

Analyse des seismischen Rauschens im Großraum Bukarest

Diplomarbeit

eingereicht von

Jörn Groos

Februar 2007

Referat: Prof. Dr. Friedemann Wenzel
Korreferat: PD Dr. Joachim Ritter
Abgabe: 7. Februar 2007

Universität Karlsruhe
Geophysikalisches Institut
Hertzstr. 16
76187 Karlsruhe

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Quellen seismischer Bodenbewegung	3
2.1.1	Meeresmikroseismik.....	3
2.1.2	Anthropogene Quellen.....	4
2.1.3	Wind	7
2.1.4	Einfluss der Bebauung	8
2.1.5	New Global Noise Model	8
2.2	Rauschen im Zeitbereich.....	9
2.2.1	Stochastischer Zufallsprozess	9
2.2.2	Normalverteilung	12
2.2.3	Stationäre stochastische Prozesse.....	15
2.2.4	Zentraler Grenzwertsatz	15
2.2.5	Mehrgipfelige Verteilungen	15
2.3	Rauschen im Frequenzbereich.....	17
2.3.1	Spektralanalyse	17
2.3.2	Leistungsdichtespektrum.....	18
2.4	Analyse seismologischer Zeitreihen	19
2.4.1	Zeitbereich.....	20
2.4.2	Frequenzbereich.....	28
2.5	Frequenz-Wellenzahl-Analyse.....	30
3	Daten	33
3.1	URS-Datensatz.....	33
3.2	Erdbeben.....	35
3.3	Meteorologische Daten.....	36
3.4	Ausgewertete Zeiträume	37
3.5	Datenverarbeitung.....	37
4	Resultate	41
4.1	Frequenzbereich 8 bis 40 mHz.....	42
4.2	Frequenzbereich 40 mHz bis 0.6 Hz	48
4.2.1	Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz	49
4.2.2	Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz	54
4.2.3	Frequenzbereich 0.18-0.6 Hz	58
4.3	Frequenzbereich 0.6 bis 1 Hz.....	64
4.4	Frequenzbereich 1-25 Hz	68
4.5	Frequenzbereich 25-45 Hz	75
4.6	Rauschspektren.....	77
5	Zusammenfassung	81
	Literaturverzeichnis	85
	Abbildungsverzeichnis	89
	Tabellenverzeichnis	92
	Programmbeschreibungen	93
	Windgeschwindigkeiten	99

1 Einleitung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 461 "Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen" wurde mit dem mobilen **K**arlsruher **B**reit**B**and **A**rray (KABBA) von Oktober 2003 bis August 2004 mit 31 Seismometern an 34 Standorten im Großraum Bukarest die Bodenschwinggeschwindigkeit kontinuierlich gemessen. Dabei wurde eine enge und gleichmäßige Überdeckung des Innenstadtbereichs angestrebt. Es wurden mehrheitlich STS-2 Seismometer mit einer Eigenperiode von 120 Sekunden verwendet und alle Stationen mit einer Abtastrate von 100 Hz betrieben (Ritter et al., 2005). Dieser Datensatz erlaubt eine Untersuchung des urbanen seismischen Rauschens im Frequenzbereich von 8 mHz bis 45 Hz in Abhängigkeit von Zeit und Ort. Bei der Anwendung neuer Techniken, die mit Hilfe von geeigneten Messungen des seismischen Rauschens die oberflächennahe Untergrundbeschaffenheit erkunden, ist eine gute Kenntnis des urbanen seismischen Rauschens von großem Interesse. Ebenso wird diese Kenntnis benötigt, um optimale Standorte für seismische Überwachungsnetze zu finden.

Ziel dieser Arbeit ist eine Charakterisierung und Quantifizierung des urbanen seismischen Rauschens am Beispiel der Stadt Bukarest. Um Änderungen des seismischen Rauschens in Abhängigkeit von der Zeit und der Frequenz untersuchen zu können, sollen Langzeit-Spektrogramme berechnet werden, die mehrere Wochen umfassen. Das seismische Rauschen soll im Zeit- und Frequenzbereich quantifiziert und der Einfluss meteorologischer Parameter untersucht werden. Prominente Quellen des seismischen Rauschens in Bukarest sollen identifiziert und nach Möglichkeit mit Array-Verfahren lokalisiert werden.

Zu Beginn der Arbeit werden die wichtigsten bereits bekannten Eigenschaften des seismischen Rauschens und die im Großraum Bukarest zu erwartenden Quellen seismischer Bodenbewegungen kurz zusammengefasst. Spektrogramme, Rauschspektren und das verwendete Array-Verfahren, sowie die wichtigsten theoretischen Grundlagen, werden beschrieben. Ein im Rahmen dieser Arbeit entwickelter und umgesetzter statistischer Ansatz zur automatischen Bestimmung von Rauschamplituden im Zeitbereich wird vorgestellt. Anschließend werden die zur Verfügung stehenden Daten und die daran vorgenommene Datenverarbeitung beschrieben. Abschließend werden die gewonnenen Resultate, aufsteigend nach Frequenzbereichen gegliedert, präsentiert.

2 Grundlagen

2.1 Quellen seismischer Bodenbewegung

Im Folgenden werden die wichtigsten bekannten Quellen seismischer Bodenbewegung, die im Großraum Bukarest in dem untersuchten Frequenzbereich zwischen 8 mHz und 45 Hz erwartet werden können, kurz zusammengefasst und ihre wichtigsten Eigenschaften dargestellt. In aktueller Literatur wird zwischen seismischen Rauschen tiefer Frequenz (microseism) und hoher Frequenz (microtremor) unterschieden (Bard et al., 2004). Die Grenze zwischen beiden Frequenzbereichen liegt bei etwa 1 Hz. Als dominierende Quellen des tieffrequenten seismischen Rauschens gelten die Meeresmikroseismik und großräumige meteorologische Ereignisse während im hochfrequenten Bereich anthropogene Aktivitäten als Quellen des seismischen Rauschens vorherrschen. Das Wellenfeld des seismischen Rauschens im Frequenzbereich < 1 Hz setzt sich überwiegend aus Rayleigh-Wellen der Grundmode zusammen. Die Zusammensetzung des Wellenfeldes bei höheren Frequenzen ist noch unklar und umstritten. Aktuelle Untersuchungen weisen auf eine Mischung aus P-Wellen, Rayleigh-Wellen der Grundmode und Oberflächenwellen höherer Ordnung hin (Bard et al., 2004).

2.1.1 Meeresmikroseismik

Als Meeresmikroseismik wird die seismische Bodenunruhe aufgrund der Wasserbewegungen der Ozeane und großen Wasserflächen bezeichnet. Die Meeresmikroseismik ist eine konstante, weltweit aktive Quelle seismischer Bodenbewegung in einem Frequenzbereich zwischen 0.04 bis 0.6 Hz (Haubrich und McCamy, 1969). Obwohl die Meeresmikroseismik bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts beobachtet und untersucht wird, sind ihre Ursachen und die zugrunde liegenden Mechanismen noch nicht vollständig verstanden. Analysen der Partikelbewegung und Phasenbeziehungen von Meeresmikroseismikmessungen an Land und am Meeresboden weisen auf eine Ausbreitung hauptsächlich als Grundmode der Rayleigh-Welle hin (Barstow et al., 1989). Für die Energieeinkopplung von den Schwerewellen des Wassers in den Untergrund konnten bislang zwei unterschiedliche Mechanismen identifiziert werden, die jeweils daraus resultierende Meeresmikroseismik wird als primäre bzw. sekundäre Meeresmikroseismik bezeichnet.

Primäre Meeresmikroseismik

Die unmittelbare Einkopplung von Energie erfolgt durch die von den Wasserwellen verursachten Druckänderungen auf den Meeresboden. Das Spektrum der angeregten seismischen Bodenbewegungen entspricht dem der Wasserschwerewellen und weist ein Leistungsdichtemaximum im Frequenzbereich zwischen 0.04 bis 0.1 Hz auf (Bromirski et al., 1999). Die Druckänderung durch die Schwerewellen nimmt jedoch exponentiell mit der Wassertiefe ab, so dass dieser Mechanismus nur im küstennahen Flachwasserbereich Meeresmikroseismik verursachen kann. Die genauen Prozesse der Einkopplung sind noch nicht verstanden. Vermutet wird eine Wechselwirkung der Wasserschwerewellen mit dem ansteigenden Meeresboden und/oder mit dem Brechen der Wasserwellen an der Küstenlinie (Hasselmann, 1963). Die auf diese Weise eingekoppelte seismische Energie ist gegenüber der sekundären Meeresmikroseismik gering. Die primäre

Meeresmikroseismik liegt oftmals unterhalb der Detektionsschwelle (Bromirski et al., 1999).

Sekundäre Meeresmikroseismik

Die weitaus stärkere, sekundäre Meeresmikroseismik im Frequenzbereich zwischen 0.1 bis 0.6 Hz wird durch nicht-lineare Effekte stehender Wasserschwerewellen verursacht, wodurch ein Teil der Druckänderungen in der Wassersäule nicht mit der Tiefe abklingt und so auch im Tiefwasserbereich Meeresmikroseismik anregen kann. Die Frequenz der Druckänderungen ist wieder abhängig vom Spektrum der Wasserschwerewellen und liegt etwa bei der doppelten Frequenz des spektralen Maximums der Wasserschwerewellen. Dieser Mechanismus der Meeresmikroseismik-Anregung wurde zuerst von Longuet-Higgins (1950) beschrieben. Stehende Meereswellen bilden sich im küstennahen Bereich durch die Überlagerung einlaufender Wellen der Dünung mit denen an den Küsten reflektierten auslaufenden Wellen gleicher Frequenz. Diese stehenden Wellen galten lange als Hauptursache der sekundären Meeresmikroseismik. Neuere Untersuchungen (Webb, 1998) zeigen jedoch, dass die Hauptenergie der sekundären Meeresmikroseismik im tiefen Ozeanbereich angeregt wird. Als Hauptursache gelten entgegenlaufende Wasserwellen, die durch mehrere gegenläufige Sturmsysteme verursacht werden sowie im Einflussgebiet eines Sturmtiefs erzeugte stehende Wellen aufgrund sich rasch ändernder Windrichtungen („local seas“) innerhalb des Systems (Bromirski et al., 1999; Kibblewhite und Ewans, 1985). Das Frequenzspektrum der Wasserwellen sowie die vorherrschenden Wellenhöhen und Wellenrichtungen werden als Wellenklima (wave climate) bezeichnet (Bromirski et al., 1999).

Spektrum der sekundären Meeresmikroseismik

Das Spektrum der Meereswellen und damit das der sekundären Meeresmikroseismik wird hauptsächlich beeinflusst durch die Geschwindigkeit des anregenden Windes und der Angriffsfläche des Windes auf die Wasseroberfläche (fetch). Mit zunehmender Windgeschwindigkeit und Größe der Angriffsfläche verschiebt sich das spektrale Maximum der Meereswellen zu tieferen Frequenzen (Bromirski und Duennebie, 2002). Abhängig von der Entfernung zum Quellgebiet kann der spektrale Verlauf der beobachteten sekundären Meeresmikroseismik komplexe Muster zeigen. Aufzeichnungen küstennaher Stationen zeigen häufig starke Frequenzänderungen des Leistungsdichtemaximums aufgrund sich ändernder Windgeschwindigkeit und geographischen Ausbreitung während sich ein Sturmsystem entwickelt und wieder abflaut. (Bromirski und Duennebie, 2002). Weit entfernte Stationen beobachten aufgrund von Dispersion und Dämpfung der Oberflächenwellen häufig nur noch eine sehr schmalbandige sekundäre Meeresmikroseismik bei relativ tiefen Frequenzen zwischen 0.09 bis 0.18 Hz und ein leichtes Ansteigen der Frequenz beim Abklingen der Anregung.

2.1.2 Anthropogene Quellen

Durch den Mensch verursachtes seismisches Rauschen ist überwiegend hochfrequent und zeigt sowohl im Zeit- als auch im Frequenz-Bereich deutliche Tag/Nacht und Werktag/Feiertag Unterschiede (Yamanaka et al., 1993). Die Einkopplung elastischer Schwingungen in den Untergrund erfolgt hauptsächlich durch Verkehr, Industriemaschinen und dadurch angeregte Bauwerksschwingungen.

Verkehr

Sämtliche vom Mensch benutzten Verkehrsmittel führen zu Einkopplung elastischer Schwingungen in den Untergrund. Den größten Anteil haben Straßen und Schienenverkehr, ebenfalls möglich ist die Einkopplungen durch von Luftfahrzeugen verursachte Luftdruckschwankungen und durch von der Schifffahrt erzeugten Wellenschlag. Im Falle des Straßenverkehrs erfolgt die Einkopplung im Frequenzbereich von 2-30 Hz und wird durch Neigen und Federn der Fahrzeuge (2-10 Hz) sowie durch die Übertragung von Achsvibrationen über die Räder auf den Untergrund (10-30 Hz) verursacht. Amplitude und Spektrum der angeregte Bodenbewegung werden von der Fahrzeuggeschwindigkeit, dem Straßenzustand (eben-uneben; Schlaglöcher; Schienen), den Fahrzeugeigenschaften sowie der Untergrundbeschaffenheit beeinflusst (Coward et al., 2003).

Fahrende Züge verursachen aufgrund von Oberflächen-Unregelmäßigkeiten der Schienen und Räder sowie Höhendifferenzen des Schienenpaares und beim Überfahren von Schwellen und Weichen Vibrationen, die in Gleisbett und Untergrund einkoppeln. Dabei kann ein Zug als Reihe sich bewegender Punktlasten aufgefasst werden (Chen et al., 2004). Das Spektrum der angeregten Bodenbewegung zeigt in der Regel mehrere dominante Frequenzen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Zuges, dem Fahrgestellabstand, dem Achsabstand, der Zuglänge und dem Schwellenabstand sowie den Eigenfrequenzen des Gleisbetts und des Untergrundes. Charakteristisch sind die Passier-Frequenzen der Achsen (f_{achs}) und Drehgestelle (f_{dreh}) sowie der Bahnschwellen (f_{schw}) und deren Obertöne, die sich aus der Zuggeschwindigkeit und den entsprechenden Abständen ergeben. Mit zunehmender Länge des Zuges können aufgrund unterschiedlicher Drehgestellabstände und unterschiedlicher Masse von verschiedenen Waggonen auch tiefere Frequenzen angeregt werden (Degrande und Schillemans, 2001). Tabelle 2.1 zeigt die von einem typischen Güterzug bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten am stärksten angeregten Frequenzen. In Europa am häufigsten verwendete Güterwaggonen haben zwei Drehgestelle im Abstand von 15 Metern mit einem Achsabstand von 2 Metern. Der übliche Schwellenabstand beträgt 0.6 Meter.

Geschwindigkeit [km/h]	f_{dreh} [Hz]	f_{achs} [Hz]	f_{schw} [Hz]
5	0.09	0.70	2.31
20	0.37	2.78	9.26
30	0.55	4.17	13.88
50	0.93	6.95	23.15
70	1.30	9.72	32.40
100	1.85	13.88	46.30
120	2.20	16.70	66.70
160	2.97	22.20	74.00

Tabelle 2.1: Angeregte Frequenzen in Abhängigkeit von der Zug-Geschwindigkeit nach (Degrande und Schillemans, 2001).

Industriemaschinen

Quellen sehr schmalbandiger Vibrationen mit Frequenzen ≥ 1 Hz sind in Industrie, Gewerbe und Gebäudetechnik weit verbreitete Drehstrom-Elektromotoren im Leistungsbereich zwischen wenigen Watt und 2000 MW. Die Anwendung reicht z. B. von Lüftermotoren, Klimaanlage, Aufzügen, Förderbändern, Pumpen Schmiedehämmern, Papierwalzen, Kalkmühlen bis hin zu Großgeneratoren zur Stromerzeugung. Die Einkopplung von elastischen Schwingungen in den Untergrund erfolgt zum einen über den angetriebenen Mechanismus (z. B. Schmiedehammer)

und durch die von Unwuchten des Rotors erzeugten mechanischen Schwingungen der Motorachse, die über das Maschinenfundament in den Untergrund einkoppeln. Die Drehfrequenz f_{ds} der Motoren ist von der Anzahl ihrer Pole p und der Frequenz f_0 des antreibenden Drehstroms (Betriebsfrequenz) abhängig.

$$f_{ds} = 2 \frac{f_0}{p} \quad (2.1)$$

Dies gilt jedoch nur für Drehstrom-Elektromotoren, die synchron mit der Betriebsfrequenz laufen. Wird ein gewisses Drehmoment überschritten, bleibt der Motor stehen. Da solche Motoren nicht alleine anfahren können und aufwendig mit Hilfsmotoren mit der Betriebsfrequenz synchronisiert werden müssen, sind in der Industrie asynchrone Drehstrom-Motoren wesentlich verbreiteter. Diese Motoren entwickeln konstruktionsbedingt nur dann ein Drehmoment, falls sich der Rotor des Motors mit einer Frequenz kleiner der Betriebsfrequenz dreht. Der Frequenzunterschied wird als Frequenzschlupf bezeichnet. Der maximal mögliche Frequenzschlupf eines Motors wird in Prozent der Betriebsfrequenz angegeben. Dieser Frequenzschlupf erlaubt ein Anfahren der Motoren gegen bestehende Drehwiderstände. Mit zunehmender Polzahl nimmt der maximale Frequenzschlupf technisch bedingt ab. Drehstrom-Motoren sind international gemäß der Norm IEC 60034 (entsprechend DIN EN 60034) normiert. Diese Norm beinhaltet auch Grenzwerte für die Stärke mechanischer Schwingungen, die von Drehstrom-Motoren ausgehen dürfen. Die direkt am Maschinenlager gemessenen mechanischen Schwingungen im Frequenzbereich von 2-1000 Hz dürfen eine maximale Schwinggeschwindigkeit von 2.8 mm/s nicht überschreiten. Drehstrom-Motoren werden entweder direkt mit der Netzfrequenz (50 Hz bzw. 60 Hz) oder mit Frequenz-Umrichtern betrieben, die ein nahezu stufenloses Regeln der Betriebsfrequenz zwischen 0 und dem doppelten der Netzfrequenz erlauben. Tabelle 2.2 enthält die Drehfrequenzen für synchrone (f_{ds}) und typische Frequenzbereiche für asynchrone (f_{da}) Drehstrom-Motoren mit üblichen Polzahlen bei der in Europa verwendeten Netzfrequenz von 50 Hz. Die Angabe der Frequenzbereiche bei asynchronen Drehstrom-Motoren beruht auf denen definierter Standardmotoren gemäß IEC 60034. Da jedoch für viele Anwendungen auch Sondermotoren gefertigt werden, kann dies nur als Orientierung dienen.

Pole	f_{ds} [Hz]	f_{da} [Hz]
2	50.000	45.75-49.77
4	25.000	22.00-24.85
6	16.670	13.80-16.53
8	12.500	10.50-12.38
10	10.000	
12	8.330	
16	6.250	
24	5.000	
48	2.083	

Tabelle 2.2: Typische Drehfrequenzen von Drehstrom-Motoren bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz.

Durch Drehstrom-Motoren verursachte seismische Bodenbewegung wurde bereits mehrfach beobachtet. Bereits seit den 1960er Jahren ist ein an ruhigen Stationen in ganz Deutschland messbares spektrales Maximum bei 2.083 Hz bekannt. Eine umfassende Untersuchung dieses Phänomens durch Bokelmann und Baisch (1999)

mit dem **German Regional Seismic Network (GRSN)** ergab, dass vermutlich wenige, besonders starke Quellen das Signal verursachen. Eine Quelle wurde im westlichen und eine im östlichen Teil Deutschlands vermutet. Als wahrscheinlichste Quelle gelten 48-polige synchrone Drehstrom-Motoren, die z. B. als Kompressoren in der Industrie oder als langsam drehende Generatoren in Wasserkraftwerken zum Einsatz kommen. Von schnell drehenden 2-poligen Generatoren, die von Dampfturbinen angetrieben werden, ist bekannt, dass sie im Umkreis von mehreren hundert Metern empfindliche Geräte stören und Gebäude zu Eigenschwingungen anregen können (Evans, 2005).

