfertigt, innerhalb der Tonschicht einen laufenden Mangel anzunehmen und dies auch im Modell zu berücksichtigen. Entsprechend den Informationen liegt die wasserabschließende Schicht unterhalb der KKÁT-Deponie zirka zehn Meter tiefer als anderswo, womit diese Tiefe 47 baltischer Seehöhe als untere Grenze des Modells festgelegt wurde.

Die hydraulische Leitfähigkeit der einzelnen Schichten ( $K_{x,y,z}$ ) und die Porosität (n) wurde aus den zur Verfügung stehenden Daten, die spezifische Lagerfähigkeit ( $S_s$ ) und die spezifische Durchlassfähigkeit ( $S_y$ ) aus einer Tabelle übernommen. Demzufolge gelangten folgende Daten zur Eingabe.

**Tabelle 4: Eingabedaten des Modells**

<b>Baltische Höhe</b>	<b>Mitteltypus</b>	<b><math>K_x(K_y)</math> m/s</b>	<b><math>K_z</math> m/s</b>	<b><math>S_s</math> 1/m</b>	<b><math>S_y</math> -</b>	<b>N -</b>
92-85	Sand	$10^{-5}$	$10^{-6}$	0,005	0,25	0,35
85-80	Schottersand	$8 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$	0,0005	0,2	0,3
80-78,5	Schottersand	$8 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$	0,0005	0,2	0,3
78,5-57	Schotter	0,001	0,001	0,0001	0,15	0,25
57-54,5	Ton	$10^{-8}$	$10^{-9}$	0,1	0,05	0,45
54,5-47	Sand	$10^{-5}$	$10^{-6}$	0,005	0,25	0,35

### Grenzbedingungen

Das Beziehungswasserniveau für die Schichten 1 bis 4 wurde mithilfe von SURFER ermittelt. Aufgrund der Vorstudien kann festgelegt werden, wo diese Bezugsebene platziert werden kann (wo sich das Niveau nicht mehr beträchtlich ändert. Hier wurde von den Daten des Brunnens R-63 ausgegangen. Bei den Untersuchungen wird klar ersichtlich, dass die im Brunnen gemessenen Pegelstände – trotz der Entfernung von der Donau und der Tiefe des Brunnens – überraschenderweise dem Wasserstand der Donau gut folgen, aber diesen in der Regel um drei Meter überschreiten. Deshalb wurde dieser Pegel als Bezugspegel gesetzt.

Die Berechnungen haben ergeben, dass die Strömungsverhältnisse der Gegend stark von der Donau, dem Kaltwasserkanal, den Fischteichen und dem Kondorsee beeinflusst werden. Bei der Erstellung des transienten Modells wurde der einige Zeit lang wahrgenommene Wasserstand der Donau und des Kaltwasserkanals berücksichtigt, der Pegel der Fischteiche ist immer gleich, 90,2 baltischer Seehöhe, der des Kondorsees ebenfalls, 90,3 baltischer Seehöhe. Bei der Erstellung des statischen Modells der Schadstoffausbreitung wurde der im allgemeinen charakteristische mittlere Pegelstand als Grundlage genommen. Donaubecken 79 baltischer Seehöhe, neben dem Kaltwasserkanal 81 baltischer Seehöhe, Becken der Fischteiche 98,4 baltischer Seehöhe.

Auch die im Bereich stehenden Gebäude sollten Berücksichtigung finden. Wie sich herausstellte beeinflussen die Gebäude die Strömungsverhältnisse nicht nachhaltig. Sehr stark ist hingegen die Wirkung der Fischteiche und des Kaltwasserkanals.

Bei der Erstellung des Modells wurden auch die wichtigsten Ergebnisse einer Vierteljahresmessung der Beobachtungsbrunnen verwendet. Aus den zu einem Zeitpunkt gehörenden Messdatenreihen wurden mithilfe von SURFER die piezometrischen Linien berechnet und diese mit der von MODFLOW berechneten piezometrischen Landkarte verglichen. Brunnen befinden sich nur an wenigen Stellen des modellierten Bereiches, deshalb konnten die SURFER-Landkarten nur für einen kleinen Bereich des modellierten Bereiches (für die unmittelbare Umgebung des Kraftwerkes) gezeichnet werden, aber selbst in diesen Bereichen bedurfte es noch einer Extrapo-

lation, weil es zum Beispiel im Bereich der Fischteiche keine Beobachtungsbrunnen gibt. Deshalb können nur jener Teil der mit MODFLOW erstellten piezometrischen Landkarten mit den SURFER-Landkarten verglichen werden, die sich auf den unmittelbaren Bereich des Kraftwerkes beziehen.

(...)

