

Statistische Analyse Erdbeben bezogener
hydrogeologischer und geochemischer
Signale
an Beispielen aus der Vrancea-Zone, Kamchatka und
Japan

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
an der Fakultät für Bio- und Geowissenschaften
der
Universität Karlsruhe
genehmigte
Dissertation

von

Jens Hartmann

aus Gross-Umstadt

2001

Danksagung:

Ich danke Frau Prof. Dr. Stüben und Herrn Prof. Dr. Henze für die Vergabe des Themas. Beide haben mir in der Gestaltung des Themas und in der Entwicklung der Theorien freie Hand gelassen.

Der DFG danke ich für die Unterstützung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit durch ein Stipendium im Rahmen des Graduiertenkollegs Naturkatastrophen.

Ein besonderer Dank gilt Dr. Zsolt Berner, der für die Analyse und die Qualität des in dieser Arbeit bearbeiteten chemischen Datensatzes aus der Vrancea-Zone verantwortlich war.

Außerdem möchte ich Frau Dr. Anita Ermini und Herrn Prof. Kenji Notsu danken. Beiden verdanke ich zwei weitere Datensätze (Pinachevo, Kamchatka und Izu Peninsula, Japan). Bei Rückfragen halfen sie mir immer schnell und zuverlässig, auch wenn die Fragen komplizierter waren oder einer Recherche bedurften.

Auch Dr. Heiko Woith vom GFZ Potsdam darf ich hier nicht vergessen. Mit ihm hatte ich zwei wesentliche und fruchtbare Diskussionen über meine Arbeit, die mich motivierten und voranbrachten.

Tomás Fernandez-Steeger hat mir in der Endphase der Arbeit mit seinen kritischen Standpunkten zahlreiche Anregungen gegeben und war mir eine große Stütze.

Zuletzt danke ich meinen Eltern Margrit und Erich Hartmann für die Unterstützung in allen Lebenslagen und allen Zeiten meines Daseins.

Und ohne Dich zu vergessen, danke ich dir Susanne für deine Unterstützung und Hilfestellung, besonders in der heißen Phase der Dissertation.

Bei Fragen zur Arbeit ist der Verfasser Jens Hartmann unter der e-mail:

geo@hattes.de

auch in den nächsten Jahren zu erreichen.

1	EINLEITUNG	3
2	GRUNDLAGEN DER TEHYGGES-PHÄNOMENE.....	5
2.1	VORÜBERLEGUNGEN ZUR ZUSAMMENHANGSANALYSE	5
2.2	MODELLE DER ENTSTEHUNG VON TEHYGGES-PHÄNOMENEN: EINE DISKUSSION	6
2.2.1	„Diffusion-dilitancy“-Modell: Eine mögliche Erklärung praeseismischer Signale.....	8
2.2.2	Mitteltiefe Erdbeben im duktilen Bereich (Tiefe: 70-300 km).....	10
2.2.3	Coseismisches Spannungsmodell von Muir Wood (1994)	10
2.2.4	Fluidbewegung in Deformation ausgesetzten Sedimenten (nach Stephenson, 1994).....	11
2.2.5	Überlagerung von prä- und co-/postseismischen Signalen	11
3	ERDBEBEN BEZOGENE SIGNALE, EINE LITERATURSTUDIE	12
3.1	DIE DATENGRUNDLAGE	12
3.2	AUSWERTUNG DER GESAMMELTEN DATEN	13
4	METHODIK DER ANALYSE.....	18
4.1	DAS HAUPTKONZEPT.....	19
4.2	DIE ZUSAMMENHANGSANALYSE	20
4.2.1	Ansatz I: Die regressive Zusammenhangsanalyse	20
4.2.2	Ansatz II: Signaldefinitionen.....	24
4.3	REDUKTION DER ZU UNTERSUCHENDEN ERDBEBENAKTIVITÄTEN E.....	26
4.4	ANMERKUNGEN ZU DEN STATISTISCHEN VERFAHREN	26
5	DURCHFÜHRUNG DER ANALYSEN.....	28
5.1	ANWENDUNG AUF DIE EINZELNEN DATENSÄTZE.....	28
5.2	DIE PROGRAMME.....	28
6	BESCHREIBUNG DER DATENSÄTZE	30
6.1	VRANCEA, RUMÄNIEN: BOHRUNGEN TURIA UND COVASNA	30
6.1.1	Monitoringstationen.....	30
6.1.2	Geologie und Tektonik:.....	34
6.1.3	Erdbeben und Erdbebenverteilung	34
6.1.4	Die Monitoringzeitreihen.....	36
6.1.5	Vergleich der e- und E-Parameter.....	40
6.2	PENINSULA IZU, JAPAN: KSM-STATION	46
6.2.1	Monitoring-Station.....	46
6.2.2	Geologie und Tektonik.....	46
6.2.3	Erdbeben und ihre Erdbebenverteilung.....	46
6.2.4	Die Monitoringzeitreihen.....	47
6.2.5	Vergleich e-und E-Parameter.....	47
6.3	KAMCHATKA, RUSSLAND: LOKATION PINACHEVO	49

6.3.1	<i>Die Monitoringstationen und die Monitoringzeitreihen:</i>	49
6.3.2	<i>Geologie und Tektonik</i>	51
6.3.3	<i>Erdbeben und ihre Verteilung</i>	51
6.3.4	<i>Vergleich e- und E-Parameter</i>	51
7	GEWÄHLTE PARAMETER UND METHODEN FÜR DIE ANALYSE DER EINZELNEN DATENSÄTZE	53
7.1	VRANCEA, RUMÄNEN	53
7.2	IZU PENINSULA, JAPAN	53
7.3	KAMCHATKA, RUSSLAND	53
8	ERGEBNISSE VRANCEA	54
8.1	DAS HAUPTERGEBNIS.....	54
8.2	TURIA: ERGEBNISSE UND DISKUSSION	60
8.2.1	<i>Parameter $e = M$</i>	61
8.2.2	<i>Parameter $e = M/D_{hypo}$</i>	65
8.2.3	<i>Parameter $e = M/\text{Tiefe}$</i>	73
8.2.4	<i>Parameter $e = \epsilon_{dobro}$</i>	78
8.2.5	<i>Vergleich der einzelnen Parameter</i>	80
8.3	COVASNA: ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	81
8.3.1	<i>Parameter $e = M$</i>	83
8.3.2	<i>Parameter $e = \epsilon_{dobro}$</i>	85
8.3.3	<i>Parameter $e = 10^M / \text{Tiefe}$</i>	87
8.4	ZUSAMMENFASSUNG VRANCEA.....	90
9	KSM-STATION, IZU PENINSULA: ERGEBNISSE UND DISKUSSION	91
10	KAMCHATKA, PINACHEVO: ERGEBNISSE UND DISKUSSION	104
11	POTENTIELLES VORLÄUFERSIGNAL DES KOBE-ERDBEBENS	110
12	ZUSAMMENFASSEND E DISKUSSION DER ERGEBNISSE	112
13	ANHANG	115
13.1	DATEN VRANCEA	115
13.1.1	<i>Rohdaten Turia</i>	115
13.1.2	<i>Rohdaten Covasna</i>	118
13.2	LITERATURSTUDIE	121
13.3	LITERATURVERZEICHNIS:	130
13.4	GLOSSAR: BEGRIFFERLÄUTERUNGEN	136
14	ZUSAMMENFASSUNG	137

1 Einleitung

Hydrogeologisch/geochemische Systeme können sensibel auf Seismik induzierende tektonische Prozesse reagieren. In der Literatur wird dieser Sachverhalt ausführlich dokumentiert (Reviewartikel: THOMAS, 1988; KING, 1986; ROELOFFS, 1988). In den 70er und 80er Jahren hoffte man, dass hydro-/gasgeochemische "Vorläufersignale" einen wichtigen Beitrag für eine zukünftige Erdbebenvorhersagestrategie liefern könnten. Doch ein zuverlässiges Vorhersagemodell konnte bisher nicht etabliert werden. Dies liegt zum einen an der Vielzahl von Variablen, welche im betrachteten, komplexen Wirkungsnetz miteinander verknüpft sind, zum anderen an nicht vollständigen Informationen (Tektonik, Permeabilitäten, Erdbebenkataloge enthalten Erdbeben erst ab einer Mindestmagnitude, u.a.). In der Regel wurde in vergangenen Arbeiten Wert auf die Analyse der Beziehungen zwischen potentiellen hydro-/gasgeochemischen **Signalen** und einzelnen herausragenden Erdbeben gelegt (siehe dazu Kapitel 3, Literaturstudie).

Viele tektonische Ereignisse, z.B. aseismische Bewegungen in Störungssystemen oder Erdbeben, werden oft als diskrete Ereignisse behandelt. Diese Arbeit fasst darüber hinausgehend die tektonischen Prozesse als einen **kontinuierlichen gesamtheitlichen** Prozess in Raum und Zeit auf.

Es wird eine "**tektonische Aktivität**" eingeführt, welche die Erdbebenaktivität für eine abgegrenzte Region innerhalb eines bestimmten Zeitraums repräsentiert. Um die tektonischen Prozesse zu beschreiben, wird die Tektonik vereinfacht durch eine Funktion der seismischen Beobachtungen dargestellt. Das bedeutet, dass Erdbeben nicht als einzelne Ereignisse betrachtet werden.

Wie Abbildung 1 skizziert, lassen sich Erdbeben und die Änderungen der Rahmenbedingungen, welche hydro-/gasgeochemische Signale erzeugen können, gemeinsam auf tektonische Prozesse zurückführen. Wenn sich die Tektonik durch eine Funktion der Erdbebenaktivität darstellen lässt, kann untersucht werden, ob ein Zusammenhang zwischen Erdbebenaktivität und den Signalen besteht. Solche Zusammenhänge werden in dieser Arbeit untersucht.

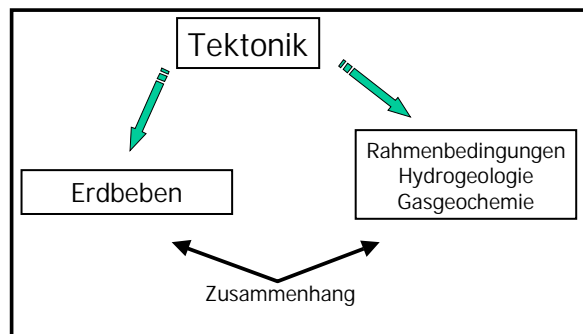


Abbildung 1: Tektonik beeinflusst sowohl die seismischen Aktivitäten als auch die hydrogeologischen /gasgeochemischen Rahmenbedingungen.

Für diesen Ansatz werden folgende Annahmen getroffen:

- Die tektonischen Prozesse können für die hier aufgegriffene Fragestellung als Funktion der seismischen Beobachtungen ausgedrückt werden.
- Der Einfluss aseismischer Prozesse wird vernachlässigt, da zum Zeitpunkt der Arbeit keine Informationen über aseismische Prozesse und deren Auswirkungen vorhanden sind.
- Für gemessene Monitoringparameter¹ gilt: Es existieren physikalische Prozesse, welche über tektonische Mechanismen auf die Monitoringparameter einwirken und so einen Anteil an der Varianz erzeugen:

¹ **Monitoringparameter/-zeitreihe:** gemessene hydrogeologische, hydrochemische oder gasgeochemische Parameter. Erdbeben werden nicht als Monitoringparameter bezeichnet.

1 Einleitung

- Die Wasserchemie in Bohrungen/Quellen wird durch die Mischung verschiedener Aquifere bzw. Wässer unterschiedlicher Genese beeinflusst. Die Mischung wird neben anderen Prozessen auch durch tektonische Prozesse gesteuert.
- Wasserspiegeländerungen in Bohrungen oder Änderungen im Abflussverhalten von Quellen können neben anderen Prozessen auch durch tektonische Prozesse verursacht werden.
- Änderungen in der Gasexhalation der Erdkruste werden neben anderen Prozessen auch durch tektonische Prozesse gesteuert.

Ein vorhandener Zusammenhang zwischen Tektonik und Änderungen im hydrogeologischen/geochemischen System sollte prinzipiell qualitativ nachweisbar sein bzw. quantitativ beschreibbar sein. In dieser Arbeit werden verschiedene Funktionen von Erdbebenaktivitäten definiert, und es wird untersucht, welche am besten mit dem Verhalten von Monitoringzeitreihen in Zusammenhang gebracht werden können. Es werden tektonische Aktivitäten definiert und deren Beitrag an der Varianz von Monitoringzeitreihen untersucht. Dabei werden die Energien und Geometrien der seismischen Aktivität bezüglich der Monitoringstation in die tektonischen Aktivitäten mit einbezogen.

In der Literatur werden tektonisch induzierte Signale von Monitoringparametern oft „anomales Verhalten“ genannt. Hier wird versucht, den Begriff „anomales Verhalten“ nicht zu verwenden, da es sich bei den Ursachen der Änderungen der Rahmenbedingungen in den betrachteten Systemen um Prozesse handelt, welche eng mit der Tektonik zusammenhängen.

Wenn es möglich ist, Zusammenhänge ausreichender Güte zu identifizieren, so wäre dies ein sehr starker Hinweis darauf, dass ein Tekto-hydro-/gas-geologisches System prinzipiell modellierbar ist. Eine Voraussetzung sind ausreichende Daten und die Kenntnis der Rahmenbedingungen. Dass ein solches System modellierbar ist, wird heute nach wie vor angezweifelt (GELLER, 1997; GELLER ET AL., 1997).

Die hydrogeologischen (Wasserstand, Temperatur) und hydro-/gasgeochemischen Phänomene, welche im Zusammenhang mit Erdbeben auftreten, werden im folgenden auch als **tehygges**-Phänomene bezeichnet (**TE**ktionisch-**HY**dro-**GE**ologische-**GE**ochemische-**SE**ismische Phänomene). Diese **tehygges**-Phänomene werden in prä-, co- oder postseismisch unterteilt (siehe dazu Kapitel 2). Dabei ist zu beachten, dass co- und postseismische Signale in der Regel durch denselben Mechanismus verursacht werden und sich somit nicht klar trennen lassen. In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen und essentielle Beobachtungen zur Entstehung von tehygges-Phänomenen erläutert. Sie fließen später in Kapitel 4 in die methodischen Überlegungen der Analyse ein. Zuvor werden in Kapitel 3, beruhend auf zur Zeit verfügbarer Literatur, bestehende Beziehungen zwischen Variablen im **tehygges**-Komplex diskutiert.

In den Kapiteln 8 bis 11 werden an Hand von Datensätzen aus drei unterschiedlichen tektonischen Bezirken prä- bzw. co-/postseismische Zusammenhänge zwischen tektonischen Ereignissen und hydro-/gasgeochemischen Parametern beschrieben. Dazu werden statistische Verfahren und Signaldefinitionen benutzt.

Für die Identifizierung von seismisch relevanten Signalen werden verschiedene Transformationen der Monitoringparameter und Signaldefinitionen eingeführt und deren Relevanz zu den Erdbebenzeitreihen, welche durch Funktionen der Tektonik repräsentiert werden.

Dabei wird untersucht, ob außer zu großen Erdbeben, auch Zusammenhänge zum tektonischen Gesamtprozess und somit auch zu kleineren seismischen Ereignissen existieren.

2 Grundlagen der Tehygges-Phänomene²

2.1 Vorüberlegungen zur Zusammenhangsanalyse

Die Frage nach der Entstehung der **tehygges**-Phänomene² hängt eng mit der Frage zusammen: Was ist ein tektonisch bezogenes Signal und welcher Zusammenhang zwischen Tektonik und Monitoringvariablen soll beschrieben werden?

Ein gemessener Monitoringparameter, der über einen bestimmten Zeitraum gemessen wird, unterliegt in der Regel unterschiedlichen Einflusskomponenten, welche einen Anteil der Varianz der Messreihe erklären.

Messung = Trendkomponente + zyklische Komponente + **tektonisch induzierte Komponente** + barometrische Komponente + stochastische Komponente + andere Komponenten (z.B. Temperatur)

Abbildung 2: Prinzipiell kann eine Monitoringzeitreihe in verschiedene Komponenten unterteilt werden:

Abbildung 2 zeigt die für diese Untersuchung wichtigen Einflusskomponenten.

- Die Trendkomponente wird hier im Sinne eines allgemeinen globalen Trends angeführt.
- Zyklische Komponenten reflektieren unter anderem den Einfluss der Tiden und der Jahreszeiten.
- Die barometrische Komponente (Luftdruck) beeinflusst z.B. die Lösung von Gas im Wasser oder den Wasserstand.
- **Zusätzlich** wird nun eine tektonisch induzierte Komponente eingeführt. Im Verlauf der Arbeit wird untersucht, ob diese identifizierbar ist.

Um eine tektonische Komponente zu identifizieren, wurde in der Vergangenheit oft nach einem „anomalem“ Verhalten der Monitoringparameter im Zusammenhang mit Erdbeben gesucht. Eine Anomalie kann z.B. das Überschreiten eines Vertrauensbereiches sein (z.B. : 2-fache Standardabweichung um den Mittelwert). Bei den meisten publizierten prä- und co-/postseismischen Signalen wurde die Entscheidung, ob ein tektonisch bedingtes „Signal“ vorliegt, nach optischen Kriterien gefällt (Beispiel: HAUSSON & GODDARD, 1981).

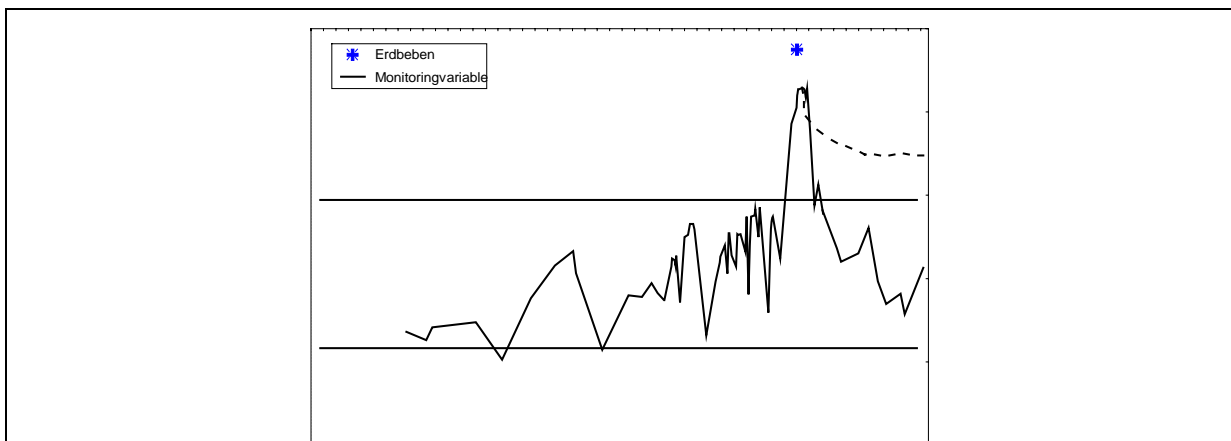


Abbildung 3: In der Grafik ist beispielhaft der Verlauf eines Monitoringparameters mit einem bestimmten Vertrauensbereich dargestellt (horizontale Linien). Der Verlauf wird in Zusammenhang mit einem Erdbeben gebracht. Die gestrichelte Linie stellt alternativ einen asymptotischen Rückgang des Monitoringparameters dar, bei dem das Signal auf einem neuen Niveau „hängen“ bleibt. Auf eine Skala wurde verzichtet, um die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Variablen zu verdeutlichen.

² TEHYGGES-Phänomene: **TE**ktionisch-**HY**dro-**GE**ologische-**GE**ochemische-**SE**ismische Phänomene

Doch welche Kriterien liegen diesen, vorläufig als „Erdbeben bezogenes Signal“ definierten und somit tektonisch induzierten, Verläufen von aufgezeichneten Monitoringparametern zu Grunde? Das aufgezeichnete Signal läuft nach oben oder unten aus einem grafisch (oder auch rechnerisch) bestimmten Vertrauensbereich heraus (vergleiche Abbildung 3). Dieses kehrt dann entweder zu seinem ursprünglichen Niveau relativ rasch (spitzer Verlauf, Beispiel: TOUTAIN ET AL., 1997) oder erst später (asymptotisch, linear, Beispiel: MATSUMOTO, 1992) zurück. Es kann aber auch passieren, dass sich die Signale auf einem neuen Niveau einstellen. Das System stellt sich bedingt durch die starke tektonische Einwirkung neu ein. Die grafischen Vertrauensbereiche werden in der Literatur häufig nicht begründet, doch kann man in Anlehnung an die Chart-Analyse bei Aktienkursen Unterstützungs-Linien einzeichnen und bei Durchbrechen dieser Trend- oder Umhüllungslinien von einem Signal reden.

Zuverlässiger sind die rechnerisch bestimmten Vertrauensbereiche (Beispiel bei KOPYLOVA ET AL., 1994). Da sich ein geologisches System ununterbrochen verändert, führt auch ein rechnerischer Vertrauensbereich langfristig zu Problemen. Es kann zum Beispiel zu Strukturbrüchen in einer Zeitreihe kommen, so dass langfristige Vertrauensbereiche keine Geltung mehr besitzen.

2.2 Modelle der Entstehung von tehygges-Phänomenen: Eine Diskussion

Wie kann die Entstehung der oben erwähnten „Erdbeben bezogenen Signale“ erklärt werden?

Hilfreich für die Vorstellung der ablaufenden Prozesse ist das Speicherkonzept, wie es in der Hydrologie angewandt wird, um die Ankunft eines Niederschlagsignals in einem Einzugsgebiet an einem Messpegel zu modellieren (DYCK & PESCHKE, 1995).

Die beobachteten geochemischen und hydrogeologischen Variablen sind im Boden (Gas), im Wasser (gelöste Spezies) und in der Erdkruste (Wasser, Gas) in Form von „Speichern“ verschiedener Größe, in unterschiedlichen Konzentrationen und Mengen abgebildet. Das Gas kann gelöst im Wasser oder frei im Porenvolumen des Gesteins vorkommen. Chemische Spezies werden gelöst im Wasser gespeichert und ebenso wird das Wasser im Porenraum bzw. Klufthohlraum des Gesteins gespeichert. Diese Speicher besitzen an ihren Rändern Ab- und Zuflüsse. Werden die Rahmenbedingungen dieser „Speicher“ geändert, z.B. durch Änderung der Zu- und Abflüsse oder veränderte Druckbedingungen, kommt es zu Änderungen der Konzentrationen oder Mengen der beobachteten Parameter in den Speichern.

Beispiel für die Entstehung eines tektonisch bedingten Radonsignals:

Radon entsteht durch radioaktiven Zerfall im Gestein. Das Gestein entlässt das Radon allmählich durch Risse (micro cracks). Die Menge des exhalieren Radons hängt von der Anzahl und der Neuentstehung der Mikrorisse und der Neubildungsrate von Radon ab. In Abhängigkeit vom Spannungsumfeld kann sich die Gesamtheit der Risse ändern und dadurch bedingt können auch Wegsamkeiten verändert werden. Auch die Permeabilität wird durch die Änderung des Spannungsumfeldes dynamisch verändert. Dies wurde unter anderem von ZOBACK & BYERLEE (1975) in Laborversuchen gezeigt: Sie setzten verschiedene Gesteine einer verformenden Spannung aus und dokumentierten die sich mit der Spannung ändernden Permeabilitäten. Im Bereich der elastischen Deformation des Gesteins erniedrigte sich die Permeabilität. Mit zunehmender plastischer Deformation nahmen sowohl das Volumen als auch die Permeabilität zu. Ohne dass es zum Bruch des Gesteines kam, verdreifachte sich zwischenzeitlich die Permeabilität. Andere Versuche bestätigen die Ergebnisse von ZOBACK & BYERLEE (BRACE ET AL., 1966 oder JIANG & LI, 1981).

Wenn nun z.B. in einer Bohrung die Radonkonzentration gemessen wird, kann eine Erniedrigung oder Erhöhung der Konzentration in den Speichern durch geänderte Permeabilitäten oder geänderte Randbedingungen, wie durch obige Mechanismen beschrieben, erklärt werden.

Die Permeabilität als hydrogeologischer Parameter wird unter anderem durch die Porosität und die Klüftigkeit des Gesteins bzw. der Sedimente beeinflusst. Die Bewegung des Wassers, und somit die Wanderung von im Wasser gelösten Ionen und Elementen wird in erster Linie durch das hydraulische Potential und die Permeabilität (d.h. die Durchlässigkeit) des Gesteins sowie durch tektonisch und stratigrafisch bedingte Wegsamkeiten bestimmt. Eine Veränderung des hydraulischen Potentials

2 Grundlagen der Tehygges-Phänomene

und/oder der Konzentrationen von Ionen (englisch: mixing aquifers; sich vermischende Aquifere) kann also durch tektonisch bedingte Vorgänge erklärt werden.

Zur Verdeutlichung folgt ein durch BOLOGNESI (1997) dokumentiertes Beispiel für "mixing aquifers" (vermischende Grundwasserkörper) auf der Insel Vulcano, Italien:

Über einen Zeitraum von 2 Jahren hinweg wurden in Abständen von ungefähr zwei Wochen Proben aus einer Bohrung entnommen. Aus Untersuchungen nahegelegener weiterer Bohrungen war bekannt, dass der Wasserkörper der beprobten Bohrung eine Mischung von Wässern mit unterschiedlicher chemischer Signatur war (a: durch den Magmatismus Vulcanos beeinflusstes hydrothermales Wasser und b: oberflächennahes Grundwasser). Diese konnten relativ gut gegeneinander abgegrenzt werden. In der betreffenden Bohrung verhielten sich die hydrochemischen Verhältnisse weitgehend konstant bis auf zwei Zeiträume, in welchen in einer Entfernung von weniger als 30 km Erdbebenschwärme gelöst wurden. Es kam zu einer Verschiebung in den Mischungsverhältnissen der Wasserkörper und somit zu einem anderen Mischungsverhältnis in allen beobachteten Parametern in der Bohrung. Die Veränderung in der Wasserchemie begann jeweils vor den Erdbebenschwämen.

Prozesse, welche die Entstehung tektonisch bedingter Signale (prä- und co-/postseismisch) erklären können, werden in den Kapiteln 2.2.1.–2.2.5. beschrieben.

Um die durch Spannungsänderung hervorgerufenen hydro-/gasgeochemischen Phänomene beobachten zu können, benötigt man eine Quelle oder einen Brunnen, dessen Aquifer sensibel auf Spannungsänderungen reagiert (ROELOFFS, 1988; KÜMPEL, 1992, 1993; GUPTA ET AL., 2000).

Die Ausbreitungen und Eigenschaften der Aquifere bzw. der tektonischen Einheiten haben einen Einfluss auf das Entstehen eines potentiellen Signals bzw. auf die Reichweite des potentiellen Signals. Dies erklärt auch die Dreiecks-Verteilung der Beziehung Magnitude-Entfernung von beobachteten Anomalien (Abbildung 4). Es scheint in Abhängigkeit der gelösten Energie eines Erdbebens (Magnitude) natürliche Obergrenzen für die Reichweite von Vorläufersignalen zu geben (siehe durchgezogene Linie in Abbildung 4).

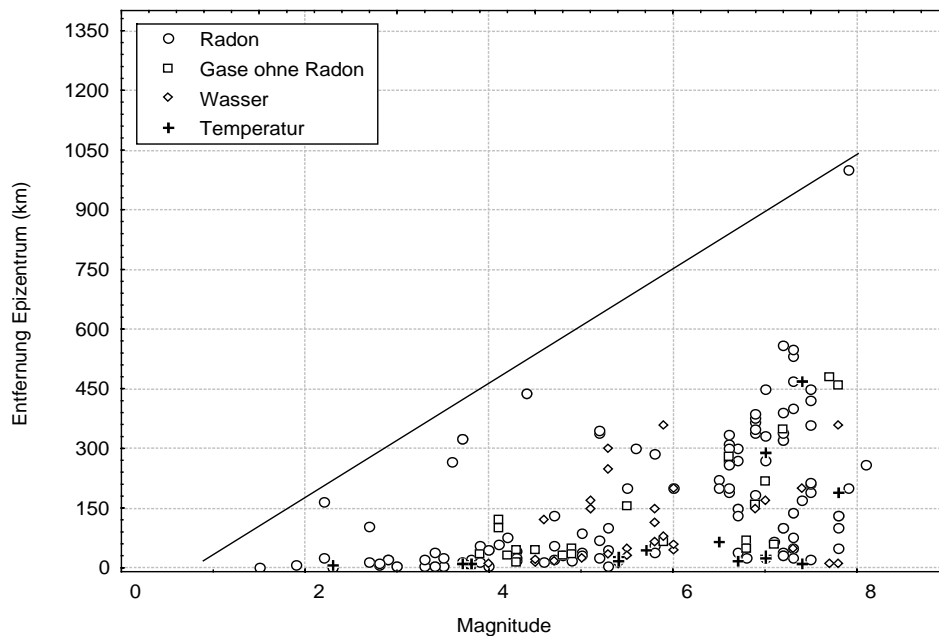


Abbildung 4 zeigt die Beziehung zwischen der Distanz zum Epizentrum beobachteter Erdbeben bezogener Signale und der Magnitude des dazugehörigen Erdbebens. Es sind nur Vorläufersignale dargestellt. Die Daten entstammen der Literaturstudie in Kapitel 3. Die eingezeichnete Gerade grenzt die Verteilung ab. Es existieren keine Beobachtungen oberhalb der Geraden.

KÜMPEL (1992, 1993) und GREKSCH ET AL. (1999) zeigten, dass homogene, lineare Modelle der Erdkruste im allgemeinen für die Simulation der Entstehung von co-/postseismischen **tehygges**-Signalen (im untersuchten Fall Wasserspiegelschwankungen) nicht ausreichen. GREKSCH zeigte in

2 Grundlagen der Tehygges-Phänomene

seiner Arbeit dass die coseismische Antwort von Brunnenspiegeln auf das 1992er Roermond-Erdbeben wesentlich höher ausfiel, als eine Modellierung mit homogenen Bedingungen ergab. Es muss ergänzend gesagt werden, dass die meisten Modelle (z.B. das viel zitierte half-space-Modell von DOBROVOLSKY, 1979, 1989) von einem linearen oder loglinearen Zusammenhang zwischen Erdbebenenergie und Weiterleitung der Effekte, die zu **tehygges**-Phänomenen führen, ausgehen (Vergleiche Abbildung 4). In die benutzten homogenen Modelle fließen keine Informationen über Aquifere, Stratigrafie und kleinere tektonische Einheiten ein.

Um die Bedingungen für die Entstehung der **tehygges**-Phänomene ausreichend beschreiben zu können, werden detaillierte Untergrundmodelle benötigt. Diese liegen in der benötigten Genauigkeit aber meist nicht vor. Ohne diese sind Eigenschaften wie Permeabilität, Porosität, Geometrie der Kluftsysteme, Störungen und Gesteinskonstanten nur grob oder gar nicht zu schätzen. Diese Parameter werden für die Modellierung feinsten Reaktionen des zu betrachtenden Systems benötigt, denn schon eine kleine Schwächezone kann die hydraulischen Eigenschaften einer Region massiv beeinflussen (HIMMELSBACH, 1999). Das ist auch der Grund, warum homogene Modelle die tatsächlichen Abläufe bisher nur ungenügend widerspiegeln.

Auch die Übertragung von Wissen aus Laborversuchen ist wegen des Maßstabeffektes nur bedingt möglich. Die Verteilung von Strukturen, wie tektonische Flächen im großen Maßstab, können im kleinen Labormodell nicht mit einbezogen werden. Die Erkenntnisse aus den Laborversuchen können prozessklärend benutzt werden, aber nicht für präzise Modellierungen. Auftretende Probleme bei solchen Modellierungen werden in der Arbeit von HIMMELSBACH (1999) behandelt.

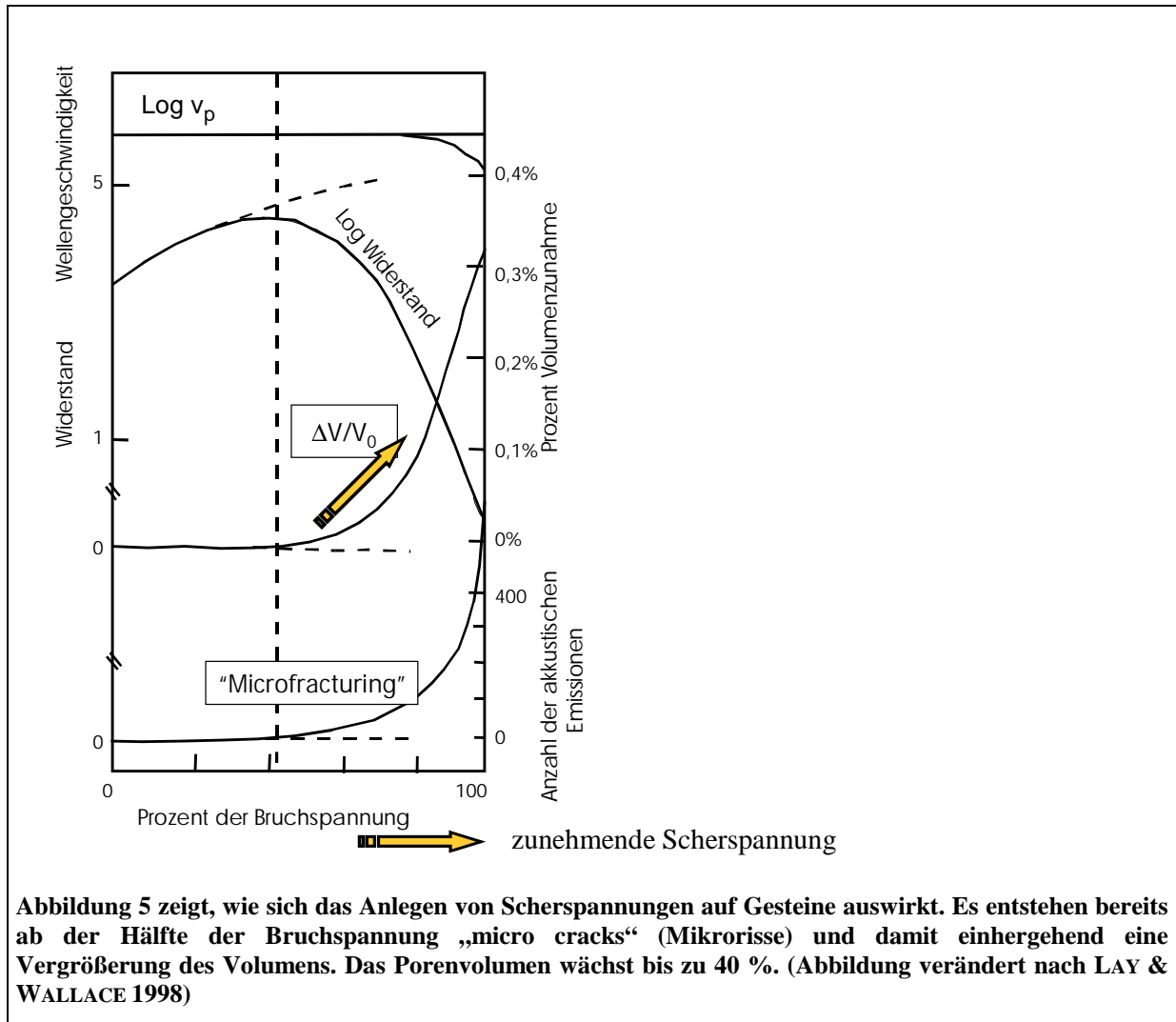
Einen Ausweg bietet hier die statistische Analyse beobachteter **tehygges**-Phänomene, um Beziehungen zwischen einzelnen beobachteten Variablen oder Variabelengruppen zu beschreiben und gegebenenfalls Gebietscharakteristika zu identifizieren.

2.2.1 „Diffusion-dilatancy“-Modell: Eine mögliche Erklärung praeseismischer Signale

Das am häufigsten zitierte Modell für präseismische Signale ist das „diffusion-dilatancy-model“ (NUR ET AL., 1973; ANDERSON ET AL., 1973). Es wurde für kristalline Gesteine konzipiert. Es geht auf die Tatsache ein, dass vor einem Bruch im Gestein sogenannte „microcracks“ (Mikrorisse) entstehen, die zu einer Volumenvergrößerung führen. Die neuen Risse sind zunächst trocken. Wenn die Risse Kontakt zu einem Aquifer erlangen, dringt Wasser in die Risse ein.

Auf Basis dieses Konzepts wird postuliert, dass neue Wegsamkeiten für die Exhalation von Gas aus der Erde entstehen, und zusätzliches Gas (z.B. Radon) durch das Öffnen von „Gasspeichern“ (im Gestein) freigesetzt werden kann. Auch eine Verringerung der Permeabilität entlang der Aufstiegswege ist möglich, wenn sich die Spannung in einem Gebiet nicht soweit aufbaut, dass es zu miteinander verbundenen Mikrorissen kommt. Das ist in angrenzenden Gebieten außerhalb der „diffusion dilatancy“-Zone der Fall (siehe dazu ZOBACK & BYERLEE, 1975). IGARASHI & WAKITA (1990) beobachteten vor Erdbeben eine Zunahme der Radon-Konzentrationen im Wasser eines Brunnens (Izu Peninsula, Japan). Dieser Datensatz wird in Kapitel 10 untersucht. Auch Wasserspiegel-Schwankungen vor Erdbeben wurden mit diesem Modell in Verbindung gebracht (DOBROVOLSKY, 1979; ROELOFFS, 1988), weil durch die Volumenveränderung auch die hydraulischen Eigenschaften des Systems verändert werden. Dieses Modell ist in der Lage, Vorläufersignale zu erklären.

Man wurde auf den Effekt des diffusion-dilatancy aufmerksam, als festgestellt wurde, dass saturierte (Wasser gesättigte) kristalline Gesteine **höhere** seismische Geschwindigkeiten besitzen als untersaturierte. Dies bedeutet, saturierte Gesteine sind scheinbar „härter“ als untersaturierte, da normalerweise in härteren Gesteinen die seismischen Wellen höhere Geschwindigkeiten besitzen. So wurden daraufhin Geschwindigkeitsanomalien vor Erdbeben mit den Erkenntnissen des Phänomens des „dilatancy“ und „dilatancy-hardening“ kristalliner Gesteine unter brucherzeugender Spannung (BRACE et al. 1966) zur diffusion-dilatancy Theorie zusammengefasst. Mittlerweile sind die Erkenntnisse über diese Effekte in Laborexperimenten gesichert.



In der Regel beginnen die ersten dilatancy-Volumenvergrößerungen bereits bei Erreichen der halben Bruchspannung (Abbildung 5). Die Volumenvergrößerung des Gesteins durch Mikrorisse kann über 0,3 %, und die damit einhergehende Vergrößerung des Porenvolumens über 40% betragen. Wenn sich diese Risse öffnen, sind sie noch trocken. Flüssigkeit dringt allmählich in die neugebildeten Risse ein und lässt die Geschwindigkeit der kompressiven Wellen (p-Wellen) wieder ansteigen. Das Gestein wird scheinbar härter (dilatancy-hardening), so dass das charakteristische Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten v_p/v_s (p für Primärwelle = Kompressionswelle, s für Sekundärwelle = Transversalwelle) ebenfalls wieder in Richtung des zuvor beobachteten Wertes wandert (ANDERSON & WHITCOMB, 1973; NUR 1972, 1974). NUR & SIMMONS (1969) zeigten, dass bereits bei geringen Porositätsunterschieden hohe Geschwindigkeitsunterschiede bezüglich Kompressionswellen in saturierten und nicht saturierten Gesteinen zu beobachten sind.

ZOBACK & BYERLEE (1975) bestätigten in Laborversuchen, dass die Permeabilität stark durch Ausweitungs-Mikrorisse verändert werden kann. Die Mikrorisse sind parallel zur Achse der größten Kompression angeordnet.

Die Laborversuche von ZOBACK & BYERLEE (1975) lassen vermuten, dass viele Mikrorisse während der Wachstumsphase isoliert sind, so dass bis zu einem gewissen Punkt keine Permeabilitäts-Erhöhung festzustellen ist.

Das diffusion-dilatancy-Modell bezieht sich auf Bruchzonen tektonischer Erdbeben, nicht auf vulkanische Beben (Tremoring oder andere Phänomene) oder durch Erdfall ausgelöste Erdbeben.

Die hier beschriebenen Mechanismen resultieren aus einer Deformation des Gesteins, welche zum Spröbruch führt. Neben Reibungsgleiten ist der Spröbruch für die typischen krustalen Erdbeben bis zu 70 km Tiefe verantwortlich (GREEN, 2001).

2.2.2 Mitteltiefe Erdbeben im duktilen Bereich (Tiefe: 70-300 km)

Sprödbbruch von Gesteinen findet nur bis zu einer Tiefe von ca. 70 km statt (GREEN, 2001). Der Mechanismus für mitteltiefe Erdbeben bis zu einer Tiefe von 300 km wurde in Laborversuchen am Mineral Serpentin entschlüsselt. Serpentin ist ein typisches krustales Mineral und gelangt über den Subduktionsmechanismus in den Mantel. Ab einem gewissen Druck kommt es zur Entwässerung des Serpentin. Gleichzeitig mit der Entwässerung entstehen durch Brüche und Verschiebungen innerhalb der Kristalle verwerfungsähnliche Defekte innerhalb der Kristalle (engl. faulting). Dieser Mechanismus konnte bis zu Drücken von ca. 10 Gigapascal beobachtet werden (entspricht Drücken in einer Tiefe von 300 km). Im Zusammenhang mit den verwerfungsähnlichen Defekten im Kristall wurden akustische Emissionen ähnlich denen von Flachbeben mit Sprödbbruch aufgezeichnet. Anscheinend können, ungeachtet des hohen hydrostatischen Drucks, die für Sprödbbruch typischen Mikrorisse geöffnet werden (GREEN, 2001). Die beobachteten Mikrorisse öffneten sich parallel zur Kompressionsspannung. GREEN postuliert, dass sich wie bei Flachbeben vor mitteltiefen Erdbeben eine Schwächezone bildet, die, wenn sich die Linsen der Sprödbrüche miteinander verbinden, in eine ein Erdbeben auslösende Verwerfung münden. Diese Verwerfungsflächen können für große Erdbeben rekonstruiert werden.

2.2.3 Coseismisches Spannungsmodell von Muir Wood (1994)

Erläuterung: coseismische Signale werden im folgenden mit den postseismischen Signalen zusammen behandelt, da sie eine gemeinsame Ursache besitzen: Beide werden durch Prozesse verursacht, die mit dem Erdbeben beginnen.

MUIR-WOOD (1994) führt die beobachtete Mobilisierung von Fluiden in verschiedenen Gebieten auf extensionelle und kompressive Tätigkeit von Störungen zurück: Normale und extensionelle Störungen (Abschiebungen) bilden coseismische Kompressionsrisse, Aufschiebungen dagegen erzeugen (englisch: reverse faults) coseismische Weitungsrisse. Abbildung 6 verdeutlicht diesen Vorgang.

Diese Theorie erklärt aber auch erhöhte co-/postseismische Abflüsse für kompressive Tektonik. Intuitiv würde man denken (vergleiche mit Abbildung 6), dass es bei interseismischer kompressiver Tektonik grundsätzlich zu einem Sinken des Wasserspiegels nach dem coseismischen Rückschnellen kommen müsste. Dies ist auch in der Mitte einer betroffenen Störung der Fall. Allerdings entstehen an den blinden Enden von kompressiven Störungen auf Grund der Spannungsgeometrie auch lokal begrenzte coseismische Abflüsse aus der Kruste, weil dort die coseismische Kompression Risse schließt. Durch coseismisches Rückschnellen verursachter erhöhter Abfluss wird seismisches Pumpen genannt (seismic pumping).

MUIR-WOOD & KING (1993) modellierten basierend auf diesem Ansatz den zusätzlichen coseismischen Abfluss für ein Einzugsgebiet mit einer kompressiven Aufschiebung und kamen für ein beobachtetes Erdbeben (1952 in Kern County, Californien) auf gute Übereinstimmungen mit den beobachteten überdurchschnittlichen postseismischen Abflüssen dieses Einzugsgebietes. Für dieses Projekt wurde die Störung auskartiert und die aufgezeichneten Abflüsse der Einzugsgebiete verwendet.

Ihr Modell des „coseismic strains“ (hier ist strain gleichbedeutend mit Spannungsänderung) lässt vermuten, dass es prinzipiell möglich sein sollte, die Menge und Verteilung der Flüssigkeitsabgabe für eine bestimmte Größe, Tiefe und Art einer Störung vorhersagen zu können. Allerdings ist der enge Zusammenhang zwischen Spannungsänderung und Volumen des abgegebenen Wassers nur dann möglich, wenn in der oberen Kruste Risse und Klüfte zusammenhängen, und so die dynamische Porosität des Gesteins widerspiegeln.

Das Modell kann auf verschiedene Störungen angewendet werden (Aufschiebung, Abschiebung, Blattverschiebung). Allerdings könnte es bei nicht intraplatten Erdbeben versagen, weil dort andere Spannungs- und tektonische Bedingungen vorherrschen. Problematisch wird das Modell ebenfalls für Erdbeben, die in einer Tiefe mit duktiler Verformung des Gesteins liegen.

Das Modell von Muir Wood (“coseismic rebound/coseismic pumping”) erklärt coseismische (und postseismische) Signale

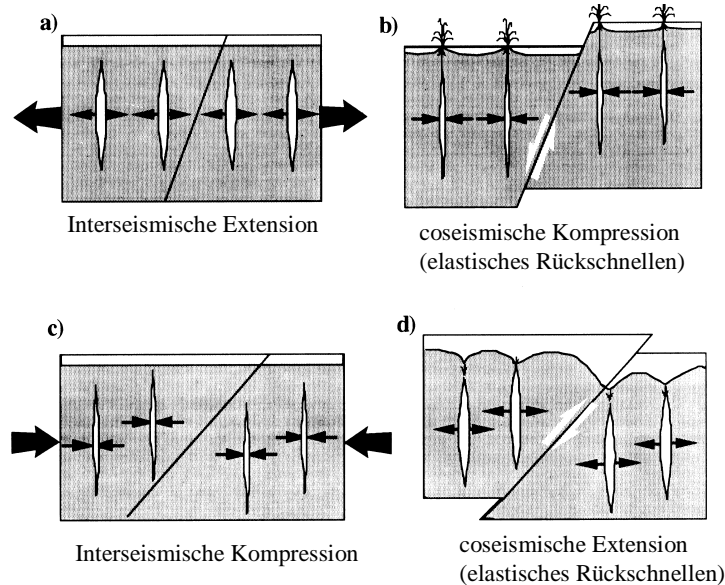


Abbildung 6: Das Verhalten der Kruste vor Erdbeben im interseismischen Zeitraum ist in den Abbildungen (a) und (c) dargestellt. Das coseismische Rückschnellen während der seismischen Aktivität wird in Abbildung (b) und (d) verdeutlicht. Nach dem coseismischen Rückschnellen verändert sich wegen der geänderten Porenvolumina der Wasserspiegel (Modell aus MUIR-WOOD, 1994).

2.2.4 Fluidbewegung in Deformation ausgesetzten Sedimenten (nach Stephenson, 1994)

STEPHENSON (1994) zeigt anhand von Experimenten, dass die Permeabilität (Durchlässigkeit) von Sedimenten stark mit „stress“ (hier: statische Spannung) und „strain“ (hier: verformende Spannung) gekoppelt ist. Außerdem ist für die Permeabilitätsänderung der Anfangszustand des Sedimentes von Bedeutung (Ist das Sediment unterkonsolidiert oder überkonsolidiert? Wie ist die Lagerung? Welche Kornverteilung liegt vor?).

Er nennt die Änderung der Permeabilität in Abhängigkeit von der angelegten Spannung „dynamische Permeabilität“.

Dieses Konzept spielt für die Erklärung von tehygges-Phänomenen in erdbebensensitiven Bohrungen eine Rolle, wenn diese in Sedimenten abgeteuft sind (Siehe Kapitel 6: Beschreibung der untersuchten Monitoringstationen).

Anmerkung: Der Begriff erdbebensensitiv wird für Lokationen verwendet, an denen Tehygges-Phänomene beobachtet werden können, die eng mit dem Erdbebenprozess zusammenhängen, also sensitiv auf erdbebenbezogene Ereignisse reagieren.

2.2.5 Überlagerung von prä- und co-/postseismischen Signalen

Eine seismisch aktive Region ist in der Regel längere Zeit seismisch aktiv. Dies kann zu einer Überlagerung der Signalkomponenten von prä- und co-/postseismischen Prozessen führen. Wenn in einem Modell nur die Seismik als repräsentative Komponente der Tektonik zur Verfügung steht, kann dies zu Problemen bei der Extraktion von Signalkomponenten aus einer Monitoringzeitreihe führen.

3 Erdbeben bezogene Signale, eine Literaturstudie

Eine der wichtigsten Fragen lautet: Sind globale Beziehungen und Gesetze aus bisherigen Beobachtungen ableitbar? Um Antworten auf diese sehr allgemeine Frage zu finden, werden hier 239 potentielle Vorläufersignale von Gasen (Radon, Helium,...), Wasser (Wasserstände, Quellschüttungen) und Temperaturänderungen (Wasser oder Gas) aus der Literatur miteinander verglichen. Elektromagnetische Emissionen und Änderungen des spezifischen Widerstandes des Bodens vor und nach Erdbeben wurden in der Studie nicht berücksichtigt.

SCHOLZ (1977), RIKITAKE (1975), DOBROVOLSKY (1979), HAUSSON (1981), FLEISCHER (1981), TOUTAIN & BAUBRON (1999) stellten für beobachtete Vorläufersignale von Erdbeben log-lineare Zusammenhänge zwischen Magnitude und Vorläuferzeit sowie zwischen Vorläuferzeit und Entfernung und zwischen Magnitude-Entfernung fest (vergleiche Abbildung 7).

Dabei wurde in den meisten Arbeiten, wie in Abbildung 7 gezeigt, von epizentralen Entfernungen zur jeweiligen Beobachtungsstation ausgegangen. Je nach Erdbebenverteilung der Lokalität kann es auch Sinn machen, eine andere geometrische Größe als die epizentrale Entfernung zu wählen (siehe dazu Kapitel 4). Die umfangreichste Studie mit über hundert beobachteten Vorläuferphänomenen ist die Studie von TOUTAIN & BAUBRON (1999). Von diesen über hundert Beobachtungen wurden einige in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt, weil eine Überprüfung der Quellen ergab, dass es sich nicht um eindeutige Vorläufersignale handelt. Oft lag ein potentielles „Signal“ zwischen zwei Erdbeben, oder es gab keine eindeutige Zuordnung zu einem Erdbeben oder es lag keine Definition vor, was ein Erdbeben bezogenes Signal oder ein anomales Verhalten in Bezug auf ein Erdbeben ist. Auch wurde in letzteren Fällen keine grafische Analyse (Chartanalyse) durchgeführt. In der Arbeit von TOUTAIN & BAUBRON (1999) sind die Daten der zusammenfassenden Arbeiten von HAUSSON (1981) und FLEISCHER (1981) enthalten. Zudem sind in der Arbeit von TOUTAIN & BAUBRON (1999) zahlreiche „Vorläufersignale“ doppelt aufgeführt, da sie ohne Überprüfung aus anderen zusammenfassenden Arbeiten übernommen wurden.

Leider wurden in der Regel nur ein oder zwei Beziehungen betrachtet (Magnitude, Vorläuferzeit, Entfernung, u.a.; siehe Kapitel 3.2). Wegen mangelnder Dokumentation der Basisarbeiten ist es in der Regel nicht möglich, nachträglich zusätzliche Beziehungen zu untersuchen.

Es fehlt bislang an einer einheitlichen Systematik für die Dokumentation von tehygges-Beobachtungen. In Kapitel 3.1 wird vorgeschlagen, wie eine solche Systematik aussehen könnte (Tabelle 34). Auf Basis dieser Kriterien wurden die recherchierten tehygges-Phänomene in einer Datenbank eingetragen und ausgewertet.

In manchen Publikationen wurden grafisch identifizierbare Signale willkürlich einem Erdbeben, welches in der Nähe stattfand, zugeordnet. Ist eine eindeutige Zuordnung nicht möglich, weil zum Beispiel ein „anomalies“ Signal vor und nach dem Erdbeben (siehe Beispiel in SHAPIRO ET AL.(1980), Erdbeben vom 20.12.1977, $M = 2,8$) zu sehen ist, dann wird dieses Signal nicht berücksichtigt. Durch nicht präzise Zuordnung von vermeintlichen Vorläufersignalen wird das Rauschen in den zu untersuchenden Relationen größer.

Grundlage der Literaturstudie ist die Erfassung der beobachteten Phänomene in einer Datenbank, die auf eine Basis von über 48 Publikationen zurückgreift (aus 150 untersuchten Publikationen). Es wurde versucht, möglichst auf Originalarbeiten zurückzugreifen, um ein Maximum an Informationen zu erhalten. Insgesamt konnten 239 Erdbeben bezogene Signale identifiziert werden.

3.1 Die Datengrundlage

Im Anhang 13.2. sind die Tabellenstrukturen der benutzten Datenbank erläutert. In dieser Arbeit werden zwei Tabellen benutzt:

- Beschreibung der Erdbeben bezogenen Signale (Tabelle 32 im Anhang)
- Beschreibung der Literaturquellen (Tabelle 33 im Anhang)

Konventionen:

Es gibt bisher keine standardisierten Regeln, wann und wie welche Erdbeben mit „anormalen“ Signalen in Zusammenhang gebracht werden. Deswegen sind die in der Literatur aufgelisteten „Anomalie“-Erdbeben-Beziehungen oft nicht mit Kriterien begründet. Ein erster bekannter Ansatz zur Bestimmung der Eindeutigkeit Erdbeben bezogener Signale stammt von HAUSSON & GODDARD (1981). Ihre Regeln werden in Kapitel 4.2.2. erläutert und kommentiert.

In die Auswertung dieser Literaturstudie wurden nicht alle Erdbeben bezogenen Signale aus der Literatur übernommen. Folgende Bewertungen wurden getroffen:

- **Eindeutigkeit ?**

Es gilt Eindeutigkeit, wenn es kein anderes Erdbeben vor/nach einer betrachteten Anomalie gibt, welches der Anomalie ebenfalls zugeordnet werden könnte. Aus Zeitgründen wurden für diese Unterscheidung nur die Informationen aus den Literaturquellen herangezogen. Auf eine zusätzliche Analyse der Erdbebenkataloge wurde verzichtet, obwohl dies bestimmt sinnvoll wäre, wie die Analysen der Beziehungen zwischen Signal und Erdbebenaktivität in den Kapiteln 9 bis 11 zeigen. Wenn Zweifel bestanden, wurde das Kriterium „eindeutig“ mit nein beantwortet.

- **Liegt ein Kriterium für ein Signal vor ?**

Nach graphischen oder rechnerischen Kriterien sollte eine Anomalie plausibel sein. Wenn ein zitiertes Signal nicht durch ein Kriterium beschreibbar ist, wird die Literaturquelle nicht berücksichtigt. Diese Bewertung ist nicht einfach, denn wie oben erwähnt, wurden selten eindeutige Kriterien in den Arbeiten für die Erdbebenbezogenheit der Anomalien/Signale angewandt. (Wie zum Beispiel eine grafische Analyse: Wird ein Trendkanal durchbrochen? Wird ein Vertrauensbereich überschritten/unterschritten?). Konnte aus den graphischen Verläufen in den Veröffentlichungen ein Kriterium festgelegt werden, wurde das Signal in die Liste aufgenommen. Wenn Zweifel bestanden, wurde das Signal ignoriert. Oft war die Qualität der Graphen in den Veröffentlichungen sehr schlecht.

Ziel einer einheitlichen Datenbank ist die Identifizierung von robusten Merkmalen.

Eine systematische Datenbank könnte folgende weitere Fragestellungen beantworten:

- Gibt es Unterschiede zwischen den Variablen der Vorläufersignale?
- Welche Rolle spielt die Gestalt des Signals (spitzgipfelige Form, sinusartige Form?)
- Verhalten sich Signale in Beziehung zu Intraplattenerdbeben anders als solche in Beziehung zu Subduktionszonen?

3.2 Auswertung der gesammelten Daten

Die Daten der Signale werden im folgenden einer Verteilungsanalyse unterzogen. Eine Faktorenanalyse ist nicht sinnvoll, da es zu viele fehlende Werte gibt. Für die Analysen wurden die Erdbeben bezogenen Signale in 4 Gruppen unterteilt:

- 1.) Radon (es ist das am häufigsten beobachtete Signal)
- 2.) Andere Gase ohne Radon (Helium, Argon, Wasserstoff)
- 3.) Wasser (Wasserspiegelschwankungen, Änderungen im hydraulischen Potential und Änderungen in der Zusammensetzung des Wassers)
- 4.) Temperatur von Wässern.

Abbildung 4 zeigt für die Beziehung „Entfernung Epizentrum zur dazugehörigen Magnitude“ eine Dreiecksverteilung. Es gibt bei gegebener Magnitude anscheinend eine Obergrenze für die maximale Entfernung eines beobachtbaren Erdbeben bezogenen Signals.

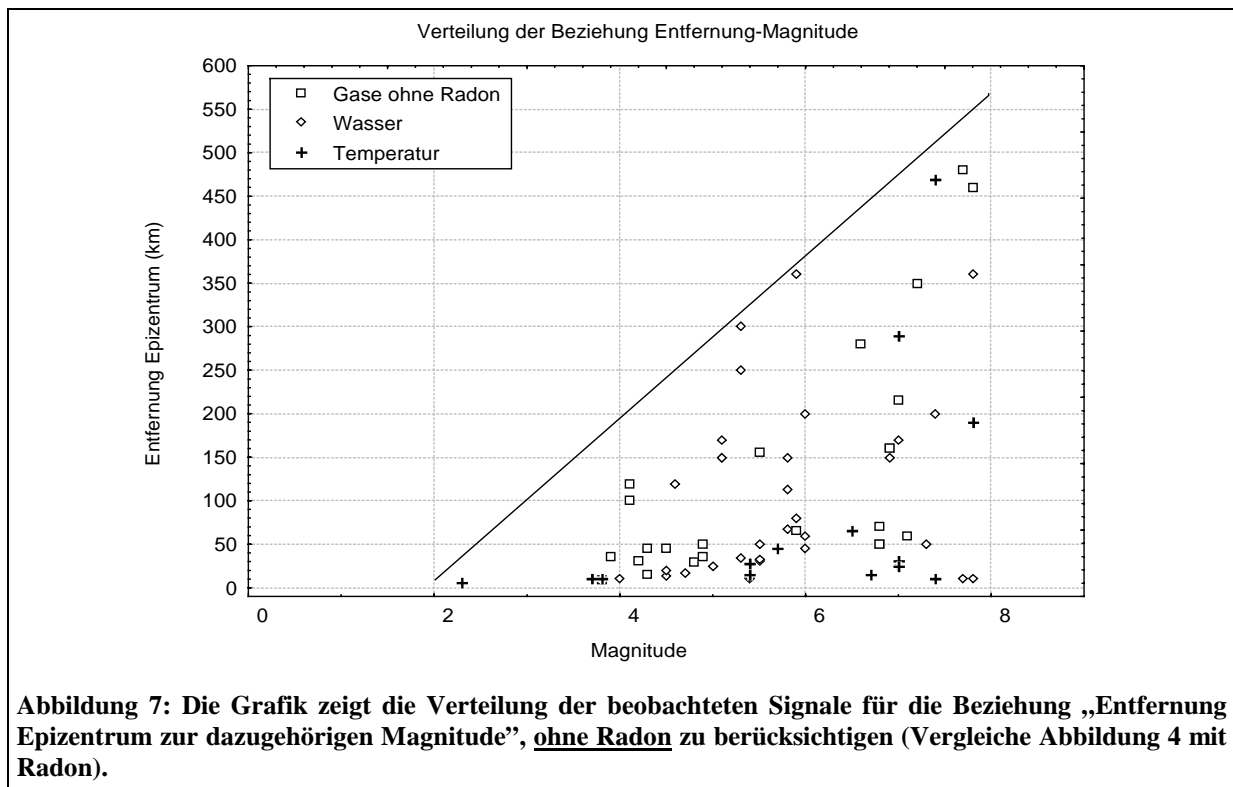
Abbildung 7 zeigt für die Beziehung „Entfernung Epizentrum zur dazugehörigen Magnitude“ ohne Radon ebenfalls eine Dreiecks-Verteilung. Die Begrenzungsgerade liegt tiefer (bei ähnlicher Steigung) als bei der Betrachtung aller Beobachtungen mit Radon. Daraus ergibt sich die Frage: Ist der Parameter Radon sensibler?

Um solche Fragen präziser beantworten zu können, wäre es sinnvoll mehr solcher Signale zu untersuchen.

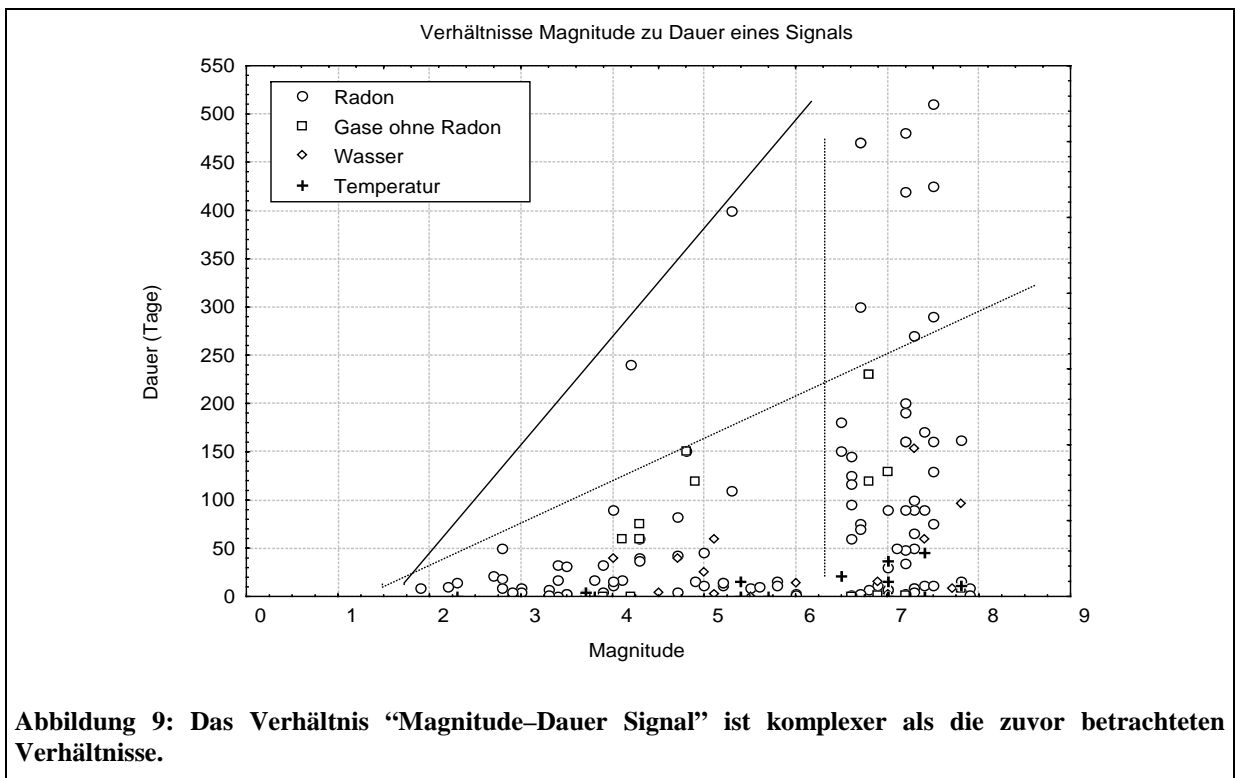
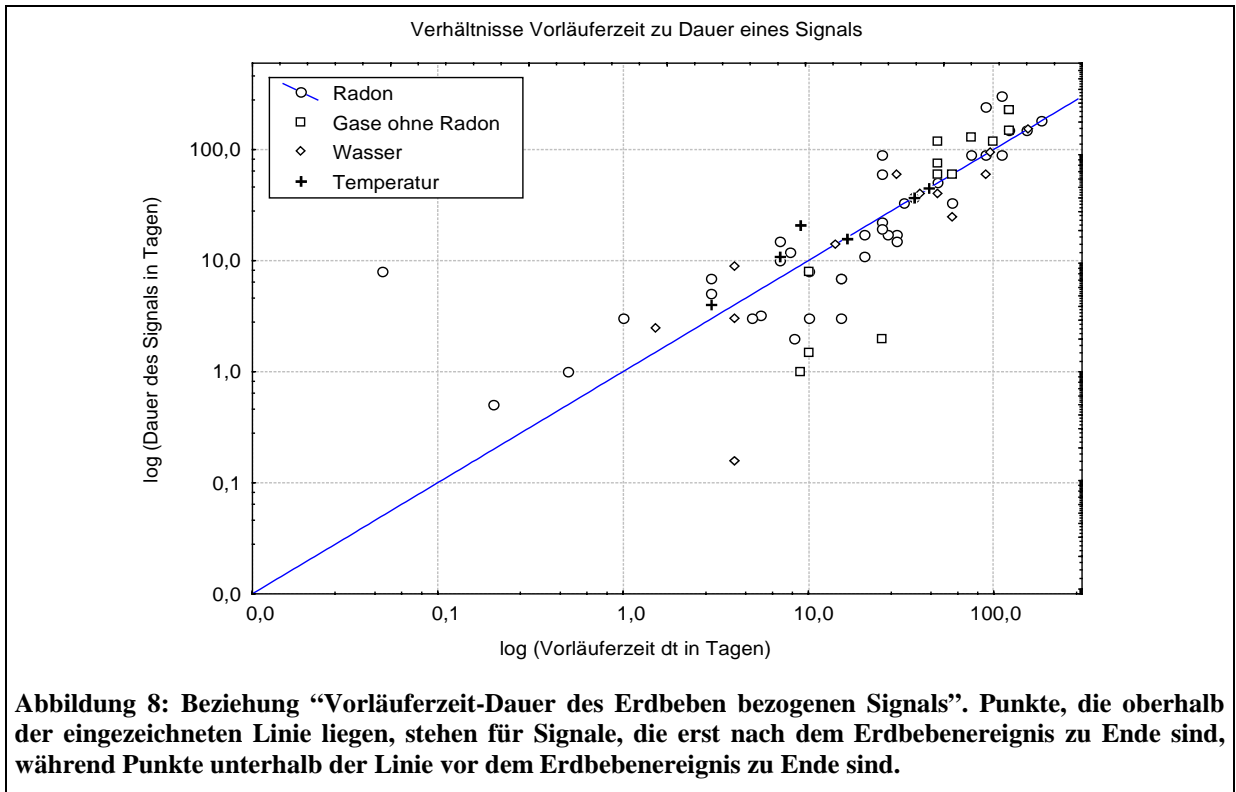
Die Beziehung „Vorläuferzeit-Dauer des Erdbeben bezogenen Signals“ (Abbildung 8) zeigt einen log-linearen Zusammenhang. Punkte, die oberhalb der eingezeichneten Linie liegen, stehen für Signale, die erst nach dem Erdbebenereignis zu Ende sind. Punkte, die unterhalb der Linie liegen, sind vor dem Erdbebenereignis zu Ende. Beide Fälle treten ungefähr gleich häufig auf. Die Verteilung bestätigt den Zusammenhang des identifizierten Signals zum jeweils angegebenen Erdbeben.

Das Verhältnis „Magnitude–Dauer Signal“ (Abbildung 9) ist komplexer als die zuvor betrachteten Verhältnisse. Es kann zum einen eine Gerade (durchgezogene Linie) angesetzt werden, welche die absolute Obergrenze der Dauer für beobachtete Magnituden darstellt. Unter der Voraussetzung, dass die zwei Radon-Signale zwischen den gestrichelten Linien und der durchgezogenen Linie als Ausreißer zu betrachten sind, können die beiden gestrichelten Geraden als Begrenzungen interpretiert werden, welche zwei Populationen unterscheiden: a) Erdbeben mit Magnituden 1 bis 5,3 und b) Erdbeben mit Magnituden > 6,2. Es existiert eine Beobachtungslücke zwischen Magnitude 5 und 6. Die schräge gestrichelte Linie kann als Obergrenze für „nicht Radon“ Erdbeben bezogene Signale interpretiert werden. Auch in dieser Grafik kann erneut die Frage gestellt werden, ob Radon ein sensiblerer Parameter ist als die anderen Parameter.

In dieser Darstellung wird gezeigt, dass eine weitere systematische Erfassung der Erdbeben bezogenen Signale notwendig ist, um Verhaltenscharakteristika klar zu erfassen und durch eine genügend große Stichprobenanzahl zu untermauern. Um das zu verdeutlichen, sind in (Abbildung 9) die unterschiedlichen oberen Begrenzungen für die Dauer eines Signals in Abhängigkeit von der Magnitude dargestellt (ohne Radonsignale). Abbildung 10 zeigt, dass für jede der vier Signalgruppen eine eigene obere lineare Begrenzung eingezeichnet werden kann. Anscheinend besitzt jede Signalgruppe ihre eigenen Charakteristika, d.h. sie sollten bei der Interpretation getrennt behandelt werden.



3 Erdbeben bezogene Signale, eine Literaturstudie



3 Erdbeben bezogene Signale, eine Literaturstudie

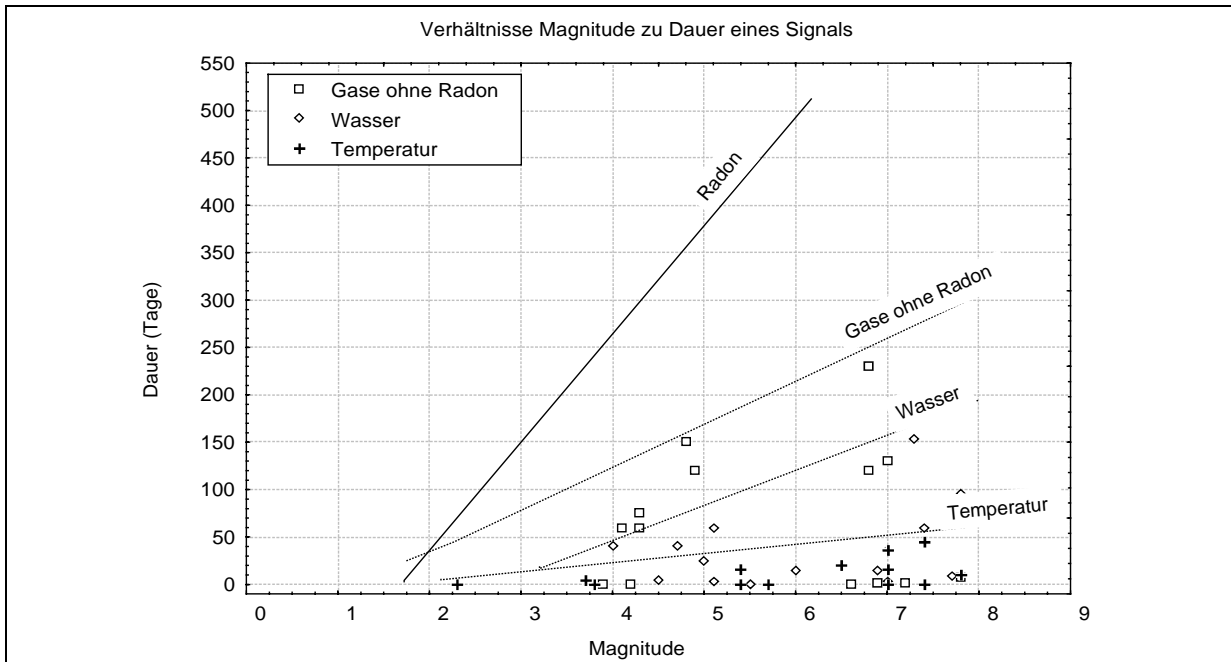


Abbildung 10: Beim hier dargestellten Verhältnis „Magnitude-Dauer eines Signals“ wurden die Radonsignale weggelassen. Zusätzlich sind die oberen Begrenzungen für die Dauer einer Magnitude für Signale „Gase ohne Radon“, „Wasser“ und „Temperaturänderungen von Wasser“ eingezeichnet.

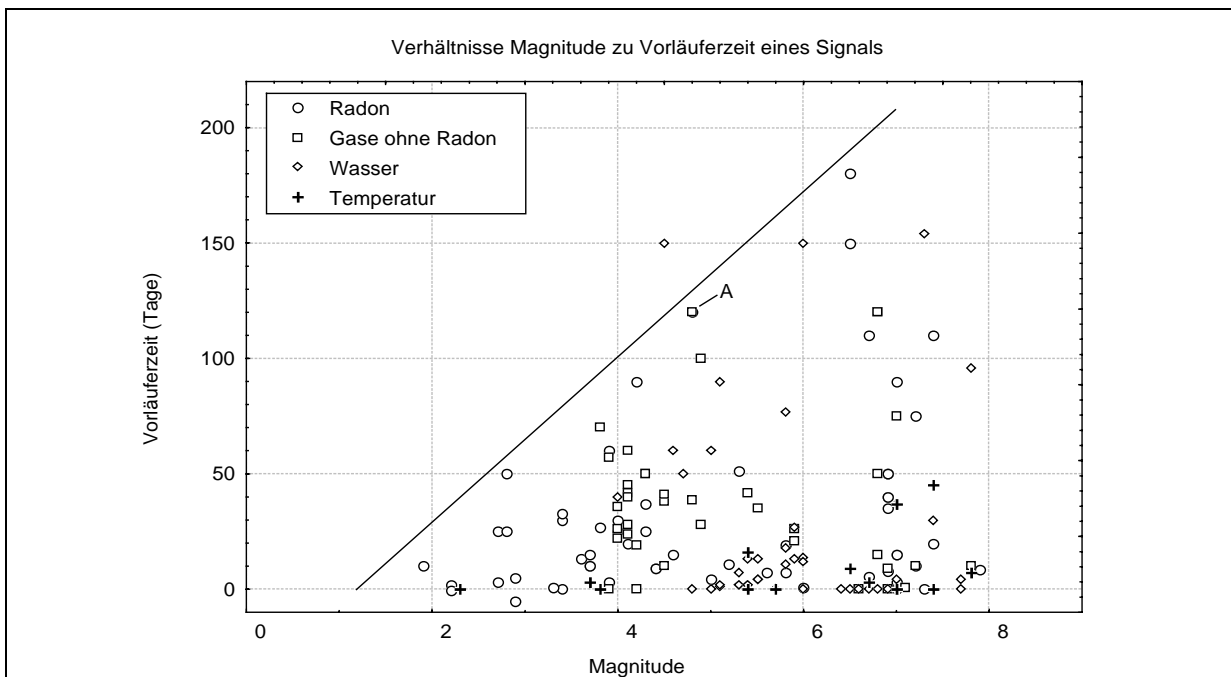


Abbildung 11: Unter der Annahme, dass die Beobachtung oberhalb der eingezeichneten Linie ein Ausreißer ist, kann auch bei dieser Beziehung eine Obergrenze für die Beobachtungen in Abhängigkeit von der Magnitude gesetzt werden. Diese Obergrenze ermöglicht eine Abschätzung der minimalen zu erwartenden Magnitude: Wenn ein Erdbeben bezogenes Signal eine gewisse Zeit andauert, wie z.B. Beobachtung A, kann mit einem Erdbebenereignis $> \text{Magnitude } 4,8$ gerechnet werden.

3 Erdbeben bezogene Signale, eine Literaturstudie

Die eingezeichnete Funktion (bzw. Linie) in Abbildung 11 bildet die Obergrenze der Verteilung (Punktwolke) und kann durch eine lineare Funktion beschrieben werden:

$$(\text{Maximum von } \Delta t_{\text{Vorläufer}}) = b + a M$$

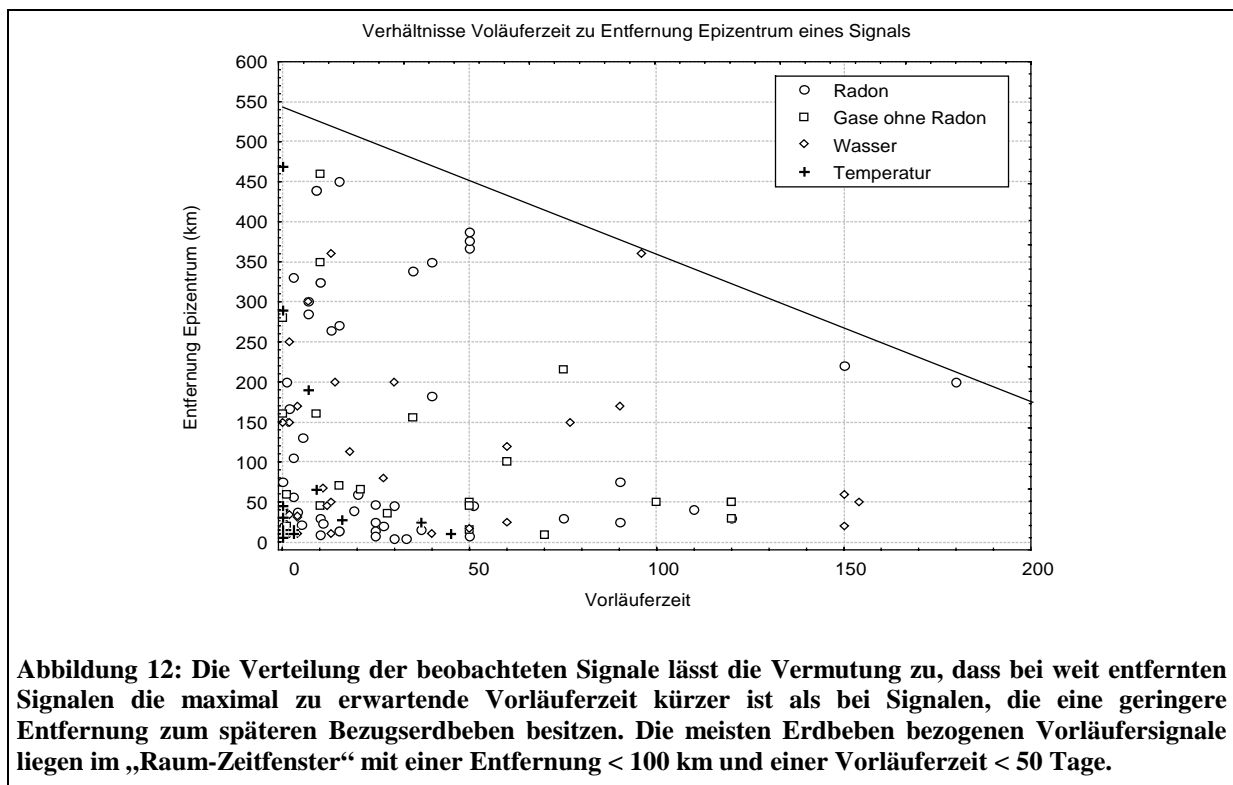
M: Magnitude, $\Delta t_{\text{Vorläufer}}$: Vorläuferzeit; a, b: Koeffizienten.

Wenn diese Beziehung durch weitere Beobachtungen bestätigt wird, kann dieser Sachverhalt für eine zukünftige Erdbebenvorhersagestrategie von Nutzen sein. Eine mögliche Interpretation wäre:

Wenn ein Erdbeben bezogenes Signal, welches zuvor gesetzte Kriterien erfüllt, beobachtet wird und zudem bekannt ist, dass die betreffende Lokation erdbebensensitiv ist, kann angenommen werden, dass nach einer Zeit Δt und bisherigem nicht Eintreffen eines Erdbebens, mit einem Erdbeben einer Minimummagnitude M eintritt.

Wenn keine Vorläufersignale identifiziert werden, bedeutet das nicht, dass keine Vorläufersignale existieren. Potentielle Fehler in den obigen Verteilungen können durch nicht präzise oder fehlerhafte Signaldefinitionen zu Stande kommen.

Zudem überlagern sich prä- und coseismische Phänomene in Erdbebenregionen mit häufigen Ereignissen. Das führt zu einer Vermischung der Signale und zu Fehlinterpretationen.



4 Methodik der Analyse

- **Rumänien:** 2 Bohrungen mit 52 vierzehntäglichen Proben über 30 Parameter; Erdbebenkatalog mit Erdbeben größer Magnitude 3.
- **Kamchatka:** Eine Bohrung und 2 Quellen mit 15 Parametern, welche durchschnittlich alle drei Tage über 20 Jahre gemessen wurden. Die Werte sind auf einen Tag linear interpoliert; Erdbebenkatalog: Erdbeben größer Magnitude 4.
- **Japan:** Izu Peninsula: eine Bohrung mit Tiden und Temperatur korrigierten stündlichen Radon-Messungen über 14 Jahre. Erdbebenkatalog: Erdbebenkatalog des "Meteorological Institute of Japan"; teilweise mit Erdbeben unter Magnitude 2.
- **Japan:** Untersuchung eines potentiellen hydrochemischen Vorläufersignals des Kobeerdbebens 1995.

Tabelle 1: Kurze Übersicht über die in dieser Arbeit bearbeiteten Datensätze.

Wie die Literaturstudie in Kapitel 3 zeigt, lassen sich allgemeine Zusammenhänge zwischen verschiedenen beobachteten Variablen darstellen. In bisherigen Arbeiten wurde nicht systematisch nach Kriterien für die Definition eines Erdbeben bezogenen Signals gesucht, um Beziehungen zwischen Erdbeben und hydro-/gasgeochemischen Zeitreihen zu belegen.