2.1.3 Wind

Wind entsteht durch stochastische, physikalische Prozesse in der Atmosphäre. Die Schwankungen der Windgeschwindigkeit haben in Abhängigkeit der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse in der Atmosphäre einen tiefperiodischen und einen kurzperiodischen Anteil. Der tiefperiodische, auch makrometeorologische, Anteil mit Periodendauern von einigen Stunden bis zu mehreren Tagen ist Resultat des Großwettergeschehens wie der Bewegung von Hoch- und Tiefdruck-Gebieten und dem Tagesgang der Sonne. Innerhalb dieser großräumigen Luftströmungen werden durch Reibung an der Erdoberfläche turbulente Windströmungen (Böen) mit kurzperiodischen Windgeschwindigkeitsschwankungen mit Periodendauern kleiner 120 Sekunden verursacht (Bachmann, 2003). Das Energiespektrum der Windgeschwindigkeit (Abbildung 2.1), auch Böenspektrum genannt, zeigt im kurzperiodischen Bereich ein Maximum bei einer Periodendauer von etwa 70 Sekunden.

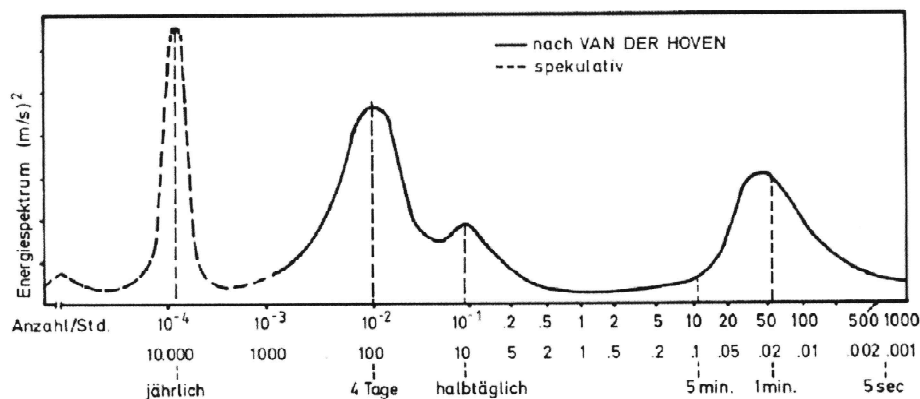


Abbildung 2.1: Böenspektrum nach VAN DER HOVEN (1957).

Das Spektrum der durch den Wind angeregten Bodenbewegung im untersuchten Frequenzbereich zwischen 0,008-45 Hz ist von der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit, der umgebenden Topographie (Bungum et al., 1985), dem Bewuchs und der Bebauung sowie deren Resonanzfrequenzen abhängig. Die Einkopplung erfolgt durch direkte Krafteinwirkung auf den Untergrund und über die Kippbewegungen von Bäumen und Gebäuden unter dynamischer Windlast. Bei Gebäuden können Eigenschwingungen größer dem 7. Oberton angeregt werden (Ward und Crawford, 1966). Im Frequenzbereich um 1 Hz gelten Wind und regionale meteorologische Ereignisse als Hauptursache seismischer Bodenbewegung (Bard et al., 2004). Eine Untersuchung des seismischen Rauschens an einem abgelegenen Standort in New Mexico durch Withers et al. (1996) im Frequenzbereich zwischen 1-60 Hz ergab einen nachweisbaren Einfluss des Windes im gesamten untersuchten Frequenzbereich ab einer Windgeschwindigkeit von 3 m/s. Untersuchungen an verschiedenen Standorten bestätigen solche

Windgeschwindigkeits-Schwellwerte zwischen 3-5 m/s. Der Schwellwert ist abhängig von den lokalen Umgebungsbedingungen und dem Hintergrundrauschen (Carter et al., 1991; Young et al., 1996). Das Spektrum des durch Wind verursachten seismischen Rauschens im Großraum Bukarest kann, aufgrund der flachen Topographie, als maßgeblich von Windgeschwindigkeit und Bebauung beeinflusst erwartet werden.

2.1.4 Einfluss der Bebauung

Indirekte anthropogene Quellen seismischer Bodenbewegung sind die Eigenschwingungen von künstlichen Bauwerken, die durch seismische Bodenbewegung natürlichen oder anthropogenen Ursprungs oder direkte Kraftereinwirkung angeregt werden und über das Fundament wiederum in den Untergrund einkoppeln. Eine analytische Untersuchung für Mexico City (Gueguen et al., 2002) ergab, dass Gebäude und Untergrund mit ähnlichen Eigenfrequenzen nach Anregung durch Erdbebenwellen einen signifikanten Einfluss auf das seismische Wellenfeld haben. Die Bodenbewegungen mit Frequenzen entsprechend den Eigenfrequenzen des Untergrundes und der Gebäude waren bei dichter Bebauung deutlich verlängert, der Effekt wird als *site-city seismic interaction* bezeichnet.

Andere Untersuchungen zeigen, dass neben starken Quellen wie Erdbeben auch schwächere Quellen wie z. B. Straßenverkehr und dynamische Windlast Bauwerke und Bauwerksteile zu Schwingungen mit ihren Resonanzfrequenzen und deren Obertönen führen können (Pyl et al., 2004; Ward und Crawford, 1966). Typische Eigenfrequenzen von Gebäuden liegen je nach Bauart, Gebäudehöhe und Grundfläche zwischen 0.2-10 Hz. Eine weitere Quelle sind durch Fahrzeuge angeregte Schwingungen von Straßen- und Bahnbrücken mit üblichen Eigenfrequenzen zwischen 1-4 Hz und deren Obertönen. Dauer und Amplitude der angeregten Schwingungen werden hauptsächlich durch Gewicht und Geschwindigkeit des Fahrzeuges beeinflusst. Bei einem weichen Untergrund kann die durch die schnelle Überfahrt eines schweren Fahrzeuges angeregte und eingekoppelte Bodenbewegung noch in einer Entfernung von über 1000 m gemessen werden (Acernese et al., 2004).

2.1.5 New Global Noise Model

Bereits seit Jahrzehnten werden in der Seismologie **Noise Model (NM)** in Form von mittleren Leistungsdichtespektren (siehe S. 18) für Zeiträume mit schwachem seismischen Rauschen (**Low Noise Model, LNM**) und starkem seismischen Rauschen (**High Noise Model, NHM**) zu Vergleichszwecken verwendet. Dazu wurden Leistungsdichtespektren möglichst zahlreicher Stationen übereinander dargestellt und durch Seismologen ein mittleres Modell angepasst. Die Anpassung erfolgte in Form kurzer, linearer Segmente der Leistungsdichte in Abhängigkeit von der Frequenz. Die ersten LNM und HNM wurden bereits 1959 erstellt und über die Jahrzehnte von zahlreichen Autoren abgeändert (Peterson, 1993). Mit zunehmender Anzahl seismischer Stationen mit breitbandigen Seismometern wurden diese alten Modelle durch das **New Global Noise Model NGNM** bestehend aus **New High Noise Model NHNM** und **New Low Noise Model NLNM** ersetzt (Peterson, 1993). Für das NGNM wurden Messdaten von 75 Stationen weltweit verwendet. Für jede Station wurden sorgfältig Messdaten ausgewählt, die weder von seismischen noch sonstigen transienten Ereignissen belastet waren, um repräsentative Leistungsdichtespektren für schwaches und starkes seismisches Rauschen an jeder Station zu erhalten. Das NGNM umfasst den Periodenbereich von 100.000 bis 0.1 Sekunden und wurde für

Bodenbeschleunigung, Bodengeschwindigkeit und Bodenverschiebung erstellt. Es wird häufig für die Beurteilung bestehender und geplanter Standorte seismischer Stationen verwendet, wie auch für das **German Regional Seismic Network** GRSN (Bormann et al., 1997). Abbildung 2.14 (S. 28) zeigt das seismische Rauschen an einer Station des URS-Array im Vergleich mit dem New Global Noise Model.

2.2 Rauschen im Zeitbereich

Unter Rauschen wird in der Physik allgemein eine zufällige Störgröße mit breitem Frequenzspektrum verstanden, die mathematisch als stochastischer Zufallsprozess beschrieben werden kann (Buttkus, 1991). Die in der Seismologie gemessene Bodenbewegung an einem Ort entsteht durch die Überlagerung seismischer Wellen unterschiedlicher Amplitude und Frequenz voneinander unabhängiger Quellen (Lay und Wallace, 1995). In der Regel sind jedoch nur seismische Wellen einer bestimmten Quelle von Interesse, so dass die Signalanteile anderer Quellen als Rauschen das gewünschte Nutzsignal stören.

2.2.1 Stochastischer Zufallsprozess

Ein stochastischer Prozess ist die mathematische Beschreibung eines zeitlich geordneten, zufälligen Vorganges (Sachs, 1978). Dabei wird eine Zufallsvariable X betrachtet, die jedem Experiment einen Wert x aus der Grundgesamtheit, der Menge aller möglichen Realisierungen der Zufallsvariable, zuweist. Durch n -fache Realisierung des Experiments erhält man eine zeitlich geordnete Stichprobe bzw. einen zeitdiskreten stochastischen Prozess (Sachs, 1978). Eine seismologische Zeitreihe bestehend aus n Messwerten der Bodengeschwindigkeit in nm/s im zeitlichen Messwertabstand Δt ist eine Realisierung eines zeitdiskreten stochastischen Prozesses. Die Differenz zwischen minimalem und maximalem Wert der Stichprobe wird als deren Spannweite bezeichnet.

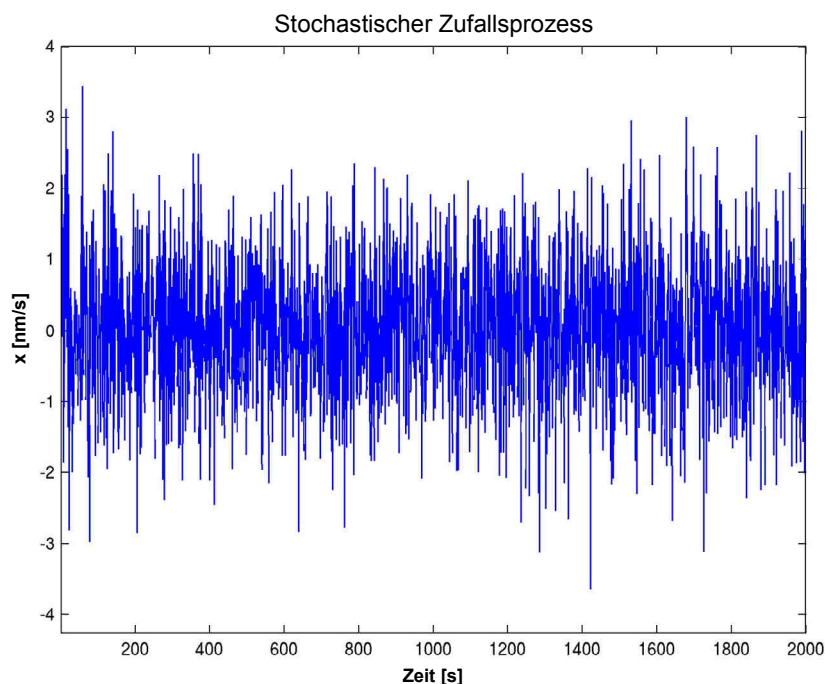


Abbildung 2.2: synthetische Zeitreihe aus Zufallszahlen einer Normalverteilung.

Die in Abbildung 2.2 gezeigte synthetische Zeitreihe wird im Folgenden als stochastischer Prozess der Zufallsvariablen *Bodengeschwindigkeit* betrachtet. Die

Zeitreihe wurde mit numerischen Zufallszahlen einer Normalverteilung mit einem Mittelwert von Null und Standardabweichung von eins erzeugt.

Die grundlegende Eigenschaft eines stochastischen Prozesses ist seine Wahrscheinlichkeitsverteilung. Sie ist über die Verteilungsfunktion

$$F(x) = P(X \leq x) \quad (2.2)$$

definiert, die der Wahrscheinlichkeit P entspricht, mit der die Zufallsvariable X einen Wert kleiner oder gleich x annimmt. Sie ist für reelle Zahlen x definiert und steigt monoton von 0 nach 1 an und wird Summenhäufigkeitsfunktion genannt. Abbildung 2.3 zeigt die Summenhäufigkeitsfunktion der synthetischen Zeitreihe aus Abbildung 2.2.

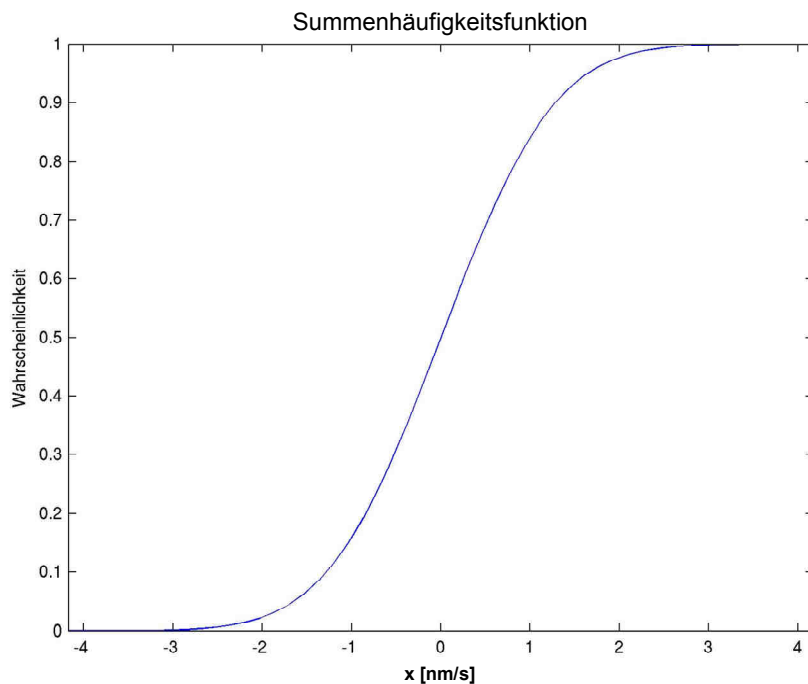


Abbildung 2.3: Summenhäufigkeitsfunktion der synthetischen Zeitreihe aus Abbildung 2.2.

Eine weitere Möglichkeit die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zufallsvariablen X zu beschreiben ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (probability density function, pdf) in Abbildung 2.4. Im Falle einer stetigen Zufallsvariablen wie der Bodengeschwindigkeit entspricht die Verteilungsfunktion der Integration über die Wahrscheinlichkeitsdichte $f(x)$.

$$P(a < X \leq b) = F(b) - F(a) = \int_a^b f(x) dx \quad (2.3)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Zufallsvariable X einen Wert x im Intervall $a < x \leq b$ annimmt entspricht der Fläche unter der Funktion $f(t)$ für diesen Wertebereich. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Zufallsvariable X einen Wert von $-\infty$ bis $+\infty$ annimmt ist 1.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (2.4)$$

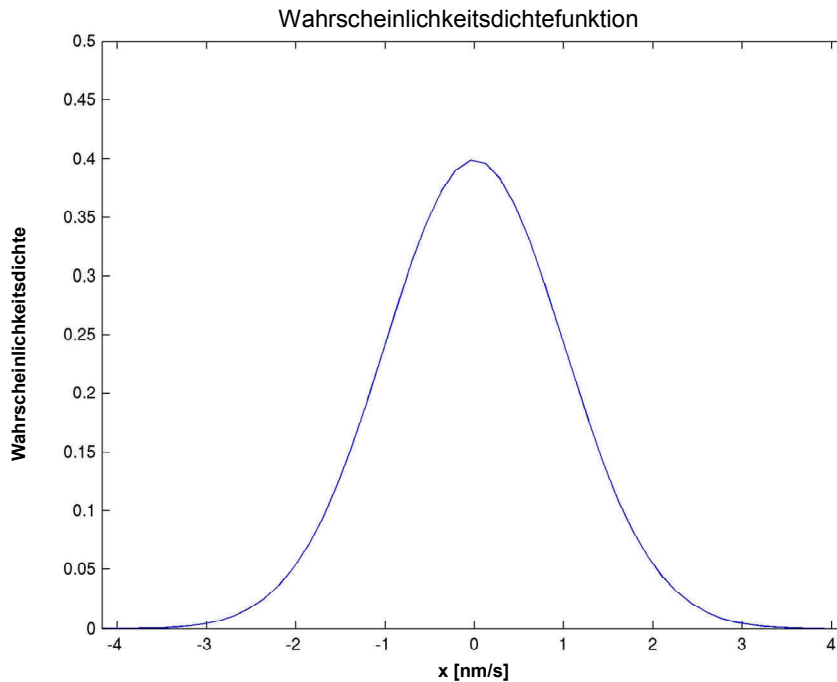


Abbildung 2.4: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der synthetischen Zeitreihe aus Abbildung 2.2.

Eine digitale seismologische Zeitreihe stellt als wertdiskrete Darstellung der Bodengeschwindigkeit streng genommen auch eine wertdiskrete Zufallsvariable dar. Da jedoch die Bodengeschwindigkeit selbst stetig und die Messwerte fein abgestuft sind, darf für die praktische Auswertung seismologischer Zeitreihen von einer stetigen Zufallsvariablen ausgegangen werden.

Ein wichtiges Werkzeug für die Datenauswertung stellt das Histogramm (Abbildung 2.5), auch Häufigkeitsverteilung genannt, dar. Zu ihrer Beschreibung wird der Wertebereich der Stichprobe in m gleich große Werteklassen unterteilt. Die Werteklassen werden entsprechend ihrer absoluten oder relativen Häufigkeit als Rechtecke in dem Koordinaten-System x : Messwert y : absolute/relative Häufigkeit aufgetragen. Bei feiner Abstufung der Werteklassen lässt sich die Häufigkeitsverteilung durch eine Kurve annähern, die mit der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des zugrunde liegenden stochastischen Prozesses über die Breite der Werteklassen und der Werteanzahl der Stichprobe verknüpft ist.

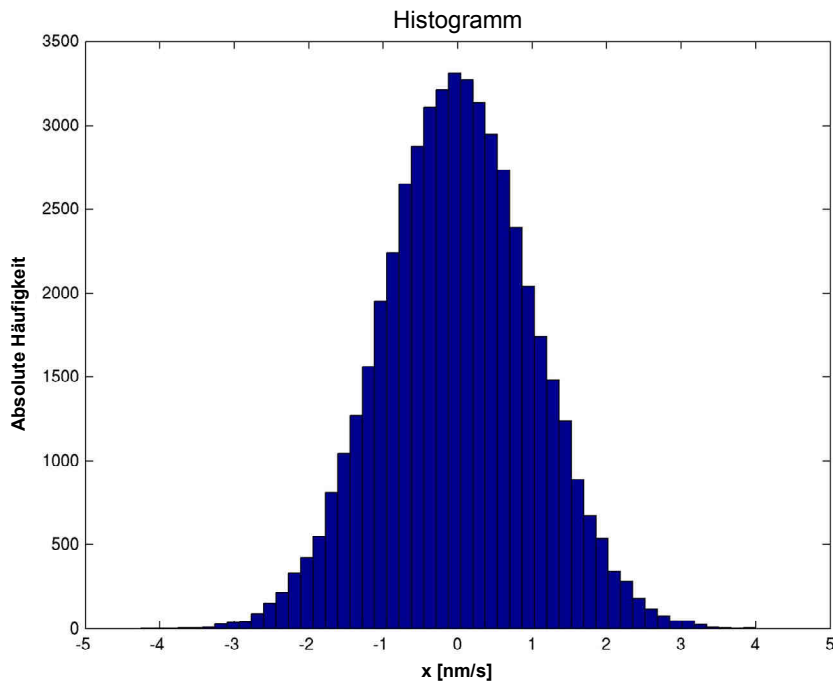


Abbildung 2.5: Histogramm der synthetischen Zeitreihe aus Abbildung 2.2.