#### Literaturverzeichnis

- [1] A Paksi Atomerőmű földrengésbiztonsága (Die Erdbebensicherheit des AKW Paks), Hg.: Marosi Sándor – Meskó Attila – Akadémiai Kiadó, 1997.
- [2] VVER 440-213 Seismic Hazard Re-evaluation, PHARE Project No.:4.2.1, Ove Arup, Contract No 94-06000
- [3] Site Investigation of Site Response and Liquefaction Potential, Interpretative Report, Ove Arup & Partners, London, October 1995.
- [4] Site Investigation of Site Response and Liquefaction Potential, Final Report, ISMES, Bergamo, August 1995.
- [5] Earthquake Hazard Assessment at Paks NPP Site, GeoRisk Kft., Budapest, 2001.
- [6] Környezetvédelmi-, telephely- és vízjogi engedélyezési kérdésekhez kapcsolódó telephely-jellemzési vizsgálat. Monitoring rendszer a Paksi Atomerőmű hűtőrendszerének a Duna vizére és a parti szűrésű vízbázisokra gyakorolt környezeti hatása ellenőrzésére. ETV-ERŐTERV Rt., 0000K00ERA00014, 1999. december (Untersuchung zur Standortcharakterisierung im Zusammenhang mit einem umweltschützerischen, standortrechtlichen und wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren)
- [7] Bács-Kiskun és Tolna megye statisztikai évkönyvei (Statistische Jahrbücher der Komitate Bács-Kiskun und Tolna), KSH (Statistisches Zentralamt), Bp. 1998.
- [8] A Paksi Atomerőmű tervezett üzemidő-hosszabbítására vonatkozó Részletes Környezeti Hatástanulmányt (RKHT) előkészítő földtani, szeizmotektonikai és geotechnikai értékelés (Kutatási jelentés), II. kötet, A tíz éve folyó mikroszeizmikus monitorozás eredményeinek szeizmológiai értékelése és a neotektonikai modell megújítása, GeoRisk Földrengéskutató Intézet Kft., 2005. november – Geologische, seismotektonische und geotechnische vorbereitende Bewertung für die Vorstudie zur Umweltverträglichkeitsprüfung im Zusammenhang mit der geplanten Betriebszeitverlängerung des AKW Paks (Forschungsbericht) Band II: Erneuerung der seismologischen Bewertung und des neotektonischen Modells im Rahmen der Ergebnisse des zehnjährigen mikroseismischen Monitoring – GeoRisk Erdbebenforschungsinstitut – November 2005
- [9] A Paksi Atomerőmű tervezett üzemidő-hosszabbítására vonatkozó Részletes Környezeti Hatástanulmányt (RKHT) előkészítő földtani, szeizmotektonikai és geotechnikai értékelés (Kutatási jelentés), III. kötet, A telephely mérnökgeológiai adatainak összefoglalása, geotechnikai értékelés, GeoRisk Földrengéskutató Intézet Kft. 2005. november – Geologische, seismotektonische und geotechnische vorbereitende Bewertung für die Vorstudie zur Umweltverträglichkeitsprüfung im Zusammenhang mit der geplanten Betriebszeitverlängerung des AKW Paks (Forschungsbericht) Band III: Zusammenfassung der ingenieursgeologischen Daten der Betriebsstätte, geotechnische Bewertung – GeoRisk Erdbebenforschungsinstitut – November 2005
- [10] A Paksi Atomerőmű tervezett üzemidő-hosszabbítására vonatkozó Részletes Környezeti Hatástanulmányt (RKHT) előkészítő földtani, szeizmotektonikai és geotechnikai értékelés (Kutatási jelentés). I. kötet, 3D földtani-hidrogeológiai modell készítése a Paksi Atomerőmű környezetére, Geomega Földtani és Környezetvédelmi Kutató-Szolgáltató Kft., 2005. november Geologische, seismotektonische und geotechnische vorbereitende Bewertung für die Vorstudie zur Umweltverträglichkeitsprüfung im Zusammenhang mit der geplanten Betriebszeitverlängerung des AKW Paks (Forschungsbericht) Band I: Anfertigung eines geologisch-hydrogeologischen 3-D-Modells für die Umgebung des AKW Paks; Geomega Forschungsdienst für Geologie und Umweltschutz GmbH. – November 2005

[11] Paksi Atomerőmű 1-4. blokk. A Paksi Atomerőmű élettartam hosszabbításának és teljesítménynövelésének környezetvédelmi és vízjogi engedélyezéséhez kapcsolódó telephely jellemzési program. Jelentés a Paksi Atomerőmű telephely-jellemzési programjának keretében a tágabb környezetre vonatkozó hidrogeológiai modell elkészítéséről, ETV-ERŐTERV Rt., 0000K00ERA00058/A, 2005. augusztus – AKW Paks. Block 1-4. Programm zur Charakterisierung der Betriebsstätte im Zusammenhang mit der umweltschützerisch und wasserrechtlichen Zulassung der Leistungssteigerung und Betriebszeitverlängerung des AKW Paks.

[12] Jelentés a Paksi Atomerőmű telephely-jellemzési programjának keretében elvégzett dunai vízgazdálkodási tevékenység jellemzéséről. Vízbázisvédelem modellezés, elérési idők meghatározása, ETV-ERŐTERV Rt., 0000K00ERA00056/A, 2005. június – Bericht über die Charakterisierung der Wasserbewirtschaftungstätigkeit im Rahmen des Programms zur Charakterisierung der Betriebsstätte des AKW Paks. – Juni 2005