Die Analyse der potentiellen Erdbeben bezogenen Signalen aus der Literatur wird durch folgende Faktoren negativ beeinflusst:

- Unterschiedliche Beprobungsabstände.
- Die Nichtkorrektur von barometrischem Druck, Tiden und anderen unerwünschten Einflüssen und die Nichtüberprüfung, ob solche Einflüsse einen signifikanten Anteil der Varianz erklären.
- Unterschiedliche bzw. überhaupt keine klaren Kriterien, wann ein Erdbeben bezogenes Signal vorliegt. Ausnahmen sind die Arbeiten von IGARASHI & WAKITA (1990), KAWABE (1987), KOPYLOVA (1994).
- Die analysierten Arbeiten geben (ohne einheitliches System) einmal epizentrale Distanzen, ein anderes Mal hypozentrale Distanzen zu den signalbezogenen Erdbeben an. Deswegen sind die Vergleiche von potentiellen Signalen unterschiedlicher Erdbeben an einer/unterschiedlichen Station/en problematisch (siehe dazu: WAKITA, 1978).
- Es kann zur Verwischung von coseismischen und präseismischen Effekten kommen (Kapitel 2.2). Können diese nicht klar getrennt werden, ist eine genaue Reaktion auf die tektonischen Prozesse, vor allem der präseismischen Effekte nicht präzise beschreibbar. Keine der untersuchten Arbeiten machte eine Unterscheidung zwischen den Prozessen, die zu den prä- und coseismischen Effekten führen.
- In der Literatur wird in der Regel davon ausgegangen, dass ein Erdbeben bezogenes Signal einem einzelnen Erdbeben zugeordnet werden kann. Es wird nicht hinterfragt, welche Prozesse zu diesem Signal führen und somit die Zuordnung dieser zu einem einzelnen Erdbeben überhaupt legitim ist.

Prinzipiell ist der in der Literatur benutzte Begriff „Anomalie“ im hier untersuchten Zusammenhang irreführend. In dieser Arbeit wird die Hypothese aufgestellt, dass Prozesse, welche Erdbeben bezogene Signale auslösen, einen Teil der Varianz der beobachteten Monitoringparameter erklären. Diese, in Kapitel 2 erläuterten Prozesse, wurden in Kapitel 2.1 als tektonische Komponente vorgestellt. Im weiteren Verlauf wird nur noch bei Signalen, welche auf Anomaliedefinitionen zur Identifikation von Erdbeben bezogenen Signalen beruhen, von Anomalien gesprochen. Ansonsten wird der Begriff Signal verwendet.

Zunächst ein paar Gedanken aus der statistischen Nachrichtentheorie (KROSCHEL, 1999):

Legt man für die Entstehung von tehygges-Phänomenen einen plausiblen physikalischen Prozess zugrunde, kann man annehmen, dass dieser Prozess nach Eliminierung der größten Störeinflüsse geschätzt werden kann. Es ist also das Ziel, ein Methodik zu entwerfen, welche aus dem Messsignal die tehygges-relevanten Informationen extrahiert.

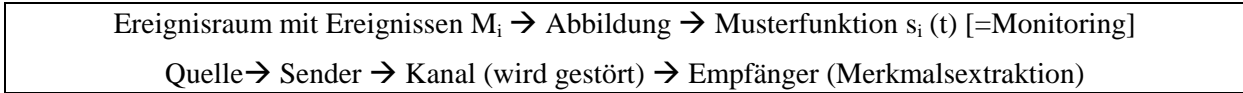


Abbildung 13: In der obersten Zeile ist das Grundproblem der Signalinterpretation in der Nachrichtentechnik dargestellt. Die zweite Zeile zeigt das Prinzip eines Nachrichtenübertragungssystems in der Nachrichtentechnik.

Wenn Seismik induzierende Tektonik einen Einfluss auf eine Monitoringstation besitzt, so wird dieser Einfluss in Form eines Musters auf die Monitoringparameter abgebildet.

Das Nutzsignal bei der Mustererkennung ist zunächst nicht mathematisch beschreibbar. Es stammt aus einer Quelle, die nicht von Menschenhand entworfen ist. Das Problem besteht im Erkennen eines gesendeten Signals oder Musters durch die „Quelle“, obwohl die Parameter zunächst unbekannt sind. Eine Entscheidung erfolgt durch Zuordnung des Empfangssignals zu einem eine Signalklasse repräsentierenden Cluster (Beispiel:: Abfall der Radonkonzentration um eine bestimmte Konzentration innerhalb einer bestimmten Zeit einer bestimmten tektonischen Aktivität). Nach Eliminierung anderer wirkender Einflüsse, wie zum Beispiel Tiden oder barometrischer Druck, erhält man im einfachsten Fall (z. B. einer eindeutigen “Anomaliedefinition”) eine binäre 0/1-Antwort (Signal ja oder nein), oder im Fall einer metrischen/verhältnisorientierten Zusammenhangsdefinition eine Zuordnung zu einer Funktion (vergleiche BORTZ, 1993 , Kapitel 1.1.).

Bei einem der untersuchten Datensätze (Peninsula Izu, Japan, KSM-Station) wurden bekannte Störsignale, wie z.B. Tiden, barometrischer Druck, Temperatureinflüsse, herausgerechnet und so die Störung verringert. Die Methodik ist in ISHIGURO ET AL. (1983) und TANAMURA ET AL (1983) beschrieben. Von einem anderen Datensatz (Kamchatka) ist bekannt, dass es keinen Einfluss durch Niederschläge auf die Wasserzusammensetzung gibt. Die Bereinigung von Störungen der Messsignale oder deren Ausschließen erleichtert die Identifizierung tektonisch bedingter Zusammenhänge.

Im folgenden werden zwei Ansätze zur Identifizierung von potentiellen Zusammenhängen erläutert.

4.1 Das Hauptkonzept

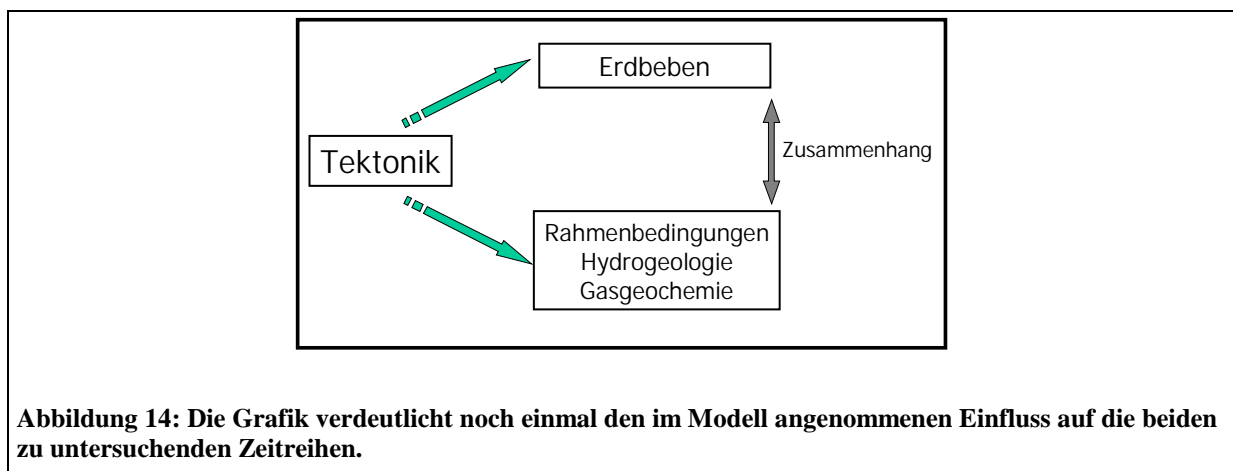


Abbildung 14: Die Grafik verdeutlicht noch einmal den im Modell angenommenen Einfluss auf die beiden zu untersuchenden Zeitreihen.

Abbildung 14 verdeutlicht (noch einmal) schematisch, dass die Tektonik sowohl für Erdbeben als auch für einen Teil der Varianz der beobachteten hydrochemischen, hydrologischen oder gasgeochemischen Parameter verantwortlich ist. Beide beobachtbaren Ereignisse besitzen also die gleiche Ursache. Weil aber keine Daten über die Tektonik in Form einer Zeitreihe vorliegen, wird die tektonische Aktivität

durch eine Funktion der seismischen Ereignisse ausgedrückt. Deswegen werden für die folgenden Analysen drei Annahmen getroffen.

Annahmen:

- a) **Tektonische Prozesse** können vereinfachend als eine **Funktion der seismischen Beobachtungen** ausgedrückt werden.
- b) Der **Einfluss aseismischer Prozesse** kann zunächst **vernachlässigt** werden.
- c1) Das Wasser der Bohrungen ist eine **Mischung aus verschiedenen Quellen/Aquiferen**, welche teilweise durch **tektonische Prozesse kontrolliert** werden.
- c2) Die **Tektonik** ist für einen Teil der **Varianz der gasgeochemischen Signale** verantwortlich

4.2 Die Zusammenhangsanalyse

Im Verlauf dieses Kapitels werden zwei Analyseansätze vorgestellt, welche dann auf die Datensätze (Tabellarische Übersicht : Tabelle 1) angewandt werden.

4.2.1 Ansatz I: Die regressive Zusammenhangsanalyse

In Kapitel 2.2. wurden tektonische Mechanismen beschrieben, welche vor und während eines Erdbebenereignisses wirken und einen Teil der Variabilität von hydro-/gasgeochemischen Zeitreihen erklären können. In diesem Kapitel wird erläutert, mit welchen statistischen Mitteln diese Variabilität qualitativ bzw. quantitativ herausgefiltert werden kann.

Transformation der Erdbebenzeitreihen:

Mit den Ereignissen Erdbeben und Monitoringmessung liegen prinzipiell zwei Zeitreihen vor, die nicht synchron und zumindest im Fall der beobachteten Erdbeben nicht äquidistant sind. Dieser Umstand macht einen direkten Vergleich problematisch.

Aus diesem Grund werden die hier untersuchten **multivariaten Erdbebenzeitreihen** (Magnitude, Zeit, Raumkoordinaten) in eine univariate Zeitreihe transformiert, indem jedem Erdbeben ein Parameter e zugeordnet wird. Aus den Analysen in Kapitel 3 kann entnommen werden, dass sowohl die Erdbebenenergie, die Entfernung der tektonischen Ereignisse als auch die zeitlichen Komponenten im tehygges-Prozess eine Rolle spielen. Deswegen beinhalten die Parameter e in der Regel eine **Energiekomponente** des Erdbebens und/oder eine **geometrische Komponente** der räumlichen Beziehung Hypozentrum-Monitoringstation. Tabelle 2 zeigt die in dieser Arbeit verwendeten 16 **Basistransformationen** für einzelne Erdbebenereignisse. Es wurden einfache Verhältnisse gewählt und versucht, die in der Natur oft vorkommenden Potenzgesetze zu berücksichtigen.

Tabelle 2: Jedes Erdbeben wird durch einen Parameter e repräsentiert. Die Tabelle zeigt die 16 Basistransformationen dieser Arbeit. M : Momentenmagnitude; d_{hypo} : Distanz des Beprobungsortes zum Hypozentrum; d_{epi} : Distanz des Beprobungsortes zum Epizentrum, ϵ_{dobro} : Dobrovolsky's „half space“ Parameter ϵ ; er errechnet sich durch $\epsilon_{\text{dobro}} = 10^{(1,3M-8,18)}/d_{\text{epi}}^3$ (nach BELLA ET AL., 1998).

1: $e = M$	2: $e = \epsilon_{\text{dobro}}$	3: $e = 10^M$	4: $e = M/d_{\text{hypo}}$
5: $e = M/d_{\text{hypo}}^3$	6: $e = 10^M/d_{\text{hypo}}$	7: $e = 10^M/d_{\text{hypo}}^3$	8: $e = M/d_{\text{epi}}$
9: $e = M/d_{\text{epi}}^2$	10: $e = 10^M/d_{\text{epi}}$	11: $e = 10^M/d_{\text{epi}}^2$	12: $e = 1/\text{Tiefe}^3$
13: $e = 1/e^{\text{Tiefe}}$	14: $e = M/\text{Tiefe}$	15: $e = 10^M/\text{Tiefe}$	16: $e = 10^M/\text{Tiefe}^3$

Jede dieser Transformationen wurde für die Analysen zusätzlich mit $1/1$, $1/\Delta t$ und $1/\Delta t^2$ gewichtet. Δt steht für den zeitlichen Abstand des Erdbebens zum Monitoringzeitpunkt. Insgesamt werden also pro Erdbeben 48 verschiedene Transformationen (**e -Parameter**) errechnet.

Der Begriff ϵ_{dobro} steht für die durch ein Erdbeben gelöste verformende Spannung ($\epsilon_{\text{dobro}} = 10^{(1,3M-8,18)/d_{\text{epi}}^3}$). Sie wird durch das „half space“-Modell von DOBROVOLSKY ET AL. (1979, 1989) beschrieben. Im Zusammenhang mit tehygges-Phänomenen wird dieses Modell am häufigsten zitiert: z.B. BELLA ET AL. (1998), TOUTAIN & BAUBRON (1999), DOBROVOLSKY ET AL. (1979, 1989), KAWABE (1987).

Beim Dobrovolsky Parameter ϵ_{dobro} ist zu beachten, dass erst Erdbeben größer einer Magnitude 6,3 zu einem positiven Wert im Exponenten führen. Die Theorie geht davon aus, dass erst bei größeren Erdbeben eine signifikante Veränderung der Gesteinsspannung stattfindet, bei der es zu tehygges-Phänomenen kommt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird deutlich, dass dies nicht als allgemeiner Fall angenommen werden kann, und es auch bei mehreren deutlich kleineren Erdbeben zu ähnlichen Effekten kommen kann. Dies geht aus den Ergebnissen in Kapitel 8.1 (Hauptergebnisse der Vrancea-Zone) hervor. Die Literaturstudie in Kapitel 3 weist ebenso tehygges-Phänomene auf, die deutlich unter dem als signifikant beschriebenen ϵ_{dobro} liegen: $\epsilon_{\text{dobro}} < 10^{-6}$.

Für die spätere Interpretation ist zu beachten, dass in den *e*-Parametern die Magnituden *M* im Bereich zwischen 2 und 8 liegt (innerhalb einer Größenordnung), wohingegen die Distanz in Bereichen zwischen 1 und 1000 km (drei Größenordnungen) und die Tiefe zwischen 1 und 500 (zwei Größenordnungen) liegen.

Synchronisation der Erdbebenzeitreihen mit den Monitoringzeitreihen:

Um die beiden Zeitreihen zu synchronisieren, werden die *e*-Parameter über einen Zeitraum von *n* Basiszeiteinheiten (in der Regel Tage) zu einer Erdbebenaktivität **summiert**.

Beispiel: $E_{n, \text{nach}} = \sum_{i \in (t, t+n)} e_i$.

Im Beispiel werden alle *e*-Parameter für jedes Erdbeben innerhalb von *n* Zeiteinheiten nach der Messung, inklusive der Messzeiteinheit, summiert.

Die hier eingeführte Erdbebenaktivität beinhaltet eine Energiekomponente, eine räumliche Gewichtung und eine Zeitkomponente.

Es werden drei Grundtypen von Erdbebenaktivitäten unterschieden:

1: **Summierung** aller *e*-Parameter innerhalb eines Zeitraumes von *n* Zeiteinheiten **nach** jeder Monitoringmessung (inklusive der Zeiteinheit, in der gemessen wird).

Formel: $E_{n, \text{nach}} = \sum_{i \in (t, t+n)} e_i$ (Typ „nach“; er wird in Abbildung 15 dargestellt).

2: **Summierung** aller *e*-Parameter innerhalb eines Zeitraumes *n* Zeiteinheiten **vor** jeder Monitoringmessung (inklusive der Zeiteinheit, in der gemessen wird).

Formel: $E_{n, \text{vor}} = \sum_{i \in (t-n, t)} e_i$ (Typ „vor“)

3: **Summierung** aller *e*-Parameter innerhalb eines Zeitraumes $2n+1$, wobei sich die erste Hälfte des Zeitfensters vor und die zweite Hälfte des Zeitfensters nach der Monitoringmessung befindet (inklusive der Zeiteinheit, in der gemessen wird).

Formel: $E_{n, \text{sym}} = \sum_{i \in (t-n, t+n)} e_i$ (Typ „sym“).

So erhält man für jede Erdbebenzeitreihe verschiedene Summen-Zeitreihen $E_{n, \text{Typ}}$, die mit der Monitoringzeitreihe in Zusammenhang gebracht werden können (Typ steht für die Variationen vor, nach und sym). Die Unterscheidung in diese drei Typen ermöglicht eine Untersuchung des präseismischen, des coseismischen und des postseismischen Zusammenhangs bezüglich der Monitoringmessung.

Es gibt somit eine Vielzahl von möglichen Variationen: 48 *e*-Parameter und je *e*-Parameter *n* Summen-Zeitreihen, sowie drei unterschiedliche Typen-Betrachtungen bezüglich prä- und co-/post-seismischer Zusammenhänge. Diese Variationen dienen der systematischen Untersuchung von Zusammenhängen, da vor der Untersuchung nicht bekannt ist, welche Prozesse im System wirken. Die **systematische Variation** soll verhindern, dass willkürlich beste Zusammenhänge gefunden werden.

Die Frage, ob ein tiefes und nahes Erdbeben einen anderen Einfluss auf tehygges-Phänomene besitzt als ein Erdbeben, welches weit weg und flach ist, oder eines, welches genauso weit entfernt ist, aber eine andere Tiefe besitzt, wurde in den bisherigen Studien nicht untersucht. Aus diesem Grund wurden für die unten beschriebenen Ansätze zur Analyse der Zusammenhänge zwischen den Zeitreihen verschiedene Erdbebenparameter definiert (siehe Tabelle 2), welche jeweils Teilaspekte der räumlichen Lage und der Energie der Erdbeben beinhalten.

Transformation der Monitoringzeitreihen:

Um eventuelle gleitende Mittelwertprozesse zu erfassen, werden die Monitoringzeitreihen ebenfalls transformiert:

- a) Es werden die Differenzen zwischen den einzelnen Messungen errechnet.
- b) Es werden aus den normalen Monitoringmessungen gleitende Mittelwerte errechnet.
 - b1) Kontinuierliche Datensätze (äquidistante, tägliche oder stündliche Messungen):
 Berechnung der normalen symmetrischen gleitenden Mittelwerte, da später durch Kreuzkorrelationen, prä- und co-/postseismisch bezogene Ereignisse zu erkennen sind.
 - b2) Nicht kontinuierliche Datensätze (Vrancea-Datensätze mit 14-täglichen Messungen):
 Berechnung drei verschiedener gleitender Mittelwerte (siehe Abbildung 15). Wegen des großen zeitlichen Abstandes werden Mittelwerte errechnet, mit dem Ziel symmetrische, präseismische und postseismische Zusammenhänge zu betrachten.

Beispiel: Mit dem Zusammenhang zwischen dem gleitenden Mittelwert Typ GM A und der Erdbebenaktivität $E_{n, nach}$ wird ein präseismischer Fall betrachtet (Abbildung 15).

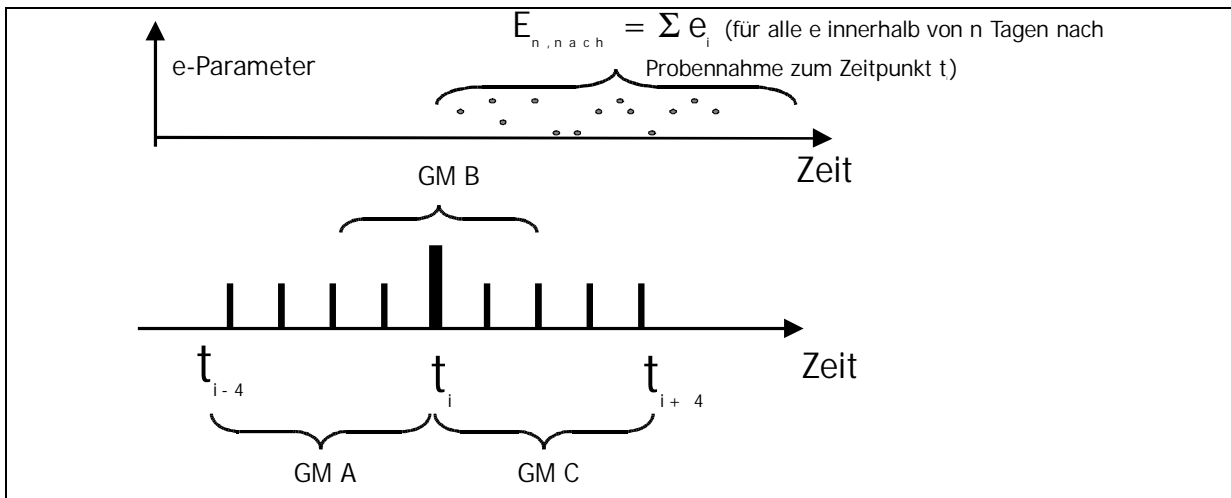


Abbildung 15: Darstellung der drei unterschiedlichen gleitenden Mittelwert Typen für die nicht kontinuierlichen Monitoringzeitreihen und der Erdbebenaktivität für den Typ „nach“. GM A steht für den gleitenden Mittelwert Typ A, GM B für den gleitenden Mittelwert Typ B, GM C für den gleitenden Mittelwert Typ C.

Die Analyse der potentiellen Zusammenhänge:

In Abhängigkeit davon, ob ein Multiparameter-Monitoring-Datensatz vorliegt oder ein univariater, werden nun die $E_{n,Typ}$ -Zeitreihen mit Hilfe der Multiplen Regression oder mit einfacher Regression aus den Monitoringparametern geschätzt:

$$E_{n,Typ} = b_0 + b_1f_1 + b_2f_2 + b_3f_3 + \dots + b_n f_n + e \quad (\text{Gleichung für Multiple Regression})$$

$$E_{n,Typ} = b_0 + b_1f + e \quad (\text{Gleichung für univariate Regression})$$

„e“ steht für nicht erklärte Varianz und den zufälligen Anteil; f_i entspricht dem Monitoringparameter, seiner Transformation oder einem repräsentativen Faktorwert; b_i sind die zu schätzenden Koeffizienten.

Bei den Verfahren handelt es sich um Standardverfahren der Sozialwissenschaften und Wirtschaftswissenschaften, die ausführlich in BORTZ (1995), BACKHAUS ET AL. (1996) und RAWLINGS ET AL. (1998) beschrieben werden.

Bei kontinuierlichen Monitoringzeitreihen können zudem sehr einfach kreuzkorrelative Analysen durchgeführt werden.

$$E_{n,sym/i} = b_{i+k} f_{i+k} \quad (k = \text{Zeitverschiebung um } k \text{ Zeiteinheiten, im weiteren Verlauf „lag“ genannt})$$

Bei kontinuierlichen Messungen der Monitoringparameter genügt es, den Fall „sym“ zu betrachten, da durch die Verschiebung um den lag k automatisch auch der Fall vor und nach erfasst wird.

Als Maß für die Güte der Schätzung wird der Korrelationskoeffizient zwischen geschätzter und beobachteter Erdbebenaktivität benutzt.

Konvention: Wird die Erdbebenaktivität $E_{n,nach}$ durch eine GM Typ A geschätzt, wird im folgenden von einem präseismischen Zusammenhang gesprochen. Wenn die Erdbebenaktivität $E_{n,vor}$ durch einen GM Typ C geschätzt wird bezeichnet das einen postseismischen Zusammenhang.

Es gehen mehrere Fehler in die Analysen ein:

- Die Erdbebenkataloge enthalten in der Regel nur Erdbeben ab einer Mindestmagnitude. Dadurch wird nur ein Teil der tektonisch induzierten seismischen Aktivität erfasst.
- Räumliche (geometrische) Elemente der Tektonik (Spannungs-Tensoren, Kluftsystem, ...) werden nicht bzw. nur ungenügend (durch Erdbebencluster) charakterisiert.
- Faktoren wie Permeabilität, Porosität und lithologische Einflüsse werden nicht in die Analyse mit einbezogen.

Abbildung 16 zeigt schematisch den Analysevorgang für Ansatz I. Die beiden Zeitreihen, Monitoringzeitreihe und Erdbebenzeitreihe, werden Transformationen unterzogen, um anschließend einer Zusammenhangsanalyse unterzogen zu werden. Die Ergebnisse werden nach der Analyse in Diagrammen untersucht. Dies wird im folgenden beschrieben.

Systematische Veränderung der Parameter und Untersuchung der Zusammenhänge in Diagrammen:

Durch die systematische Veränderung der Parameter n in den Summen der Erdbebenaktivitäten, den Zeitverschiebungen k für die Kreuzkorrelationen, der Erdbebenaktivitäten-Typen „vor“, „nach“, „sym“ sowie die unterschiedlichen gleitenden Mittelwerttypen A, B und C wird untersucht, ob sich die Zusammenhänge systematisch oder chaotisch verändern.

Die Korrelationen zwischen geschätzten und beobachteten Erdbebenaktivitäten werden in Diagrammen dargestellt, welche die systematische Veränderung der Parameter wiedergeben. So kann untersucht werden, ob sich die Korrelationen bei systematischer Veränderung zufällig verändern bzw. ob sie einem Schema folgen.

Die Korrelationen r zwischen geschätzten und beobachteten Erdbebenaktivitäten werden für den Vrancea-Datensatz in **n-r-Diagrammen** bzw. in **k-r-Diagrammen** dargestellt (Beispiel Abbildung 25). Die systematische Veränderung kann dazu genutzt werden, um die besten Zusammenhänge zu finden.

Mischungsmodelle für den Multiparameterdatensatz:

Für die Multiparametersätze der Vrancea-Zone werden Mischungsmodelle entwickelt (vergleiche Abbildung 50). Aus den Datensätzen werden mit Hilfe der Faktorenanalyse unabhängige Faktoren extrahiert. Die Mischungsmodelle von Wasserkomponenten unterschiedlicher chemischer Signatur zeigen den Einfluss der Faktoren auf die Zusammensetzung des Wassers, die tektonisch signifikant sind. Für die b-Koeffizienten wird die **Nullhypothese $b=0$** aufgestellt. Das bedeutet der Faktor besitzt keinen Anteil an der Klärung der Varianz. Das Signifikanzniveau wird auf $p=0,1$ festgelegt. Wenn für $n>30$ mehrheitlich (50 von 60 Werten) die Nullhypothese H_0 auf dem Signifikanzniveau von $p=0,1$ abgelehnt werden kann, werden die Faktoren als signifikant tektonisch beeinflusst gewertet. Für den Test der Nullhypothese wird der t-Test benutzt (siehe BORTZ, 1995; BACKHAUS ET AL., 1996).

Die Verläufe der geschätzten Koeffizienten b_i der Regressionsgleichungen (siehe oben) werden in **b_i - n -Diagrammen** dargestellt (Beispiel Abbildung 34), um herauszufinden, wie diese zu interpretieren sind. In **p_{b_i} - n -Diagrammen** werden die Irrtumswahrscheinlichkeiten p dargestellt, mit denen die Nullhypothese gerade noch abgelehnt wird. Anhand dieser Diagramme wird die Entscheidung getroffen, ob ein Faktor nach dem oben genannten Kriterium signifikant tektonisch beeinflusst ist.

Da es sich um eine explorative Arbeit handelt, ist es schwierig zuvor ein geeignetes Signifikanzniveau für die geschätzten Zusammenhänge festzulegen. Mit den Mischungsmodellen kann der unterschiedliche präseismische und postseismische Einfluss der Tektonik auf das Wasser bezüglich unterschiedlicher e-Transformationen anschaulich gemacht werden.

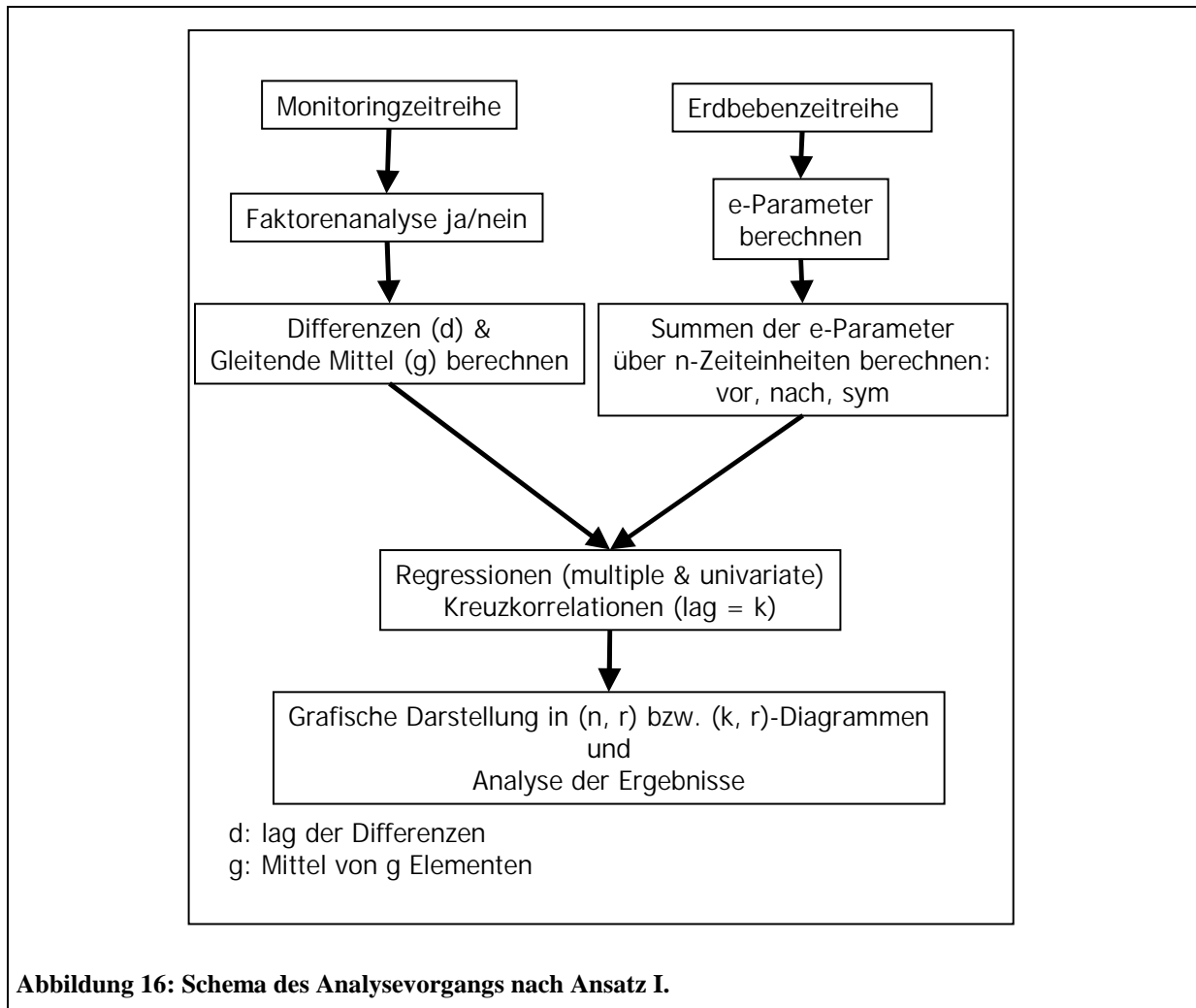


Abbildung 16: Schema des Analysevorgangs nach Ansatz I.

4.2.2 Ansatz II: Signaldefinitionen

Der zweite Ansatz untersucht an Datensätzen aus zwei Regionen (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**: Kamchatka und Japan, Peninsula Izu) den Einsatz von Signaldefinitionen für Monitoringzeitreihen. Es werden Erdbeben Transformationen und Erdbebenaktivitäten wie in Ansatz I berechnet. Um Zusammenhänge zwischen Erdbebenaktivität und dem Verhalten der Monitoringmessungen zu finden, werden Signaldefinitionen eingeführt. Ein Signal kann z. B. der Trendwechsel einer Messreihe sein.

Von beiden hier untersuchten Datensätzen ist bekannt, dass sie auf Erdbeben mit einer Magnitude größer 6 mit coseismischen Signalen reagieren können (IGARASHI & WAKITA, 1990; BELLA ET AL., 1998). Allerdings gibt es in beiden Datensätzen auffällige Veränderungen im Trend der Monitoringmessungen, welche nicht mit einzelnen großen Erdbeben erklärt werden konnten. Ziel ist

es, auffällige Änderungen in den aufgezeichneten Monitoringzeitreihen, welche mit der Signaldefinition übereinstimmen, mit der Erdbebenaktivität in Zusammenhang zu bringen.

Fast keine Veröffentlichung behandelte bisher Signaldefinitionen in Zusammenhang mit Erdbebenaktivitäten. Die Literatur, welche für die Literaturstudie in Kapitel 3 recherchiert wurde, geht von der Vorstellung aus, dass es sich bei Reaktionen in den Monitoringzeitreihen im Zusammenhang mit Erdbeben um „anomalies Verhalten“ handelt. GODDARD & HAUSSON (1981) machten sich als erste Gedanken, wie mit Radon-Anomalien, welche einen vermuteten Bezug zu Erdbeben besitzen, umgegangen werden soll. Sie schlugen drei Regeln vor, welche im folgenden kommentiert werden. GODDARD & HAUSSON (1981) gehen von einem anomalen Verhalten der Radonzeitreihen in Zusammenhang mit einzelnen Erdbeben aus. Nach HAUSSON & GODDARD liegt eine Anomalie vor, wenn eine Radonmessung außerhalb der 2-fachen Standardabweichung liegt, welche über die Gesamtpopulation ermittelt wurde. Dies ist eine Standarddefinition in der Zeitreihenanalyse.

- 1) Nur Erdbeben aus einer seismischen Zone werden in die Analyse einbezogen. Dies ist gegeben, wenn kein Erdbeben aus der Nachbarzone eine Anomalie verursacht.

Anmerkung zu 1: WAKITA & IGARASHI (1989) zeigten, dass auch große Erdbeben aus benachbarten seismischen Zonen ($M=7,9$, Distanz $_{\text{Epizentrum}} = 1000$ km) mit signifikanten Änderungen einer Radonzeitreihe in Verbindung gebracht werden können.

- 2) Die empirische Magnitude-Distanz Beziehung von vergangenen Erdbeben wird bei der Auswahl der Erdbeben berücksichtigt (siehe dazu Kapitel 3.2.). Es wird davon ausgegangen, dass nur Erdbeben, die mit ihrem so erzeugten Wirkungsradius die Station einschließen, eine Anomalie erzeugen können.

Anmerkung zu 2: Dabei wird vorausgesetzt, dass ein Wirkungsradius für ein einzelnes Erdbeben definiert werden kann bzw. bereits bekannt ist. Legt man homogene Modelle zu Grunde, ist eine solche Definition sinnvoll (Beispiel: DOBROVOLSKY ET AL., 1979). Allerdings ist dies nicht praktikabel, weil tektonische Einheiten selten homogen aufgebaut sind. Als Beispiel sei hier die Geometrie einer Subduktionszone, wie sie in Japan oder Kamchatka zu finden ist, oder die vulkanisch geprägte Tektonik einer Caldera angeführt.

- 3) Im Fall, dass mehrere Erdbeben (in Raum und Zeit) geclustert auftreten, wird angenommen, dass das größte Erdbeben mit dieser Anomalie in Bezug steht.

Anmerkung zu 3: Das Problem bei dieser Regel ist, dass bei Annahme eines Raum-Zeit-Kontinuums auch die zeitlich integrierte (summierte) Wirkung der Tektonik berücksichtigt werden müsste. In dieser Arbeit wird versucht, diesem Sachverhalt mit der Einführung der Erdbebenaktivitäten Rechnung zu tragen. Regel 3 macht dann Sinn, wenn es darum geht, eine Anomalie, welche aufgrund eines Varianzbereiches (z.B.: 2 Sigma) definiert ist, einem einzelnen konkreten Erdbeben zuzuordnen. Aber bei Unkenntnis der Beziehungen im betrachteten System macht es keinen Sinn, das größte Erdbeben einem Signal zuzuordnen.

Diese Regeln wurden später nur selten angewandt (Ausnahmen: IGARASHI & WAKITA, 1990; KAWABE, 1987) und kaum weiterentwickelt (Ausnahme IGARASHI & WAKITA, 1990).

IGARASHI & WAKITA (1990) verfeinerten diesen ersten systematischen Ansatz später, indem sie die Standardabweichungen nicht über die Gesamtpopulation berechneten, sondern aus den gleitenden Mittelwerten ($x_i \in (20 \text{ bis } 40 \text{ Zeiteinheiten, bzw. Tagen})$). In der Radonzeitreihe von der Bohrung KSM (Izu Peninsula, Japan) fanden sie signifikante Anomalien für einige große Erdbeben ($M > 6$), wenn sie die Standardabweichungen aus den gleitenden Mittelwerten für $x = 30$ Tage berechneten.

Signaldefinitionen für die KSM-Station:

In dieser Arbeit wird für den Datensatz aus Japan von der KSM-Station der Ansatz von IGARASHI & WAKITA (1990) verfeinert und durch die Berechnung von Differenzen der Radonkonzentration über die letzten n Zeiteinheiten ersetzt. Ein Signal nach der Differenzenmethode liegt vor, wenn gilt

$$|\frac{dc}{dn}| > w.$$

($\frac{dc}{dn}$: Änderung der Konzentration um dc innerhalb dn Zeiteinheiten, w entspricht einem Grenzwert für die Signaldefinition).

Die Definition einer Differenzenanomalie als Signal bietet Vorteile gegenüber der Definition von IGARASHI & WAKITA (1990), da sie nicht von einem konstanten Mittelwertprozess ausgeht, sondern Änderungen mit der Zeit berücksichtigt.

Eine systematische Untersuchung zur KSM-Bohrung folgt in Kapitel 9.

In ihrer Analyse fanden IGARASHI & WAKITA 5 Anomalien, welchen kein Erdbeben größer Magnitude 6 zugeordnet werden konnte. In Kapitel 9 der Auswertung des Datensatzes wird versucht, diesen Anomalien Erdbebenaktivitäten E_n nach obigen Definitionen zuzuordnen. Zudem fanden sie für einige Erdbeben mit $M > 6$ keine Anomalien. Auch für diese wird versucht, mit der Differenzenmethode eine Anomalie zu erklären.

Die Methode von IGARASHI UND WAKITA ist wiederum nichts anderes, als einen Vertrauensbereich um den normalen Mittelwert a zu definieren, welcher innerhalb eines Bereiches ($a \pm y s$) liegt: mit a dem Mittelwert, s als Standardabweichung und y einem Faktor, der in Bezug auf die zuvor definierten Erdbeben eine beste Sensibilität liefert.

Signaldefinition für den Kamchatka Datensatz:

Für den Kamchatka-Datensatz wird eine andere Signaldefinition gewählt. Ein Signal liegt vor, wenn der Trend der letzten 50 Tage in der Konzentration des Chlorid umgekehrt wird oder eine besonders hohe Zunahme der Chloridkonzentration erfolgt (mehr als 30 mg/l).

Vergleich Erdbebenaktivität-Signal der Monitoringzeitreihe: Beide Datensätze werden graphisch mit den Erdbebenaktivitäten verglichen. Es wird überprüft, ob Übereinstimmungen zwischen Signalen und Erdbebenaktivitäten auch für Zeiteinheiten ohne große Erdbeben identifiziert werden können.

4.3 Reduktion der zu untersuchenden Erdbebenaktivitäten E

Um die Vielzahl von Erdbebenaktivitäten zu reduzieren, werden sie einer Faktorenanalyse unterzogen. Erdbebenaktivitäten, die hoch miteinander korrelieren, liegen auf einem Faktor. So reicht es aus, pro Faktor eine Erdbebenaktivität bezüglich der Relevanz zu einer Monitoringzeitreihe zu untersuchen.

Die berechneten Erdbebenzeitreihen E_n werden für verschiedene n einer Faktorenanalyse unterzogen. Dadurch werden die E_n (z.B. für $n=0$ und $n=60$) einem Faktor zugeordnet. In der Vrancea-Analyse sind die meisten Schätzungen stabil für $n=60$ (siehe Auswertungen). Mit Hilfe dieses Vorgehens kann die Anzahl der zu untersuchenden Beziehungen reduziert werden. Dies wird beispielhaft an der Lokation Turia gezeigt (Abbildung 25). Die Verläufe der E_n , die auf einem Faktor liegen, zeigen fast identische Korrelationsverläufe für die geschätzten und beobachteten Erdbebenaktivitäten.

4.4 Anmerkungen zu den statistischen Verfahren

Multiple Regressionen:

BORTZ (1993) gibt an, dass die Normalverteilungsvoraussetzung für einen Stichprobenumfang mit mehr als 40 Beobachtungen und für bis zu 10 Variablen nicht mehr erfüllt sein muss. Somit kann zur Überprüfung der Nullhypothese H_0 , es besteht kein Zusammenhang, mit dem F-Test getestet werden. Die Signifikanzen der Prädiktorvariablen (b-Gewichte) werden mit dem t-Test getestet. Beide Verfahren sind in BORTZ (1993) und BACKHAUS ET AL. (1989) ausführlich beschrieben. Aus der Definition des F-Tests nach BORTZ (1993) und BACKHAUS ET AL. (1989) kann für den F-Test auf dem Signifikanzniveau von $p=0,05$ für den Vrancea-Datensatz bei 8 Prädiktorvariablen und 47 Variablen die Nullhypothese $r=0$ für Korrelationen $r > 0,71$ abgelehnt werden. Bei dem F-Test des Programmpakets STATISTICA wird die Definition bereits für Korrelationen $r > 0,6$ erfüllt. Es sei erwähnt, dass es sich bei dieser Arbeit um eine explorative Arbeit handelt und somit eine Hypothese im Vorfeld schwierig ist.

Faktorenanalyse:

Es gibt zahlreiche Verfahren, um Faktoren aus einer Datenmatrix zu extrahieren. Diese Verfahren können einerseits zu verschiedenen Zuordnungen von Variablen zu Faktoren führen und andererseits zur Extraktion einer unterschiedlichen Anzahl von Faktoren. Prinzipiell gibt es keine falschen Faktorenanalysen, jedoch stellt sich die Frage, ob die extrahierten Faktoren sinnvoll interpretierbar sind. Das hier angewandte Modell der Faktorenanalyse mit anschließender normalisierter varianzmaximierender Rotation ist das am häufigsten benutzte Verfahren. Auch ist es am einfachsten zu interpretieren.

In der Literatur hat die Frage, wann eine Faktorenanalyse als stabil anzusehen ist, zu zahlreichen Kriterien geführt. Die Faktorenanalysen für die chemischen Matrizen der Bohrungen Turia und Covasna erfüllen teilweise solche Kriterien, teilweise jedoch auch nicht.

Um den Sinn der Faktorenanalyse zu überprüfen, genügt auch ein Blick auf die Korrelationsmatrix für die betrachteten Variablen. Sie bestätigen in dieser Untersuchung die Zuordnung der Variablen zu den Faktoren. Die Faktorenanalyse wird hier für die Gruppierung der Variablen eingesetzt. Das gleiche wird bei der Reduktion der zu betrachtenden Erdbebenaktivitäten E gemacht. Die Variablen werden nach größter gemeinsamer Korrelation gruppiert, um die Anzahl der zu betrachtenden Zusammenhänge zu reduzieren. Die Erdbebenaktivitäten erfüllen wegen der geringen Anzahl an Faktoren und der großen Anzahl an Stichproben die meisten Stabilitätskriterien für Faktorenanalysen. Näheres kann bei GUADAGNOLI & VELICER (1988) und BORTZ (1993) nachgelesen werden.

5 Durchführung der Analysen

Die Analysen wurden mit dem Statistik-Paket "Statistica" durchgeführt. Dieses verfügt über eine BASIC-Programmiersprache (für Datenmanagement, Input-Output-Aktionen, Transformationen und einfache statistische Berechnungen) und eine Command Language (für die Automatisierung komplexerer statistischer Analysen), beide im folgenden als Programme bezeichnet. Beide Programme lassen sich nicht miteinander verknüpfen und sind Beschränkungen bezüglich des Umfangs der zu verarbeitenden Dateigrößen unterworfen. Command-Language-Programme (Multiple Regressionen, Kreuzkorrelationen) wurden für jeden Erdbebenparameter einzeln erstellt.

5.1 Anwendung auf die einzelnen Datensätze

Da unterschiedliche Datensätze vorliegen, ist es möglich, sowohl Ansatz I als auch Ansatz II zu untersuchen.

Zur Aufstellung der bestmöglichen Zusammenhänge werden die Analysen für alle Erdbebenparameter durchgeführt, indem die Parameter (n: Zeit, k: lag bei Kreuzkorrelationen, g: gleitende Mittel) systematisch verändert werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht zu erkennen, ob potentielle Zusammenhänge vorliegen und wie sich diese mit Veränderung der Parameter verhalten.

5.2 Die Programme

Wegen Softwarebeschränkungen in der zu verarbeitenden Datenmenge bzw. Programmierbeschränkungen des verwendeten Statistik-Programm-Paketes STATISTICA mussten einige Programme für jeden Parameter modifiziert werden (Dateinamen, zu lesende Dateien, zu berechnende Parameter). Es wird hier auf das Statistikprogramm SAS verwiesen, mit dem ein komplexes verschachteltes Analyseprogramm konstruiert werden kann, so dass mit diesem eine Komplettanalyse mit einem Programm möglich ist. Aber auch dann erübrigt es sich nicht, die Analysen zu interpretieren.

Im folgenden werden die Routinen für die einzelnen Analyseschritte kurz beschrieben:

- Das Programm **Zeitkorrektur** rechnet die Zeitpunkte der Erdbeben auf die lokale Zeit der Monitoringmessungen um. Die Erdbebenkataloge liegen in der Regel im Weltzeitformat vor.
- Das Programm **Sum-X** berechnet die e -Parameter und summiert (da diskrete Zeitreihen vorliegen) alle einzelnen Erdbebenparameter innerhalb von n Zeiteinheiten (Tage, Stunden) für alle gewünschten Transformationen zur Erdbebenaktivität $E_{n, Typ}$.
 - vor den jeweiligen Monitoringmessungen (abgekürzt mit Typ = vor)
 - nach den jeweiligen Monitoringmessungen (abgekürzt mit Typ = nach)
 - je vor und nach den jeweiligen Monitoringmessungen (abgekürzt mit Typ = sym)

Damit wird die diskrete Erdbebenaktivität auf die Zeiteinheiten der Monitoringzeitreihe überführt. Dadurch werden beide Zeitreihen miteinander vergleichbar.

- Das Programm **Anomalien** findet Anomalien in den Monitoringzeitreihen nach gegebener Definition.
- Die Programme **Differenzen**, **gleitende Mittel**, **Lag** sind kleine Programme, welche die Daten in gewünschter Art und Weise transformieren: Berechnung der gleitenden Mittelwerte, Differenzen, Zeitverschiebungen (lag).
- Das Programm **Zusammenführen der Monitoringparameter und der Erdbebenparameter** führt Erdbebenparameter und Monitoringparameter bzw. die Faktorwerte für jeden Erdbebenparameter einzeln für die spätere Zusammenhangsanalyse in einer Datei zusammen.

5 Durchführung der Analysen

- Das Programm **Multiple Korrelationen (MR)** berechnet die Multiplen Regressionen zwischen den Summen der Erdbebenparameter (Erdbebenaktivitäten) und den Monitoringparametern bzw. ihren Faktorwerten und speichert die Ergebnisdateien in einem Ordnerschema, damit die einzelnen Zwischenergebnisse wie Korrelationskoeffizienten, die b-Koeffizienten, Wahrscheinlichkeits-Niveaus später weiterverarbeitet werden können.
- Das Programm **Korrelationen lesen (Kor-lese)** und das Programm **Korrelationen zusammenführen (Kor-zus)** lesen aus den Protokolldateien der Multiplen Regressionen die Korrelationskoeffizienten zwischen beobachteten und geschätzten Funktionen und legen sie in einer Matrix ab. Eine Matrix enthält in den Spalten die Korrelationskoeffizienten für einen Erdbebenparameter und alle Transformationen der Monitoringparameter für alle betrachteten Erdbebenaktivitäten $E_{n, \text{Typ}}$. Genauso werden auch die b-Koeffizienten der Multiplen Korrelationen und die Signifikanzniveaus für die Ablehnung der H_0 (t-Test) in Matrizen gespeichert.
- Das Programm **Kreuz-Korrelationen** errechnet die Zusammenhänge für den bivariaten Fall. Die Ergebnisse werden wie im multiplen Fall gelesen und in Matrizen gespeichert.

6 Beschreibung der Datensätze

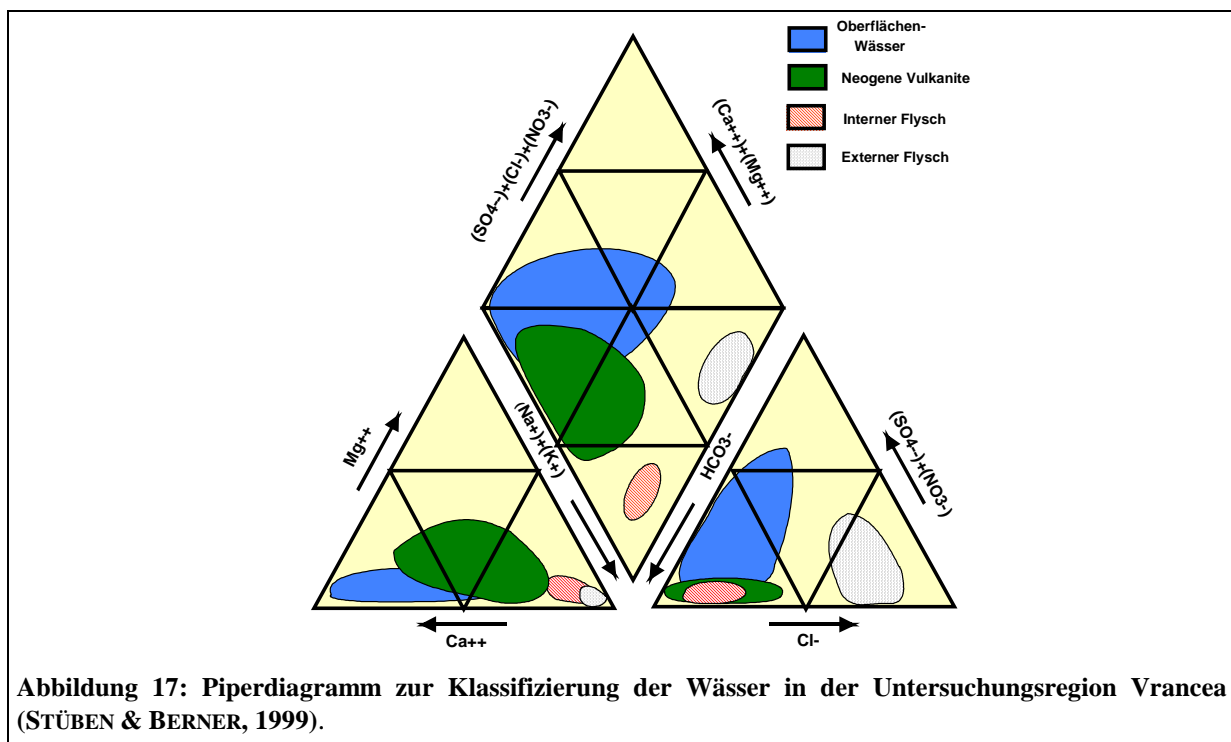
6.1 Vrancea, Rumänien: Bohrungen Turia und Covasna

6.1.1 Monitoringstationen

Es wurden zwei Bohrungen bei den Orten Turia und Covasna beprobt. Um geeignete Probenorte für die Untersuchung zu identifizieren, wurden im Rahmen des Teilprojektes A5 des Sonderforschungsbereiches 461 „Starkbeben“ 72 Wasseraustrittsstellen (Quellen, Bohrungen, Oberflächenwässer) im südlichen Teil der Ostkarpaten beprobt. Diese wurden am Institut für Petrographie und Geochemie der Universität Karlsruhe analysiert. Die Charakterisierung der beprobten Wässer ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Bohrungen Covasna und Turia können in den sogenannten externen Flysch eingeordnet werden (vergleiche Wasserchemie im Anhang).

Zusätzlich wurden in Zusammenarbeit mit italienischen Forschern von Dr. Zsolt Berner vom Institut für Petrographie und Geochemie (MINISSALE ET AL., 1997; ABBADO ET AL., 1997) auch He-Isotopenanalysen durchgeführt. Sie ergaben hohe $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse. Die Bohrungen liegen in Gebieten mit $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnissen zwischen 0,6 und 1,4 (MINISSALE ET AL., 1997; ABBADO ET AL., 1997). Typische krustale $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse liegen im Bereich von 0,02. Dagegen liegen die $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnisse in MORB-Basalten bei ca. 8. Diese Ergebnisse weisen auf eine Mantelkomponente in der Gasexhalation hin. Zusätzlich wurde ein hoher Zusammenhang zwischen $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnissen und CO_2 -Partialdruck der Gasemanation nachgewiesen. Nach IANCU & APOSTOL (1980) besteht somit im Untersuchungsgebiet ein enger Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Mineralwässern, ihrem CO_2 -Partialdruck und Verwerfungen bzw. in der Tiefe ablaufenden magmatischen Prozessen.

Die hohen Konzentrationen an Na^+ und Cl^- (bei relativ niedrigen SO_4^{2-} Konzentrationen), welche einen Einfluss einer Tiefenkomponente (nicht oberflächennahe) induzieren, das temporäre artesische Verhalten der Bohrungen im Zusammenhang mit hohem CO_2 -Partialdruck und die hohen $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnissen waren ein Entscheidungsgrund für die Auswahl der Beprobungsorte.



Monitoringstation Turia:

Koordinaten: 46,03° N 25,92°E, (in Dezimalgrad)

Eine ausführliche Dokumentation über die Beobachtungen bei der Bohrung, die Geologie und Hydrogeologie wird in einem erhaltenen Teil des Bohrprotokolls gegeben. Leider war es nicht möglich, das Gesamtdokument zu erhalten. Für mögliche spätere Untersuchungen wird der gesamte erhaltene Text wiedergegeben. Er gibt einen Überblick über die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse. Anmerkungen wurden in Anführungszeichen gesetzt.

Auszug aus dem Bohrprotokoll: (Übersetzung aus dem Rumänischen)

Bohrung Turia

Beprobung: in den artesischen Phasen der Bohrung.

Durchgeführte Arbeiten während der Bohrung:

Veliciu führte im Jahr 1975 in Balványos geothermische Untersuchungen durch und fand geothermische Gradienten von 10 bis 15 °C/100m. Auf Grund der Messungen wurden geothermische Anomalien lokalisiert, wodurch der Schluss nahe lag, in der Tiefe geothermische Aquifere anzutreffen.

Für die Absicherung der geothermischen Anomalie wurde 1979 die Bohrung 4806 am rechten Ufer des Baches Torija (Turia) auf dem Grund der Gemeinde Balványos abgeteuft. Die Bohrung wurde mit einer P 50 ("russisches Gerät") durchgeführt, wobei alle 200 m eine mechanische Kerngewinnung erfolgte (nicht kontinuierlich).

"Sie ist artesisch geysirartig (alle 10 min für ca. 5 min ein Ausbruch)."

Bohrbeschreibung:

0 bis 15 m	Kiese, kompakte Sande, grau-weißlich, Quartär
15-1202,8 m	curbicortikaler Flysch: Flyschfazies gewölbt, Schichtgrenzflächen: oberes Abt bis unteres Alb im folgenden Lithologie:
15-125 m	grau-weißliche Mergel, glimmerhaltig, Kalkkonkretionen
125-157 m	feine kompakte Sandsteine, mergel-kalkiger Zement (Matrix)
157-400 m	Wechsellagerung A) kompakter Sandstein mit kalkigem Zement und Argilite (Tonsteine) B) kompakte Mergel ± Kalkkonkretionen . überwiegend Sandsteinfazies
400-750	Wechsellagerung von A) Mergel und ± kalkigen Konkretionen B) Sandsteine mit mergel-tonigem Zement, untergeordnet sandige Mergel anzutreffen dominieren der mergeligen Fazies
750-1202,8 m	Wechsellagerungen kompakter Sandsteine mit kalkigem Zement aleuro-psamitisch („aleuro: größer als pelitisch“) mit grauen kompakten Mergeln mit kalkigen Konkretionen.
1202,8-1203 m	Andesit: mit Pyroxenen, porphyrische Struktur, massive Textur, neogenes Alter.

Während der Bohrung wurden Siebproben in 2-metrigem Abstand und Kernproben entnommen:

von

182-185 m; 400-404 m; 602-603,5 m; 1020-1022 m; 1200-1203 m

Insgesamt 11 Proben (Siebproben, die auf 10 Meter-Abstände kumuliert wurden und mechanischen Kernproben) wurden mikropaläontologisch untersucht, um das Alter der Formation zu bestimmen.

Es wurden Proben petrographisch und petrophysikalisch untersucht bei I.C.P.P.G. Bukarest.

Ergebnisse:

Während der Durchführung der Bohrung kam es ab einer Tiefe von 180 m immer wieder zu CO₂-Ausbrüchen. Besonders hohe Intensitäten wurden bei 180-240 und 700-790 m registriert.

Das CO₂ wurde offensichtlich gespeichert, so dass es hin und wieder zu starken Ausbrüchen des Bohrschlammes kam.

Zur Vermeidung wurde ein sehr dichter Bohrschlamm (1,6 – 1,9 kg /dm³) verwendet.

Es gab keine Kreisverluste, also Schlammverluste („Anmerkung:“ es wurden keine größeren Hohlräume angebohrt).

6 Beschreibung der Datensätze - 6.1 Vrancea, Rumänien: Bohrungen Turia und Covasna

Verrohrung:

0-154,5 m: \varnothing 13 3/8 "

0-608 m: \varnothing 9 5/8 "

0-1196 m: \varnothing 5 1/2 "

Bei Beendigung der Bohrung wurde das Loch verschlossen mit einer T-Abdeckung 2".

Die geophysikalischen Bohrlochmessungen bestanden aus elektrischen, radioaktiven und thermischen Untersuchungen.

Die Temperatur wurde mit der thermoelektrischen Methode ermittelt. Um die maximale Temperatur zu messen, wurde die Sonde 24 Stunden in Ruhe gelassen.

Temperatur:

300 m = 21 °C

500 m = 26 °C

600 m = 28 °C

700 m = 41 °C

800 m = 44,5 °C

850 m = 45,5 °C

900 m = 47 °C

950 m = 49 °C

100 m = 50 °C

1100 m = 51,5 °C

1150 m = 53,5 °C

1200 m = 57 °C

Dies entspricht einem durchschnittlichen Temperatur-Gradienten von **3-6°C/100 m**, mit der Ausnahme des Bereiches von 600 bis 700 m, in dem ein Gradient von **13°C/100 m** gemessen wurde.

Hydrogeologische Experimente:

Abschnitte der verrohrten Bohrung, welche an Hand des geophysikalischen Bohrlogs als mögliche Aquifere identifiziert worden sind, wurden mit Hilfe von Siebsprengungen gelöchert („Anmerkung: Kartusche mit Kügelchen wird zur Explosion gebracht → dadurch wird ein Siebeffekt erzielt“). Das benutzte Instrument: J80 erzeugt eine Dichte von 12 Kugeln/m von unten nach oben. Die Intervalle wurden nach den jeweiligen Untersuchungen mit Zement verschlossen/isoliert, um so die einzelnen Abschnitte zu untersuchen.

Beprobungsversuche: Sog und freie Entleerung.

Der Wasseraustritt hatte intermittenten Charakter („Anmerkung:“ → nicht kontinuierlich sondern periodisch). Dies lässt sich durch den Anstieg des CO₂-Partialdruckes erklären. Es wurden 7 Etappen untersucht.

1.) von 1165-1130 m (35 m) gelöchert

10 Tage lang wurde Wasser mit Pausen abgepumpt (9.-19. August). Insgesamt wurden 30800 l Wasser entnommen.

Mineralisation: 19,3 g/l

2.) von 1100-1070 m (30 m)

10 Tage lang wurde Wasser mit Pausen abgepumpt (19-29. August). Insgesamt wurden 43200 l Wasser entnommen.

Mineralisation: 33,574 g/l

3.) von 1025-1018 m (7 m)

10 Tage lang wurde Wasser mit Pausen abgepumpt (29. August- 9. September). Insgesamt wurden 44000 l Wasser entnommen.

Mineralisation: 29,159 g/l

4.) 915-900 m (15 m)

9 Tage lang wurde Wasser mit Pausen abgepumpt (8-17 September). Insgesamt wurden 35300 l Wasser entnommen.

Mineralisation: 134,4 kg/vag

5.) 877-867 m und 840-825 m

9 Tage lang wurde Wasser mit Pausen abgepumpt (17-26. September). Insgesamt wurden 15900 l Wasser entnommen.

Mineralisation: 219,2 kg/vag

6.) 785-765 (20 m)

6 Beschreibung der Datensätze - 6.1 Vrancea, Rumänien: Bohrungen Turia und Covasna

9 Tage lang wurde Wasser mit Pausen abgepumpt (26. September-8. Oktober). Insgesamt wurden 27700 l Wasser entnommen.

Mineralisation: 189,9 kg /vag.

Nach 4,5 Stunden pumpen mit Unterbrechung wurde Salzwasser mit 0,5 l/ sek. gefördert. Nach nochmaligem abpumpen wurde keine artesische Förderung mehr beobachtet.

7.) 240-225 und 185-175

Mineralisation: ?? (kein Eintrag)

Vom 8. bis 31. Oktober wurden Absenkversuche durchgeführt, um das Bohrloch zu säubern und um das Bohrloch für die artesische Wasserförderung zu stimulieren. Dabei wurde der Wasserspiegel auf 130 bis 160 m gesenkt. In Pumpenpausen hat die Bohrsonde mit Unterbrechungen Wasser gefördert. Mit unterschiedlich starken Schüttungen wurde CO₂-haltiges Wasser gefördert.

Bei einem Durchmesser von 5,5'' lag die Schüttung zwischen 30 und 8 l/min. Zum Schluss lag die Schüttung bei 8 l/min. Die Schüttung war vom Volumen des akkumulierten CO₂ abhängig. Um die Bohrung zu größerer Förderung zu stimulieren hat man einen Rezeptivitätsversuch mit 10 000 l 4% D5 („unbekannte Zusammensetzung“) durchgeführt.

Der Aquifer hat die Wassermenge bei einem Druck von 35 Atmosphären angenommen. Eine Verbesserung der Schüttung konnte dadurch nicht erreicht werden. Mit diesem Versuch wurden die Versuche eingestellt.

Während der Versuche wurden bei jeder Etappe für chemische Untersuchungen im Labor IGPSMS, Bukarest, Wasserproben entnommen.

Ende Auszug Bohrprotokoll.

Monitoringstation Covasna:

Koordinaten: 45,85° N 26,16°E (in Dezimalgrad)

Durch die chaotischen Verhältnisse und den gesellschaftlichen Umbruch in Rumänien war es nicht möglich, das Bohrprotokoll zu erhalten.

Die Bohrung ist wie die Bohrung Turia ebenfalls temporär artesisch und enthält eine Mantelkomponente ³He in ihrer Ausgasung, weswegen sie ebenfalls als geeignet für diese Untersuchung eingestuft wurde.

6.1.2 Geologie und Tektonik:

In der Vrancea-Zone treffen sich drei plattentektonische Einheiten: die (Ost-)europäische Platte, die Moesische Platte und die Tisia-Dacia-Platte. Zwischen der Moesischen und der europäischen Platte befinden sich zwei Störungszonen: die Intramoesische Störungszone im Südwesten und die Trotus/Peceneaga-Camena Störung im Nordosten (GIRBACEA & FRISCH, 1997). Die beiden beprobten Bohrungen befinden sich zwischen diesen beiden Störungssystemen in den Flyschdecken der östlichen Karpaten. Sie liegen im Südosten des Haghita Vulkangebietes und im Nordwesten der Vrancea-Zone.

6.1.3 Erdbeben und Erdbebenverteilung

Die seismische Aktivität der Vrancea-Zone macht dieses Gebiet für die hier zu untersuchende Fragestellung zu einem nahezu idealen Labor. Die Seismizität der Vrancea-Zone mit ihren überwiegend Mitteltiefen Erdbeben (Tiefe: 50-220 km) ist auf einen sehr engen Raum (ca. 30 x 70 km) beschränkt (siehe Abbildung 18). Daneben gibt es zahlreiche intrakrustale Erdbeben, welche weiter gestreut vorkommen und oft an die größeren regionalen Störungen gebunden sind.

Abbildung 19 verdeutlicht die Verteilung der Erdbeben mit der Tiefe. Die Verteilung ist für die spätere Interpretation der Daten wichtig. Erdbeben mit einer Entfernung größer 70 km von der Bohrung Turia sind ausschließlich flache Erdbeben mit Tiefen < 40 km.

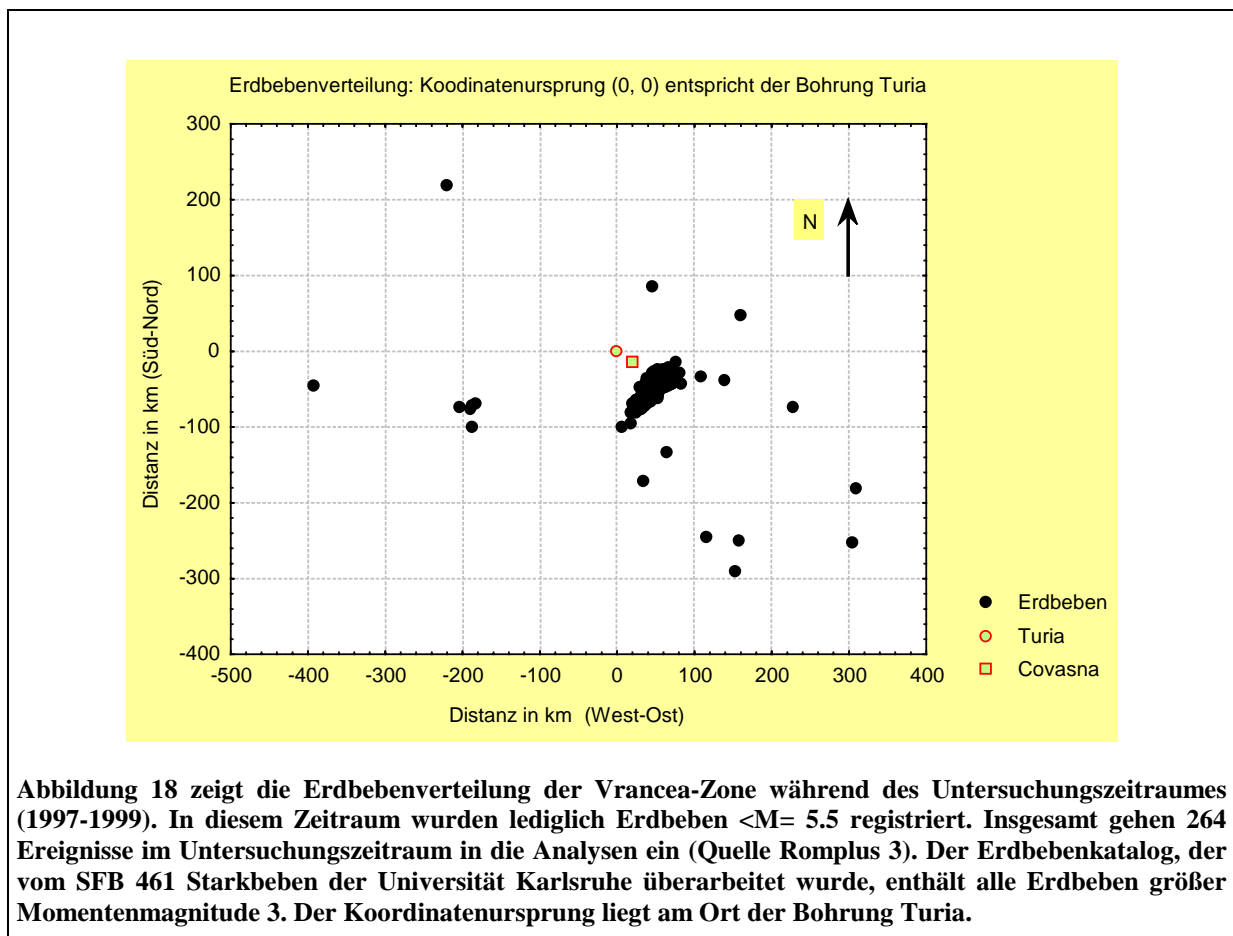


Abbildung 18 zeigt die Erdbebenverteilung der Vrancea-Zone während des Untersuchungszeitraumes (1997-1999). In diesem Zeitraum wurden lediglich Erdbeben <M= 5.5 registriert. Insgesamt gehen 264 Ereignisse im Untersuchungszeitraum in die Analysen ein (Quelle Romplus 3). Der Erdbebenkatalog, der vom SFB 461 Starkbeben der Universität Karlsruhe überarbeitet wurde, enthält alle Erdbeben größer Momentenmagnitude 3. Der Koordinatenursprung liegt am Ort der Bohrung Turia.

Zwischen 40 und 60 km Tiefe existiert für den Untersuchungszeitraum eine seismische Lücke. Dies deckt sich mit den bisherigen Erfahrungen (siehe Erdbebenkatalog ROMPLUS 3). Erdbeben mit einer

Tiefe größer 60 km befinden sich in der duktilen Zone. Dort sollte das „dilatancy“-Modell (Kapitel 2.2.2) noch anwendbar sein. Allerdings herrschen in der Vrancea-Zone besondere und bisher nicht eindeutig geklärte tektonische Verhältnisse (MÜLLER ET AL., 1999; GIRBACEA & FRISCH, 1997). Vor allem die Geometrie, der anscheinend nicht mehr aktiven Subduktionszone, ist bisher nicht eindeutig einem Modell zugeordnet worden. Derzeit werden mindestens vier Modelle diskutiert. Im Sonderforschungsbereich 461 „Starkbeben“ an der Universität Karlsruhe wird derzeit das Modell einer Subduktion unterhalb der miozänen Sutur mit einem anschließenden Abbrechen der subduzierten Kruste (obere Lithosphäre) und mit anschließender Delamination der unteren Lithosphäre (lithosphärischer Mantel) vorgeschlagen. Die untere Lithosphäre brach nicht ab. Der Komplex aus abgebrochener oberer, subduzierter Lithosphäre und delaminierter unterer Lithosphäre tauchte ab und vollzog so ein sogenanntes „roll back“ oder Zurückrollen nach Südosten“, so dass sich der „slab“ (Streifen) nun fast vertikal unter dem Vortiefenbecken befindet. Die nun fehlende Lithosphäre wurde durch weniger dichtes Material der Asthenosphäre ersetzt, welches so ein Anheben des Akkretionskeiles induzierte. Kinematische Gravitationsmodellierungen von SPERNER & LILLIE (2000) untermauern dieses Szenario. Ungeklärt ist allerdings noch, ob sich die Erdbeben in der duktilen delaminierten Lithosphäre ereignen, was nach bisherigen Modellen nicht sein darf, oder ob sie in der subduzierten Kruste stattfinden. Die bisherigen Ergebnisse liefern kein eindeutiges Bild.

Als Quelle für die Erdbeben, diente der vom Sonderforschungsbereich 461 (Universität Karlsruhe) überarbeitete Erdbebenkatalog „Romplus 3“.

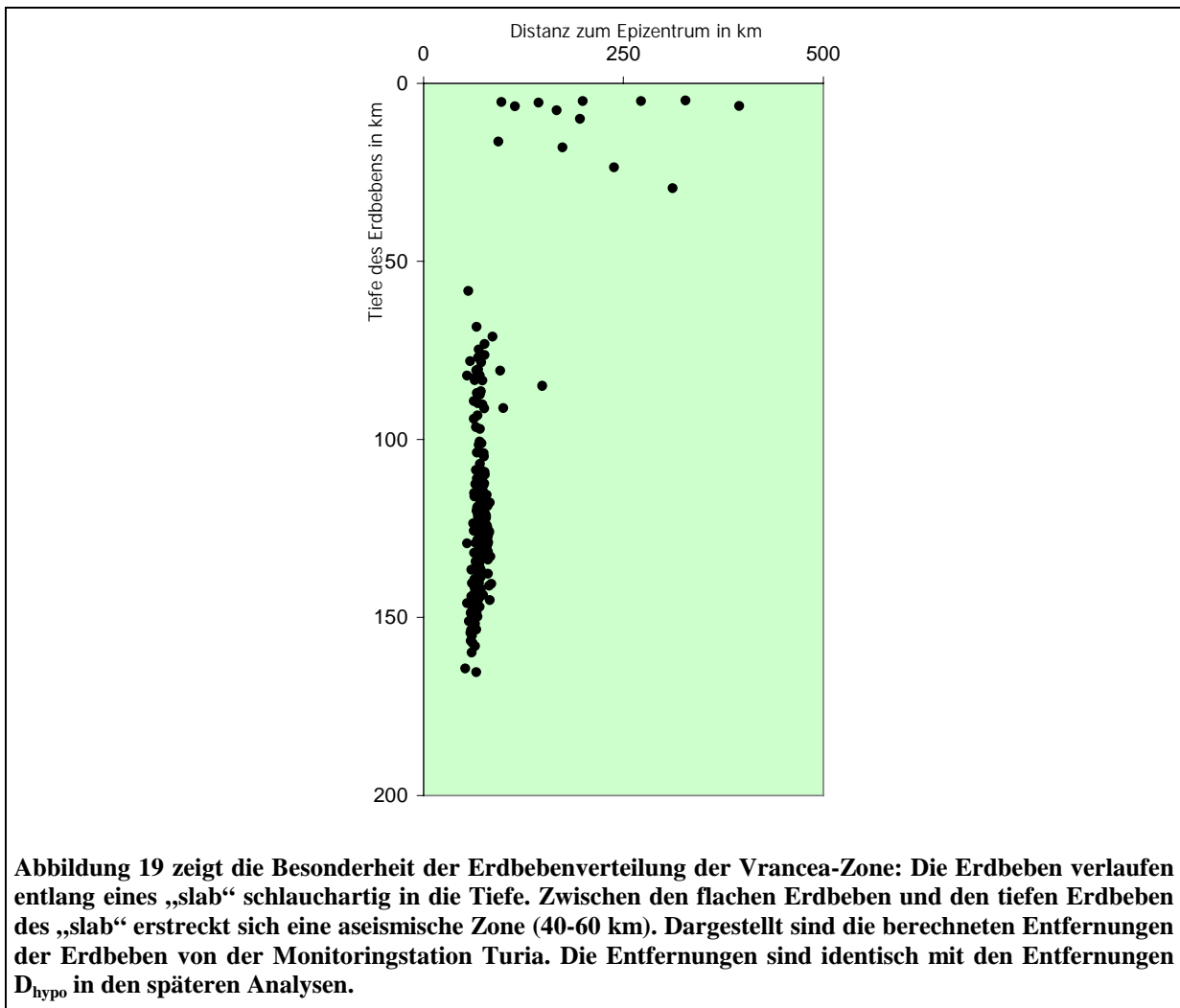


Abbildung 19 zeigt die Besonderheit der Erdbebenverteilung der Vrancea-Zone: Die Erdbeben verlaufen entlang eines „slab“ schlauchartig in die Tiefe. Zwischen den flachen Erdbeben und den tiefen Erdbeben des „slab“ erstreckt sich eine aseismische Zone (40-60 km). Dargestellt sind die berechneten Entfernungen der Erdbeben von der Monitoringstation Turia. Die Entfernungen sind identisch mit den Entfernungen D_{hypo} in den späteren Analysen.

6.1.4 Die Monitoringzeitreihen

Vom 11.8.1997 bis zum 12.6.1999 wurden beide Bohrungen im Abstand von 14 Tagen 52 mal beprobt. Die Analysen wurden unter Dr. Zsolt Berner am Institut für Petrographie und Geochemie der Universität Karlsruhe im Rahmen des SFB-Projektes „Seismogeochemische Signale und Stofftransportprozesse im krustalen Spannungsfeld der Vrancea-Subduktionszone“ (SFB 461: Starkbeben -Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmassnahmen) durchgeführt.

Folgende Variablen wurden untersucht:

Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe (gesamt), F^- , Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} , V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Cd, Sb, Cs, Ba, La, Tl, Pb, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{CO}_2}$, $\delta^{34}\text{S}$, Temperatur in °C, pH, Leitfähigkeit.

Wegen fehlender Messwerte oder zu geringen Konzentrationen im Wasser wurden nicht alle analysierten Variablen in der Untersuchung berücksichtigt.

- Für die Untersuchung des Standortes Turia wurden folgende Parameter nicht berücksichtigt: Alkalinität, La, Y, $\delta^{34}\text{S}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{CO}_2}$.
- Für die Untersuchung des Standortes Covasna wurden folgende Parameter nicht berücksichtigt: Alkalinität, Sc, Y, Ag, Cd, Sb, Tl, Th, U, $\delta^{18}\text{O}_{\text{CO}_2}$, $\delta^{34}\text{S}$.

Die vollständigen Analysedaten befinden sich im Anhang, Kapitel 13.

Beide Datensätze wurden mit Hilfe von Statistica 5.5 einer Faktorenanalyse mit standardisierter Varimax-Methode unterzogen. (Zur Durchführung der Methode siehe BORTZ (1995) und BACKHAUS ET AL.(1996)).

Fehlende Werte im Datensatz wurden durch Mittelwerte ersetzt. Lagen Messwerte unter der Nachweisgrenze, wurden sie durch die Hälfte der Nachweisgrenze ersetzt (in der Tabelle im Anhang mit „< Zahl“ gekennzeichnet).

Die Auswahl der Faktoren erfolgte mit Hilfe des „scree“-Tests, wenn die Bedingung Eigenwert > 1 erfüllt war.

Ziel war es, die Vielzahl von Variablen auf einige wenige erklärende Faktoren zu reduzieren. Für die Bohrung Turia wurden 8 Faktoren und für Covasna 10 Faktoren gefunden.

Im Anhang befindet sich die Tabelle mit den Faktorladungen der einzelnen Variablen.

Faktorenanalyse Turia:

In Tabelle 4 sind die signifikanten Variablen mit Faktorladung $> 0,7$ zusammengefasst.

In Tabelle 4 in Klammern geschriebene Variablen sind keinem Faktor eindeutig zuzuordnen, weil die gefundene Varianz von unterschiedlichen Faktoren „kontrolliert“ wird. In der Theorie der Faktorenanalyse geht man davon aus, dass die erklärende Varianz auf einem Faktor dem Quadrat der Faktorladung entspricht. Ist mehr als die Hälfte der Varianz einer Variablen durch einen Faktor erklärt, so entspricht dies einer Faktorladung von 0,707. Als Standard werden Variablen mit einer Faktorladung größer 0,7 als dem Faktor zugehörig interpretiert.

Die Faktorwerte aus der Faktorenanalyse wurden nun benutzt, um die $E_{n, \text{nach}}$ -Zeitreihen (siehe Kapitel 5) mit Hilfe der linearen Multiplen Regression zu schätzen. Die Faktorwerte sind im Anhang Kapitel 13 dargestellt.

Tabelle 3: Faktorladungen der Elemente auf den acht Faktoren der Bohrung Turia. Ant. Ges. steht für den relativen Anteil an der Gesamten Varianz.

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5	Faktor 6	Faktor 7	Faktor 8
Na	0,93	0,09	0,16	-0,02	0,02	-0,08	0,00	0,05
K	0,82	-0,03	0,20	0,00	0,13	0,04	0,16	-0,05
Mg	(0,57)	-0,17	0,15	0,22	0,08	(0,63)	-0,17	0,22
Ca	(0,45)	-0,07	0,03	-0,15	0,06	-0,22	0,14	0,39
Fe	-0,02	0,73	0,00	0,16	0,19	0,34	0,28	0,03
F	0,40	-0,38	0,14	0,22	0,18	(0,49)	0,09	-0,18
Cl	0,92	-0,03	0,11	0,09	-0,07	0,05	-0,08	0,09
Br	(0,62)	0,05	(0,53)	0,20	0,21	0,23	0,18	-0,06
SO4	-0,77	0,10	-0,05	-0,02	0,15	0,14	0,05	0,28
V	-0,02	0,78	0,14	0,13	-0,02	-0,20	0,34	-0,09
Cr	0,01	0,22	0,01	0,24	0,04	0,01	0,80	-0,18
Mn	0,12	-0,45	0,10	-0,26	0,08	-0,36	-0,07	(-0,56)
Co	0,27	0,06	(0,46)	(0,46)	0,46	0,29	-0,18	0,22
Ni	-0,07	0,16	0,05	0,85	0,02	0,02	-0,05	0,09
Cu	0,12	0,28	0,28	0,38	-0,17	0,06	0,22	-0,37
Zn	-0,10	0,17	0,16	-0,14	-0,21	0,13	0,73	0,09
Ga	-0,06	-0,15	0,08	0,37	0,56	-0,38	0,22	0,33
As	0,12	-0,08	0,11	0,08	0,07	-0,71	-0,09	0,02
Rb	0,11	0,27	0,81	-0,11	0,19	-0,11	0,22	-0,12
Sr	0,12	-0,08	0,84	-0,14	0,06	-0,21	0,08	-0,26
Cs	0,20	0,00	0,92	0,18	0,07	0,04	0,03	0,09
Ba	0,29	-0,39	0,70	0,27	-0,04	0,10	0,05	-0,14
La	-0,18	-0,30	(-0,58)	-0,05	0,08	-0,22	0,11	0,37
Pb	0,07	0,05	0,09	-0,10	0,85	-0,01	-0,08	-0,08
$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$	0,77	-0,01	0,16	-0,26	0,21	0,25	0,02	-0,05
$\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3}$	-0,08	-0,13	-0,12	-0,13	(-0,56)	(-0,51)	-0,30	-0,12
T°C	-0,01	-0,02	-0,29	0,11	0,02	0,02	-0,07	0,82
pH	0,33	0,08	0,10	-0,17	0,27	0,02	0,76	0,07
Leitfähigkeit	(0,50)	0,01	(0,46)	0,16	0,10	-0,05	0,26	-0,34
Erklärte Varianz	5,32	2,12	4,16	1,89	2,01	2,25	2,43	2,07
Proportional zur Gesamtvarianz	0,18	0,07	0,14	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07

Tabelle 4: In der Tabelle sind die signifikanten Variablen der einzelnen Faktoren dargestellt (Faktorladungen > 0,7) und die nicht signifikanten mit einer Ladung > 0,45 und < 0,7 in Klammern.