Die Häufigkeitsverteilungen von Messwerten einer stetigen Zufallsvariablen X weisen häufig eine symmetrische Glockenform auf, die durch die Funktion

$$y = ae^{-bx^2} \quad (2.5)$$

angenähert beschrieben werden kann und als Gaußsche Glockenkurve bekannt ist. Die beiden Konstanten a und b bestimmen dabei Größe und Form der Glockenkurve.

2.2.2 Normalverteilung

Die Häufigkeitsverteilung der Messwerte von wiederholten Messungen einer konstanten physikalischen Größe weist meist aufgrund zufälliger Messfehler eine bestimmte symmetrische Glockenform mit einem Maximum am realen Wert der Größe und einem Abfall zu extremen Werten hin auf, die Normalverteilung genannt wird. Der in Abbildung 2.2 gezeigte stochastische Prozess ist normalverteilt. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Normalverteilung ist definiert durch

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}. \quad (2.6)$$

Die Normalverteilung wird durch die beiden Parameter Mittelwert μ und Standardabweichung σ vollständig charakterisiert (Sachs, 1978).

Der Schätzwert $\hat{\mu}$ für den Mittelwert μ der Verteilung ist definiert als

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.7)$$

einer Stichprobe der Länge n mit den Werten x_i . Die Standardabweichung ist definiert als positive Quadratwurzel der Varianz σ^2 und dient als Streuungsmaß der Verteilung.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu})^2 \quad (2.8)$$

Der Mittelwert bestimmt die Lage der Normalverteilung in Bezug auf die x-Achse und die Standardabweichung die Form der Normalverteilung. Je größer σ ist, desto breiter wird die Verteilung (Sachs, 1978). Zwischen dem Maximalwert der Normalverteilung und der Standardabweichung besteht der Zusammenhang

$$f_{\max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}. \quad (2.9)$$

Die Verteilung (Abbildung 2.4) des normalverteilten stochastischen Prozesses aus Abbildung 2.2 mit Mittelwert 0 und Standardabweichung 1 wird als standardisierte Normalverteilung bezeichnet.

Eine der günstigen mathematischen Eigenschaften der Normalverteilung ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Anteil der Messwerte bzw. der Fläche unter der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion innerhalb eines bestimmten Wertebereichs (Perzentile) und dem Vielfachen der Standardabweichung.

Es gilt für jede Normalverteilung:

Wertebereich	Perzentile
$\mu \pm 1.96\sigma$	95.0-Perzentile
$\mu \pm 2.58\sigma$	99.0-Perzentile
$\mu \pm 3.29\sigma$	99.9-Perzentile
$\mu \pm 1\sigma$	68.27-Perzentile
$\mu \pm 2\sigma$	95.45-Perzentile
$\mu \pm 3\sigma$	99.73-Perzentile

Tabelle 2.3: Perzentile und entsprechende Vielfache der Standardabweichung einer Normalverteilung.

Für den Zufallsprozess aus Abbildung 2.2 liegen entsprechend 95.45% der Messwerte im Wertebereich zwischen -2 und 2 nm/s (rot) und 99.73% der Messwerte im Wertebereich zwischen -3 und 3 nm/s (grün) (siehe Abbildung 2.6).

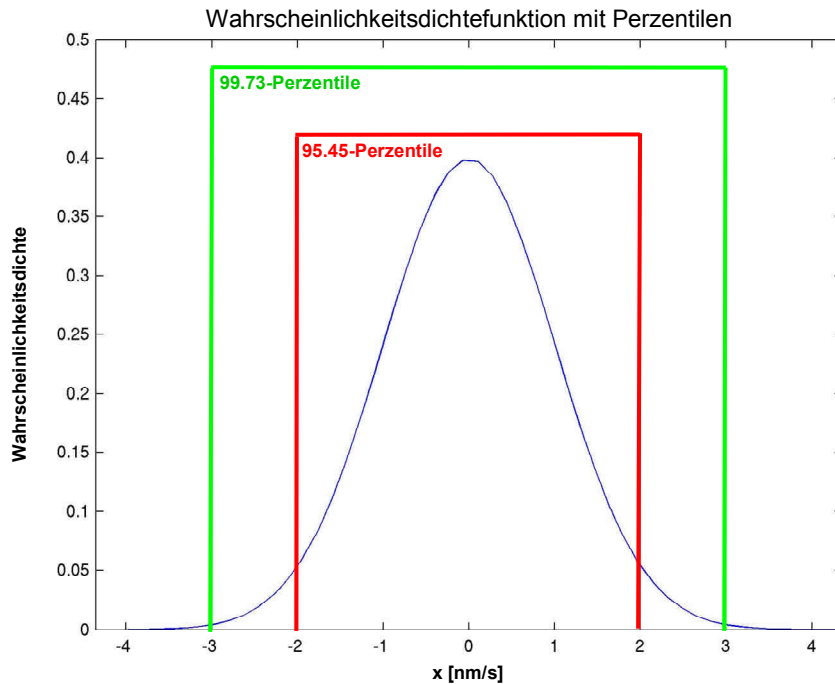


Abbildung 2.6: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der synthetischen Zeitreihe aus Abbildung 2.2 mit 95.45-Perzentile (rot) und 99.73-Perzentile (grün).

Abweichungen von der Normalverteilung

In der Realität treten häufig Abweichungen von der Normalverteilung auf. Dabei wird zwischen zwei Haupttypen unterschieden.

Schiefe (skewness)

Eine Schiefe der Verteilung liegt vor, falls der Hauptanteil der Messwerte nicht in der Mitte, sondern rechts- oder linksseitig davon liegt. Man spricht je nach Lage des Maximums von einer rechts- bzw. linkssteilen Verteilung.

$$\text{Schiefe } \hat{\mu}_3 = \frac{\sum f(x_i - \hat{\mu})^3}{n\hat{\sigma}^3} \quad (2.10)$$

Für eine symmetrische Verteilung beträgt die Schiefe null. Die Schiefe wird positiv für eine rechtssteile und negativ für eine linkssteile Verteilung.

Wölbung, Kurtosis (curtosis)

Neben einer Asymmetrie kann es zu einer Wölbung der Verteilung kommen. Dabei liegt das Maximum der Verteilung entweder höher oder niedriger als bei der Normalverteilung. Ist das Maximum größer, liegt ein positiver Exzess vor. Es besteht ein Werteüberschuss gegenüber der Normalverteilung in der Nähe des Verteilungsmaximums und in den Randbereichen der Verteilung sowie ein Wertemangel an den Verteilungsflanken. Bei einem negativen Exzess mit zu niedrigem Maximum wird die Verteilung flacher. Es besteht ein Werteüberschuss im Flankenbereich und ein Wertemangel beim Verteilungsmaximum und an den Verteilungsenden.

$$\text{Wölbung } \hat{\mu}_4 = \frac{\sum f(x_i - \hat{\mu})^4}{n\hat{\sigma}^4} \quad (2.11)$$

Bei einer Normalverteilung beträgt die Wölbung null. Sie wird positiv im Falle eines positiven und negativ im Falle eines negativen Exzesses. Die Wölbung wird stark durch einzelne, im Vergleich zur Standardabweichung extrem große, Messwerte beeinflusst. Auf Grund dessen, ist sie besonders für sehr lange Zeitreihen wie in der Seismologie, nur zum Erkennen sehr großer Abweichungen von der Normalverteilung geeignet.

2.2.3 Stationäre stochastische Prozesse

Ein stochastischer Prozess $\{x_t\}$ der Zufallsvariable X ist vollständig stationär, falls die Wahrscheinlichkeits-Verteilungen der Prozess-Abschnitte

$$\{x_{t1}, x_{t2}, \dots, x_{tm}\} \text{ und } \{x_{t1+k}, x_{t2+k}, \dots, x_{tm+k}\}$$

für beliebige Zeitpunkte t und jede beliebige natürliche Zahl k identisch sind.

Ein stochastischer Prozess gilt als schwach stationär, falls sich die Parameter Mittelwert und Standardabweichung der Abschnitte nicht mit der Zeit ändern. Üblicherweise wird ein schwach stationärer Zufallsprozess als stationärer Zufallsprozess bezeichnet.

2.2.4 Zentraler Grenzwertsatz

Der zentrale Grenzwertsatz (auch Grenzwertsatz von Lindeberg-Levy, (Bronstein et al., 2001)) besagt, dass die Verteilung der Summe von n unabhängigen Zufallsvariablen X_n , die derselben Verteilung mit unterschiedlichem Mittelwert μ und Varianz σ^2 genügen, mit steigendem $n \rightarrow \infty$ gegen die Normalverteilung strebt. Dieser Grenzwertsatz ist ein Spezialfall der verallgemeinerten Form (Bendat und Piersol, 1986), die ebenfalls für nicht identisch verteilte Zufallsvariablen gilt, falls Mittelwert und Standardabweichung der Zufallsvariablen reelle Zahlen sind (Basler, 1994). Die Anzahl n der Zufallsvariablen, die zu einer Normalverteilung ihrer Summe benötigt werden, ist hauptsächlich abhängig von deren Varianz. Je geringer die Differenz zwischen minimaler und maximaler Varianz, desto kleiner wird n für das Erreichen einer normalverteilten Summe. Die Verteilung einer Zeitreihe, falls sie von der Normalverteilung abweicht, erlaubt Aussagen über die Dominanz und den Charakter einzelner Zufallsprozesse.

2.2.5 Mehrgipfelige Verteilungen

Die Verteilungen periodischer Prozesse weisen mehrere Gipfel auf, deren Anzahl, Gestalt und Lage von der Amplitude und dem Verlauf des periodischen Prozesses abhängen. Typisch ist die zweigipfelige, symmetrische Verteilung einer sinusförmigen Schwingung (Abbildung 2.7).

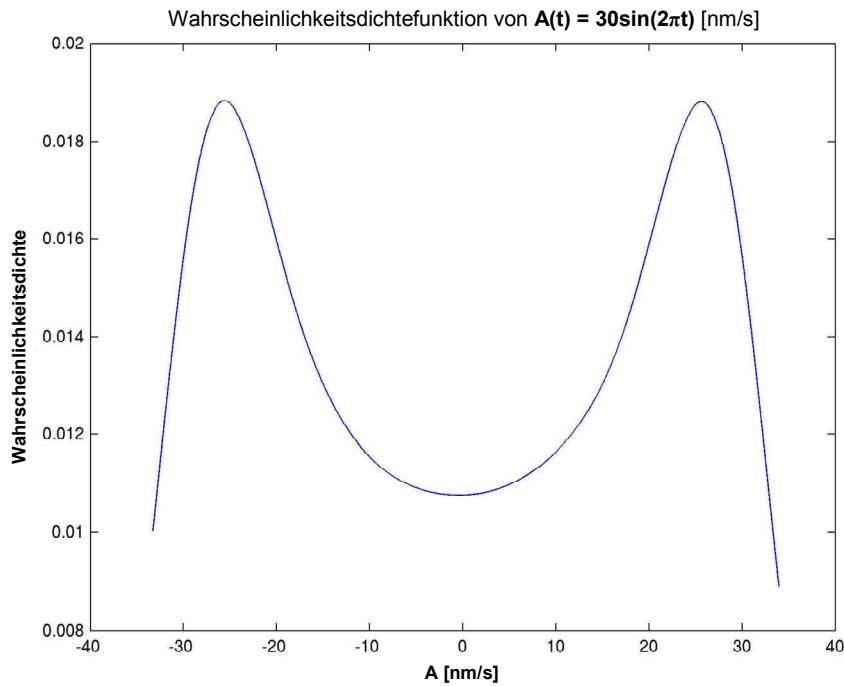


Abbildung 2.7: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der sinusförmigen Schwingung $A(t)=30\sin(2\pi t)$ [nm/s].

Überlagern sich mehrere periodische Schwingungen, können sich symmetrische und unsymmetrische Verteilungen mit mehreren Gipfeln ausbilden (Abbildung 2.8). Mit zunehmender Anzahl an überlagerten periodischen Prozessen nähert sich die Summe in Abhängigkeit von den Spannweitenunterschieden entsprechend dem zentralen Grenzwertsatz wieder einer Normalverteilung an.

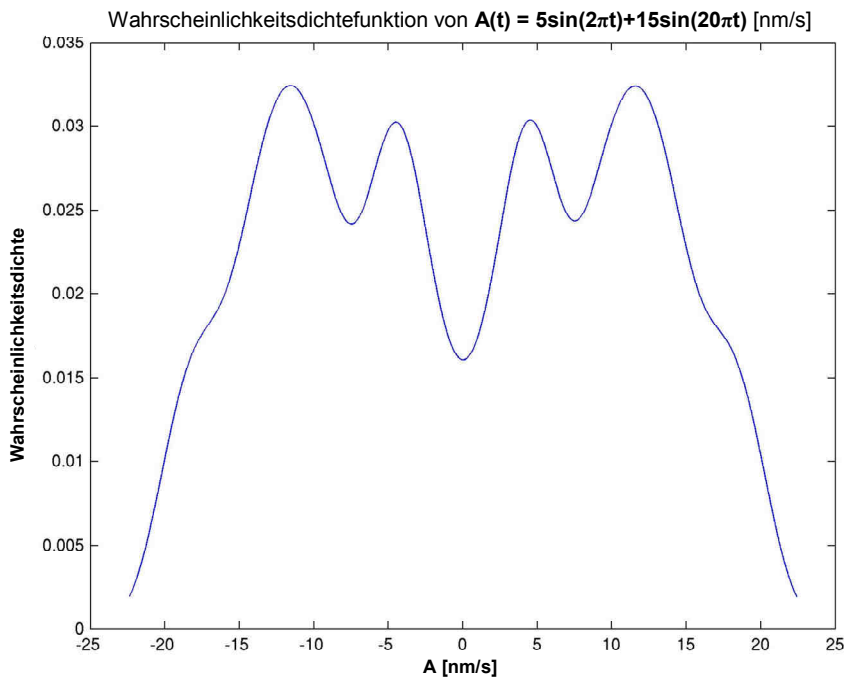


Abbildung 2.8: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Summe aus zwei sinusförmigen Schwingungen $A(t)=5\sin(2\pi t)+15\sin(20\pi t)$ [nm/s].

2.3 Rauschen im Frequenzbereich

Neben der Beschreibung stochastischer Zufallsprozesse im Zeitbereich mit Hilfe ihrer Wahrscheinlichkeitsdichten sowie ihrer Mittelwerte und Standardabweichungen ist die Spektralanalyse ein wichtiges Werkzeug zur Kennzeichnung stochastischer Zufallsprozesse. Sie erlaubt die Untersuchung eines Rauschprozesses auf seinen Frequenzinhalt und den Vergleich des seismischen Rauschens zu verschiedenen Zeitpunkten und an verschiedenen Orten.

2.3.1 Spektralanalyse

Ein transientes Signal $x(t)$ endlicher Länge, das zu einem bestimmten Zeitpunkt beginnt, erfüllt die Bedingung, dass das Integral

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)| dt \quad (2.12)$$

konvergiert. Damit ist die Integrierbarkeitsbedingung des Fourier-Integrals erfüllt, und es kann die Fourier-Transformierte berechnet werden (Buttkus, 1991).

$$\tilde{x}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.13)$$

Die Fourier-Transformierte hat die Einheit

$$[\tilde{x}(\omega)] = [x(t)]s = \frac{[x(t)]}{\text{Hz}} \quad (2.14)$$

Der Betrag der Fourier-Transformierten wird als Amplitudenspektrum des Signals $x(t)$ bezeichnet. Das Integral über das quadrierte Signal $x(t)$ wird als Energie des Signals und das quadrierte Signal als zeitliche Energiedichte aufgefasst:

$$E_{\text{Signal}} = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \quad (2.15)$$

mit der Einheit:

$$[E_{\text{Signal}}] = [x(t)]^2 \cdot s = \frac{[x(t)]^2}{\text{Hz}} \quad (2.16)$$

Die Signalenergie des transienten Signals $x(t)$ ist endlich, und es gilt das Parsevalsche Theorem:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{+\infty} |\tilde{x}(\omega)|^2 \frac{1}{2\pi} d\omega \quad (2.17)$$

Das Betragsquadrat des Amplitudenspektrums ist somit das Energiedichtespektrum des Signals $x(t)$ und kann durch Multiplikation der Fourier-Transformierten mit ihrer komplex konjugierten Form berechnet werden:

$$|\tilde{x}(\omega)|^2 = \tilde{x}(\omega) \tilde{x}^*(\omega) \quad (2.18)$$

Das Energiedichtespektrum von $x(t)$ hat die Einheit:

$$[|\tilde{x}(\omega)|^2] = \frac{[x(t)]^2}{\text{Hz}^2} = \frac{[E_{\text{Signal}}]}{\text{Hz}} \quad (2.19)$$

2.3.2 Leistungsdichtespektrum

Soll ein stochastischer Zufallsprozess im Frequenzbereich betrachtet werden, ergibt sich das Problem, dass für einen zeitlich nicht abklingenden Prozess die Integrierbarkeits-Bedingung für die Fourier-Transformation nicht erfüllt ist, da die Energie des Prozesses theoretisch unendlich ist. In der Realität liegen jedoch nur *Zeitausschnitte* eines stochastischen Prozesses vor, deren Energie wiederum endlich ist und sowohl vom stochastischen Prozess selbst als auch von der Länge des betrachteten Zeitausschnittes abhängt (Buttkus, 1991).

Ist der stochastische Prozess außerdem stationär, bleibt seine mittlere zeitliche Energiedichte konstant. Die mittlere Signalleistung P eines stationären, stochastischen Prozesses $x(t)$ ist definiert als:

$$P = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} |x(t)|^2 dt \quad \text{mit } T_1 < t < T_2 \quad (2.20)$$

Entsprechend dem spektralen Energiedichtespektrum lässt sich nun das spektrale Leistungsdichtespektrum definieren als

$$P(\omega) = \frac{1}{T_2 - T_1} |\tilde{x}(\omega)|^2 \quad (2.21)$$

und $P(\omega)$ hat die Einheit

$$[P(\omega)] = \frac{[x(t)]^2}{\text{Hz}} \quad (2.22)$$

Das Leistungsdichtespektrum (power spectral density, psd) gibt die Verteilung der Gesamtleistung des Prozesses bzw. der Zeitreihe über den Frequenzbereich bzw. die Leistungsdichte pro Frequenzintervall an und erlaubt beispielsweise den Vergleich des seismischen Rauschens im Frequenzbereich zu unterschiedlichen Zeiten und an unterschiedlichen Orten.

2.4 Analyse seismologischer Zeitreihen

Die Quantifizierung des seismischen Rauschens an einem Standort erfolgt im Frequenzbereich durch die Berechnung von Leistungsdichtespektren. Diese werden zur Beurteilung des seismischen Rauschens mit den Leistungsdichtespektren an anderen Stationen oder dem NGNM (siehe S. 8) verglichen. Die Analyse des seismischen Rauschens an den Stationen des GRSN und potentiellen neuen Standorten wurde z.B. auf diese Art durchgeführt (Bormann et al., 1997). Durch die Mittelung zahlreicher Leistungsdichtespektren wird die Bestimmung des Hintergrund-Rauschens angestrebt. Diese Art der Quantifizierung des seismischen Rauschens ist bei einer großen Anzahl an Stationen weitgehend automatisch durchführbar. Vom Analysten selbst müssen lediglich Zeitreihen mit außergewöhnlichen transienten Signalen erkannt und entfernt werden (Bormann et al., 1997).