Faktoren:	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5	Faktor 6	Faktor 7	Faktor 8
Variablen:	+Na +K +Cl $+\delta^{18}\text{O}_{(\text{H}_2\text{O})}$ - SO_4^{2-} (+LF) (+Mg) (+Ca) (+Br)	+Fe +V (+Mn)	+Rb +Sr +Cs +Ba (+Br) (+Co) (-La) (+LF)	+Ni (+Co)	+Pb (+Co) (+Ga) (- $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3}$)	-As (+Mg) (+F) (- $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3}$)	+Cr +Zn +pH	+T°C (-Mn)
Anteil erklärte Varianz von 1:	0,18	0,07	0,14	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07

Tabelle 5: Die Auflistung der Kommunalitäten zeigt, dass der Großteil der analysierten Parameter durch die acht extrahierten Faktoren erklärt wird. Variablen mit einer Erklärung <0,7 sind fett gekennzeichnet.

erklärte Varianz	Von 4 Faktoren	Von 5 Faktoren	Von 6 Faktoren	Von 7 Faktoren	Von 8 Faktoren	Multiple R-Quadrat
Na	0,90	0,90	0,91	0,91	0,91	0,96
K	0,72	0,73	0,73	0,76	0,76	0,88
Mg	0,43	0,43	0,84	0,86	0,91	0,94
Ca	0,24	0,24	0,29	0,30	0,46	0,59
Fe	0,56	0,59	0,71	0,79	0,79	0,87
F	0,37	0,41	0,65	0,66	0,69	0,89
Cl	0,86	0,86	0,87	0,87	0,88	0,95
Br	0,70	0,75	0,80	0,83	0,84	0,91
SO ₄	0,60	0,62	0,64	0,65	0,73	0,86
V	0,65	0,65	0,70	0,81	0,82	0,87
Cr	0,11	0,11	0,11	0,74	0,78	0,71
Mn	0,29	0,30	0,43	0,43	0,75	0,80
Co	0,50	0,72	0,80	0,83	0,88	0,93
Ni	0,76	0,76	0,76	0,77	0,77	0,73
Cu	0,32	0,35	0,35	0,40	0,54	0,61
Zn	0,08	0,13	0,14	0,67	0,68	0,69
Ga	0,17	0,49	0,63	0,68	0,79	0,71
As	0,04	0,04	0,54	0,55	0,55	0,67
Rb	0,76	0,79	0,81	0,85	0,87	0,96
Sr	0,74	0,75	0,79	0,80	0,87	0,91
Cs	0,91	0,92	0,92	0,92	0,93	0,97
Ba	0,81	0,81	0,82	0,82	0,84	0,87
La	0,46	0,47	0,52	0,53	0,67	0,78
Pb	0,02	0,75	0,75	0,76	0,76	0,78
$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$	0,68	0,72	0,78	0,78	0,79	0,81
$\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3}$	0,06	0,37	0,63	0,72	0,73	0,85
T°C	0,10	0,10	0,10	0,10	0,78	0,83
pH	0,16	0,23	0,23	0,80	0,81	0,77
Leitfähigkeit	0,49	0,50	0,50	0,57	0,68	0,75

Interpretation der Faktoren der Bohrung Turia:

Die Temperatur von mehr als 10 °C und das CO₂-reiche intermittierende, artesische Verhalten sowie die hohe Ionenkonzentration der Bohrung sind ein Zeichen für eine hydrothermale Beeinflussung des Wassers bzw. durch einen Einfluss von Tiefenwässern.

Faktor 1: Die Variablen Cl⁻ und Na⁺ kontrollieren maßgeblich die Salinität des Wassers. Die Einzelanalysen (siehe Anhang) zeigen, dass Natrium und Chlorid zu über 90 % der Mineralisation beitragen. Zusammen mit den Erkenntnissen aus dem Bohrprotokoll, welches eine hohe Gesamtsalinität im unteren Bereich der Bohrung belegt (bis > 30 g/l), kann dieser Faktor möglicherweise als Tiefenkomponente interpretiert werden. Die positive Korrelation des $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ bestätigt die Hypothese der Tiefenkomponente.

SO₄²⁻ korreliert negativ mit diesem Faktor. Dies stimmt nach SEIM & TISCHENDORF (1990, Seite 440) mit typischen hydrothermalen Tiefenwässern überein. Sulfat ist in der Regel ein Indikator für junge Grundwässer. Da diese Variable negativ mit Faktor 1 korreliert, scheint dies die Hypothese einer Tiefenkomponente zu bekräftigen.

Faktor 2 erklärt die Variablen Fe(gesamt) und V. Beide Variablen kommen häufig zusammen in eisenhaltigen Silikaten vor (SEIM & TISCHENDORF, 1990, Tabelle im Anhang).

Faktor 3 erklärt die Gruppe Rb, Cs, Sr und Ba. Sr wird bevorzugt in kalkiger Matrix eingebaut (als Substitution für Ca). Ba, Rb und Cs sind bevorzugt an Tonminerale gebunden. Dies steht in Übereinstimmung mit dem Bohrprofil: Kalkige Matrix im Sandstein sowie Mergel mit Kalkkonkretionen. Im tieferen Bereich der Bohrung herrschen Sandsteine mit toniger Matrix vor.

Faktor 4 korreliert nur mit einem Element, dem Ni, hoch. Untergeordnet erklärt dieser Faktor auch Co.

Auch **Faktor 5** korreliert nur mit einem Element hoch: Pb. Untergeordnet auch Ga, ebenfalls untergeordnet Co und negativ korreliert $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3}$. Ein negativer Trend von $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3}$ kann als „nicht Tiefeneinfluss“ interpretiert werden.

Faktor 6 korreliert mit As, **Faktor 7** mit pH, Cr und Zn.

Faktor 8 wird hauptsächlich durch die Temperatur repräsentiert. Dies kann wiederum als möglicher Tiefenindikator interpretiert werden.

Die Faktoren 1, 3 und 8 lassen sich mit den hier vorliegenden Informationen (Bohrprotokoll, Geologie) interpretieren. Für die anderen Faktoren ist eine Interpretation schwierig, weil zu wenig Informationen vorliegen.

(Anmerkung zur Faktorenanalyse: Die Faktorenanalyse trennt die Faktoren auf Basis der Varianz der gemessenen Spezies. Die Gesamtkonzentration fließt nicht in die Faktorenanalyse ein.)

Faktorenanalyse Covasna:

Die Faktorenanalyse der Bohrung Covasna ist ohne nähere Informationen nicht mit gutem Gewissen interpretierbar. Es gibt keinen Faktor, welcher eine eindeutige chemische Tiefenkomponente repräsentiert. Faktor 1, auf welchem die Temperatur hoch korreliert ist ein Indiz für den Einfluss einer Tiefenkomponente (nicht oberflächennahe), welcher sich in den hohen Na^+ - und Cl^- -Konzentrationen sowie dem CO_2 -reichen intermittenten artesischen Verhalten widerspiegelt. Die Variablen Na^+ - und Cl^- bilden aber getrennte Faktoren. Anscheinend wird die Varianz durch unterschiedliche Faktoren gesteuert, auch wenn die Gesamtkonzentrationen der Ionen zusammen auf hohem Niveau bleiben. Siehe dazu die Anmerkung im obigen Absatz.

Tabelle 6: Faktorladungen der Faktorenanalyse für die Wasserchemie der Bohrung Covasna. Prp. zur Gesamtvr.: Proportional zur Gesamtvarianz.

	FAKTOR	FAKTOR	FAKTOR	FAKTOR	FAKTOR	FAKTOR	FAKTOR	FAKTOR	FAKTOR	FAKTOR
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na	0,10	0,01	0,05	0,01	0,01	0,01	-0,01	0,02	-0,95	0,01
K	0,11	(0,53)	-0,17	0,09	0,12	0,00	(0,57)	0,17	0,06	0,07
Mg	(0,49)	0,37	0,20	(0,58)	0,15	-0,19	-0,13	-0,11	0,10	0,08
Ca	-0,02	-0,02	-0,06	0,09	0,90	0,13	0,00	0,09	0,02	-0,07
Fe	-0,27	(-0,56)	0,09	0,01	0,43	0,17	0,00	-0,18	0,24	-0,04
F	0,05	0,77	-0,07	0,11	0,16	0,15	0,31	0,13	-0,08	-0,26
Cl	0,21	(0,53)	-0,17	0,31	0,15	0,28	(0,48)	0,04	0,01	-0,11
Br	-0,06	0,11	0,06	-0,03	0,01	0,04	0,09	-0,07	-0,03	-0,93
SO ₄	0,13	0,79	0,02	-0,08	0,12	0,00	0,12	-0,14	0,06	0,04
V	0,16	-0,26	-0,11	0,14	0,13	(-0,67)	-0,34	-0,26	0,12	-0,02
Cr	0,20	-0,01	-0,14	-0,09	-0,26	-0,81	-0,17	0,11	0,06	-0,04
Mn	(-0,67)	-0,13	-0,07	-0,05	0,32	(0,46)	0,01	-0,15	0,00	0,07
Co	0,09	-0,30	0,87	-0,04	-0,02	0,03	-0,11	0,05	0,04	0,00
Ni	0,24	0,04	0,86	0,27	0,09	0,01	-0,07	0,03	-0,02	-0,10
Cu	(-0,62)	-0,31	0,11	-0,01	0,13	-0,18	-0,10	0,23	-0,04	-0,11
Zn	-0,10	0,03	0,06	0,05	0,04	-0,11	0,76	-0,07	-0,07	-0,37
Ga	-0,01	0,11	-0,15	-0,08	-0,02	0,07	(0,63)	-0,07	-0,12	0,06
As	-0,05	(-0,63)	0,36	-0,18	0,17	0,11	0,34	0,26	0,04	0,16
Rb	-0,84	-0,13	-0,26	0,00	-0,09	0,16	0,17	0,17	-0,10	0,01
Sr	-0,82	-0,21	(-0,45)	0,00	0,02	0,16	0,13	0,02	-0,05	0,01
Cs	-0,05	0,08	0,15	-0,07	0,00	-0,70	0,34	-0,04	-0,09	0,11
Ba	-0,71	(0,44)	0,29	-0,10	-0,10	0,12	0,12	-0,20	-0,17	0,08
La	-0,02	0,07	0,12	0,91	-0,02	0,03	0,05	0,02	0,01	0,03
Pb	0,00	-0,19	-0,12	0,09	-0,87	0,01	-0,08	0,06	0,12	-0,05
$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$	0,14	-0,10	-0,25	0,31	-0,14	-0,03	-0,37	(-0,48)	-0,11	-0,12
$\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3}$	-0,39	0,04	-0,15	0,00	0,10	0,05	0,32	0,09	-0,74	-0,09
T°C	0,76	0,02	0,08	0,20	0,00	0,10	0,33	-0,19	-0,20	0,16
pH	0,15	0,08	0,00	-0,08	0,04	-0,03	0,12	-0,88	0,10	-0,04
Leitfähigkeit	-0,39	(0,44)	0,05	(-0,54)	0,02	-0,33	0,09	-0,10	0,17	0,04
<i>Erklärte</i>	4,19	3,44	2,31	1,91	2,14	2,24	2,52	1,49	1,72	1,23
<i>Proportional zur Gesamtvarianz</i>	0,14	0,12	0,08	0,07	0,07	0,08	0,09	0,05	0,06	0,04

6.1.5 Vergleich der e- und E-Parameter

In Abbildung 20 bis Abbildung 24 werden die Variationen verschiedener Erdbebenzeitreihen und Transformationen gezeigt. An ihnen wird deutlich, weshalb im Gegensatz zur ersten intuitiven Annahme eine Summation über die Zeit nicht automatisch zu hohen Korrelationen mit einem anderen ebenfalls gemittelten Parameter (z.B. Wasserchemie) führt. Erst durch die Summation über einen genügend großen Zeitraum erhalten die Erdbebenzeitreihen eine aussagekräftige Varianz. Für eine Summation über kleine Zeiteinheiten zeigen die Erdbebenzeitreihen kaum Varianz. Bei den anderen Datensätzen dagegen existieren für jeden Tag Monitoringmessungen und diese sind sehr lang, so dass dort eine erhöhte Varianz bereits bei Summation über kleine Zeiträume auftritt.

Damit nicht alle E_n -Transformationen analysiert werden müssen, werden die E_n -Zeitreihen einer Faktorenanalyse unterzogen (Tabelle 8). Tabelle 6 zeigt, dass eine einfache Korrelationsmatrix zu unübersichtlich ist. Zudem verdeutlicht Tabelle 6, dass für eine Summation der e -Parameter nur eine geringe Variation besteht. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 20 dargestellt.

Die Abbildungen 21, 22 und 24 zeigen, wie mit zunehmendem „n“ (Betrachtung der Erdbebenaktivität über den Zeitraum n) die Variabilität der Erdbebenaktivität ansteigt. Es kommt nicht zu einem Herausmitteln der Varianz. Die Erdbebenzeitreihen für große Erdbeben sind ähnlich in ihrer Varianz.

In Abbildung 23 sind die e -Parameter jeweils mit dem reziproken Wert der Zeit zur Monitoringmessung $1/\Delta t$ gewichtet. Die Erdbebenaktivitäten für n größer 10 unterscheiden sich nicht

wesentlich. Dieser Sachverhalt wird in Kapitel 8 in den Schätzungen der Erdbebenaktivitäten wiedergefunden (Die Korrelationen zwischen geschätzter unbeobachteter Erdbebenaktivität variieren kaum.).

Tabelle 7: Die Tabelle zeigt die Korrelation zwischen einigen Summenzeitreihen für $n = 0$ (für einen Tag summiert, am Monitoringtag) für verschiedene e-Transformationen. Hierbei wird deutlich, wie gering die Variation für die Summation über einen nur kleinen Zeitraum in der Vrancea-Zone ist. Die darauffolgenden Grafiken verdeutlichen, wie mit zunehmendem n die Variation der Erdbebenaktivität zunimmt.

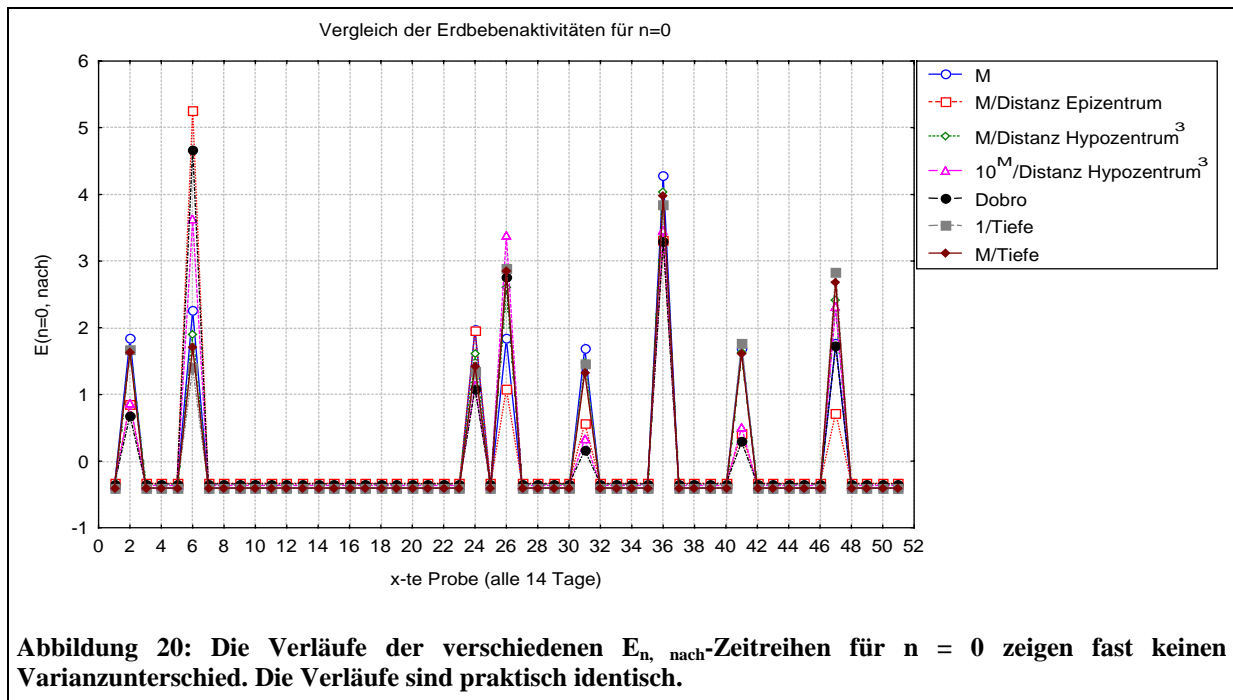
	M	M/D _{EPI}	M/D _{HYP0}	10 ^M /D _{HYP0} ³	ε _{dobro}	1/Tiefe	M/Tiefe
M	1,00	0,84	0,99	0,90	0,86	0,96	0,97
M/D _{epi}	0,84	1,00	0,80	0,89	0,95	0,73	0,77
M/D _{hypo}	0,99	0,80	1,00	0,93	0,86	0,99	1,00
10 ^M /D _{hypo} ³	0,90	0,89	0,93	1,00	0,98	0,91	0,93
ε _{dobro}	0,86	0,95	0,86	0,98	1,00	0,83	0,86
1/Tiefe	0,96	0,73	0,99	0,91	0,83	1,00	1,00
M/Tiefe	0,97	0,77	1,00	0,93	0,86	1,00	1,00

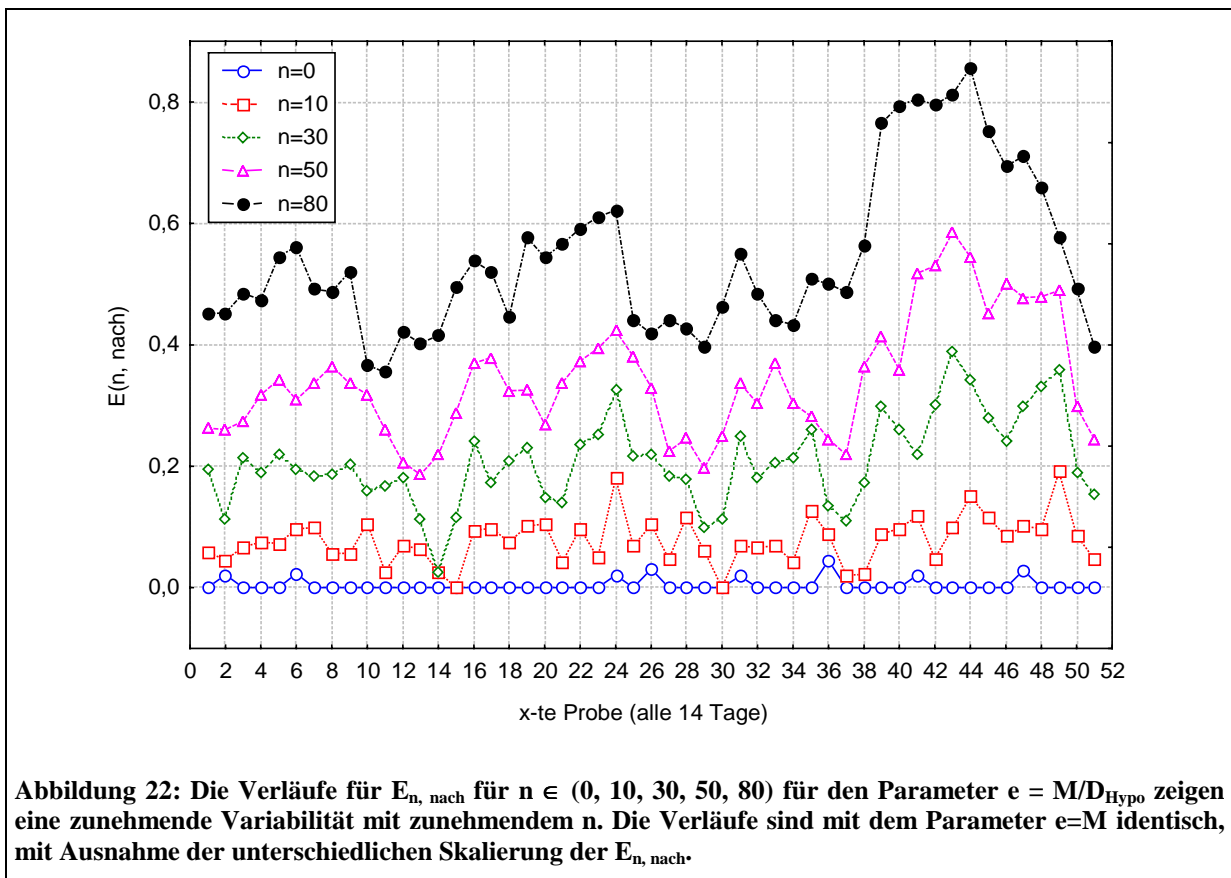
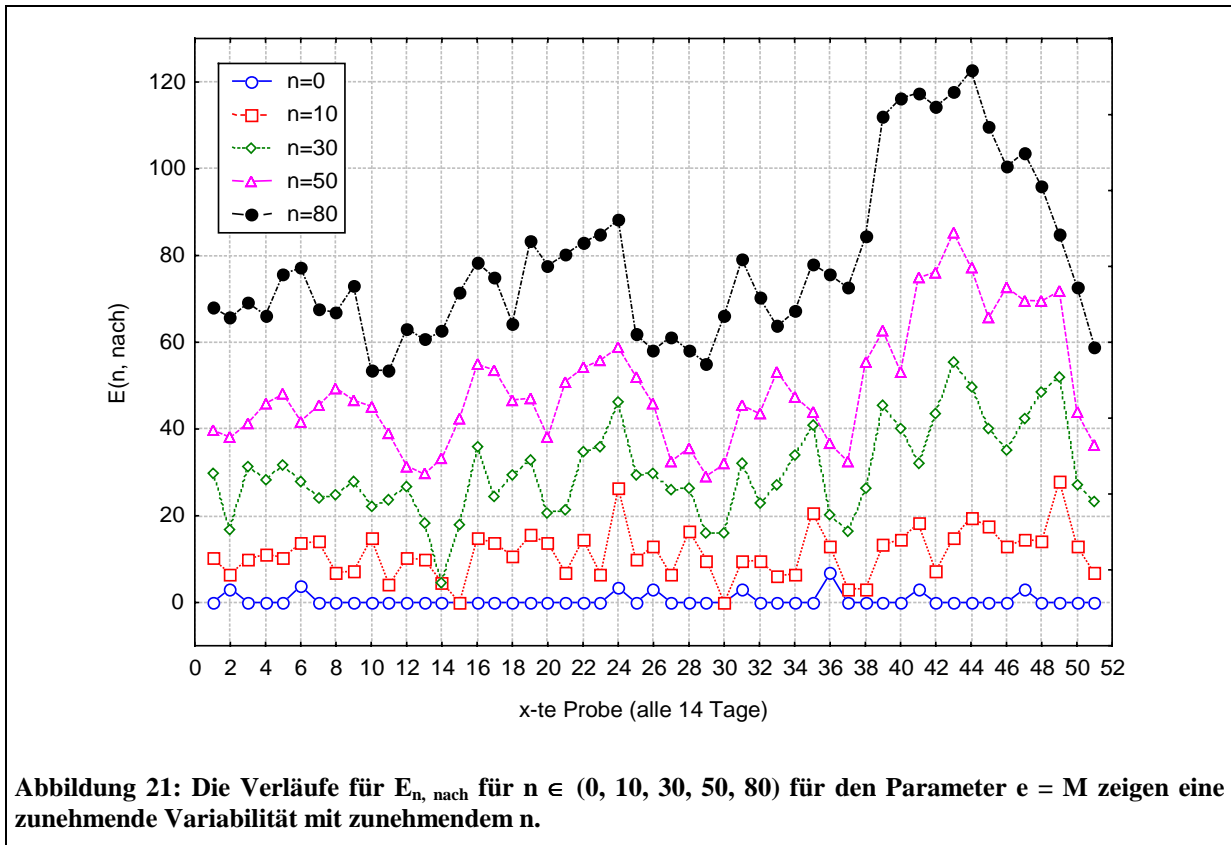
Tabelle 8: Die Tabelle zeigt die Faktorladungen aus der Faktorenanalyse der Summenzeitreihen E₆₀ (n=60). Auf Basis der Ergebnisse kann entschieden werden, welche Zusammenhänge untersucht werden. Es reicht dann, die Zusammenhänge von nur 3 Transformationen anzuschauen, wegen der hohen Korrelationen zwischen den Summenzeitreihen für große n . Siehe dazu Abbildung 28 in Auswertung Kapitel 8.1.

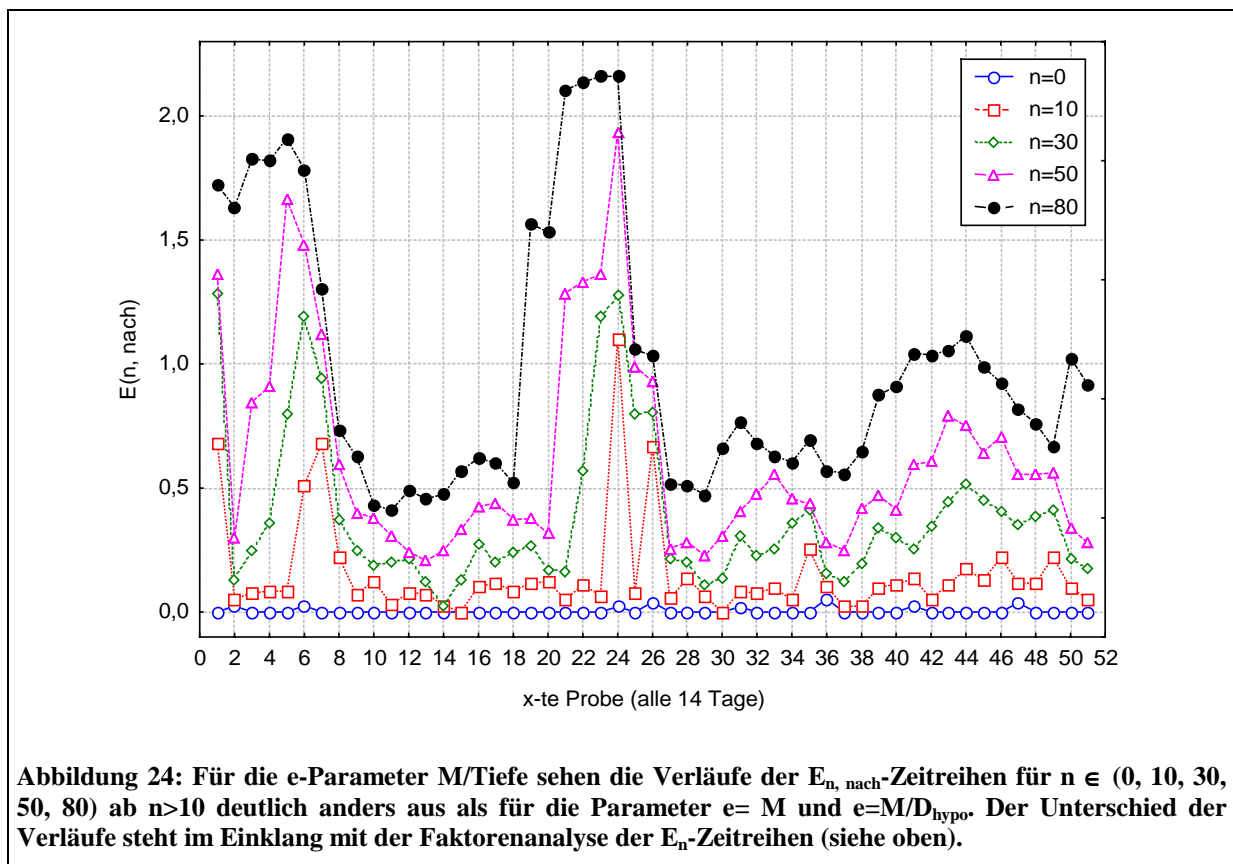
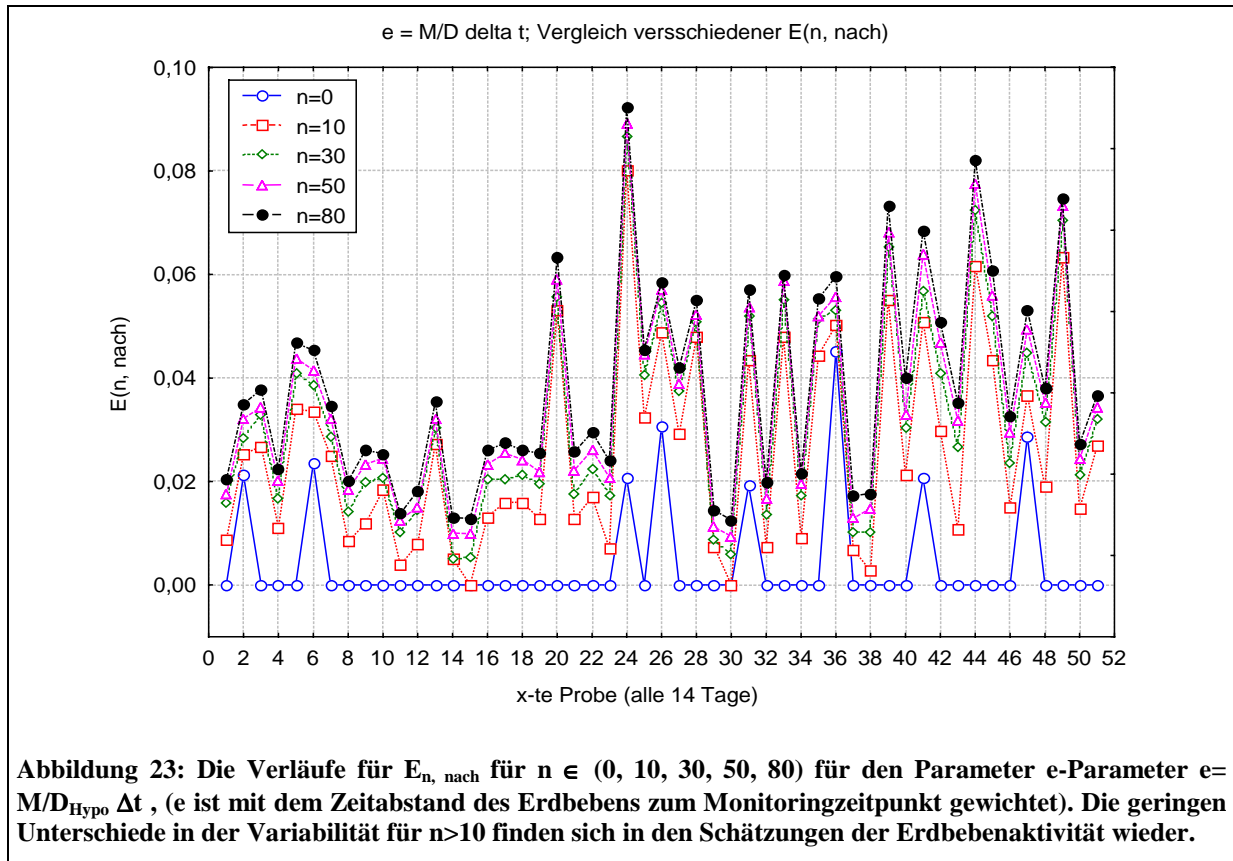
	Faktor	Faktor	Faktor
	1	2	3
M	0,39	0,08	0,91
ε _{dobro}	0,95	0,08	0,27
10 ^M	0,93	-0,02	0,36
M/D Hypozentrum	0,38	0,13	0,92
M/D Hypozentrum ³	0,28	0,23	0,87
10 ^M /D Hypozentrum	0,93	0,02	0,36
10 ^M /D Hypozentrum ³	0,91	0,10	0,38
M/D Epizentrum	0,38	0,00	0,92
M/D Epizentrum ²	0,36	-0,03	0,92
10 ^M /D Epizentrum	0,93	-0,03	0,35
10 ^M /D Epizentrum ²	0,93	-0,03	0,35
1/Tiefe	0,10	0,98	0,12
1/e ^{Tiefe}	-0,08	0,96	-0,04
M/Tiefe	0,13	0,98	0,14
10 ^M /Tiefe	0,83	0,48	0,27
Erklärte Varianz	6,57	3,18	4,95
Proportional zur Gesamtvarianz	0,44	0,21	0,33

Tabelle 9: Die Tabelle zeigt die Faktorladungen einer Faktorenanalyse (Varimax rotiert) mit den e-Transformationen der einzelnen Erdbeben. Es fällt auf, dass hier der erste Faktor überwiegend aus energiereichen Transformationen besteht ($10^M/xx$). Faktor 2 wird negativ durch Transformationen mit der Tiefe und nicht zu hoher Gewichtung der Energie bestimmt. In der Transformation $10^M/\text{Tiefe}$ überwiegt wiederum der Energieanteil, weswegen er hoch mit Faktor 1 korreliert. Dass die Transformationen M/D_{epi} und M/D_{epi}^2 im wesentlichen, wenn auch niedriger, mit Faktor 2 korrelieren, liegt an der Tatsache, dass die flacheren Erdbeben weiter entfernt sind als die vielen tiefen Erdbeben (vergleiche Abbildung 19). Faktor 3 zeichnet sich durch ein ausgewogenes Verhältnis aus Magnitude und Entfernung aus.

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
M	0,82	0,21	0,11
ϵ_{dobro}	0,96	0,03	0,08
10^M	0,99	0,07	0,02
M/D Hypozentrum	0,33	0,22	0,90
M/D Hypozentrum ³	-0,04	0,00	0,98
$10^M/D$ Hypozentrum	0,99	0,07	0,07
$10^M/D$ Hypozentrum ³	0,96	0,07	0,22
M/D Epizentrum	(0,49)	(0,67)	0,23
M/D Epizentrum ²	0,38	(0,66)	0,19
$10^M/D$ Epizentrum	0,99	0,09	0,03
$10^M/D$ Epizentrum ²	0,99	0,10	0,03
1/Tiefe	0,00	-0,98	-0,01
$1/e^{\text{Tiefe}}$	0,03	-0,91	-0,05
M/Tiefe	0,02	-0,98	0,00
$10^M/\text{Tiefe}$	0,86	-0,49	0,05
$10^M/\text{Tiefe}^3$	0,03	-0,96	-0,02
Erklärte Varianz	7,65	4,91	1,93
Proportional zur Gesamtvarianz	0,48	0,31	0,12







Covasna:

Die Faktorenanalyse für Covasna ergibt für $n > 0$ drei Faktoren (Tabelle 11 und Tabelle 12). Die Verteilung der E-Zeitreihen auf die drei Faktoren ist die gleiche wie für die Bohrung Turia. Die nähere Lage am Zentrum der Vrancea-Region hatte auf die Erdbebenaktivitäten nach der hier eingeführten Definition keinen wesentlich anderen Einfluss als im Vergleich zur Bohrung Turia. Die Faktorenanalyse der e-Parameter (Tabelle 10) ergibt nur 2 Faktoren. Deren Verteilung spiegelt sich in den Faktoren der Erdbebenaktivitäten nicht mehr wider.

Tabelle 10: Faktorenladungen der Faktorenanalyse der e-Parameter.

	Faktor	Faktor
	1	2
M	0,80	(0,53)
ϵ_{dobro}	0,85	(0,46)
10^M	0,97	0,21
M/D Hypozentrum	0,72	(0,66)
M/D Hypozentrum ³	0,48	0,87
10^M /D Hypozentrum	0,94	0,32
10^M /D Hypozentrum ³	0,77	(0,61)
M/D Epizentrum	0,81	(0,54)
M/D Epizentrum ²	0,81	(0,54)
10^M / D Epizentrum	0,97	0,20
10^M / D Epizentrum ²	0,96	0,18
1/Tiefe	(0,64)	0,73
$1/e^{\text{Tiefe}}$	-0,07	0,89
M/Tiefe	(0,68)	0,70
10^M /Tiefe	0,92	0,37
10^M /Tiefe ³	(0,61)	0,77
Erklärte Varianz	9,82	5,39
Proportional zur Gesamtvarianz	0,61	0,34

Tabelle 11: Faktorladungen der Faktorenanalyse der $E_{25, \text{nach}}$.

	Faktor	Faktor	Faktor
	1	2	3
M	0,30	0,15	0,93
ϵ_{dobro}	0,97	0,05	0,16
10^M	0,96	0,00	0,27
M/D Hypozentrum	0,29	0,17	0,94
M/D Hypozentrum ³	0,23	0,21	0,88
10^M /D Hypozentrum	0,95	0,03	0,29
10^M /D Hypozentrum ³	0,92	0,08	0,35
M/D Epizentrum	0,31	0,05	0,94
M/D Epizentrum ²	0,31	0,01	0,94
10^M / D Epizentrum	0,96	-0,01	0,27
10^M / D Epizentrum ²	0,96	0,00	0,27
1/Tiefe	0,06	0,97	0,22
$1/e^{\text{Tiefe}}$	-0,01	0,97	0,01
M/Tiefe	0,09	0,96	0,23
10^M /Tiefe	0,80	(0,53)	0,25
10^M /Tiefe ³	0,04	0,99	-0,01
Erklärte Varianz	6,54	4,19	4,91
Proportional zur Gesamtvarianz	0,41	0,26	0,31

Tabelle 12: Faktorladungen der Faktorenanalyse der $E_{0, \text{nach}}$.

	Faktor	Faktor	Faktor
	1	2	3
M	0,40	0,09	0,91
ϵ_{dobro}	0,96	0,08	0,25
10^M	0,93	0,00	0,36
M/D Hypozentrum	0,39	0,13	0,91
M/D Hypozentrum ³	0,30	0,22	0,88
10^M /D Hypozentrum	0,93	0,03	0,37
10^M /D Hypozentrum ³	0,91	0,11	0,39
M/D Epizentrum	0,39	0,01	0,92
M/D Epizentrum ²	0,37	-0,02	0,92
10^M / D Epizentrum	0,93	-0,01	0,35
10^M / D Epizentrum ²	0,93	-0,01	0,35
1/Tiefe	0,13	0,97	0,19
$1/e^{\text{Tiefe}}$	-0,07	0,97	-0,02
M/Tiefe	0,16	0,96	0,21
10^M /Tiefe	0,83	0,48	0,29
10^M /Tiefe ³	0,01	0,99	-0,07
Erklärte Varianz	6,63	4,11	5,00
Proportional zur Gesamtvarianz	0,41	0,26	0,31

6.2 Peninsula Izu, Japan: KSM-Station

6.2.1 Monitoring-Station

Die KSM-Observationsstation liegt im östlichen Teil der Fukushima Präfektur (Nordost-Japan).

Koordinaten (Altgrad): 140° 53 Min. 31 Sek. Ost
 37° 41 Min. 27 Sek. Nord
 93 m über dem Meeresspiegel

Das Observationsbohrloch ist 200 m tief und artesisch. Es wurde direkt in die Futaba-Verwerfung abgeteuft.

Bohrlochbeschreibung:

Im oberen Bereich finden sich Sandsteine und Tonsteine. In den Schichten unterhalb 130 m finden sich mylonitisierte Granodiorite. Die Strukturen der Breckzien und Pulverisierung des Gesteins spiegelt die Aktivität der Verwerfung wider (NAKAMURA & WAKITA, 1982). Letzteres war ein Grund für die Auswahl der Monitoringstation.

Die Verrohrung besteht aus einem Eisenrohr mit 10 cm Durchmesser. In einer Tiefe zwischen 124-129 m befindet sich ein Filter, welcher eine durchschnittliche Fließrate von 30 cm³ / min aufweist. Um die Antwortzeit auf mögliche Änderungen in der Radonkonzentration zu verkürzen, wird das Wasser am Filter durch einen Siphon (ein Rohr mit 1,3 cm Durchmesser) zur Radon-Messkammer geführt. Die Radonkonzentration im Grundwasser wird mit einem „ZnS-scintillation-detector“ (NOGUCHI & WAKITA, 1977) ermittelt. Der Detektor wurde für Messungen mit niedrigen Durchflussraten modifiziert.

Die Genauigkeit der Temperaturmessung beträgt 0,01°C. Sie wird mit zwei Thermometern ermittelt. Wasserstandsänderungen werden mit einer Genauigkeit von 1 mm ermittelt. Die Grundwasser-Durchflussrate wird ebenfalls gemessen. Zudem wird der atmosphärische Druck vor Ort ermittelt.

Die stündlich gemittelten Daten werden an ein zentrales Observationsbüro weitergeleitet (Universität Tokyo). Einflüsse von Tiden, Temperatur und atmosphärischem Druck werden mit dem BAYTAP-Algorithmus systematisch herausgefiltert (TANAMUARA ET AL., 1991).

6.2.2 Geologie und Tektonik

Die Futaba-Verwerfung ist eine der aktivsten Verwerfungen im Nordosten Japans (IGARASHI & WAKITA, 1990; KOIKE, 1969). Die östliche Seite der Futaba-Verwerfung wird durch quartäre und tertiäre Sedimente dominiert, wohingegen im westlichen Teil der Verwerfung in der Abukuma Gebirgsregion, Paläozoikum, Mesozoikum und Miozäne Vulkanite zusammen mit metamorphen Granodioriten das Bild prägen.

6.2.3 Erdbeben und ihre Erdbebenverteilung

Nordost-Japan ist ein typischer Inselbogen. Dies wird durch die doppelflächige Struktur der Erdbebenverteilung wiedergegeben (IGARASHI & WAKITA, 1990). Die pazifische Platte bewegt sich relativ zur eurasischen Platte. Die Erdbeben in der oberen Fläche sind durch Überschiebungen (engl.: „reverse fault movement“) bzw. Kompressionen der Subduktionsbewegung (engl.: „down-dip-compression“) charakterisiert. In der unteren Fläche herrscht eine Extension (engl.: „down-dip extension“) vor (HASEGAWA ET AL., 1985). Einige Erdbeben im Südosten Japans werden durch die Bewegung der philippinischen See-Platte relativ zur eurasischen Platte verursacht. Die Erdbeben in der Nähe der Intersektion der pazifischen und philippinischen Platte sind wegen der Koppelung an drei Platten oft kompliziert. Zusätzlich haben einige Erdbeben in der Nähe des Izu-Mariannen-Grabens eine enge Beziehung zur vulkanischen Aktivität.

Im Erdbebenkatalog des MIJ (Meteorological Institute of Japan) existieren für den Zeitraum vor 1985 nicht für alle Erdbeben Koordinaten, gerade für kleinere Ereignisse. Deshalb werden in der Analyse in Kapitel 10 Daten erst ab 1985 verwendet.

6.2.4 Die Monitoringzeitreihen

Der untersuchte Monitoringdatensatz (in 6.2.1. beschrieben) besteht aus einer Variablen (Radon). Sie wurde durch den BAYTAP-Algorithmus von den größten bekannten Einflüssen bereinigt (Temperatur, atmosphärischer Druck, Tiden). Die Messreihe wird seit 1984 aufgezeichnet. Es gibt Lücken in der Zeitreihe, da die Messtechnik einige Male ausgefallen ist. Der Messwert wird in cpm, counts per minute, ermittelt. Näheres wird bereits oben unter „6.2.1. Monitoringstation“ erwähnt.

6.2.5 Vergleich e- und E-Parameter

Die Faktorenanalyse der e-Parameter für den Japan-Datensatz ergab 4 Faktoren (im Gegensatz zur Vrancea-Zone mit 3 Faktoren). Die Zuordnung der unterschiedlichen Transformationen auf die Faktoren ist allerdings weitgehend ähnlich. Auch wird der größte Varianzanteil durch den Faktor erklärt, auf dem die e-Transformationen liegen, welche eine hohe Gewichtung der Erdbebenenergie besitzen. Faktor zwei ist auch in diesem Fall durch das Verhältnis Energie zu Tiefe charakterisiert. Faktor 3 zeigt, dass die Entfernung zum Epizentrum diesmal eine eigenständige Komponente darstellt, ebenso wie Faktor 4 mit der Gewichtung zur Entfernung Hypozentrum. Die einfachste Transformation $e = M$ verteilt sich in dieser Darstellung auf die Faktoren 2 (Energie/Tiefe) und 4 (Energie/D_{hypo}).

Tabelle 13: Faktorladungen der Faktorenanalyse der e-Parameter.

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
M	0,23	0,06	-0,02	(0,69)
ϵ_{dobro}	0,94	0,02	-0,01	0,04
10^M	0,84	0,02	-0,02	0,09
M/D Hypozentrum	0,11	0,07	0,07	0,96
M/D Hypozentrum ³	0,05	0,02	0,14	0,85
10^M /D Hypozentrum	0,99	0,02	-0,02	0,10
10^M /D Hypozentrum ³	0,94	0,01	-0,01	0,08
M/D Epizentrum	0,03	0,01	0,99	0,10
M/D Epizentrum ²	0,02	0,00	1,00	0,05
10^M /D Epizentrum	0,91	0,02	0,38	0,12
10^M /D Epizentrum ²	0,04	0,00	1,00	0,05
1/Tiefe	-0,01	-0,93	0,00	-0,21
$1/e^{\text{Tiefe}}$	-0,01	-0,93	0,00	-0,03
M/Tiefe	0,01	-0,96	0,00	-0,11
10^M /Tiefe	0,84	-0,14	-0,04	0,19
10^M /Tiefe ³	0,04	-0,76	-0,02	0,11
Erklärte Varianz	5,04	3,26	3,15	2,27
Proportional zur Gesamtvarianz	0,32	0,20	0,20	0,14

Tabelle 14: Die Tabelle gibt die Faktorladungen der einzelnen Erdbebenaktivitäten $E_{60, \text{sym}}$ für die 16 Transformationen wieder. Es können hier drei Hauptfaktoren unterschieden werden:

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
M	0,96	0,05	0,08	-0,08
ϵ_{dobro}	-0,07	0,94	0,00	-0,15
10^M	0,17	0,79	0,08	0,35
M/D Hypozentrum	0,93	0,20	0,11	-0,22
M/D Hypozentrum ³	0,38	(0,60)	0,09	(-0,53)
10^M /D Hypozentrum	0,03	0,99	0,05	0,06
10^M /D Hypozentrum ³	-0,06	0,93	0,01	-0,18
M/D Epizentrum	0,90	0,21	-0,23	-0,23
M/D Epizentrum ²	-0,04	-0,06	-1,00	0,00
10^M /D Epizentrum	0,01	0,99	-0,06	0,05
10^M /D Epizentrum ²	-0,05	0,00	-1,00	-0,01
1/Tiefe	0,96	-0,09	0,04	0,05
$1/e^{\text{Tiefe}}$	0,91	-0,10	0,03	0,09
M/Tiefe	0,96	-0,07	0,04	0,07
10^M /Tiefe	(0,69)	0,33	0,07	(0,54)
10^M /Tiefe ³	0,85	-0,03	0,05	0,42
Erklärte Varianz	6,64	4,93	2,10	1,06
Proportional zur Gesamtvarianz	0,42	0,31	0,13	0,07

Tabelle 15: Faktorenanalyse $E_{0, \text{sym}}$. Die Faktorladungen ähneln im wesentlichen der Faktorenanalyse für $n=60$, nur dass Faktor 1 und 2 die Reihenfolge vertauscht haben. Da sie aber einen ähnlichen Varianzanteil erklären, ist dies nicht weiter von Bedeutung.

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4
M	0,92	0,09	0,04	0,17
ϵ_{dobro}	0,00	0,95	-0,01	-0,03
10^M	0,00	(0,69)	0,01	(0,45)
M/D Hypozentrum	0,91	0,23	0,05	0,11
M/D Hypozentrum ³	0,44	(0,63)	0,06	-0,18
10^M /D Hypozentrum	0,03	0,97	0,00	0,19
10^M /D Hypozentrum ³	0,01	0,95	-0,01	-0,04
M/D Epizentrum	(0,69)	0,19	(0,66)	0,08
M/D Epizentrum ²	-0,02	0,00	1,00	0,00
10^M /D Epizentrum	0,02	0,96	0,14	0,17
10^M /D Epizentrum ²	-0,02	0,04	0,99	0,00
1/Tiefe	0,95	-0,04	-0,01	0,17
$1/e^{\text{Tiefe}}$	0,86	-0,06	-0,03	0,17
M/Tiefe	0,95	-0,03	0,00	0,20
10^M /Tiefe	0,39	0,34	0,01	0,80
10^M /Tiefe ³	(0,45)	-0,03	0,01	0,79
Erklärte Varianz	5,24	4,77	2,45	1,70
Proportional zur Gesamtvarianz	0,33	0,30	0,15	0,11

Tabelle 16: Faktorladungen der Faktorenanalyse $E_{25, \text{sym}}$

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3
M	0,95	0,08	0,03
ϵ_{dobro}	-0,07	0,94	-0,01
10^M	0,16	0,72	0,10
M/D Hypozentrum	0,92	0,22	0,03
M/D Hypozentrum ³	0,39	(0,67)	-0,02
10^M /D Hypozentrum	0,05	0,99	0,04
10^M /D Hypozentrum ³	-0,06	0,94	-0,01
M/D Epizentrum	0,88	0,22	-0,32
M/D Epizentrum ²	-0,01	-0,04	-1,00
10^M /D Epizentrum	0,04	0,99	-0,08
10^M /D Epizentrum ²	-0,02	0,01	-1,00
1/Tiefe	0,97	-0,05	0,02
$1/e^{\text{Tiefe}}$	0,92	-0,07	0,02
M/Tiefe	0,97	-0,04	0,02
10^M /Tiefe	0,75	0,29	0,08
10^M /Tiefe ³	0,89	-0,01	0,05
Erklärte Varianz	6,80	4,87	2,12
Proportional zur Gesamtvarianz	0,43	0,30	0,13

6.3 Kamchatka, Russland: Lokation Pinachevo

6.3.1 Die Monitoringstationen und die Monitoringzeitreihen:

Koordinaten der Stationen: 53° 23,6 min Nord / 158° 25,4 min Ost (Altgrad)

Insgesamt stehen die Daten von 3 Monitoringstationen zur Verfügung, welche in einem Abstand von 3 Tagen seit dem 1.1.1977 untersucht wurden. Die Untersuchungen wurden von der „Hydrogeoseismic Group“ des Laboratoriums für „Technische Tests“ in Petropavlovsk durchgeführt. Die Daten und die Umgebung wurden ausführlich in KHATKEVICH (1994), KOPYLOVA ET AL. (1994), BELLA ET AL. (1998) beschrieben.

Folgende Parameter wurden an einer Bohrung und zwei benachbarten Quellen untersucht:

Vor Ort wurden der Abfluss Q , die Wassertemperatur und der pH-Wert gemessen. Für die Untersuchung des Gasinhaltes und der Ionen wurden Wasserproben entnommen. Folgende Ionen wurden ermittelt: Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , H_3BO_3 , H_4SiO_4 (jeweils in mg/l). Folgende gelöste Gase wurde ermittelt: O_2 , N_2 , Ar, CO_2 , H_2 , CH_4 , He (ml/l). Außerdem wurden die freien Gase für die Bohrung GK-1 ermittelt: N_2 , Ar, CO_2 , H_2 , CH_4 , He (in l/min).

Die Bohrung ist am Kopf verschlossen, die Quellen 1 und 2 an ihren Austrittstellen ebenfalls.

Die Monitoringstationen Quelle 1 und Quelle 2 (in der Literatur spring 1 und spring 2) sind natürliche Quellen, GK-1 ist eine Bohrung. Alle drei Monitoringstationen liegen zu Füßen des Koryakskiy-Vulkans. Die Lokation wird Pinachevo genannt.

Die Lokation Pinachevo befindet sich an der tiefen Petropavlovsk-Verwerfung, welche NW streicht. Die Verwerfung trennt die Vulkangürtel Ost-Kamchatkas von der „Nicht-Vulkanregion“ der Malka-Petropavlovsk Bruchzone.

- **Bohrung GK-1:**

Das freie Gas der Bohrung wird von CH_4 (~80%) und N_2 (~20%) dominiert. Ar, CO_2 , He und H_2 spielen eine untergeordnete Rolle. Die Wassertemperatur beträgt ungefähr 16,4 °C und der pH-Wert liegt bei 7,5. Das Wasser ist ein Na-Ca-Cl-Wasser mit einer hohen Mineralisierung (~ 9g/l). Nachdem die Bohrung 1970 abgeteuft wurde, sank der artesische Abfluss von 2,8 l/s auf 0,12 l/s. Die Abnahme kann nach KOPYLOVA ET AL (1994) für den Zeitraum von 1986 bis 1992 mit der Funktion

$$Q(t) = 4,19 (t + 11135,5)^{-0,44}$$

beschrieben werden. Dabei entspricht Q der Einheit l/s und t der Einheit Tage. Parallel zur Abnahme des Abflusses kann eine Abnahme der Temperatur, für die Ionen ein Anstieg von Cl^- , Na^+ , und Ca^{2+} sowie eine Abnahme von HCO_3^- , Li^+ , H_3BO_3 , H_4SiO_4 festgestellt werden (KHATKEVICH, 1994).

Saisonale Faktoren oder andere Klimafaktoren beeinflussen die Bohrung und die beiden Quellen nicht oder nur unwesentlich (KOPYLOVA ET AL. , 1994).

- **Quellwasser:**

Die Quellwasser sind eine Mischung aus dem Tiefenwasser der Bohrung GK-1 und frischem Grundwasser. Die Mineralisierung liegt hier wesentlich niedriger mit 0,45 g/l für Quelle 1 (HCO_3 -Cl-Na-Typ) und 1 g/l für Quelle 2 (Cl- HCO_3 -Mg-Na-Typ).

Die Wässer von Pinachevo sind nitritische Methan-Thermalwässer. Diese sind typisch für Kamchatka sowie weltweit repräsentativ für dicke Sediment- und Vulkanit-Sequenzen, die in jüngeren Becken, Gräben oder Depressionen abgelagert sind.

Quelle 1 und Quelle 2 liegen direkt neben der Bohrung GK-1. Sie werden in KOPYLOVA ET AL. (1994) erwähnt, um die Wasserzusammensetzung der Bohrung GK-1 zu erläutern.

- **Faktorenanalyse von Quelle 1:**

Die für eine Tiefenkomponente typischen gelösten Ionen fallen mit Methan auf den Faktor 1 und erklären ca. 38 % der Gesamtvarianz. Die Faktoren erklären ihre Varianz fast vollständig (siehe Kommunalitäten).

Tabelle 17: Faktorenanalyse der gelösten Spezies und des Ausflusses. (1977-1998)

	Faktor	Faktor
	1	2
Q	(0,64)	-0,40
pH	0,11	-0,44
Temp.	0,40	(0,69)
Cl	0,97	0,05
H ₃ BO ₃	0,86	-0,03
HCO ₃ ⁻	0,96	0,06
Na	0,97	0,08
Ca	0,90	0,05
H ₄ SiO ₄	0,15	0,73
K	0,39	-0,58
Mg	0,86	-0,17
Erklärte Varianz	5,85	1,74
Proportional zur Gesamtvarianz	0,53	0,16

Tabelle 18: Kommunalitäten für die Faktorenanalyse der gelösten Spezies:

	von 1	von 2	Multiple R-Quadrat
	Faktor	Faktoren	
Q	0,40	0,56	0,53
pH	0,01	0,20	0,10
Temp.	0,16	0,65	0,46
Cl	0,94	0,94	0,97
H ₃ BO ₃	0,75	0,75	0,76
HCO ₃ ⁻	0,92	0,93	0,93
Na	0,94	0,94	0,96
Ca	0,81	0,81	0,90
H ₄ SiO ₄	0,02	0,55	0,29
K	0,15	0,49	0,40
Mg	0,75	0,77	0,76

Tabelle 19: Faktorladungen der Faktorenanalyse der Chemie von Quelle 1 mit Gas (ab 1984):

	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor
	1	2	3	4	5
Q	0,44	-0,04	-0,01	0,79	-0,11
pH	0,20	0,02	-0,43	0,13	(0,52)
Temp.	0,38	0,04	0,74	-0,08	-0,12
Cl	0,96	0,09	0,13	0,15	0,02
H ₃ BO ₃	0,92	0,08	0,23	0,17	0,01
HCO ₃ ⁻	0,92	0,07	0,24	0,21	-0,01
Na	0,93	0,09	0,21	0,21	0,02
Ca	0,93	0,09	-0,05	0,16	0,00
H ₄ SiO ₄	0,09	0,01	0,81	0,02	0,16
K	0,24	-0,03	-0,12	0,87	0,08
Mg	0,84	0,05	-0,12	0,33	0,04
Ar	-0,23	-0,80	-0,02	0,10	0,01
CO ₂	0,09	-0,16	0,12	0,44	-0,73
Gasdruck	(0,48)	-0,69	0,05	0,13	-0,43
H ₂	-0,04	0,05	-0,22	-0,08	(-0,66)
N ₂	-0,25	-0,88	0,06	-0,01	-0,05
O ₂	-0,01	(-0,62)	-0,34	(-0,50)	0,25
CH ₄	0,95	0,11	0,01	-0,07	0,04
Erklärte Varianz	6,77	2,36	1,77	2,14	1,55
Proportional zur Gesamtvarianz	0,38	0,13	0,10	0,12	0,09

Tabelle 20: Kommunalitäten der Faktorenanalyse mit Gas von Quelle 1:

	Nach 1	nach 2	nach 3	nach 4	nach 5	Multipl. R-Quadrat
	Faktor	Faktoren	Faktoren	Faktoren	Faktoren	
Q	0,19	0,19	0,19	0,81	0,82	0,73
pH	0,04	0,04	0,23	0,24	0,52	0,25
Temp.	0,15	0,15	0,69	0,70	0,71	0,58
Cl	0,92	0,93	0,95	0,97	0,97	0,99
H ₃ BO ₃	0,84	0,85	0,90	0,93	0,93	0,93
HCO ₃ ⁻	0,84	0,85	0,91	0,95	0,95	0,97
Na	0,87	0,88	0,93	0,97	0,97	0,98
Ca	0,87	0,88	0,88	0,91	0,91	0,95
H ₄ SiO ₄	0,01	0,01	0,66	0,66	0,69	0,37
K	0,06	0,06	0,07	0,82	0,83	0,65
Mg	0,70	0,70	0,72	0,83	0,83	0,86
Ar	0,05	0,69	0,69	0,70	0,70	0,49
CO ₂	0,01	0,04	0,05	0,24	0,77	0,96
Gasdruck	0,23	0,71	0,71	0,73	0,91	0,98
H ₂	0,00	0,00	0,05	0,06	0,49	0,07
N ₂	0,06	0,84	0,85	0,85	0,85	0,95
O ₂	0,00	0,39	0,50	0,75	0,81	0,79
CH ₄	0,90	0,92	0,92	0,92	0,92	0,97

6.3.2 Geologie und Tektonik

Die Halbinsel von Kamchatka gehört zu einem typischen Inselbogen mit darunter liegender Subduktionszone. Sie beherbergt mehr als 100 Vulkane, von denen viele zur Zeit aktiv sind. Die hier vorgestellten Monitoringstationen liegen am Fusse des Koryakskiy-Vulkans, im Südosten Kamchatkas in der Nähe von Petropavlovsk. Die Lokation Pinachevo liegt in der Zone der tiefliegenden Nordwest streichende Petropavlovsk-Störungszone. Diese trennt die Ostkamchatka-Vulkangürtel von der nicht vulkanisch aktiven Malka-Petropavlovsk-Transversalstörungszone.

6.3.3 Erdbeben und ihre Verteilung

Als Quelle diente der Erdbebenkatalog der „Hydrogeoseismic Group“ des Laboratoriums für „Technische Tests“ in Petropavlovsk.

Die Halbinsel Kamchatka ist durch eine starke seismische Aktivität gekennzeichnet (Kopylova, 1994). Die meisten Erdbeben befinden sich allerdings „offshore“ (vor der Küste).

Die hypozentralen Tiefen reichen von einigen wenigen km bis zu 500 km Tiefe. Die Tiefe der Erdbeben hängt von ihrer Position auf der Subduktionszone ab. Die seismische Aktivität wird durch Phasen geprägt in denen weniger starke Erdbeben erscheinen und Phasen mit starken Erdbeben ($M > 6$), so zumindest die Unterscheidung in der Literatur. Die Berechnung der Erdbebenaktivitäten zeigt allerdings, dass sich unter Berücksichtigung der Energie und der Geometrie diese Phasen nicht mehr so klar trennen lassen (siehe Auswertung Kapitel 10). So erscheinen in der Periode von 1977 bis 1986 nur Erdbeben mit Magnituden kleiner 6, während in der Phase von 1986 bis 1998 mehrere Ereignisse mit Magnitude größer 6 zu verzeichnen sind, insgesamt 5 Erdbeben mit Magnitude größer 6,5 (KOPYLOVA, 1994, BELLA ET AL. 1998).

6.3.4 Vergleich e- und E-Parameter

Für die Region Kamchatka lassen sich 3 Faktoren extrahieren. Hier ist beispielhaft die Erdbebenaktivität für $n = 60$ angegeben. Die Faktorenanalyse der e-Parameter zeigen eine Differenzierung, welche hauptsächlich durch die geometrische Gewichtung des e-Parameters bestimmt ist.

Tabelle 21: Die Faktorladungen der Faktorenanalyse der e-Parameter in der Region Kamchatka ergibt insgesamt 6 Faktoren. Die Unterscheidung der Faktoren liegt vor allem in der Gewichtung der Geometrie. Deswegen kann der e-Parameter $e=M$ keinem der Faktoren eindeutig zugeordnet werden.

	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor
	1	2	3	4	5	6
M	0,21	0,10	(0,53)	0,41	-0,01	-0,16
$\varepsilon_{\text{dobro}}$	0,37	0,02	0,07	0,27	0,01	0,87
10^M	0,99	0,00	0,01	0,05	0,01	0,02
M/D Hypozentrum	0,02	0,03	0,96	0,08	0,11	0,06
M/D Hypozentrum ³	-0,05	0,04	0,84	-0,15	0,09	0,15
10^M /D Hypozentrum	0,92	0,02	0,04	0,26	0,01	0,28
10^M /D Hypozentrum ³	0,25	0,02	0,09	0,26	0,00	0,90
M/D Epizentrum	0,02	-0,03	0,41	0,03	0,87	0,02
M/D Epizentrum ³	0,00	0,00	-0,07	0,00	0,97	-0,01
10^M /D Epizentrum	0,99	0,01	0,02	0,07	0,01	0,11
10^M /D Epizentrum ²	0,94	0,01	0,04	0,08	0,01	0,31
1/Tiefe	0,00	0,97	0,01	0,02	-0,02	0,01
$1/e^{\text{Tiefe}}$	-0,01	0,92	-0,01	-0,05	0,02	0,03
M/Tiefe	0,04	0,93	0,14	0,23	-0,02	-0,02
10^M /Tiefe	0,18	0,06	0,02	0,90	0,01	0,27
10^M /Tiefe ³	0,09	0,08	0,00	0,90	0,02	0,25
Erklärte Varianz	3,98	2,69	2,11	2,10	1,73	1,95
Proportional zur Gesamtvarianz	0,25	0,17	0,13	0,13	0,11	0,12

Tabelle 22: Faktorladungen der Faktorenanalyse der Erdbebenaktivitäten E_{60} , nach-

	Faktor	Faktor	Faktor
	1	2	3
M	0,93	0,12	0,16
$\varepsilon_{\text{dobro}}$	0,29	0,94	0,06
10^M	0,73	(0,47)	0,18
M/D Hypozentrum	0,79	(0,50)	0,16
M/D Hypozentrum ³	0,39	0,89	0,08
10^M /D Hypozentrum	(0,53)	0,80	0,14
10^M /D Hypozentrum ³	0,30	0,94	0,06
M/D Epizentrum	0,76	(0,48)	0,33
M/D Epizentrum ²	0,05	0,04	0,93
10^M /D Epizentrum	(0,49)	0,80	0,20
10^M /D Epizentrum ²	0,21	0,71	(0,59)
1/Tiefe	0,88	0,35	-0,02
$1/e^{\text{Tiefe}}$	0,77	0,40	-0,03
M/Tiefe	0,87	0,39	-0,02
10^M /Tiefe	(0,66)	0,70	0,00
10^M /Tiefe ³	(0,58)	0,70	-0,01
Erklärte Varianz	6,38	6,46	1,49
Proportional zur Gesamtvarianz	0,40	0,40	0,09

7 Gewählte Parameter und Methoden für die Analyse der einzelnen Datensätze

7.1 Vrancea, Rumänien

Die 48 Erdbeben Transformationen e wurden (siehe Tabelle 3) jeweils für $n=0$ Tage bis $n=90$ Tage und für die drei Grundtypen *vor*, *nach* und *sym* (vergleiche Seite 21), zu $E_{n, Typ}$ summiert (insgesamt 96 Variationen).

Für die Wasserchemie von Turia wurden 8 Faktoren und für die von Covasna 10 Faktoren extrahiert. Von diesen Faktoren wurden jeweils die 3er gleitenden Mittel ($g=3$) und die 5er gleitenden Mittel ($g=5$) der Faktorwerte für die gleitenden Mittelwert-Typen A, B und C berechnet (siehe Abbildung 15). Außerdem wurde die Differenz der Faktorwerte berechnet und von diesen wiederum die 3er gleitenden Mittel und die 5er gleitenden Mittel. Für die Wasserchemie werden so insgesamt 18 Variationen betrachtet.

Die Erdbebenzeitreihen $E_{n, Typ}$ wurden mittels der multiplen Regression aus den Variationen der Faktorwerte geschätzt.

Für die Untersuchung wurden Erdbeben größer Magnitude 3 mit einer epizentralen Distanz kleiner 500 km berücksichtigt (Erdbebenkatalog: Romplus3 des Sonderforschungsbereiches 264 „Starkbeben“ an der Universität Karlsruhe).

7.2 Izu Peninsula, Japan

Die 48 Erdbeben Transformationen e wurden jeweils für $n=0$ bis $n=100$ zu den entsprechenden $E_{n, sym}$ summiert. Aus der Radonzeitreihe wurden die gleitenden Mittel für $g=2$ bis $g=100$ berechnet, zudem wurden die Differenzen für einen lag von $k=1$ bis $k=100$ berechnet. So können über 200 Variationen der Radonzeitreihe untersucht werden. Der Zusammenhang zwischen Radon und Erdbebenaktivität wird mittels der Kreuzkorrelation berechnet. Der Kreuzkorrelationskoeffizient wird in Graphen dargestellt (vergleiche Abbildung 88). Zudem werden die beiden Zeitreihen graphisch auf Gemeinsamkeiten hin untersucht.

Signale werden aus den Differenzen berechnet: $|dc/dt| > \text{Grenzwert}$ (dc : Änderung der Konzentration um 50 cpm; dt : betrachteter Zeitraum von 2 Tagen).

Für die Untersuchung wurden Erdbeben größer Magnitude 2 mit einer epizentralen Distanz kleiner 1000 km berücksichtigt. Als Quelle für die Erdbeben diente der Erdbebenkatalog des MIJ (Meteorological Institute of Japan).

7.3 Kamchatka, Russland

Die 48 Erdbeben Transformationen e werden jeweils für $n=0$ bis $n=100$ zu den entsprechenden E_n summiert. Für Quelle1 wurde aus den Parametern Cl und Methan die gleitenden Mittelwerte für $g=2$ bis $g=100$ berechnet. Die Differenzen werden für einen lag von $k=1$ bis $k=100$ berechnet. Es werden so insgesamt über 200 Variationen der Zeitreihen betrachtet.

Außerdem wird die Wasserchemie einer Faktorenanalyse unterzogen und die Faktorwerte werden für die Schätzung der Erdbebenaktivität genutzt.

Für die Untersuchung wurden Erdbeben größer Magnitude 4 mit einer epizentralen Distanz kleiner 1000 km berücksichtigt. Als Quelle diente der Erdbebenkatalog der „Hydrogeoseismic Group“ des Laboratoriums für „Technische Tests“ in Petropavlsloisk.

8 Ergebnisse Vrancea

Die Datensätze der Vrancea-Zone zeichnen sich durch eine hohe Anzahl von hydrochemischen Variablen aus. Aufgrund der geringen Probenanzahl (52) und den langen Messabständen wird bei beiden Datensätzen aus der Vrancea-Zone auf Analyseansatz II (siehe Kapitel 4.2.2) verzichtet.

8.1 Das Hauptergebnis

Für einige Erdbeben-Transformationen finden sich gute Zusammenhänge zwischen der Wasserchemie und der seismischen Aktivität, wenn diese über einen genügend großen Zeitraum summiert werden (siehe Abbildung 25).

Wie in Abbildung 25 zu sehen ist, verlaufen für Erdbebenzeitreihen, welche auf einem Faktor liegen (vergleiche Kapitel 6.1.), die Korrelationen für zunehmende n subparallel. Dieser Effekt spiegelt sich auch in der Korrelationsmatrix in Tabelle 23 wider. Der identische Verlauf einiger Summenzeitreihen ist mit der lokalen Erdbebenverteilung zu erklären. Die Erdbebenverteilung wird in Abbildung 18 und Abbildung 19 gezeigt. Die Korrelationen mit den Erdbebenaktivitäten, berechnet nach dem geophysikalischen Modell von DOBROVOLSKY ET AL. (1979, 1989), liegen interessanterweise für $n > 30$ deutlich niedriger als die übrigen Ansätze.

Die Faktorenanalyse für die E_n -Zeitreihen kann als Entscheidungskriterium genutzt werden, um festzulegen, welche Zeitreihen für den Zusammenhang mit den Monitoringparametern untersucht werden. Es brauchen so weniger Zusammenhänge untersucht werden. (Vergleiche auch Summenzeitreihen von Kamchatka und Japan in Kapitel 6.2 und 6.3.) Obwohl in Tabelle 9 die e -Transformationen von $e = M$ und $e = \varepsilon$ (ε nach Dobrovolsky) zusammen auf Faktor 1 hoch korrelieren, ergeben sich in den Summen für $n = 60$ deutlich niedrigere Korrelationen (siehe Tabelle 23). Diese Unterschiede sind im Korrelationsverlauf zu sehen. Die parallelen Korrelationsverläufe in Abbildung 25 bestätigen, dass Faktorenanalysen zur Gruppierung unter Nutzung anderer „ n “ als $n=60$ in Kapitel 6.1. zu gleichen Gruppierung der $E_{n, \text{Typ}}$ auf den Faktoren kommen.

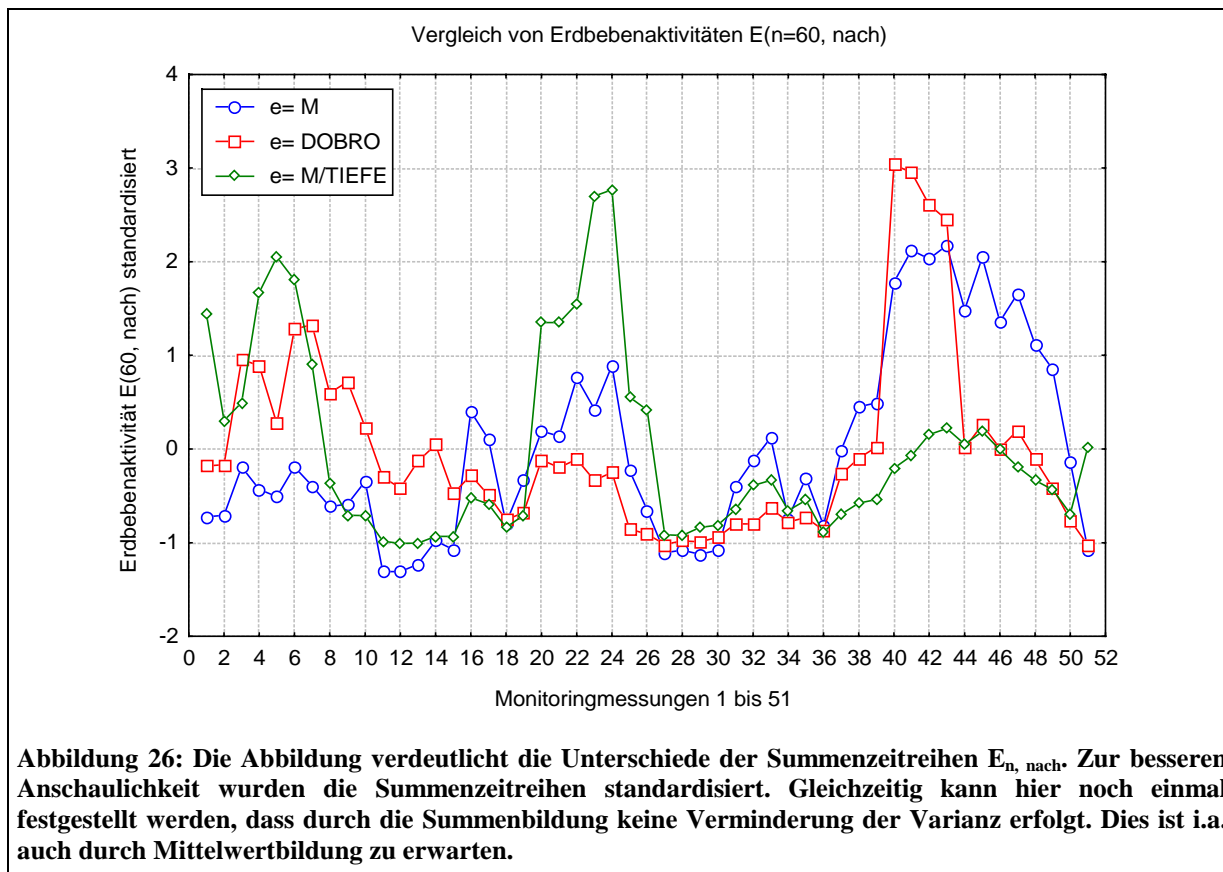
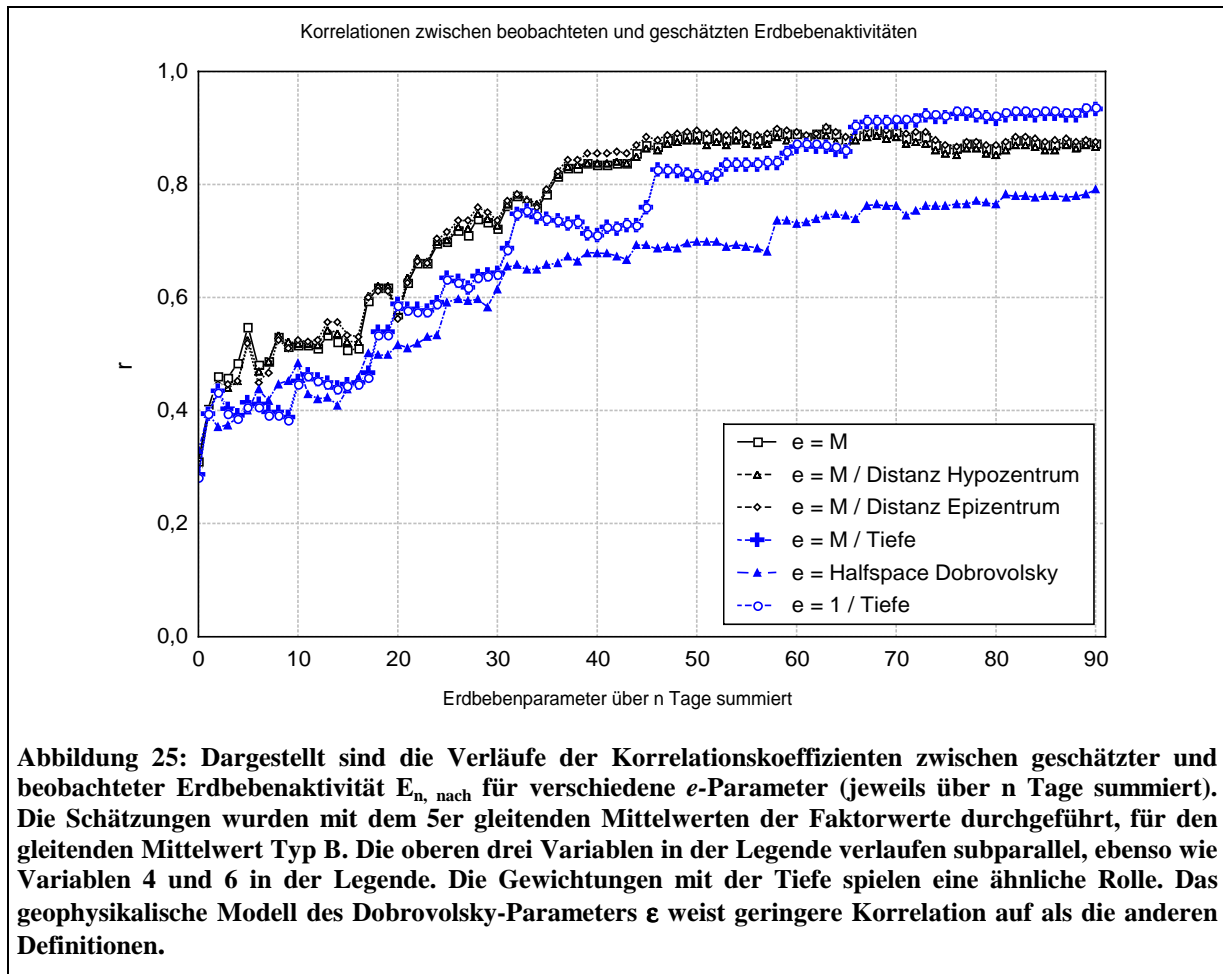
Abbildung 26 zeigt die $E_{60, \text{nach}}$ der drei im weiteren Verlauf untersuchten e -Parameter (M/D_{Hypo} , M/Tiefe , ε nach Dobrovolsky). Die Summen wurden z -standardisiert, um einen direkten Vergleich möglich zu machen. Durch die Summation über einen größeren Zeitraum (hier 60 Tage) werden die Varianzen der Zeitreihen nicht vermindert. In Kapitel 6 wurde bereits gezeigt, dass in der Vrancea-Zone erst durch die Summation über einen Zeitraum, der größer als 10 Tage ist, eine deutliche Varianz in der Erdbebenaktivität entsteht. Dieser Umstand hängt auch mit dem Beprobungsabstand zusammen (vergleiche E_0 und andere E_n der Datensätze von Kamchatka, Izu Peninsula und Kobe).

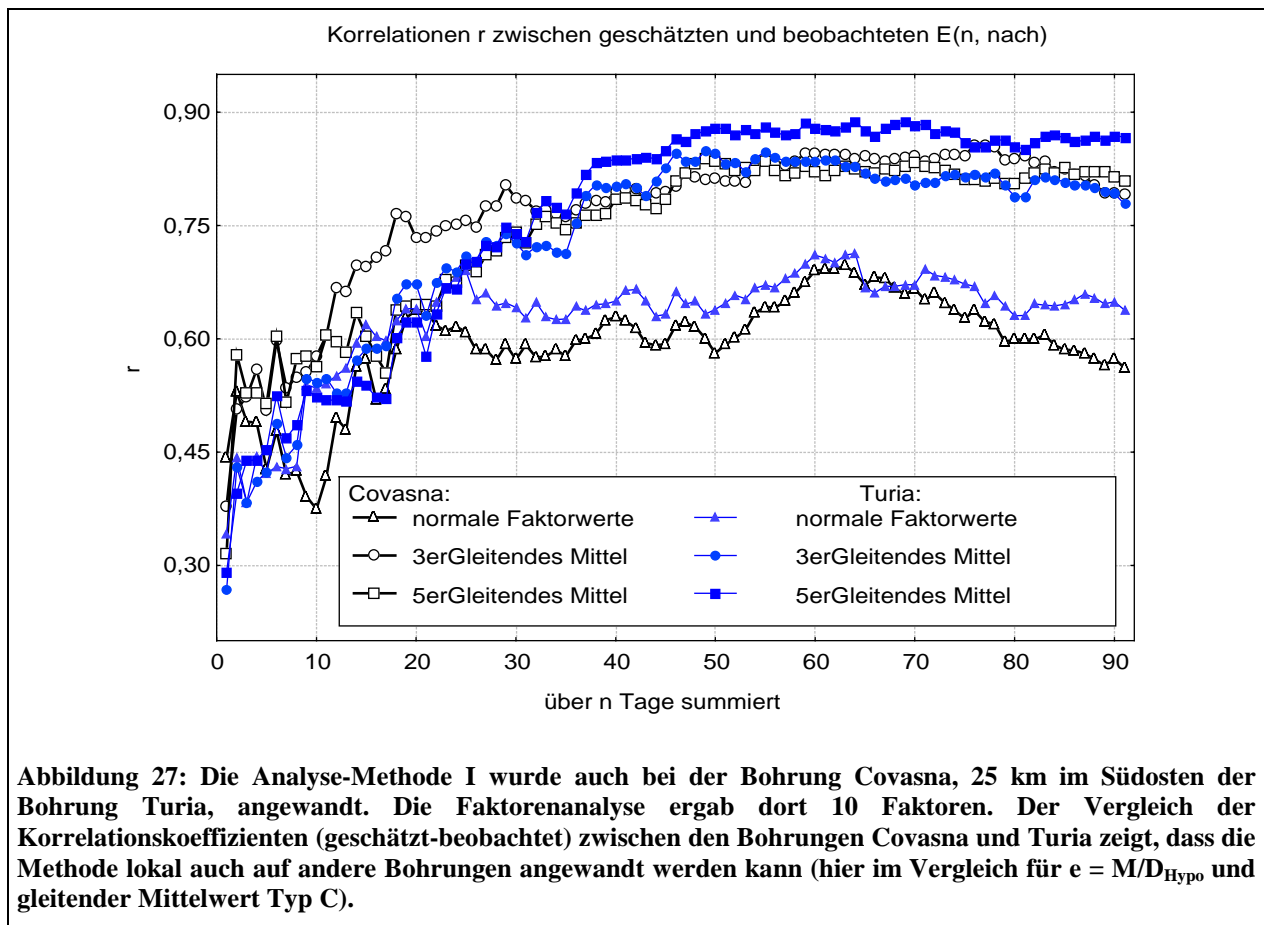
In Abbildung 27 werden die Ergebnisse der Analysemethode I zwischen der Bohrung Turia und der Bohrung Covasna für den e -Parameter $e = M/D_{\text{Hypo}}$ verglichen. Wie die subparallelen Verläufe der Korrelationskoeffizienten zeigen, ist die Methode auch lokal übertragbar (Zwischen beiden Bohrungen liegen ca. 25 km Luftlinie). Für die anderen Parameter verlaufen die Korrelationen ebenfalls subparallel.

Tabelle 23: Ein Vergleich der Summen für $n = 60$ der verschiedenen Summenzeitreihen $E_{n, \text{nach}}$ verdeutlicht, warum einige der Korrelationen zwischen geschätzter und beobachteter $E_{n, \text{nach}}$ subparallel verlaufen. Der Parameter $e = 10^M/D_{\text{Hypo}}^3$ wurde in Abbildung 25 nicht abgebildet.

	M	M/D_{Hypo}	M/D_{Epi}	$10^M/D_{\text{Hypo}}^3$	ε	$1/\text{Tiefe}^3$	M/Tiefe
M	1,00	0,99	0,99	0,71	0,61	0,23	0,26
M/D_{Hypo}	0,99	1,00	0,98	0,69	0,60	0,14	0,17
M/D_{Epi}	0,99		1,00	0,71	0,61	0,27	0,30
$10^M/D_{\text{Hypo}}^3$	0,71			1,00	0,98	0,24	0,27
ε	0,61				1,00	0,20	0,24
$1/\text{Tiefe}^3$	0,23					1,00	1,00
M/Tiefe	0,26						1,00

8 Ergebnisse Vrancea - 8.1 Das Hauptergebnis



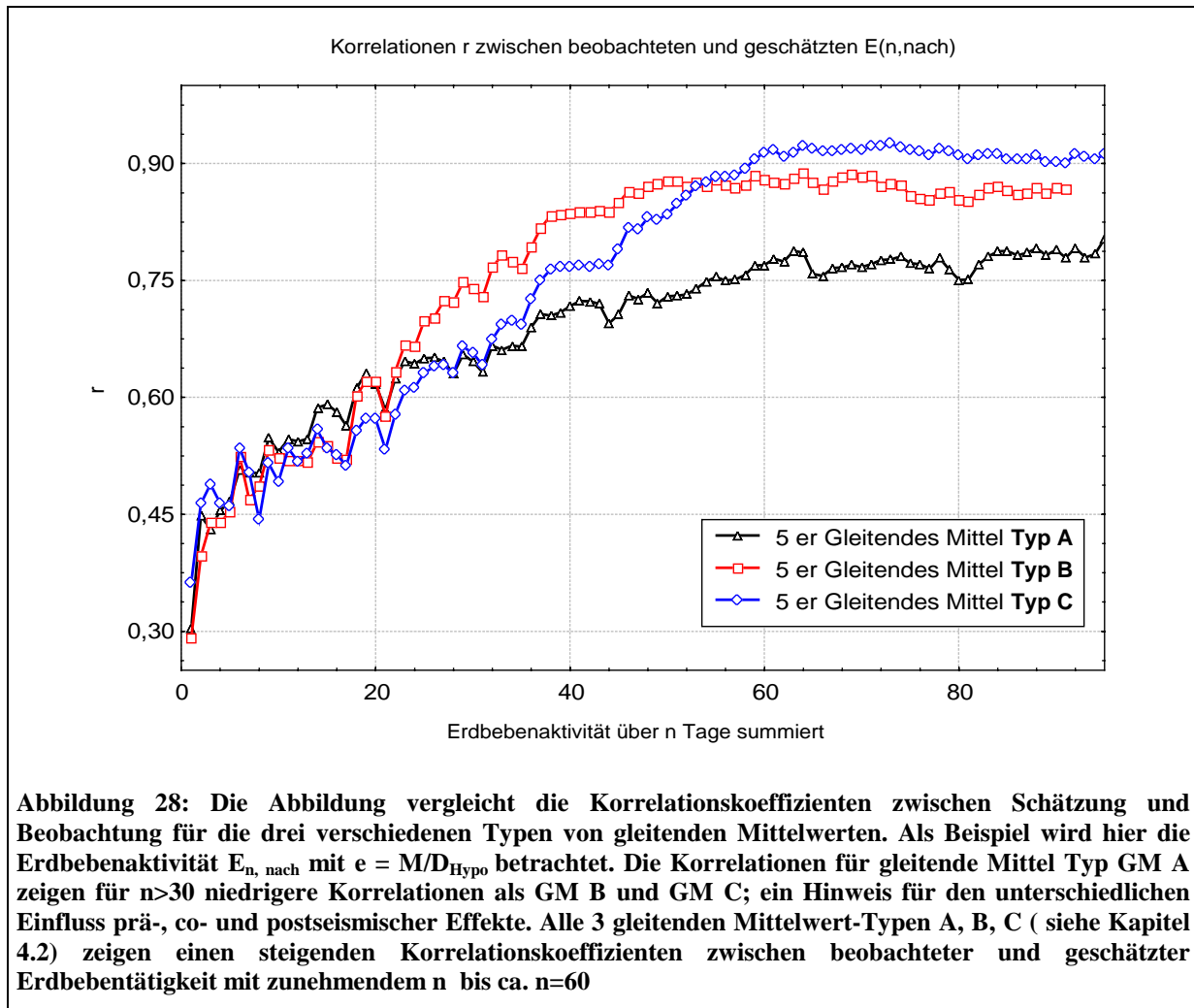


Die gleitenden Mittel für $g = 3$ und $g = 5$ für die Typen GM A, B und C führen in den meisten Fällen gegenüber den einfachen Faktorenwerten zu Verbesserungen der Schätzungen (Abbildung 27). Um die zukünftige Erdbebenaktivität zu schätzen (präseismischer Zusammenhang), wird die Erdbebenaktivität $E_{n, \text{nach}}$ mit dem gleitenden Mittelwert Typ A geschätzt (vergleiche Abbildung 15). Man erhält so eine präseismische Schätzung der Erdbebenaktivität. Wird der gleitende Mittelwert Typ C benutzt, um $E_{n, \text{vor}}$ zu schätzen, wird ein postseismischer Zusammenhang untersucht.

Beispiel:

Bei einem gleitenden Mittel von $g = 5$ und Typ GM B (Abbildung 15) werden Informationen von 14 Tagen nach und 14 Tagen vor der Referenzmessung der Monitoringparameter mitbetrachtet. Für eine Schätzung der Erdbebenaktivität $E_{n, \text{nach}}$ ($e = M/D_{\text{Hypo}}$) werden gute Schätzungen mit $r > 0,75$ für $n > 28$ Tage erreicht (Abbildung 28). Für $n > 14$ liegt somit eine Teilprognose der Erdbebenaktivität der Zukunft vor.

Werden zusätzlich Erdbeben-Informationen aus einem Zeitraum vor der Messung integriert (Erdbebenaktivität $E_{n, \text{sym}}$), verbessern sich die Schätzungen nur unwesentlich. Sie liegen für hohe n aber in der Regel über denen für Erdbebenaktivitäten vom Typ $E_{n, \text{nach}}$ (Abbildung 31). Ebenso liegen die Korrelationen der Schätzungen für die Erdbebenaktivitäten des Typs „vor“ über denen des Typs „nach“ (Abbildung 30).



Die Gewichtung der Erdbeben mit der Zeit und die Differenzen-Bildungen liefern bei allen Rechnungen schlechtere Ergebnisse bzw. niedrigere Korrelationen als die Benutzung der normalen Faktorwerte und deren gleitende Mittelwerte und die Benutzung der normalen Summen der Erdbebenanomalien (siehe Abbildung 35 bis Abbildung 39).

Die b -Koeffizienten der Regressionsgleichung verändern sich nicht chaotisch, sondern folgen weitgehend mit größer werdendem n einem Trend. Dieser kann mit der zunehmenden Erdbebenaktivität mit zunehmendem n erklärt werden.

Die Analyse der b -Koeffizienten aus den Multiplen Regressionen kann Aufschluss über die Wirkung der Tektonik auf die unterschiedlichen Faktoren der Wasserchemie geben. Je nach Betrachtung des gleitenden Mittelwertes für die Typen GM A, B oder C findet eine systematische Verschiebung der b -Koeffizienten der Faktoren statt. Dies wird am Beispiel der Erdbebenaktivitäten für $e = M/D_{Hypo}$ in Abbildung 40 bis Abbildung 42 gezeigt:

- Faktor 1 spielt bei Schätzung von $E_{n,nach}$ durch den Typ GM A (präseismischer Zusammenhang) die wichtigste Rolle, vor dem Faktor 3.
- Bei Schätzung von $E_{n,nach}$ durch den Typ GM B sind beide Faktoren ungefähr gleichwertig an der Erklärung der Varianz beteiligt, und
- mit der Schätzung von $E_{n,nach}$ durch den Typ C (postseismischer Zusammenhang) spielt Faktor 1 keine signifikante Rolle mehr, dafür wird der größte Teil der Varianz durch den Faktor 3 erklärt.

Die b -Koeffizienten bestätigen die Gruppierungen der E_n -Zeitreihen auf Faktoren. Der Vergleich der b -Koeffizienten in Abbildung 41 ($e = M/D_{Hypo}$) und Abbildung 34 ($e = M$) zeigt den subparallelen Verlauf der b -Koeffizienten für die Faktoren 1 bis 8.

Mischungsmodelle in Abhängigkeit von der tektonischen Aktivität:

Eine Analyse der b-Koeffizienten (z.B. in Kapitel 8.2.2 und 8.2.3) erlaubt es, Modelle über die Wirkung der Tektonik auf die Zusammensetzung der Grundwasserchemie an einem Beobachtungspunkt vor und nach Phasen erhöhter seismischer Aktivität aufzustellen (Abbildung 50). Außerdem ist eine Unterscheidung der Wirkung der Tektonik auf die Mischungsverhältnisse bezüglich der geometrischen Beziehungen zum Beobachtungspunkt festzustellen (Abbildung 64). Diese Modelle werden in den Unterkapiteln diskutiert. Für die Mischungsmodelle wurden die Analysen der 5er gleitenden Mittelwerte der Faktoren der Wasserchemie hinzugezogen. Die Mischungsmodelle für die Zusammensetzung des Wassers sind aber auch für andere Transformationen der Monitoringparameter aufstellbar. Diese Modelle machen aber nur Sinn, wenn signifikante Unterschiede im Verhalten der Faktoren oder Monitoringparameter vorliegen.

Basis für die Mischungsmodelle ist die Annahme, dass die Faktoren der Wasserchemie acht bzw. zehn unabhängige Komponenten darstellen, aus denen die zu einem Zeitpunkt gemessene chemische Charakterisierung des Wassers zusammengesetzt wird. Mit Hilfe der Analyse der b-Koeffizienten in den Schätzungen der Erdbebenaktivität kann nun der Einfluss eines jeden Faktors an der Zusammensetzung des Wassers in Zusammenhang mit der betrachteten tektonischen Aktivität untersucht werden. Probleme können auftreten, wenn über den geologischen Untergrund und die hydrogeologischen Verhältnisse zu wenig bekannt ist. Die Faktoren der Bohrung Turia lassen sich teilweise mit Hilfe der Informationen aus dem Bohrprotokoll interpretieren. Als hilfreich erweist sich der Zustand von Faktor 1. Er vereint einige wesentliche Spezies, welche typisch für Tiefenwässer sind. Chemische Spezies, die typisch für eine Grundwasserspezies wie z.B. Tiefenwässer sind, müssen allerdings nicht auf einem Faktor liegen. Entscheidend für die Zuordnung auf einen Faktor sind nicht absolute Konzentrationen, sondern die Varianz der einzelnen hydrochemischen Spezies. Für die Bohrung Covasna ist die Interpretation aus diesem Grund schwierig. Die gefundenen Faktoren sind auf Basis der vorliegenden Informationen sehr abstrakt. Wegen des mangelnden Wissens über den geologischen Untergrund und die Grundwasserverhältnisse sind die Faktoren nicht eindeutig interpretierbar. Die Analyse der b-Koeffizienten erlaubt auch hier von einer Mischungsänderung im Zusammenhang mit der Tektonik auszugehen.

Einfluss präseismischer Effekte und postseismischer Effekte:

Die Schätzungen mit den einfachen Faktorwerten sind in der Regel nicht besser sondern eher schlechter als für Mittelwerte. In der Grafik unten werden für den e-Parameter $e = M/D_{\text{hypo}}$ der Unterschied für den präseismischen und den postseismischen Zusammenhang gezeigt. Mit den gleichen Faktorwerten wird einmal der präseismische und einmal der postseismische Zusammenhang geschätzt. Für $n > 40$ sind die postseismischen Schätzungen deutlich besser. Dies kann als Hinweis dafür gewertet werden, dass der Einfluss coseismischer Effekte auf die Wasserchemie, welche ja auch postseismisch wirken, stärker ist als der für präseismische Effekte. Wird dieser Zusammenhang für die Bohrung Covasna betrachtet (Abbildung 75) ist dieser Sachverhalt eindeutiger. Dort liegen für den e-Parameter $10^M/\text{Tiefe}$ die Korrelationen für den postseismischen Zusammenhang für fast alle n deutlich höher. Dies gilt dort auch für die betrachteten gleitenden Mittel der Faktorwerte. Mit den Unterscheidungen können also gezielt die Einflüsse verschiedener tektonischer Effekte eingeschätzt werden.

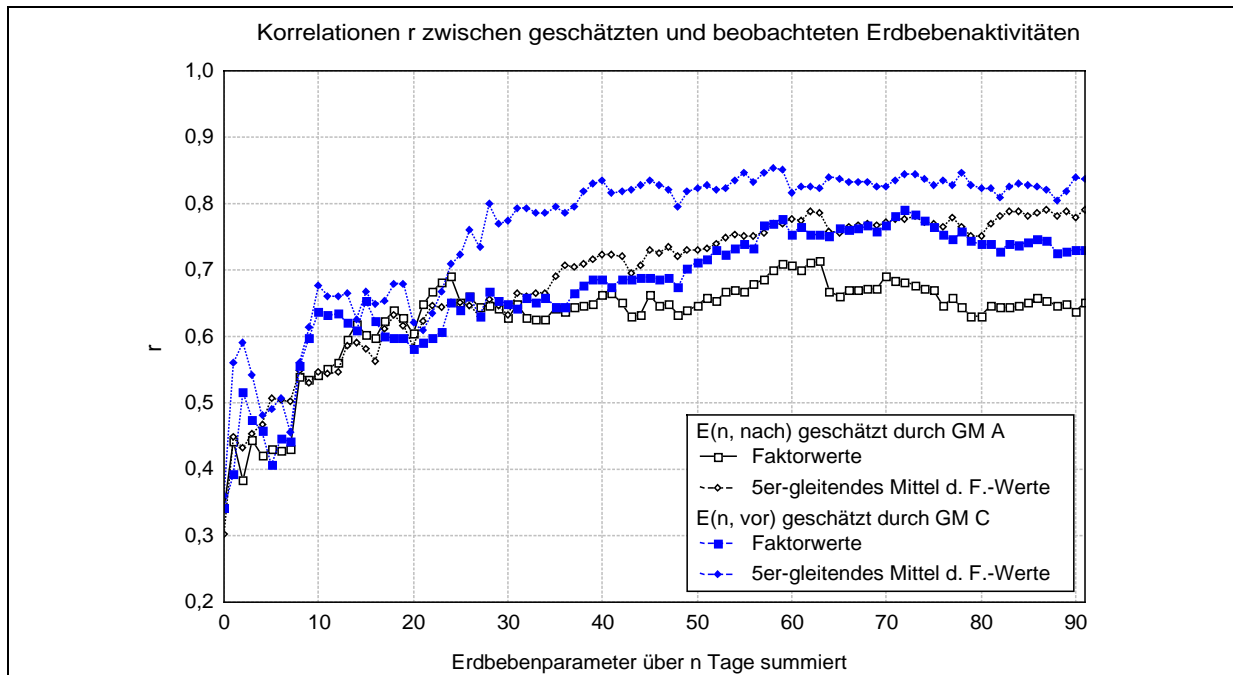


Abbildung 29: Vergleich der postseismischen und präseismischen Effekte und deren Wirkung auf den Zusammenhang, hier am Beispiel des Parameters $e = M/D_{\text{hypo}}$ für die Bohrung Turia.

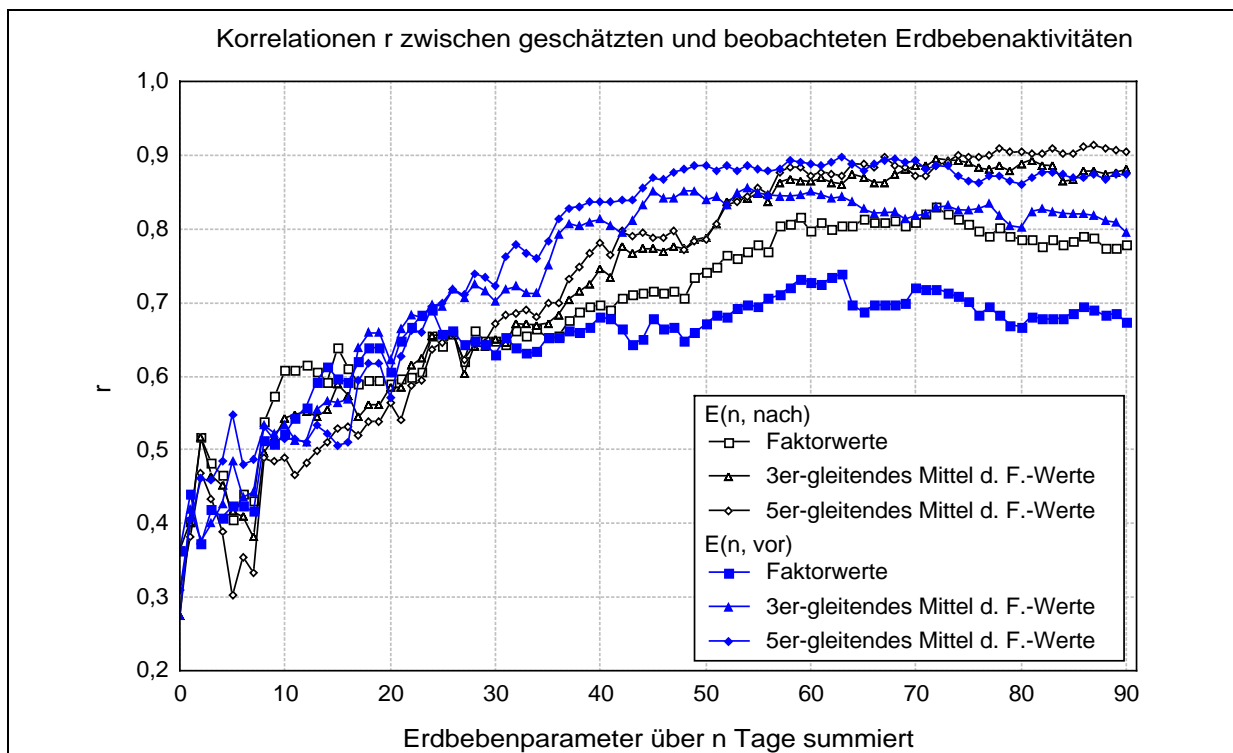


Abbildung 30: Vergleich der Korrelationen für die Schätzungen der beobachteten Erdbebenaktivitäten $E_{n, \text{nach}}$ und $E_{n, \text{vor}}$ mit $e = M$ durch die gleitenden Mittelwerte GM Typ B. Die Korrelationen der einfachen Faktorwerte für die „Nachläufersignale“ ($E_{n, \text{vor}}$ geschätzt GM Typ B) verlaufen ab $n > 30$ am niedrigsten, obwohl die Korrelationen der „Nachläufersignale“ ansonsten im Vergleich zu den „Vorläufersignalen“ höher oder ähnlich hoch sind.

8.2 Turia: Ergebnisse und Diskussion

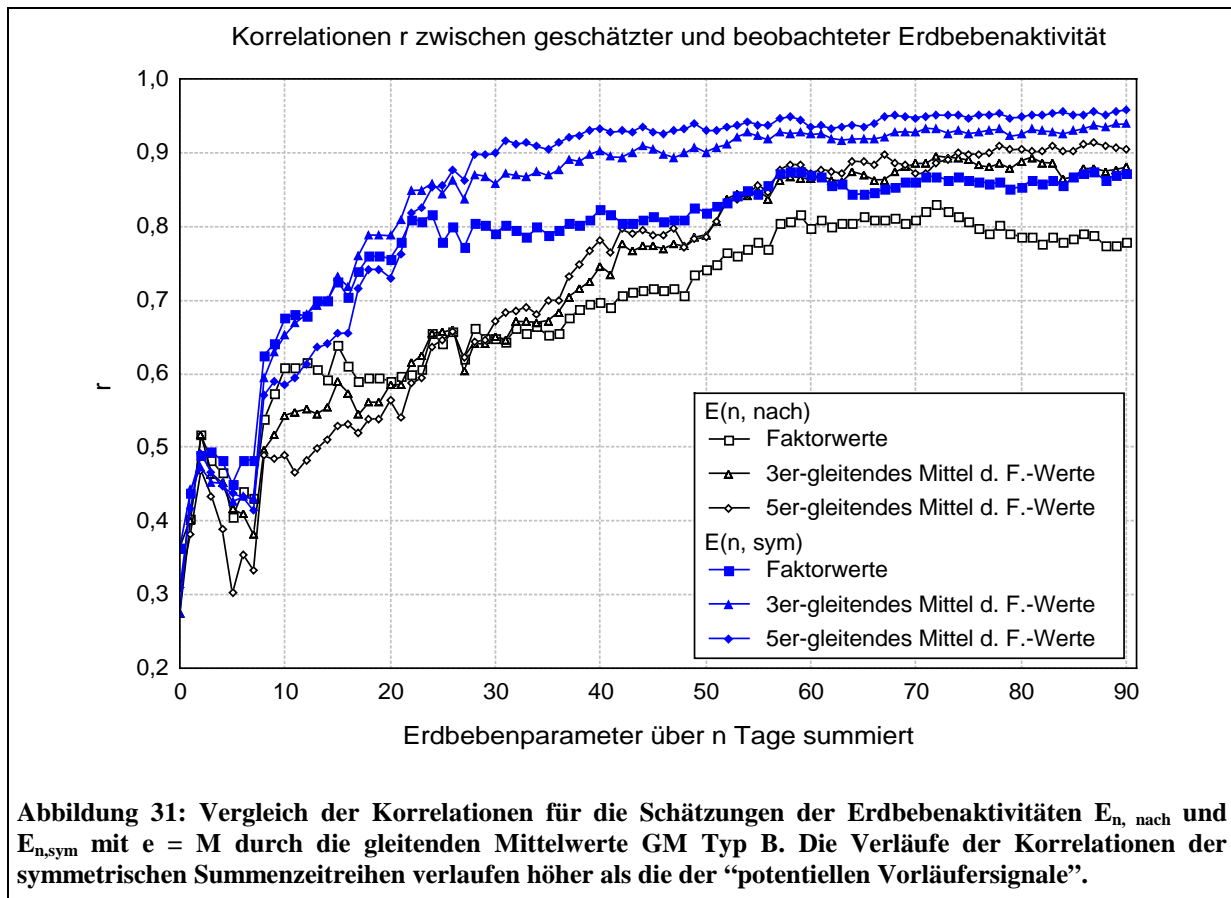
Um die Auswertung nicht aufzublähen, werden hier exemplarisch nur vier Erdbeben-Transformationen (M , M/D_{Hypo} , $10^M/\text{Tiefe}$, ϵ_{dobro}) im Detail behandelt. Die Ergebnisse für $e = M$ und $e = M/D_{\text{Hypo}}$ sind weitgehend identisch, weil die Erdbebenaktivitäten $E_{n, \text{Typ}}$ dieser beiden e -Parameter hoch miteinander korrelieren (sie liegen auf dem gleichen Faktor). Damit soll die Verteilung der Erdbebenaktivitäten $E_{n, \text{Typ}}$ auf Faktoren in Erinnerung gerufen werden. Die Struktur der Erdbebenverteilung in der Vrancea-Zone macht die Tiefe zu einem besonderen Parameter (siehe Abbildung 18 und Abbildung 19 in Kapitel 6.1).

Die Erdbebenaktivitäten des Typ „sym“ werden bei näherer Betrachtung nicht besser geschätzt als die Typen „vor“ oder „nach“, da in die Berechnung der Erdbebenaktivitäten die Informationen von $2n$ Zeiteinheiten eingehen.

In Abbildung 32 und Abbildung 33 werden die Beobachtungen und die Schätzungen der Erdbebenaktivität für $E_{60, \text{nach}}$ und die 5er gleitenden Mittelwerte GM A und GM C verglichen. Beide Abbildungen zeigen, dass die Schätzungen die Verläufe der Beobachtungen gut wiedergeben.

Die Schätzung für $E_{60, \text{nach}}$ durch den 5er GM A entspricht der Schätzung eines präseismischen Zusammenhangs. Abbildung 15 verdeutlicht dies. Dagegen entspricht die Schätzung von $E_{60, \text{nach}}$ durch den 5er GM C der Betrachtung eines coseismischen Zusammenhangs. Die jeweils betrachteten Zeitabschnitte der Erdbebenaktivität $E_{60, \text{nach}}$ und dem 5er GM C der beiden Zeitreihen liegen fast parallel. Der Zeitraum der Erdbebenaktivität in der Schätzung der Erdbebenaktivität $E_{60, \text{nach}}$ beinhaltet den Zeitraum der geochemischen Informationen von 56 Tagen (siehe Abbildung 15).

Auf die Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 35 bis Abbildung 39 wurde bereits im Unterkapitel Hauptergebnisse eingegangen.



8.2.1 Parameter $e = M$

Die meisten Abbildungen für den e -Parameter $e = M$ wurden bereits oben diskutiert.

Die Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigen, wie gut eine Schätzung für $E_{60, Typ}$ die beobachteten Erdbebenaktivitäten abbildet.

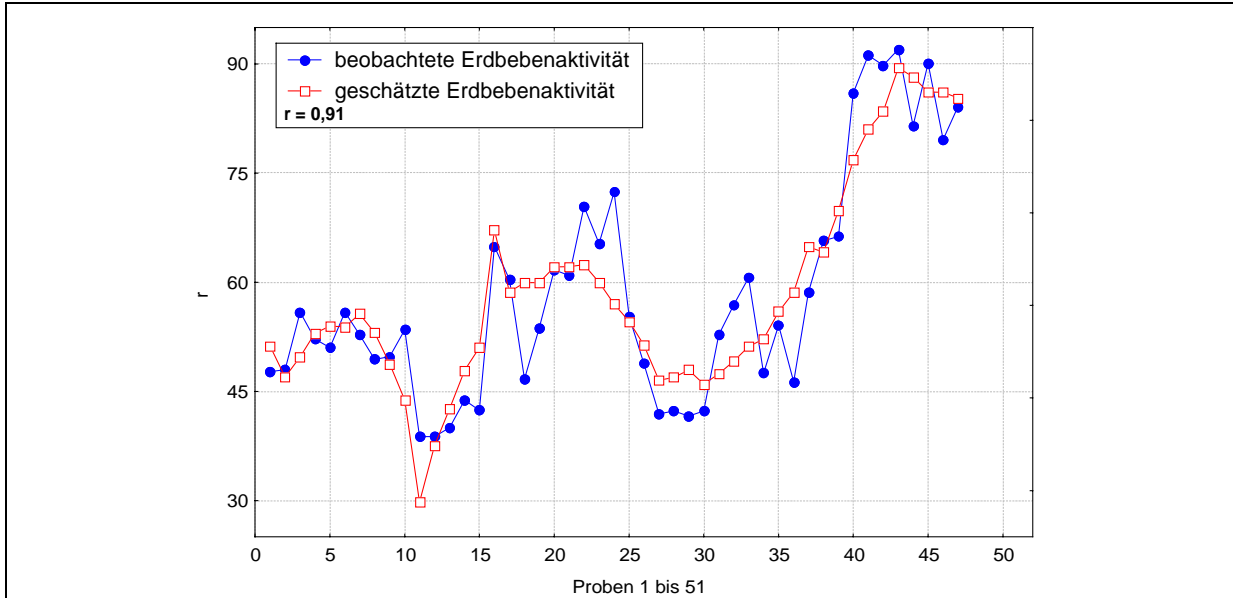


Abbildung 32: Diese Abbildung verdeutlicht die Güte einer Schätzung von $E_{60, vor}$ mit einer Korrelation von $r = 0,91$ durch den 5er-gleitenden Mittelwert Typ C. In der nächsten Abbildung ist der gleiche Fall für den gleitenden Mittelwert Typ A dargestellt ($r=0,79$), welcher einer rein präseismischen Schätzung entspricht.

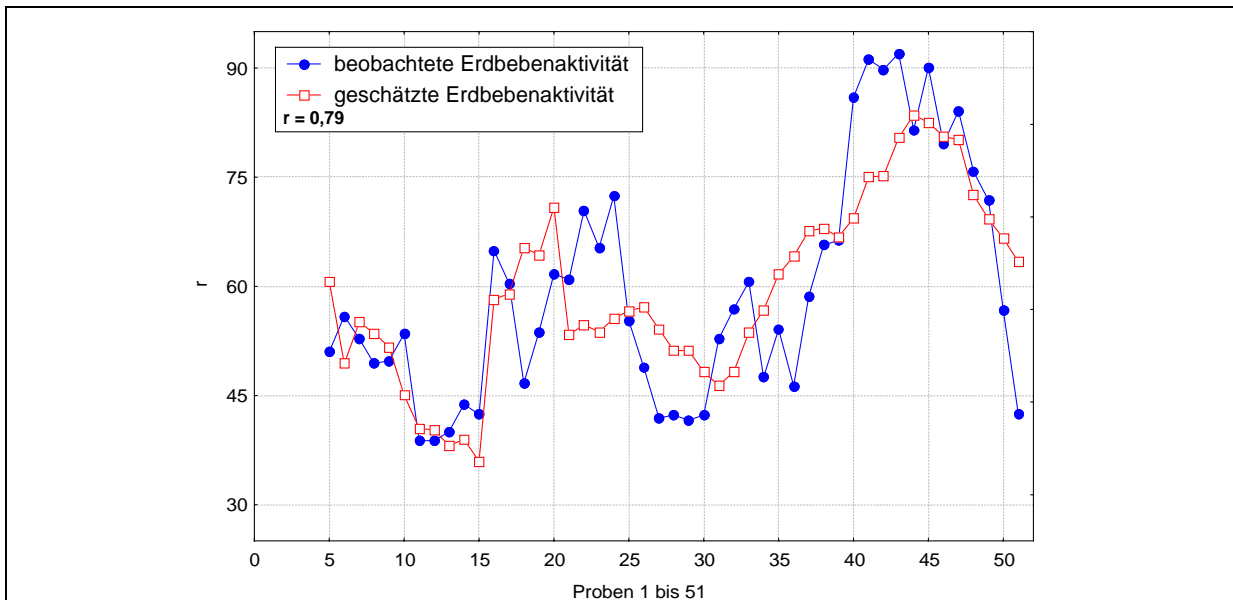
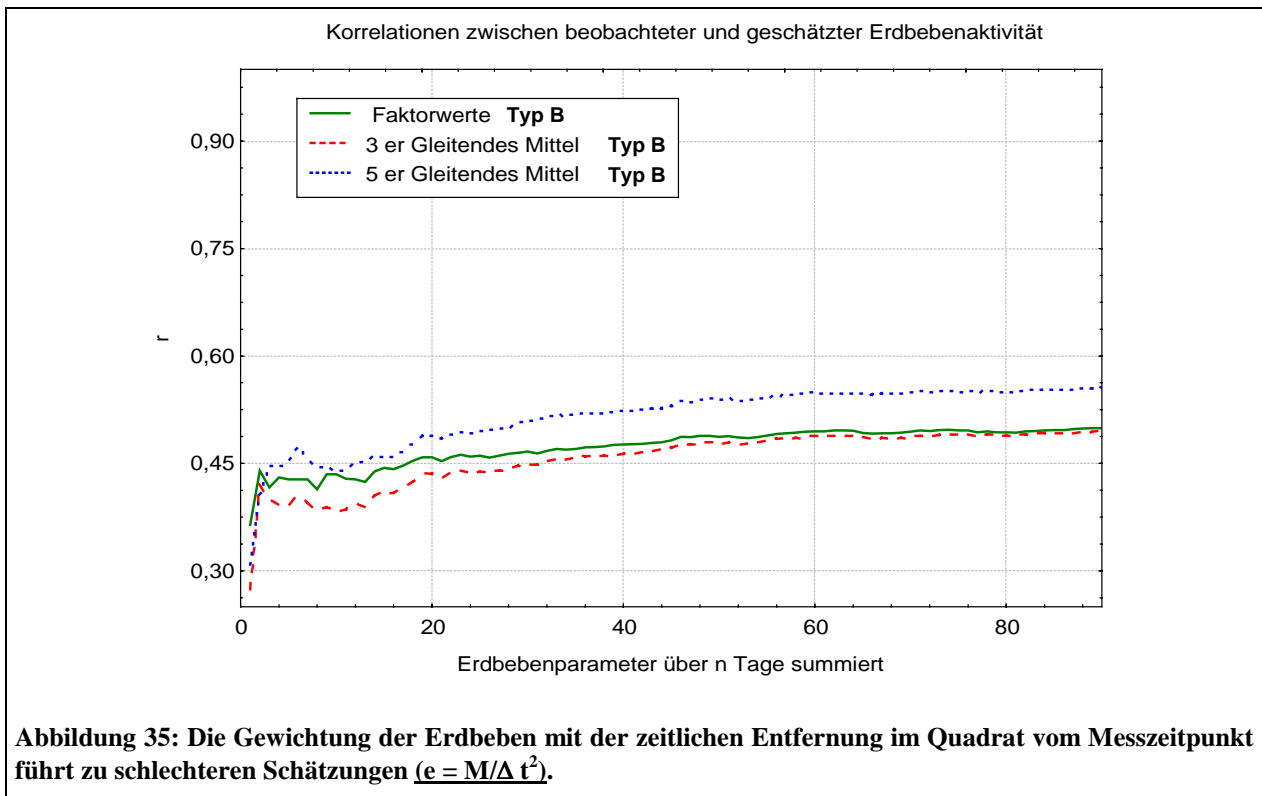
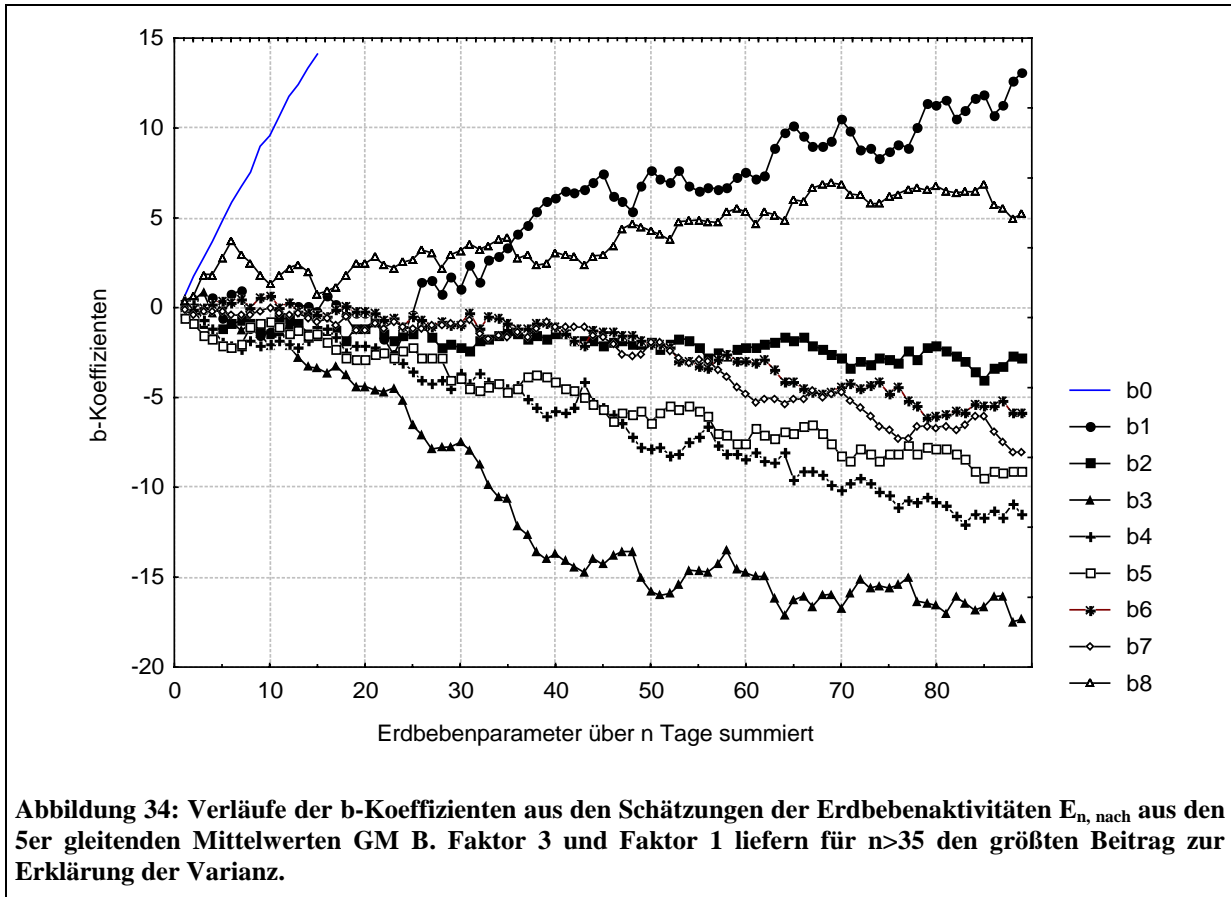
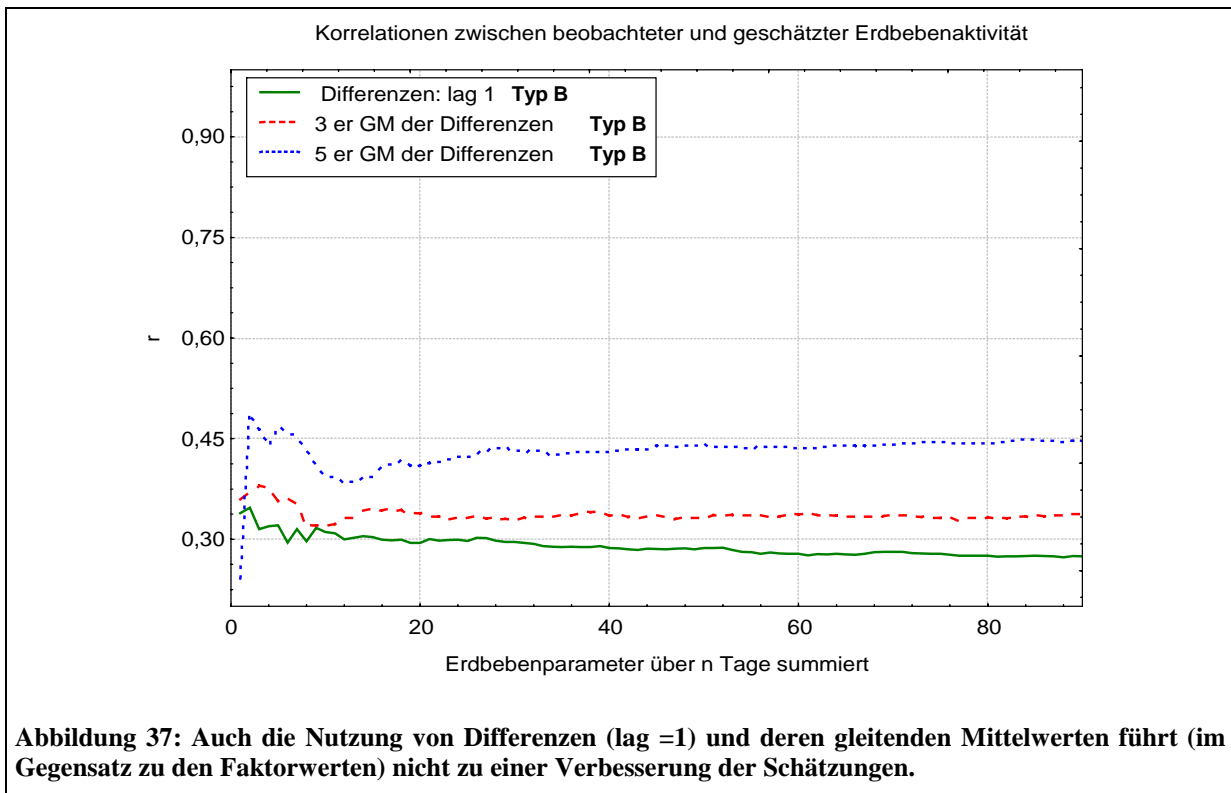
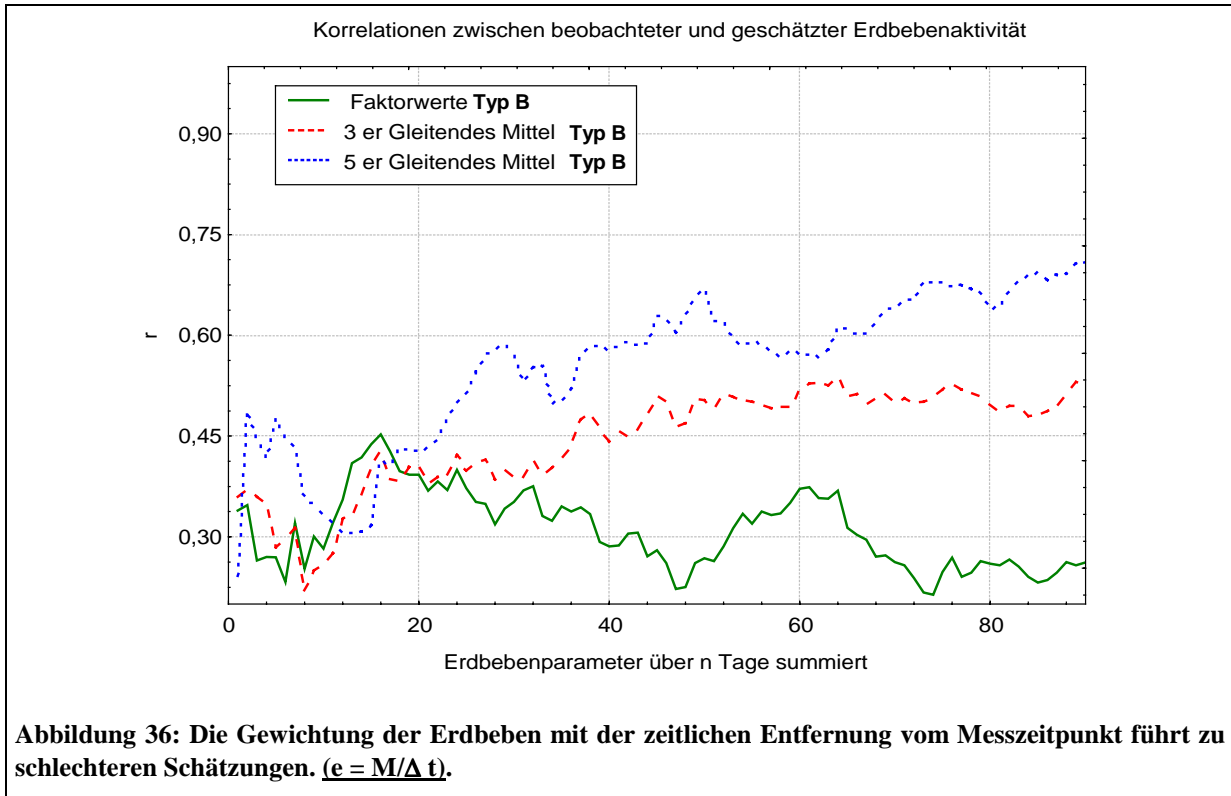
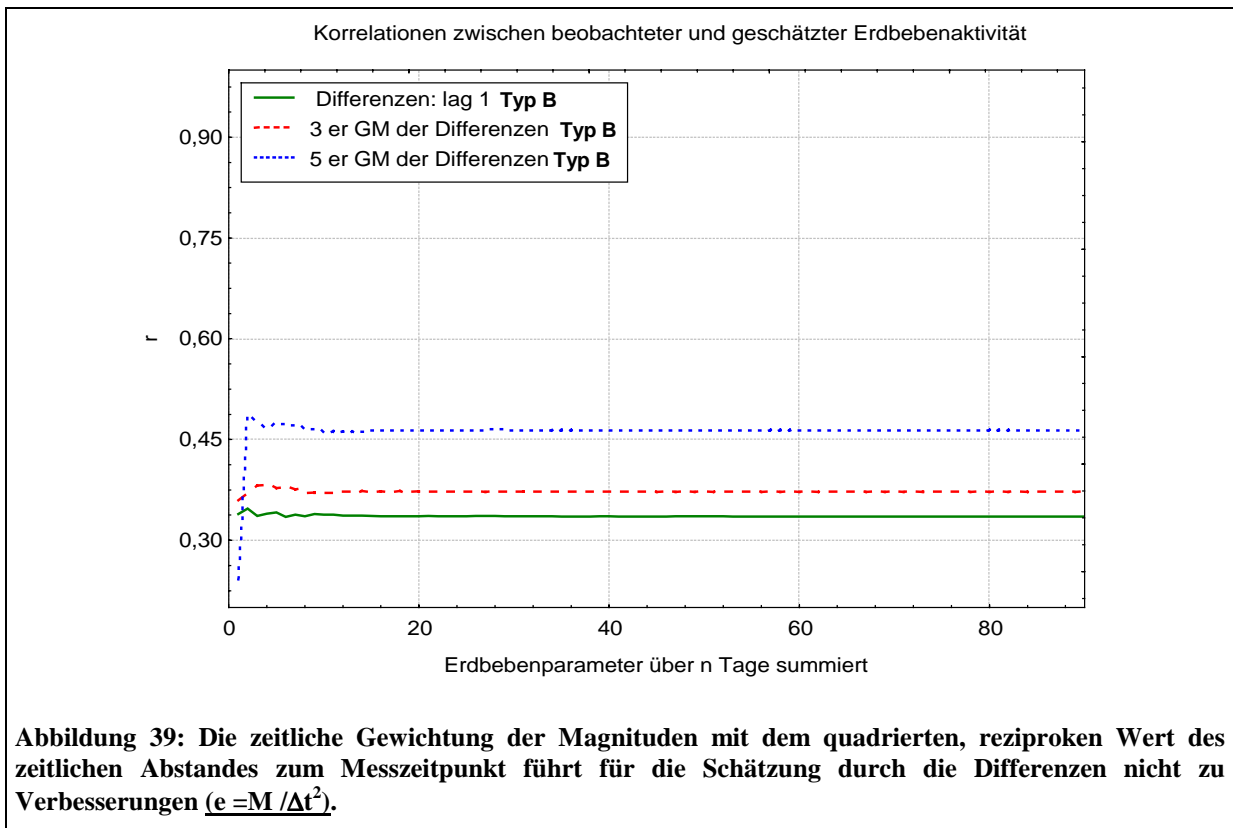
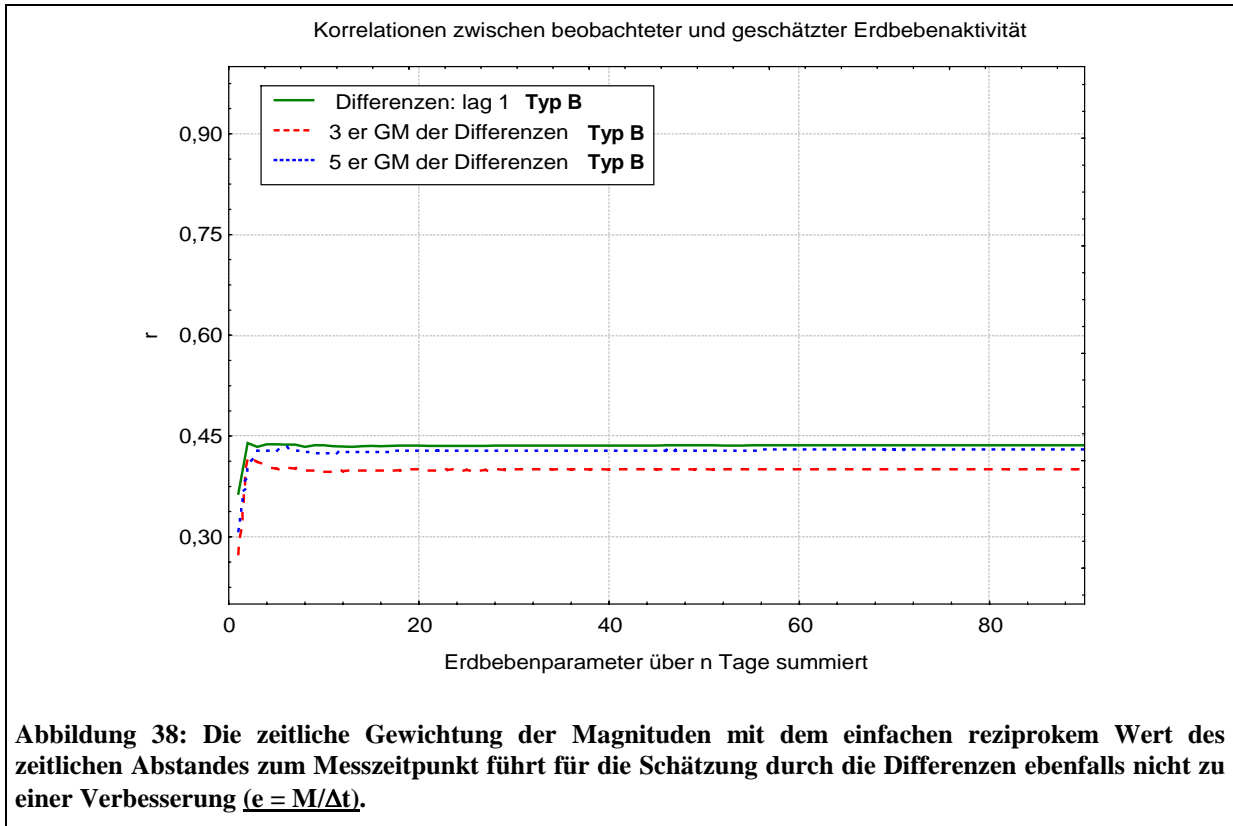


Abbildung 33: Die Schätzung von $E_{60, nach}$ durch 5er-GM Typ A (präseismischer Fall) zeigt, dass er den allgemeinen Trend fast ebenso gut schätzt wie im Fall der Schätzung von $E_{60, vor}$ durch 5er-GM Typ C.







8.2.2 Parameter $e = M/D_{\text{hypo}}$

Der e-Parameter $e = M/D_{\text{hypo}}$ repräsentiert für $n = 60$ einen Faktor, welcher ca. 31 % der Varianz der untersuchten Erdbebenaktivitäten erklärt. Für den Faktor scheint die Distanz keine Rolle zu spielen. Dagegen repräsentiert die Tiefe als Distanzmaß einen eigenen Faktor. In Kapitel 6 wird die Verteilung der Erdbebenaktivitäten diskutiert.

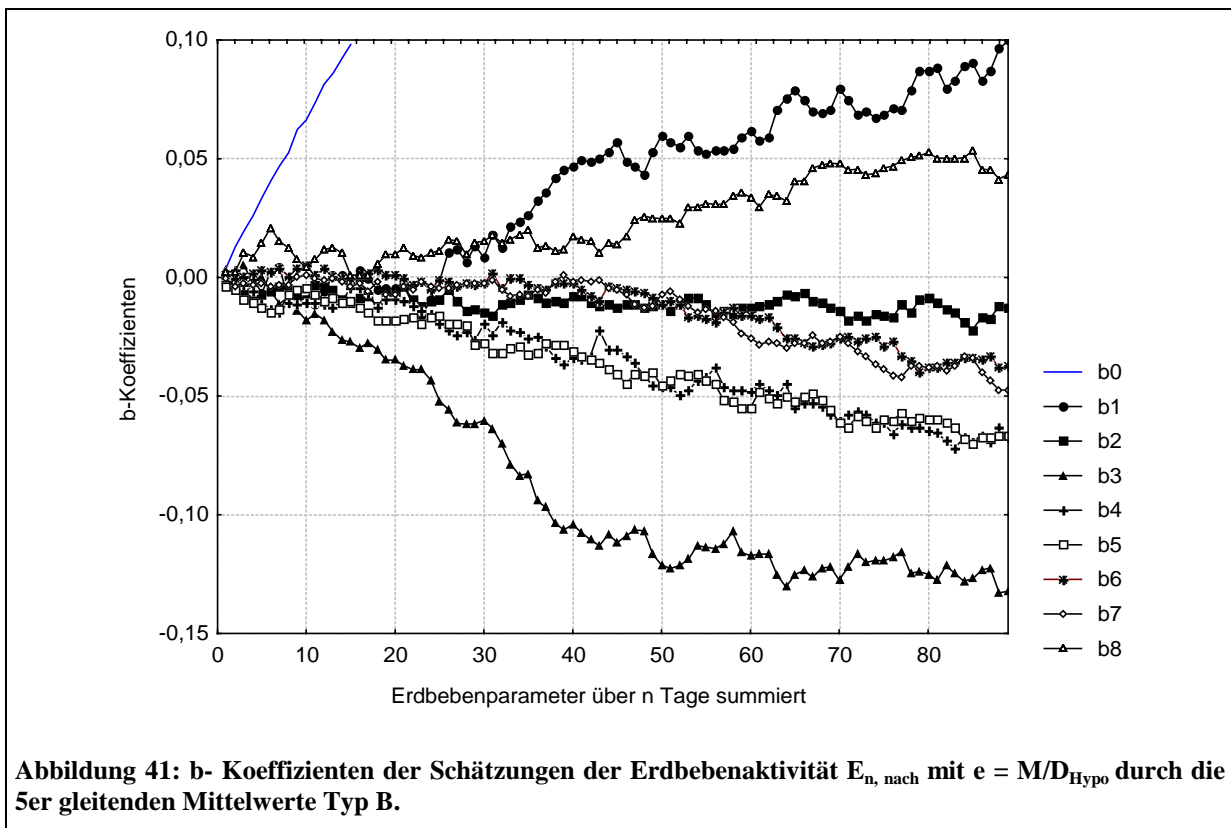
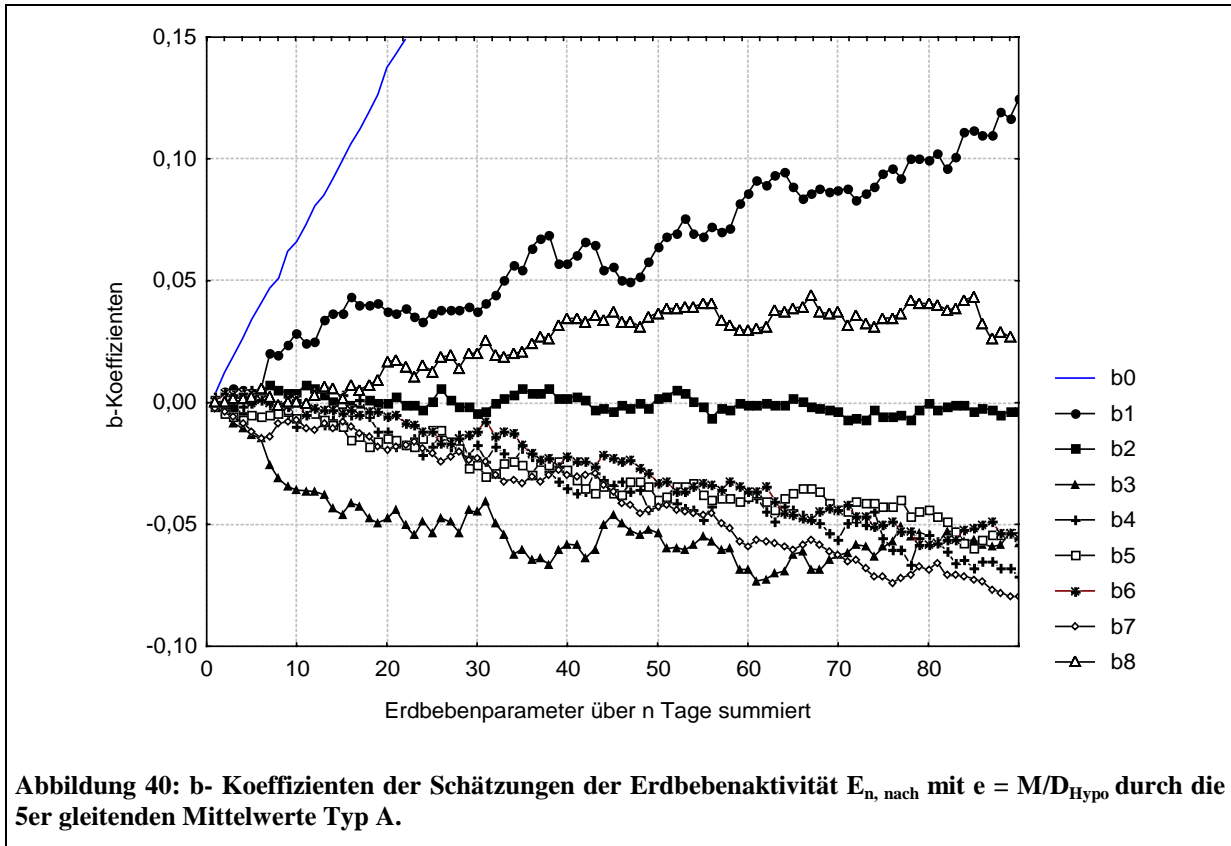
In diesem Teilkapitel erfolgt eine Analyse der b-Koeffizienten aus den Schätzungen der Multiplen Regressionen. Es zeigt sich, dass sich die b-Koeffizienten mit dem Verschieben der gleitenden Mittelwerte in den Schätzungen systematisch verändern. Beispiele sind Faktor 1 und Faktor 3 für die Schätzung der Erdbebenaktivitäten $E_{n,\text{nach}}$. Mit zunehmender Überschneidung der Betrachtungszeiträume von seismischer Aktivität $E_{n,\text{nach}}$ und Monitoringzeitraum („coseismischer“ Einfluss), repräsentiert durch die gleitenden Mittelwerte, nimmt der Beitrag von Faktor 3 an der Aufklärung der Varianz zu (von Abbildung 40 zu Abbildung 42). Auch im präseismischen Fall besitzt Faktor 3 einen signifikanten Beitrag an der Klärung der Varianz, während er im postseismischen Fall kaum zur Klärung der Varianz beiträgt.

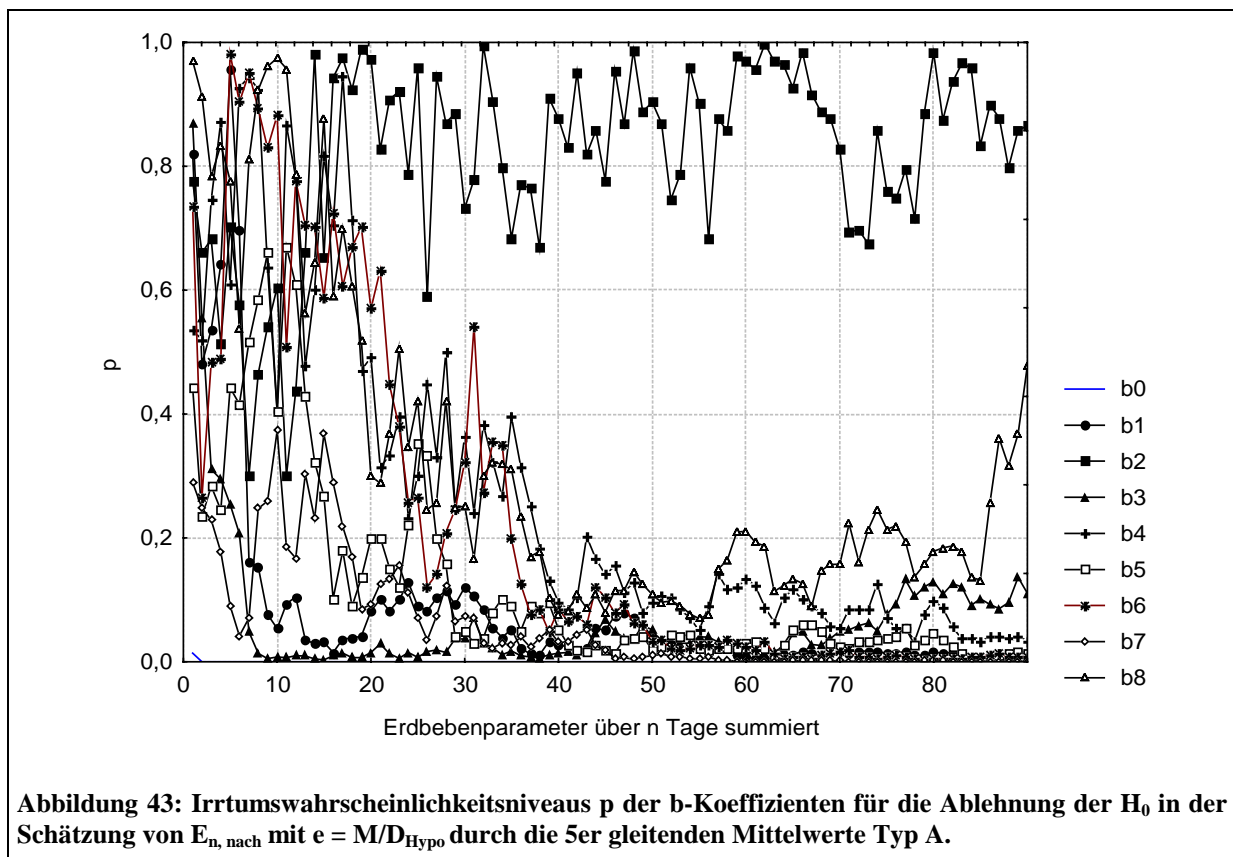
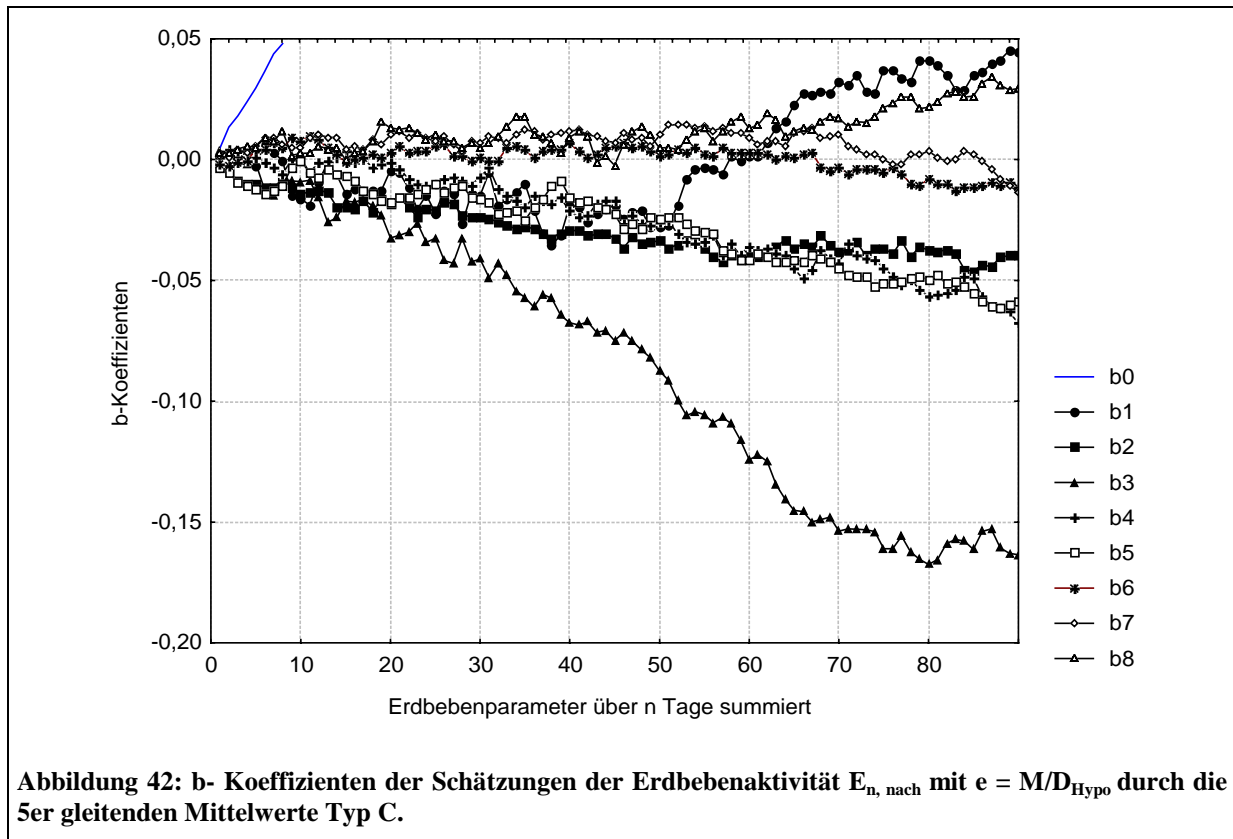
Faktor 1 ist für den „präseismischen“ Fall der wichtigste Faktor ($b > 0$ für alle n , Abbildung 40). Bei Betrachtung des postseismischen Falles dreht sich das Vorzeichen des b-Koeffizienten für Faktor 1 um ($b < 0$ für alle n , Abbildung 46). Der Koeffizient ist für beide Fälle $n > 30$ signifikant. Abbildung 43 und Abbildung 47 zeigen die Signifikanzniveaus, auf denen die Nullhypothese für die b-Koeffizienten abgelehnt werden kann.

Mit Hilfe der hier genannten Unterschiede wurde das oben erwähnte Mischungsmodell entwickelt (Abbildung 50). In diesem Modell sind signifikante b-Koeffizienten (Signifikanzniveau $p=0,1$ für $n > 30$) fett gekennzeichnet. Ist ein Koeffizient positiv, so wird dies mit einem Pluszeichen dargestellt. Ist der Faktor der wichtigste oder zweitwichtigste für die Klärung der Varianz (Absolutbetrag der b-Koeffizienten) und größer Null (kleiner Null), wird dies mit 2 Pluszeichen (Minuszeichen) gekennzeichnet, bei negativen b-Koeffizienten entsprechend mit einem bzw. zwei Minuszeichen. Als wichtig wird die relative Stärke des b-Koeffizienten genommen. Wenn mehrheitlich $|b_x| > |b_y|$ gilt, trägt Faktor X einen größeren Beitrag zur Klärung der Varianz bei als Faktor Y.

Durch die gezielte Auswertung der b-Koeffizienten und somit des Einflusses der Faktoren in der Schätzung kann rückgeschlossen werden, welche Spezies im Wasser mit der betrachteten tektonischen Aktivität zusammenfällt. Somit kann auch entschieden werden, welche Variablen für ein künftiges Monitoring geeignet sind.

Abbildung 49 verdeutlicht noch einmal die gegenläufige Tendenz der b-Koeffizienten der Faktoren 1 und 3 bezüglich der Schätzungen $E_{n,\text{vor}}$ durch GM C („postseismischer Fall“) und $E_{n,\text{nach}}$ durch GM A („präseismischer Fall“).





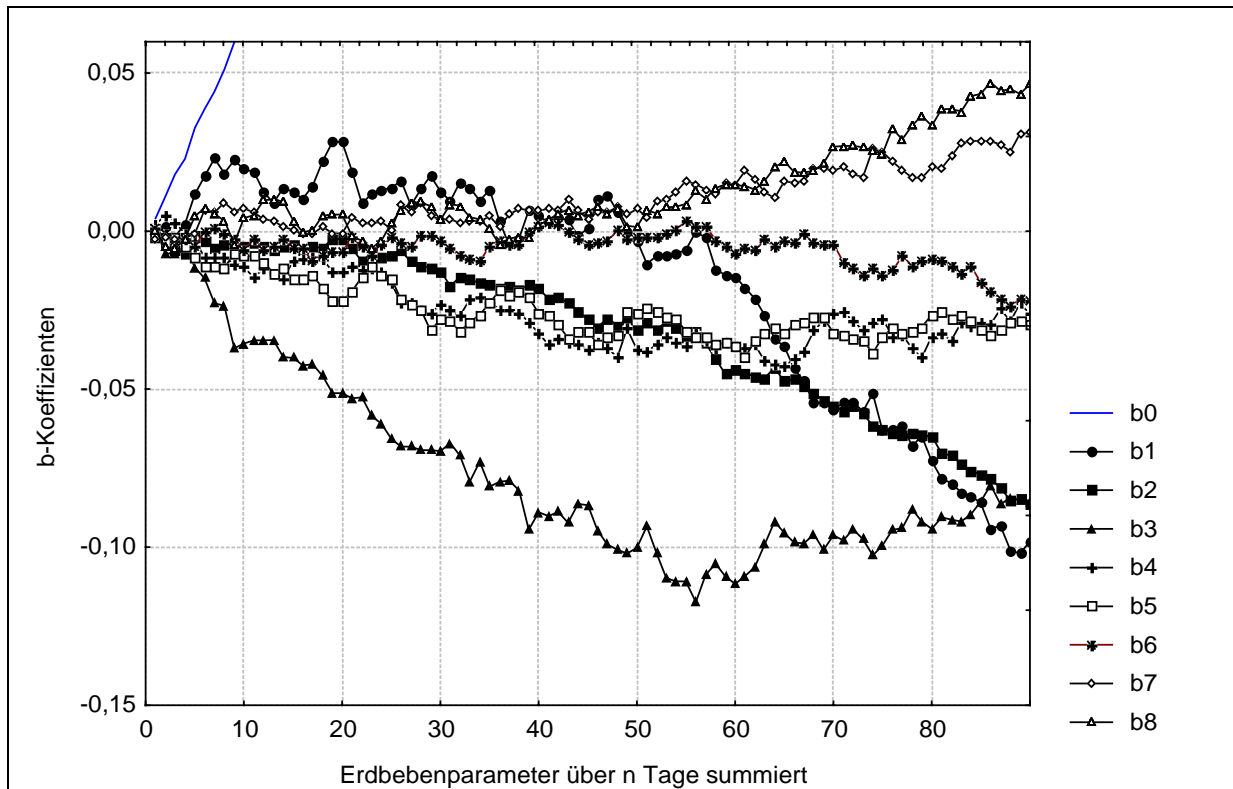


Abbildung 44: b- Koeffizienten der Schätzungen der Erdbebenaktivität $E_{n, \text{vor}}$ mit $e = M/D_{\text{Hypo}}$ durch die 5er gleitenden Mittelwerte Typ A.

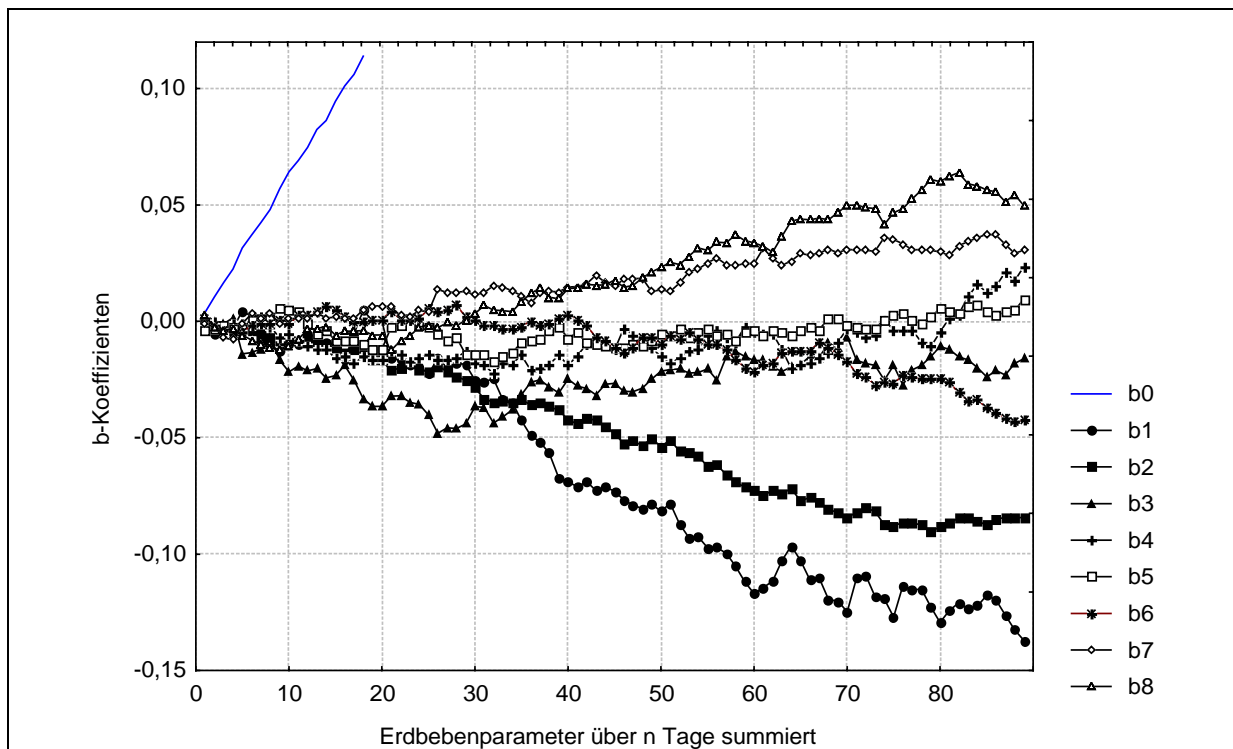


Abbildung 45: b- Koeffizienten der Schätzungen der Erdbebenaktivität $E_{n, \text{vor}}$ mit $e = M/D_{\text{Hypo}}$ durch die 5er gleitenden Mittelwerte Typ B.

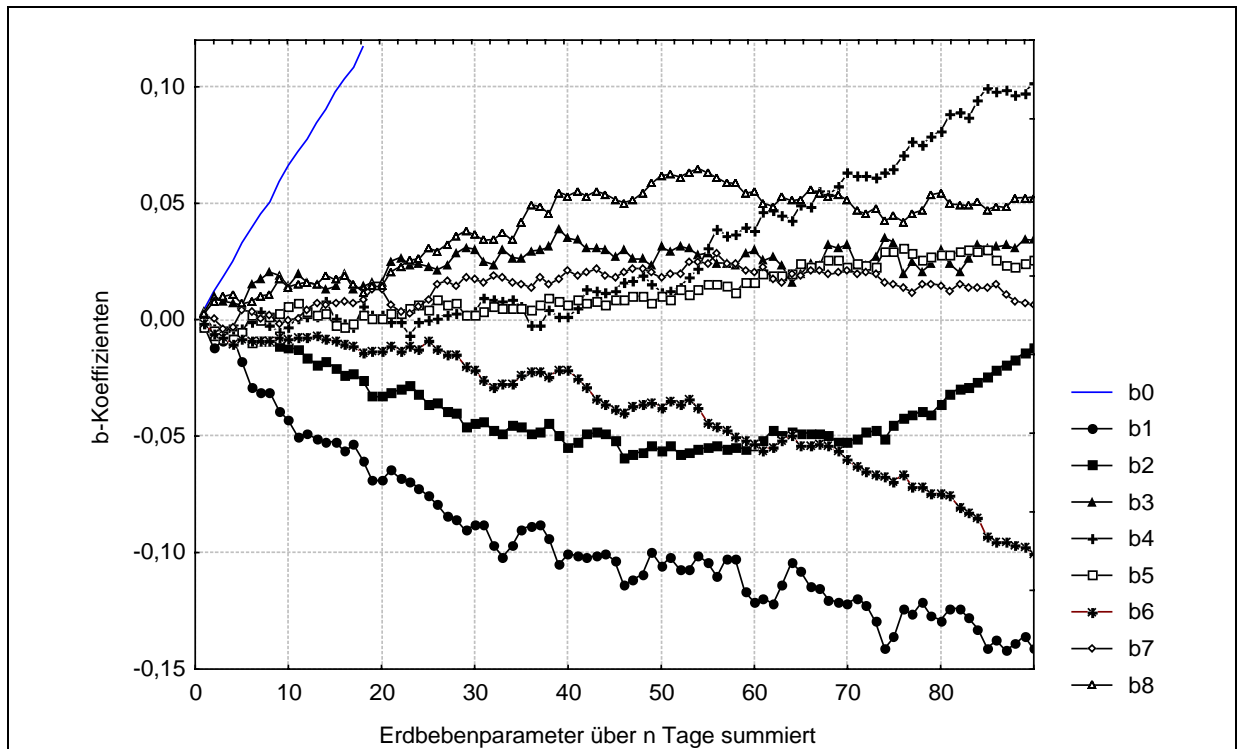


Abbildung 46: b-Koeffizienten der Schätzungen der Erdbebenaktivität $E_{n, \text{vor}}$ für $e = M/D_{\text{Hypo}}$ durch die 5er gleitenden Mittelwerte Typ C.

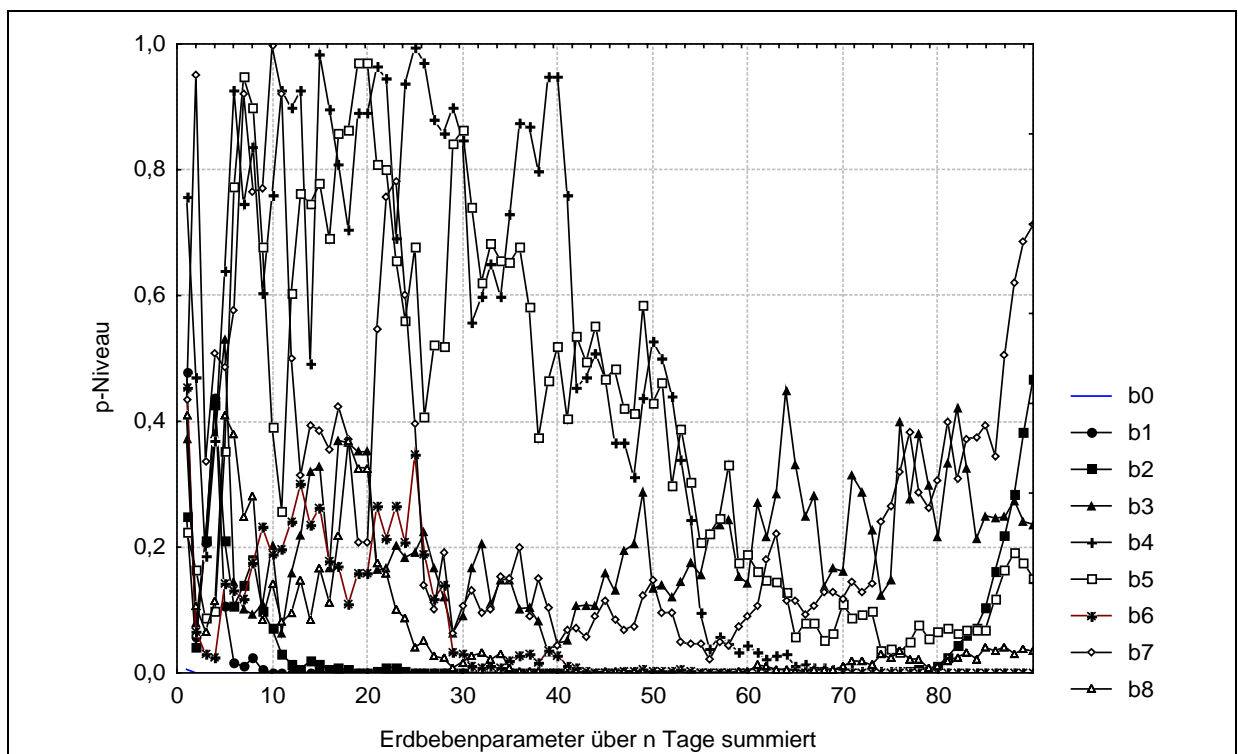


Abbildung 47: Irrtumswahrscheinlichkeitsniveau p der b-Koeffizienten für die Ablehnung der H_0 in der Schätzung von $E_{n, \text{vor}}$ mit $e = M/D_{\text{Hypo}}$ durch die 5er gleitenden Mittelwerte Typ C.