Im Zeitbereich ist die Quantifizierung des Hintergrund-Rauschens schwierig. Wird die Bodengeschwindigkeit an einem bestimmten Ort als Überlagerung unendlich vieler seismischer Wellen mit unterschiedlichem, von einander unabhängigem und zufälligem Ursprung betrachtet, wäre die aufgezeichnete Zeitreihe entsprechend dem zentralen Grenzwertsatz normalverteilt. Würden sich zudem Spannweite und Verteilung der Quellen nicht ändern, könnte die gemessene Bodengeschwindigkeit im Zeitbereich als normalverteilter, stationärer stochastischer Prozess durch Mittelwert und Standardabweichung hinreichend beschrieben werden. Diese Bedingungen werden jedoch nur von zeitlich eng begrenzten Abschnitten des seismischen Rauschens erfüllt.

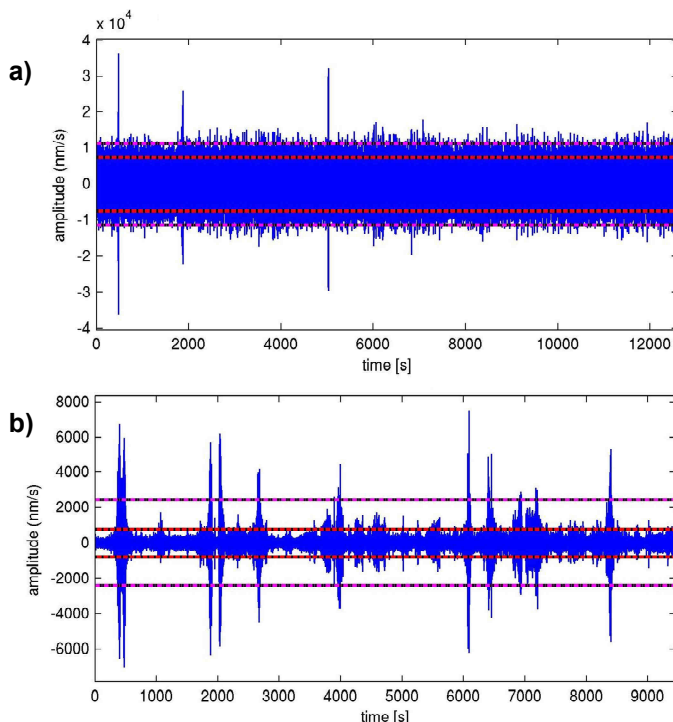


Abbildung 2.9: a) Normalverteilte, stationäre Zeitreihe
 b) Nicht normalverteilte, instationäre Zeitreihe
 des seismischen Rauschens von 1-25 Hz an Stationen des URS-Netzwerks.

Abbildung 2.9 a) zeigt eine normalverteilte und stationäre Zeitreihe des seismischen Rauschens bei Nacht. Aufgrund der sich mit der Zeit ändernden Anzahl an Quellen und deren Eigenschaften ist das aufgezeichnete Rauschen häufig instationär und im Falle einzelner Quellen mit relativ großer Spannweite nicht normalverteilt (siehe Abbildung 2.9 b)). Um das seismische Rauschen im Zeitbereich zu beschreiben und

zu vergleichen, sind die Angabe von Standardabweichung und Mittelwert dementsprechend nicht ausreichend. In der Vergangenheit wurden Rauschamplituden im Zeitbereich deshalb von Analysten manuell oder aufgrund des enormen Aufwandes bei größeren Datenmengen gar nicht bestimmt. Eine manuelle Bestimmung von Rauschamplituden im Zeitbereich an den 31 Stationen des URS-Netzwerks ist praktisch nicht möglich. Die in den letzten Jahren enorm gewachsene Rechnerkapazität erlaubt heute den Einsatz von Methoden der Zeitreihenstatistik zur Quantifizierung und Charakterisierung des seismischen Rauschens im Zeitbereich. Im Folgenden wird ein solcher Ansatz, der im Rahmen dieser Arbeit von mir entwickelt und in MATLAB (siehe S. 97) umgesetzt wurde, vorgestellt werden. Grundlage meines statistischen Ansatzes ist, dass das seismische Rauschen im Idealfall die Realisierung eines normalverteilten stochastischen Zufallsprozesses darstellt (siehe Zentraler Grenzwertsatz, S. 15).

2.4.1 Zeitbereich

Um vergleichende Aussagen über das seismische Rauschen im Zeitbereich treffen zu können, empfiehlt sich die Angabe der 95.45- und 99.73-Perzentile und eine Einteilung der untersuchten Zeitreihen in eine Rauschklasse (noise class).

Die Bestimmung der 95.45- und 99.73 - Perzentile bzw. der Doppelamplitude, innerhalb derer der entsprechende Anteil der Messwerte der untersuchten Zeitreihe liegt, wird numerisch mit Hilfe eines Histogramms durchgeführt. Entscheidend für die Genauigkeit der bestimmten Perzentilen ist die Anzahl der Werteklassen des Histogramms bzw. deren Breite in Messwerteinheiten. Aufgrund der zeitabhängigen großen Dynamik (>100 dB) des seismischen Rauschens an einem Messort muss die Anzahl der Werteklassen individuell an die Spannweite der untersuchten Zeitreihe angepasst werden. Aufgrund numerisch bedingter Rundungsfehler für sehr kleine Realzahlen und begrenzter Rechenleistung sind hier abhängig vom verwendeten Rechnersystem und den zu untersuchenden Zeitreihen Grenzen gesetzt. Die Spannweiten der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Zeitreihen liegen zwischen 20 nm/s und 2 mm/s. Für Zeitreihen mit einer Spannweite größer 5 µm/s wird eine Klassenbreite von 2.5 nm/s verwendet. Die Histogramme von Zeitreihen kleinerer Spannweite wurden mit 2000 Werteklassen erstellt, um mit kleiner werdender Rauschamplitude eine höhere Genauigkeit zu erreichen und gleichzeitig auch bei kleinsten Doppelamplituden Rundungsfehler zu vermeiden. Um die Zeitreihen des seismischen Rauschens neben den bestimmten Perzentilen hinsichtlich ihres Charakters untersuchen und in Rauschklassen einteilen zu können, werden im folgenden einige weitere Maßzahlen und Methoden vorgestellt.

Peakfactor

Als wichtiges und einfaches Maß zur Beurteilung einer Zeitreihe des seismischen Rauschens habe ich den Peakfactor (Pf) eingeführt. Er gibt erste Hinweise auf eine mögliche Abweichung von der Normalverteilung und deren Charakter. Definiert ist der Peakfactor als Verhältnis zwischen der 95.45- und 99.73-Perzentile der Zeitreihe.

$$Pf = \frac{99.73 - \text{Perzentile}}{95.45 - \text{Perzentile}} \quad (2.23)$$

Er entspricht 1.5 im Falle einer Normalverteilung. Als Faustregel kann gelten, dass Zeitreihen mit einem Peakfactor >2 von transienten Ereignissen (Peaks) dominiert werden. Bei Zeitreihen mit Peakfactor <1.4 liegen abgeflachte, unsymmetrische oder mehrgipfelige Verteilungen vor, die häufig durch periodische Signalanteile verursacht

werden. Eine zuverlässige Unterscheidung in Rauschklassen ist für Zeitreihen mit einem Peakfactor zwischen 1.4-2 jedoch nur mit zusätzlichen statistischen Tests möglich.

χ^2 -Anpassungstest

Der χ^2 -Anpassungstest ist ein in der Statistik weit verbreiteter Test, um eine unbekannte Verteilung eines realen Zufallsprozesses mit einer erwarteten theoretischen Verteilungsfunktion zu vergleichen (Bendat und Piersol, 1986). Geprüft wird die Alternativhypothese, dass die empirische Verteilungsfunktion nicht mit der theoretischen übereinstimmt, gegen die Nullhypothese, dass beide Verteilungsfunktionen mit einer Signifikanz von 5% übereinstimmen. Die Signifikanz entspricht der maximalen Wahrscheinlichkeit, mit der die Nullhypothese zu Unrecht bestätigt wird. Bei der Analyse der Zeitreihen des seismischen Rauschens wird ein χ^2 -Anpassungstest für die Nullhypothese durchgeführt, dass die Zeitreihe eine Realisierung des normalverteilten Zufallsprozesses mit Mittelwert und Standardabweichung der Zeitreihe ist.

Wird die Nullhypothese für eine Zeitreihe abgelehnt, sind für die weitere Klassifizierung das Ausmaß und die Art der Abweichung von der Normalverteilung von entscheidender Bedeutung. Wird die Abweichung durch einige extreme Werte verursacht, führt dies zu einer Wölbung der Verteilung, es entsteht ein positiver Exzess. Der Einfluss der Wölbung auf eine Normalverteilung ist relativ gering (Sachs, 1978). Fallen die Abweichungen am Verteilungsmaximum und an den Flanken nicht zu groß aus, kann eine Verteilung als angenähert normalverteilt betrachtet werden. Aufgrund der großen Anzahl von Messwerten im Falle einer seismologischen Zeitreihe werden die Werte besonders für die Wölbung so groß, dass nur starke Abweichungen von der Normalverteilung damit erkannt werden können. Um auch das Maß geringer Abweichungen beurteilen zu können, wurde von mir für die Zeitreihen des seismischen Rauschens ein vereinfachter χ^2 -Test realisiert. Als Grundlage dafür wird eine auf die Mehrzahl der Messwerte zutreffende Normalverteilung geschätzt. Aufgrund der starken Sensibilität der Standardabweichung auf einzelne Extremwerte erfolgt dies stattdessen über das Maximum des Histogramms mit Hilfe von Gleichung (2.9). Mit der geschätzten Normalverteilung wird das theoretische Histogramm für eine Realisierung der Normalverteilung mit der Länge der Zeitreihe berechnet.

Das reale Histogramm wird nun mit dem theoretischen Histogramm im Wertebereich der 95.45-Perzentile verglichen. χ^2 wird berechnet als

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(n_j - n_{tj})^2}{n_{tj}} \quad (2.24)$$

mit n_j der Häufigkeit in Klasse j , n_{tj} der theoretischen Häufigkeit in Klasse j und der Klassenanzahl k .

Als Vergleichswert wird ebenfalls χ^2 für eine maximale Abweichung von 5 Prozent von der theoretischen Häufigkeit jeder Werteklasse berechnet:

$$\chi_{\max}^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(1.05 \cdot n_{tj} - n_j)^2}{n_{tj}} \quad (2.25)$$

Die Anwendung im Wertebereich der 95.45 – Perzentile gewährleistet eine hinreichend große Häufigkeit in jeder Werteklasse größer 5 (Sachs, 1978). Der vereinfachte χ^2 -Test vergleicht die reale und theoretische Verteilung im Bereich der

Flanken. Im Falle eines positiven Exzesses aufgrund kurzer transienter Ereignisse mit relativ großen Amplituden liegen gegenüber der geschätzten Normalverteilung ein Wertemangel an den Flanken und ein Werteüberschuss an den Verteilungsenden vor. Das 95.45-Perzentil der geschätzten Normalverteilungen ist dann kleiner als das der Zeitreihe. Im Folgenden wird eine Zeitreihe als angenähert normalverteilt betrachtet, wenn gilt

$$\chi^2 \leq \chi_{\max}^2 \quad (2.26)$$

und falls die reale Werteanzahl innerhalb der 95.45-Perzentile um maximal 5 Prozent von der der geschätzten Normalverteilung abweicht sowie das Maximum beider Verteilungen übereinstimmt.

Stationarität und Schwankungsmaß

Im streng mathematischen Sinne sind Zeitreihen des seismischen Rauschens, die über wenige Minuten hinausgehen, sehr selten stationär. Bereits wenige transiente Ereignisse oder das Hinzukommen einzelner Rauschquellen großer Amplitude führen zu einem nicht-stationären, regellosen Prozess. Die Auswahl der verwendeten Zeitreihen für die Bestimmung der Perzentilen muss entsprechend sorgfältig erfolgen, um möglichst stationäre Zeitreihen auszuwerten. Bei der automatisierten Auswertung großer Datenmengen müssen Zeitreihen mit dennoch ausgeprägter Zu- oder Abnahme der Doppelamplituden erkannt werden. Um dies zu erreichen, werden die untersuchten Zeitreihen in vier Zeitabschnitte unterteilt und deren Mittelwert und Standardabweichung bestimmt. Als Schwankungsmaß wird die Standardabweichung der vier Zeitabschnitts-Standardabweichungen in Prozent der mittleren Zeitabschnitts-Standardabweichung angegeben und ist in die Definition der in dieser Arbeit verwendeten Rauschklassen eingegangen.

Rauschklassen

Die Einteilung in die Rauschklassen 1 bis 4 erfolgt durch Überprüfung der gewählten Kriterien nach Strenge. Voraussetzung ist, dass es sich nicht um eine defekte Zeitreihe handelt (siehe Rauschkategorie 5) und die Bedingungen der nächst kleineren Rauschkategorie nicht erfüllt wurden.

Genügt eine Zeitreihe dem statistischen Test auf Normalverteilung, wird die Rauschkategorie 1 zugeordnet. Bei einer nicht normalverteilten Zeitreihe werden die Abweichungen von der Normalverteilung erfasst und mit Hilfe der Rauschklassen 2 bis 4 beschrieben. Einer Zeitreihe, deren Verteilung nur sehr geringe Abweichungen von der Normalverteilung aufweist, und die als *quasi-normalverteilt* betrachtet werden kann, wird die Rauschkategorie 2 zugewiesen. Für starke Abweichungen stehen die Rauschklassen 3 und 4 zur Verfügung, die außerdem Aufschluss über Art und Ursache der Abweichungen geben. Zeitreihen, deren Verteilungen aufgrund zahlreicher transienter Ereignisse von der Normalverteilung abweichen, und daher einen starken positiven Exzess aufweisen, fallen in die Rauschkategorie 3. Die Rauschkategorie 4 umfasst Zeitreihen, die von periodischen Signalen, Ereignissen extremer Amplitude oder von starken Amplitudenschwankungen dominiert werden und deren Verteilungen daher mehrere Gipfel, Asymmetrien und negative oder extrem positive Exzesse aufweisen. Im Folgenden werden die numerischen Auswahlkriterien der verschiedenen Rauschklassen im Detail vorgestellt.

Rauschklasse 1

Das einzige belastbare Kriterium für eine Zuteilung der Rauschklasse 1 ist der statistische χ^2 -Anpassungstest auf Normalverteilung. Die numerisch berechnete Wölbung ist aufgrund der großen Messwertanzahl seismologischer Zeitreihen zu ungenau. Der Peakfactor ist ohne verlässliche Bestimmung der Wölbung als Kriterium nicht geeignet, da Verwechslungsgefahr mit nicht glockenförmigen Verteilungen besteht.

Lehnt der numerische χ^2 -Anpassungstest die Nullhypothese, dass die vorliegende Zeitreihe normalverteilt ist, mit einer Signifikanz von 5% nicht ab, wird der geprüften Zeitreihe die Rauschklasse 1 zugeordnet. Bei mittelwertfreien Zeitreihen ist die Angabe der Standardabweichung bzw. der 95.45-Perzentile somit alleine ausreichend um die Zeitreihe zu beschreiben. In Abbildung 2.10 ist eine Zeitreihe der Rauschklasse 1 und das zugehörige reale Histogramm (blau) sowie das theoretische Histogramm entsprechend der geschätzten Normalverteilung (siehe Gleichung (2.9)) (grün-schwarz) dargestellt. Der Peakfactor der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten normalverteilten Zeitreihen lag zwischen 1.42 und 1.7 und betrug im Median 1.52.

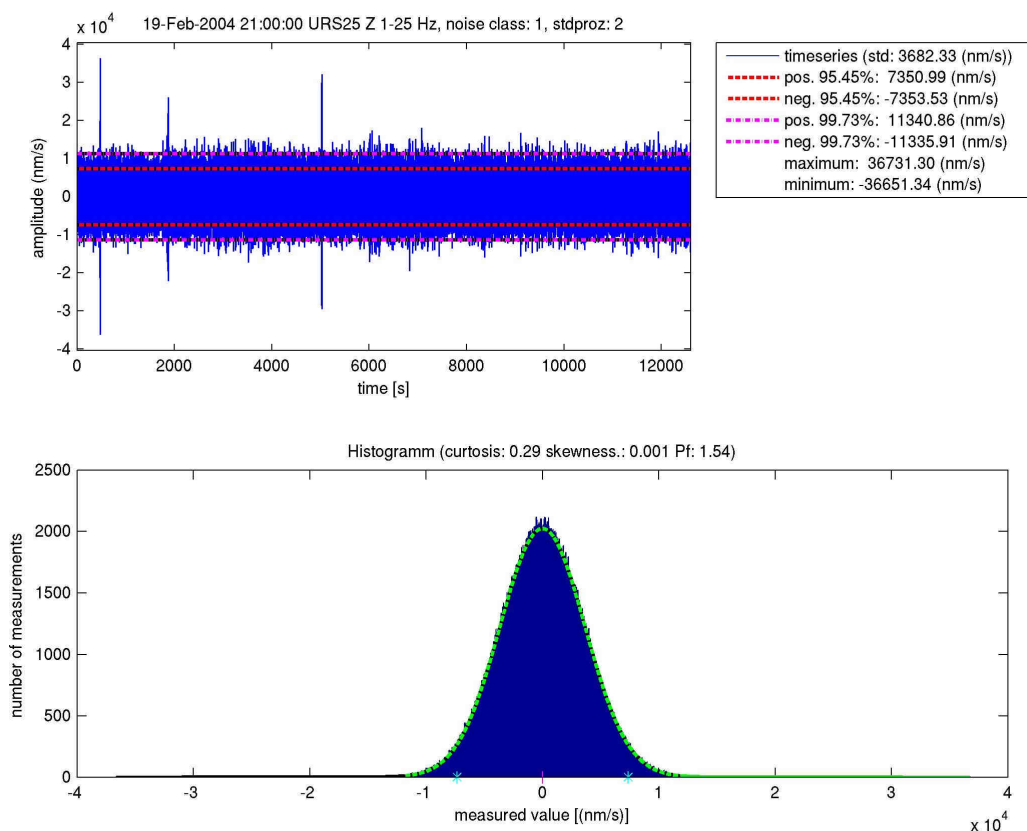


Abbildung 2.10: Zeitreihe der Rauschklasse 1 mit Histogramm (blau) und geschätzter Normalverteilung (grün gestrichelt).

Rauschklasse 2

Der statistische Anpassungstest hat die Null-Hypothese abgelehnt. Häufig sind die Abweichungen jedoch so gering, dass die Zeitreihen für die seismologische Anwendung als *quasi-normalverteilt* betrachtet werden können. Als Kriterium dient das Erfüllen des vereinfachten χ^2 -Test nach Gleichung (2.26) und ein Peakfactor größer 1.4 und kleiner 2.

Eine Einteilung alleine anhand von Peakfactor, Wölbung und Schiefe ist aufgrund der Empfindlichkeit gegenüber einzelnen Extremwerten wie bei Rauschklasse 1 bei solch geringen Abweichungen von der Normalverteilung numerisch nicht möglich. Die Abweichungen von der Normalverteilung entstehen entweder durch wenige transiente Ereignisse mit Amplituden größer der dreifachen Standardabweichung oder durch kurze, einmalige Ereignisse extrem großer Amplitude, wodurch die Häufigkeitsverteilungen in beiden Fällen einen leichten positiven Exzess aufweisen. Abbildung 2.11 zeigt eine Zeitreihe der Rauschklasse 2 mit einem Peakfactor von 1.72. Die theoretische Häufigkeitsverteilung weist geringfügig niedrigere Häufigkeiten im Schulterbereich und zu den Verteilungsenden (ab $\pm 0.5 \cdot 10^4$ nm/s) und erhöhte Werte am Maximum und an den Flanken auf (vgl. Abbildung 2.10).