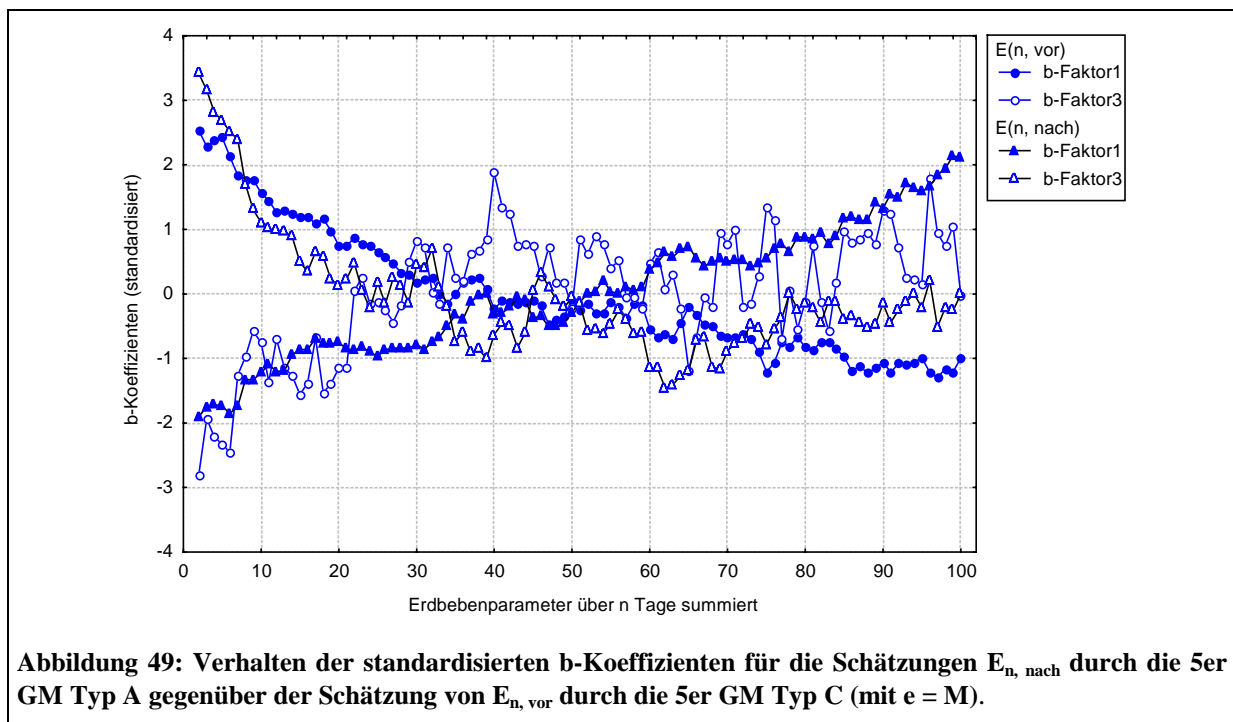
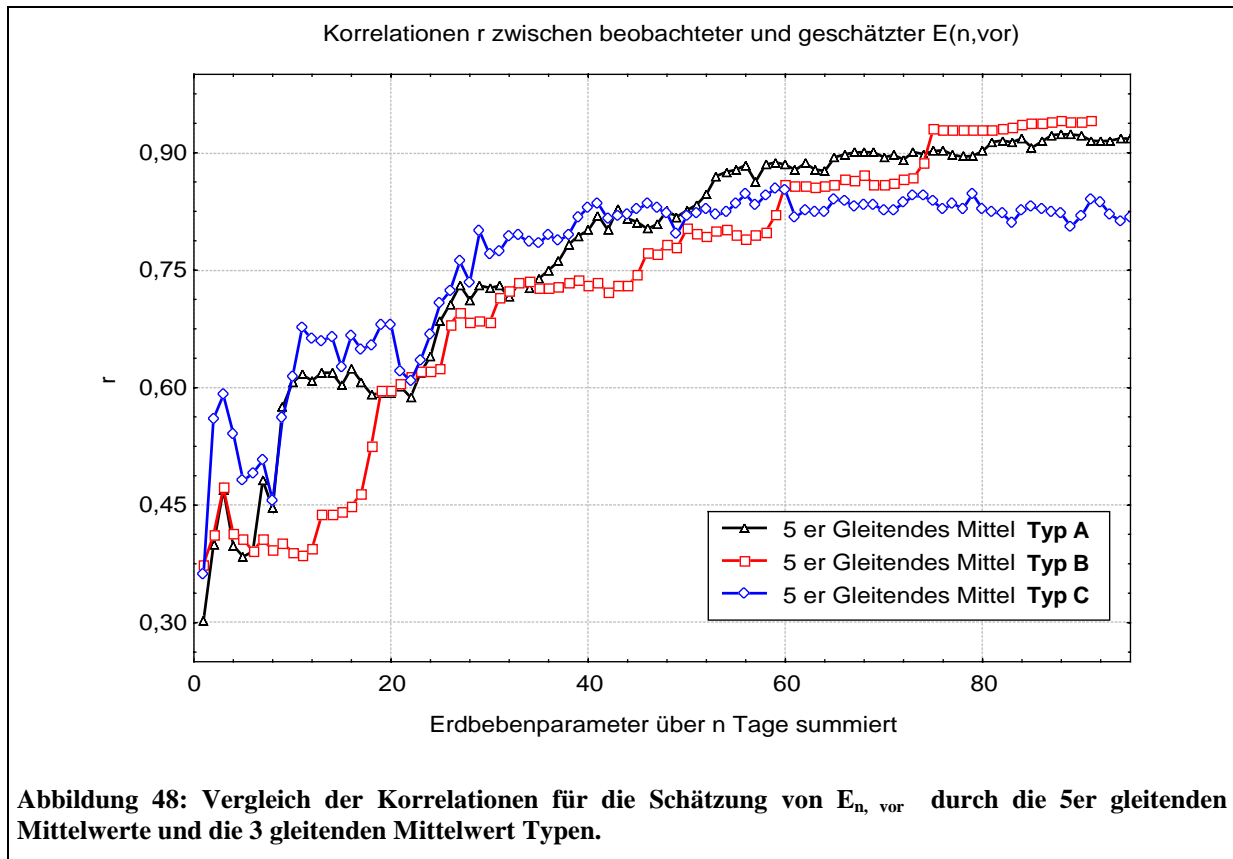


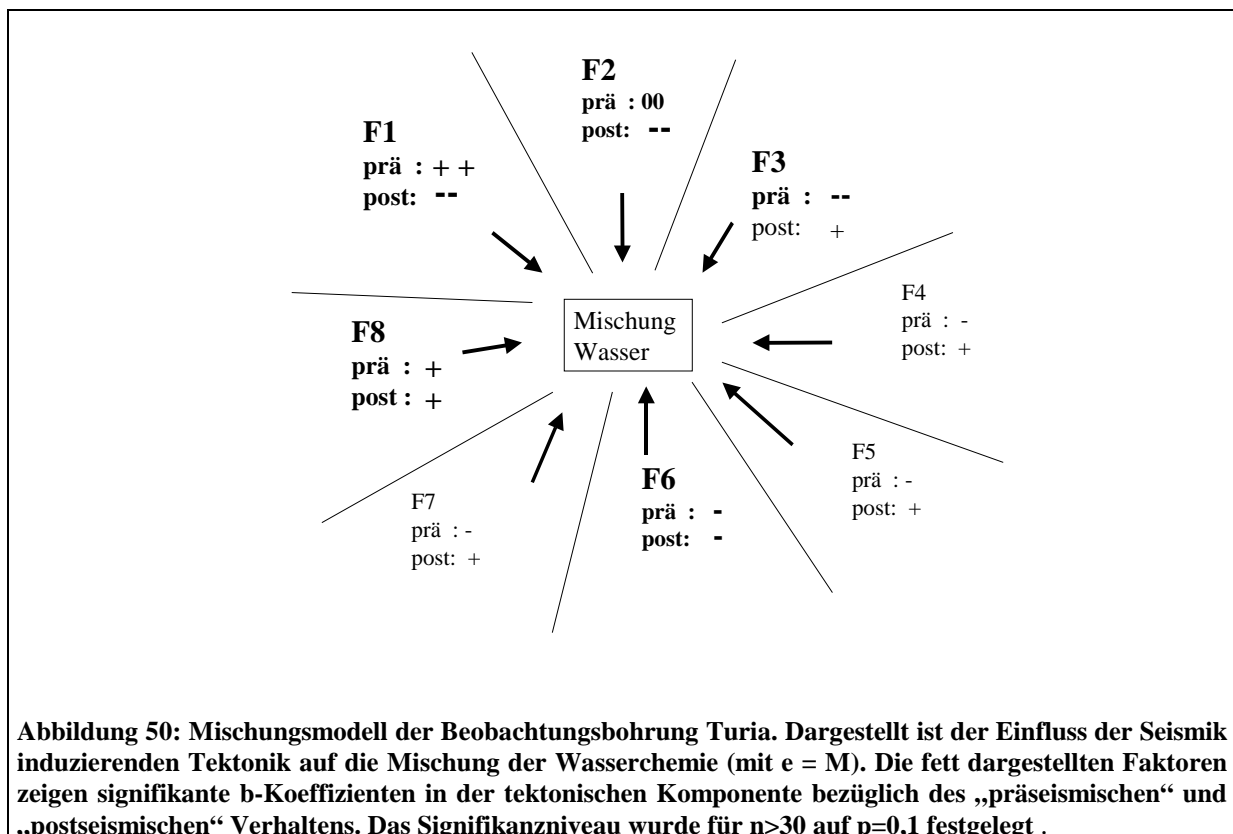
Abbildung 47 zeigt den Vergleich der Korrelationen zwischen beobachteter und geschätzter Erdbebenaktivität $E_{n, \text{vor}}$. Für den postseismischen Fall (Schätzung durch GM C) sind die Korrelationen für $n > 50$ nicht mehr am höchsten. Die Unterschiede zwischen dem präseismischen Zusammenhang und dem postseismischen Zusammenhang werden für die Faktoren 1 und 3 in Abbildung 49 dargestellt. Abbildung 50 zeigt, wie sich diese im Mischungsmodell auswirken. Die Faktoren 1 bis 3 zeigen die größten signifikanten Unterschiede. Auf Basis solcher Unterschiede kann bei einem zukünftigen Monitoring ein gezieltes Augenmerk auf die Variablen, welche diese Faktoren repräsentieren, gelegt werden: z. B. Chlorid für Faktor 1, Fe (gesamt) für Faktor 2 und Ba für Faktor 3.

In Abbildung 50 ist der Einfluss der Seismik induzierenden Tektonik vor und nach erhöhter Erdbebenaktivität auf die Mischung der Wasserchemie dargestellt. Die b-Koeffizienten der fett dargestellten Faktoren sind in den Schätzungen signifikant von Null verschieden. Einige zeigen signifikante Unterschiede in der tektonischen Komponente bezüglich des „präseismischen“ und des „postseismischen“ Verhaltens (prä: $E_{n, \text{nach}}$ geschätzt durch GM A geschätzt; post: $E_{n, \text{vor}}$ geschätzt durch GM C).

Wie in Kapitel 4 beschrieben, gilt ein Faktor als signifikant tektonisch beeinflusst, wenn für die b-Koeffizienten für $n > 30$ und für mindestens 50 der 60 b-Koeffizienten die H_0 auf dem Niveau $p=0,1$ abgelehnt werden kann. Die Faktoren 1 bis 3 zeigen die deutlichsten Unterschiede.

Mit dem Parameter $e = M/D_{\text{hypo}}$ wurden bisherige Ansätze bestätigt, nachdem mit zunehmender Entfernung der Einfluss Seismik induzierender Tektonik abnimmt. Andererseits korrelieren die Ergebnisse für $e = M$ sehr hoch mit dem Fall $e = M/D_{\text{hypo}}$, so dass die Interpretation bezüglich der Entfernung in der Vrancea-Zone für die Bohrung Turia nicht haltbar ist. Gleichzeitig lieferten diese beiden Parameter bessere Schätzungen, also eine bessere Erklärung der Varianz in der Wasserchemie, als der e-Parameter ε nach Dobrovolsky, welcher auf einem physikalisch fundierten, aber von Homogenität im Gesteinskörper ausgehenden Ansatz beruht.

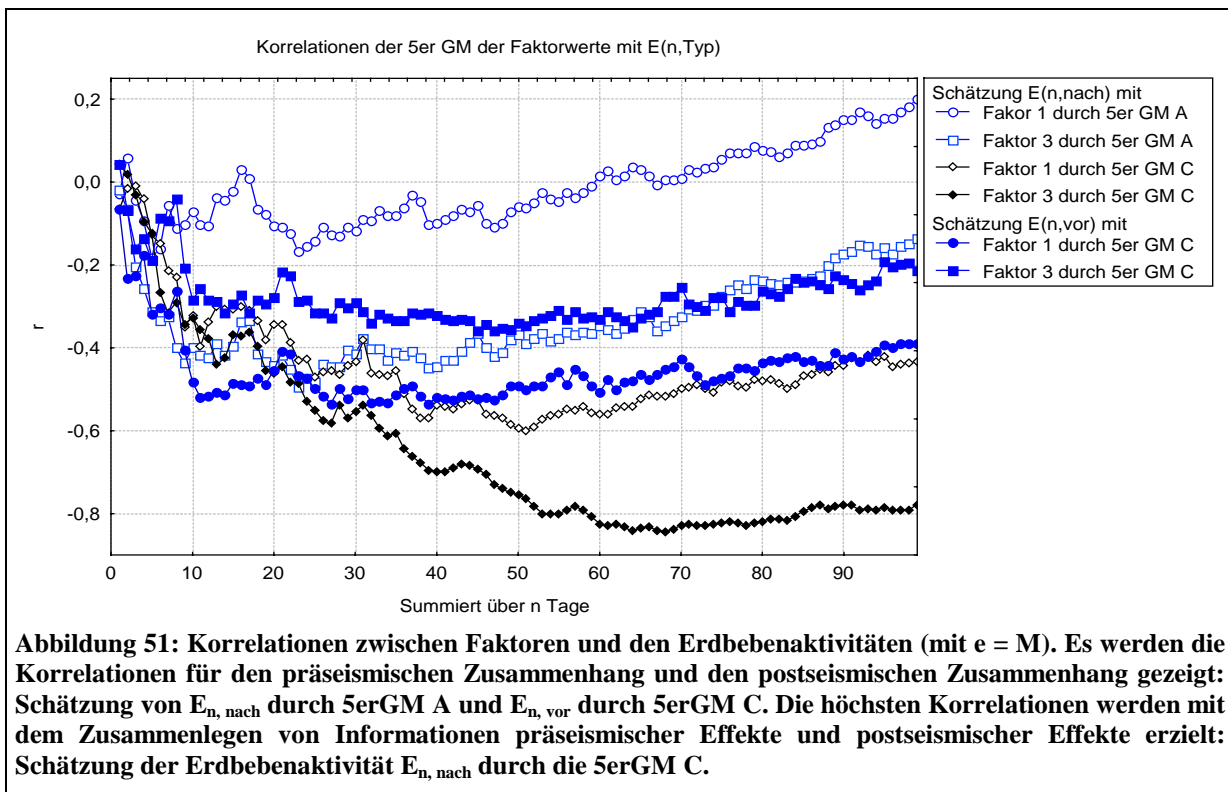
Abbildung 51 zeigt exemplarisch für die Faktoren 1 und 3, die oben schon beispielhaft behandelt wurden, wie sich Korrelationen zwischen den einzelnen Faktoren und den Erdbebenaktivitäten verhalten (univariater Fall), wenn der Parameter n systematisch verändert wird. Es werden u.a. der präseismische und der postseismische Zusammenhang betrachtet, wobei für diese beiden Fälle keine Korrelationen $r > 0,55$ beobachtet werden. Allerdings werden erst für einen Zusammenhang, in



welchem sowohl präseismische als auch postseismische Informationen eingehen Korrelationen größer 0,8 erreicht ($E_{n, nach}$ geschätzt durch GM C). Es zeigt sich somit, dass auch hier eine Mischung von präseismischen und co-/postseismischen Effekten vorliegt. Wenn Vorhersagemodelle entwickelt werden sollen, müssen diese Effekte herausgefiltert werden. Zusätzlich bestätigt die Grafik das Signifikanzkriterium für die b-Koeffizienten und den Ansatz der Schätzung der Erdbebenaktivität über einen Multiparameteransatz.

In Abbildung 51 fällt auf, dass Faktor 1 und Faktor 3 in drei von den 4 betrachteten präseismischen und postseismischen Fällen negativ mit der Erdbebenaktivität korrelieren. Ein Fall korreliert zwischen $-0,2$ und $+0,2$. Interessant ist dieser Fall, weil die b-Koeffizienten der Faktoren in den Multiplen Regressionen jeweils gegenläufige Verhaltensmuster zeigen (Abbildung 49). Die Tabellenübersicht unten zeigt, dass beide Faktoren als einzige für die 5er GM relativ hoch miteinander korrelieren. Das gegenläufige Verhalten in der Multiplen Regression kann mit Suppressionseffekten erklärt werden (siehe BORTZ, 1995). Es muss somit kein Widerspruch vorliegen. Für die einfachen Faktorwerte liegen keine signifikanten Korrelationen vor, da die Faktorwerte aus einer Faktorenanalyse stammen und somit eine Korrelation $r = 0$ besitzen. Dies kann nachgerechnet werden, mit den Faktorwerten im Anhang 13.1.

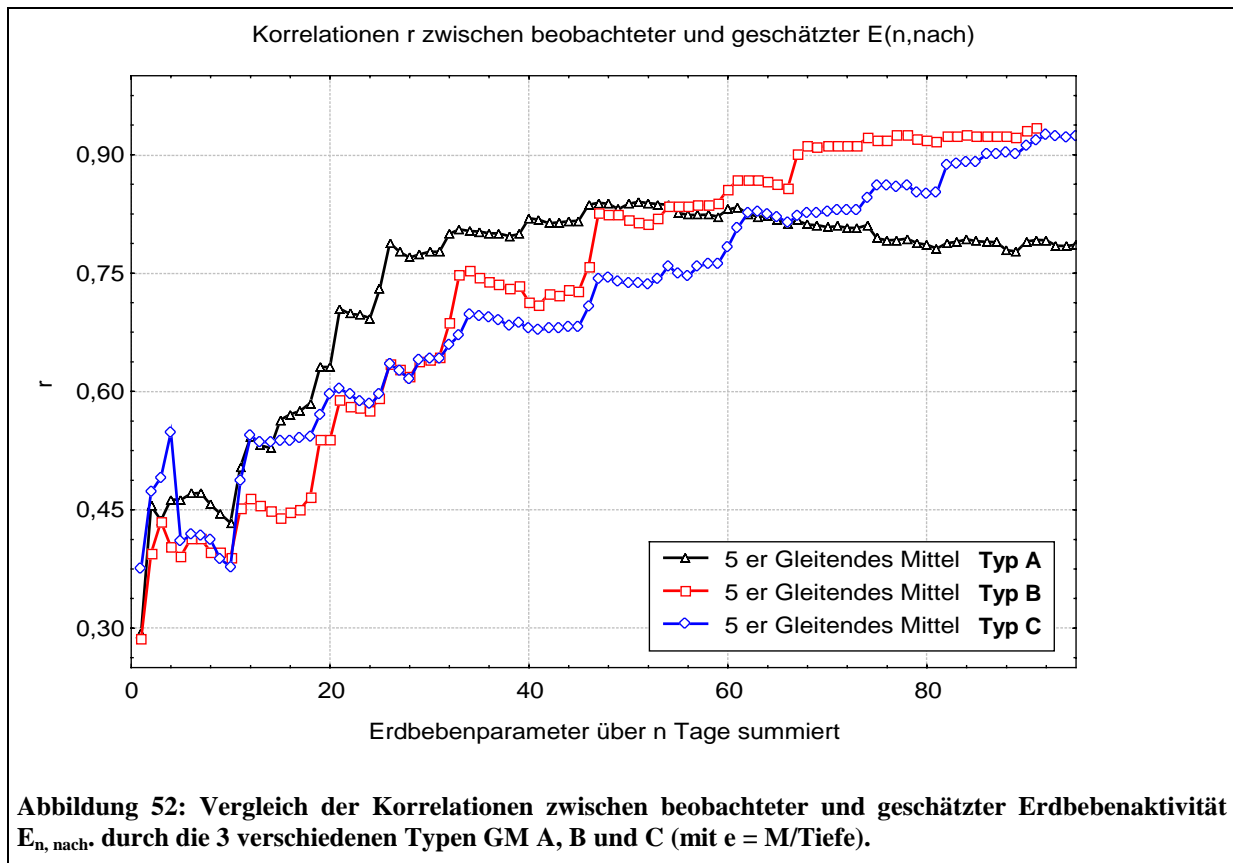
	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5	Faktor 6	Faktor 7	Faktor 8	Die Tabellenübersicht zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen den 5er GM der Faktorwerte.
Faktor 1	1,00	-0,15	0,68	0,21	0,20	0,03	-0,03	-0,24	
Faktor 2		1,00	0,03	-0,12	0,12	0,11	0,32	0,12	
Faktor 3			1,00	0,23	0,13	0,06	0,19	-0,36	
Faktor 4				1,00	-0,15	0,35	-0,11	0,27	
Faktor 5					1,00	0,16	0,19	0,21	
Faktor 6						1,00	-0,02	0,24	
Faktor 7							1,00	-0,11	
Faktor 8								1,00	

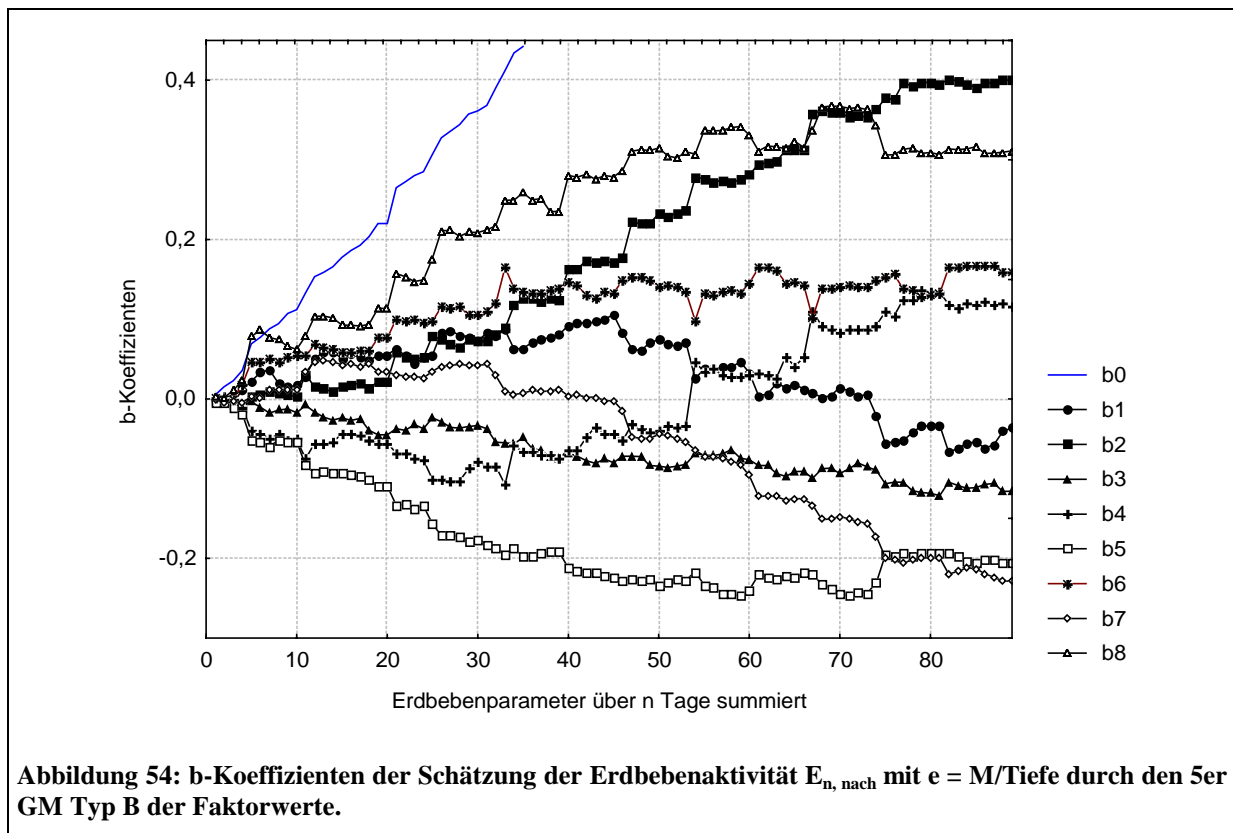
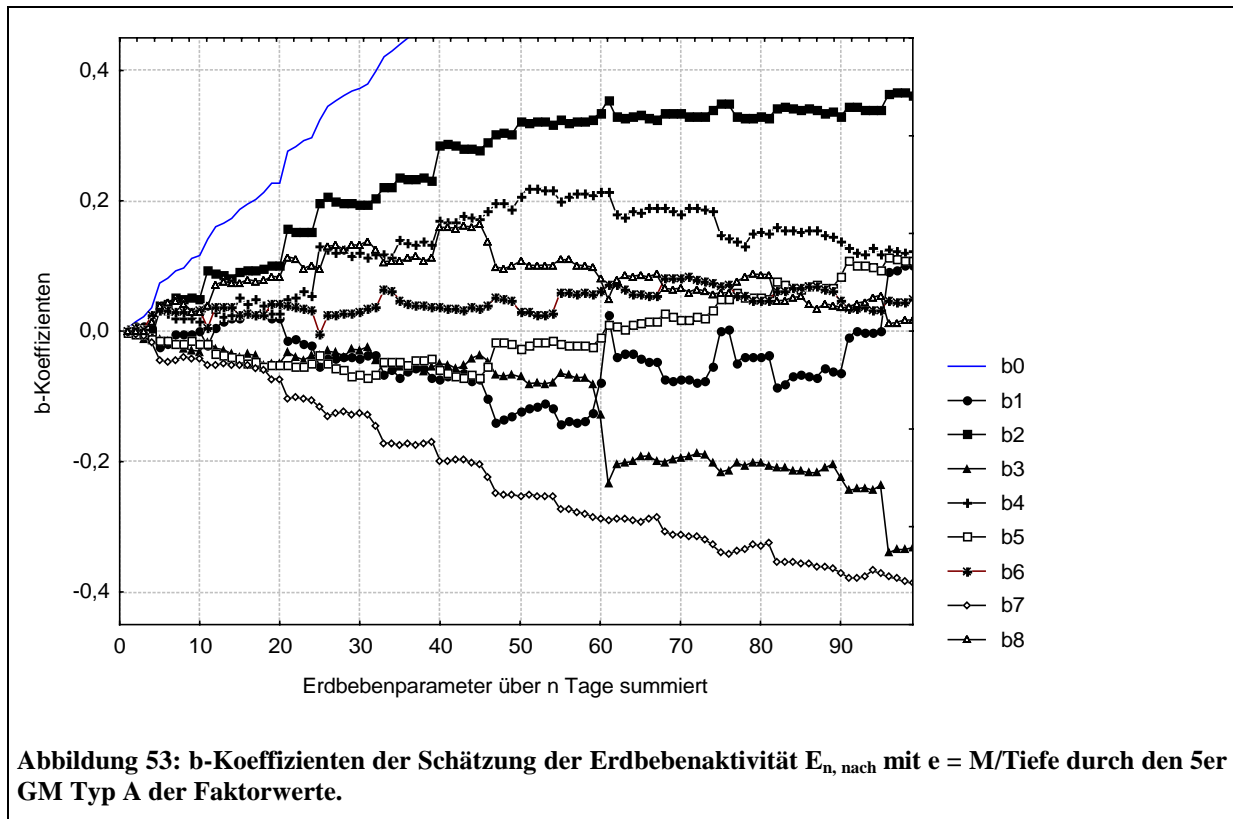


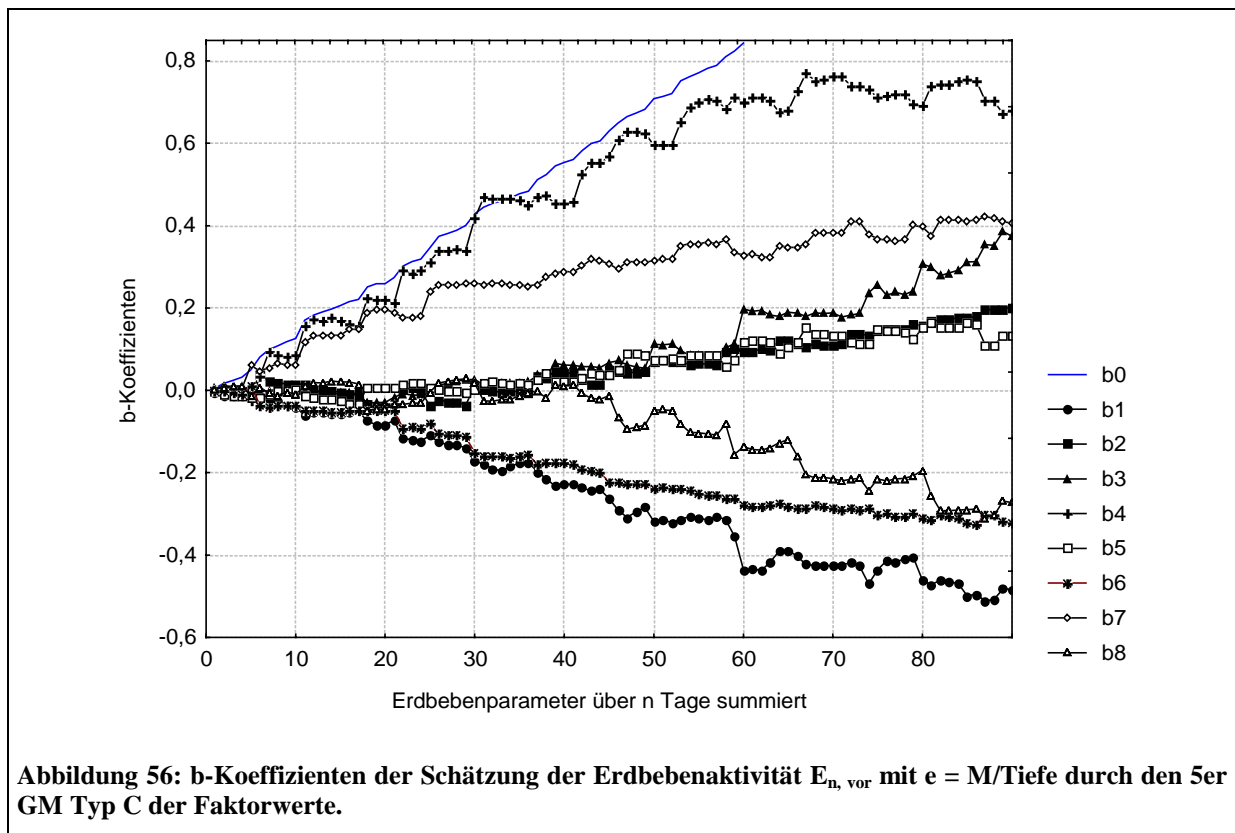
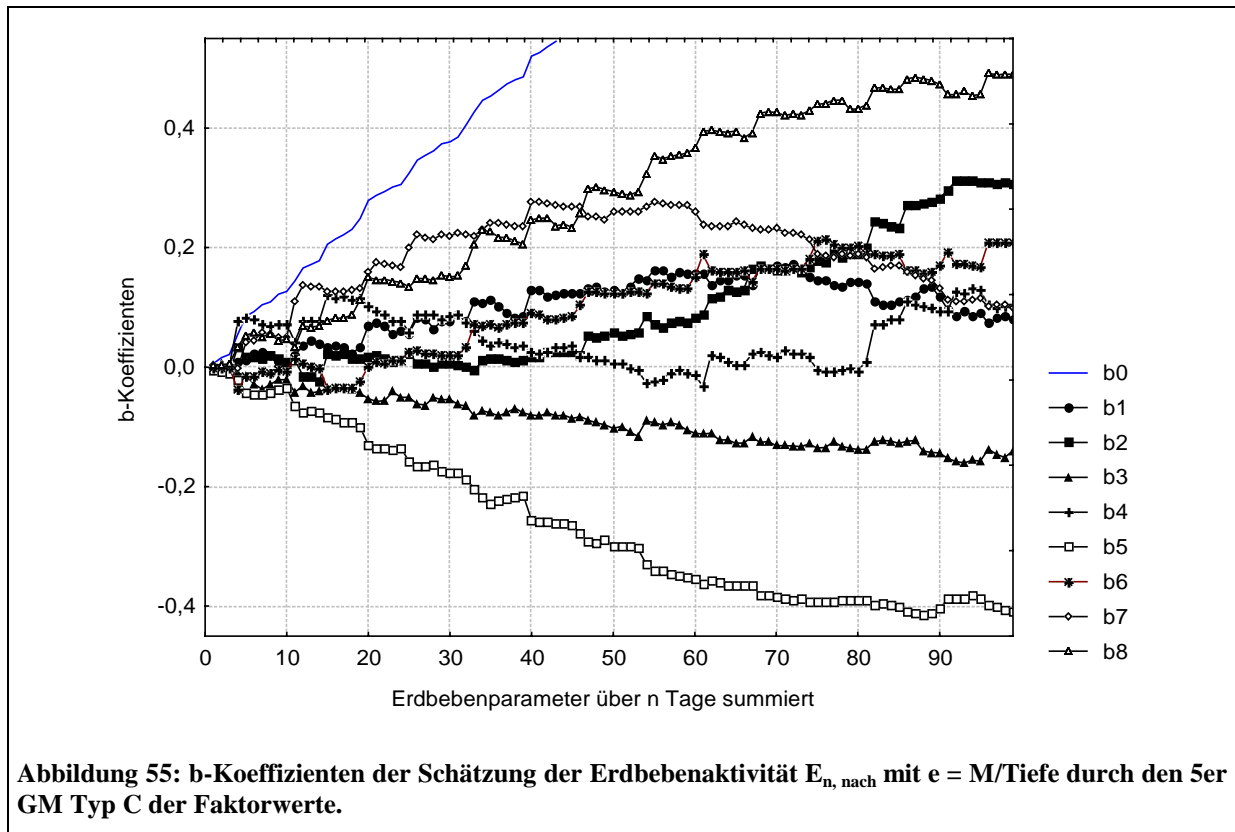
8.2.3 Parameter $e = M/\text{Tiefe}$

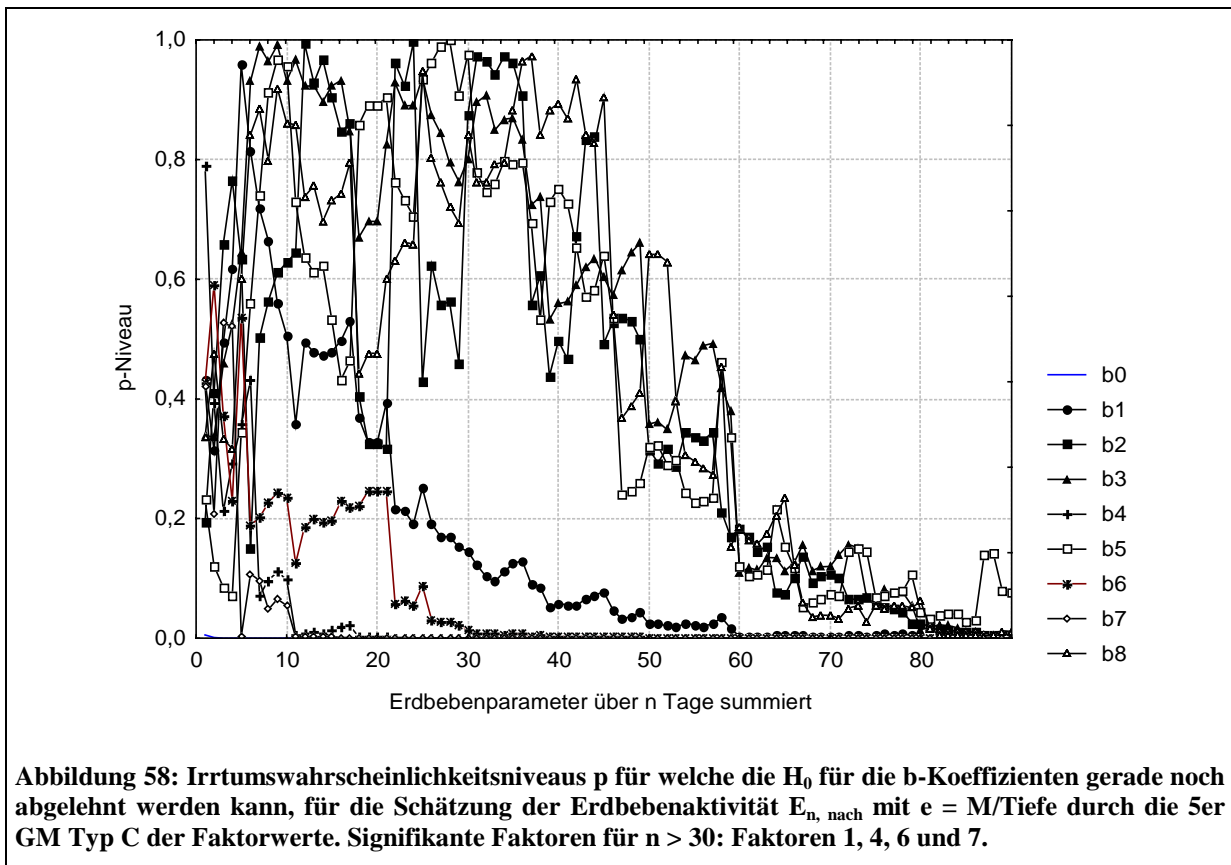
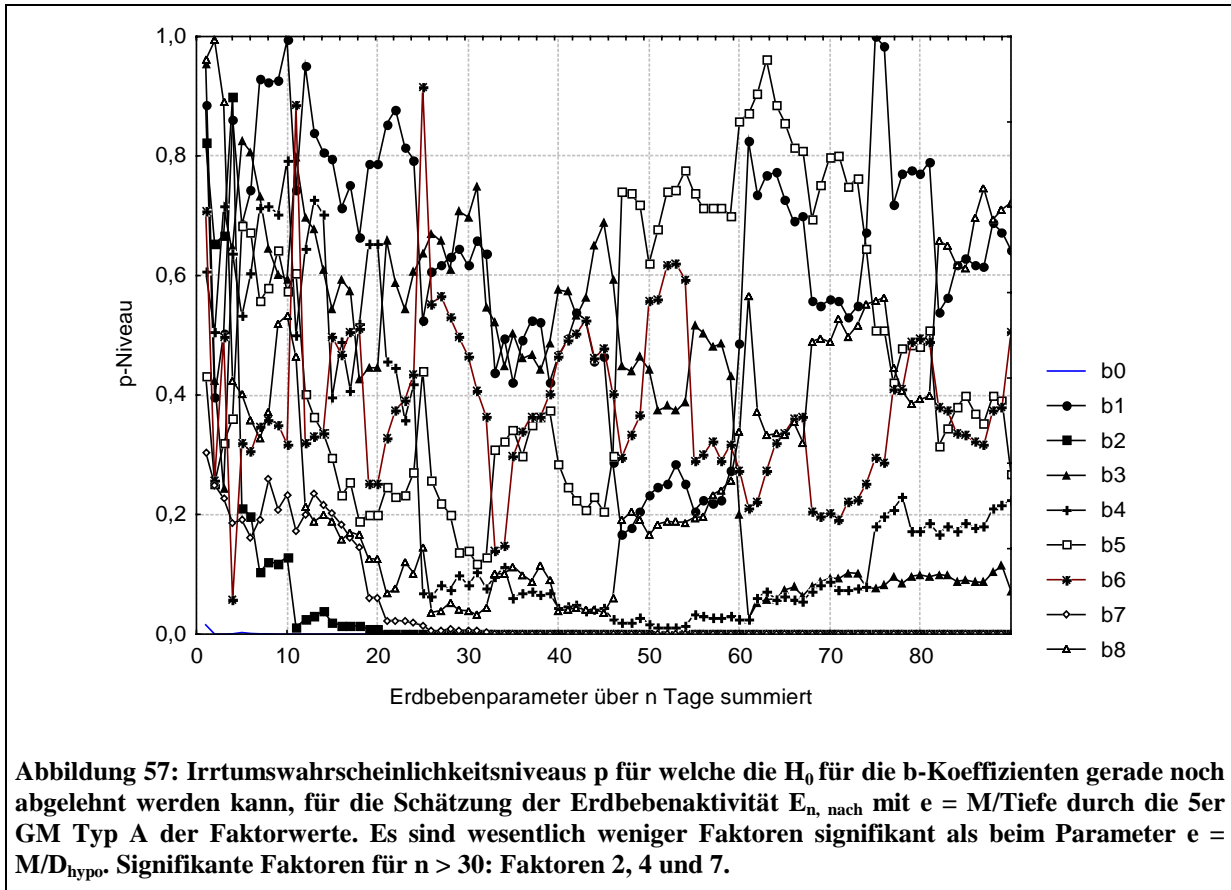
Abbildung 52 zeigt die Schätzung der Erdbebenaktivitäten $E_{n, \text{nach}}$ mit dem e -Parameters $e = M/\text{Tiefe}$ durch die der 5er GM-Typen A, B und C. Dabei fällt auf, dass GM Typ A (präseismische Schätzung) im Gegensatz zum Parameter $e = M/D_{\text{Hypo}}$ (Abbildung 28) für $n \in (15, 54)$ eine deutlich höhere Erklärung der Varianz liefert als die beiden anderen GM-Typen. Zudem nimmt die Korrelation zwischen geschätzter und beobachteter Erdbebenaktivität für $n > 54$ ab. Da die Erdbeben mit dem reziproken Wert der Tiefe geschätzt werden, kann dieses Phänomen als Hinweis gewertet werden, dass die tiefe Erdbeben auslösende Tektonik auf die Zusammensetzung der Wasserchemie einen geringeren Einfluss besitzt.

Die Abbildungen 53 bis 56 zeigen die b -Koeffizienten für verschiedene Schätzungen. Wie beim e -Parameter $e = M/D_{\text{Hypo}}$ zeigen sich je nach Schätzung (Erdbebenaktivität und GM Typ) signifikante Unterschiede in den b -Koeffizienten. Sie verändern sich systematisch. Zum Beispiel nimmt der Einfluss von Faktor 7 vom präseismischen Fall über den coseismischen Fall zum postseismischen Fall (von Abbildung 53 bis Abbildung 56) kontinuierlich von signifikant negativ zu signifikant positiv zu. Aus solchen Unterschieden kann auch hier wieder ein Mischungsmodell für die Zusammensetzung des Wassers entwickelt werden (Abbildung 59). Die oberen Signifikanzniveaus für die Ablehnung der Nullhypothese der b -Koeffizienten für die prä- und postseismische Schätzung können in den Abbildungen 57 und 58 abgelesen werden. Sie fließen in die Interpretation des Mischungsmodells in Abbildung 59 ein.









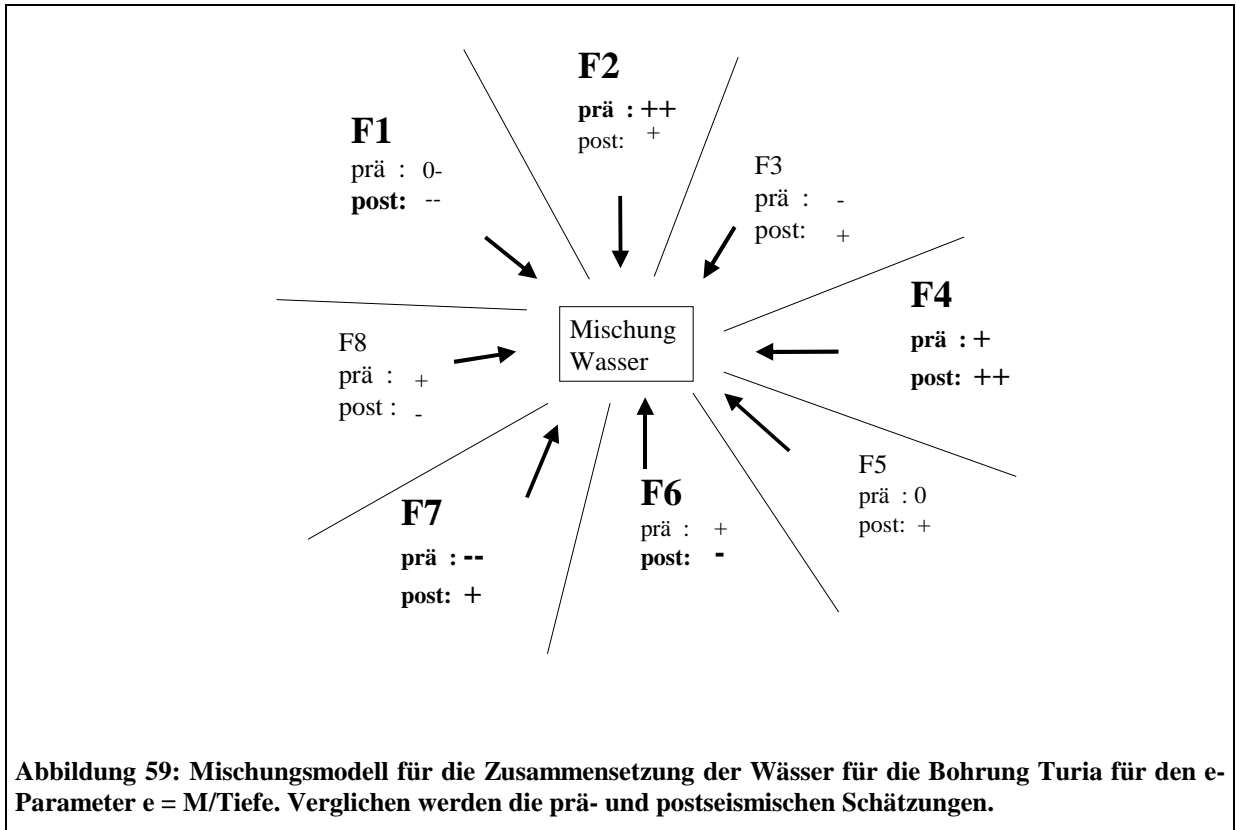
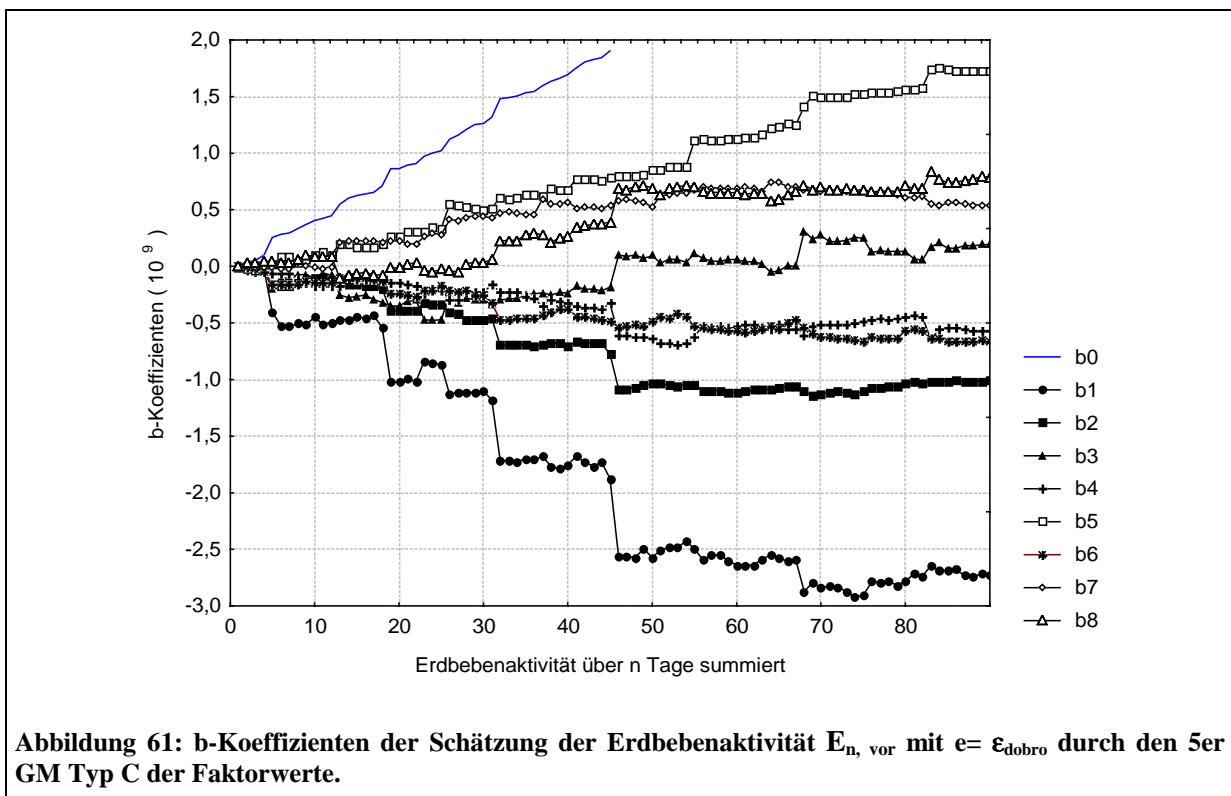
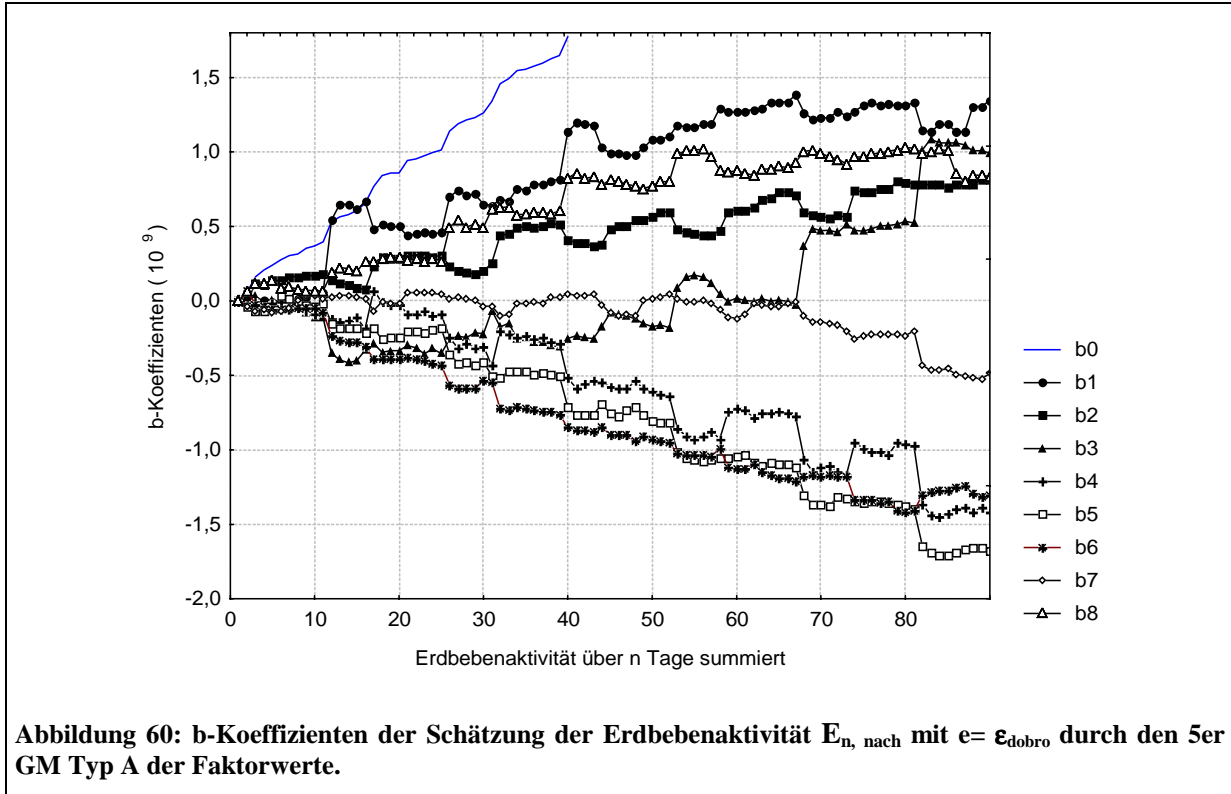
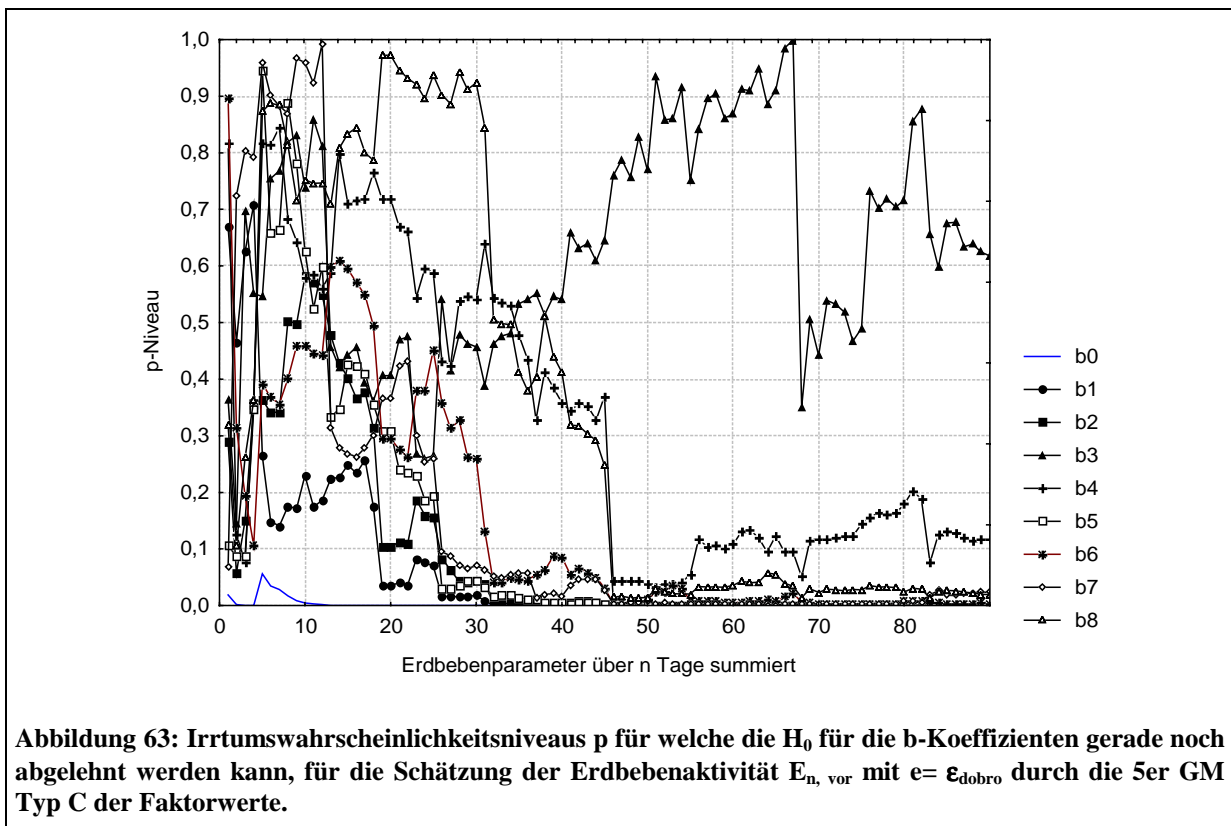
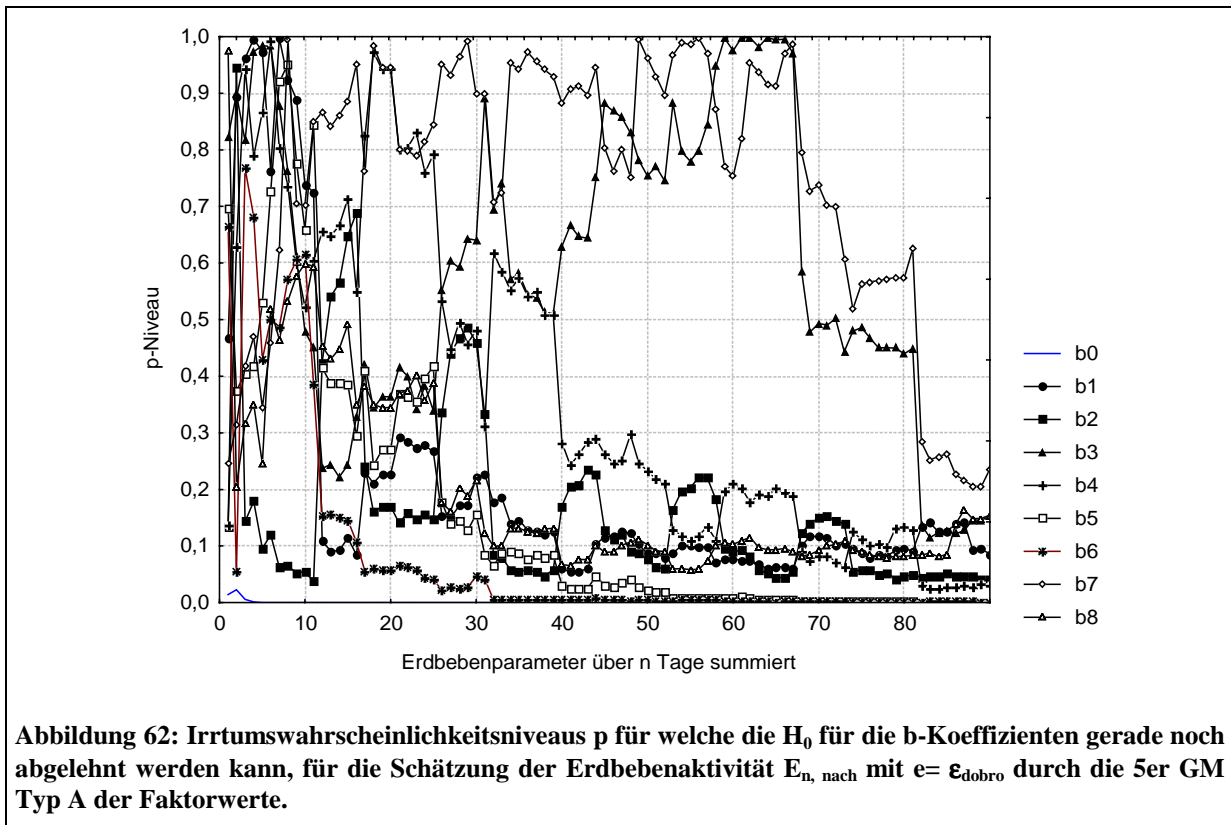


Abbildung 59: Mischungsmoell für die Zusammensetzung der Wässer für die Bohrung Turia für den e-Parameter $e = M/\text{Tiefe}$. Verglichen werden die prä- und postseismischen Schätzungen.

8.2.4 Parameter $e = \epsilon_{\text{dobro}}$

Für den e-Parameter $e = \epsilon_{\text{dobro}}$ werden zur Dokumentation die b-Koeffizienten für die prä- und die postseismische Schätzung dargestellt und die oberen Signifikanzniveaus für die Ablehnung der Nullhypothese der b-Koeffizienten. Damit soll gezeigt werden, dass auch mit diesem Parameter ein Mischungsmodell aufgestellt werden könnte.



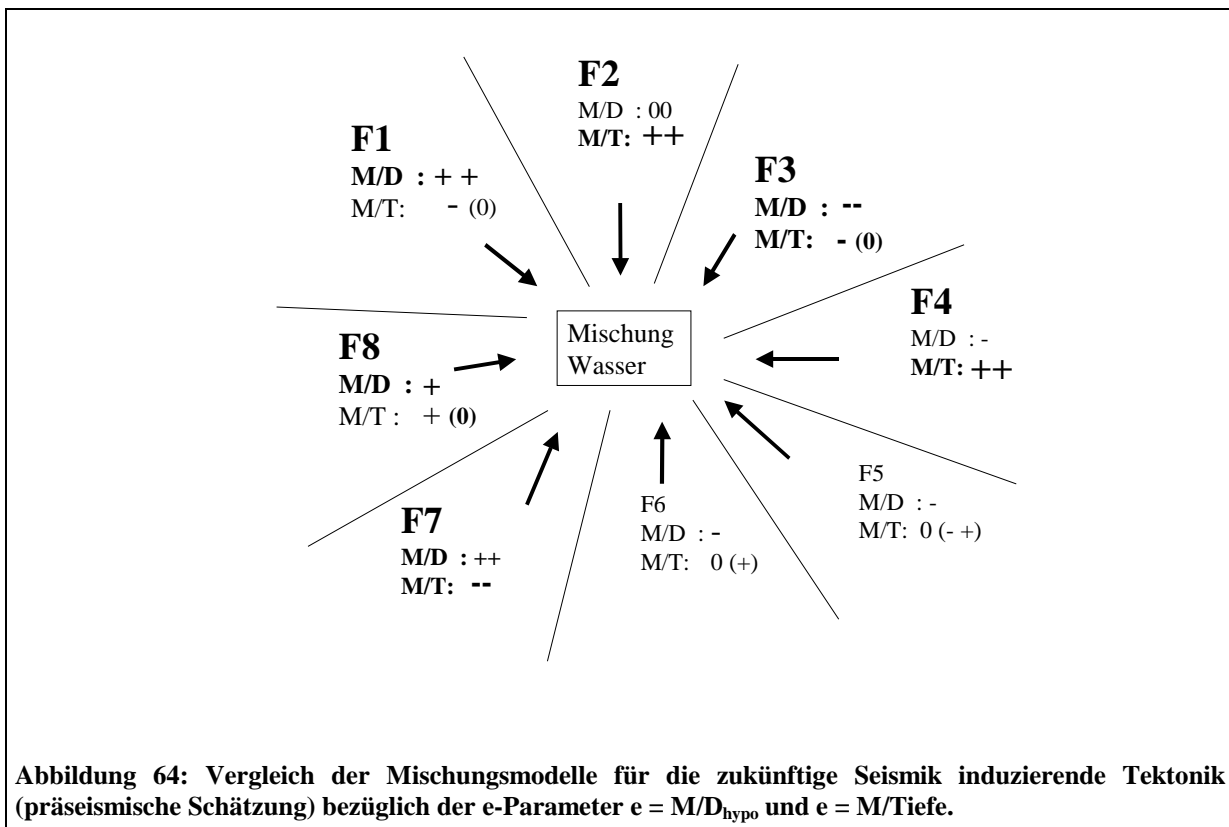


8.2.5 Vergleich der einzelnen Parameter

Nach dem Vergleichen der b-Koeffizienten der einzelnen e-Parameter für den prä- und postseismischen Fall, können auch Modelle für die Mischung des Wassers aufgestellt werden, welche den Einfluss der räumlichen Verteilung der tektonischen Aktivität unter Berücksichtigung der Geometrie und der seismisch gelösten Energie auf die Wasserzusammensetzung verdeutlichen. Die Ergebnisse der verschiedenen e-Parameter können nun auch untereinander in Mischungsmodellen verglichen werden. Abbildung 64 stellt im Modell die Unterschiede unter Berücksichtigung der zukünftigen Seismik induzierenden Tektonik für die zwei ausführlich behandelten e-Parameter dar. Die Abbildung zeigt die Tendenzen der b-Koeffizienten in den Gleichungen der Multiplen Regression. Es sind die gleichen Konventionen angewandt worden, wie für die Modelle in Kapitel 8.2.2 und 8.2.3. Fünf der acht Faktoren zeigen deutliche Unterschiede im Verhalten der b-Koeffizienten. Es kann also eine Differenzierung des tektonischen Einflusses auf die Zusammensetzung des Wassers auf Basis der zukünftigen räumlichen Erdbebenverteilung beobachtet werden.

Interpretation am Beispiel von Faktor 1: Faktor 1 wurde als Einfluss einer Tiefenkomponente (tiefe/nicht oberflächennahe, saline Wässer) interpretiert. Das bedeutet für die Gewichtung mit dem reziproken Wert der Tiefe werden die e-Parameter klein für große Tiefen, und somit wird bei großer Erdbebenaktivität in der Tiefe auch $E_{n, \text{nach}}$ klein. Dieser Sachverhalt kann in Abbildung 26 nachvollzogen werden. Dort sind die drei e-Parameter, welche die drei Faktoren der Erdbebenaktivität repräsentieren, zum Vergleich für $n = 60$ dargestellt. Es kann eine deutliche Unterscheidung der Aktivitäten festgestellt werden und somit der unterschiedliche Einfluss von tiefer und flacher Erdbeben bezogener Tektonik über die Zeit.

In den b-Koeffizienten findet sich somit eine Gemeinsamkeit zwischen der Verteilung der Erdbeben und der Wasserchemie. Entsprechend dem hier vorgestellten Modell können auch für die anderen möglichen Zusammenhänge Mischungsmodelle aufgestellt werden (vergleiche b-Koeffizienten für $e = \epsilon_{\text{dobro}}$): Variationen für den prä-, co- oder postseismischen Zusammenhang sowie für jeden e-Parameter.



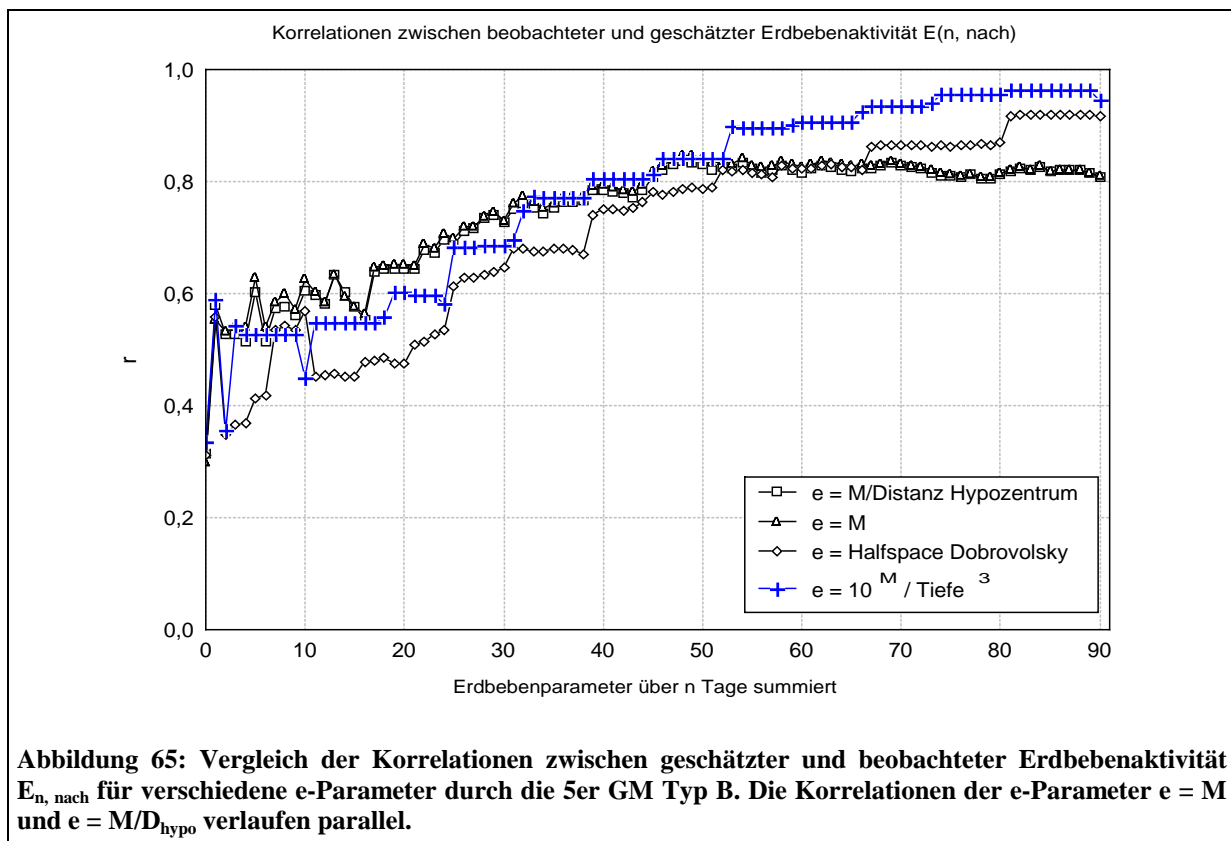
8.3 Covasna: Ergebnisse und Diskussion

An der Lokation Covasna ist die Güte der Schätzungen der Erdbebenaktivitäten vergleichbar mit der Lokation Turia, obwohl durch die Varianz in der Wasserchemie andere Faktoren identifiziert werden. Dies ist eine Bestätigung der Analysemethode. Daraus geht hervor, dass die Tektonik, welche die Lokation Turia, beeinflusst auch die Lokation Covasna in der Mischung des Wassers in der Bohrung beeinflusst. Das Problem der Lokation Covasna ist, dass die Faktoren wegen fehlender Informationen des Untergrundes nicht gut bzw. nicht zu interpretieren sind.

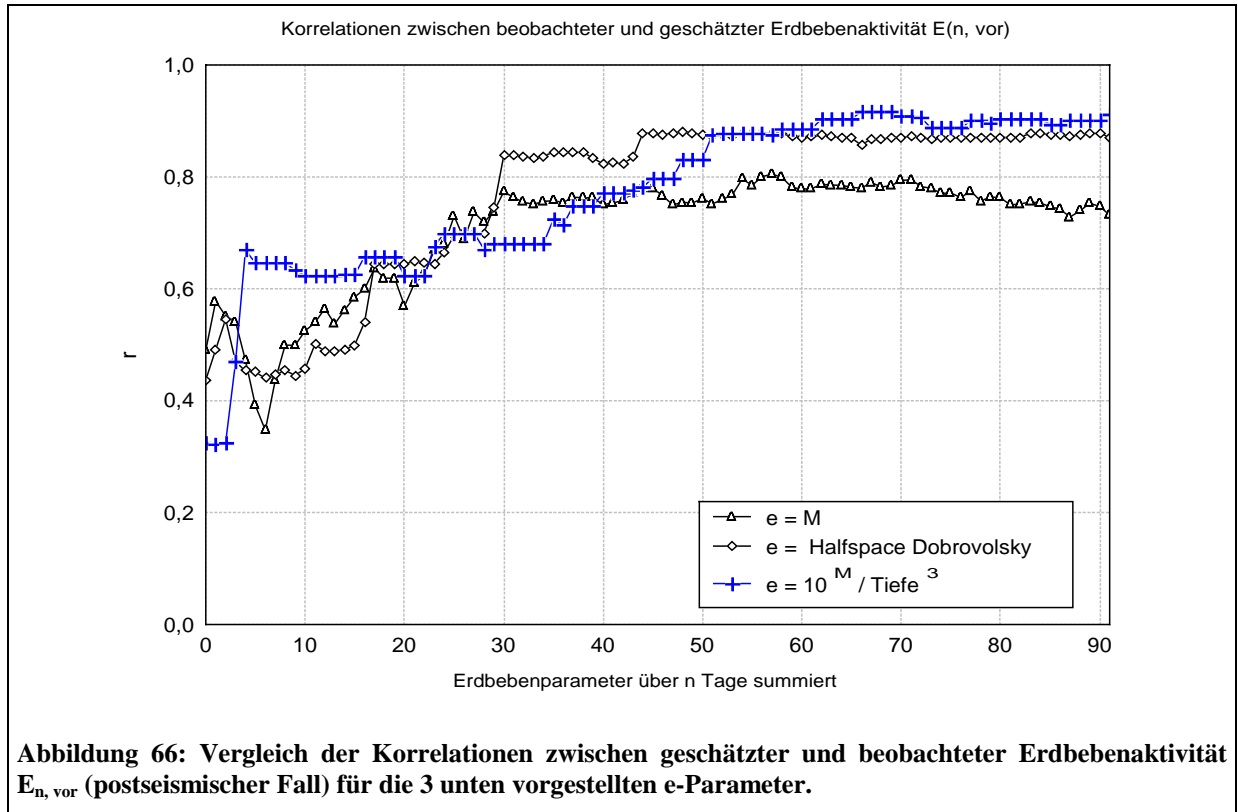
Im folgenden werden drei e-Parameter, welche die Faktoren der Erdbebenaktivität (Faktorenanalyse in Kapitel 6.1.) repräsentieren, vorgestellt. In den Kapiteln 8.3.1 bis 8.3.3 werden die b-Koeffizienten der Schätzungen der prä- und postseismischen Zusammenhänge, sowie die p-Niveaus der Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Ablehnung der Nullhypothese vorgestellt (Abbildung 67 bis Abbildung 80). Aus ihnen geht hervor, dass auch für diese Schätzungen Mischungsmodelle aufgestellt werden können. Die Abbildung 65 und Abbildung 66 zeigen die Korrelationen zwischen beobachteter und geschätzter Erdbebenaktivität. Die Ergebnisse sind denen für die Bohrung Turia vergleichbar. Die Korrelationsverläufe für die e-Parameter $e = M$ und $e = M/D_{\text{hypo}}$ verlaufen parallel. Das ist, wie am Beispiel der Bohrung Turia bereits gezeigt, eine Bestätigung für die Gruppierung der Erdbebenaktivitäten auf einem Faktor. Auch für diese Bohrung lassen sich nun für eine zukünftige Monitoringstrategie einzelne Monitoringvariablen gezielt auswählen.

Für den e-Parameter $10^M/\text{Tiefe}$ sind in Abbildung 75 die Korrelationsverläufe für die Schätzungen mit den 3 verschiedenen Mittelwerten der Faktorwerte für den präseismischen und postseismischen Zusammenhang dargestellt. Für $n > 50$ gilt auch wie für die Bohrung Turia, dass die 5er gleitenden Mittelwerte besser schätzen als die 3er gleitenden Mittelwerte oder die einfachen Faktorwerte.

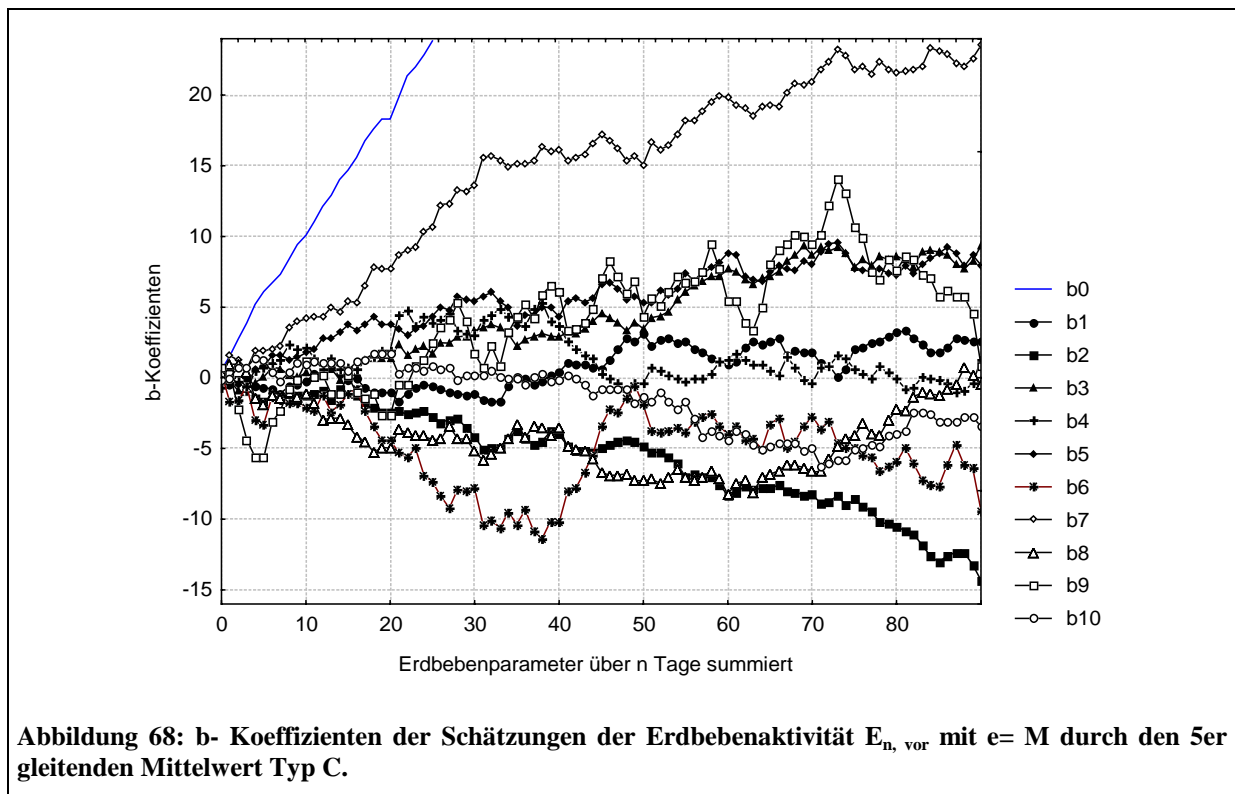
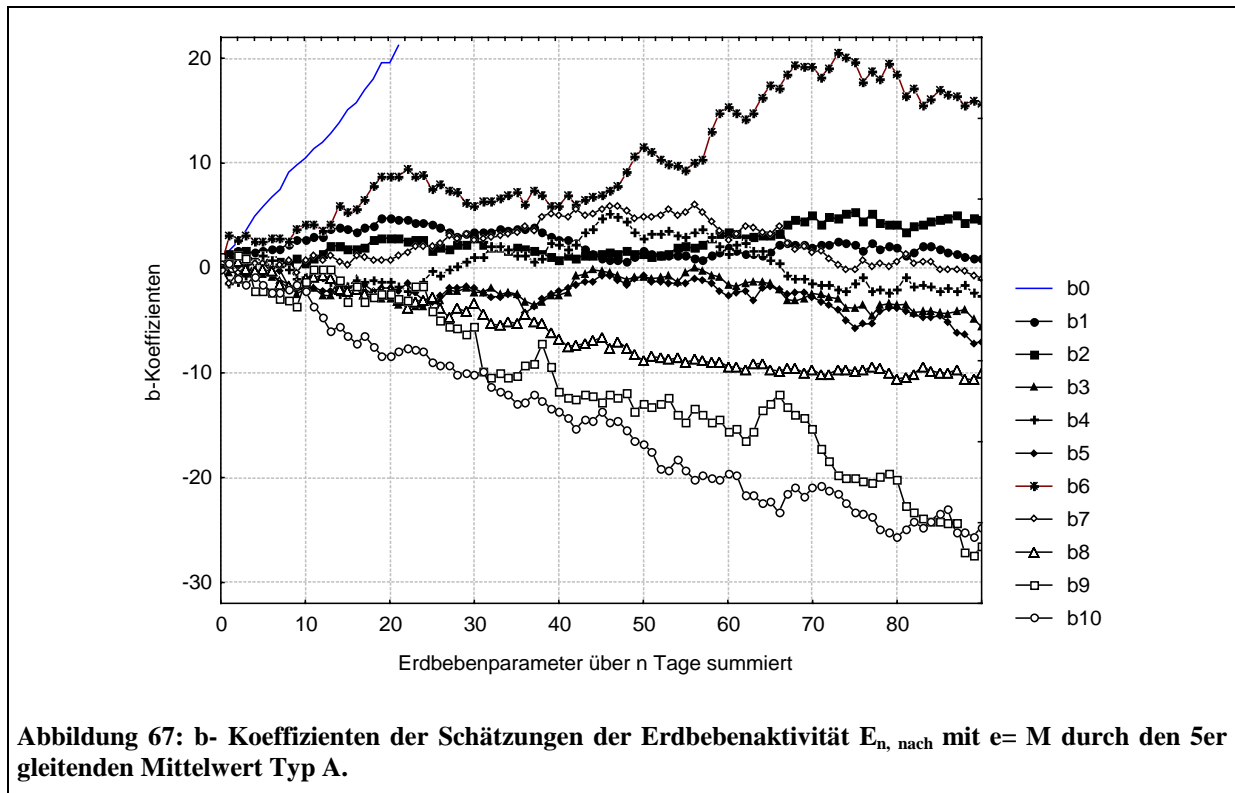
Dass die Schätzungen der einfachen Faktorwerte für den postseismischen Zusammenhang deutlich besser als für den präseismischen Zusammenhang sind, deutet auf einen stärkeren Einfluss von coseismische Effekten hin, welche auch im Nachhinein noch wirken. Dieser Effekt ist für die Bohrung Turia weniger stark ausgeprägt (erst für $n > 40$ deutlich).

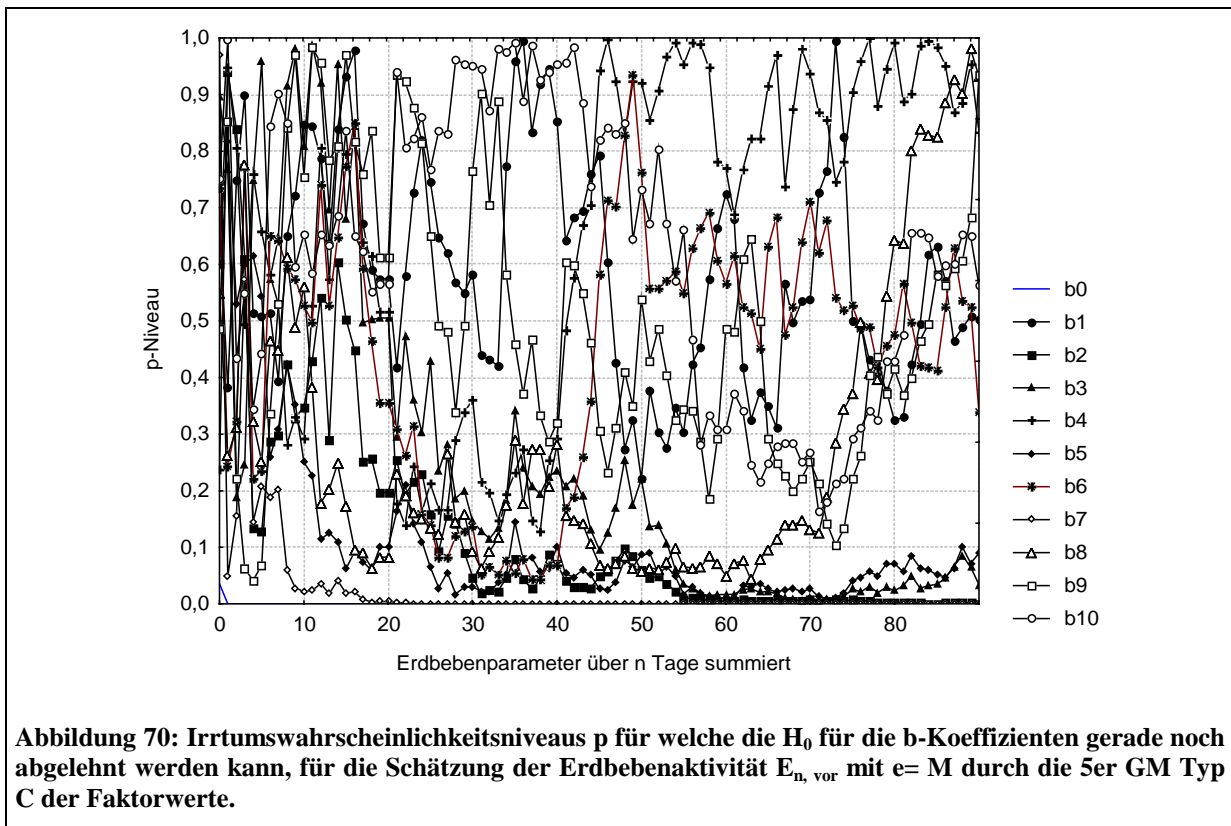
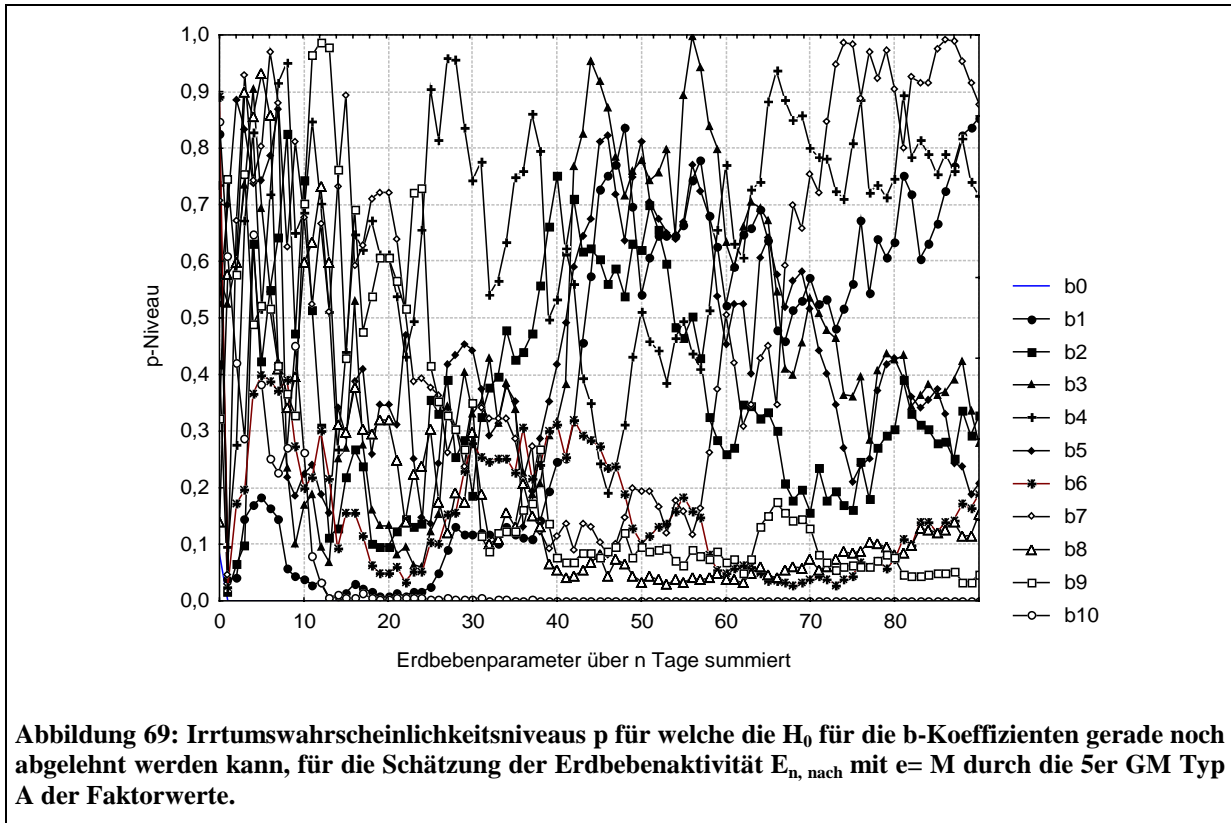


8 Ergebnisse Vrancea - 8.3 Covasna

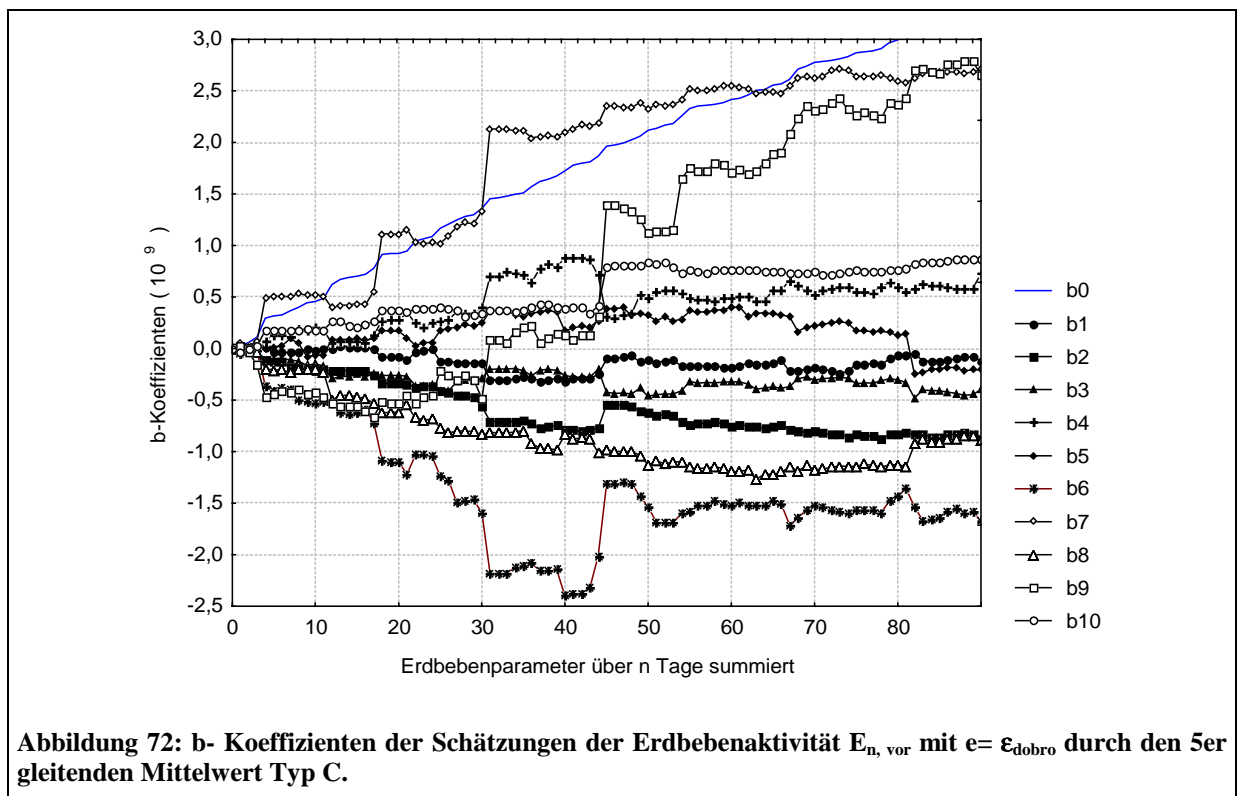
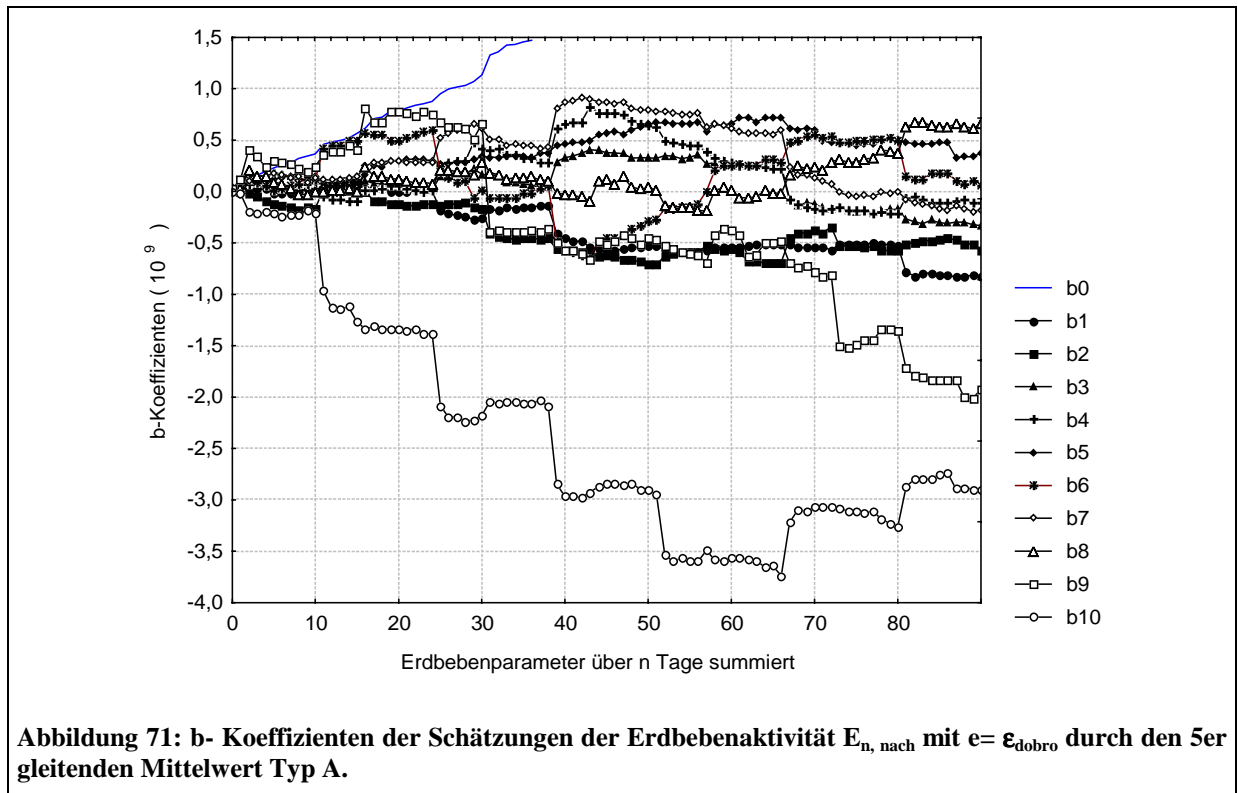


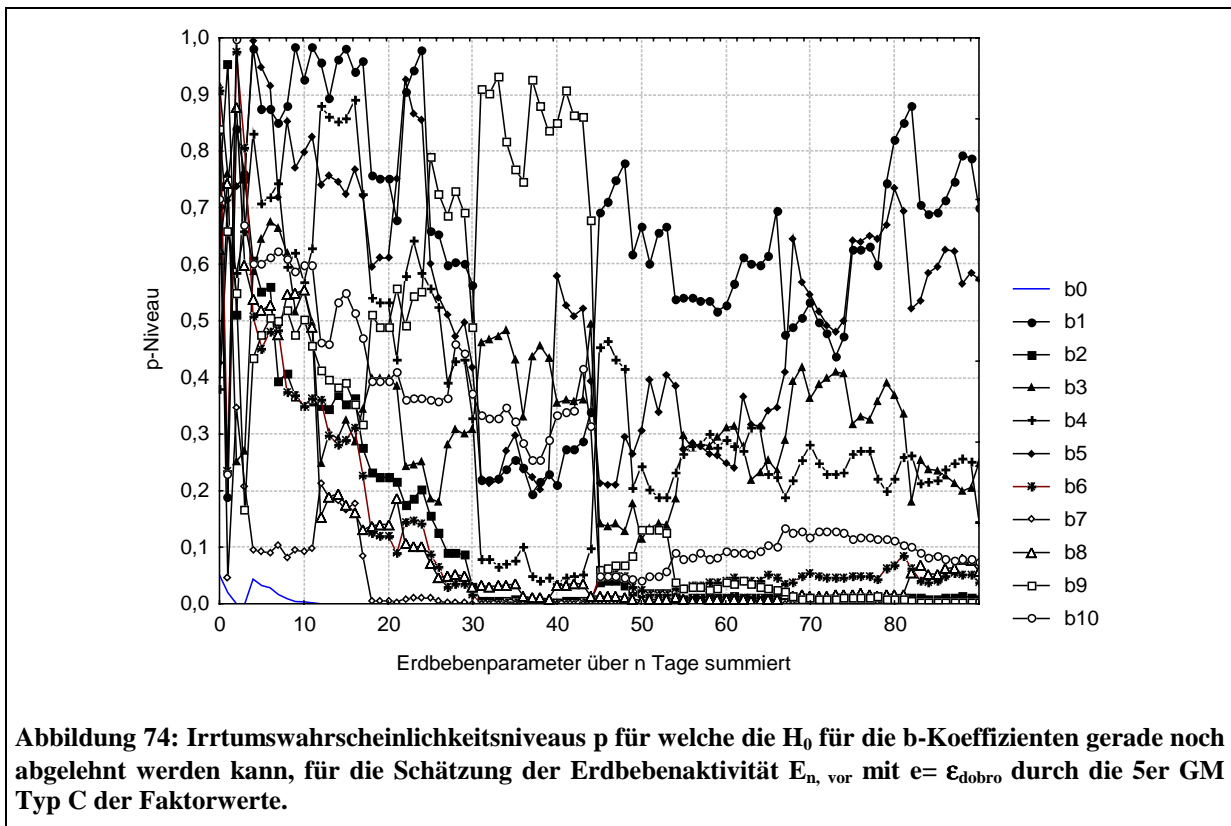
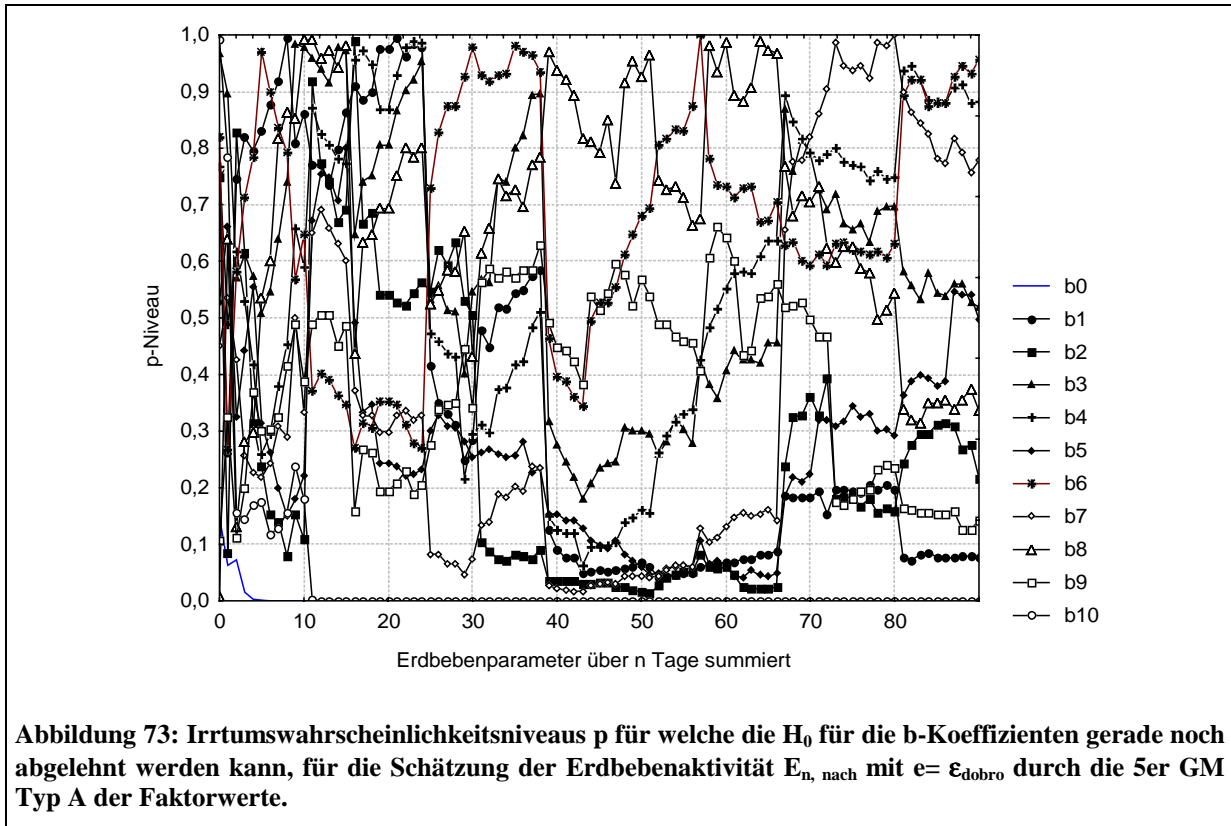
8.3.1 Parameter $e = M$





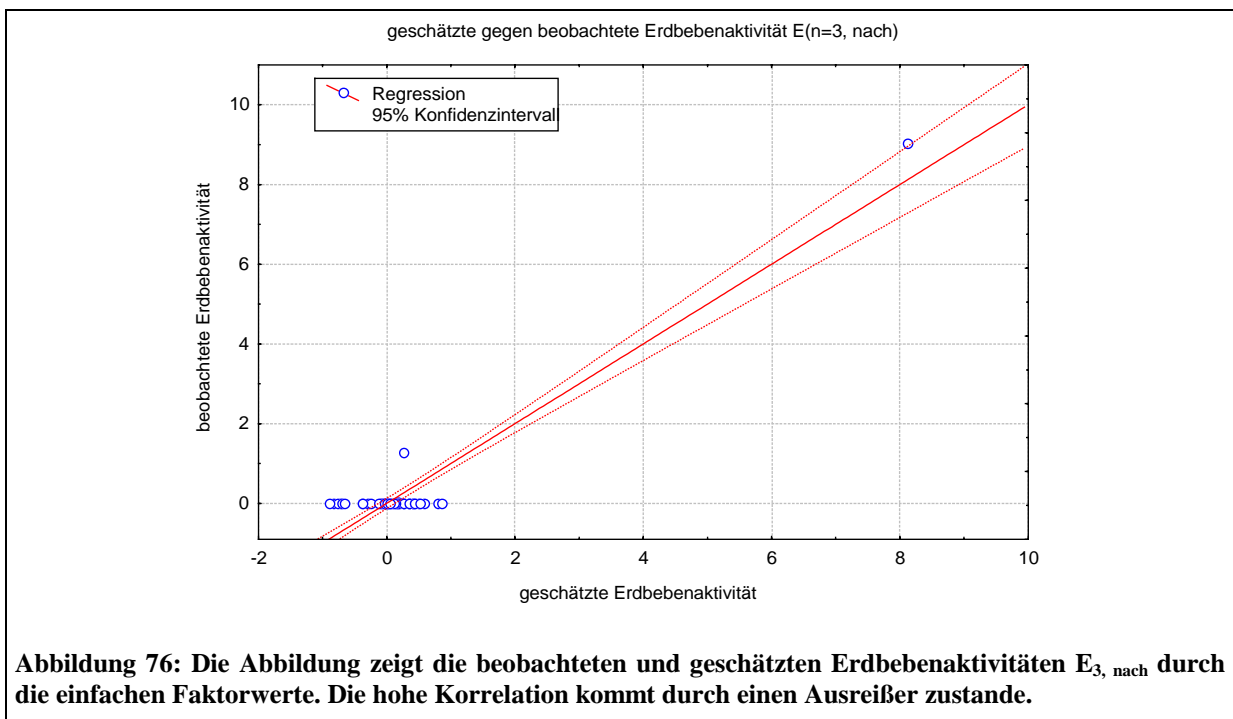
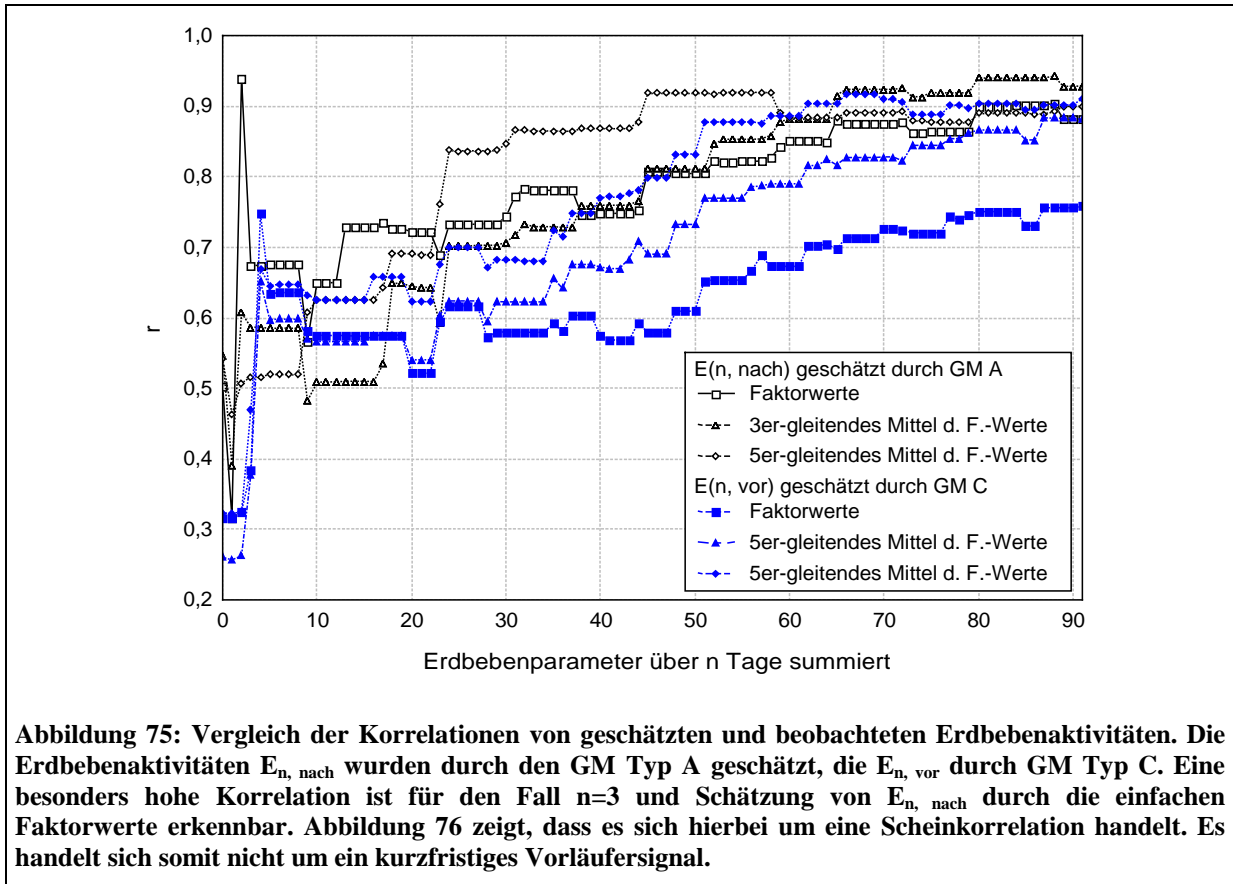
8.3.2 Parameter $e = \epsilon_{\text{dobro}}$

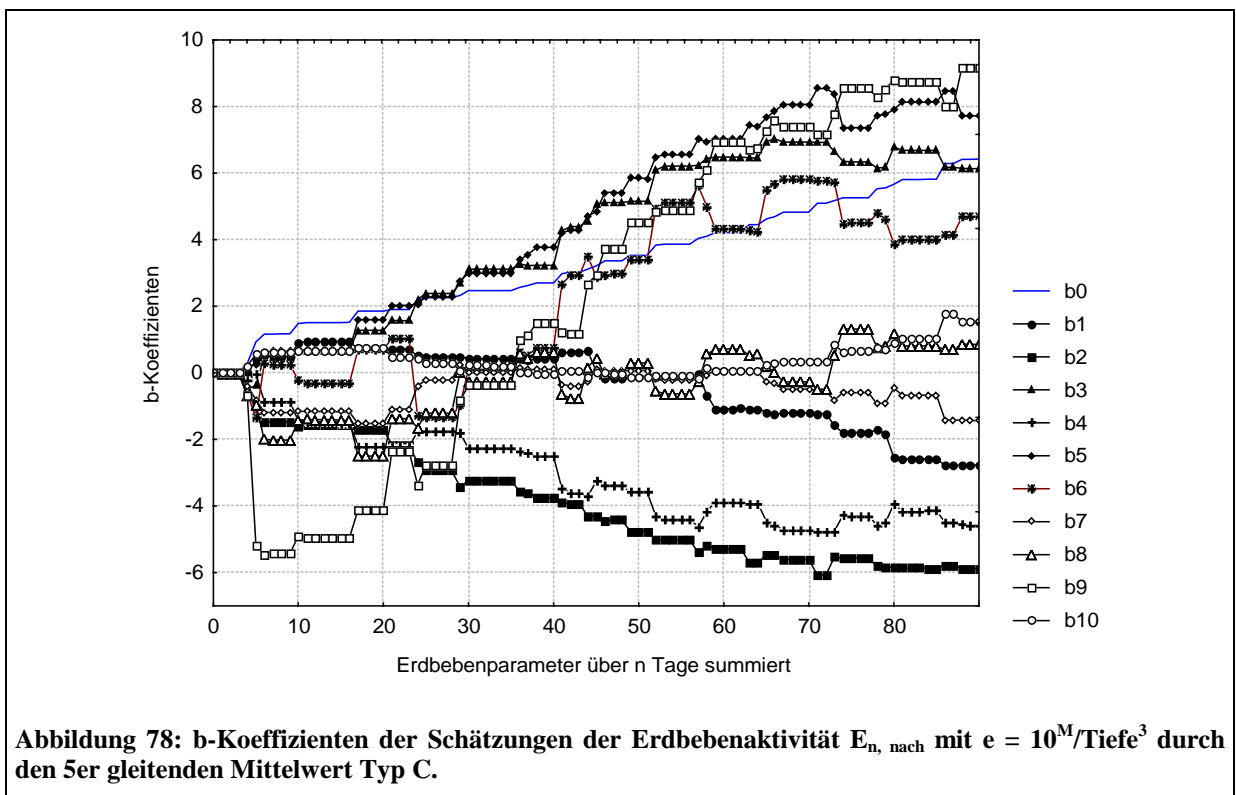
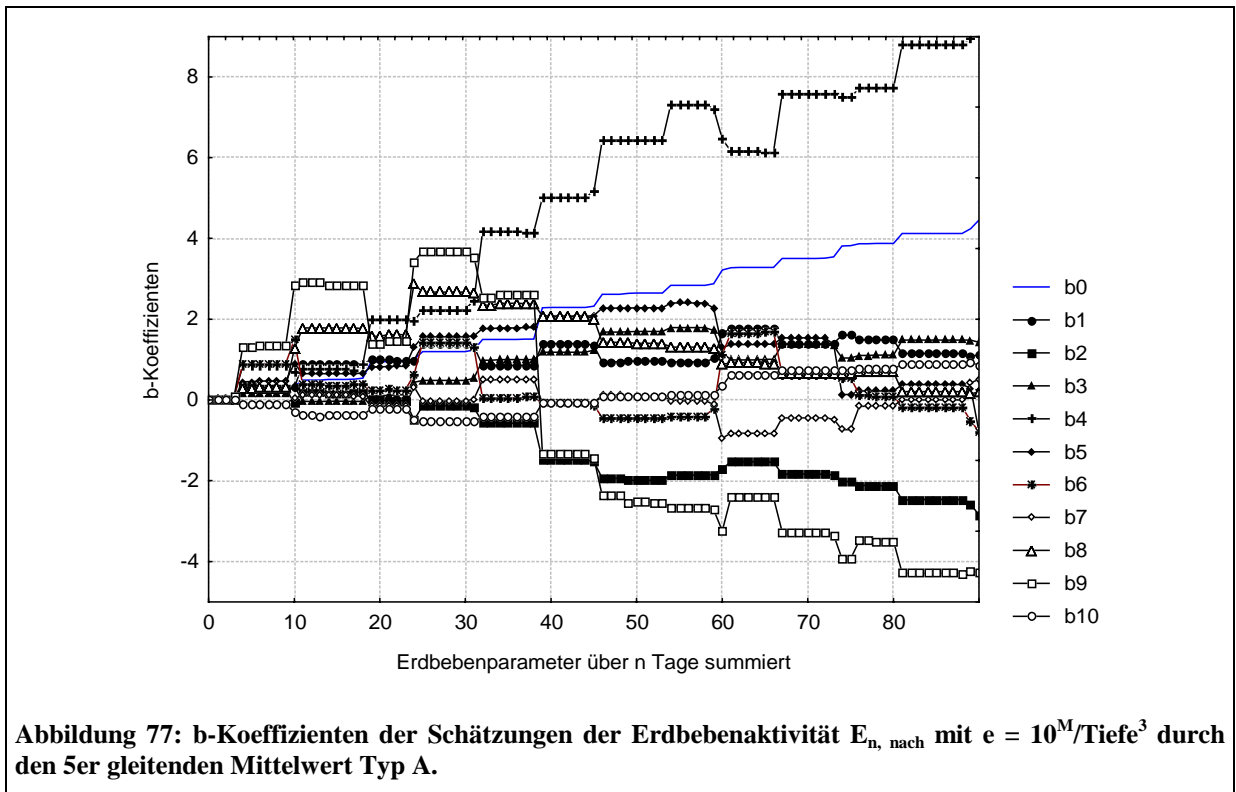


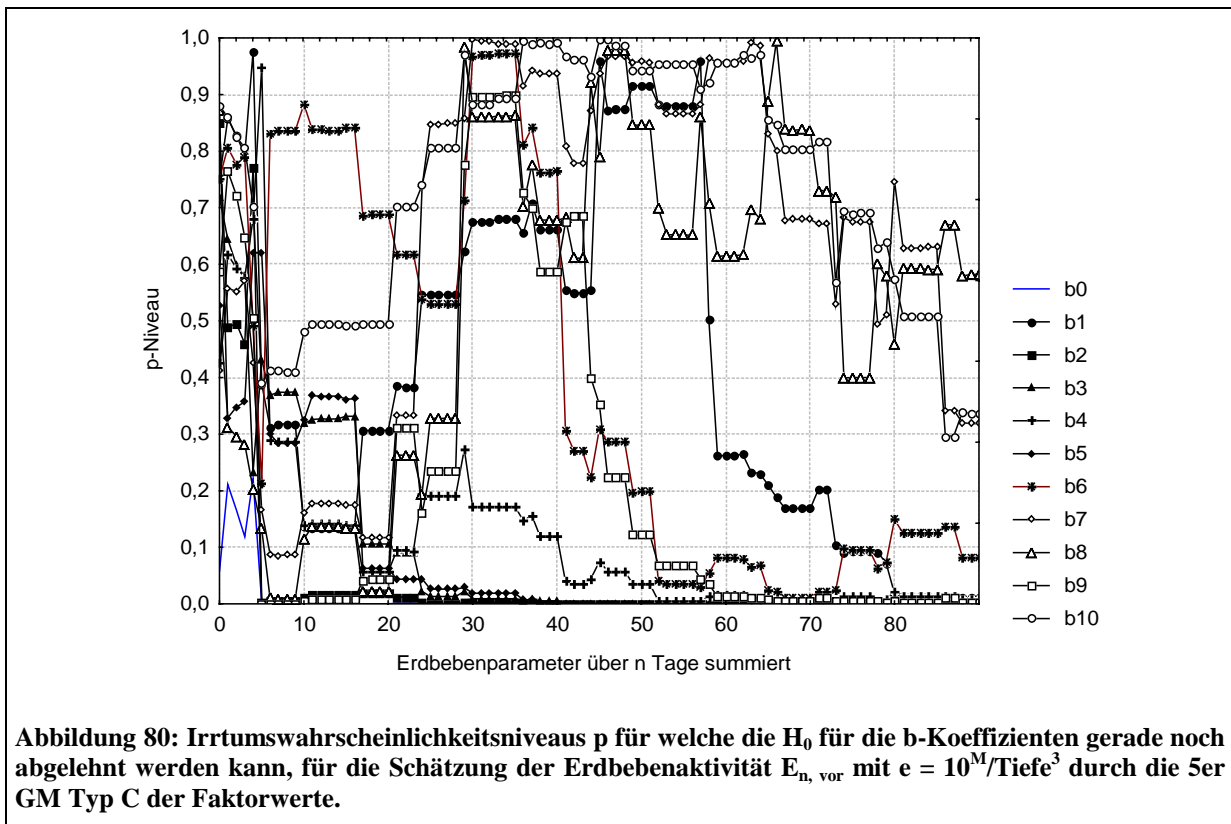
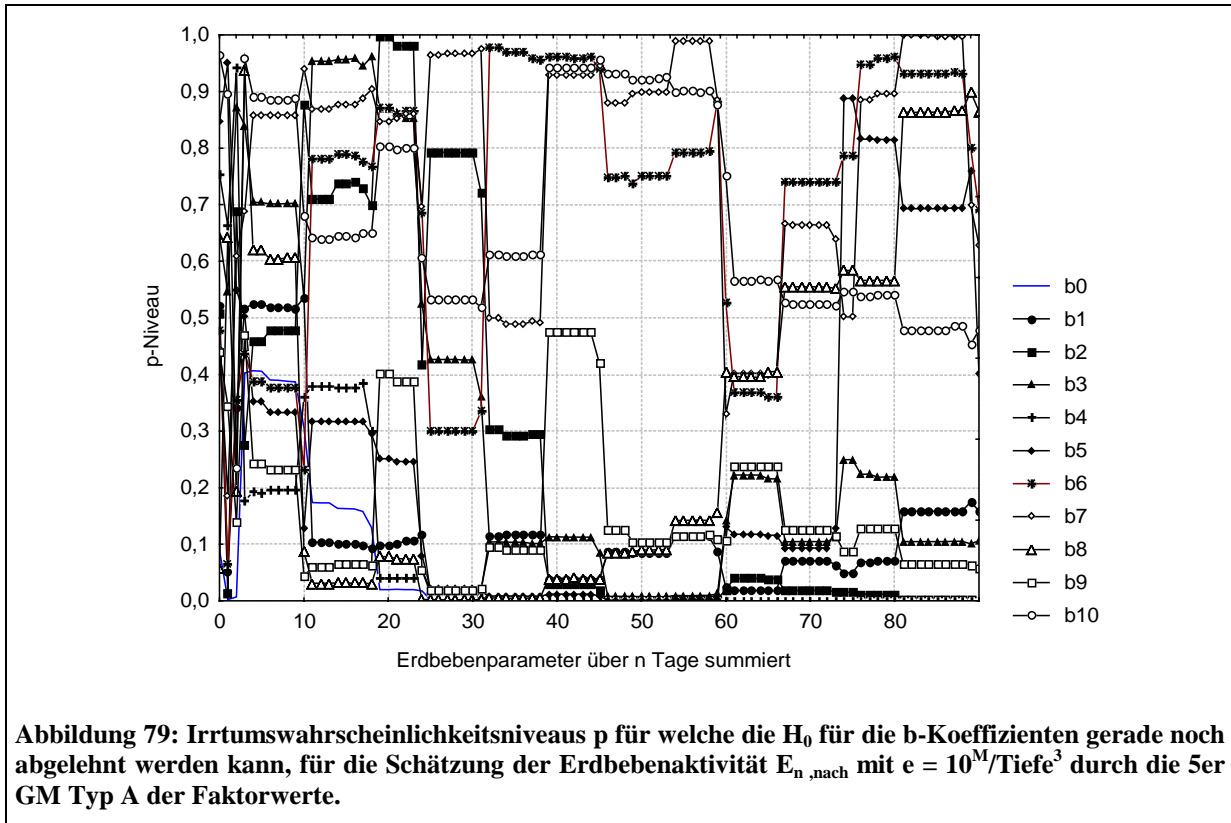


8.3.3 Parameter $e = 10^M / \text{Tiefe}$

Beispielhaft sind hier die Korrelationsverläufe für den postseismischen und präseismischen Fall dargestellt. Es fällt auf, dass für $n = 3$ eine Schätzung eine Korrelation $r > 0,9$ aufweist. Die Abbildung 75 zeigt, dass es sich dabei vermutlich um eine Scheinkorrelation handelt. Für $n = 3$ sind nur 2 beobachtete Erdbebenaktivitäten deutlich von 0 verschieden.







8.4 Zusammenfassung Vrancea

Wie Abbildung 28 zeigt, reagieren beide Bohrungen sensibel auf tektonische Aktivität. Beide Systeme zeigen subparallele Verläufe der Korrelationen der geschätzten und beobachteten Erdbebenaktivitäten.

Das wichtigste Ergebnis ist, dass sich die beschriebene Vorgehensweise eignet, um die Sensibilität einer Bohrung bezüglich Seismik induzierender Tektonik nachzuweisen. Die systematische Veränderung der e-Parameter, des Zeitparameters n , der Typen der Erdbebenaktivitäten und der gleitenden Mittelwerttypen ergab, dass die gefundenen Zusammenhänge nicht zufällig sind, sondern einem System folgen. Durch die systematische Veränderung der Parameter kann ein „Fenster“ bester Zusammenhänge gefunden werden. Die vorgestellte Methodik ist geeignet, um den Zusammenhang zwischen Tektonik und Wasserchemie zu analysieren und bei geeigneten Bedingungen sogar die Erdbebenaktivität für einen kommenden Zeitraum zu schätzen. Es können mit dieser Methode bei gegebenem Zusammenhang keine einzelnen Erdbeben vorhergesagt werden. Es ist lediglich möglich bei vorhandenem Zusammenhang Erdbebenaktivität unter einer gegebenen geometrischen und energetischen Verteilung integriert über einen Zeitabschnitt zu schätzen.

Durch die unterschiedliche Gewichtung der Energie und der Geometrie konnte gezeigt werden, dass sich die räumliche Verteilung der Erdbeben in der Wasserchemie widerspiegelt.

Die Analyse der b-Koeffizienten ergab, dass für genügend große n in den Schätzungen für die meisten Faktoren keine chaotische Struktur zu sehen ist. Es gibt je nach betrachteter Erdbebenaktivität Faktoren, die keinen Beitrag zur Klärung der Varianz in den Erdbebenaktivitäten $E_{n, Typ}$ liefern.

Die b-Koeffizienten zeigen für $e = M/D_{Hypo}$, $e = \epsilon_{dobro}$ und $e = M/Tiefe$ ein unterschiedliches Verhalten der Faktoren. Dies lässt darauf schließen, dass die unterschiedliche Geometrie und die energetische Komponente einen Einfluss auf die Wasserchemie besitzen, und zwar sowohl in der Vorbereitung der seismischen Ereignisse als auch als Folge der damit zusammenhängenden tektonischen Ereignisse.

In den Korrelationsverläufen konnte gezeigt werden, dass sich präseismische und postseismische Tektonik unterschiedlich stark in der Erklärung der Varianz wiederfinden. Zudem zeigt dies, dass sich die Effekte der postseismischen und präseismischen Tektonik überlagern können. Dieses Verhalten ist bei einer zukünftigen Monitoringstrategie zu beachten.

Die Darstellung der p-Niveaus der Irrtumswahrscheinlichkeiten für die Ablehnung der H_0 der b-Werte zeigt, dass einige Faktoren auch bei hohen n keinen signifikanten Beitrag zur Klärung der Varianz liefern.

Die Ergebnisse der Transformation $e = M/Tiefe$ und $e = M/D_{Hypo}$ zeigen, dass Prozesse im Zusammenhang mit flachen Erdbeben in der Analyse einen viel stärkeren Einfluss auf die Wasserchemie besitzen als solche mit vielen tiefen Erdbeben.

Die Analyse der b-Koeffizienten eignet sich, Monitoringparameter zu identifizieren, die auf einem signifikanten Faktor liegen und, welche für ein zukünftiges Monitoring geeignet sind.

Mischungsmodelle für die Zusammensetzung des Wassers können bei der Interpretation des aktuellen tektonischen Geschehens eingesetzt werden, da sie die unterschiedlichen Geometrien und Energien der Erdbebenaktivität widerspiegeln.

9 KSM-Station, Izu Peninsula: Ergebnisse und Diskussion

Die Radonzeitreihe der KSM-Station auf der Peninsula Izu, Japan wurde seit fast 20 Jahren kontinuierlich untersucht und stellt so eine der am besten untersuchten Monitoringstationen bezüglich der Erdbebenaktivität dar. Für diese Arbeit wurde der Zeitraum von 1985 bis 1989 untersucht. IGARASHI & WAKITA (1990) veröffentlichten eine Arbeit, in der sie nach einem optimalen sensiblen Signalkriterium für große Erdbeben suchten. Sie fanden heraus, dass die 2-fache Standardabweichung des 30er gleitenden Mittelwertes optimal ist, um für die meisten Erdbeben mit einer Magnitude größer 6 eine postseismische Antwort in der Radonzeitreihe zu identifizieren. Für einen Zeitraum wurde sogar eine potentielle Reaktion im Vorfeld eines 6er Erdbebens gefunden. Dabei blieb ungeklärt, ob es sich dabei um einen zufälligen Ausbruch des Radons aus dem zuvor definierten Vertrauensbereich handelte.

Wie in Kapitel 4.2.2 erläutert, wird nun eine alternative Signaldefinition eingeführt, um zu untersuchen, ob eine Signaldefinition über ein Differenzenkriterium eine bessere Möglichkeit bietet, um Antworten der Radonzeitreihe auf das tektonische Geschehen zu identifizieren. In Tabelle 24 und Tabelle 25 sind die von Igarashi und Wakita gefundenen Anomalie-Signale und die in die Analyse mit einbezogenen untersuchten Erdbeben dargestellt. Der von IGARASHI & WAKITA (1990) gefundene sensible Vertrauensbereich betrug 48 cpm um den 30er gleitenden Mittelwert. Lag die Radonkonzentration außerhalb dieses Bereiches, lag eine Anomalie vor (Anomalie 11 in Tabelle 24).

Als Konkurrenzkriterium wird in dieser Arbeit eine Signaldefinition mittels der Tagesdifferenzen der Radonkonzentration über einen Zeitraum von 2 Tagen eingeführt. Es wird überprüft, ob bei Änderung der Radonkonzentration innerhalb von 2 Tagen um mehr als 50 cpm (counts per minute) ein nicht zufälliges oder ein tektonisch induziertes Signal vorliegt. Ist dies der Fall, so sollte für mindestens eine e-Transformation eine erhöhte Erdbebenaktivität festzustellen sein. In Tabelle 26 sind für gefundene Signale erhöhte Erdbebenaktivitäten gekennzeichnet. Die erhöhten Radonkonzentrationen sind in den Abbildungen unten mit einem Pfeil markiert. Nach einer Faktorenanalyse der Erdbebenaktivitäten wurden 4 repräsentative Erdbebenaktivitäten gefunden. Die grafische Analyse beschränkt sich auf diese. Signale, die hintereinander vorkommen (weniger als 5 Tage voneinander entfernt) gelten als ein Signal.

Mit der „Signaldefinition“ über die Änderung der Radonkonzentrationen um mehr als 50 cpm in zwei Tagen können mehr signifikant erhöhte Erdbebenaktivitäten und einzelne große Erdbeben identifiziert werden als mit dem Kriterium von IGARASHI & WAKITA (1990). Tabelle 26 zeigt die gefundenen Signale. Es wurden 28 negative Signale und 29 positive Signale identifiziert, wobei meistens ein negatives und ein positives Signal zusammenfallen. Für die 4 Faktoren, welche die Erdbebenaktivitäten repräsentieren, wurde jeweils eine e-Transformation für E_0 grafisch dargestellt (Abbildung 82 und Abbildung 85 bis Abbildung 87).

In den Abbildungen wurden erhöhte Erdbebenaktivitäten, die mit einem Signal zusammenfallen, mit einem Pfeil markiert. In Tabelle 26 wurde dann für jeden Pfeil entsprechend ein Vermerk gemacht. Für die negativen Signale wurden für 28 Signale 23 erhöhte Erdbebenaktivitäten registriert. Bei den positiven Signalen betrug die Aufklärungsrate 23 zu 29.

Als Überblick werden in den nächsten Grafiken die Radonzeitreihe und die Erdbebenaktivität $E_{n, sym}$ für $n=0$ und $n=5$ und mit vier unterschiedlichen e-Transformationen (laut Faktorenanalyse in Kapitel 6.2.5 unabhängig voneinander) dargestellt.

Abbildung 86 und Abbildung 87 zeigen, dass mit der Berechnung der Erdbebenaktivitäten E für einen Tag ($n=0$) 4 postseismische Signale nach IGARASHI & WAKITA (1990) erklärbar sind, welchen nach dem Anomaliekriterium über den Vertrauensbereich der Standardabweichungen kein Erdbeben aus Tabelle 25 zugeordnet werden konnte: Signale 1, 16, 17, 18 in Tabelle 24. Diese fallen nicht mit einzelnen großen Erdbeben zusammen, aber mit erhöhten Erdbebenaktivitäten nach der hier vorgestellten Definition. Allen Signalen, welchen IGARASHI & WAKITA (1990) einzelne große Erdbeben zugeordnet haben, lassen sich unterschiedlichen Erdbebenaktivitäten E für $n=0$ zuordnen. Interessanterweise kann keine Erdbebenaktivität alle Signale nach IGARASHI & WAKITA (1990) erklären.

Mit der Erdbebenaktivität summiert über 11 Tage ($E_{5, \text{sym}}$) kann z.B. eine erhöhte seismische Aktivität in Form eines lokalen Maximums mit den Signalen an den Tagen 153 und 155 in Verbindung gebracht werden. Das lokale Maximum ist in Abbildung 83 mit einem Pfeil markiert. Mit der Summation der Erdbebenaktivität über 1 Tag ($n=0$) zu E_0 ist es nicht möglich diesen Signalen in der Radonzeitreihe eine erhöhte Erdbebenaktivität zuzuordnen. Das lokale Maximum $E_{5, \text{sym}}$ in Abbildung 83 fällt auch mit dem Signal 3 nach IGARASHI & WAKITA (1990) am Tag 153 zusammen. Für dieses konnte weder ein großes Erdbeben, noch wie oben erwähnt, eine eindeutige Erdbebenaktivität E_0 zugeordnet werden.

Somit konnten mit der hier vorgestellten Methode der Erdbebenaktivitäten alle Signale nach Igarashi und Wakita erklärt werden, welche nicht mit einem großen Erdbeben zusammenfallen ($M>6$). Außerdem konnten mit der Signaldefinition über Differenzen weitere Signale gefunden werden, welche mit erhöhten Erdbebenaktivitäten zeitlich zusammenfallen.

Für Signale ohne erhöhte Erdbebenaktivität am Ende des betrachteten Zeitraums kann auch eine Erklärung gefunden werden: Um den Tag 1270 gibt es einen deutlich erkennbaren Strukturbruch in der Radonzeitreihe, er wird von Signalen, welchen keine erhöhte Erdbebenaktivität mit E_0 zugeordnet werden konnte, eingeleitet. Am Ende des steilen Anstiegs ist für 3 der 4 e-Parameter eine sehr starke Erdbebenaktivität zu beobachten. Dies ist besonders deutlich in Abbildung 83 zu sehen.

Da mit keiner einzelnen e-Transformation, allen markierten Signalen nach IGARASHI & WAKITA (1990) eine erhöhte Erdbebenaktivität zugeordnet werden konnte, sind somit nicht immer die gleichen tektonischen Bedingungen (nach der hier eingeführten Aktivitätsdefinition) für das Auftreten von tektonisch bedingten Signalen in der Radonzeitreihe verantwortlich.

Die Erdbeben 9 und 10 sowie 15, 20 und 26-30 in Tabelle 25 wurden mit der Methode von IGARASHI & WAKITA (1990) nicht identifiziert. Mit der hier verwendeten Differenzenmethode konnte diesen ebenfalls kein Signal zugeordnet werden. Eventuell wurde für diese nicht die richtige Erdbebenaktivität gewählt, oder diese Erdbeben sind singuläre Ereignisse ohne kurzfristigen Einfluss auf die Radonzeitreihe.

Aber 5 Erdbeben mit Magnitude größer 6 nach IGARASHI & WAKITA (1990), welchen kein Signal nach den Definitionen zugeordnet werden konnte, leiten eine Trendwende im lokalen Verlauf ein, bzw. liegen im Bereich lokaler Extremwerte (siehe Pfeile in Abbildung 81). Alle Erdbeben nach Igarashi und Wakita, denen keine Signaldefinition zugeordnet werden konnte, fallen mit erhöhter Erdbebenaktivität am selben Tag zusammen.

Es kann gezeigt werden, dass nicht nur einzelne große Erdbeben Signale auslösen, sondern auch Erdbebenaktivitäten mehrerer Ereignisse für Signale in Frage kommen. Dieser Umstand hat Konsequenzen für die Interpretation der vorliegenden Daten. Bei einem eindeutigen Signal kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein einzelnes großes Erdbeben dafür verantwortlich ist. In den Abbildungen unten zeigt die Unterteilung der Erdbebenaktivitäten in 4 Faktoren welche Rolle die Betrachtung der Verhältnisse aus Erdbebenenergie und Geometrie spielt.

Auf die Erdbebenaktivität am Tag 650 folgt eine Erhöhung der Radonkonzentration. Es handelt sich um eine Phase mit vielen Erdbeben. Für $E_{5, \text{sym}}$ mit $e = M/D_{\text{epi}}^2$ zeigt sich ein lokales Maximum. Sie lässt sich für den E_0 des e-Parameters $e = M/D_{\text{epi}}^2$ und für den Parameter M/D_{hypo} ebenfalls eindeutig identifizieren. Eine solche Erhöhung der Radonaktivität ist im untersuchten Zeitabschnitt nicht typisch für die Reaktionen der Radonzeitreihe auf die Tektonik. Aber für die Tagesaktivität mit $e = M/D_{\text{epi}}^2$ kann eine erhöhte lokale Aktivität identifiziert werden.

Anmerkung zu den Abkürzungen in den Abbildungen:

Signal und E: Signal nach Igarashi & Wakita (1990), dem ein Erdbeben aus der Liste zugeordnet werden kann.

Signal ohne E: Signal nach Igarashi & Wakita (1990), dem kein Erdbeben aus der Liste zugeordnet werden kann.

Diff-Signal-minus: Signale nach der Differenzdefinition mit Tendenz nach unten.

Diff-Signal-oben: Signale nach der Differenzdefinition mit Tendenz nach oben.

E(n= xx, Typ): Erdbebenaktivität nach entsprechenden Kriterien..

9 KSM-Station, Izu Peninsula

Tabelle 24: Anomalien nach Igarashi und Wakita (1990):

	Datum	Tag seit 1.1.1985	DC (cpm)	Dauer Anomalie	Erdbeben innerhalb 1 Woche davor und danach				Δt (Tage)	Tage seit 1.1.1985
					Datum	Magnitude	Distanz	Erdbeben-Nr.		
1	1985-01-10	10	-73	1,1						
2	1985-04-13	103	-76	1,2	1985-04-11	6,8	940	10	+2,0	101
3	1985-06-02	153	-108	2,1						
4	1985-08-14	226	-169	4,7	1985-08-12	6,4	10	11	+1,4	224
5	1985-10-06	279	-171	1,5	1985-10-04	6,1	230	12	+1,5	277
6	1986-02-13	409	-66	1,2	1986-02-12	6,1	150	13	+1,3	408
7	1986-03-03	427	-62	1,3	1986-03-02	6,0	160	14	+1,3	426
8	1986-06-26	542	-138	1,7	1986-06-24	6,5	330	16	+1,7	540
9	1986-10-17	655	+81	2,1	1986-10-14	5,7	90			652
10	1987-01-11	741	-89	1,1	1987-01-09	6,6	260	19	+1,5	739
11	1987-02-04	765	+72	3,2	1987-02-06	6,4	130	21	-2,3	767
					1987-02-06	6,7	130	22	-2,3	767
					1987-02-06	6,4	130	21	+2,1	767
12	1987-02-09	770	-203	6,3	1987-02-06	6,7	130	22	+2,1	767
13	1987-04-09	829	-139	2,5	1987-04-07	6,6	110	23	+2,3	827
14	1987-04-18	838	-153	7,8	1987-04-17	6,1	110	24	+1,8	837
15	1987-04-24	844	-127		1987-04-23	6,5	100	25	+1,2	843
16	1987-08-24	966	+95		9,7					
17	1988-06-20	1267	-87	1						
18	1988-06-26	1273	-91	1,2						

Tabelle 25: Erdbeben größer Magnitude 6 mit einer epizentralen Entfernung < 1000 km für den Untersuchungszeitraum 1.1.1984 bis 31.12.1989.

Nr.	Datum	Tage seit 1.1.1985	Magnitude	Distanz Hypozenentrum
1	1984-01-01	-365	7,3	680
2	1984-03-06	-300	7,9	1000
3	1984-03-06	-300	6,0	570
4	1984-04-24	-251	6,7	880
5	1984-09-14	-108	6,8	360
6	1984-09-15	-107	6,2	370
7	1984-09-19	-103	6,6	410
8	1985-03-27	86	6,6	860
9	1985-03-29	88	6,5	330
10	1985-04-11	101	6,8	940
11	1985-08-12	224	6,4	100
12	1985-10-04	277	6,1	230
13	1986-02-12	408	6,1	150
14	1986-03-02	426	6,0	160
15	1986-04-16	471	6,2	860
16	1986-06-24	540	6,5	330
17	1986-11-22	691	6,0	370
18	1986-12-01	700	6,0	180
19	1987-01-09	739	6,6	260
20	1987-01-14	744	7,0	570
21	1987-02-06	767	6,4	130
22	1987-02-06	767	6,7	130
23	1987-04-07	827	6,6	110
24	1987-04-17	837	6,1	110
25	1987-04-23	843	6,5	100
26	1987-07-16	927	6,3	640
27	1987-12-12	1076	6,6	900
28	1987-12-17	1081	6,7	270
29	1988-01-02	1097	6,4	650
30	1988-03-18	1173	6,0	270

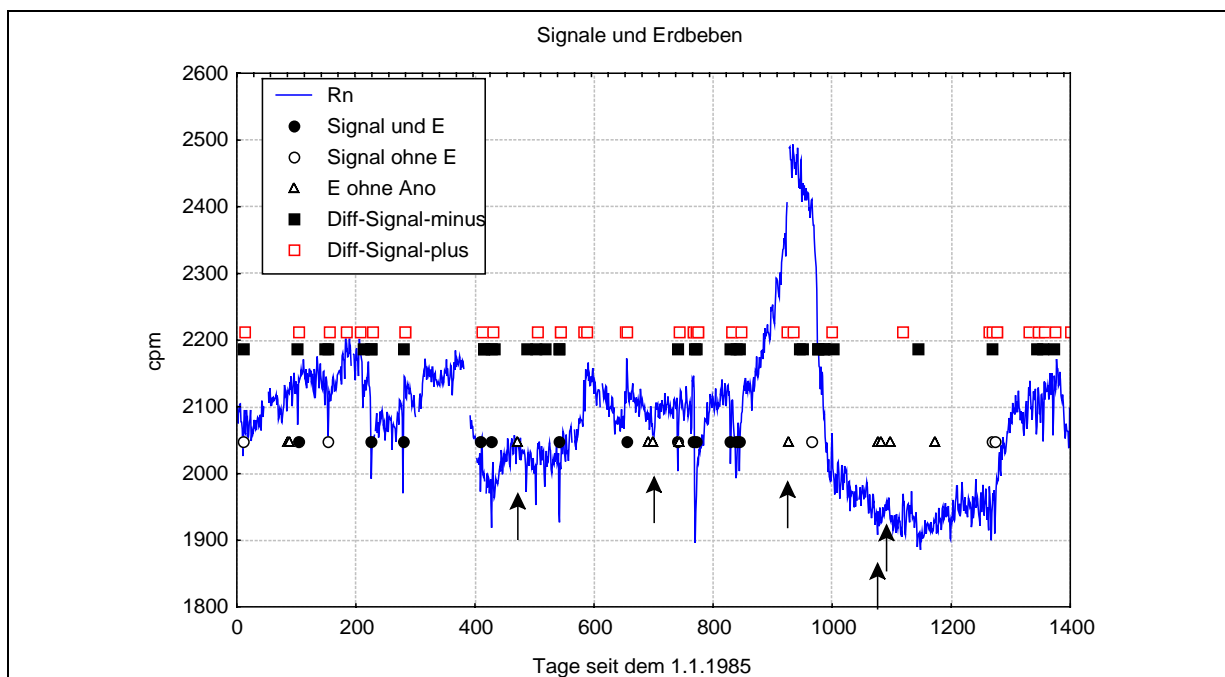


Abbildung 81: Vergleich der Signale nach IGARASHI & WAKITA mit den Differenzen-Signalen. Mit Pfeilen sind Erdbeben aus der Analyse von IGARASHI & WAKITA markiert denen kein Signal zugeordnet werden konnte. Sie markieren einen Trendwechsel (lokale Extremwerte) in der Radonzzeitreihe. Der Trendwechsel wird im nächsten Kapitel als Signaldefinition eingeführt. Diff-Signal-minus: Signale nach der Differenzdefinition mit Tendenz nach unten. Diff-Signal-oben: Signale nach der Differenzdefinition mit Tendenz nach oben.

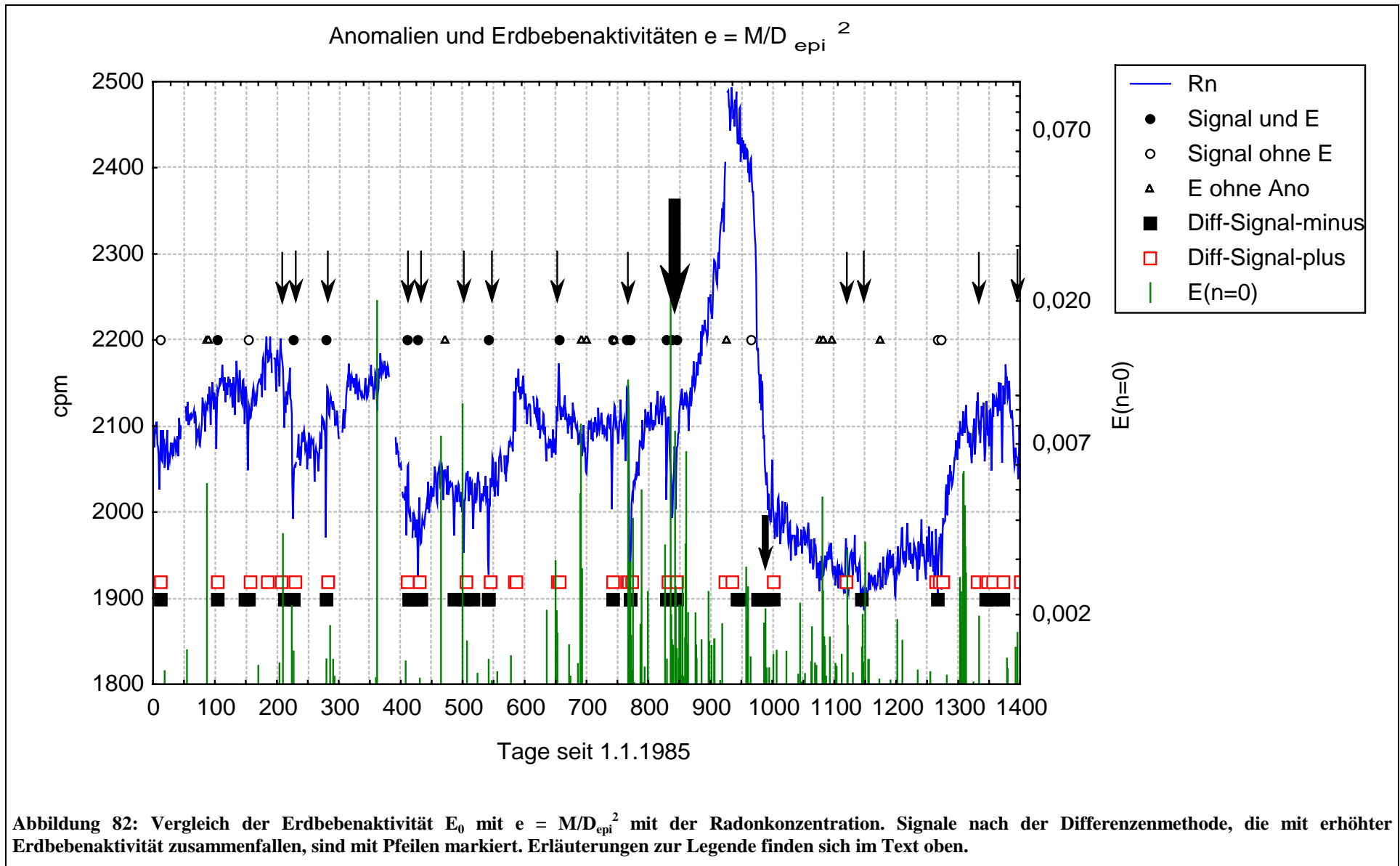
Nr.	Tag Negatives Signal	Erhöhte Erdbebenaktivität	Tag positives Signal	Erhöhte Erdbebenaktivität
1	10	3, 4	12	3, 4
2	102	3, 4	104	3, 4
3	148	-	155	-
4	153	-	183	4
5	212	1, 3	206	-
6	225+226	1, 3	228	3, 4
7	279	1, 3, 4	281+282	3
8	413+414	1, 3	411	3, 4
9	428+432	1, 3, 4	430	4
10	486	4	504	3, 4
11	502	1, 3	543+544	1, 3, 4
12	517	-	583+587	-
13	541+542	1, 3, 4	652+655	1, 2, 3, 4
14	741	3	743	3
15	769+770	1, 2, 3	765+766	1, 3
16	829	1, 3	772+773+774	1, 2, 3
17	838	1, 3	831+832	1, 3
18	844	1, 3	846	1, 3
19	944	-	924	1, 3
20	949	4	934	4
21	975+976	1, 4	1000	1, 3, 4
22	985+986	1, 2, 4	1119	1, 3
23	1002	1, 3, 4	1264+1269	-
24	1143	1, 2	1275+1276	-
25	1267	-	1330	-
26	1343	3	1345+1346	3
27	1354	3	1356	3
28	1371	2	1373	1, 2
		-	1399	1

Tabelle 26:

In der Tabelle sind die Signale nach der Differenzmethode dargestellt. Die erhöhten Erdbebenaktivitäten sind durch Zahlen repräsentiert:

- 1: $e=M/D_{epi}^2$;
- 2: $e=M$;
- 3: $e=10^M/D_{hypo}^3$;
- 4: $e=10^M/Tiefe^3$.

Eine erhöhte Erdbebenaktivität wurde als dem Signal zugehörig interpretiert, wenn sie nicht mehr als 5 Tage entfernt war.



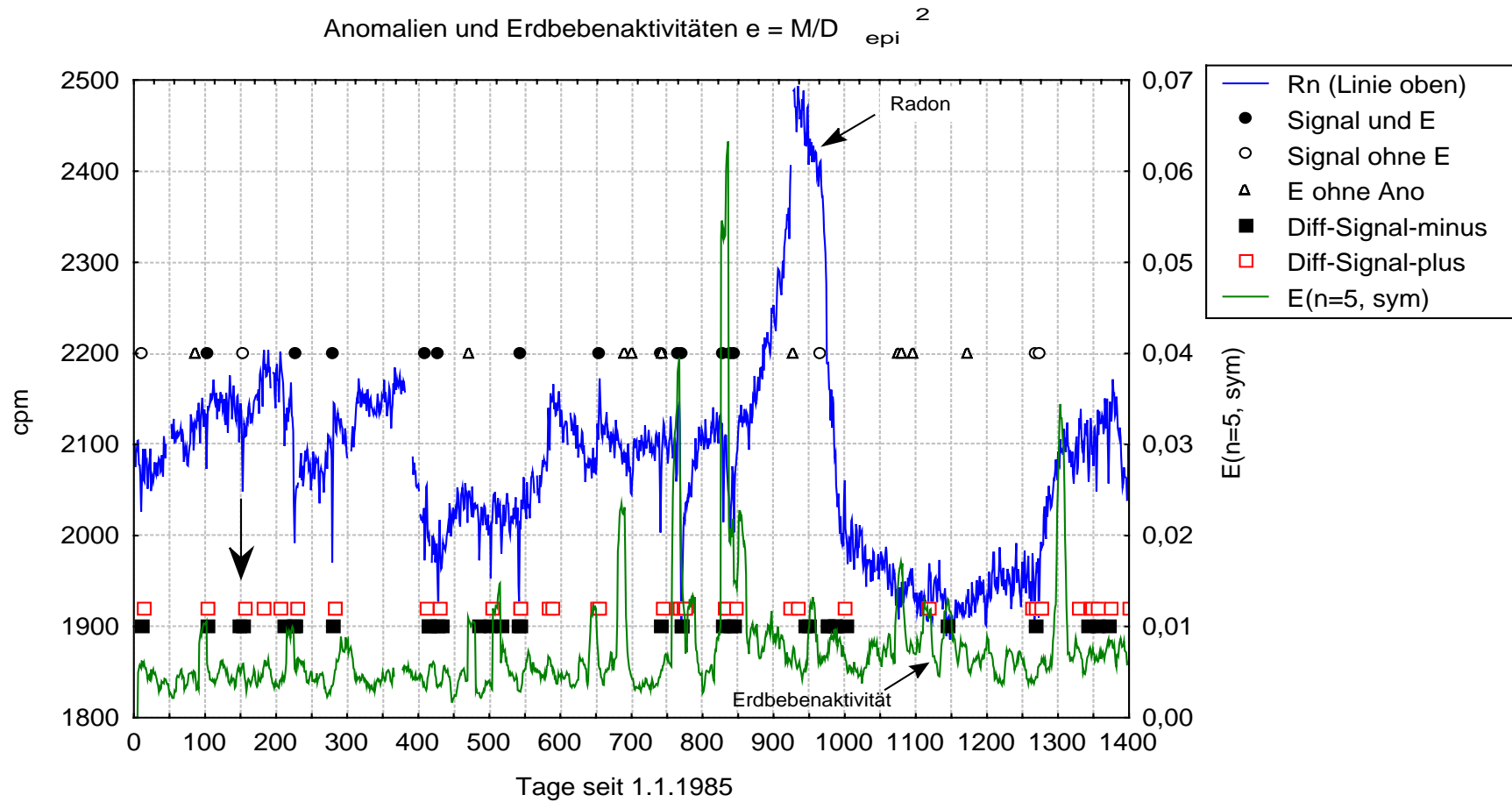
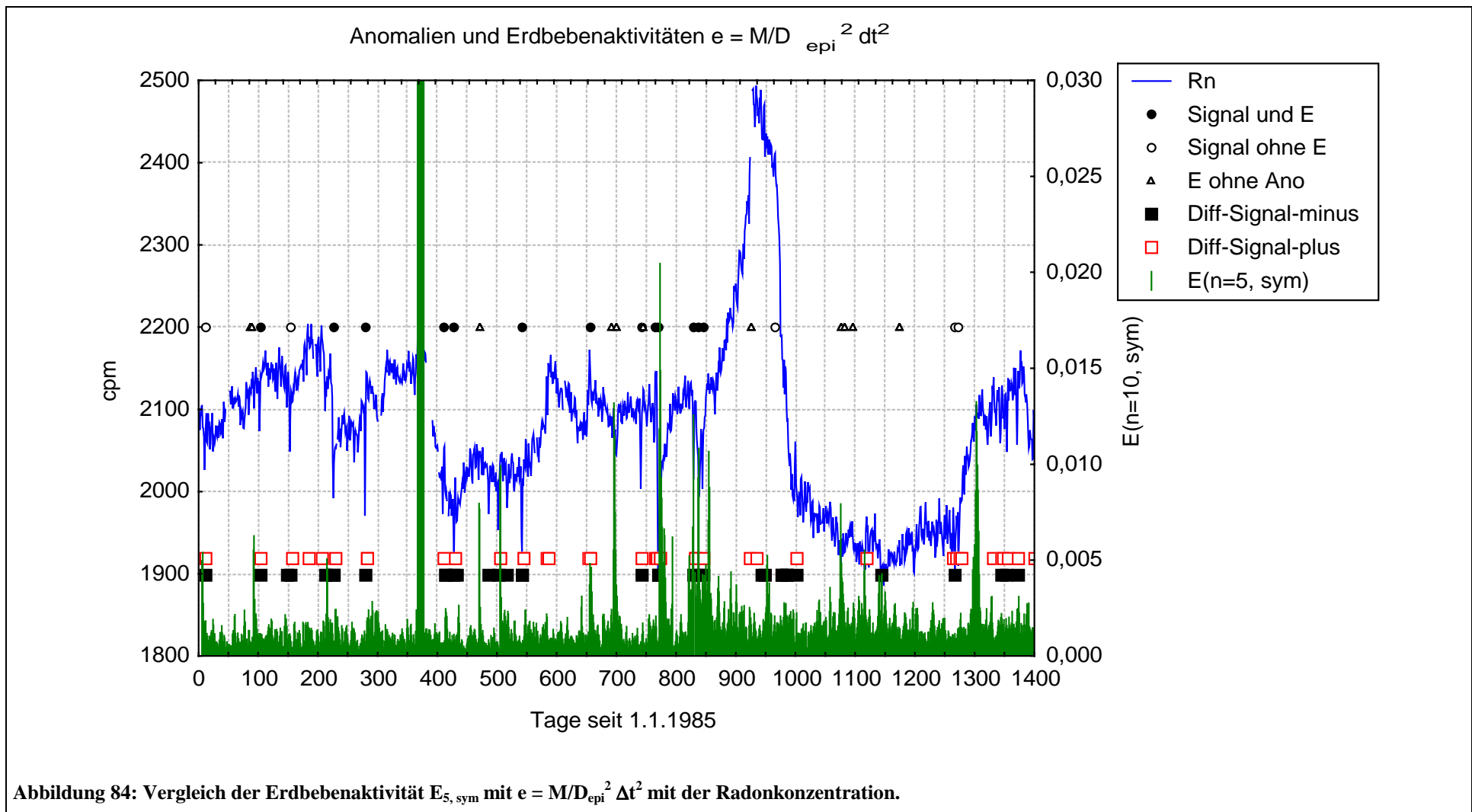
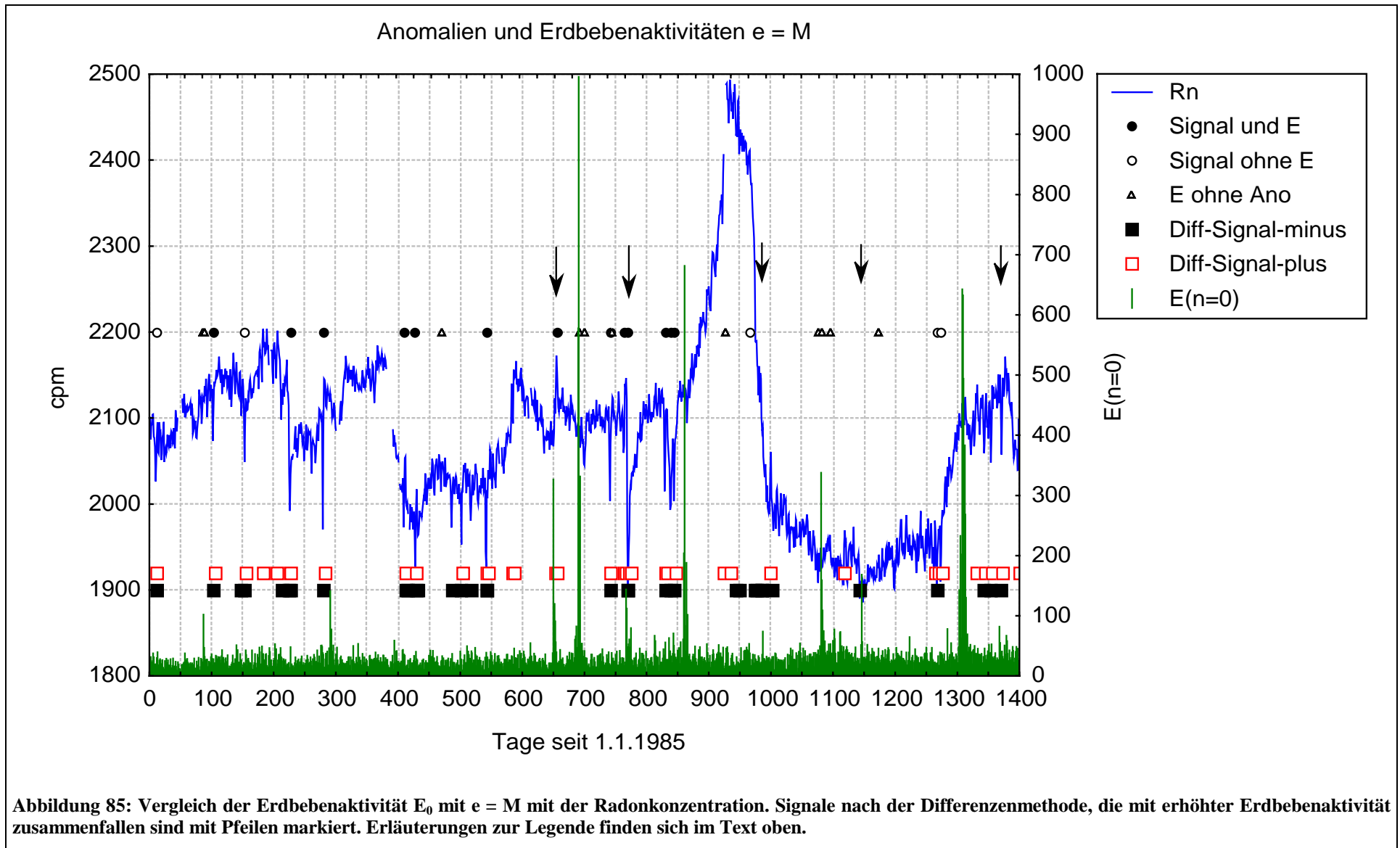
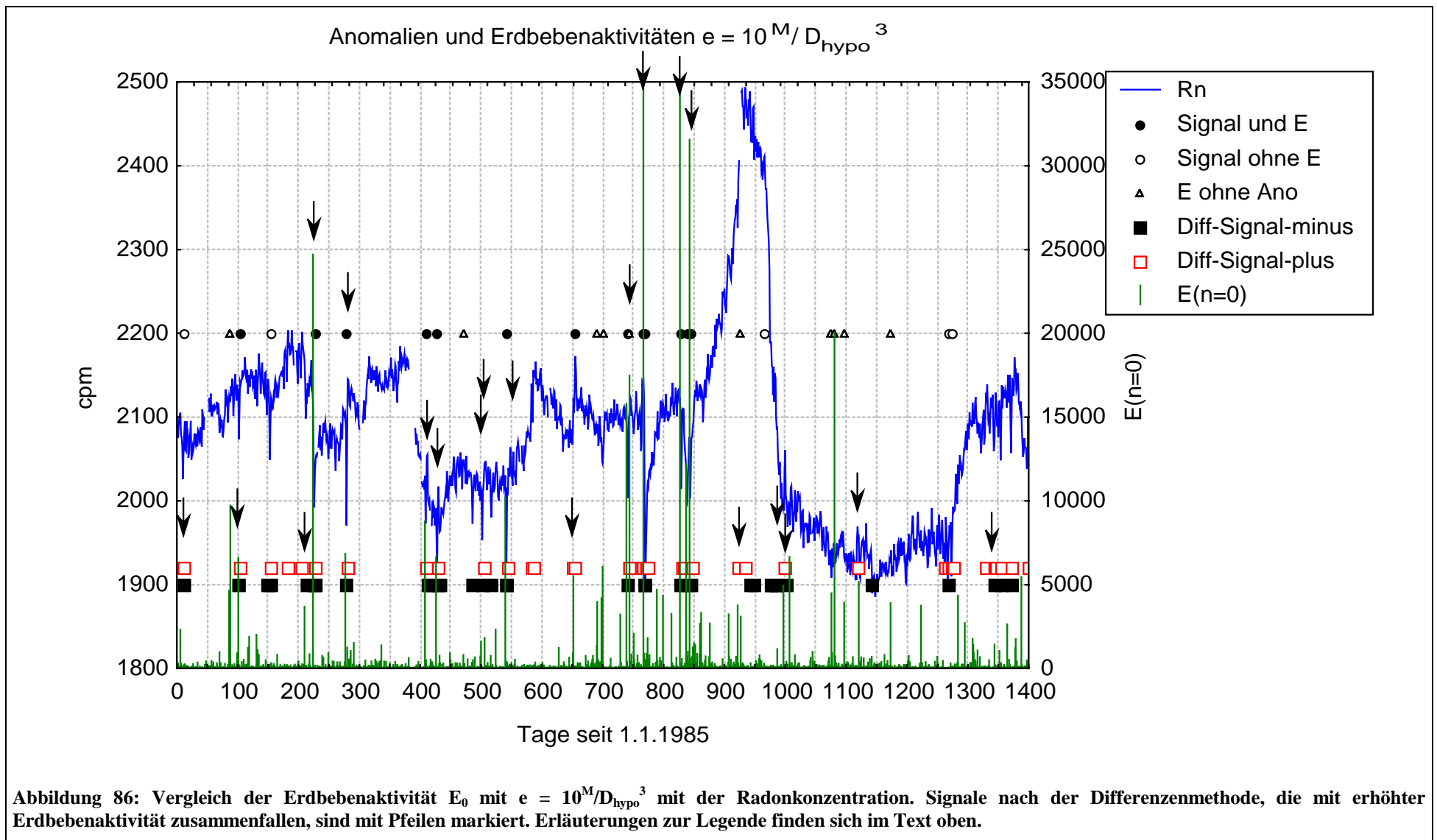
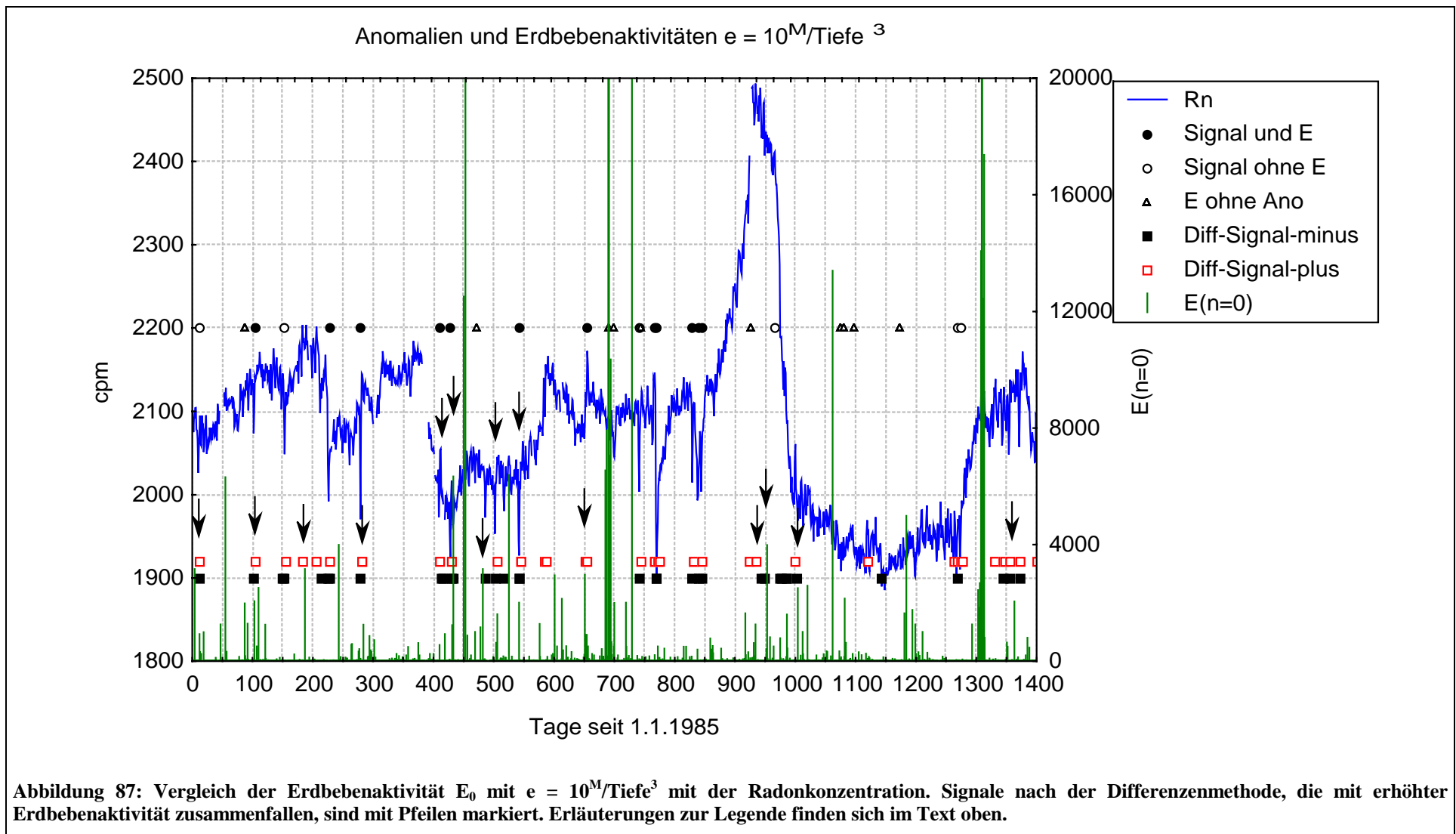


Abbildung 83: Vergleich der Erdbebenaktivität $E_{5, sym}$ mit $e = M/D_{epi}^2$ mit der Radonkonzentration. Ein Signal nach Igarashi und Wakita, denen keine erhöhte Erdbebenaktivität für E_0 zugeordnet werden konnte, das aber hier mit einem lokalen Maximum der Erdbebenaktivität zusammenfällt ist mit einem Pfeil markiert. Erläuterungen zur Legende finden sich im Text oben.