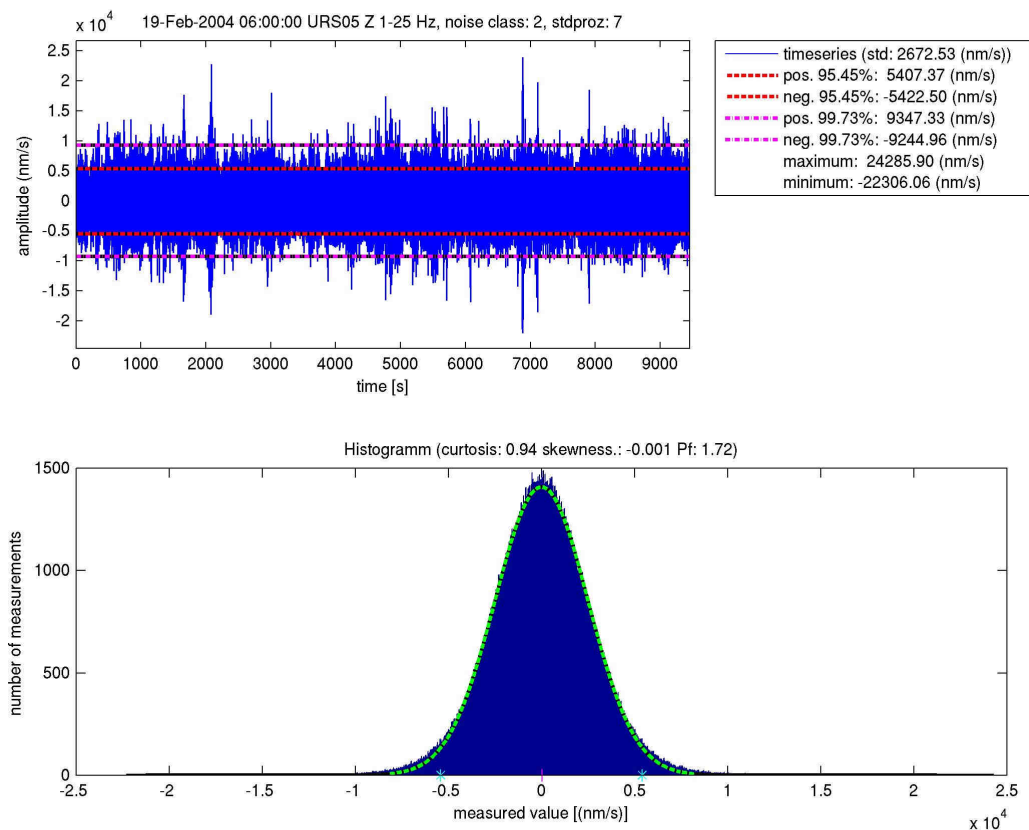


Abbildung 2.11: Zeitreihe der Rauschklasse 2 mit Histogramm (blau) und geschätzter Normalverteilung (grün gestrichelt).

Rauschklasse 3

Nimmt die Anzahl transienter Ereignisse großer Amplitude zu (siehe Abbildung 2.12), verstärkt sich der positive Exzess der symmetrischen und eingipfeligen Häufigkeitsverteilung (vgl. Abbildung 2.11 und Abbildung 2.10). Neben dem Erfüllen des vereinfachten χ^2 -Test nach Gleichung (2.26) mit einem Peakfactor größer 2, dienen nun auch Peakfactor, Schiefe μ_3 , Wölbung μ_4 , Schwankungsmaß S (siehe Seite 22) und die Lage des Maximums der Verteilung zur Beurteilung der Zeitreihe. Stimmen Lage des Maximums und Mittelwert der Zeitreihe überein, müssen darüber hinaus noch folgende Bedingungen erfüllt sein:

Peakfactor	> 1.6
$ \mu_3 $	< 15
$ \mu_4 $	< 6000
S	< 60 %

Tabelle 2.4: Kriterien für Rauschklasse 3.

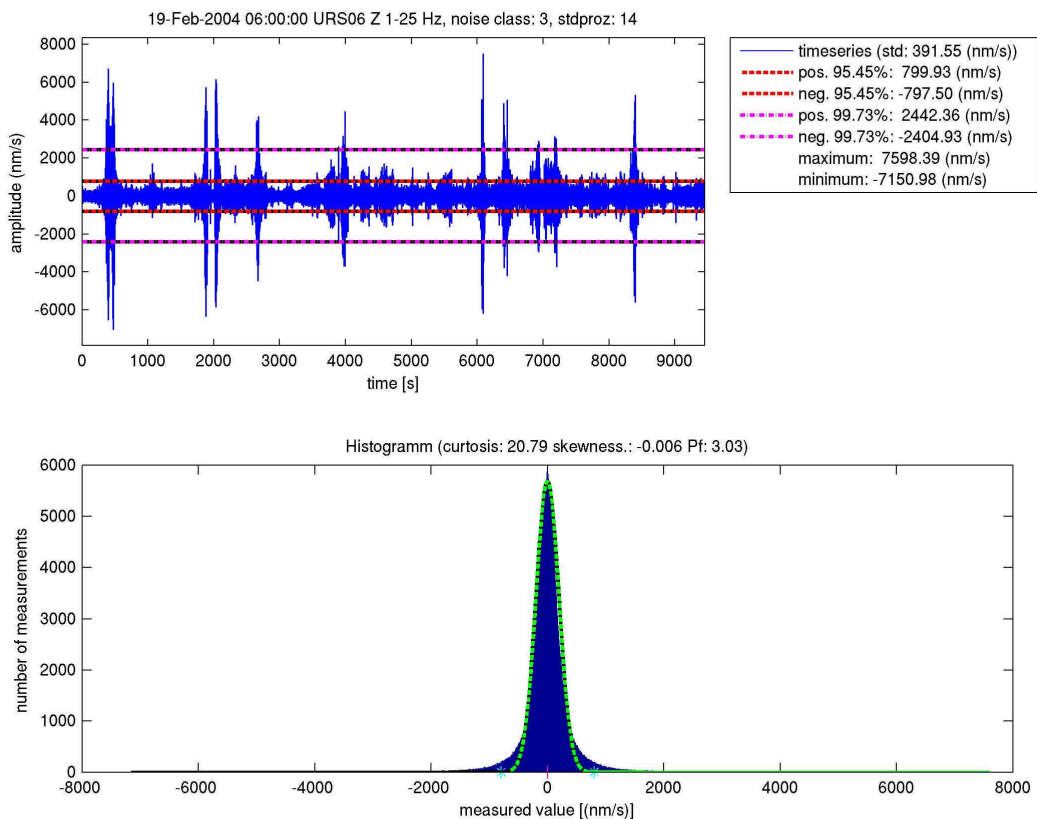


Abbildung 2.12: Zeitreihe der Rauschklasse 3 mit Histogramm (blau) und geschätzter Normalverteilung (grün gestrichelt).

Rauschklasse 4

Werden auch die Bedingungen der Rauschklasse 3 nicht erfüllt, ist die Verteilung der Zeitreihe unsymmetrisch, mehrgipfelig und/oder weist einen extremen Exzess auf. Ursache können neben periodischen Signalen großer Amplitude, einzelnen Ereignissen mit extrem großer Amplitude auch technische Probleme im Seismometer/Rekorder System sein. Die Einteilung in Rauschklasse 4 erfolgt, wenn einer der Parameter Schiefe, Wölbung, Peakfactor, oder das Schwankungsmaß Grenzwerte über oder unterschreitet bzw. die Verteilung mehrere Gipfel aufweist.

Peakfactor	< 1.4
$ \mu_3 $	> 15
$ \mu_4 $	> 6000
S	> 60 %

Tabelle 2.5: Grenzwerte für Rauschklasse 4.

Die in Abbildung 2.13 gezeigte Zeitreihe wird von zwei sinusförmigen Signalen dominiert, was zu einer Ausbildung von drei Gipfeln in der Häufigkeitsverteilung führt. Am Histogramm der Zeitreihe lässt sich die Doppelamplitude der größeren sinusförmigen Schwingung mit etwa 8 $\mu\text{m/s}$ ablesen.

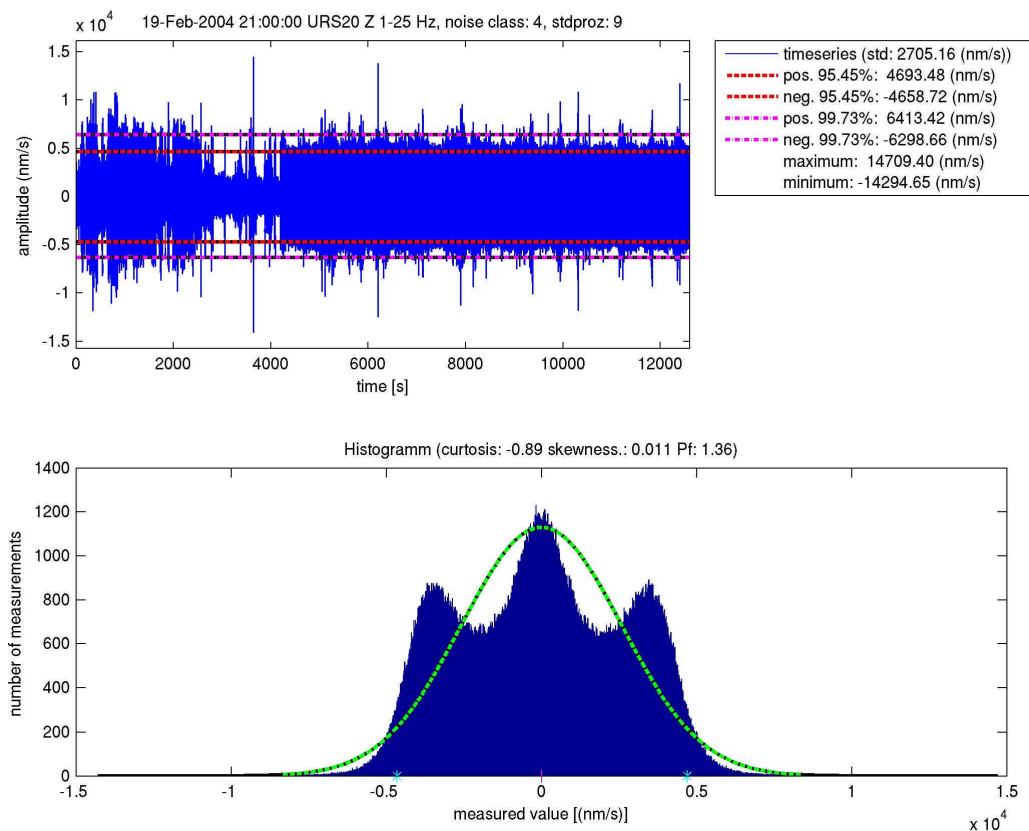


Abbildung 2.13: Zeitreihe der Rauschklasse 4 mit Histogramm (blau) und geschätzter Normalverteilung (grün gestrichelt).

Rauschklasse 5

Ein übliches technisches Problem, auch moderner 3-Komponenten-Breitbandsensoren, ist das ausgelenkte „hängen“ einzelner oder mehrerer Schwingungsmesser. Auf den konstanten Wert addiert sich das Geräterauschen aus dem A/D-Wandler und Rekorder, so dass ein normalverteiltes Rauschen mit einem Mittelwert entsprechend der festen Position des Schwingungsmessers aufgezeichnet wird. Nach dem üblichen Entfernen des Mittelwertes im Laufe der Datenverarbeitung bleibt ein mittelwertfreies, normalverteiltes Rauschen mit geringer Amplitude. Eine derart beschädigte Zeitreihe lässt sich nach der Verarbeitung der originalen Messdaten nur dann von echtem, normalverteiltem seismischen Rauschen unterscheiden, falls das seismische Rauschen jederzeit deutlich größere Amplituden aufweist.

Einer normalverteilten Zeitreihe, deren Spannweite unterhalb eines kritischen Grenzwertes liegt, wird deshalb die Rauschklasse 5 zugeordnet. Vor der weiteren Verwendung ist eine Kontrolle der originalen Messdaten erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Grenzwert von 7 nm/s verwendet, der gute Resultate bei der Erkennung fehlerhafter Spuren erbrachte und deutlich unterhalb der kleinsten gemessenen Spannweite des seismischen Rauschens lag.

Rauschklasse 0

Der Zeitreihe konnte automatisch keine Rauschklasse zugeordnet werden und muss individuell beurteilt werden.

Durchführung der Amplitudenbestimmung

Aufgrund der großen Menge an Daten (~600 GByte), die im Rahmen des URS-Experiments gemessen wurden, und um eine umfassende Analyse des seismischen Rauschens in Abhängigkeit von Ort und Zeit durchführen zu können, wurde das beschriebene Klassifizierungsverfahren in MATLAB realisiert (siehe Programm *rauschamplituden.m*, S. 97). Die automatisch bestimmten Amplituden aller Zeitreihen, denen die Rauschklasse 4, 5 oder 0 zugeordnet wurde, wurden anschließend überprüft und falls nötig verworfen oder korrekt zugeordnet. Zeitreihen der Rauschklasse 4 sind in die Auswertung eingegangen und weisen im Allgemeinen auf einen starken anthropogenen Einfluss hin.

2.4.2 Frequenzbereich

Rauschspektrum (noise spectrum)

Ein Rauschspektrum ist das Leistungsdichtespektrum einer Zeitreihe des seismischen Rauschens (siehe Gleichung (2.20)). Das Leistungsdichtespektrum stellt aufgrund der endlichen Zeitreihenlänge nur eine Schätzung der wahren Eigenschaften des zugrunde liegenden regellosen Prozesses dar (Buttkus, 1991). Um die Schätzung zu verbessern, wird ein zuerst von Welch (1967) vorgeschlagenes, in der Seismologie inzwischen gängiges Verfahren (Bormann, 1998) verwendet. Um die Varianz der Schätzung zu verringern, erfolgt die Berechnung als Mittelung mehrerer Leistungsdichtespektren (Buttkus, 1991). Dazu wird die Zeitreihe des seismischen Rauschens in acht Zeitausschnitte gleicher Länge, die sich jeweils zur Hälfte überlappen, unterteilt. Als Fensterfunktion wird ein Hamming-Fenster verwendet. Das Rauschspektrum wird als Durchschnitt der acht einzelnen Leistungsdichtespektren berechnet. Alle Rauschspektren in dieser Arbeit wurden nach diesem Verfahren erstellt. Die tiefste dargestellte Frequenz entspricht der Eigenfrequenz des verwendeten Seismometers, die höchste Frequenz liegt mit 49 Hz knapp unterhalb der Nyquist-Frequenz von 50 Hz. Um die Leistungsdichte auch bei tiefen Frequenzen genau zu bestimmen, entspricht die Zeitfensterlänge der einzelnen Segmente der sechsfachen Eigenperiode des Seismometers (Bormann et al., 1997). Abbildung 2.14 zeigt das Rauschspektrum einer Station des URS-Array im Vergleich mit dem New Global Noise Model.

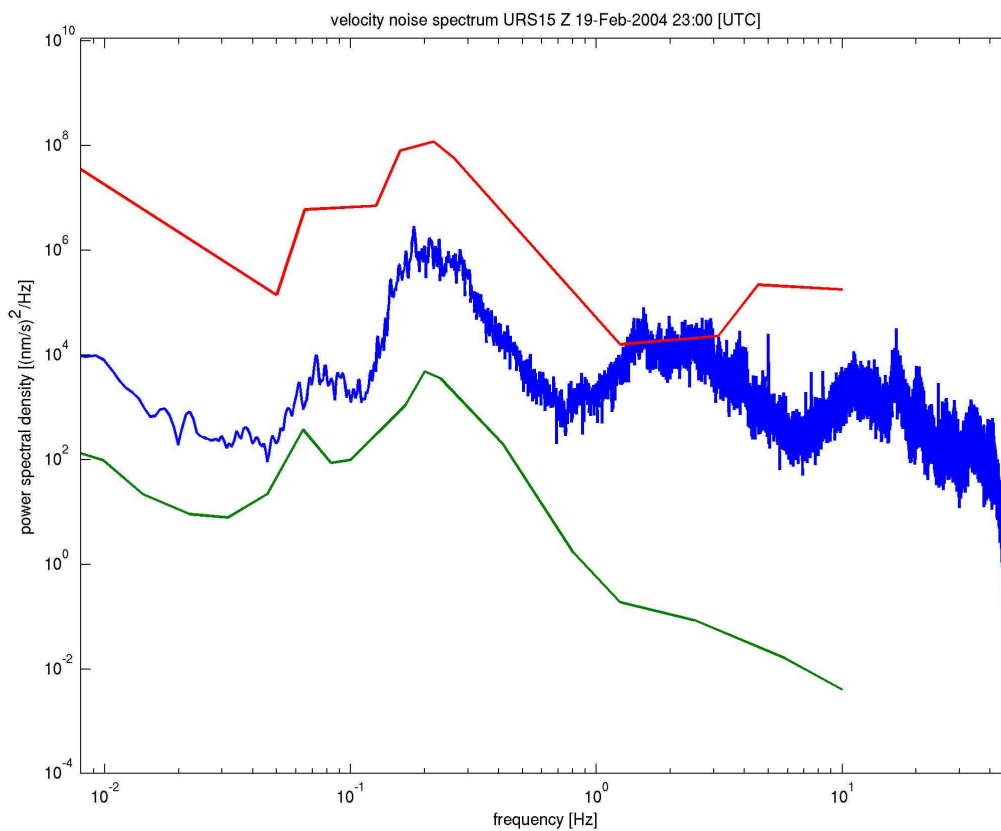


Abbildung 2.14: Rauschspektrum der Bodenschwingungsgeschwindigkeit im Vergleich mit dem New Low Noise Model (grün) und dem New High Noise Model (rot).

Spektrogramm

Ein hilfreiches Werkzeug für die Untersuchung der zeitlichen Änderung des seismischen Rauschens ist das Spektrogramm (Abbildung 2.15).

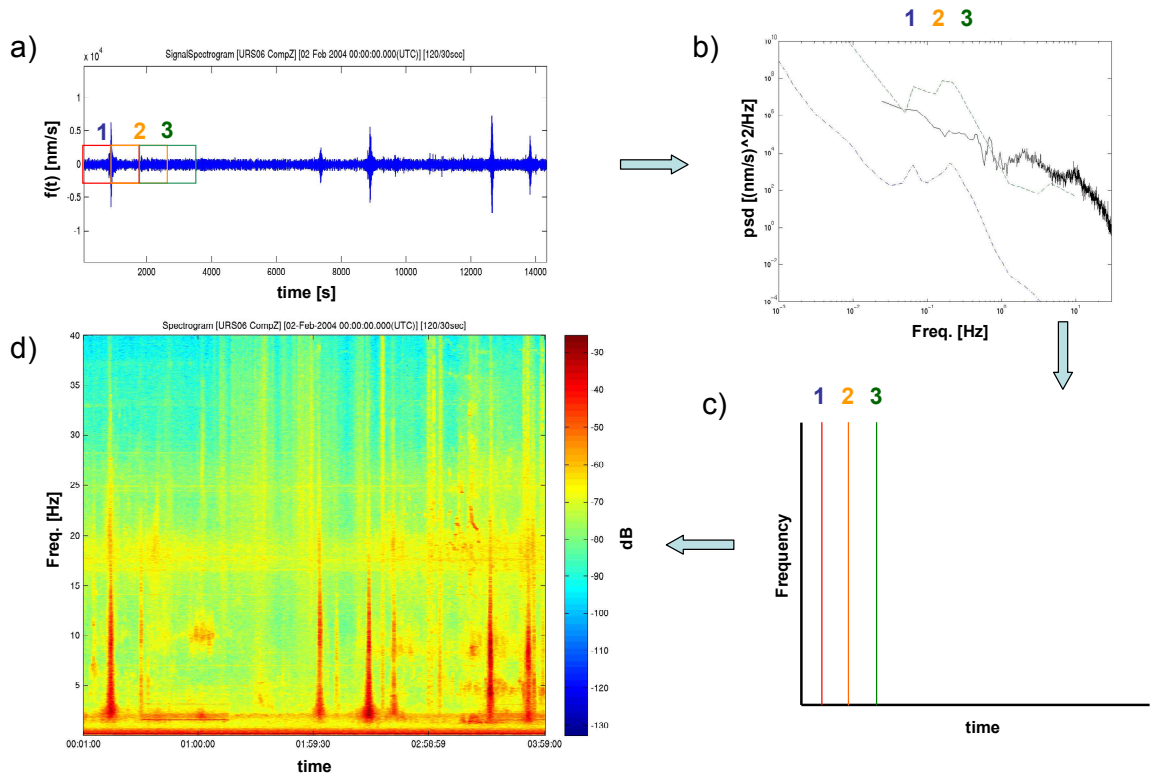


Abbildung 2.15: a) Zeitreihe mit Zeitfenstern b) Leistungsdichtespektren für Zeitfenster c) Matrixschema der berechneten Leistungsdichten d) Spektrogramm

Dazu wird die Zeitreihe in Zeitfenster gleicher Länge unterteilt, die sich je nach zeitlichem Abstand der Fenster auch überlappen können (Abbildung 2.15 a)). Nach Ausschnitt der einzelnen Zeitfenster wird unter Verwendung der *adaptive multiple taper*-Methode (Sudhaus, 2004) das Leistungsdichtespektrum für jedes Zeitfenster berechnet. (Abbildung 2.15 b)). Die berechneten Leistungsdichten werden als Matrix mit den Dimensionen (Anzahl diskreter Frequenzen x Zeitfenster) zusammengefasst (Abbildung 2.15 c)). Jedes Matrixelement wird in Bezug auf die maximale Leistungsdichte in Dezibel umgerechnet und mit Hilfe einer Farbskala dargestellt (Abbildung 2.15 d)). Als zeitliche Bezugspunkte auf der x-Achse des Spektrogramms dienen die Mittelpunkte der Zeitfenster.

Die Auflösung eines Spektrogramms in Bezug auf Zeit und Frequenz ist abhängig von der Länge der Zeitfenster für die Leistungsdichtespektren und deren Anzahl. Das Frequenzauflösungsvermögen ist alleine abhängig von der Zeitfensterlänge, die wie im Fall des Rauschspektrums idealerweise mindestens das Sechsfache der Eigenperiode des verwendeten Seismometers betragen sollte. Allerdings erfolgt dadurch eine Verschmierung der Leistungsdichte sehr kurzer transients Ereignisse über eine größere Zeitdauer und führt zu einer schlechteren zeitlichen Auflösung des Spektrogramms. Um eine gute zeitliche Auflösung zu erreichen und gleichzeitig auch möglichst tiefe Frequenzen im Spektrogramm gut aufzulösen, wurden die im

Rahmen dieser Arbeit berechneten Spektrogramme kurzer Zeitabschnitte (<49 h) mit 120 Sekunden langen Zeitfenstern in einem Abstand von 30 Sekunden erstellt. Die Zeitfensterlänge entspricht der Eigenperiode der STS-2 Seismometer. Die Leistungsdichte im Frequenzbereich oberhalb 0.05 Hz ist genau bestimmt. Im Frequenzbereich zwischen 0.05 und 0.008 Hz ist eine zunehmende Ungenauigkeit zu erwarten. Um die Aussagekraft der berechneten Spektrogramme für Signale mit Eigenperioden zwischen 60 und 120 s beurteilen zu können wurde ein Vergleich mit Spektrogrammen basierend auf längeren Zeitfenstern und mit Rauschspektren durchgeführt. Obwohl der absolute Wert der Leistungsdichte für sehr tiefe Frequenzen ungenauer ist, ist die deutliche Leistungszunahme bei Anwesenheit tieferperiodischer Signale grundsätzlich auflösbar. So ist z. B. das Eintreffen und Abklingen tieferperiodischer Oberflächenwellen zeitlich gut aufgelöst.

Aufgrund der Verwendung der Spektrogramme als Visualisierungswerkzeug ist eine Begrenzung der Zeitfensterlänge auf die Eigenperiode der Seismometer vertretbar. Für die Bestimmung untereinander vergleichbarer Absolutwerte der Leistungsdichte für sehr tiefe Frequenzen sollten grundsätzlich Rauschspektren verwendet werden.

Für die Berechnung sehr langer Spektrogramme zwischen 2 und 28 Tagen wurde ein anderes Verfahren eingesetzt, um die Rechenzeit zu verkürzen und eine Glättung durch Mittelung zu erreichen. Es wurde jeweils ein mittleres Leistungsdichtespektrum alle 32 Minuten als Durchschnitt von 16 Leistungsdichtespektren aufeinander folgender Zeitfenster berechnet. Die Zeitfensterlänge von 120 Sekunden wurde beibehalten.

2.5 Frequenz-Wellenzahl-Analyse

Die Frequenz-Wellenzahl-Analyse (fk-Analyse) (Capon, 1969) erlaubt die schnelle und gleichzeitige Bestimmung von Rückazimut und Langsamkeit bzw. des Langsamkeitsvektors am Array ankommender seismischer Wellen.

Das Verfahren basiert auf der Idee der kohärenten Stapelung. Dabei werden die am Array aufgezeichneten Zeitreihen in Bezug zu einer Referenzstation des Arrays im Zeitbereich verschoben, um den Zeitversatz aufgrund der unterschiedlichen Stationsstandorte zu entfernen. Dazu müssen der Rückazimut und die Langsamkeit der einfallenden Welle bekannt sein. Werden die verschobenen Zeitreihen addiert, ergibt sich bei korrektem Rückazimut und korrekter Langsamkeit die Summenspur mit maximaler Doppelamplitude bzw. maximaler Signalenergie im Zeit- und Frequenzbereich (Parsevalsches Theorem, siehe Gleichung (2.16)). In der Praxis wird der Rückazimut (bei bekannter Quelle) oft geschätzt und die Summenspuren für verschiedene Langsamkeiten berechnet und zum Vergleich als Vespagramm gemeinsam dargestellt. Ist der Rückazimut jedoch unbekannt, ist dieses Verfahren sehr aufwendig, da zwei Parameter gleichzeitig bestimmt werden müssen.

Die Zeitverschiebung nach Rückazimut und Langsamkeit entspricht einer wesentlich effizienteren Phasenverschiebung im Frequenzbereich. Die fk-Analyse führt eine numerische Parametersuche (*grid search*) für verschiedene Wellenzahlvektoren im Frequenzbereich durch und berechnet die Energiedichte (siehe Formel (2.18)) der jeweiligen Summenspur. Die Energiedichte wird in fk-Diagrammen (Abbildung 2.16) über Rückazimut und Langsamkeit aufgetragen. Rückazimut und Langsamkeit der einfallenden, als eben vorausgesetzten Welle werden am Energiedichtemaximum abgelesen. Abbildung 2.16 zeigt das Diagramm einer fk-Analyse im Frequenzbereich von 90-180 mHz von 250 Sekunden langen, entsprechend Bandpass gefilterten, Zeitreihen des seismischen Rauschens im Innenstadtbereich von Bukarest. Das deutlich sichtbare Energiemaximum bei einer Langsamkeit von 28.8 s/° und einem

Rückazimut von 295° zeigt den Einfall einer Rayleigh-Welle der sekundären Meeresmikroseismik aus einem Quellgebiet im Atlantik nord-westlich der britischen Inseln.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für alle fk-Analysen das FORTRAN-Programm von K. Stammler in Verbindung mit SeismicHandler und MATLAB verwendet. Die Programmteile in SeismicHandler und MATLAB wurden vom Autor erweitert (siehe S. 98), um fk-Analysen über die Zeit mit Hilfe verschobener Zeitfenster durchzuführen.

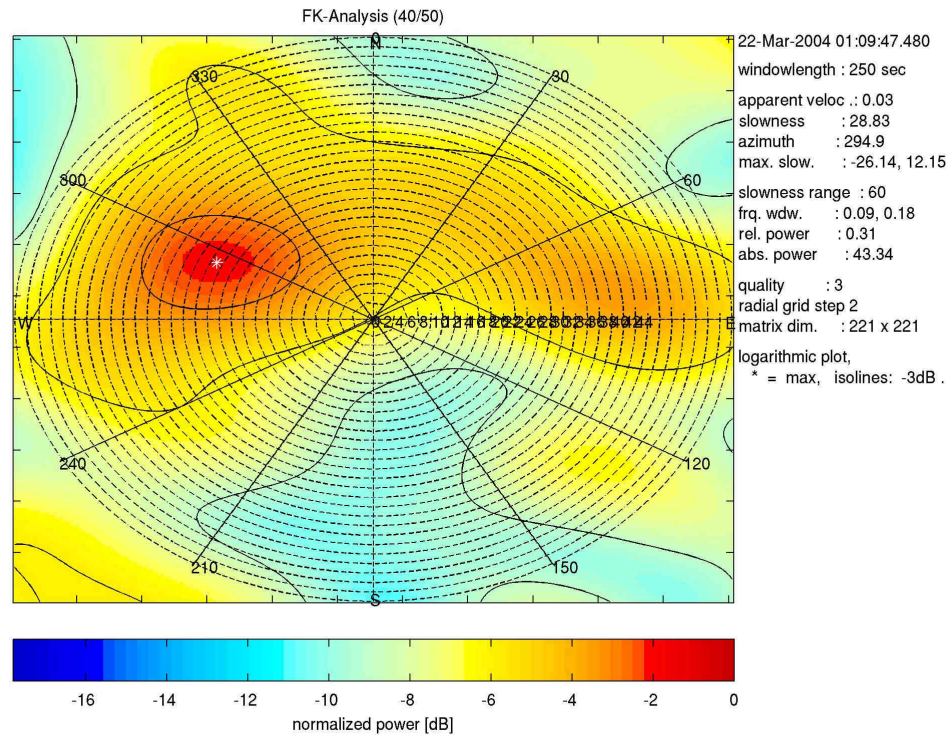


Abbildung 2.16: fk-Diagramm, am URS-Array einfallende Rayleigh-Wellen der sekundären Meeresmikroseismik des Atlantiks.

3 Daten

3.1 URS-Datensatz

Die seismischen Messungen im Rahmen des **UR**ban **S**eismology-Projekts wurden mit dem KABBA-Instrument (**KAR**lsruhe **B**road**B**and **A**rray) der Universität Karlsruhe durchgeführt (Ritter et al., 2005). Zum Zeitpunkt des Projekts bestand KABBA aus 32 24-bit Datenerfassungsgeräten der Firma EarthData und 22 Streckeisen STS-2 ($T_0=120$ s), sechs Geotech KS-2000 ($T_0=100$ s), drei Güralp CMG40T ($T_0=30$ s) bzw. CMG3ESP ($T_0=30$ s) und zwei Lennartz LE-3D ($T_0=5$ s) Sensoren mit den Eigenperioden T_0 (siehe Tabelle 3.1). Im Zeitraum von Oktober 2003 bis August 2004 wurde mit den KABBA-Stationen an insgesamt 34 Standorten innerhalb und außerhalb von Bukarest (Abbildung 3.1) kontinuierlich mit einer Abtastrate von 100 Hz gemessen.

Station	Sensor	Standort	Breite	Länge	Beginn	Ende
URS01	STS-2	Zoologischer Garten	44.51853° N	26.10449° E	03.11.03	27.07.04
URS02	STS-2	Voluntari	44.48668° N	26.16914° E	27.10.03	05.08.04
URS03	STS-2	Acroconstucto	44.44505° N	26.02311° E	29.10.03	17.06.04
URS04	STS-2	Sere Horticola	44.42220° N	25.99993° E	28.10.03	01.04.04
URS05	STS-2	Jimbolia	44.48975° N	26.03197° E	24.10.03	09.06.04
URS06	STS-2	Sulari	44.67768° N	26.25261° E	26.10.03	02.08.04
URS07	STS-2	Jilava	44.32940° N	26.08646° E	27.10.03	18.05.04
URS08	STS-2	Agropole	44.35540° N	26.20337° E	24.10.03	17.07.04
URS09	STS-2	Geotec	44.43712° N	26.10683° E	24.10.03	27.07.04
URS10	STS-2	Otopeni	44.55055° N	26.07512° E	25.10.03	27.07.04
URS11	STS-2	geol. Museum	44.45526° N	26.08514° E	24.10.03	27.07.04
URS12	STS-2	Curtea Veche	44.43004° N	26.10170° E	24.10.03	27.07.04
URS13	STS-2	Scoala Steri	44.41503° N	26.17772° E	29.10.03	27.07.04
URS14	STS-2	Tei	44.46977° N	26.11258° E	29.10.03	27.07.04
URS15	STS-2	Stefanesti	44.53223° N	26.21334° E	25.10.03	27.07.04
URS16	STS-2	Tineretul Park	44.40589° N	26.11897° E	25.10.03	03.08.04
URS17	STS-2	Ciorogarla	44.44885° N	25.87995° E	25.10.03	04.08.04
URS18	STS-2	Herestrau Park	44.47748° N	26.08085° E	24.10.03	09.08.04
URS19	STS-2	Buftea	44.56491° N	25.94173° E	26.10.03	06.08.04
URS20	STS-2	INCERC	44.44091° N	26.16236° E	28.10.03	03.08.04
URS21	STS-2	Magurele	44.34796° N	26.02812° E	22.10.03	07.08.04
URS22	STS-2	Geotec Moreni	44.47040° N	26.15510° E	27.10.03	27.07.04
URS23	LE-3D	Berser	44.36515° N	26.12239° E	27.10.03	03.08.04
URS24	G40T	Imperatui	44.39434° N	26.10826° E	28.10.03	03.08.04
URS25	G40T	Hofigal	44.39791° N	26.15939° E	24.10.03	16.06.04
URS26	G3ESP	Cutitul Argint	44.41088° N	26.09424° E	25.10.03	27.07.04
URS27	KS-2000	Centrul Scolar	44.43577° N	26.12380° E	28.10.03	03.12.03
URS28	KS-2000	Scola 128	44.42353° N	26.08211° E	27.10.03	04.08.04
URS29	KS-2000	Academy	44.44655° N	26.08997° E	30.10.03	03.08.04
URS31	KS-2000	C.S./BST	44.44573° N	26.09839° E	25.10.03	27.07.04
URS32	KS-2000	Botanischer Garten	44.43674° N	26.06561° E	29.10.03	27.07.04
URS33	KS-2000	Avram Iancu	44.43737° N	26.11828° E	06.12.03	27.07.04
URS34	STS-2	Physik-Hochhaus Keller	44.35011° N	26.03121° E	14.05.04	05.08.04
URS35	LE-3D	Physik-Hochhaus 11. Stock	44.34990° N	26.03118° E	14.05.04	05.08.04

Tabelle 3.1: URS-Stationen mit Stationsname, Sensortyp, Standort und Messzeitraum.

Es wurde eine engmaschige Überdeckung des gesamten Großraum Bukarest und des innerstädtischen Bereiches angestrebt. Die Stationen wurden vorwiegend in Kellern privater und öffentlicher Gebäude installiert (Ritter et al., 2005).



Abbildung 3.1: Großraum Bukarest mit URS-Standorten.

Die gemessenen Rohdaten liegen pro Station und Komponente in Dateien zu je 30 Minuten im MiniSEED-Format der Firma EarthData auf Datenplatten vor. Der Zugriff erfolgt über das Programm XCUT (Plokarz, 2005-2006), das den Datenausschnitt für beliebige Stationen und Komponenten in den benötigten Zeiträumen ermöglicht (siehe Datenausschnitt, S. 37).

Technische Probleme

Während der Durchführung des URS-Projekts wurde an der Mehrzahl der Geotech KS-2000 Seismometer (URS28, URS31, URS32, URS33) ein Hersteller-Fehler in der Elektronik entdeckt. Es bildete sich ein Schwingkreis mit einer Periodendauer von etwa 16 Sekunden aus. Die dadurch verursachten periodischen Spannungs-

schwankungen addierten sich auf das, relativ dazu, kleine Messsignal und wurden von den Datenerfassungsgeräten aufgezeichnet. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit die Messdaten der Stationen mit KS-2000 Seismometern im Zeitbereich nur für Analysen des seismischen Rauschens mit Periodendauern < 11 Sekunden verwendet. Nach Durchführung des Projekts wurden die fehlerhaften Seismometer von Geotech Instand gesetzt.

3.2 Erdbeben

Das seismische Rauschen im Großraum Bukarest soll ohne den Einfluss seismischer Ereignisse ausgewertet werden. Dazu ist es notwendig, die Zeiträume ohne Wellenankünfte seismischer Ereignisse zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurde von mir ein Katalog potentiell in Bukarest messbarer Ereignisse erstellt. Grundlage waren die Erdbebenkataloge NEIC des **United States Geological Survey** (USGS) und der Katalog lokaler Erdbeben der Vrancea-Zone des rumänischen **National Institute for Earth Physics** (NIEP). Der erstellte Katalog enthält alle Ereignisse des lokalen Katalogs und ausgewählte regional- und teleseismische Ereignisse innerhalb des Messzeitraums. In Abhängigkeit der Distanz der Ereignisse zu Bukarest wurden Grenzwerte für die Momentenmagnitude festgelegt, ab der ein Ereignis in den Katalog aufgenommen wurde (Tabelle 3.3). Grundlage für die Wahl der Grenzmagnituden waren in Abhängigkeit der Entfernung die Momentenmagnituden der schwächsten bisher im URS-Datensatz detektierten Erdbeben, die mir von Olivier Sèbe zur Verfügung gestellt und zur Sicherheit um 0.5 reduziert wurden.

Distanz	Katalog	Grenzmagnitude	Anzahl Ereignisse
lokal	NIEP	keine	59
< 30 °	NEIC	2.9	38
30 – 101 °	NEIC	4.9	680
> 101 °	NEIC	5.4	195

Tabelle 3.2: Auswahlkriterien für regional- und teleseismische Ereignisse.

Für den gesamten Katalog wurden näherungsweise die Ankunftszeiten für das Stadtzentrum (URS09) aus der Herdzeit nach NEIC und der Laufzeit in Sekunden mit einer einfachen Formel nach iasp91 (Kennett und Engdahl, 1991) für die Herdtiefe 0 km berechnet.

$$\text{Ankunftszeit} = \text{Herdzeit} + (M \cdot \Delta + c) \text{Sekunden}$$

Es gehen die Entfernung Δ in Grad und abhängig davon die empirisch bestimmten und genäherten Konstanten M und c ein.

Entfernungsbereich [°]	M [s/°]	c [s]
0-20	13.5	0
20-80	7.5	120
80-105	4.2	384
105-145	8.78	103
145-180	1.29	983

Tabelle 3.3: Empirische Konstanten für die Laufzeitberechnung.

Für sehr tiefe Beben in großer Entfernung können die berechneten Laufzeiten bis zu 60 Sekunden vom realen Ersteinsatz abweichen. Entsprechend diesen theoretischen Ersteinsätzen wurden Zeiträume bestimmt, in denen mit der Ankunft von Raum- und

Oberflächenwellen gerechnet werden muss. Diese Zeiträume umfassen 60 Sekunden vor dem berechneten Ersteinsatz und die darauf folgenden 180 Minuten, um Einsatz und Hauptwellenzug der Oberflächenwellen mit einzuschließen. Für lokale Erdbeben wurden Zeiträume von 10 Minuten ab Herdzeit verwendet.

Für die Bestimmung von Rauschamplituden im Zeit- und Frequenzbereich wurden nur Zeitreihen außerhalb dieser Zeiträume ausgeschnitten. Aufgrund der großen Anzahl an Erdbeben und deren gleichmäßiger zeitlicher Verteilung ist eine Untersuchung des seismischen Rauschens ohne Ankunft seismischer Wellen in Zeiträumen größer 24 Stunden nicht möglich. In allen Spektrogrammen sind daher die berechneten Ankunftszeiten seismischer Wellen mit farbigen Symbolen markiert.