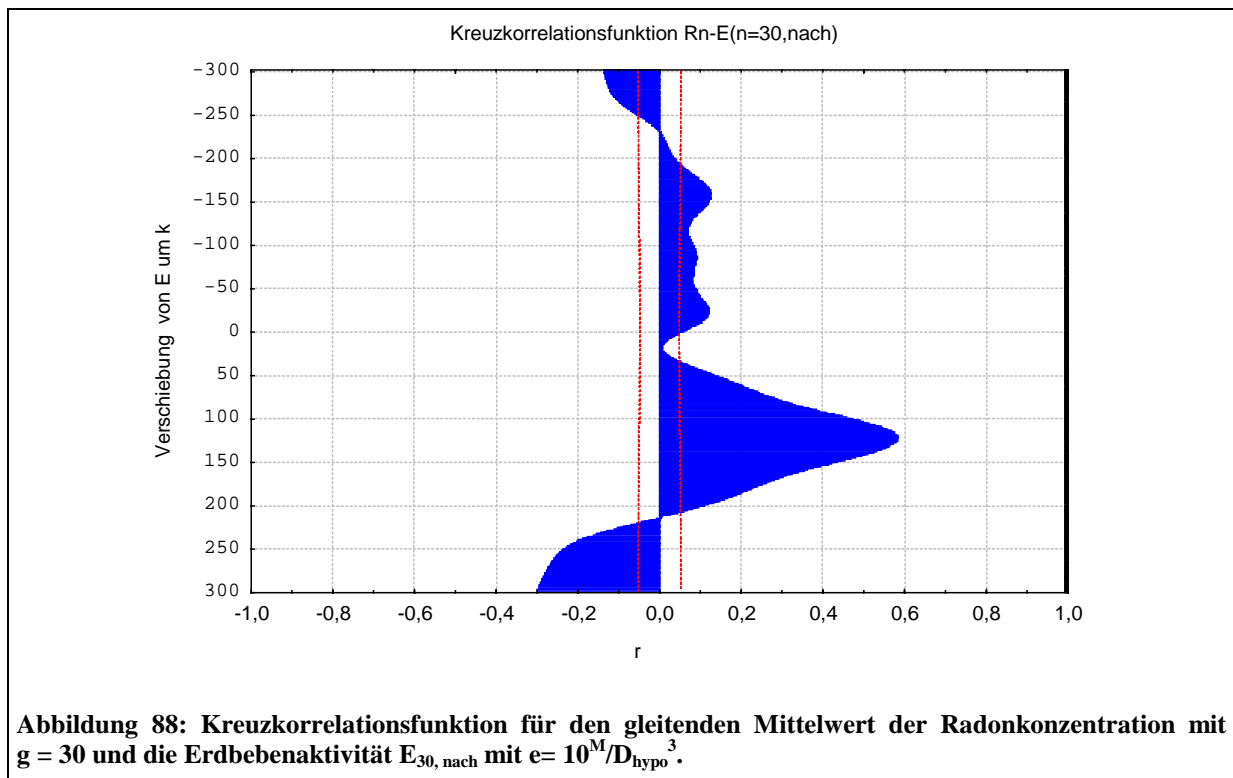


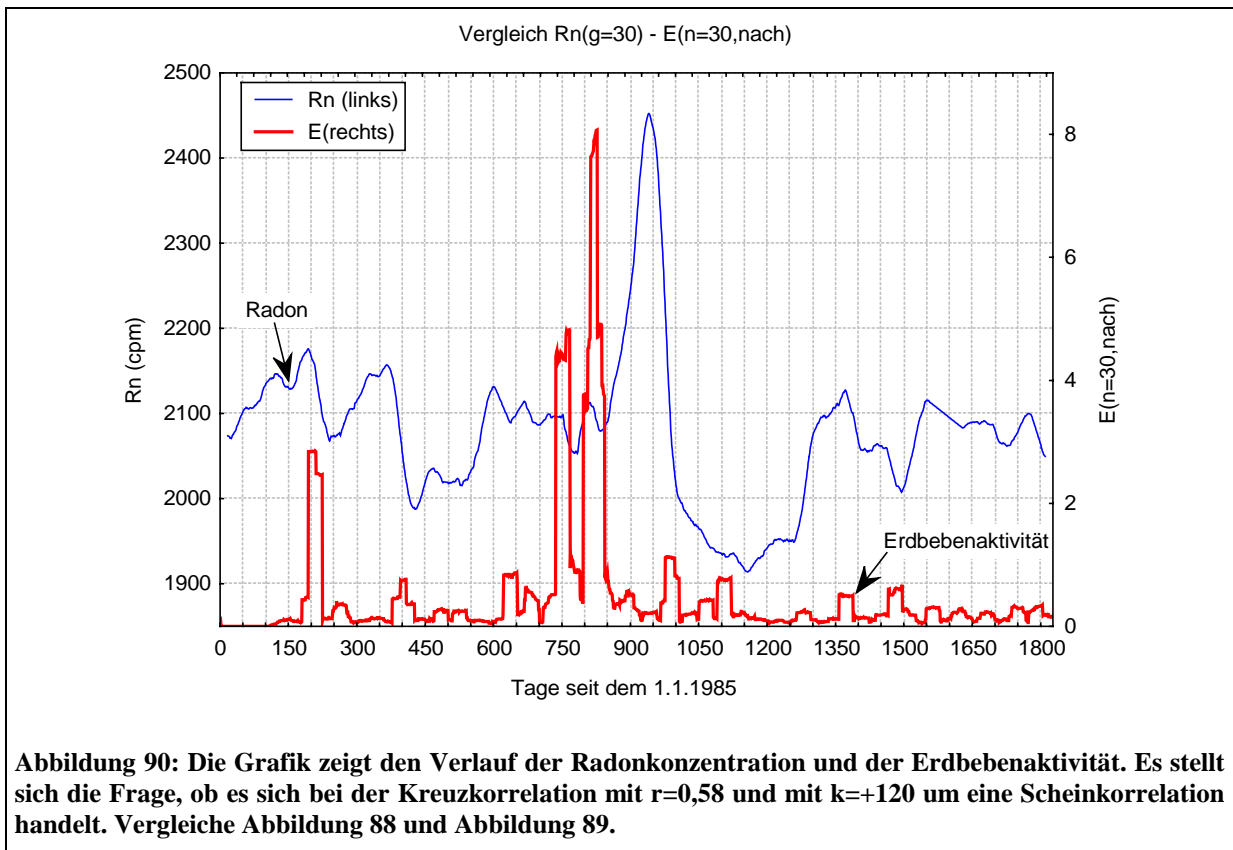
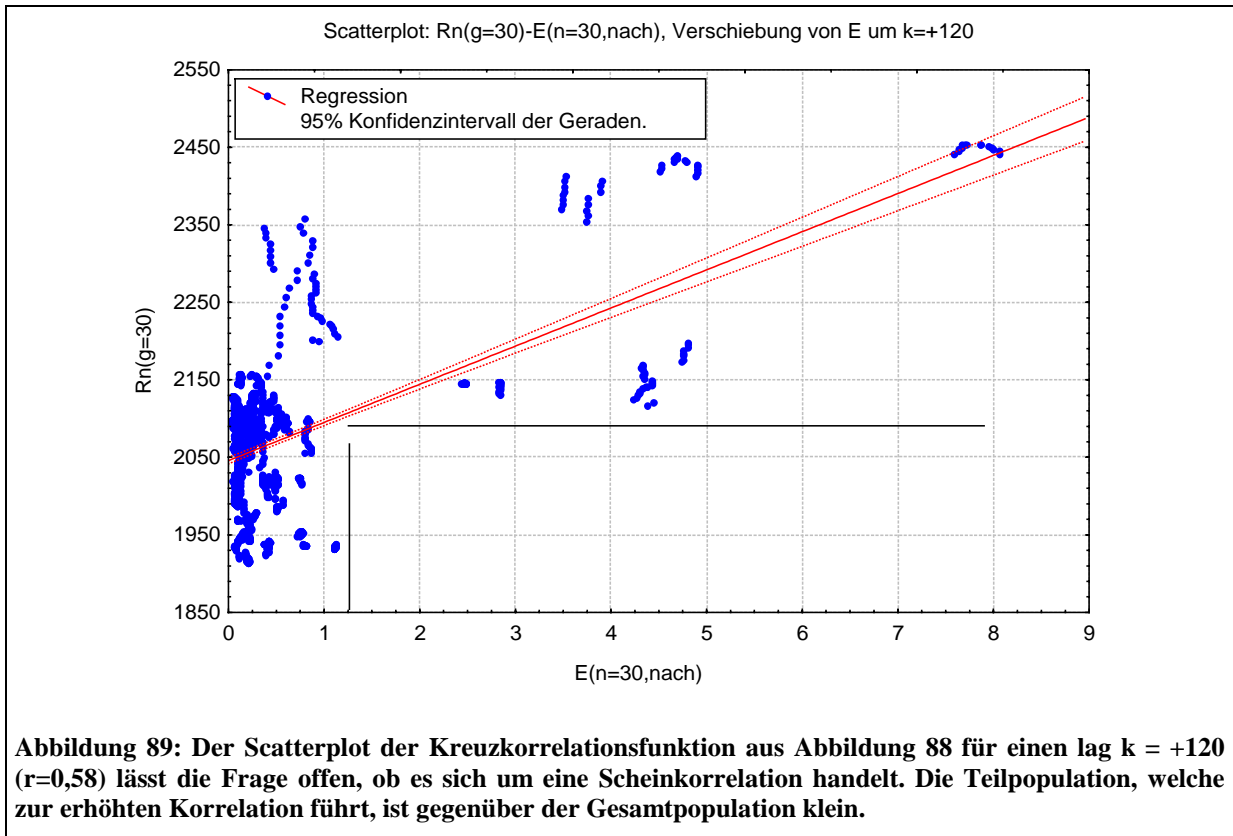


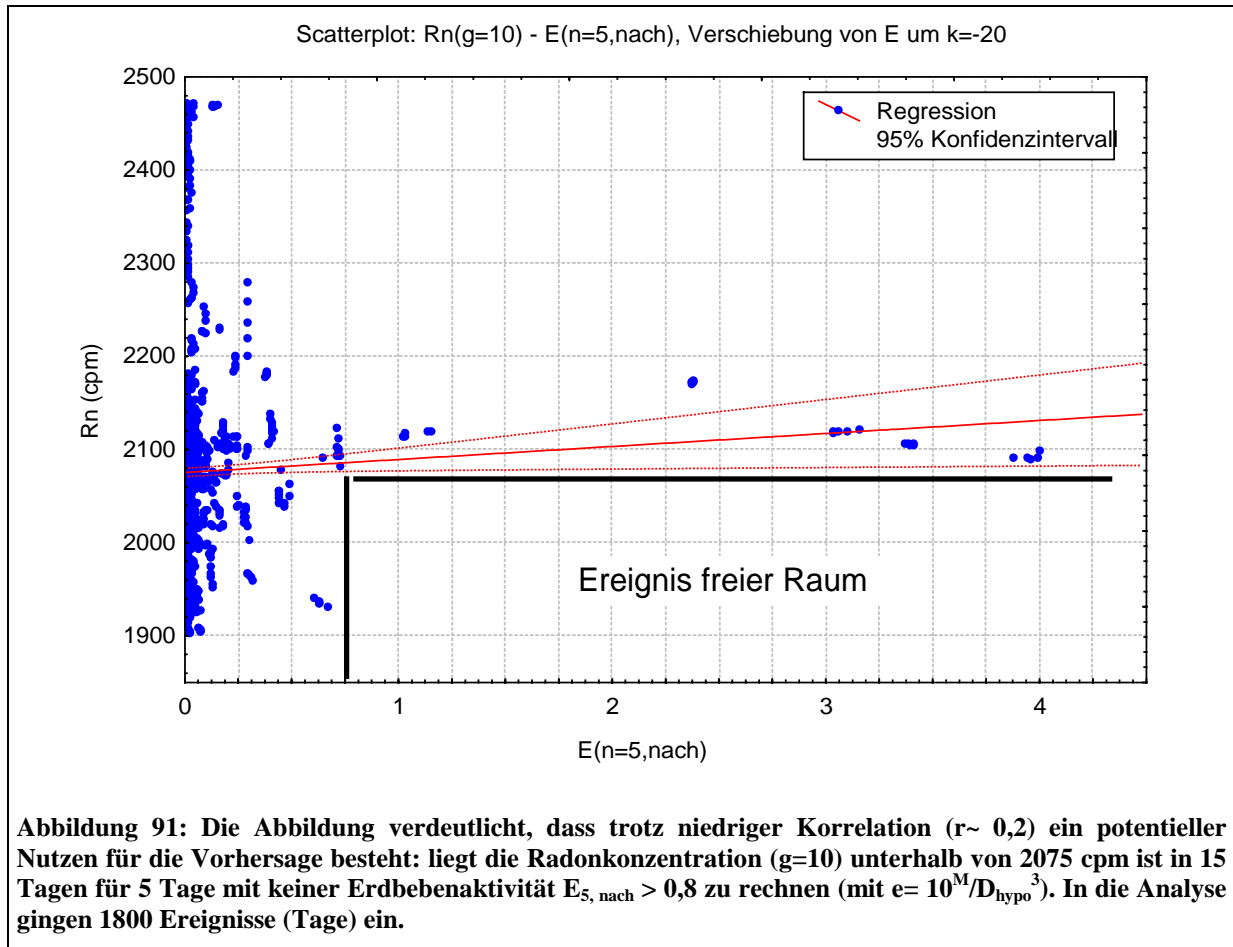
Lineare Regressionen bzw. Kreuzkorrelationen sind für diese Zeitreihen mit den hier verwendeten Kriterien nicht geeignet, um Zusammenhänge signifikant zu erklären (Abbildung 88 und Abbildung 89). Die besten Korrelationen mit $r > 0,5$ werden in Abbildung 88 gezeigt. Dabei handelt es sich aber vermutlich um eine Scheinkorrelation, wie Abbildung 89 zeigt. Wenn Zusammenhänge in einem Zeitraum untersucht werden, der kleiner 100 Tage beträgt, kann keine Kreuzkorrelation mit $r > 0,5$ gefunden werden.

Abbildung 88 zeigt, dass es ein Maximum der Korrelation $r > 0,58$ für einen positiven lag $k \approx 120$ gibt. Es ist nicht klar, ob es sich dabei um eine Scheinkorrelation handelt, wie Abbildung 89 und Abbildung 90 vermuten lassen. Der Verlauf der Erdbebenaktivität zwischen Tagen 725 und 825 werfen die Frage nach dem Mechanismus für die anomale hohe Radonkonzentration im Zeitraum der Tage 850 bis 1000 auf. Besitzt eine hohe Erdbebenaktivität eine solche Wirkung, dass erst ≈ 120 Tage später eine erhöhte Radonkonzentration aus der Erdkruste exhaliert wird? Oder steht die erhöhte Radonkonzentration in Zusammenhang mit dem Erdbeben am Tag 927 ($M=6,3$)? Radon ist ein sehr mobiles Gas, und reagiert normaler Weise innerhalb weniger Tage auf die Tektonik. Dies wurde im Zusammenhang mit den Signaldefinitionen gezeigt.

In Abbildung 91 ist eine mögliche Anwendung der Erdbebenaktivitäten gezeigt. Eine direkte Vorhersage der Erdbebenaktivität scheint mit dem hier gezeigten linearen Modell nicht möglich. Wird die Erdbebenaktivität $E_{5, \text{nach}}$, 15 Tage nach der letzten Radonbeobachtung des 10er gleitenden Mittelwertes des Radon untersucht, kann für den untersuchten Zeitraum ein ereignisfreier Raum beobachtet werden. Sinkt die Radonkonzentration unter einen Schwellenwert von 2075 cpm, ist ab dem 15. Tag nach der Referenzmessung für einen Zeitraum von 5 Tagen mit keiner Erdbebenaktivität $E_{5, \text{nach}} > 0,8$ zu rechnen (mit $e = 10^M/D_{\text{hypo}}^3$). Diese Beobachtung gilt nur für den untersuchten Zeitraum.







10 Kamchatka, Pinachevo: Ergebnisse und Diskussion

Die Arbeiten von KHATKEVICH (1991), KOPYLOVA ET AL.(1994) und BELLA ET AL. (1998) zeigten für verschiedene Monitoringstationen im Gebiet des Koryaskiy-Vulkans, dass diese auf Erdbeben größer Magnitude 6 und einer epizentralen Distanz kleiner 250 km mit hydrogeochemischen und gasgeochemischen Signalen coseismisch antworten. Diese Arbeiten ordneten 3 Erdbeben Vorläufersignale, sowie 5 Erdbeben coseismische Effekte zu. Die Methode der Berechnung von Erdbebenaktivitäten über einen Zeitraum n erlaubt nun auch die Klärung von weiteren Änderungen in der Hydrochemie (Bsp.: Cl⁻, Abbildung 93). Es werden hier die Ergebnisse der Quelle 1 der Lokation Pinachevo vorgestellt, da diese am eindeutigsten sind.

Analyse einzelner Signale (Abbildung 92):

Als Erdbebensignal wurde das Überschreiten einer Grenz-Erdbebenaktivität gewählt, welche durch Anlegen einer horizontalen Gerade an die Erdbebenaktivitäten für den Parameter $e = M/D_{\text{hypo}}$ definiert wurde (Überschreiten einer Mindestaktivität). Eine Antwort in der Hydrochemie liegt vor, wenn der Trend bzw. der Verlauf der Konzentration des Chlorid für einen Zeitraum von 50 Tagen umgekehrt wird. In Abbildung 92 sind einige Signale mit Pfeilen gekennzeichnet. Die Methode der Signaldefinition ist also neben der Radonzeitreihe auch hier anwendbar. Der Pfeil ohne Hintergrundfarbe zeigt, dass diese Signaldefinition nicht optimal ist. Er kennzeichnet das Zusammenfallen eines Signals in der Hydrochemie mit einem lokalen Maximum in der Erdbebenaktivität unterhalb der festgesetzten Grenz-Erdbebenaktivität. Als alternative Grenzen für die Erdbebenaktivität könnten andere Kriterien hinzugezogen werden wie z.B. eine Definition, welche die Aktivität der letzten Zeiteinheiten berücksichtigt (lokale Wendepunkte oder Minima im Verlauf der Erdbebenaktivität).

In der Quelle 1 spiegelt sich die tektonische Aktivität der gesamten Region wieder. Bei erhöhter Aktivität wird der Anteil der Tiefenwasserkomponente im Mischungsverhältnis erhöht. Dieses Verhalten kann auch für Zeiträume ohne Erdbeben größer Magnitude 6 gezeigt werden (Zeitraum 1977-1989). Für die Quelle 1, ergeben sich keine eindeutigen optischen Hinweise auf Vorläufersignale von Erdbebenaktivitäten.

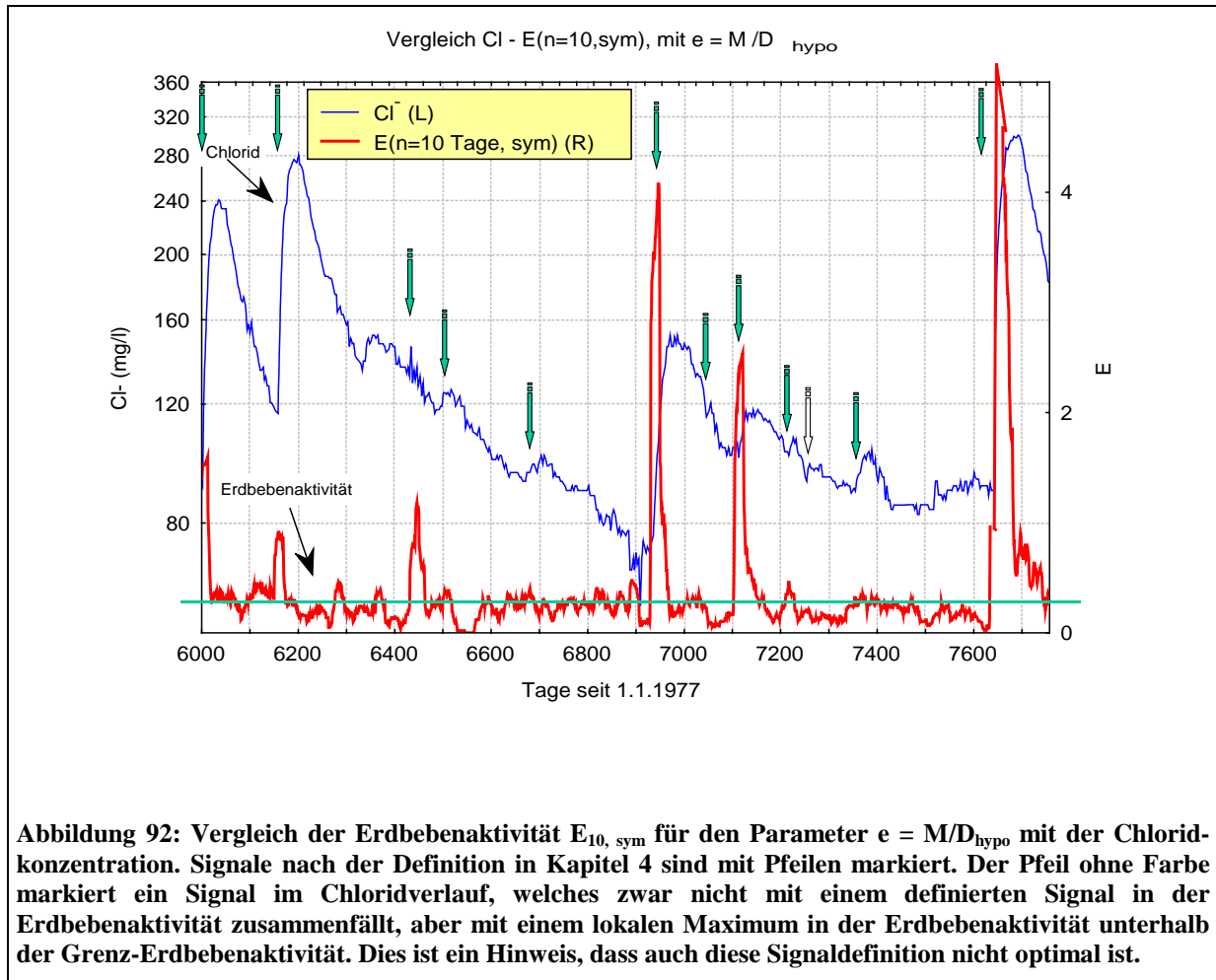
Durch die Summierung von Erdbebenaktivitäten ergeben sich zu unterschiedlichen Zeiten ähnlich starke Antworten des hydrochemischen Systems wie sie im Zusammenhang mit einem großen, nahen Erdbeben hervorgerufen werden.

Die Methode der linearen Kreuzkorrelationen brachte für diesen Datensatz keine Ergebnisse mit $r > 0,5$, wenn Zeitverschiebungen kleiner 100 Tage betrachtet wurden.

Es können nur coseismische Signale identifiziert werden. Dies kann an dem Beprobungsabstand von 3 Tagen liegen. Bei den Änderungen in der Hydrochemie handelt es sich nicht nur um einen Mischungsprozess durch veränderte Rahmenbedingungen im Druckpotential zweier benachbarter Aquifere. Die Änderungen der Methankonzentration belegen dies (Abbildung 96). Methan liegt auf demselben Faktor wie Chlorid. Die Wegsamkeiten (Permeabilitäten) des Systems sind in Zeiten erhöhter Erdbebenaktivität grundlegend anders. Die hohen Methankonzentrationen stehen dabei für eine erhöhte Wegsamkeit von tieferen Aquiferen mit größerer Salinität zum Aquifere mit jungen Grundwässern, welcher in Quelle 1 entwässert. Die Tiefenwässer wurden direkt neben der Quelle in der Bohrung GK-1 belegt.

Die Abbildung 93 bis Abbildung 95 zeigen die Erdbebenaktivitäten E_0 repräsentativ für die 3 extrahierten Faktoren der Erdbebenaktivität aus Kapitel 6.3.4. Für viele überdurchschnittlich hohe Erdbebenaktivitäten an einem Tag können erhöhte Chloridkonzentrationen oder der Beginn eines neuen Trends zu erhöhten Chloridkonzentrationen festgestellt werden. In Abbildung 93 sind einige Signale mit Pfeilen markiert.

Auch an diesem Datensatz konnte gezeigt werden, dass der Ansatz der Erdbebenaktivitäten mehr Varianz in den Monitoringzeitreihen erklären kann als der Bezug zu einzelnen großen Erdbeben.



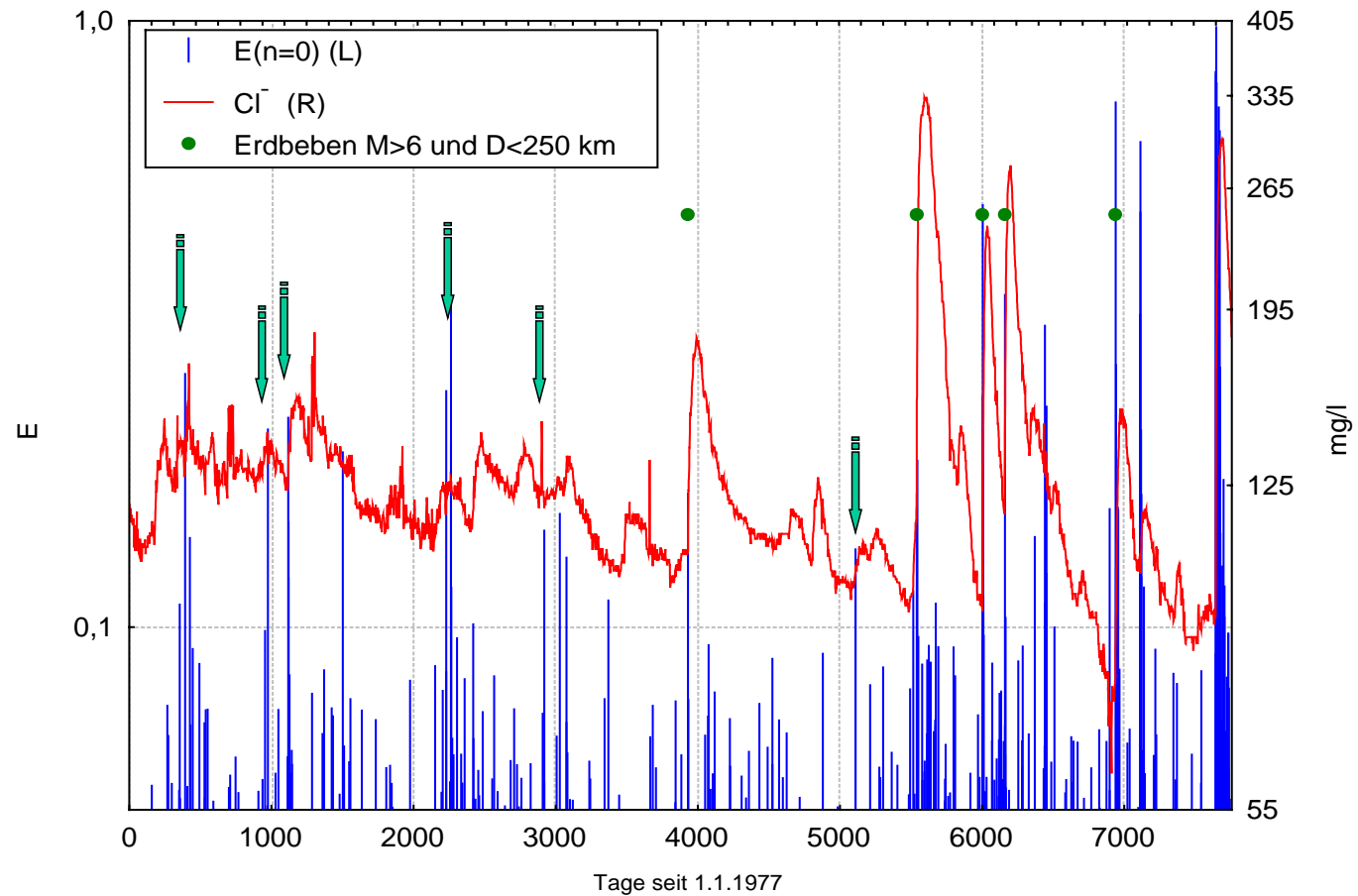


Abbildung 93: Vergleich der Chloridkonzentration mit der Erdbebenaktivität E_0 für $e = M/D_{hypo}$. Die Pfeile markieren das Zusammenfallen erhöhter Erdbebenaktivität mit erhöhten Chloridkonzentrationen oder einen Trendwechsel im Verlauf der Chloridkonzentration. Die eingezeichneten Erdbeben mit $M > 6$ und einer Entfernung kleiner 250 km entsprechen den 5 Erdbeben welche BELLA ET AL. mit erhöhter Chloridkonzentration in Verbindung brachten.

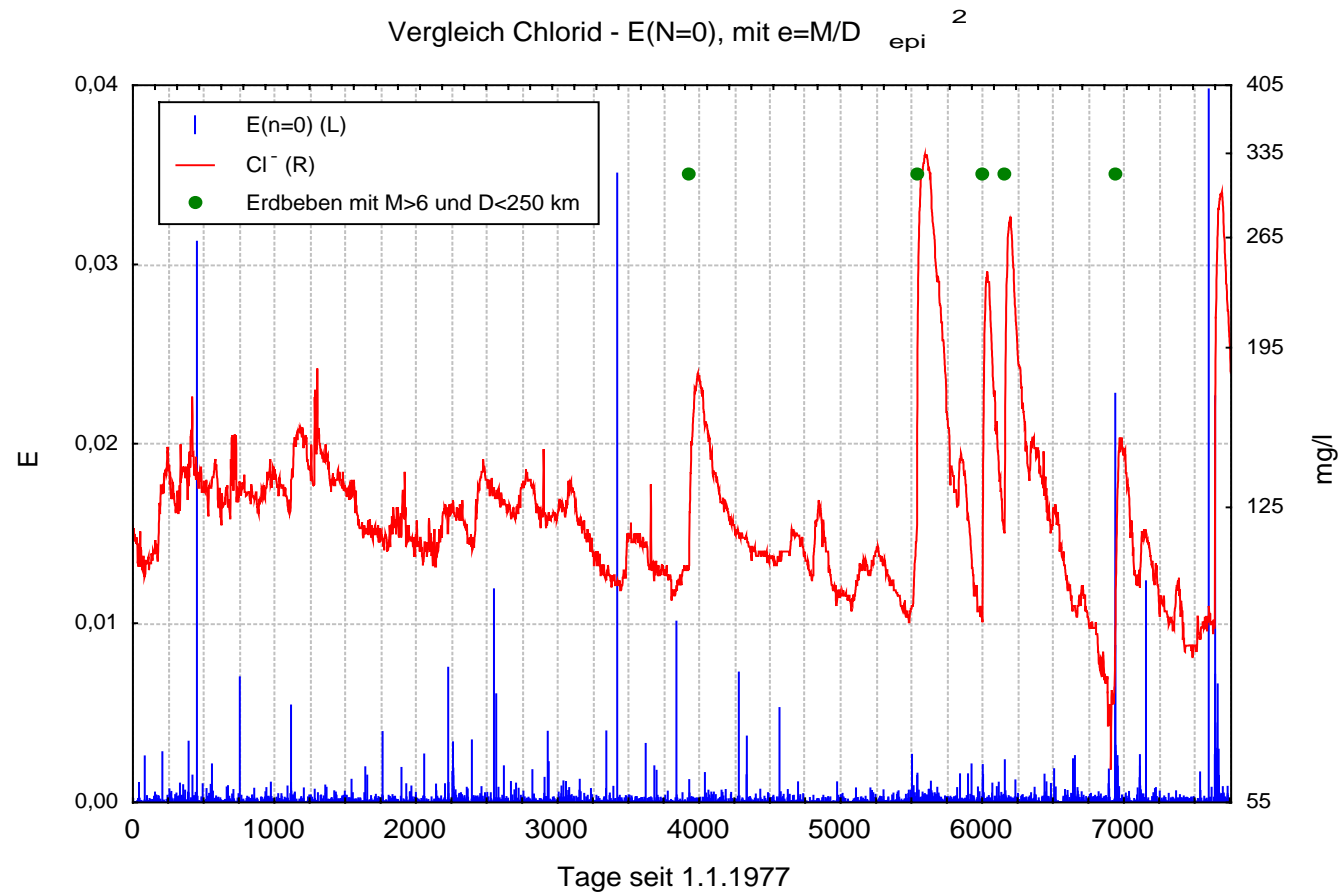


Abbildung 94: Vergleich der Erdbebenaktivität E_0 für den Parameter $e=M/D_{hypo}^2$ mit der Chloridkonzentration des Wassers von Quelle 1.

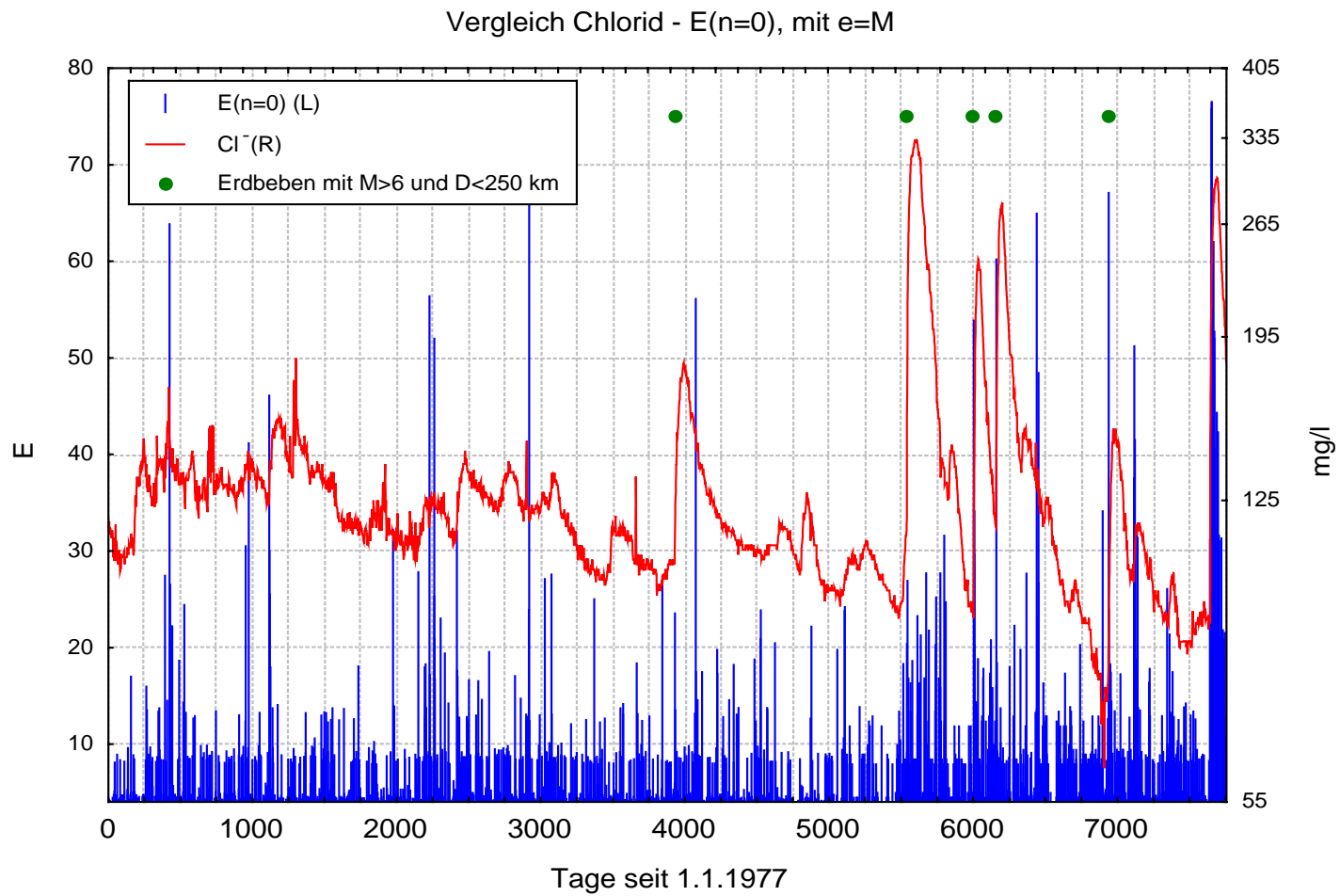


Abbildung 95: Vergleich der Erdbebenaktivität E_0 für den e -Parameter $e = M$ mit der Chloridkonzentration.

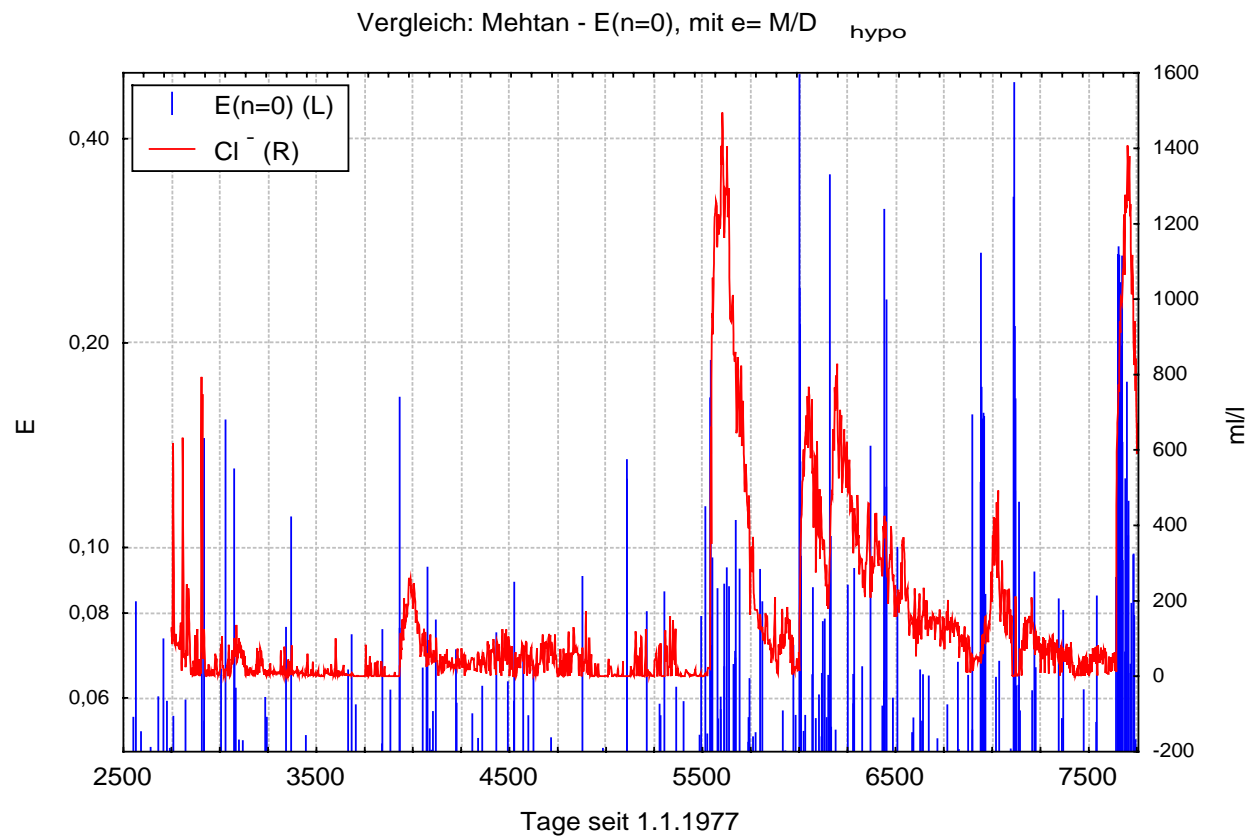


Abbildung 96: Vergleich der Erdbebenaktivität E_0 des e-Parameters $e = M/D_{\text{hypo}}$ mit dem gelösten Methan im Wasser von Quelle 1.

11 Potentielles Vorläufersignal des Kobe-Erdbebens

TSUNOGAI & WAKITA (1995, 1996) veröffentlichten einen Datensatz chemischer Wasseranalysen einer kommerziellen Wasserabfüllung im Zusammenhang mit dem Kobeerdbeben am 17. Januar 1995 ($M=7,2$). Die Quellen für die Wasserabfüllung liegen nur 20 km vom Epizentrum des Kobeerdbebens entfernt. Die Konzentrationen von Chlorid und Sulfat stiegen vor dem Kobeerdbeben an. Dies wurde als potentielles Vorläufersignal interpretiert. Es wird hier nun untersucht, ob sich diese Interpretation auch auf den Ansatz der Erdbebenaktivitäten E übertragen lässt. Dafür wurden alle Erdbeben mit einer epizentralen Entfernung < 500 km und einer Momentenmagnitude > 2 in die Berechnung der Erdbebenaktivitäten einbezogen. Als Quelle für die Erdbeben wurde der Erdbebenkatalog des "Meteorological Institut of Japan" MIJ benutzt. Die Faktorenanalyse ergibt zwei Faktoren (Tabelle 27). Faktor 1 vereinigt 74 % der gesamten Varianz der untersuchten Erdbebenaktivitäten. Das Kobeerdbeben findet am Beginn der stark erhöhten Erdbebenaktivität am Tag 747 statt.

Wie die Methode der Erdbebenaktivitäten am Beispiel des Kobeerdbebens in der Abbildung 97 zeigt, kann sie zur Überprüfung von vermeintlichen Vorläufersignalen genutzt werden. Die erhöhte Erdbebenaktivität am Anfang der Zeitreihe für Faktor 1 (Tag 130) hat anscheinend keine Reaktion in der Wasserchemie ausgelöst. Danach kann mit erhöhter Erdbebenaktivität des Faktors 1 eine erhöhte Konzentration der chemischen Spezies Chlorid und Sulfat beobachtet werden. Vielleicht stehen die beobachteten Sequenzen erhöhter Erdbebenaktivitäten vor dem Kobeerdbeben, welche mit den erhöhten chemischen Konzentrationen korrelieren, in Zusammenhang mit einer tektonischen Vorbereitung auf das Kobeerdbeben. Dass die chemischen Konzentrationen nach einem Abschnitt erhöhter Erdbebenaktivität wieder zurückgehen, spricht nicht für ein Brechen von Barrieren zwischen Aquiferen wie TSUNOGAI & WAKITA (1995, 1996) vermuteten. Es spricht eher für eine Änderung des Druckpotentials, welches das Spannungsfeld widerspiegeln und die Mischungsprozesse beeinflussen.

Das untersuchte Wasser ist eine Mischung von zwei Quellen. Chemische Analysen vor der Mischung und Abfüllung zeigten, dass nur eine der Quellen ihre chemischen Konzentrationen mit der Zeit verändert.

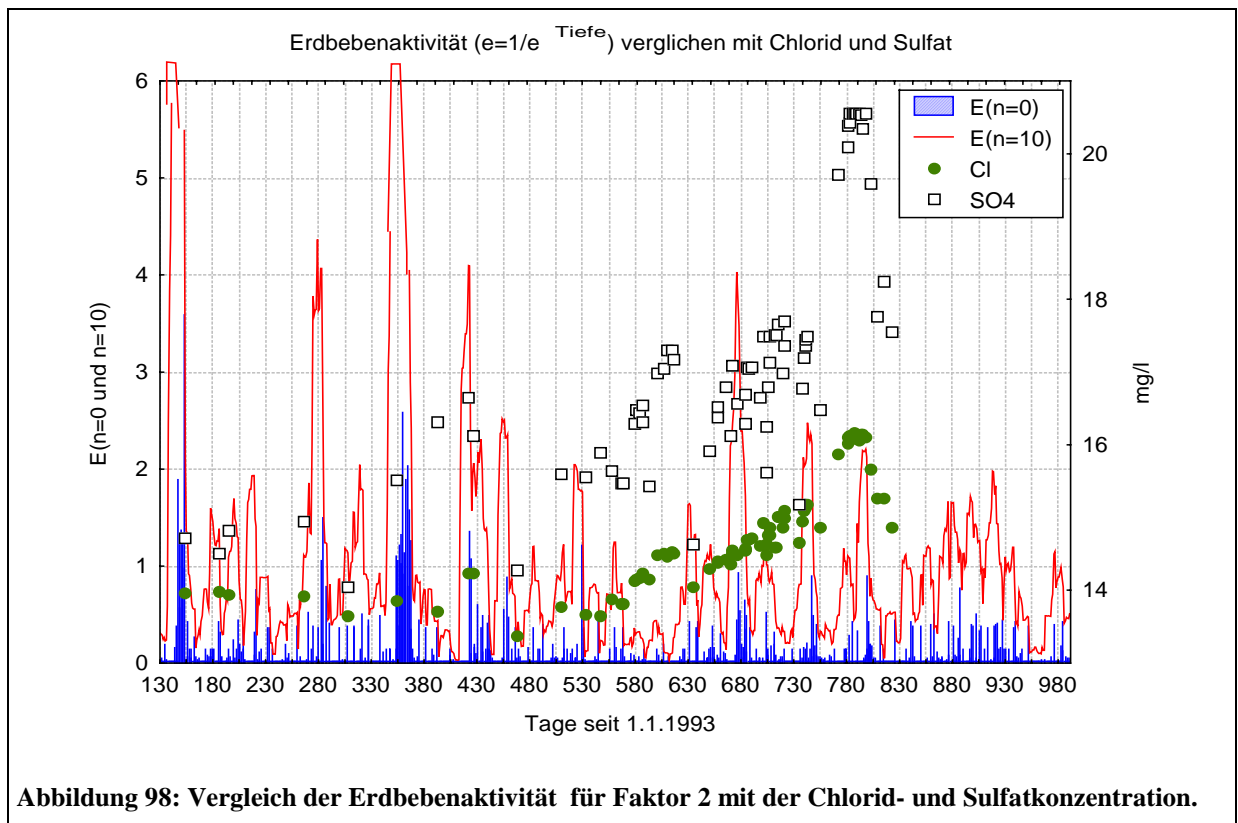
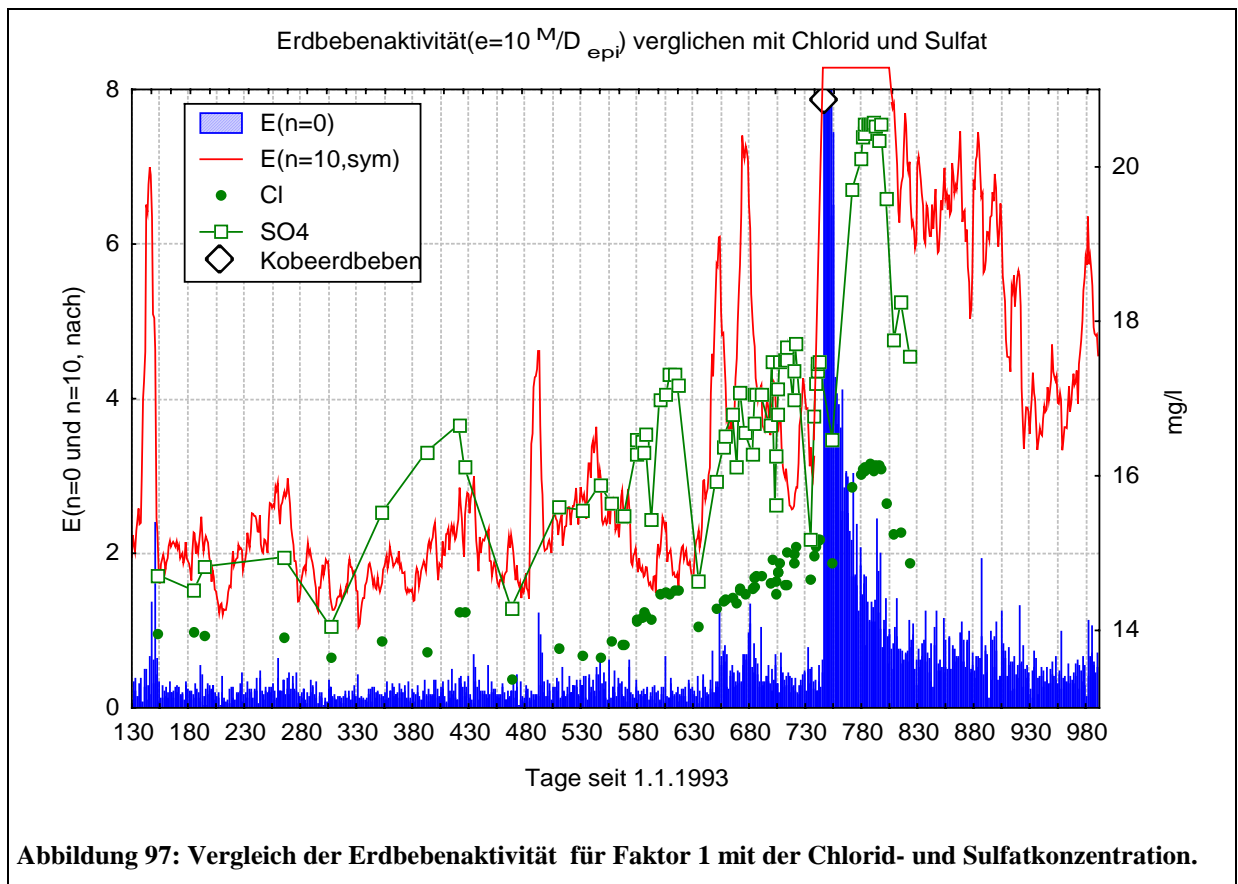
In den Veröffentlichungen von TSUNOGAI & WAKITA (1995, 1996) sind weitere potentielle Vorläufersignale des Kobeerdbebens von anderen Orten dargestellt. Der Quellabfluss einer Monitoringstation in der Nähe fällt mit dem Anstieg der Chlorid- und Sulfatkonzentration Anfang Oktober (Tag 638) zusammen. Diese Quellabflüsse fallen mit Anstieg der Erdbebenaktivität.

Die Ergebnisse dieses Datensatzes bestätigen den Vorteil der Betrachtung der Gesamtseismizität unter unterschiedlichen geometrischen und energetischen Betrachtungen. Es kann gezeigt werden, dass vermeintliche Vorläufersignale großer Erdbeben auch andere tektonische Ursachen besitzen können. Dabei kann hier nicht geklärt werden, inwieweit diese Prozesse zusammenhängen.

Tabelle 27: Faktorenanalyse der Erdbebenaktivitäten für $n=0$. Es werden nur 2 Faktoren extrahiert.

	Faktor 1	Faktor 2
M	0,86	0,40
ϵ_{dobro}	0,97	0,09
10^M	0,97	0,11
M/D Hypozentrum	0,95	0,15
M/D Hypozentrum ³	0,96	0,13
$10^M/D$ Hypozentrum	0,98	0,09
$10^M/D$ Hypozentrum ³	0,98	0,09
M/D Epizentrum	0,96	0,15
M/D Epizentrum ²	0,96	0,15
$10^M/D$ Epizentrum	0,98	0,09
$10^M/D$ Epizentrum ²	0,98	0,09
1/Tiefe	0,61	0,75
$1/e^{\text{Tiefe}}$	-0,09	0,92
M/Tiefe	0,62	0,75
$10^M/Tiefe$	0,95	0,23
$10^M/Tiefe^3$	0,00	0,81
Erklärte Varianz	11,76	2,98
Proportional zur Gesamtvarianz	0,74	0,19

11 Potentielles Vorläufersignal des Kobe-Erdbebens



12 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

Es können mehrere Ergebnisse kurz festgehalten werden:

- a) Alle 5 in dieser Arbeit untersuchten Datensätze (Kapiteln 9 bis 11) sind sensibel für Seismik induzierende Tektonik.
- b) Mit den beiden in Kapitel 4 vorgestellten Analyseansätzen (Zusammenhangsanalyse mit regressiven Methoden und Signaldefinitionen) können jeweils an mindestens 2 Monitoringstationen Zusammenhänge zwischen Erdbebenaktivität und Monitoringparametern identifiziert werden.
- c) Der Ansatz der Erdbebenaktivitäten $E_{n, \text{Typ}}$ ist geeignet, um Zusammenhänge zwischen Erdbeben bezogenen tektonischen Prozessen und (Signalen in) Monitoringzeitreihen zu untersuchen.
- d) Der lineare Ansatz in der Zusammenhangsanalyse führt bereits zu guten Ergebnissen. Damit gibt es ein weiteres Potential für das Finden besserer Zusammenhänge mit Hilfe nicht linearer Methoden oder durch die Einführung weiterer e-Parameter, die an der lokalen Tektonik ausgerichtet sind.
- e) Mit der Methode der Erdbebenaktivitäten können historische, potentielle Erdbeben bezogene Signale überprüft werden.

Am Beispiel der zwei Multiparameter-Datensätze aus der Vrancea-Zone wurden die berechneten Erdbebenaktivitäten durch mehrere Variablen mit Hilfe der **Multiplen Regression** geschätzt. Dabei wurden sowohl präseismische als auch postseismische Zusammenhänge gefunden. Für beide Zusammenhänge wurden Korrelationen zwischen geschätzter und beobachteter Erdbebenaktivität von $r > 0,8$ ermittelt. Es konnte auch gezeigt werden, dass sich präseismische und postseismische tektonische Effekte in der Zusammensetzung des Wassers überlagern. Zudem konnte ein Bezug der Faktoren zur räumlichen Verteilung der Erdbebenaktivität hergestellt werden (Entfernung und Tiefe). Die Verteilung der b-Koeffizienten in den Multiplen Regressionen zeigten, dass die Betrachtung mehrerer Faktoren Aspekte der räumlichen Verteilung der Tektonik auflösen kann. Auf dieser Basis ist es möglich Mischungsmodelle aufzustellen, welche den Einfluss der Tektonik auf die Zusammensetzung des Wassers qualitativ nachvollziehen können. Aber auch für einzelne Faktoren (bzw. Variablen) konnten hohe univariate Korrelationen mit $r > 0,8$ identifiziert werden.

Die Ergebnisse der Vrancea-Zone lassen vermuten, dass es prinzipiell möglich ist, unter günstigen Bedingungen die hier definierten Erdbebenaktivitäten über einen bestimmten Zeitraum auch für den präseismischen Fall zu schätzen. Es muss angemerkt werden, dass das nicht heißt, dass einzelne seismische Ereignisse vorhergesagt werden können. Bei den Ergebnissen der Vrancea-Zone ist zu beachten, dass im beobachteten Zeitraum die Spanne der registrierten Erdbeben zwischen Magnitude 3 und 5,5 lag. Es ist nicht klar wie das System bei Erdbeben mit höherer Energie reagiert. In die Analysen der beiden Datensätze KSM-Station und Kamchatka flossen größere Erdbeben ein. Für sie wurden keine hohen Korrelationen ($r > 0,7$) mit den linearen Ansätzen gefunden. An Beispielen wurde für die Vranceadatensätze gezeigt, dass es sich bei den gefundenen Korrelationen für hohe n nicht um Scheinkorrelationen handelt. Die Verteilungen der Erdbebenaktivitäten zeigen für die Vrancea-Zone keine einzelnen großen Ausreißer in den Erdbebenaktivitäten für $n > 30$.

Für einen univariaten Datensatz (Japan, Kapitel 9) konnten ebenfalls Zusammenhänge ($r = 0,58$) gefunden werden. Dabei konnte der Verdacht einer Scheinkorrelation nicht ausgeräumt werden. Als Untersuchungsmittel diente die Kreuzkorrelation.

Signaldefinitionen können bei der Suche nach der tektonischen Komponente im Anteil der Varianz einer Monitoringzeitreihe nützlich sein. Für zwei Monitoringzeitreihen (Japan: Radon, Kamchatka: Chlorid) wurden über besonders starke Änderungen in der Konzentration Signale definiert. Diese Signale wurden mit den Erdbebenaktivitäten verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass viele Signale mit erhöhter Erdbebenaktivität zusammenfallen. Das besondere ist die Tatsache, dass für Zeiträume ohne große Erdbeben (Magnitude > 6), aber mit erhöhter Erdbebenaktivität, verursacht durch viele kleinere Ereignisse, Signale in den Monitoringzeitreihen identifiziert werden können. Damit konnten

bisherige Meinungen widerlegt werden, nach denen nur Signale für große Ereignisse durch die tektonisch bedingte Verformung des Gesteins erzeugt werden können.

Am Beispiel eines viel zitierten Vorläufersignals in der Literatur (Kobeerdbeben) wurde exemplarisch gezeigt, dass der Verlauf einer „Anomalie“ für ein großes Erdbeben auch mit der Erdbebenaktivität vor diesem großen Erdbeben in Zusammenhang gebracht werden kann. Der Kobedatensatz zeigt, dass die hydrochemischen Monitoringparameter sehr gut die Variabilität der tektonischen Aktivität im Vorfeld des Kobeerdbebens nachvollziehen. Dieses Ergebnis besitzt Relevanz für die Interpretation von potentiellen Signalen in Zusammenhang mit einzelnen Erdbeben in der bisherigen Literatur. Es stellt die bisherige Form der Interpretation, ein Signal-ein Erdbeben, für bisherige Beobachtungen in Frage. Hier zeigt sich der Vorteil einer versuchten ganzheitlichen Betrachtung, gegenüber der bisherigen Vorgehensweise, der Suche nach Vorläufersignalen großer Ereignisse (versuchte ganzheitliche Betrachtung: es wird versucht möglichst viele Informationen in die Analysen einzubeziehen). Das Beispiel des Kobeerdbebens zeigt, dass die in der Literatur angeführten Erdbeben bezogenen Signale nicht unbedingt einzelnen herausragenden Erdbebenereignissen zuzuordnen sind, sondern unter Umständen im Zusammenhang mit dem gesamttektonischen Prozess gesehen werden müssen.

Schlussfolgerungen

Es kann gezeigt werden, dass es sich bei der durch Tektonik erzeugten Varianz von Monitoringparametern nicht um zeitlich begrenzte bzw. punktuell auftretende Anomalien handelt, sondern um eine reguläre Komponente der Varianz erzeugenden Faktoren (vergleiche Abbildung 2). Dies wurde durch Betrachtung der seismischen Aktivität in Form einer Funktion möglich und nicht durch Analyse einzelner Erdbeben.

Die Ergebnisse sind trotz Vernachlässigung der aseismischen Komponente signifikant.

Die Methodik eignet sich, um bestehende Datenbestände von Monitoringzeitreihen auf ihre Sensibilität bezüglich der Seismik induzierenden Tektonik zu untersuchen. Sie eignet sich als Entscheidungskriterium, inwiefern ein weiteres Monitoring sinnvoll ist, um Erdbeben bezogene Signale zu untersuchen und welche Parameter besonders günstig für die Untersuchung sind.

Bestehende Messstationen können auf Basis der Untersuchung in ein Monitoringnetzwerk aufgenommen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass jede Station individuell bezüglich der Erdbebenaktivität geeicht werden muss.

Das Potential der versuchten ganzheitlichen Betrachtung ist mit der hier vorgestellten Methodik nicht ausgeschöpft, da nur lineare und binäre Zusammenhänge betrachtet wurden (binäres Signal: ja oder nein). Die Möglichkeiten der Mustererkennung, wie sie in der statistischen Nachrichtentechnik angewandt werden, könnten zu noch besseren Ergebnissen führen. (Bsp.: Identifizierung komplexer Signale in der Radioastronomie). Zudem könnten e-Transformationen an die gegebene lokale Tektonik angepasst werden (Beispiel: Störungszonen wie das anatolische Verwerfungssystem besitzen eine charakteristische Geometrie).

Der Mischungsansatz (Vranceadatensätze, Kobedatensatz und Kamchatka) ist eine Ergänzung zu anderen Ansätzen in der Erdbebenforschung, wie die Beobachtung des Spannungsfeldes, der Erdbebenstatistik und den geodätischen Beobachtungen. Eine sinnvolle Erdbebenstrategie sollte ein paralleles Monitoring der unterschiedlichen Disziplinen beinhalten und die Informationen aus diesen in einem Modell verknüpfen.

Der weitere Vorteil der hier angewandten Methodik ist, dass bereits an vielen Orten Monitoringstationen bestehen. Ohne große zusätzliche Kosten und ohne großen Aufwand könnten diese Daten in ein Modell integriert werden (nachdem die Sensibilität auf Seismik induzierende Tektonik festgestellt wurde). Ein Monitoringnetz könnte Abschätzungen verbessern.

Der Vergleich der Erdbeben bezogenen Signale aus der Literatur (bezüglich einzelner Erdbeben) mit dem Ansatz der Erdbebenaktivitäten zeigt, dass die Erdbebenaktivität nicht kompatibel mit den Ergebnissen aus der Literaturstudie in Kapitel 3 ist. Das bedeutet nicht einen Widerspruch, da bei der

12 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

Methode der Erdbebenaktivitäten nicht ein Cluster oder ein Erdbebenereignis untersucht wird, sondern der gesamte Umkreis unter Berücksichtigung der Geometrie und der Energie der Erdbebenverteilung.

Wenn der Ansatz der Erdbebenaktivitäten äquivalent mit den Verteilungen einzelner Charakteristika der Signale in der Literaturstudie wäre (Bsp.: Entfernung-Magnitude), dann müssten viele kleinere Erdbeben summiert zu einer hohen Aktivität auch eine größere potentielle Entfernung der Signale ermöglichen. Die Verteilungen der Zusammenhänge in Kapitel 3 bestätigen einen solchen Effekt nicht.

13 Anhang

13.1 Daten Vrancea

13.1.1 Rohdaten Turia

Tabelle 28: Chemische Daten der Bohrung Turia. Die Variablen Na bis SO₄ sind in ppm, die übrigen chemischen Spezies (Ausnahme Isotope) in ppb gemessen. Die Isotopen wurden nach folgenden Standards in ‰ angegeben: δ¹⁸O nach dem SMOW-Standard, δ¹³C nach dem PDB, δ³⁴S nach dem CDT. Die Temperatur wurde in °C und die Leitfähigkeit LF in mS/cm gemessen.

	ZEIT	Na	K	Mg	Ca	Fe	F	Cl	Br	SO ₄	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Rb	Sr	Y	Cs	Ba	La	Pb	δ ¹⁸ O _{H₂O}	δ ¹³ C _{HCO₃}	δ ¹⁸ O _{HCO₃}	δ ³⁴ S _{Sulfat}	T°C	pH	LF
1	1997-08-13	2500	168	88	258		2,43	2870	13,5	293	38,1	2,31	3395	0,99	5,08	2,07	5,39	0,24	18,77	995	4700		656	124		0,11	-8,75	6,50	28,2		17,1	6,29	11,45
2	1997-09-06	1920	162	86	254	90	8,38	2530	12	344	42,9	9,95	3410	1,32	43,90	4,65	5,14	0,51	18,07	1050	5040		679	164		0,25	-10,62	4,34	32,9	1,52	16,1	6,14	10,51
3	1997-09-21	1920	166	86	246	90	7,28	2610	12,8	336	43,3	2,83	3520	1,05	6,63	4,83	12,38	0,48	18,96	1070	5220		704	177		0,20	-9,73	3,68	32,9	1,52	15,3	6,26	11,56
4	1997-10-04	1880	166	86	246	90	7,52	2610	12,9	343	42,3	2,96	3210	1,08	5,72	3,34	15,43	0,29	21,80	1040	5100		686	218		<0,1	-9,71	3,46	33,2	-0,57	15,8	6,21	9,20
5	1997-10-18	2000	170	86	250	90	7,67	3030	13,3	328	41,0	3,33	3280	1,05	6,17	3,61	3,50	0,25	22,44	1100	5400		714	241		<0,1	-8,54	1,93	30,3	-0,55	15,0	6,25	10,98
6	1997-11-02	2040	172	86	258	90	7,64	2720	13,7	328	49,6	5,72	3910	0,73	4,40	<3	3,61	0,38	6,70	1111	6016	15,6	663	252	2,35	0,18	-10,51	2,46	32,9	-0,05	15,8	6,25	11,08
7	1997-11-16	1960	168	88	250	89	7,86	2600	13,1	313	64,0	7,81	3734	0,75	4,15	3,56	9,68	0,44	19,11	1076	5935	15,6	647	252	2,20	0,14	-8,84	-0,62	22,9	0,38	13,3	6,31	11,41
8	1997-11-30	1960	178	88	250	89	8,01	2645	13,4	307	29,8	5,42	3608	0,73	4,24	5,03	43,32	<0,3	13,27	1115	6031	15,2	684	263	2,38	0,16	-9,15	3,14	33,0	0,34	14,5	6,46	11,17
9	1997-12-13	1960	178	88	254	90	8,79	2690	13,7	311	29,8	7,77	3803	0,74	4,86	4,90	20,77	<0,3	11,88	1108	6078	15,6	676	277	2,28	0,09	-8,81	3,64	31,1	-1,05	14,8	6,57	11,93
10	1998-01-11	1960	166	88	251	90	10,4	2660	13,9	313	29,7	10,35	3980	0,64	3,79	5,05	10,76	<0,3	11,22	1184	6515	17,0	694	295	2,58	0,16	-8,90	0,42	32,4	-0,45	12,5	6,31	11,18
11	1998-01-24	2000	192	90	258	90	8,3	2590	14	327	42,5	18,12	3840	0,81	3,96	<3	16,57	0,38	11,78	1127	6286	16,1	688	282	2,54	0,37	-8,80	0,64	32,6	-0,39	14,6	6,84	12,10
12	1998-02-08	2000	212	88	258	90	9,65	2650	14,1	307	28,5	3,99	3892	1,54	7,03	2,71	4,99	0,44	18,23	1122	5972	17,8	702	310	2,54	4,55	-8,87	1,35		0,21	14,4	6,29	11,62
13	1998-02-22	2050	172	92	271	19	8,28	2780	15,3	423	23,3	3,18	3939	1,36	6,31	2,30	8,77	0,53	14,75	1125	5963	16,2	728	355	2,31	2,78	-8,96	-0,07	34,0		16,1	6,59	11,25
14	1998-03-08	2100	176	94	269	84	8,5	2830	15,5	298	29,1	3,00	3943	1,37	6,59	5,15	4,83	0,43	20,99	1109	5944	18,5	710	382	2,44	1,81	-8,74	-0,42	32,9		15,1	6,27	12,12
15	1998-03-22	2100	176	94	269	81	9,23	2790	15,8	301	27,4	2,35	4218	1,77	8,48	2,46	5,63	0,44	28,92	1694	10168	17,2	1095	427	1,89	1,27	-8,70	-0,50	32,4		14,3	6,34	11,84
16	1998-04-04	3250	256	110	361	69	11,7	4470	17,9	209	19,9	2,35	4330	1,21	5,57	2,10	4,12	0,38	14,29	1024	5274	19,7	635	175	2,74	1,00	-7,14	0,36	34,2		16,8	6,50	11,79
17	1998-04-19	1850	152	88	262	86	7,52	2210	12,7	303	20,2	2,76	4218	1,13	6,32	2,76	2,94	0,45	15,28	1007	5213	18,8	634	174	2,68	1,32	-9,22	-0,10	33,8		14,2	6,31	9,60
18	1998-05-01	1850	156	88	260	85	8,25	2470	13,1	303	16,9	3,01	4380	1,12	7,19	2,77	4,23	0,30	11,50	948	4730	18,5	578	138	2,32	0,99	-9,17	3,07	31,9		14,7	6,32	10,43
19	1998-05-17	1700	142	86	258	90	7,71	2020	12,1	338	31,1	2,33	3693	1,16	8,34	1,50	<6,0	<0,5	11,30	974	5045		610	133	2,13	<0,5	-8,99	-0,01	32,9		12,8	6,37	12,80
20	1998-05-31	1800	164	100	236	88	8,9	2450	11,8	348	22,9	1,64	3316	1,31	10,67	2,17	<6,0	<0,5	7,26	906	5043		658	180	2,66	0,64	-8,91	-0,24	32,3	1,80	15,8	6,11	9,60
21	1998-06-14	1800	153	100	241	88	9	2670	12,1	344	21,7	1,90	3292	1,24	11,93	2,25	<6,0	<0,5	7,57	942	5294		690	251	2,43	<0,5	-9,15	4,29	32,1	1,65	15,8	6,12	10,11
22	1998-06-28	1960	166	105	247	84	9,5	2930	12,7	338	21,0	1,73	3107	1,20	9,20	2,97	<6,0	<0,5	8,39	930	5048		703	261	2,68	0,53	-9,13	0,29	32,8	1,65	16,8	6,17	10,30
23	1998-07-11	1960	167	105	249	82	9,8	2920	13,5	334	21,8	2,29	2922	1,38	7,99	2,56	<6,0	<0,5	7,20	890	4641		671	265	2,70	<0,5	-8,70	-0,34	32,9	1,64	15,0	6,36	10,55
24	1998-07-26	1960	170	105	244	84	9,9	2920	14	338	21,9	4,13	2867	1,51	7,25	2,58	<6,0	<0,5	8,12	899	4654		664	263	2,53	0,63	-8,96	-1,58	34,7	1,54	16,3	6,14	10,58
25	1998-08-09	2000	173	105	249	84	10,2	3010	14,1	322	20,1	1,90	3960	1,15	13,03	2,36	7,11	0,21	16,93	932	4901	15,8	713	352	2,35	<0,2	-8,82	-0,84	32,2	1,93	16,2	6,17	10,88
26	1998-08-23	2000	178	96	260	54	8,3	2790	14,5	285	16,6	2,29	3930	1,35	9,76	3,01	9,29	0,38	15,87	960	5233	14,7	711	378	2,22	<0,2	-9,22	1,45	32,8	0,30	16,3	6,34	11,38
27	1998-09-09	2000	172	94	259	53	8,7	2700	13,9	301	20,0	2,85	3686	1,51	9,90	2,99	5,83	0,43	17,35	981	5537	15,7	750	544	2,74	<0,2	-9,21	0,37	34,3	-0,10	16,4	6,34	11,31
28	1998-09-20	2100	190	98	271	52	10,1	2980	16,1	291	20,6	7,94	3961	1,40	8,76	3,70	6,96	0,40	15,58	996	5398	16,1	786	447	2,51	<0,2	-8,94	0,74	34,4	-0,10	14,2	6,41	12,28
29	1998-10-03	2100	182	98	272	52	9,3	3000	16,6	288	18,5	4,48	3771	1,48	7,83	2,05	3,57	0,38	19,06	992	5556	15,7	770	491	2,48	<0,2	-8,95	1,71		-0,10	14,2	6,21	12,53

30	1998-10-18	2100	186	98	272	53	9,3	2920	15,9	285	18,7	3,17	3796	1,42	13,67	2,97	11,21	0,46	16,31	1071	5971	15,5	814	568	2,49	<0,2	-8,95	1,59			-0,50	16,5	6,27	12,19	
31	1998-10-31	2100	186	98	67	52	8,9	2850	15,3	284	24,1	2,44	4613	1,04	9,44	3,95	2,87	<0,3	18,84	1029	6275	13,4	674	420	1,92	0,78	-9,04	2,01			-0,10	13,2	6,15	12,15	
32	1998-11-15	2100	138	88	276	44	8,9	2830	12,3	287	21,8	2,15	4046	1,12	5,90	4,18	3,83	0,52	15,85	989	6282	17,8	636	394	2,61	0,43	-8,75	0,86			-0,60	13,1	6,25	11,72	
33	1998-11-28	2100	182	92	271	45	9,2	2840	14,1	297	24,1	1,87	4047	0,84	5,77	3,96	5,01	<0,3	14,18	1046	6437	15,7	677	316	2,23	0,67	-9,08	4,04	32,9	0,10	14,0	6,15	11,00		
34	1998-12-13	2100	180	92	271	45	7,6	2820	13,4	299	24,2	2,19	4171	1,13	8,54	3,98	2,17	<0,3	15,64	1025	6230	9,4	684	356	0,64	0,18	-9,12	4,54	33,4		14,0	6,02	11,37		
35	1998-12-27	2050	176	90	265	45	8,7	2690	13,6	315	23,0	1,71	4596	0,84	4,44	2,48	1,02	<0,3	8,81	1109	6488	13,1	741	384	2,12	<0,1	-9,15	9,30			-0,30	13,2	6,01	11,49	
36	1999-01-09	2050	178	92	264	45	9,4	2760	13,7	302	24,8	2,42	4261	1,04	6,18	3,39	3,24	<0,3	8,65	1115	6573	12,7	849	403	2,04	<0,1	-9,21	8,82			0,10	13,5	6,09	11,58	
37	1999-01-24	2100	198	92	265	45	8,3	2820	13,7	301	21,5	1,82	4129	0,89	5,43	3,52	4,37	<0,3	19,16	1016	6266	15,8	673	369	2,45	<0,1	-9,16	2,65			0,00	14,6	6,37	11,62	
38	1999-02-06	2100	178	92	270	45	8,7	2770	14	302	23,0	1,74	4082	0,82	4,82	1,80	7,81	<0,3	15,02	1003	6272	16,1	648	348	1,70	<0,1	-9,17	3,47	33,1	0,10	14,2	6,21	10,63		
39	1999-02-20	2050	180	92	271	44	9	2820	14,2	305	21,6	2,43	3897	1,00	5,81	2,01	<1,3	0,67	22,34	883	6666	17,8	711	399	2,77	<0,5	-9,10	7,80			0,30	14,4	6,18	11,92	
40	1999-03-07	2100	178	92	277	45	7,8	2960	11,4	299	23,2	2,07	3909	0,78	4,73	3,09	<1,3	0,27	34,82	968	6417	19,7	744	384	2,99	<0,5	-8,97	6,76				14,2	6,33	11,28	
41	1999-03-20	2100	176	92	268	44	9,6	3290	12,1	291	23,3	2,09	3877	0,79	4,57	1,79	<1,3	<0,3	23,97	1022	6213	18,0	672	359	2,87	<0,5	-8,92	6,79				14,3	6,27	10,24	
42	1999-04-03	2000	170	90	259	45	8,2	3160	11,7	313	20,0	1,90	3945	1,01	6,39	4,01	<1,3	0,30	12,72	1060	6153	18,2	693	350	2,70	<0,5	-8,71	6,80				14,8	6,13	11,43	
43	1999-04-17	2000	170	90	258	46	8,7	3090	11,1	299	18,2	1,67	3881	0,73	4,23	1,67	<1,3	<0,3	25,41	893	4885	16,4	529	114	2,77	<0,5	-9,08	6,49				14,5	6,33	11,33	
44	1999-05-02	1700	150	84	255	46	7,7	2270	5,5	329	17,6	1,85	3840	0,57	3,37	2,04	<1,3	<0,3	18,77	866	4703	17,7	526	119	3,07	<0,5	-9,68	6,39				15,4	6,19	9,96	
45	1999-05-16	1700	148	84	249	49	7,9	2570	9,9	325	24,5	2,28	4006	0,76	4,52	1,87	<1,3	<0,3	14,09	840	5092	20,3	585	152	3,48	<0,5	-9,64	6,47				14,9	6,08	9,39	
46	1999-05-29	1700	148	84	249	48	7,8	2670	9,9	326	20,7	3,57	4074	0,89	5,16	2,39	<1,3	0,35	29,22	730	4784	20,9	552	125	3,26	<0,5	-9,60	6,03				16,0	6,08	9,85	
47	1999-06-12	1650	140	82	244	50	7,1	2100	9,3	326	16,2	1,70	4076	0,59	3,92	1,01	7,24	0,34	11,74	890	4761	18,4	549	119	2,98	0,17	-9,71	6,19				17,0	6,10	9,36	
48	1999-06-26	1700	152	86	244	41,5	7,22	2190	10,7	354	14,2	1,85	3939	0,59	4,25	1,74	10,53	0,39	17,71	884	4805	18,4	556	125	3,13	0,23	-9,79					15,8	6,12	9,58	
49	1999-07-11	1750	156	86	246	47	7,16	2100	9,79	339	15,0	1,71	4222	0,59	3,98	1,50	6,88	0,42	18,97	911	5109	18,3	564	150	3,12	0,23	-9,69					15,7	6,12	9,64	
50	1999-07-24	1700	158	86	244	46	7,74	2330	9,49	341	14,8	1,70	3940	0,61	4,23	1,37	8,35	0,45	20,14	912	4945	18,9	580	140	3,25	0,32	-9,67					16,8	6,19	9,79	
51	1999-08-08	1750	158	88	246	46	7,92	2230	10,1	346	15,7	1,73	4055	0,56	3,49	1,65	4,84	0,32	9,59	948	5138	18,4	590	154	3,14	0,43	-9,68					16,3	6,10	9,76	
52	1999-08-21	1700	158	88	246	46	7,02	2330	9,98	340																		-9,59					17,0	6,40	9,77

Tabelle 29: Faktorwerte der Faktorenanalyse der Bohrung Turia:

	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor	Faktor
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,10	2,75	-0,31	-1,08	-1,02	-1,75	-1,03	1,78
2	-0,90	1,46	-0,66	5,08	-0,29	-1,49	0,45	0,16
3	-0,49	1,63	0,18	0,68	-0,21	-0,90	0,43	0,33
4	-0,71	1,73	0,28	-0,06	-0,76	-0,25	0,08	1,28
5	0,32	1,98	0,18	-0,16	-0,24	-0,35	-0,39	0,40
6	-0,51	1,33	0,20	-0,27	-0,16	-0,45	0,43	0,30
7	0,00	2,06	-0,18	0,01	0,35	-0,66	1,09	-1,07
8	-0,27	0,66	0,66	-1,08	-1,86	0,81	2,70	0,11
9	0,15	0,56	0,20	-0,62	-1,09	0,63	2,17	-0,67
10	-0,21	0,22	0,11	-0,27	-0,40	0,99	1,71	-2,03
11	0,15	0,21	-0,20	-0,67	0,52	0,05	4,02	-0,23
12	0,36	0,74	-0,11	-0,22	3,90	-0,37	-0,45	-1,09
13	-0,74	-1,05	1,17	-0,87	2,56	-0,03	0,73	1,36
14	0,58	0,60	0,40	0,62	1,52	-0,32	-0,13	-0,50
15	-0,35	0,37	4,67	-0,99	1,56	-1,04	-0,67	0,89
16	5,33	-0,08	-1,70	-0,73	0,89	0,01	0,16	0,97
17	-0,67	0,26	-0,64	-0,35	1,83	-0,14	-0,20	-0,57
18	-0,22	0,22	-1,05	-0,30	0,98	0,33	-0,24	-1,03
19	-0,93	1,13	-0,38	-0,55	0,99	0,74	-0,10	-1,16
20	-0,68	0,62	-0,43	0,04	0,57	2,02	-1,03	0,76
21	-0,64	0,45	0,08	0,39	-0,41	1,64	-1,05	0,86
22	-0,05	0,30	-0,15	0,40	-0,13	2,01	-0,74	1,39
23	0,23	0,22	-0,49	0,24	0,14	2,43	-0,24	0,91
24	0,09	0,44	-0,39	0,60	0,35	2,50	-0,61	1,14
25	0,42	-0,40	-0,10	0,72	-0,19	1,61	-0,44	0,46
26	0,36	-0,83	0,29	0,74	-0,27	0,25	0,20	0,66
27	-0,01	-1,29	0,72	1,18	-0,03	0,12	0,40	1,14
28	0,82	-1,42	0,28	1,36	0,00	0,43	1,33	-0,37
29	0,78	-1,19	0,66	1,02	-0,02	0,18	0,04	0,12
30	0,57	-1,45	1,28	1,40	-0,46	0,11	0,58	1,21
31	0,09	-0,29	0,15	1,03	0,16	0,90	-1,13	-3,59
32	0,08	-0,94	0,02	0,51	0,53	-0,54	0,14	-1,02
33	0,44	-0,15	0,35	-0,42	-0,60	0,15	-0,54	-0,96
34	0,35	0,77	1,00	0,01	-1,10	0,07	-1,69	-1,30
35	-0,04	-0,56	1,02	-0,80	-1,18	-0,09	-1,11	-1,32
36	0,04	-0,50	1,48	-0,23	-1,47	0,19	-0,82	-0,90
37	0,63	-0,57	0,27	-0,39	-0,69	-0,23	0,13	-0,49
38	0,25	-0,28	0,52	-1,00	-0,90	0,36	-0,47	-0,42
39	0,38	-1,52	0,29	0,84	0,14	-1,59	-0,05	0,21
40	0,69	-0,64	0,28	-0,09	-0,66	-1,95	-0,25	0,14
41	0,82	-0,67	-0,05	-0,62	-0,83	-0,67	-0,54	-0,02
42	0,31	-0,40	0,34	0,03	-0,74	-0,39	-0,72	-0,22
43	0,80	-0,23	-1,50	-0,60	-0,36	-0,77	-0,50	-0,57
44	-0,98	-0,39	-1,47	-0,85	-0,55	-0,60	-0,52	-0,16
45	-0,82	-0,38	-1,20	-0,52	-0,53	-0,36	-0,68	-0,20
46	-0,52	-0,65	-1,62	0,56	-0,01	-1,56	-0,50	0,04
47	-1,43	-0,68	-1,00	-0,95	-0,37	-0,44	-0,27	0,72
48	-1,39	-1,01	-0,91	-0,61	-0,01	-0,36	0,20	0,64
49	-1,25	-1,03	-0,88	-0,68	0,27	-0,73	0,00	0,34
50	-1,12	-1,15	-0,92	-0,54	0,26	-0,71	0,28	1,06
51	-1,23	-0,95	-0,73	-0,95	0,04	0,21	-0,15	0,50

13.1.2 Rohdaten Covasna

Tabelle 30: Chemische Daten der Bohrung Covasna. Die Variablen Na bis SO₄ sind in ppm, die übrigen chemischen Spezies (Ausnahme Isotope) in ppb gemessen. Die Isotopen wurden nach folgenden Standards in ‰ angegeben: δ¹⁸O nach dem SMOW-Standard, δ¹³C nach dem PDB, δ³⁴S nach dem CDT. Die Temperatur wurde in °C und die Leitfähigkeit LF in mS/cm gemessen.