★	lokal
★	regional- oder teleseismisch

Tabelle 3.4: Symbole zur Markierung berechneter Ankunftszeiten von seismischen Wellen.

3.3 Meteorologische Daten

Um den Einfluss meteorologischer Parameter auf das seismische Rauschen im Großraum Bukarest untersuchen zu können, wurden durch den rumänischen Wetterdienst Institutul National de Meteorologie, Hidrologie (INMH) Messdaten einer Wetterstation im Stadtteil Baneasa von November 2003 bis September 2004 zur Verfügung gestellt. Für die Windgeschwindigkeit lagen stündliche Durchschnittswerte in m/s und für den Niederschlag Tageswerte in mm vor. Um außerdem Korrelationen mit der Wetterlage über dem Schwarzen Meer und der Marmara See vornehmen zu können, wurden frei verfügbare Daten des russischen Wetterdaten-Archivs „Russias Weather Server“ (<http://meteo.infospace.ru>) (RWS) für die Küstenstädte Mangalia und Konstantza am Schwarzen Meer sowie Istanbul und Tekirda an der Marmara See hinzugezogen (siehe Tabelle 3.5).

Station	Breite	Länge	Wind [m/s]	Regen [mm]	Quelle
Bukarest-Baneasa	44° 30'N	26° 08'E	stündlich	täglich	INMH
Konstantza	44° 13'N	28° 38'E	alle 3h	täglich	RWS
Mangalia	43° 49'N	28° 35'E	alle 6h	täglich	RWS
Istanbul	40° 58'N	28° 49'E	alle 6h	täglich	RWS
Tekirda	40° 59'N	27° 29'E	alle 6h	täglich	RWS

Tabelle 3.5: Verfügbare Wetterdaten.

Für das vom zentralen Teil des URS-Array (alle Stationen außer URS06, 17, 19) abgedeckte Stadtgebiet samt Vorstädten mit einer Fläche von etwa 368 km² stand nur eine Wetterstation im Norden des Gebietes zur Verfügung. Es ist entsprechend keine stationsgenaue, sondern lediglich eine qualitative Korrelation der Wetterparameter mit dem aufgezeichneten seismischen Rauschen möglich. Anhand der zur Verfügung stehenden Daten wurde eine durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 2 m/s bestimmt.

Um den Anteil der lokalen Meereseismik am seismischen Rauschen im Frequenzbereich zwischen 0.04 bis 0.6 Hz zu bestimmen, ist eine Korrelation mit der Wellenhöhe, dem Wellenspektrum und der Wellenausbreitungsrichtung der Meereswellen, die von Messbojen gemessen wurden, die beste Methode (Bromirski et al., 1999). Leider standen solche Daten nicht einfach zur Verfügung. Mit an den Küsten gemessenen Windgeschwindigkeiten ist jedoch eine grobe Abschätzung des Wellen-Klimas und eine Korrelation mit beobachteter lokaler Meereseismik möglich.

3.4 Ausgewertete Zeiträume

Mit den Messdaten von Station URS21, welche im gesamten Messzeitraum (siehe Tabelle 3.1) durchgehend und fehlerfrei gemessen hat, wurden 40 7-Tage-Spektrogramme und 10 28-Tage-Spektrogramme der drei Bodenschwinggeschwindigkeits-Komponenten Vertikal, Nord-Süd und Ost-West berechnet. Dieser Spektrogramm-Satz erlaubt unter anderem eine Identifikation sämtlicher Ereignisse primärer, sekundärer und lokaler Meeresmikroseismik. Gemeinsam mit dem erstellten Erdbeben-Katalog konnten für die detaillierte Auswertung des urbanen seismischen Rauschens 10 Tage ohne Ankunft von Erdbeben-Wellen und starker Meeresmikroseismik ausgewählt werden.

YYYY-MM-DD	Wochentag	max. Windgeschw. [m/s]	lokale Meeresmikroseismik
2003-12-02	Di.	3	schwach
2003-12-14	So.	5	nein
2004-02-02	Mo.	4	nein
2004-02-19	Do.	2	schwach
2004-03-24	Mi.	8	schwach
2004-04-01	Do.	2	nein
2004-05-07	Fr.	12	schwach
2004-06-23	Mi.	3	nein
2004-07-23	Fr.	5	nein

Tabelle 3.6: Ausgewertete Tage ohne Erdbebenwellen.

Um die Variation des seismischen Rauschens mit der Tageszeit zu erfassen und möglichst stationäre Zeitreihen auszuwerten, wurden anhand von Langzeit-Spektrogrammen der Station URS09 im Stadtzentrum möglichst lange Zeiträume im Tagesablauf mit gleich bleibendem seismischen Rauschen bestimmt.

Bezeichnung	Zeitraum [UTC]	Ortszeit Sommer	Ortszeit Winter
Morgen	06:00-09:00	08:00-11:00	09:00-12:00
Nachmittag	11:00-15:00	13:00-17:00	14:00-18:00
Nacht	21:00-01:00	23:00-03:00	00:00-04:00

Tabelle 3.7: Ausgewertete Zeiträume pro Tag.

Für alle Zeiträume wurden Spektrogramme berechnet sowie die 95.45-, und 99.73-Perzentilen und die Rauschklasse der Zeitreihe bestimmt. Um 7:30, 13:00 und 23:00 Uhr UTC wurden Rauschspektren berechnet. Schaubilder mit den verfügbaren Windgeschwindigkeiten an den ausgewerteten Tagen sind im Anhang enthalten (siehe S. 99)

3.5 Datenverarbeitung

Da die mit 4 verschiedenen Seismometer-Typen aufgezeichneten Messdaten des URS-Projekts original in counts der gemessenen Spannung vorliegen, mussten die Daten zuerst aufgearbeitet werden, um in Amplitude und Wellenform vergleichbare Zeitreihen auswerten zu können.

Datenausschnitt

Der erste Schritt der Datenverarbeitung wird bereits beim Ausschnitt der Daten mit XCUT (Plokarz, 2005-2006) durchgeführt. Die ausgeschnittenen Daten werden im Q-Format des Programms SeismicHandler abgespeichert. Dabei werden die Zeitreihen mit den Kalibrierkonstanten des jeweiligen Seismometers korrigiert, so dass die

ausgeschnittenen Zeitreihen in der Einheit nm/s vorliegen. Die Zeitreihen wurden mit zusätzlichen 15 Minuten vor Beginn und nach Ende des gewünschten Zeitraums ausgeschnitten, die erst nach Durchführung der gesamten Datenaufbereitung entfernt wurden. Dadurch kann der gewünschte Zeitraum weitgehend ohne Filter-Effekte weiter ausgewertet werden.

Datenaufbereitung

Die folgenden Schritte der Datenverarbeitung wurden mit SeismicHandler durchgeführt. Nach Entfernen des Zeitreihenmittelwertes musste eine Restitution der Messdaten durchgeführt werden, da die originalen Zeitreihen aufgrund unterschiedlicher Seismometer-Antwortfunktionen und –Eigenperioden in Amplitude und Wellenform nicht unmittelbar vergleichbar sind. Durch Verwendung eines Restitutions-Filters werden die Effekte der Seismometer-Antwortfunktion rückgängig gemacht und man erhält Zeitreihen mit der wahren Bodenschwinggeschwindigkeit. Alle restituierten Zeitreihen wurden mit der Eigenperiode des jeweiligen Seismometers als Grenze mit einem FFT-Hochpass 4. Ordnung gefiltert. Dadurch werden unzuverlässige Signalanteile entfernt und die Resultate weiterer Datenverarbeitungsschritte, besonders der Integration, verbessert.

Integration

Um die Rauschamplituden im Zeit- und Frequenzbereich auch für die Bodenverschiebung bestimmen zu können, wurden die Zeitreihen der Bodenschwinggeschwindigkeit mit SeismicHandler integriert. Die integrierten Zeitreihen wurden mit dem zeitlichen Messwertabstand Δt normiert.

Filtern

Nach der Datenaufbereitung wurden die Zeitreihen der Bodengeschwindigkeit und Bodenverschiebung für die weitere Verwendung mit MATLAB für verschiedene Frequenzbereiche gefiltert. Es wurden FFT-Filter 4. Ordnung verwendet.

Für die Auswertung der Zeitreihen im Frequenzbereich mit Spektrogrammen und Rauschspektren erfolgte nach dem vorangegangenen Filtern mit einem Hochpass nach der Restitution noch die Anwendung einen Tiefpass-Filters mit einer Eckfrequenz von 45 Hz. Bei einer Nyquist-Frequenz von 50 Hz ist der Frequenzbereich zwischen 45-50 Hz bereits durch die Anti-Aliasing-Filter des Datenerfassungsgeräts beeinflusst und wurde deshalb nicht ausgewertet.

Aufgrund der frequenzabhängigen großen Dominanz einzelner Quellen seismischer Bodenbewegung wurden die Zeitreihen für die Bestimmung von Rauschamplituden und Rauschklassen im Zeitbereich mit verschiedenen Bandpass-Filtern gefiltert (siehe Tabelle 3.8). Im tieffrequenten Bereich wurden nur Messdaten von Seismometern mit entsprechend langen Eigenperioden verwendet (siehe auch Technische Probleme, S. 34).

Frequenzbereich [Hz]	verw. Seismometer-Typen	dominante Quellen
0.008-45.00	STS-2	
0.010-45.00	KS-2000	
0.030-45.00	CMG40T/CMG3ESP	
0.200-45.00	Lennartz LE-3D	
0.008-0.04	STS-2	Wind, Stadt
0.040-0.09	STS-2, G40T, G3ESP	primäre Meeresmikroseismik
0.090-0.18	STS-2, KS-2000, G40T, G3ESP	sekundäre Meeresmikroseismik
0.180-0.25	STS-2, KS-2000, G40T, G3ESP	lokale Meeresmikroseismik
0.250-0.60	alle	lokale Meeresmikroseismik
0.600-1.00	alle	Wind, Stadt
1.000-25.00	alle	Stadt
25.000-40.00	alle	Stadt
10.500-12.50	alle	Drehstrommotoren, 8 Pole
13.700-16.70	alle	Drehstrommotoren, 6 Pole
22.000-25.00	alle	Drehstrommotoren, 4 Pole

Tabelle 3.8: Frequenzbereiche für die Bestimmung der Rauschamplituden im Zeitbereich.

Auswertung

Die weitere Auswertung der Daten erfolgte mit, falls nicht anderweitig gekennzeichnet, selbst entwickelten Programmen in MATLAB, SeismicHandler (SH) und GMT. Beschreibungen der Programme sind im Anhang enthalten.

Programmname	Programm-Typ	Verwendung
AMPPUTZ.SHC	SH	Entfernen von Mittelwert und Trend
AMPREST.SHC	SH	restituieren und filtern mit Hochpass
AMPFILTERN.SHC	SH	integrieren und filtern mit Bandpass
spektrogramme.m	MATLAB	Spektrogramme (0-2 Tage)
wochenspektrogramme.m	MATLAB	Spektrogramme (2-28 Tage)
rauschspektren.m	MATLAB	Rauschspektren
rauschamplituden.m	MATLAB	Amplituden und Rauschklassen im Zeitbereich
cityplot.gmt	GMT	Interpolierte Darstellung von Rauschamplituden im Stadtbereich von Bukarest
AUTOFK.SHC	SH, FORTRAN (K. Stammler), MATLAB	fk-Analyse mit gleitendem Zeitfenster

Tabelle 3.9: Name und Verwendungszweck der erstellten Programme.

4 Resultate

Das 28 Tage umfassende Langzeit-Spektrogramm der Bodenschwinggeschwindigkeit im Stadtzentrum auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 im Frequenzbereich von 8 mHz bis 40 Hz (Abbildung 4.1) offenbart die große Variabilität des urbanen seismischen Rauschens in Abhängigkeit von der Zeit und der Frequenz.

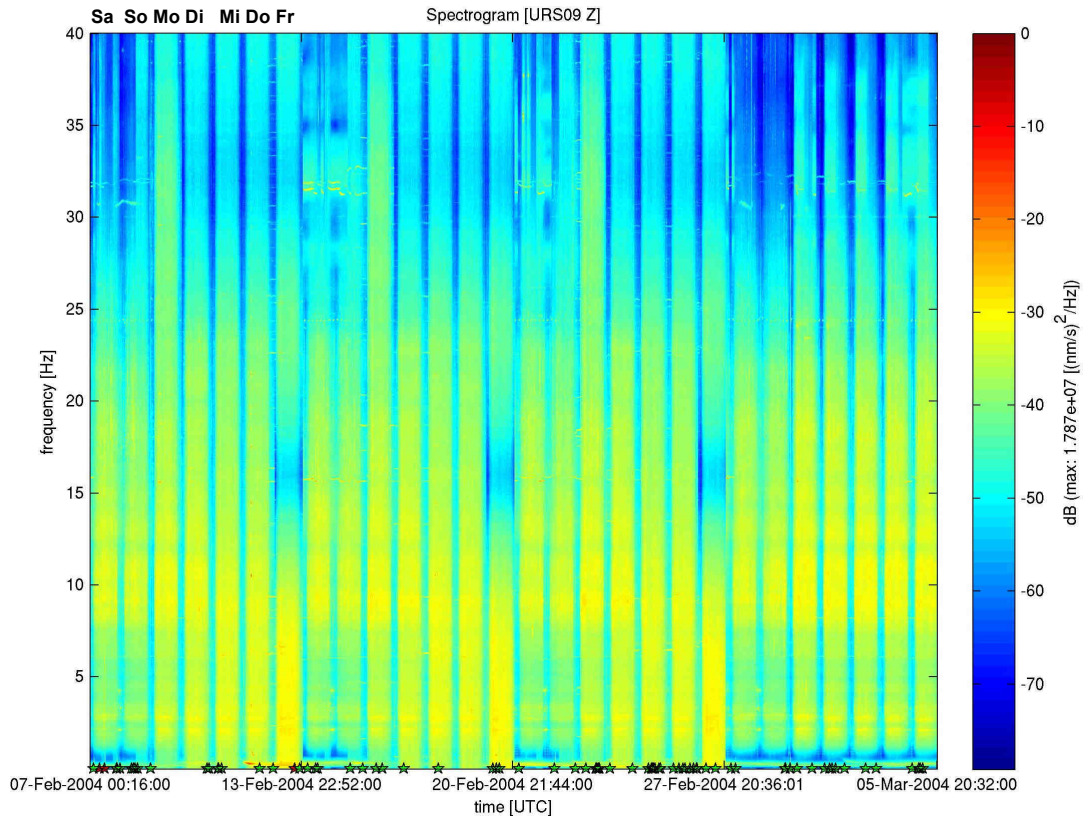


Abbildung 4.1: Variabilität des seismischen Rauschens im Frequenzbereich von 8 mHz bis 40 Hz an Station URS09 im Stadtzentrum von Bukarest– 28 Tage Spektrogramm der Vertikal-Komponente, Sterne markieren theoretisch berechnete Ankunftszeiten von Erdbebenwellen (siehe Tabelle 3.4, S. 36).

Erkennbar ist eine deutliche Abhängigkeit der Leistungsdichte des seismischen Rauschens von der Tageszeit. Deren Variation zwischen Tag und Nacht ist, wie im Folgenden gezeigt wird, abhängig von der Frequenz und dem Ort und beträgt an manchen Stationen mehr als 20 dB. Die starke Zunahme bzw. Abnahme der seismischen Bodenbewegung zwischen Tag und Nacht stimmt gut mit den Beobachtungen des innerstädtischen Verkehrs überein, der allgemein als Gradmesser anthropogener Aktivität dienen kann. Der innerstädtische Verkehr erreicht innerhalb kurzer Zeit sein Minimum etwa gegen 0 Uhr Ortszeit und setzt ab 4 Uhr Ortszeit wieder ein (Raileanu, 2006). Das am Samstag, 07.02.04, beginnende Spektrogramm (Abbildung 4.1) zeigt außerdem einen regelmäßigen Wochenrhythmus. Samstage und Sonntage sind besonders anhand einer ~ 20 dB geringeren Leistungsdichte gegenüber den Werktagen im Frequenzbereich zwischen 0.3-1 Hz und oberhalb von 25 Hz erkennbar. Eine breitbandige, besonders im Frequenzbereichen 0.3-1 Hz wirksame, anthropogene Quelle an Werktagen war in der letzten der vier dargestellten Wochen nicht aktiv.

Die folgende Zusammenfassung der Resultate ist zur Übersichtlichkeit in Frequenzbereiche (siehe Tabelle 3.8, S. 39) gegliedert, die umfangreichen Datentabellen mit Rauschamplituden der Bodenschwinggeschwindigkeit und der Bodenverschiebung im Frequenz- und Zeitbereich für alle Frequenzbereiche, Stationen und Komponenten würden den Rahmen dieser Arbeit sprengen und stehen am Geophysikalischen Institut als Datenträger zur Verfügung. Alle gezeigten Spektrogramme wurden mit Zeitreihen der Bodenschwinggeschwindigkeit erstellt. Uhrzeiten sind, falls nicht anders angegeben, in UTC.

4.1 Frequenzbereich 8 bis 40 mHz

Das sehr tieffrequente seismische Rauschen im Großraum Bukarest zeigt eine große Variabilität in Abhängigkeit von Zeit und Ort. Tabelle 4.1 enthält beispielhaft Median und Standardabweichung der 95.45-Perzentilen in nm/s für die ausgewerteten Zeitreihen von 6-9 Uhr UTC aller URS-Stationen mit STS-2 Seismometer.

nm/s	Median 95.45 Perzentile Vertikal	Standard- abweichung Vertikal	Median 95.45 Perzentile Nord-Süd	Standard- abweichung Nord-Süd	Median 95.45 Perzentile Ost-West	Standard- abweichung Ost-West
Station						
URS01	3.14E+01	6.75E+01	1.26E+04	7.63E+03	8.32E+03	3.81E+03
URS02	2.16E+02	3.62E+04	6.68E+03	2.09E+04	5.70E+03	1.36E+04
URS03	8.86E+01	6.64E+01	2.10E+03	4.88E+03	7.43E+02	1.25E+03
URS04	2.10E+02	4.01E+04	6.45E+04	6.83E+04	5.61E+04	4.75E+04
URS05	3.16E+01	1.11E+02	1.09E+04	7.16E+03	4.35E+03	3.91E+03
URS06	2.96E+01	5.68E+01	1.26E+03	2.15E+03	1.77E+03	2.69E+03
URS07	1.99E+01	1.98E+02	3.68E+03	6.62E+03	2.01E+03	2.09E+04
URS08	1.56E+02	3.93E+02	8.12E+03	1.82E+04	4.43E+03	8.55E+03
URS09	7.42E+01	6.52E+01	5.08E+03	4.40E+03	5.37E+03	4.25E+03
URS10	5.27E+01	2.45E+02	1.53E+04	8.08E+03	2.43E+04	2.44E+04
URS11	3.13E+02	1.75E+02	4.37E+03	2.29E+03	5.66E+03	4.07E+03
URS12	3.45E+02	9.32E+01	2.15E+03	4.75E+02	8.38E+03	3.21E+03
URS13	9.82E+01	1.55E+02	1.16E+04	1.01E+04	4.63E+03	2.70E+03
URS14	1.59E+02	1.03E+02	1.30E+04	4.54E+03	5.38E+03	1.57E+03
URS15	3.70E+01	2.71E+01	1.59E+04	1.04E+04	1.11E+04	7.19E+03
URS16	6.68E+03	4.70E+03	5.48E+03	5.74E+03	1.02E+04	5.80E+03
URS17	2.78E+01	3.43E+02	3.38E+03	9.68E+03	3.53E+03	1.99E+04
URS18	1.64E+02	1.28E+05	8.92E+03	6.61E+04	1.13E+04	9.94E+04
URS19	2.57E+03	6.29E+03	8.27E+03	7.91E+03	2.42E+03	2.40E+03
URS20	1.96E+02	1.42E+04	1.24E+03	1.72E+04	1.20E+03	1.20E+04
URS21	2.16E+01	2.07E+01	2.13E+03	7.77E+02	1.44E+03	1.36E+03
URS22	1.07E+02	3.35E+01	7.88E+03	5.24E+03	9.33E+03	6.04E+03

Tabelle 4.1: Median der 95.45-Perzentilen in nm/s der ausgewerteten Zeitreihen von 06-09 Uhr UTC im Frequenzbereich von 8-40 mHz und deren Standardabweichung für Stationen mit STS-2 Seismometern.