	ZEIT	Na	K	Mg	Ca	Fe	F	Cl	Br	SO ₄	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Rb	Sr	Y	Cs	Ba	La	Pb	δ ¹⁸ O _{H2O}	δ ¹³ C _{HCO₃}	δ ¹⁸ O _{HCO₃}	δ ³⁴ S _{Sulfat}	T°C	pH	LF	
1	1997-08-13	4000	130	66	180	3,7	6,26	1470	5,21	13,1																	-3,33	16,06	36,11		13,2	6,5	9,46	
2	1997-09-06	2400	132	64	202	9,5	6,44	1420	6,6	13,1	4,94	1,98	885	0,76	4,31	4,81	5,67	0,24	16,07	224	453		4	3340		0,16	-4,76	8,31	38,28	17,84	11,2	6,49	9,96	
3	1997-09-21	2400	132	64	201	9,5	6,41	1550	6,62	12,9	6,71	3,58	911	0,91	6,75	4,39	4,16	0,32	17,11	224	459		1,1	3460		0,14	-3,58	8,15	38,02	18,92	10,7	6,41	9,4	
4	1997-10-04	2400	132	64	201	9,5	6,55	1580	6,73	12,8	6,30	3,45	903	0,75	5,86	4,14	6,96	0,20	16,56	229	445		0,1	3600		0,10	-4,62	7,82	38,13	18,87	9,5	6,4	9,15	
5	1997-10-18	2400	132	64	200	9,5	6,41	1630	6,7	12,5	6,56	3,91	935	0,82	4,82	5,45	7,88	0,29	17,16	231	461		0,9	3560		0,15	-4,37	7,79	38,64	19,31	9,4	6,46	9,9	
6	1997-11-02	2520	134	64	203	9,25	6,49	1630	6,7	13,1	6,58	3,45	903	0,77	5,10	6,09	5,65	0,19	17,11	232	450		0,3	3660		0,40	-3,22	7,47	38,56	19,92	10,4	6,44	9,72	
7	1997-11-16	2400	136	66	190	9,25	6,55	1480	6,64	13,6	9,82	3,11	1000	0,56	3,62	4,89	1,94	<0,3	8,38	220	474	2,98	1,47	3990	0,10	0,11	-3,37	8,76	38,89	20,41	9	6,46	10,55	
8	1997-11-30	2360	128	66	188	9,5	6,22	1470	6,43	13,9	11,67	4,30	954	0,55	3,09	4,72	4,55	<0,3	6,96	216	473	2,86	1,74	3829	0,11	0,18	-3,45	8,19	36,90	19,72	11	6,69	10,36	
9	1997-12-13	2400	130	66	188	8,75	6	1450	6,31	12,9	10,26	5,00	1002	0,47	3,59	6,15	3,43	<0,3	4,76	221	488	2,77	1,31	4118	0,12	0,12	-3,54	8,18	38,62	19,35	8,3	6,6	10,61	
10	1998-01-11	2360	128	66	188	8,75	6,43	1470	6,43	14,9	10,22	7,43	1023	0,49	3,01	5,01	6,23	<0,3	8,32	223	482	2,99	1,18	4069	0,07	0,19	-3,39	3,80	32,67	19,29	8,2	6,58	10,26	
11	1998-01-24	2440	128	66	187	8,75	6,2	1470	6,54	14,3	9,09	8,27	1006	0,45	3,10	4,71	5,11	<0,3	3,86	224	475	2,9	1,16	4100	0,07	0,20	-3,61	6,09	38,73	20,36	7,5	6,64	10,93	
12	1998-02-08	2440	128	68	185	3,25	6,71	1490	6,61	14,3	13,00	34,87	987	0,54	2,75	4,83	1,03	<0,3	4,09	223	469	0,99	1,28	4097	0,18	0,34	-3,55	7,00		20,31	8,3	6,58	10,76	
13	1998-02-22	2450	130	68	271	20,25	5,96	1530	6,92	13,1	5,30	4,21	1060	0,89	3,70	5,37	5,96	0,27	8,23	239	487	1,37	2,1	4162	0,18	2,46	-3,47	5,90	40,11		9,6	6,57	10,33	
14	1998-03-08	2450	130	66	178	*7,8	5,96	1580	6,69	12,6	6,75	1,51	1054	1,09	4,41	4,62	7,61	0,35	12,80	232	467	2,59	2,15	4283	0,20	1,72	-3,45	6,40	37,96		9,1	6,58	10,15	
15	1998-03-22	2450	130	66	171	*3,8	5,92	1520	6,74	12,5	5,09	11,42	1079	0,85	4,44	5,25	2,66	0,29	7,17	239	484	0,78	1,95	4277	0,32	13,06	-3,57	5,80	38,51		7,1	6,36	10,93	
16	1998-04-04	2400	130	64	37	*3,8	6,1	1490	6,85	13,3	6,14	17,83	298	0,49	2,09	2,59	0,72	0,15	4,58	225	440	0,27	1,4	3800	0,28	21,10	-3,41	5,80	39,72		11,5	6,56	9,68	
17	1998-04-19	2400	130	68	177	8	4,88	1530	6,15	11,4	5,96	1,83	993	0,77	4,56	3,09	3,85	0,31	12,38	227	469	2,63	1,35	4172	0,14	1,31	-3,50	6,07	37,67		10,1	6,68	9,76	
18	1998-05-01	2450	128	66	176	8	6,05	1640	6,85	13,2	6,77	2,23	974	0,79	5,18	4,57	5,43	0,33	14,85	231	480	2,72	4,85	4141	0,13	1,04	-3,61	8,19	38,23		10,9	6,69	10,35	
19	1998-05-17	2450	128	66	176	3,5	5,85	1600	6,68	13,1	6,71	2,53	957	0,84	4,24	5,11	3,01	0,35	7,79	226	467	2,53	1,15	4108	0,14	0,52	-3,08	7,74	37,95		9,08	6,55	10,23	
20	1998-05-31	2440	136	75	192	0,24	8,7	1810	6	14	3,89	3,36	950	0,59	5,32	0,99	<6,0	<0,4	3,74	241	469	0,04	0,56	3804	<0,2	<0,6	-3,44	4,55	32,77	19,50	11,2	6,46	10,17	
21	1998-06-14	2520	139	85	198	6,3	8,4	1820	6,4	14,3	8,03	0,98	884	0,66	9,02	2,23	<6,0	<0,4	2,89	223	438	2,7	1,45	4132	2,05	<0,6	-3,47	8,74	37,08	19,14	11,1	6,54	9,17	
22	1998-06-28	2520	138	80	199	6,3	8,3	1820	6,4	14,2	7,55	0,73	633	0,67	6,39	2,50	<6,0	<0,4	5,99	176	349	2,85	4,86	3797	0,29	<0,6	-3,53	5,41	40,12	19,44	14,8	6,62	10,14	
23	1998-07-11	2520	135	80	200	6,4	8,1	1790	6,3	14,2	8,08	0,93	612	0,64	6,17	1,94	<6,0	<0,4	5,04	167	336	2,85	0,87	3623	0,14	<0,6	-3,61	4,68	39,08	19,17	11,5	6,64	9,76	
24	1998-07-26	2520	137	80	201	5,75	8,3	1740	6,4	15,5	6,69	1,50	552	0,86	6,21	2,89	<6,0	<0,4	5,18	163	318	2,7	0,77	3715	0,20	<0,6	-3,37	3,89	36,56	19,00	14,5	6,58	9,93	
25	1998-08-09	2560	136	70	211	0,14	8,5	1760	6,1	17	3,56	7,97	543	0,71	5,95	1,88	<6,0	<0,4	5,37	161	314	0,26	0,86	3807	0,19	<0,6	-3,72	5,34	37,78	18,70	11,9	6,52	10,5	
26	1998-08-23	2500	146	76	167	0,95	7,3	1620	7,4	14,2	14,09	46,77	14	0,63	5,60	1,95	20,38	0,17	8,32	187	342	0,18	8,4	3466	0,07	<0,2	-3,87	6,55		>	17,70	11,1	6,52	10,69
27	1998-09-09	2500	138	68	168	6,5	7,2	1560	7,1	15,5	4,68	1,73	851	1,04	6,95	2,62	2,54	0,21	9,41	206	375	1,97	2,7	4576	0,16	<0,2	-4,25	6,87	39,89	16,30	10,8	6,61	10,55	
28	1998-09-20	2500	130	68	170	6,75	6,8	1400	6,9	14,6	5,40	2,59	857	1,16	9,98	2,99	7,86	0,31	12,31	192	370	2,55	1,75	4385	0,14	0,29	-4,19	6,84	39,56	16,60	10,9	6,61	10,76	
29	1998-10-03	2500	134	70	169	6,75	6,8	1560	6,9	14,5	6,93	8,61	942	1,10	7,60	2,95	6,58	0,27	6,39	205	392	2,36	0,8	4396	0,12	<0,2	-4,19	7,28		17,90	11,1	6,6	10,44	
30	1998-10-18	2500	134	68	173	7,25	6,9	1570	7	14,2	7,47	7,91	876	1,15	7,23	2,58	13,39	0,29	12,81	210	397	2,38	2,55	4442	0,13	<0,2	-4,09	7,16		17,20	11,5	6,64	10,73	
31	1998-10-31	2500	134	68	128	7	7,1	1530	7,1	13,9	5,84	3,60	892	1,21	8,17	3,02	5,22	0,22	12,66	227	417	2,32	3,55	4754	0,13	<0,2	-3,98	6,91		17,80	9,2	6,52	10,58	
32	1998-11-15	2500	142	64	191	6,75	8,2	1680		15,4	5,14	1,11	1036	0,57	6,10	4,84	6,18	<0,3	10,83	244	486	2,68	2,51	4640	0,11	0,16	-4,24	5,88		17,10	8,1	6,5	10,15	
33	1998-11-28	2500	138	66	183	6,25	10,7	1790		16,4	5,57	1,21	985	0,46	3,30	3,24	<1	<0,3	7,30	247	486	2,79	2,74	4671	0,14	0,14		10,42	39,22	13,50	8,6	6,55	10,64	
34	1998-12-13	2500	138	66	183	5,75	7,6	1570	6,8	14,9	4,01	1,42	989	0,55	4,55	13,45	30,77	<0,3	9,20	267	527	2,38	3,37	5267	0,13	0,42	-4,16	10,72	38,21	17,60	8,5	6,42	10,56	
35	1999-12-27	2550	140	66	184	6	7,6	1560	6,8	13,7	5,70	1,21	1037	0,67	4,99	4,63	5,18	<0,3	9,56	248	494	2,09	1,08	4466	0,10	0,19	-3,92	9,98	37,76	17,80	8	6,31	10,69	
36	1999-01-09	2500	138	66	182	6	7,4	1600	6,2	14,5	4,98	1,05	922	0,52	3,07	4,89	1,10	<0,3	3,75	230	453	2,43	1,35	4205	0,13	0,07	-4,13	7,76	28,13	16,60	9	6,48	10,43	
37	1999-01-24	2500	136	66	182	6,75	7,5	1580	6,6	14	5,38	0,90	1061	0,37	3,71	3,26	0,35	<0,3	8,32	227	484	2,20	2,81	4241	0,10	<0,1	-4,23	9,46	35,44	17,10	7,6	6,78	10,47	

38	1999-02-06	2500	138	68	186	7	7,3	1570	6,7	14,4	5,77	1,47	1056	0,55	4,27	4,45	5,24	<0,3	12,35	258	536	2,65	2,38	4651	0,10	0,21	-3,99	10,00	37,67	18,70	8,3	6,6	10,48
39	1999-02-20	2500	138	66	181		7,4	1520	6,8	14,4	2,65	8,66	836	0,51	2,45	3,68	<1	<0,3	3,93	248	484	0,34	5,2	3985	0,04	<0,1	-4,06	9,49	37,63	17,40	7,8	6,53	11,14
40	1999-03-07	2550	140	66	191	6,75	9,9	1760	n.b	14,3	4,89	1,24	957	0,60	6,15	3,66	69,56	<0,3	4,68	230	463	2,69	1,85	4315	0,22	<0,5		10,67			8,9	6,65	10,38
41	1999-03-20	2550	138	66	193	6	8,4	1880	5,3	14,8	4,33	1,46	927	0,87	3,60	7,30	57,62	0,49	9,24	231	468	2,63	2,29	4330	0,44	0,58	-4,12	10,05			9,2	6,49	10,39
42	1999-04-03	2550	140	66	193	6,25	8,4	1810	5,7	13,7	3,64	0,84	922	0,47	3,15	4,08	2,76	<0,3	5,30	235	482	2,31	1,07	4418	0,15	<0,5	-4,02	10,56			9,5	6,45	10,69
43	1999-04-17	2550	138	66	193	6,25	9,1	1970	5,5	14,3	3,76	0,70	911	0,56	3,13	1,49	<1,3	<0,3	6,09	236	475	2,63	0,34	4344	0,12	<0,5	-4,08	10,58			9,6	6,69	10,4
44	1999-05-02	2550	140	66	193	6,25	8,1	1820	6	14	3,49	1,09	930	0,34	2,70	1,72	<1,3	<0,3	5,90	234	476	2,33	3,61	4312	0,14	<0,5	-4,05	10,08			11,9	6,53	9,97
45	1999-05-16	2600	140	66	193	6,25	9,8	1820		14,7	5,38	1,74	932	0,42	3,35	1,04	<1,3	<0,3	6,89	241	487	2,63	1,87	4377	0,09	<0,5		10,27			10,31	6,51	10,81
46	1999-05-29	2600	140	66	193	6,25	8,4	1850	6	14,6	4,52	2,17	919	0,67	4,79	4,88	134,73	<0,3	9,17	230	465	2,74	4,09	4329	0,25	<0,5	-4,03	10,21			11,3	6,57	10,64
47	1999-06-12	2550	140	66	197	6,75	8,6	1850	6,5	14,3	4,80	1,48	965	0,66	4,91	4,19	60,48	<0,3	14,42	238	477	2,71	2,21	4451	0,20	<0,5	-3,99	9,57			12,2	6,6	10,7
48	1999-06-26	2450	140	68	182	2,45	8,05	1660	6,32	14,5	2,35	4,38	985	0,33	2,66	1,60	11,45	<0,2	5,24	228	449	0,14	0,9	4233	0,11	<0,3	-4,14				10,9	6,54	10,32
49	1999-07-11	2450	146	68	180	6	7,25	1630	4,79	14,7	6,87	1,48	1228	0,54	3,19	1,82	25,35	0,28	8,41	217	466	3,14	2,6	4070	0,35	0,41	-4,13				11,3	6,55	10,4
50	1999-07-24	2450	154	68	180	6	6,48	1760	6,09	14,9	5,35	1,33	960	0,41	3,03	1,92	48,95	0,29	11,77	215	464	3,06	1,2	4034	0,29	0,45	-4,25				13,2	6,59	10,54
51	1999-08-08	2450	152	68	180	5,75	7,32	1770	6,26	15,5	5,79	1,29	1050	0,42	2,66	1,48	24,77	0,29	10,83	218	474	2,98	0,8	4061	0,24	<0,3	-4,26				12	6,65	10,35
52	1999-08-21	2350	140	66	172	5,75	7,38	1730	5,91	16	6,84	4,20		0,42	4,47	2,00	17,63	0,19	4,57			3,05			0,23	0,51	-1,80				12,5	6,71	9,69

Tabelle 31: Faktorwerte der Faktorenanalyse der chemischen Daten der Bohrung Covasna.

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5	Faktor 6	Faktor 7	Faktor 8	Faktor 9	Faktor 10
1	0,74	-1,14	-0,16	0,05	-0,16	0,01	-0,78	-0,22	-6,48	0,29
2	0,57	-1,82	0,12	-0,64	0,74	-0,17	0,71	1,49	0,32	0,32
3	0,69	-2,04	0,26	0,35	0,59	0,62	-0,08	1,40	0,07	-0,34
4	0,67	-1,83	0,03	0,11	0,62	0,95	0,02	2,27	0,42	-0,33
5	0,25	-1,79	0,02	-0,13	0,67	0,41	0,23	1,66	0,58	-0,23
6	0,42	-1,71	-0,23	0,32	0,58	0,63	-0,21	1,08	-0,04	-0,38
7	-0,40	-0,56	-0,77	-0,16	0,67	-0,45	-0,84	0,09	0,16	-0,05
8	0,02	-1,06	-0,95	-0,26	0,64	-0,64	-0,63	-1,78	0,20	-0,05
9	-0,81	-0,66	-0,83	-0,16	0,49	-0,72	-1,15	-0,91	0,19	-0,19
10	-0,42	-0,45	-0,86	-0,35	0,47	-0,37	-1,20	-0,85	1,13	-0,12
11	-0,73	-0,01	-0,83	-0,77	0,39	-0,59	-1,37	-1,20	0,64	-0,15
12	-0,53	0,24	-1,19	-0,22	0,17	-2,35	-1,67	-0,35	0,15	-0,28
13	-0,77	-1,60	-0,05	0,32	1,81	0,27	-0,45	-0,85	1,03	-0,16
14	-0,58	-1,18	0,83	0,08	-0,36	0,31	-0,22	-0,63	0,33	0,17
15	-1,30	-0,25	0,28	0,31	-2,27	-0,13	-1,03	1,32	0,74	-0,14
16	0,92	-1,02	-1,21	0,38	-5,89	0,07	-0,01	0,00	0,62	-0,37
17	0,05	-1,80	0,12	0,14	-0,46	0,70	-0,11	-1,26	0,39	0,35
18	-0,39	-1,23	0,63	-0,17	-0,07	-0,46	0,62	-1,37	-0,05	0,53
19	-0,30	-0,53	-0,02	-0,04	-0,46	0,28	-1,06	-0,41	-0,29	-0,15
20	0,72	1,18	-0,75	0,54	-0,26	1,14	-0,86	0,97	0,45	-0,03
21	-0,49	0,88	0,83	6,21	0,25	-0,12	-0,37	-0,05	0,03	0,46
22	1,91	0,54	0,54	0,97	0,68	-0,61	0,25	-0,71	0,16	0,38
23	2,24	0,48	0,08	0,52	0,71	0,37	-0,85	-0,41	0,50	-0,41
24	2,54	0,86	0,69	0,41	0,55	0,53	-0,78	-0,28	0,40	-0,14
25	2,27	1,98	0,48	-1,04	0,20	0,55	-1,07	0,92	0,01	-0,24
26	1,97	0,44	-0,22	-0,07	-0,05	-5,49	0,71	1,35	0,12	-0,09
27	0,21	0,88	2,09	-0,90	-0,31	0,31	-0,08	-0,46	0,18	0,66
28	0,36	0,16	3,05	-1,14	-0,28	0,26	-0,48	-0,58	0,02	0,27
29	0,28	0,43	1,82	-0,54	-0,20	0,20	-0,64	-0,55	0,03	0,19
30	0,21	-0,07	2,09	-0,78	-0,12	-0,33	0,23	-0,87	0,12	0,43
31	-0,67	0,25	2,74	-0,47	-1,07	-0,17	-0,04	-0,18	0,07	0,58
32	-0,97	0,84	0,48	-0,19	0,25	0,41	0,01	0,85	0,60	0,25
33	-1,04	1,94	-0,48	-0,25	0,27	0,27	-0,20	0,09	-0,27	0,05
34	-2,85	0,77	0,81	0,39	-0,01	-0,88	0,16	1,24	-0,60	0,19
35	-1,12	0,48	0,09	-0,21	0,11	0,24	-0,67	1,84	-0,43	0,14
36	-0,34	0,72	-0,59	-0,47	0,06	0,37	-0,75	0,83	0,09	0,15
37	-0,89	0,29	-0,41	-0,65	0,21	-0,13	0,14	-1,29	-0,04	0,52
38	-1,47	0,21	-0,02	-0,09	0,18	0,01	0,11	-0,27	-0,18	0,65
39	-0,83	0,80	-0,73	-1,06	-0,02	-0,97	-0,16	0,62	-0,09	0,41
40	-0,39	0,72	0,36	-0,16	0,10	0,38	0,69	-0,53	-0,28	-6,58
41	-0,87	0,43	0,41	0,66	0,18	-0,07	0,97	0,98	-0,15	-0,44
42	-0,53	0,95	-0,81	-0,20	0,18	0,69	-0,26	1,12	-0,45	0,10
43	-0,01	1,05	-0,82	-0,38	0,14	1,38	0,10	-0,38	-0,30	0,03
44	0,18	0,49	-1,21	0,03	0,14	0,60	0,52	0,34	-0,65	0,62
45	-0,10	1,08	-1,18	-0,54	0,12	0,57	1,05	0,03	-0,56	0,40
46	-0,38	-0,21	0,27	0,26	-0,03	-0,82	3,85	-0,62	-0,35	-0,61
47	-0,21	-0,16	0,18	-0,12	0,12	0,21	2,87	-0,54	-0,18	0,26
48	0,47	0,83	-1,27	-0,71	-0,51	1,02	1,02	0,22	0,01	0,71
49	-0,01	0,28	-0,57	0,17	0,27	0,13	0,74	-0,18	0,44	0,83
50	0,68	0,10	-0,85	-0,06	0,12	0,40	1,89	-0,04	0,69	0,75
51	0,53	0,52	-1,03	-0,20	0,26	0,76	1,24	-0,34	0,69	0,80
52	0,49	0,32	-1,23	0,92	-0,40	0,45	-0,10	-2,61	-0,17	-0,05

13.2 Literaturstudie

Tabelle 32: Daten der Literaturstudie. Legende: Referenz, Nr. der Arbeit in Tabelle 33; prä und co bezeichnen den Zeitpunkt des Beginns des Signals in Relation zum Erdbeben; eindeutig, wird nach dem Kriterium in Kapitel 3 entschieden; Kriterium gibt an, ob für die Identifizierung eines Signals ein Kriterium angegeben wird; mehrere Erdbeben, im beobachteten Zeitraum gab es mehrere relevante Erdbeben; J und N stehen für ja oder nein; Zeiteinheiten werden in Tagen angegeben.

Referenz	Datum	Region	Land	M	Variable	D _{epi}	D _{hypo}	prä	co	eindeutig	Kriterium	Mehrere Erdbeben	Amplitude absolut	Einheit	Amplitude zum Mittelwert in %	Zeit vom Beginn der Anomalie	Dauer
29	1976-07-27	Tangshan	China	7,8	H2	460		J	N	N	N	N			50	10	8
30	1976-08-16	Sonpan	China	7,2	H2	350		J	N	N	N	N			100	10	1,5
43	1976-11-15		China	6,9	H2	160		J	N	J	N	N	0,1865	Vol-%	3730	9	1
43	1976-11-15		China	6,9	H2	160		N	J	N	N	N	0,11	Vol-%	55	0	1
43	1976-11-15		China	6,9	Mg	150		N	J	J	N	N	6	mg/l	50	0	15
7		Liaoyang	China	4,8	Rn	32		J	N	N	N	N					
29	??/??/81	Fengzhen	China	5,8	Rn	285		J	N	N	N	N			1000	7	15
8	1969-06-18	Pohai Bay	China	7,4	Rn	170		J	N	N	N	N			60		170
41	1969-07-18		China	7,4	Rn			J	N	N	N	N	3	Bq/l		110	90
41	1969-07-18		China	7,4	Rn			J	N	J	N	N	80	Bq/l	200	20	11
8	1971-08-05	NingShin	China	4,3	Rn	42		J	N	N	N	N			200		40
27	1972-04-08	Sabteh	China	5,2	Rn	70		J	N	N	N	N			55		12
27	1972-09-27	Tankung	China	5,8	Rn	54		J	N	N	N	N			34		12
21	1973-02-06	Luhuo	China	7,9	Rn	200		J	N	N	N	N			120		9
27	1973-04-22	Yiliang	China	5,2	Rn	340		J	N	N	N	N			41		14
8	1973-05-08	Sonpan	China	5,2	Rn	345		J	N	N	N	N			40		14
21	1973-06-29	Mapien	China	5,5	Rn	200		J	N	N	N	N			89		9
8	1974-06-06	Hsingtang	China	4,9	Rn	18		J	N	N	N	N			290		16
43	1975-02	Tanghe	China	7,3	Rn	75		J	N	J	N	N	210	Bq/l	400	,05	8
8	1975-02-04	Haicheng	China	7,3	Rn	50		J	N	N	N	N			38		270
8	1975-02-04	Haicheng	China	7,3	Rn	50		J	N	N	N	N			17		50
8	1975-02-04	Haicheng	China	7,3	Rn	140		J	N	N	N	N			-43		66
8	1975-02-04	Haicheng	China	7,3	Rn	140		J	N	N	N	N			20		8
7	1975-02-04	Haicheng	China	7,3	Rn	26		J	N	N	N	N					
28	1976-05-29	Lungling	China	7,5	Rn	420		J	N	N	N	N			20		290
47	1976-05-29	Lungling	China	7,5	Rn	20		J	N	N	N	N			20		510
47	1976-05-29	Lungling	China	7,5	Rn	190		J	N	N	N	N			15		425
47	1976-05-29	Lungling	China	7,5	Rn	210		J	N	N	N	N			8		160
47	1976-05-29	Lungling	China	7,5	Rn	215		J	N	N	N	N			12		130
47	1976-05-29	Lungling	China	7,5	Rn	360		J	N	N	N	N			7		75
47	1976-05-29	Lungling	China	7,5	Rn	450		J	N	N	N	N			200		12
26	1976-07-27	Tangshan	China	7,8	Rn	100		J	N	N	N	N			50		15
8	1976-07-27	Tangshan	China	7,8	Rn	130		J	N	N	N	N			-40		1370

Referenz	Datum	Region	Land	M	Variable	D _{epi}	D _{hypo}	prae	co	eindeutig	Kriterium	Mehrere Erdbeben	Amplitude absolut	Einheit	Amplitude zum Mittelwert in %	Zeit vom Beginn der Anomalie	Dauer
8	1976-07-27	Tangshan	China	7,8	Rn	130		J	N	N	N	N			27		162
7	1976-07-27	Tangshan	China	7,8	Rn	1800		J	N	N	N	N					
47	1976-07-27	Tangshan	China	7,8	Rn	50		J	N	N	N	N			15		970
8	1976-08-16	Songpan-Pingwu	China	7,2	Rn	100		J	N	N	N	N			20		190
8	1976-08-16	Songpan-Pingwu	China	7,2	Rn	340		J	N	N	N	N			-60		160
8	1976-08-16	Songpan-Pingwu	China	7,2	Rn	390		J	N	N	N	N			55		160
47	1976-08-16	Songpan-Pingwu	China	7,2	Rn	40		J	N	N	N	N			29		480
47	1976-08-16	Songpan-Pingwu	China	7,2	Rn	100		J	N	N	N	N			11		420
47	1976-08-16	Songpan-Pingwu	China	7,2	Rn	320		J	N	N	N	N			70		1
47	1976-08-16	Songpan-Pingwu	China	7,2	Rn	320		J	N	N	N	N			-12		200
47	1976-08-16	Songpan-Pingwu	China	7,2	Rn	340		J	N	N	N	N			90		48
47	1976-08-16	Songpan-Pingwu	China	7,2	Rn	560		J	N	N	N	N			110		34
30	1976-11-15	Ninghe	China	6,9	Rn			J	N	N	N	N			900	8	12
27	1977-03-07	Chienan	China	6	Rn	200		J	N	N	N	N			70	1	3
42	1976-07-21		China	7,4	T	10		J	J	J	N	J	10	°C	12	45	45
42	1976-07-28	Tangshan	China	7,8	T	190		J	J	J	N	N	-4	°C	-5,5	7	11
42	1977-05-02	Tangshan	China	6,5	T	65		J	N	J	N	N	-0,35	°C	-2,1	9	21
46	1977-07-23		China	5,5	upwelling	50		J	N	N	N	N			400	13	
46	1979-07-07		China	6	water	200		J	N	N	N	N				14	14
46	1979-07-07		China	6	water	45		J	N	N	N	N				12	
46	1979-07-07		China	6	water	60		J	N	N	N	N				150	
46	1981-08-13		China	5,8	water	113		J	N	N	N	N	-1	cm		18	
46	1981-11-09		China	5,8	water	150		J	N	N	N	N	4	cm		77	
46	1981-11-09		China	5,8	water	67		J	N	N	N	N	20	cm		11	
46	1982-07-03		China	5,4	water	10		J	N	N	N	N	-13	cm		13	
46	1982-10-19		China	5,3	water	300		J	N	N	N	N				7	
46	1982-10-19		China	5,3	water	250		J	N	N	N	N				2	
46	1982-10-19		China	5,3	water	34		J	N	N	N	N				2	
46	1983-03-03		China	5,4	water	11		J	N	N	N	N				2	
46	1983-03-03		China	5,4	water	12		J	N	N	N	N				2	
46	1983-11-07		China	5,9	water	80		J	N	N	N	N				27	
46	1983-11-07		China	5,9	water	360		J	N	N	N	N				13	
42		Tangshan	China	7,8	Water upwelling	10		N	J	J	N	N	35	m3/min	120		
42	1969-07-18	Tangshan	China	7,4	Water upwelling	200		J	J	J	N	N	12,5	m3/min	30	30	60
39		Tianjin-Tangshan	China	7,8	water-discharge	360		J	N	J	N	N	100	cm		96	96
39			China	7,3	water-discharge	50		J	N	J	N	N	100	cm		154	154
32	1978-09-29	Duchambe	Duchambe		Hg gas	20		J	N	N	N	N			400	1,2	
32	1978-09-29	Duchambe	Duchambe		Hg gas			J	N	N	N	N			9000	0,8	
15	1987-03-06	Reventador	Equador	6,9	Rn	367		J	N	N	N	N				50	
15	1987-03-06	Reventador	Equador	6,9	Rn	377		J	N	N	N	N			230	50	

Referenz	Datum	Region	Land	M	Variable	D _{epi}	D _{hypo}	prae	co	eindeutig	Kriterium	Mehrere Erdbeben	Amplitude absolut	Einheit	Amplitude zum Mittelwert in %	Zeit vom Beginn der Anomalie	Dauer
15	1987-03-06	Reventador	Equador	6,9	Rn	339		J	N	N	N	N			400	35	
15	1987-03-06	Reventador	Equador	6,9	Rn	388		J	N	N	N	N			100	50	
15	1987-03-06	Reventador	Equador	6,9	Rn	183		J	N	N	N	N			100	40	
15	1987-03-06	Reventador	Equador	6,9	Rn	350		J	N	N	N	N			300	40,00	
8	1966-04-26	Tashkent	Ex-USSR	5,3	Rn	5		J	N	N	N	N			20		400
8	1967-03-24	Tashkent	Ex-USSR	4	Rn	5		J	N	N	N	N			100		11
8	1967-06-20	Tashkent	Ex-USSR	3,5	Rn	5		J	N	N	N	N			23		3
8	1967-07-22	Tashkent	Ex-USSR	3,5	Rn	5		J	N	N	N	N			20		3
8	1967-11-09	Tashkent	Ex-USSR	3	Rn	5		J	N	N	N	N			23		8
8	1967-11-17	Tashkent	Ex-USSR	3,3	Rn	5		J	N	N	N	N			23		7
8	1967-12-17	Tashkent	Ex-USSR	3	Rn	5		J	N	N	N	N			23		4
8	1973-02-13	Uzbekistan	Ex-USSR	4,7	Rn	130		J	N	N	N	N			47		5
8	1974-08-11	Markansu	Ex-USSR	7,3	Rn	530		J	N	N	N	N			100		100
8	1976-02-12	Tien Shan	Ex-USSR	5,3	Rn	100		J	N	N	N	N			10		110
8	1976-05-17	Gazli	Ex-USSR	7,3	Rn	470		J	N	N	N	N			220		4
8	1976-05-17	Gazli	Ex-USSR	7,3	Rn	550		J	N	N	N	N			25		90
7	1976-05-17	Gazli	Ex-USSR	7,3	Rn	400		J	N	N	N	N					
8	1977-01-31	Isfarin-Batnen	Ex-USSR	6,6	Rn	190		J	N	N	N	N			-30		60
8	1977-01-31	Isfarin-Batnen	Ex-USSR	6,6	Rn	200		J	N	N	N	N			-20		125
8	1978-03-24	Alma-Ata	Ex-USSR	7,1	Rn	65		J	N	N	N	N			32		50
8	1978-11-01	Zaalai	Ex-USSR	6,7	Rn	270		J	N	N	N	N			-30		470
8	1978-11-01	Zaalai	Ex-USSR	6,7	Rn	300		J	N	N	N	N			-40		470
8	1978-11-01	Zaalai	Ex-USSR	6,7	Rn	150		J	N	N	N	N			20		75
8	1978-11-01	Zaalai	Ex-USSR	6,7	Rn	150		J	N	N	N	N			-20		70
44	1996-02-18	Pyrenees	France	5,2	Cl	10		J	N	J	J	N	0,1	mml/l	72	4	9
16	1986-05-01	Ligurian Sea	France	3,9	Rn	56		J	N	N	N	N			100	3	5
2	1978-07-03		Iceland	2,7	Rn	14		J	N	J	N	N		dpm/kgH2O	380	25	22
2	1978-08-28		Iceland	3,4	Rn	5		J	N	N	N	N		dpm/kgH2O	60	30	17
2	1978-08-28		Iceland	3,4	Rn	5		J	N	J	N	N		dpm/kgH2O	100	33	33
2	1978-10-30		Iceland	3,8	Rn	20		J	N	N	N	N		dpm/kgH2O	280	27	17
2	1978-11-19		Iceland	4,3	Rn	16		J	N	J	N	N		dpm/kgH2O	50	37	37
2	1979-06-29		Iceland	1,9	Rn	9		J	N	J	N	N		dpm/kgH2O	-80	10	8
2	1979-09-05		Iceland	2,8	Rn	8		J	N	N	N	N		dpm/kgH2O	40	25	19
2	1979-09-05		Iceland	2,8	Rn	8		J	N	N	N	N		dpm/kgH2O	100	50	50
2	1979-12-15		Iceland	4,1	Rn	60		J	N	N	N	N		dpm/kgH2O	40	20	17
35	1991-10-20	Uttarkashi	India	7	Rn	450		J	N	J	J	N			200	15	7
35	1991-10-20	Uttarkashi	India	7	Rn	270		J	N	J	J	N			300	15	7
35	1991-10-20	Uttarkashi	India	7	Rn	330		J	N	J	J	N			180	3	7
36	1992-04-09	Himachal Pradesh	India	2,2	Rn	166		J	N	N	N	N			195	2	
36	1992-07-21	Himachal Pradesh	India	3,6	Rn	265		J	N	N	N	N			250	13	
36	1993-01-12	Himachal Pradesh	India	4,4	Rn	440		J	N	N	N	N			153	9	

Referenz	Datum	Region	Land	M	Variable	D _{epi}	D _{hypo}	prae	co	eindeutig	Kriterium	Mehrere Erdbeben	Amplitude absolut	Einheit	Amplitude zum Mittelwert in %	Zeit vom Beginn der Anomalie	Dauer
36	1993-01-12	Himachal Pradesh	India	4,4	Rn	440		J	N	N	N	N			183	9	
36	1993-08-05	Himachal Pradesh	India	3,7	Rn	325		J	N	N	N	N			242	10	
36	1993-08-05	Himachal Pradesh	India	3,7	Rn	325		J	N	N	N	N			227	10	
36	1995-05-23	Himachal Pradesh	India	2,7	Rn	105		J	N	N	N	N			165	3	
31	1978-09-16	Iran	Iran		H2S			J	N	N	N	N			170	25	2
33	1980-11-23	Irpinia	Italy	6,5	Rn	220		J	N	N	N	N			25	150	150
33	1980-11-23	Irpinia	Italy	6,5	Rn	200		J	N	N	N	N			170	180	180
23	1982-12-12	Matsuyama area	Japan	4,9	CH4/Ar	50		J	N	N	N	N			120	100	120
17	1984-09-14	Western Nagamo	Japan	6,8	CH4/Ar	50		J	N	N	N	N				120	230
17	1982-08-06	?	Japan	3,8	H2	8,6		J	N	N	N	N				70	
22	1983-05-25	?	Japan	7,7	H2	480		J	N	N	N	N			100000		
17	1984-09-14	Western Nagamo	Japan	6,8	H2	50		J	N	N	N	N				50	120
17	1984-09-14	Western Nagamo	Japan	6,8	H2	70		J	N	N	N	N			2000	15	
20	1977-04-03	Nagoya	Japan	4,1	He/Ar	100		J	N	N	N	N				60	60
20	1977-08-06	Nagoya	Japan	4,3	He/Ar	15		J	N	N	N	N				50	60
20	1977-08-15	Nagoya	Japan	4,3	He/Ar	45		J	N	N	N	N				50	75
20	1978-01-14	Nagoya	Japan	7	He/Ar	216		J	N	N	N	N				75	130
17	1984-09-14	Western Nagamo	Japan	6,8	He/Ar	50		J	N	N	N	N				120	230
18	1990-09-24		Japan	6,6	He/Ar	280		N	J	J	J	J				0	,1
18	1990-10-16		Japan	4,2	He/Ar	31		N	J	J	J	J				0	,1
18	1991-05-11		Japan	3,9	He/Ar	35		N	J	J	J	J				0	,1
17	1984-09-14	Western Nagamo	Japan	6,8	N2/Ar	50		J	N	N	N	N				120	230
21	1978-01-14	Izu-Oshirna	Japan	6,8	Rn	25		J	N	N	N	N		cpm	-8		7
37	1978-01-14	Izu Peninsula	Japan	7	Rn	25		J	N	J	N	N	-30	cpm	-6,5	90	90
37	1978-01-14	Izu Peninsula	Japan	7	Rn	25		N	J	J	N	N	30	cpm	6,5	0	30
24	1984-03-06	subdutced zone	Japan	7,9	Rn	1000		J	N	J	J	N		cpm		8,4	2
24	1987-02-06	subdutced zone	Japan	6,7	Rn	130		J	N	J	J	J		cpm		5,5	3,2
19	1990-06-01	Chiba-Ken-Okie	Japan	6	Rn	200		J	N	N	N	N			-3		1
25	1995-01-17	Kobe	Japan	7,2	Rn	30		J	N	N	N	N			200	75	90
25	1995-01-17	Kobe	Japan	7,2	Rn	30		J	N	N	N	N			1000	10	3
37	1978-01-14	Izu Peninsula	Japan	7	strain	25		J	N	J	N	N	0,0000016	strain		37	37
37	1978-01-14	Izu Peninsula	Japan	7	strain	25		N	J	J	N	N	0,0000008	strain		0	30
40	1976	Izu Peninsula	Japan	5,4	T	28		J	J	J	N	N	0,6	°C		16	16
40	1978	Izu Peninsula	Japan	7	T	31		N	J	J	N	N	1,4	°C		0	16
40	1978	Izu Peninsula	Japan	7,4	T	470		N	J	J	N	N	0,2	°C		0	0
40	1978	Izu Peninsula	Japan	5,4	T	16		N	J	J	N	J	0,7	°C		0	0
37	1978-01-14	Izu Peninsula	Japan	7	T	25		J	N	J	N	N	-9	°C	-19	37	37
40	1979	Izu Peninsula	Japan	3,8	T	10		N	J	J	N	J	0,4	°C		0	0
40	1980	Izu Peninsula	Japan	6,7	T	16		J	N	J	N	N	2	°C		3	
40	1981	Izu Peninsula	Japan	3,7	T	11		J	J	J	N	N	0,7	°C		3	4
40	1982	Izu Peninsula	Japan	2,3	T	6		N	J	J	N	N	0,4	°C		0	0

Referenz	Datum	Region	Land	M	Variable	D _{epi}	D _{hypo}	prae	co	eindeutig	Kriterium	Mehrere Erdbeben	Amplitude absolut	Einheit	Amplitude zum Mittelwert in %	Zeit vom Beginn der Anomalie	Dauer
40	1982	Izu Peninsula	Japan	5,7	T	46		N	J	J	N	N	0,9	°C		0	.1
40	1982	Izu Peninsula	Japan	7	T	290		N	J	J	N	N	0,5	°C		0	0,1
37	1978-01-14	Izu Peninsula	Japan	7	water	25		J	N	J	N	N	-32	cm	-1,4	37	37
1	1981-08-15		Japan	4,8	water		42	N	J	J	N	N	-6,3	cm			
1	1982-07-23		Japan	7,0	water		374,9	N	J	J	N	N	-4,4	cm			
1	1982-12-28		Japan	6,4	water		155,8	N	J	J	N	N	-3,4	cm			
1	1983-03-16		Japan	5,7	water		66	N	J	J	N	N	-4,6	cm			
1	1983-05-26		Japan	7,7	water		621,9	N	J	J	N	N	-1,5	cm			
1	1983-08-08		Japan	6	water		113,1	N	J	J	N	N	-2,5	cm			
1	1983-11-24		Japan	5	water		57,1	N	J	J	N	N	-2,1	cm			
1	1984-09-14		Japan	6,8	water		128,0	N	J	J	N	N	-14,1	cm			
1	1986-11-22		Japan	6	water		126,1	N	J	J	N	N	-3	cm			
1	1987-12-17		Japan	6,7	water		226,6	N	J	J	N	N	-2,7	cm			
1	1989-10-14		Japan	5,7	water		122	N	J	J	N	N	-1,7	cm			
1	1990-02-20		Japan	6,5	water		95,8	N	J	J	N	N	-10	cm			
1	1990-09-24		Japan	6,6	water		199,6	N	J	J	N	N	-1,6	cm			
14	1985-09-19	Mexico	Mexico	8,1	Rn	260		J	N	N	N	N					
45	1980-12-11		Russia	5,1	water	150		J	N	J	J	N	-0,35	cm		1,5	2,5
34	1980-10-18	Northern Taiwan	Taiwan	5,8	Rn	39		J	N	N	N	N			nd	19	
34	1981-05-14	Northern Taiwan	Taiwan	5,2	Rn	23		J	N	N	N	N			nd	11	
34	1981-06-21	Northern Taiwan	Taiwan	4,6	Rn	14		J	N	N	N	N			nd	15	
34	1981-07-18	Northern Taiwan	Taiwan	5	Rn	37		J	N	N	N	N			nd	4	
34	1982-10-31	Northern Taiwan	Taiwan	5,3	Rn	45		J	N	N	N	N			nd	51	
38	1979-08-06	San Andreas Fault	USA	5,9	He			J	N	J	J	N				26	
38	1979-12-24	San Andreas Fault	USA	4,0	He			J	N	J	J	N				26	
38	1980-03-06	San Andreas Fault	USA	4	He			J	N	J	J	N				36	
38	1980-04-13	San Andreas Fault	USA	4,8	He			J	N	J	J	N				39	
38	1980-06-18	San Andreas Fault	USA	4,1	He			J	N	J	J	N				42	
38	1980-08-23	San Andreas Fault	USA	4,1	He			J	N	J	J	N				45	
38	1981-01-07	San Andreas Fault	USA	4,5	He			J	N	J	J	N				38	
38	1981-01-27	San Andreas Fault	USA	4,1	He			J	N	J	J	N				28	
38	1981-04-25	San Andreas Fault	USA	4,1	He			J	N	J	J	N				24	
38	1981-06-09	San Andreas Fault	USA	4,2	He			J	N	J	J	N				19	
38	1981-09-28	San Andreas Fault	USA	3,9	He			J	N	J	J	N				57	
38	1982-06-19	San Andreas Fault	USA	4	He			J	N	J	J	N				22	
38	1982-08-09	San Andreas Fault	USA	4,5	He			J	N	J	J	N				41	
38	1983-02-05	San Andreas Fault	USA	4,1	He			J	N	J	J	N				40	
38	1983-07-18	San Andreas Fault	USA	5,4	He			J	N	J	J	N				42	
10		Big Bear	USA	4,8	He	30		J	N	N	N	N			65	120	150
13	1979-08-06	Coyote Lake	USA	5,9	He	65		J	N	N	N	N				21	
13	1980-01-24	Mt diabolo	USA	5,5	He	155		J	N	N	N	N				35	

Referenz	Datum	Region	Land	M	Variable	D _{epi}	D _{hypo}	prae	co	eindeutig	Kriterium	Mehrere Erdbeben	Amplitude absolut	Einheit	Amplitude zum Mittelwert in %	Zeit vom Beginn der Anomalie	Dauer
13	1980-04-13	Salinas	USA	4,9	He	35		J	N	N	N	N				28	
13	1980-08-24	Livermore	USA	4,1	He	120		J	N	N	N	N					
13	1981-01-07	St Juan Bautista	USA	4,5	He	45		J	N	N	N	N				10	
13	1989-10-17	Loma Prieta	USA	7,1	He	60		J	N	N	N	N			4	1	
7		Raquette Lake	USA	3,9	Rn	14		J	N	N	N	N					
7		Blue Mountain Lake	USA	1,5	Rn	1		J	N	N	N	N					
9	??/06/79	Caruthersville	USA	3,9	Rn			J	N	N	N	N			375	60	33
11	??/06/83	Alandale	USA	3,7	Rn	13		J	N	N	N	N			1200	15	3
4	1976-03-17	San Andreas Fault-California	USA	4,3	Rn	25		J	N	N	N	N			120	25	60
8	1976-11-22	Pearblossom	USA	3,5	Rn	25		J	N	N	N	N			60		31
4	1977-01-19	San Andreas Fault-California	USA	4	Rn	47		J	N	N	N	N			500	25	90
8	1977-02-23	Jocasse	USA	2,3	Rn	1		J	N	N	N	N			-50		14
3	1977-09-24	Pasadena	USA	2,9	Rn	21		J	N	N	N	N			62	5	3
3	1977-09-25	California	USA	2,9	Rn	20,8	25,7	J	N	J	N	N		counts/run	44	-5,5	4
4	1977-12-15	San Andreas Fault-California	USA	4	Rn	45		J	N	N	N	N			400	30	15
3	1977-12-17	California	USA	2,2	Rn	23,3	24,3	J	J	J	N	N		counts/run	80	-0,5	10
3	1977-12-20	Pasadena	USA	2,8	Rn	12		J	N	N	N	N			25		9
4	1978-08-29	San Andreas Fault-California	USA	4,2	Rn	75		J	N	N	N	N			200	90	240
3	1979-01-01	Malibu	USA	4,7	Rn	54		J	N	N	N	N			72		42
8	1979-01-01	Malibu	USA	4,7	Rn	20		J	N	N	N	N			225		82
8	1979-06-28	Big Bear	USA	5	Rn	85		J	N	N	N	N			310		12
8	1979-06-28	Big Bear	USA	5	Rn	31		J	N	N	N	N			72		45
10	1979-06-30	Big Bear	USA	4,8	Rn	30		J	N	N	N	N			60	120	150
12	1979-10-13	San Andreas	USA	3,4	Rn	40		J	N	N	N	N			400	0,2	0,5
8	1979-10-15	Imperial Valley	USA	6,6	Rn	335		J	N	N	N	N			400		116
8	1979-10-15	Imperial Valley	USA	6,6	Rn	310		J	N	N	N	N			200		95
8	1979-10-15	Imperial Valley	USA	6,6	Rn	265		J	N	N	N	N			72		145
8	1979-10-15	Imperial Valley	USA	6,6	Rn	260		J	N	N	N	N			64		2
7	1979-10-15	Imperial Valley	USA	6,6	Rn	300		J	N	N	N	N					
12	1979-12-22	San Andreas	USA	3,3	Rn	20		J	N	N	N	N			800	0,5	1
48	1983-06-07	Coalinga Fault-California	USA	6,7	Rn	40		J	N	N	N	J			800	110	300
6	1985-04-08	Kettleman Hill	USA	5,6	Rn	300		J	N	N	N	N			100	7	10
46	1972-02-24	California	USA	5	Water	25		J	N	N	N	N	-5	cm		60	25
46	1972-09-04	California	USA	4,7	Water	17		J	N	N	N	N	-8	cm		50	40
46	1973-01-15	California	USA	4	water	10		J	N	N	N	N	-5	cm		40	40
46	1980-02-25		USA	5,5	water	31		J	N	N	N	N	45	cm		4	,16
46	1980-02-25		USA	5,5	water	32		J	N	N	N	N	2,3	cm		4	,16
46	1982-03-22		USA	4,5	water	13		J	N	N	N	N					4
46	1978-03-22		USSR	7	upwelling	170		J	N	N	N	N	100	m3/h		4	3
46	1978-02-27		USSR	4,6	water	120		J	N	N	N	N	-100	cm		60	
46	1978-09-07		USSR	4,5	water	20		J	N	N	N	N	-150	cm		150	

Referenz	Datum	Region	Land	M	Variable	D _{epi}	D _{hypo}	prae	co	eindeutig	Kriterium	Mehrere Erdbeben	Amplitude absolut	Einheit	Amplitude zum Mittelwert in %	Zeit vom Beginn der Anomalie	Dauer
46	1980-12-11		USSR	5,1	water	170		J	N	N	N	N	-5	cm		90	60
46	1980-12-11		USSR	5,1	water	150		J	N	N	N	N	-3,3	cm		2	

Tabelle 33: Referenzliteratur für die Literaturstudie. Die vollständigen Zitate befinden sich im Literaturverzeichnis.

Referenznummer	Autoren	Erscheinungsjahr
1	Matsumoto, N.	1992
2	Hauksson, E., J.G. Goddart	1981
3	Shapiro, M.H., J.D. Melvin, T.A. Tombrello, J. Fong-Liang, L. Giu-Ru	1980
4	King, C.-Y.	1980
5	Poreda, R., Y. Chung, R. Horowitz, H. Craig	1978
6	Teng, T.-L., L.-F. Sun	1986
7	Fleischer, R.L.	1981
8	Hauksson, E.	1981
9	Steele, S.R.	1981
10	Chung, Y.	1985
11	Shapiro, M.H., A. Rice, M.H. Mendenhall, J.D. Tombrello	1985
12	King, C.-Y.	1985
13	Reimer, G.M.	1990
14	Segovia, N., S. De la Cruz Reyna, M. Mena, E. Ramos, M. Monin, J.L. Seidel	1989
15	Humanante, B.F., E. Giroletti, J. Idrovo, M. Monnin, R. Pasinetti, J.L. Seidel	1990
16	Borchiellini, S., M. Bernat, R. Campredon	1991
17	Sugisaki, R. T. Sugiura	1986
18	Nagamine, K., R. Sugisaki	1991
19	Wakita, H. , G. Igarashi, Y. Nakamura, Y. Sano, K. Notsu	1989
20	Sugisaki, R.	1978
21	Wakita, H., Y. Nakamura, Y. Sano	1988
22	Satake, H., M. Ohashi, Y. Hayashi	1985
23	Kawabe, I.	1985
24	Igarashi, G., H. Wakita	1990
25	Igarashi, G., S. Saeki, N. Takahata, K. Sumikawa, S. Tasaka, Y. Sasaki, M. Takahashi, Y.	1995
26	Wang, C.Y.	1978
27	Teng, T.L.	1980
28	Tang, C.	1978
29	Shi, H., Z. Cai	1986
30	Jiang, F.L., G. Li	1981
31	Barsukov, V.L., V.S. Serebrenikov, A.A. Belyaev, Y.A. Bakaldin, R.V. Arsenyeva	1985
32	Varshal, G.M., Sobolev, V.L. Barzukov, A.V. Koltsov, B.I. Kostin, T.F. Kudinova, Y.I.	1985
33	Allegri, L., F. Bella, M. Della, A. Ermini, S. Improta, V.Sgringa	1983
34	Liu, K.K., T.F. Yui, Y.H. Yeh, Y.B. Tsai, T.L. Teng	1985
35	Virk, H.S., S. Baljinder	1994
36	Virk, H.S.	1995
37	Wakita, H.	1984
38	Reimer, G.M.	1985
39	Wang C., Y. Wang, Y. Guo	1984
40	Mogi, K., H. Mochizuki, Y. Kurokawa	1989
41	Zhang, W., C. Wang	1990
42	Zongjin, M. et al.	1990
43	Li, G., F. Jiang, J. Wang, P. Zhang	1985
44	Toutain, J.P., M. Munoz, F. Poitrasson, A.C. Lienard	1997
45	Kissin, I.G., V.L. Barabanov, A.O. Grinevsky, V.M. Markov, L.L. Khudzinskiy	1983
46	Roeloffs, E.A.	1988
47	Wakita, H.	1978
48	Sato, M., A.J. Sutton, K.A. Mc Gee, Russel-Robinson	1986

Tabelle 34: Vorschlag für vereinheitlichtes System zur Dokumentation von tehygges-Signalen. Es können natürlich noch andere Kriterien aufgenommen werden.

Referenz-Nr. (Originalliteratur)	Zahl
Zitatreferenz (Literatur im Falle eines Zitates)	Zahl
Liegen Originaldaten vor ?	Ja/nein
Lokations-Nr (fürTabelle Lokation)	Zahl
ID	Zahl
Erdbeben: Name (Falls in der Literatur fester Begriff)	Text
Datum	Datum
Region	Text
Land	Text
Erdbebentyp: Verwerfung,	Text
Magnitude	Zahl
Hochwert Erdbeben	Zahl
Rechtswert Erdbeben	Zahl
Tiefe Erdbeben	Zahl
Tektonische Beschreibung	Text
Signal-Parameter (Radon, Wasser, Element,...)	Schlüssel
Epicentrale Distanz (km)	Zahl
Hypozentral Distanz (km)	Zahl
prä (Einsetzen des Signals vor dem Referenzerdbeben)	Ja/nein
co (Einsetzen des Signals zeitgleich mit dem Referenzerdbeben)	Ja/nein
post (Einsetzen des Signals nach dem Referenzerdbeben)	Ja/nein
eindeutig	Ja/nein
Kriterium für Signal ?	Ja/nein
Welches Kriterium ?	Text bzw. Schlüssel
Bezug zu einzelner Erdbeben	Ja/nein
Amplitude absolute	Zahl
Einheit des Parameters	Text
Amplitude relativ zum Mittelwert	Zahl
Amplitude relativ zur Standardabweichung	Zahl
Δt (Beginn „Signal“ zum Erdbeben), in Tagen	Zahl
Δt (Scheitel „Signal“ zum Erdbeben), in Tagen	Zahl
Dauer „Signal“	Zahl
Filter für Erdbeben Magnitdu ($e > x$)	Zahl
Filter für Erdbeben Entfernung ($d > y$)	Zahl
Kontinuierliche Messung	Ja/nein
Messabstand(Tage)	Zahl

13.3 Literaturverzeichnis:

- Abbado D., Caradossi., F. Tassi , O. Vaselli., A. Minissale, G. Magro, I. Seghedi, Z. Berner (1997): Water and gas geochemistry of the Eastern Carpathians (Romania). *Plinius* 18; 17-18.
- Anderson, Don L., J.H. Whitcomb (1973): The dilatancy-diffusion model of earthquake prediction. In: *Proceedings of the Conference on Tectonic Problems of the San Andreas Fault System*, (R.L. Kovach and A. Nur, eds.), Stanford University Publications, Geological Sciences, Vol. XIII. 417-426.
- Backhaus, K., B. Erichson, W. Plinke, R. Erichson (1996): *Multivariate Analysemethoden*. Springer-Verlag. pp.591.
- Barsukov, V.L., V.S. Serebrenikov, A.A. Belyaev, Y.A. Bakaldin, R.V. Arsenyeva (1985): Some experience in unraveling geochemical earthquake precursors. *Pure and Applied Geophysics*. 122; 157-163.
- Bella, F., P.F. Biagi, M. Caputo, E. Cozzi, G. Della Monica, A. Ermini, E.I. Gordees, Y.M. Khatkevich, G. Martinelli, W. Plastino, R. Scandone, V. Sgrigna, D. Zilpimiani (1998): Hydrogeochemical anomalies in Kamchatka (Russia). *Physics and Chemistry of the Earth*, 23; 921-925.
- Bolognesi, L. (1997): A tentative correlation between seismic activity and changes in the composition of thermal waters on vulcano island, Italy. *Geothermics* 26/3; 379-392.
- Bonjer, K.-P., M-C Oncescu, (1997): A note on the depth recurrence and strain release of large Vrancea earthquakes. In: *Tectonics of the Alpine-Carpathian-Pannonian region; II. Tectonophysics*. 272; 2-4; 291-302.
- Borchiellini, S., M. Bernat, R. Campredon (1991): Factors controlling Radon emissions from sources in regions of accentuate relief: The influence of seismicity (Maritime Alps, France). *Earth and Planetary Science Letters*. 107; 217-229.
- Bortz, J. (1993): *Statistik (für Sozialwissenschaftler)*. Springer Verlag. pp. 753.
- Brace, W.F., B.W. Paulding, G.Scholz (1966): Dilatancy in the fractures of crystalline rocks. *Journal of Geophysical Research*. 71/16; 3939- 3943.
- Chung, Y. (1985): Radon variations at Arrowhead and Murietta springs: continuous and discrete measurements. *Pure and Applied Geophysics*. 122; 294-308.
- Dobrovolsky, I.P., N.I. Gerhenzon, I. Gokhberg (1989): Theory of electrokinetic effects occurring at the final stage in the preparation of a tectonic earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 57; 144-156.
- Dobrovolsky, I.P., S.I. Zubkov, V.I. Miachkin (1979): Estimation of the Size of Earthquake Preparation Zones. *Pure and Applied Geophysics*. 117; 1025-1044.
- Dyck, Peschke (1995): *Hydrologie*. Springer Verlag. pp 587.
- Fleischer, R.L. (1981): Dislocation model for response to distant earthquakes. *Geophysical Research Letters*. 8; 477-480.
- Fleischer, R.L., A. Magro-Campero (1985): Association of subsurface Radon changes in Alaska and the Northeastern United states with earthquakes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 49; 1061-1071.
- Geller, R.J. (1997): Earthquake prediction; a critical review. *Geophysical Journal International*. 131; 3; 425-450.
- Geller, R.J., D.D. Jackson, Y.Y. Kagan, F. Mulargia (1997): Earthquakes cannot be predicted. *Science*. 275; 1616-1617.

- Girbacea, R., W. Frisch (1997): Slab in the wrong place: Lower lithospheric mantle delamination in the last stage of the Eastern Carpathian subduction retreat. *Geology*. 26; 7; 611-614.
- Grecksch, G., F. Roth, H.J. Kuempel (1999): Coseismic well-level changes due to the 1992 Roermond earthquake compared to static deformation of half-space solutions. *Geophysical Journal International*. 138; 2; 470-478.
- Green, H. II (2001): Der Mechanismus von Tiefbeben. *Spektrum der Wissenschaft Dossier*. 2/2001; 14-21.
- Guadagnoli, E., W.F. Velicier (1988): Relation of sample size to the stability of component patterns. *Psychology Bulletin*. 103; 265-275.
- Gupta, H.K., I. Radhakrishna, R.K. Chadha, H.-J. Kümpel, G. Grecksch (2000): Pore pressure studies initiated in area of reservoir-induced earthquakes in India. *EOS*. 81; 14; 145-151.
- Hasegawa, A., N. Unimo, A. Takagi (1985): Seismicity in the Northeastern Japan Arc and Seismicity Patterns before Large Earthquakes. *Earthquake Prediction Research*. 3; 607-626.
- Hauksson, E. (1981): Radon content of groundwater as an earthquake precursor: evaluation of worldwide data and physical basis. *Journal of Geophysical Research*. 86; 9397-9410.
- Hauksson, E., J.G. Goddard (1981): Radon earthquake precursor studies in Iceland. *Journal of Geophysical Research*. 86; 7037-7054.
- Himmelsbach, T. (1999): Stofftransportvorgänge in Kluftgrundwasserleitern - Von der Datenerhebung zur Erstellung eines Modelles. *Habilitationsschrift an der Universität Karlsruhe 1999*; pp. 220.
- Humanante, B.F., E. Giroletti, J. Idrovo, M. Monnin, R. Pasinetti, J.L. Seidel (1990): Radon signals related to seismic activity in Equator, March 1987. *Pure and Applied Geophysics*. 132; 329-344.
- Iancu, V., A. Apostol (1980): The Correlation between Tectonics, Mineralised Waters and CO₂ in the Covasna Zone. *D.S.Inst.geol.geofiz. LXV*; 55-69. (in rumänisch)
- Igarashi, G., H. Wakita (1990): Groundwater Radon anomalies associated with earthquakes. *Tectonophysics*. 180; 237-254.
- Igarashi, G., S. Saeki, N. Takahata, K. Sumikawa, S. Tasaka, Y. Sasaki, M. Takahashi, Y. Sano (1995): Groundwater Radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan. *Science*. 269; 60-61.
- Ishiguro, M., H. Akaike, M. Ooe, S. Nakai (1983): A Bayesian approach to the analysis of earth tides. In: J.T.Kuo (editor), *Proceedings of the 9th International Symposium on Earth Tides*. Schweizerbart, Stuttgart. 283-292.
- Jiang, F.L., G. Li (1981). The application of geochemical methods in earthquake prediction in China. *Geophysical Research Letters*. 8; 469-472.
- Jiang, F.L., G. Li (1981): Experimental studies of the Mechanisms of seismo-geochemical precursors. *Geophysical Research Letters*. 8; 473-476.
- Kawabe, I. (1985): Anomalous changes of CH₄/Ar ratio in subsurface gas bubbles as seismogeochemical precursors at Matsuyama, Japan. *Pure and Applied Geophysics*. 122; 194-214.
- Kawabe, I. (1987): Identification of seismo-geochemical anomalies in subsurface gas CH₄/Ar ratio: geochemical filtering of earthquakes. *Geochemical Journal*. 21; 105-117.
- Khatkevich, Y.M. (1994): On intermediate-term prediction of earthquakes felt in the town of Petropavlovsk-Kamchatksy. *Volcanology and Seismology*. 1;63-67.
- King, C.Y. (1986): Gas geochemistry applied to earthquake prediction. An overview. *Journal of Geophysical Research*. 91; 12269-12281.
- King, C.-Y. (1980): Episodic Radon changes in subsurface soil gas along active faults and possible relation to earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. 85; 3065-3079.
- King, C.-Y. (1985): Impulsive Radon emanation on a creeping segment of the San Andreas Fault, California. *Pure and Applied Geophysics*. 122; 340-352.

- King, C.-Y., N. Koizumi, Y. Kitagawa (1995): Hydrochemical anomalies and the 1995 Kobe earthquake. *Science*. 269;39-39.
- Kissin, I.G., V.L. Barabanov, A.O. Grinevsky, V.M. Markov, L.L. Khudzinskiy (1983): Experimental investigations into conditions of groundwaters in order to identify hydrodynamic earthquake forerunners. *Izvestiya, Earth Physics*. 19; 6; 482-491.
- Koike, K. (1969): Geomorphological development of Abukuma Mountains and its surroundings, Northeast Japan. *Japanese Journal of Geology and Geography*. 40;1-24.
- Kopylova, G.N., V.M. Sugrobov, Y.M. Khatkevich (1994): Changes in the behaviour of Thermal Springs and Water wells in the Petropavlosk Target Area, Kamchatka, as Earthquake Precursors. *Volcanology and Seismology*. 16, 2; 145-163.
- Kroschel, K. (1999): *Statistische Nachrichtentheorie*. Springer Verlag; pp. 411.
- Kümpel, H.-J. (1992): About the potential of wells to reflect stress variations in the inhomogenous crust. *Tectonophysics*. 211; 317-336.
- Kümpel, H.-J. (1993): Ground water fluctuations as precursors to earthquakes: state of the art. *Proc. Seminar on Natural Hazards and disasters*, P.R. Reddy (Ed.), Nov. 1993, Hyderabad. NGRI; 9-14.
- Lay, T., T.C. Wallace (1995): *Modern global seismology*. Academic Press; pp. 521.
- Li, G., F. Jiang, J. Wang, P. Zhang (1985): Preliminary results of seismogeochemical research in China. *Pure and Applied Geophysics*. 122; 218-230.
- Liu, K.K., T.F. Yui, Y.H. Yeh, Y.B. Tsai, T.L. Teng (1985): Variations of Radon content in groundwaters and possible correlation with seismic activities in Northern Taiwan. *Pure and Applied Geophysics*. 122; 230-244.
- Matsumoto, N. (1992): Regression analysis of anomalous changes of ground water level due to earthquakes. *Geophysical Research Letters*. 19; 1993-1996.
- Minissale A., D. Abbado, O. Vaselli, Z. Berner, I. Seghedi, F. Tassi, S. Grigorescu., M. Ioane, N. Caradossi, M. Paolieri, D. Badescu, A. Szakacs (1997): Water geochemistry in the Eastern Carpathians. *Przeglad Geologyzny*. 45/10; 2; 1092.
- Mogi, K., H. Mochizuki, Y. Kurokawa (1989): Temperature changes in an artesian spring at Usami in the Izu Peninsula (Japan) and their relation to earthquakes. *Tectonophysics*. 159; 95-108.
- Muir Wood, R. (1994): Earthquakes, strain-cycling and the mobilisation of fluids. In: *Geofluids: Origin, Migration and Evolution of Fluids in Sedimentary Basins*. ed.: J. Parnell. Geological Society Special Publication No. 78; 85-98.
- Muir-Wood, R, G. King (1993): Hydrologic signatures of earthquake strain. *Journal of Geophysical Research*. 98; 22035-22068.
- Müller, B., S. Hettel, B. Sperner (1999): Spannungstransfer in der Kollisions-Subduktionszone Südosteuropas. In: *Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen*; Sonderforschungsbereich 461; Berichtsband 1999; 163-207.
- Nagamine, K., R. Sugisaki (1991): Coseismic changes of subsurface gas composition disclosed by an improved seismo-geochemical system. *Geophysical Research Letters*. 18; 2221-2224.
- Noguchi, M., H. Wakita (1977): A method for continuous measurement of Radon in groundwater for earthquake prediction. *Journal of Geophysical Research*. 82; 1353-1357.
- Nur & Simmons (1966): Stress-induced velocity anisotropy in rock - an experimental study. *Journal of Geophysical Research*. 74; 27; 6667-6674.
- Nur, A. (1972): Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations of t_s/t_p travel times. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 62; 1217-1222.
- Nur, A. (1974): Matzushiro, Japan earthquake swarm: confirmation of the dilatancy-fluid diffusion model. *Geology*. 2; 217-221.

- Nur, A., M.L. Bell, P. Talwani (1973): Fluid flow and faulting, 1: A detailed study of the dilatancy mechanism and premonitory velocity changes. In: Proceedings of the Conference on Tectonic Problems of the San Andreas Fault System, (R.L. Kovach and A. Nur, eds.), Stanford University Publications, Geological Sciences, Vol XIII. 391-404.
- Poreda, R., Y. Chung, R. Horowitz, H. Craig (1978): Investigation of Radon and helium as possible fluid phase precursor to earthquakes. EOS Trans. AGU, 59; 1196.
- Rawlings, J.O., S.G. Pantula, D.A. Dickey (1998): Applied regression analysis. Springer Verlag. pp. 657.
- Reimer, G.M. (1985): Prediction of Central California earthquakes from soil gas helium fluctuation. Pure and Applied Geophysics. 122; 369-375.
- Reimer, G.M. (1990): Helium increase. Nature. 347; 342-343.
- Rikitake, T. (1975): Earthquake prediction. Elsevier, Amsterdam; pp. 358.
- Rikitake, T. (1979): Classification of earthquake precursors. Tectonophysics. 54; 293-309.
- Roeloffs, E.A. (1988): Hydrologic precursors to earthquakes: a review. Pure and Applied Geophysics. 126; 177-209.
- Satake, H., M. Ohashi, Y. Hayashi (1985): Discharge of H₂ from the Atotsugawa and Ushikubi Faults, Japan, and its Relation to Earthquakes. Pure and Applied Geophysics. 122; 185-193.
- Sato, M., A.J. Sutton, K.A. Mc Gee, R. Robinson (1986): Monitoring of hydrogen along the San Andreas and Calveras faults in Central Californian 1980-1984. Journal of Geophysical Research. 91; 12315-12326.
- Scholz, C.H. (1977): A physical interpretation of the Haicheng Earthquake prediction. Nature. 267; 121-124.
- Segovia, N., S. De la Cruz Reyna, M. Mena, E. Ramos, M. Monin, J.L. Seidel (1989): Radon in soil anomaly observed at Los Azufres Geothermal field, Michoacan: a possible precursor of the 1985 Mexico earthquake (M_s = 8.1). Natural Hazards. 1; 319-329.
- Seim, R., G. Tischendorf (1990): Grundlagen der Geochemie. VEB Deutscher Verlag der Grundstoffindustrie, Leipzig.; pp. 632.
- Shapiro, M. H., J.D. Melvin, T.A. Tombrello, M.H. Mendenhall, P.B. Larson, J.H. Whitcomb (1981): Relationship of the 1979 southern California radon anomaly to a possible regional strain event. Journal of Geophysical Research. 86; 1725-1730.
- Shapiro, M.H., A. Rice, M.H. Mendenhall, J.D. Tombrello (1985): Recognition of environmentally cause variations in radon time series. Pure and Applied Geophysics. 122; 309-326.
- Shapiro, M.H., J.D. Melvin, T.A. Tombrello, J. Fong-Liang, L. Giu-Ru (1980): Automated radon monitoring at a hard-rock site in the Southern California transverse ranges. Journal of Geophysical Research. 85; 3058-3064.
- Shi, H., Z. Cai (1986): Geochemical characteristics of underground fluids in some active faults in China. Journal of Geophysical Research. 91; 12282-12290.
- Sperner, B., C. Lillie (2000): Slab Dynamics and its Surface Expression: New Insights from kinematic gravity modellings n the Eastern Carpathians. EOS, Transactions, AGU. 81;48; F1090.
- Steele, S.R. (1981): Radon and hydrologic anomalies on the rough Creek Fault: possible precursors to the M = 5.1 eastern Kentucky earthquake. Geophysical Research Letters. 8; 465-468.
- Stephenson, E.L., A.J. Maltman, R.J. Knipe (1994): Fluid flow in actively deforming sediments: " dynamic permeability" in accretionary prisms. In: Geofluids: Origin, Migration and Evolution of Fluids in Sedimentary Basins. ed.: J. Parnell. Geological Society Special Publication. 78; 113-125.

- Stüben, D., Z. Berner (1999): Seismogeochemische Signale und Stofftransportprozesse im krustalen Spannungsfeld der Vrancea-Subduktionszone. In: Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen; Sonderforschungsbereich 461; Berichtsband 1999; 111-118.
- Sugisaki, R. (1978): Changing He/Ar and N₂/Ar ratios of fault air may be earthquake precursors. *Nature*. 275; 209-211.
- Sugisaki, R. T. Sugiura (1986): Gas anomalies at three mineral springs and a fumarole before an inland earthquake, central Japan. *Journal of Geophysical Research*. 91; 12296-12304.
- Tanamura, Y. T. Sato, M. Ooe, M. Ishiguro (1991): A procedure for tidal analysis with Bayesian information criterion. *Geophysical Journal International*. 104; 507-516.
- Tang, C. (1978): Bases for prediction of the Lungling earthquake and the temporal and spatial characteristics of precursors. *Chinese Geophysics*. 1; 400-424.
- Teng, T.L. (1980): Some recent studies on ground water radon content as earthquake precursor. *Journal of Geophysical Research*. 85; 3089-3099.
- Teng, T.-L., L.-F. Sun (1986): Research on Groundwater Radon as a Fluid Phase Precursor to Earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. 91; 12305-12313.
- Thomas, D. (1988): Geochemical precursors to seismic activity. *Pure and Applied Geophysics*. 126; 241-265.
- Toutain, J.-P., J.-C. Baubron (1999): Gas geochemistry and seismotectonics: a review. *Tectonophysics*. 304; 1-27.
- Toutain, J.P., M. Munoz, F. Poitrasson, A.C. Lienard (1997): Springwater chloride ion anomaly prior to a M_L = 5.2 Pyrenean earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*. 149; 113-119.
- Tsunogai, U., H. Wakita (1995): Precursory chemical changes in groundwater: Kobe earthquake, Japan. *Science*. 269; 61-63.
- Tsunogai, U., H. Wakita (1996): Anomalous changes in groundwater chemistry-possible precursors of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, Japan. *Journal of Physics of the Earth*. 44; 381-390.
- Varshal, G.M., Sobolev, V.L. Barzukov, A.V. Koltsov, B.I. Kostin, T.F. Kudinova, Y.I. Stakeyev, S.P. Tretyakova (1985): Separation of volatile components from rocks under mechanical loading as the source of hydrogeochemical anomalies preceding earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*. 122; 463-477.
- Virk, H.S. (1995): Radon monitoring of microseismicity in the Kangra and Chamba Valleys of Himachal Pradesh, India. *Nuclear Geophysics*. 9; 141-146.
- Virk, H.S., S. Baljinder (1994): Radon recording of Uttarkashi earthquake. *Geophysical Research Letters*. 21; 737-740.
- Wakita, H. (1978): Earthquake prediction in China. *Chinese Geophysics*. 1; 443-453.
- Wakita, H. (1984): Groundwater observations for earthquake prediction in Japan. In: *Proceeding of the International Symposium on continental Seismicity and Earthquakes Prediction*. Seismology Press, Beijing, China. 494-500.
- Wakita, H., G. Igarashi, Y. Nakamura, Y. Sano, K. Notsu (1989): Coseismic radon changes in groundwater. *Geophysical Research Letters*. 16; 5; 417-420.
- Wakita, H., Y. Nakamura, Y. Sano (1988): Short-term and intermediate-term geochemical precursors. *Pure and Applied Geophysics*. 126; 267-278.
- Wang C., Y. Wang, Y. Guo (1984): Some results of groundwater level observation in earthquake areas in china during the past 15 years. In: *A Collection of Papers of the International Symposium on Continental Seismicity and Earthquake Prediction*. Seismological Press. Beijing, China. 501-513.
- Wang, C.Y. (1978): Some aspects of the Tangshan (China) earthquake of 1976. *Chinese Geophysics*. 1; 157-172.

Zhang, W., C. Wang (1990): The efficacy estimation of earthquake prediction by means of radon content in ground water. Collected Papers of the Methods of Earthquake Prediction and estimation of strong seismic risks. Chen Zhangli (ed.). Seismological Press. 121-136.

Zoback, M.D., J.D. Byerlee (1975): The effect of microcrack dilatancy on the permeability of Westerly granite. Journal of Geophysical Research. 80; 752-755.

Zongjin, M. (1990): Earthquake prediction - Nine major earthquakes in China. Springer Verlag. pp.332.

13.4 Glossar: Begriffserläuterungen

ϵ_{dobro} - geschätzte verformende Spannung nach Dobrovolsky (1979);

Δt – Zeitdifferenz zwischen Erdbebenereignis und Monitoringzeitpunkt

Antl. Ges. – Anteil an der Gesamtvarianz

cpm – counts per minute

D - Distanz

D_{epi} - Distanz zum Epizentrum

D_{hypo} - Distanz zum Hypozentrum

dilatancy - Ausdehnung

$E_{\text{n,nach}}$ -Erdbebenaktivität summiert über n Zeiteinheiten nach einer Monitoringmessung

$E_{\text{n,sym}}$ - Erdbebenaktivität summiert über n Zeiteinheiten vor und n Zeiteinheiten nach einer Monitoringmessung

$E_{\text{n,vor}}$ - Erdbebenaktivität summiert über n Zeiteinheiten vor einer Monitoringmessung

e-Parameter - Erdbebenparameter, für jedes Erdbeben separat berechnet

Erdbebenaktivität E - Summe aller e-Parameter innerhalb eines angegebenen Zeitraumes

Erkl. Var – erklärte Varianz

g – gleitende Mittelwerte aus g benachbarten Messungen

GM Typ – gleitender Mittelwert Typ: vor, nach oder sym

k – Verschiebung einer Beobachtung um k Zeiteinheiten: Kreuzkorrelation

lag – Zeitverschiebung k

M - Magnitude

micro crack - Mikrorisse

Momentenmagnitude - logarithmierte gelöste Energie

Multiple Regression - Schätzung des linearen Zusammenhangs einer Variablen durch mehrere andere Variablen

n – Zeiteinheiten; bei Summierung der Erdbebenaktivität benutzt

Permeabilität – Durchlässigkeit, sowohl für Gase als auch für Wasser

p-Niveau - Wahrscheinlichkeitsniveau, Irrtumswahrscheinlichkeit für Ablehnung der Nullhypothese

Prp. zur Gesamtvr. - Proportional zur Gesamtvarianz

Rn - Radon

Strain - verformende Spannung

Stress – angelegte Spannung

Tehygges-Phänomene - **TE**ktonisch-**HY**dro-**GE**ologische-**GE**ochemische-**SE**ismische Phänomene

Tiefe - Tiefe des Erdbebenherdes von der Erdoberfläche.

14 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist eine Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Monitoringparametern³ und der Tektonik. Es wird untersucht, inwieweit eine tektonische Komponente einen Teil der Varianz in Monitoringzeitreihen erzeugt (Abbildung 2, Seite 5). Potentielle Signale oder „Anomalien“ in den Monitoringzeitreihen, die nicht durch große Erdbeben erklärt werden können, werden mit Seismik induzierender tektonischer Aktivität in Zusammenhang gebracht. Um dies zu erreichen, wird eine Funktion, repräsentiert durch die **Erdbebenaktivität**, eingeführt. Die Tektonik wird durch eine Funktion der seismischen Beobachtungen ausgedrückt. Somit fließen auch Prozesse in die Klärung der Varianz von Monitoringparametern ein, welche „nur“ durch kleinere Erdbeben ausgelöst werden. Es wird eine Methodik vorgestellt, die sich eignet, die Sensibilität einer Monitoringstation auf Seismik induzierende Tektonik festzustellen.

I) Informationen aus der Literatur werden miteinander verglichen

Eine Analyse von Vorläufersignalen aus der Literatur gibt einen Überblick, welche Beziehungen zwischen beobachteten Signalen von Monitoringparametern und einzelnen Erdbeben bestehen. Es werden die Beziehungen „Magnitude-Distanz“, „Magnitude-Entfernung“ und „Magnitude-Vorläuferzeit“ für über 239 Beobachtungen dargestellt. Sie zeigen deutliche Begrenzungen in ihren Verteilungen. Es scheinen Obergrenzen in Abhängigkeit von der Magnitude für die potentielle Entfernung, die Dauer und für die Vorläuferzeit einzelner seismischer Ereignisse zu existieren. Aber es können keine Antworten auf die Frage nach dem exakten tektonischen Einfluß auf die Monitoringparameter gegeben werden.

II) Zusammenhangsanalyse

Die tektonische Aktivität wird durch eine Funktion der seismischen Beobachtungen ausgedrückt. Für jedes Erdbeben einer Region wird ein **e-Parameter** definiert. Er entspricht einem Verhältnis zwischen der Erdbebenenergie und/oder einer geometrischen Größe zwischen Beobachtungsstation und Erdbeben. Die tektonische Aktivität oder auch **Erdbebenaktivität E** genannt, berechnet sich aus der Summe dieser e-Parameter innerhalb eines Zeitraums (Siehe Abbildung 15, Seite 22.)

Der Zusammenhang dieser tektonischen Aktivität mit den Monitoringparametern verschiedener Monitoringstationen wird untersucht. Hierfür werden zwei Ansätze verfolgt:

1) Regressiver Ansatz

Es werden die statistischen Zusammenhänge im Rahmen eines regressiven Ansatzes untersucht, um bestmögliche Zusammenhänge zu finden. Damit dies erreicht wird, werden verschiedene e-Parameter über unterschiedliche Zeiträume zu Erdbebenaktivitäten summiert und die Monitoringparameter systematisch transformiert (gleitende Mittelwerte, Differenzen).

Am Beispiel von zwei Multiparameter-Datensätzen werden die berechneten Erdbebenaktivitäten durch mehrere Variablen mit Hilfe der **Multiplen Regression** geschätzt. Dabei werden sowohl präseismische als auch postseismische Zusammenhänge analysiert. Für beide Zusammenhänge wurden Korrelationen zwischen geschätzter und beobachteter Erdbebenaktivität von $r > 0,8$ ermittelt. Durch den Einsatz von Multiparameter-Datensätzen (Vrancea-Zone, Kapitel 8) kann festgestellt werden, dass die Monitoringvariablen auf prä- und coseismische tektonische Aktivität reagieren. Zudem kann bei bestehender Sensibilität ein Bezug der Faktoren zur räumlichen Verteilung der Erdbebenaktivität hergestellt werden (Entfernung und Tiefe).

³ **Monitoringparameter/-zeitreihe:** gemessene hydrogeologische, hydrochemische oder gasgeochemische Parameter. Erdbeben werden nicht als Monitoringparameter bezeichnet.

Die Ergebnisse der Vrancea-Zone lassen vermuten, dass es prinzipiell möglich ist, unter günstigen Bedingungen die hier definierten Erdbebenaktivitäten E über einen bestimmten Zeitraum auch für den präseismischen Fall zu schätzen. Es muss angemerkt werden, dass dies nicht heißt, dass einzelne seismische Ereignisse vorhergesagt werden können. Bei den Ergebnissen der Vrancea-Zone ist zu beachten, dass im beobachteten Zeitraum die Spanne der registrierten Erdbeben zwischen Magnitude 3 und 5,5 lag. Es ist nicht klar wie das System bei Erdbeben mit höherer Energie reagiert. Die Verteilung der b-Koeffizienten in den Multiplen Regressionen zeigen, dass erst durch die Betrachtung mehrerer Faktoren auch Aspekte der räumlichen Verteilung der Tektonik aufgelöst werden können.

Für zwei weitere Datensätze (Japan, Kapitel 9 und Kamchatka, Kapitel 10) liegen nur einzelne Monitoringvariablen vor. Für diese Datensätze werden ebenfalls Erdbebenaktivitäten E errechnet und mit den gleitenden Mittelwerten und Differenzen der Monitoringparameter (Radon bzw. Chloridkonzentration) verglichen. Als statistisches Untersuchungsmittel dient die Kreuzkorrelation. Es werden nur für den Japandatensatz der KSM-Station Korrelationen zwischen beobachteter und geschätzter Erdbebenaktivität mit $r > 0,5$ ermittelt.

2) Signalansatz

Für zwei Monitoringzeitreihen (Japan: Radon, Kamchatka: Chlorid) werden über besonders starke Änderungen in der beobachteten Variable pro Zeit Signale definiert. Diese Signale werden anschließend mit den Erdbebenaktivitäten verglichen. Auch wenn keine hohen linearen Kreuzkorrelation für beide Datensätze beobachtet werden können, so fallen doch viele Signale mit erhöhter Erdbebenaktivität zusammen. Das besondere ist die Tatsache, dass für Zeiträume ohne große Erdbeben (Magnitude > 6) aber mit erhöhter Erdbebenaktivität Signale in den Monitoringzeitreihen identifiziert werden können.

Die Ergebnisse aus den Datensätzen von Japan und Kamchatka zeigen, dass die Analyse von Zusammenhängen zwischen Monitoringzeitreihen und Erdbebenzeitreihen mit der Methode der Erdbebenaktivitäten E eine Alternative gegenüber dem Einsatz homogener geophysikalischer Modelle für die Untersuchung des Bezugs einzelner Erdbebenereignisse zu einer Monitoringzeitreihe ist (Beispiel: Dobrovolsky's „halfspace Modell“).

III) Beispiel Vorläufersignal Kobe

Am Beispiel eines in der Literatur viel zitierten Vorläufersignals wird exemplarisch gezeigt, dass der Verlauf einer hydrochemischen „Anomalie“ im Vorfeld des großen Kobeerdbebens auch mit dem Verlauf der Erdbebenaktivität vor dem Kobeerdbeben in Zusammenhang gebracht werden kann. Der Kobedatensatz zeigt, dass die hydrochemischen Monitoringparameter sehr gut die Variabilität der Erdbebenaktivität im Vorfeld des Kobeerdbebens nachvollziehen. Dieses Ergebnis besitzt Relevanz für die Interpretation der Signale einzelner Erdbeben aus der Literatur (siehe oben). Es stellt die bisherige Form der Interpretation, ein Signal-ein Erdbeben, in Frage. Mit der Methodik der Erdbebenaktivitäten kann geprüft werden, ob vermeintliche Vorläufersignale großer Erdbeben auch auf tektonische Prozesse im Vorfeld des Erdbebens zurückgeführt werden können. Hier zeigt sich der Vorteil des Versuchs einer ganzheitlichen Betrachtung gegenüber der bisherigen Vorgehensweise, der Suche nach Vorläufersignalen großer Ereignisse.

Das Beispiel des Kobeerdbebens veranschaulicht, dass die in der Literatur angeführten Erdbeben bezogenen Signale nicht unbedingt einzelnen herausragenden Erdbebenereignissen zugeordnet sein müssen, sondern unter Umständen im Zusammenhang mit dem gesamttektonischen Prozess gesehen werden müssen.

Schlussfolgerungen

Es kann gezeigt werden, dass es sich bei der durch Tektonik erzeugten Varianz von Monitoringparametern nicht um zeitlich begrenzte/punktuell auftretende Anomalien handelt, sondern um eine reguläre Komponente der Varianz erzeugenden Faktoren (vergleiche Abbildung 2). Diese Schlussfolgerung wurde nicht durch Analyse einzelner Erdbeben sondern durch die Betrachtung der seismischen Aktivität in Form einer Funktion möglich. Die Ergebnisse der Zusammenhangsanalysen

sind trotz Vernachlässigung der aseismischen Komponente signifikant. Die verwendete Methodik eignet sich, um bestehende Datenbestände von Monitoringzeitreihen auf ihre Sensibilität bezüglich der Seismik induzierenden Tektonik zu untersuchen. Weiterhin eignet sie sich als Entscheidungskriterium, inwiefern ein weiteres Monitoring sinnvoll ist, um Erdbeben bezogene Signale zu untersuchen und welche Parameter für die Untersuchung besonders günstig sind. Bestehende Messstationen können auf Basis der Untersuchung in ein Monitoringnetzwerk aufgenommen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass jede Station individuell bezüglich der Erdbebenaktivität geeicht werden muss. Diese Daten können ohne große zusätzliche Kosten und ohne großen Aufwand in ein Modell für die Erdbebenvorhersagestrategie integriert werden (nachdem die Sensibilität auf Seismik induzierende Tektonik festgestellt wurde). Ein Monitoringnetz könnte Abschätzungen verbessern.