Das seismische Rauschen hat in den horizontalen Bewegungsrichtungen (Horizontal-Komponenten) im Allgemeinen wesentlich größere Amplituden (743-64500 nm/s) als in der vertikalen Bewegungsrichtung (Vertikal-Komponente) (20-6680 nm/s), wobei die Amplitudenverhältnisse zwischen den Bewegungsrichtungen mit der Zeit und an den verschiedenen Stationen ebenso wie die absoluten Rauschamplituden stark schwanken. Dies wurde auch von Ziehm (2006) bei der Analyse spektraler H/V-Verhältnisse in Bukarest festgestellt. Ein Vergleich der Stationen anhand der Standardabweichungen der 95.45-Perzentilen, die zwischen 20-128000 nm/s liegen, zeigt, dass es im Großraum Bukarest erhebliche Standortunterschiede gibt. Im Allgemeinen zeigen ruhigere Stationen mit einem

Median der 95.45-Perzentilen (im Folgenden Rauschamplitude) kleiner als 100 nm/s auf der Vertikal-Komponente auf den Horizontal-Komponenten eine um 1-3 Größenordnungen größere Rauschamplitude zwischen 1200-24000 nm/s (siehe Tabelle 4.1, z.B. URS01). Bei den Stationen URS16 und URS19 mit Rauschamplituden größer 2500 nm/s auf der Vertikal-Komponente ist dies mit Rauschamplituden zwischen 2400-10000 nm/s auf den Horizontal-Komponenten nicht der Fall. Alle übrigen Stationen weisen ein sehr unterschiedliches und unsystematisches Verhalten auf (siehe Tabelle 4.1). Dies deutet auf einen Einfluss lokaler Quellen, die elastische Schwingungen mit sehr unterschiedlichen H/V-Verhältnissen einkoppeln. Die große Variabilität des seismischen Rauschens erklärt sich aus einer Kombination von unterschiedlichen und oft sehr lokal oder sporadisch wirkenden Quellen seismischer Bodenbewegung in diesem Frequenzbereich, auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll.

Das 8-Tage Spektrogramm der Nord-Süd-Komponente von Station URS21 (siehe Abbildung 4.2) zeigt den Einfluss der leistungsstärksten Quellen seismischer Bodenbewegung im Frequenzbereich von 8-40 mHz auf die Leistungsdichte des seismischen Rauschens. Erkennbar ist ein recht deutlicher Tag/Nacht-Wechsel mit einem Unterschied der Leistungsdichte von etwa 15-20 dB. Die plötzliche Zunahme der Leistungsdichte unterhalb von 0.1 Hz gegen 12 Uhr UTC des dritten Tages korreliert mit der Zunahme der Windgeschwindigkeit von 2 m/s (entspricht dem Durchschnitt der für Bukarest verfügbaren Windgeschwindigkeiten, siehe S. 36) auf 6-7 m/s. Diese ungewöhnlich hohen Windgeschwindigkeiten hielten bis um 12 Uhr UTC am 4. Tag an und flauten dann bis etwa 5 Uhr am 5. Tag wieder auf 2 m/s ab.

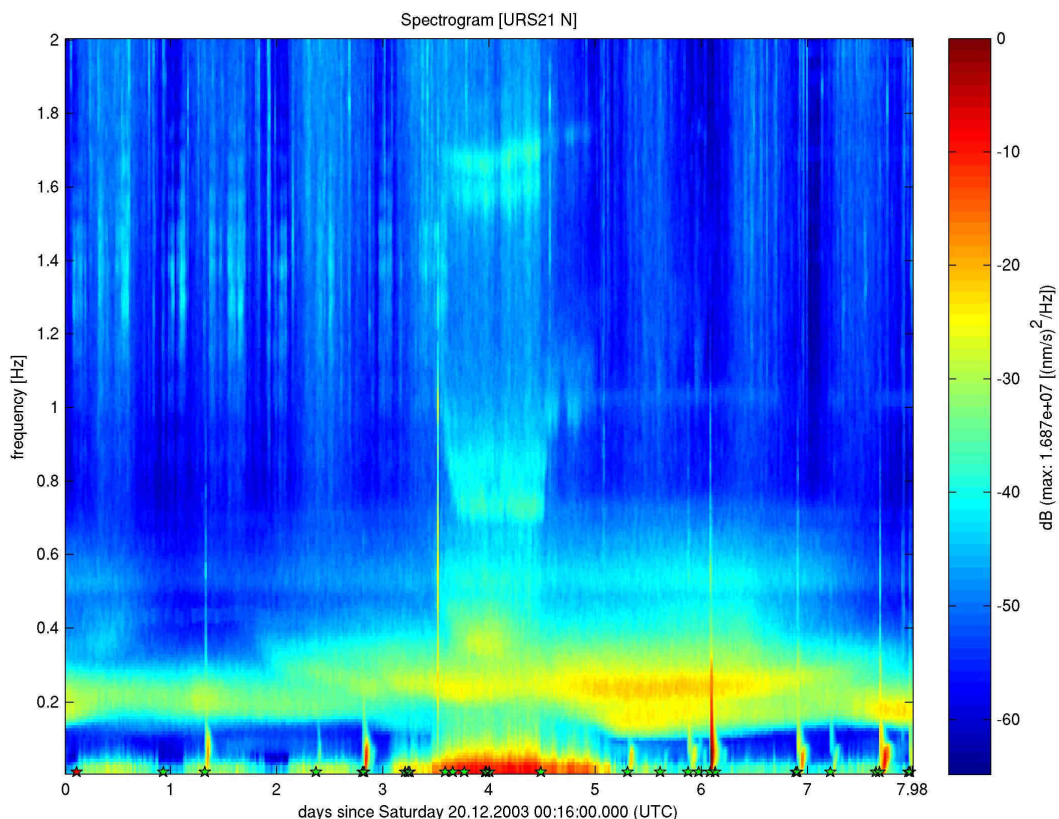


Abbildung 4.2: Spektrogramm des seismischen Rauschens im Frequenzbereich 8 mHz bis 2 Hz an Station URS21, Nord-Süd Komponente.

In Abbildung 4.2 ist ebenfalls die Ankunft von Raum- und Oberflächenwellen (grüne Sterne) mehrerer Erdbeben in Form transienter Einsätze erhöhter Leistungsdichte bis ~ 1 Hz (Raumwellen) und längerfristig erhöhten Leistungsdichten (bis zu 2 Stunden) im Frequenzbereich von 8 mHz bis 0.1 Hz (Oberflächenwellen) sichtbar. Im Frequenzbereich 8-40 mHz stellen teleseismische Oberflächenwellen starker Erdbeben eine der leistungsstärksten Quellen seismischer Bodenbewegung dar, die jedoch in dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

Das Böenspektrum des Windes (siehe Abbildung 2.1, S. 7) zeigt ein breites Maximum unterhalb von 0.1 Hz und erklärt die unterhalb dieser Frequenz beobachtete Leistungszunahme des seismischen Rauschens bei erhöhter Windgeschwindigkeit. Die durch Windeinwirkung angeregten seismischen Schwingungen sind in Bukarest ab einer Windgeschwindigkeit von 4-5 m/s als individuelle Quelle seismischer Energie bzw. Leistung identifizierbar. Eine Betrachtung der 95.45-Perzentilen für den Zeitraum von 11-15 Uhr (Abbildung 4.3) zeigt außergewöhnlich hohe Rauschamplituden am 24.03.04 und 07.05.04, die im gesamten URS-Netzwerk auftreten und die von 21-01 Uhr nicht feststellbar sind (Abbildung 4.4). Dies korreliert mit dem Verlauf der Windgeschwindigkeit, die an beiden Tagen (siehe Windgeschwindigkeiten, S. 99ff) zwischen 11-15 Uhr einen Maximalwert von 9 m/s erreichte und gegen Abend wieder durchschnittliche Werte von 2-3 m/s annahm.

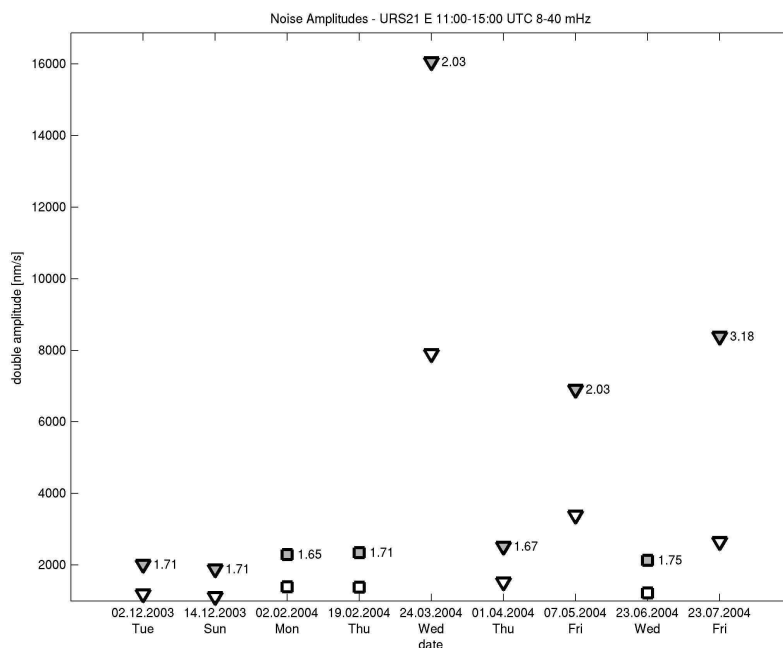


Abbildung 4.3: 95.45-Perzentilen (weiß) und 99.73-Perzentilen (grau) mit Peakfactor der Bodenschwingungsgeschwindigkeit im Frequenzbereich 8-40 mHz von 11-15 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Ost-West-Komponente von Station URS21. Symbole: Kreis (Rauschklasse 1), Quadrat (RK 2), Raute (RK 3), Dreieck (RK 4).

4.1 Frequenzbereich 8 bis 40 mHz

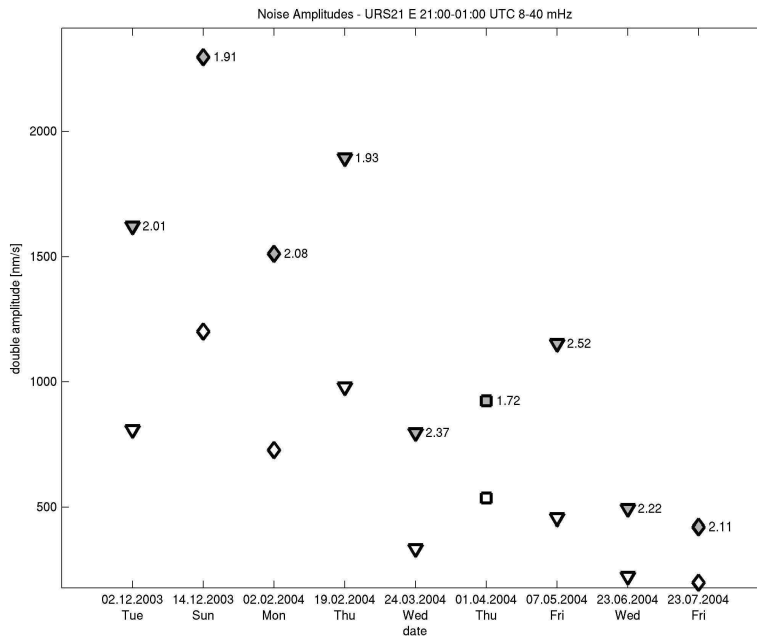


Abbildung 4.4: 95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 8-40 mHz von 21-01 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Ost-West-Komponente von Station URS21 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).

Auch auf den Vertikal-Komponenten findet eine Zunahme der Rauschamplituden bei Windgeschwindigkeiten größer 4-5 m/s statt, die jedoch absolut und relativ deutlich geringer ausfallen (vgl. Abbildung 4.5 und Abbildung 4.3). Auch bei erhöhten Windgeschwindigkeiten weisen die Rauschamplituden und H/V-Verhältnisse an den einzelnen Standorten unsystematische Schwankungen auf, die vermutlich durch lokal unterschiedliche Windgeschwindigkeiten und Bebauung verursacht werden. Da nur die Windgeschwindigkeit an einem Ort im Großraum Bukarest zur Verfügung steht, ist eine Beurteilung der räumlichen Änderungen leider nicht möglich.

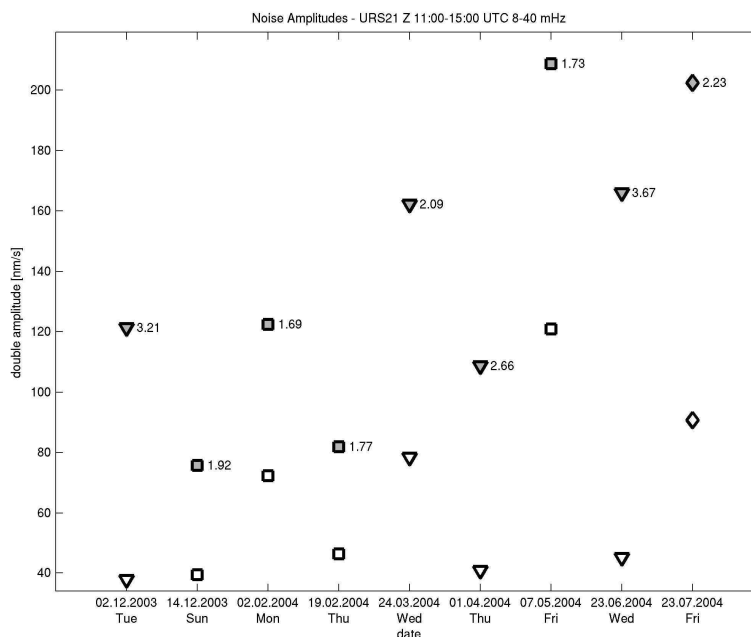


Abbildung 4.5: 95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 8-40 mHz von 11-15 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS21 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).

Die in Abbildung 4.2 klar erkennbare Tageszeitabhängigkeit ist ebenfalls je nach Station und Bewegungsrichtung sehr unterschiedlich ausgeprägt (siehe Tabelle 4.2). Die Tag/Nacht-Unterschiede variieren stark zwischen den Stationen auf der Vertikal-Komponente von -6 dB bis +16 dB und auf den Horizontal-Komponenten von 0,2 dB bis 23 dB. Zwischen Größe des Tag/Nacht-Unterschiedes und Höhe der Rauschamplituden an den Stationen besteht keine erkennbare Korrelation (vgl. Tabelle 4.1 mit Tabelle 4.2). Die verursachenden Quellen zeigen eine große Variabilität in Bezug auf die angeregte Amplitude, das H/V-Verhältnis der eingekoppelten Schwingungen und die tageszeitabhängige Aktivität.

Station	Median 95.45-Perzentile in nm/s 21-01 Uhr UTC Vertikal	Verhältnis Tag/Nacht in dB Vertikal	Verhältnis Tag/Nacht in dB Nord-Süd	Verhältnis Tag/Nacht in dB Ost-West
URS01	31	10.8	19.7	12.0
URS02	216	-6.1	10.0	7.5
URS03	89	6.8	0.4	1.6
URS04	210	5.4	10.5	19.7
URS05	32	16.0	20.0	16.4
URS06	30	5.8	3.3	4.4
URS07	20	9.3	10.5	5.5
URS08	156	-1.3	7.1	4.5
URS09	74	11.7	5.5	6.9
URS10	53	4.7	8.2	9.1
URS11	313	15.9	10.7	5.6
URS12	345	7.2	10.9	15.7
URS13	98	15.5	20.4	23.0
URS14	159	11.1	19.9	13.7
URS15	37	2.7	11.3	8.9
URS16	6683	0.5	5.0	0.2
URS17	28	8.8	1.2	3.5
URS18	164	4.1	10.8	8.9
URS19	2571	2.9	5.6	5.3
URS20	196	14.1	10.7	7.4
URS21	22	7.0	10.2	8.6
URS22	107	2.2	8.9	8.2

Tabelle 4.2: Verhältnis der 95.45-Perzentilen (Median) zwischen Tag (06-09 Uhr) und Nacht (21-01 Uhr) im Frequenzbereich 8-40 mHz an URS-Stationen mit STS-2 Seismometer in dB.

Die festgestellten großen Unterschiede der durchschnittlichen 95.45-Perzentilen zwischen den Stationen zeigt Abbildung 4.6 als Interpolation der Mediane der 95.45-Perzentilen im Stadtgebiet von Bukarest für die Ost-West-Komponente für den Zeitraum 06-09 Uhr. Es lassen sich keine geographischen Zusammenhänge zwischen den Stationen mit großen Rauschamplituden feststellen, die Ursache muss also in unmittelbarer Umgebung der einzelnen Stationen liegen. Ein Vergleich mit der räumlichen Verteilung in den Nachtstunden zwischen 21-01 Uhr UTC (Abbildung 4.7) verdeutlicht nochmals den starken Tag/Nacht-Unterschied der Rauschamplituden bis zu 23 dB und die kleiner gewordenen räumlichen Amplitudenunterschiede. Da keine klaren Welleneinsätze erkennbar sind und die Quellen innerhalb des Netzwerkes liegen, war keine konkrete Lokalisierung möglich. Es können nur Vermutungen anhand eines detaillierten Stadtplanes gemacht werden. Station URS04 liegt unmittelbar neben einem vorwiegend aus Betrieben der Schwerindustrie bestehendem Industriegebiet, die zum Transport über eigene Gleisanschlüsse an das Schienennetz der rumänischen Bahn verfügen. Die nächsten Gleisanlagen sind

weniger als 500 Meter vom Stationsstandort entfernt. In einer Entfernung von etwa 1800 Metern befindet sich das zweitgrößte Elektrizitätswerk Bukarests (*C.E.T. VEST*) mit einer Leistung von 250 MW. Station URS16 ist etwa 2500 Meter vom leistungsstärksten Elektrizitätswerk (*C.E.T. SUD*) mit 550 MW entfernt, welches ebenfalls über einen Gleisanschluss zur Brennstoffversorgung verfügt. Die Stationen URS13 und URS20 liegen ebenfalls nahe an Schwerindustrieregionen, die nächsten Gleisanlagen sind etwa 600 Meter (URS20) bzw. 1000 Meter (URS13) entfernt. Die Stationen URS18 und URS02 haben eine Entfernung von 1000 Metern bzw. 500 Metern zur Bahnstrecke Bukarest-Konstantza, die eine der wichtigsten Verbindungen an die Küste des Schwarzen Meeres darstellt. Die von langsam fahrenden Zügen angeregten Schwingungen liegen im betrachteten Frequenzbereich (siehe Tabelle 2.1, Kap. 2.1.2 Anthropogene Quellen, S. 4). Station URS10 befindet sich in unmittelbarer Nachbarschaft des internationalen Flughafens Otopeni (1000 Meter zur Startbahn, 300 Meter zum Rollfeld). Die Stationen URS09 und URS12 liegen im Stadtzentrum nahe stark befahrenen Straßen. Es sind verarbeitende Industrie und langsame Massenbewegungen (Schwertransport per Bahn, innerstädtischer Verkehr) als Ursache für tieffrequentes Rauschen denkbar.

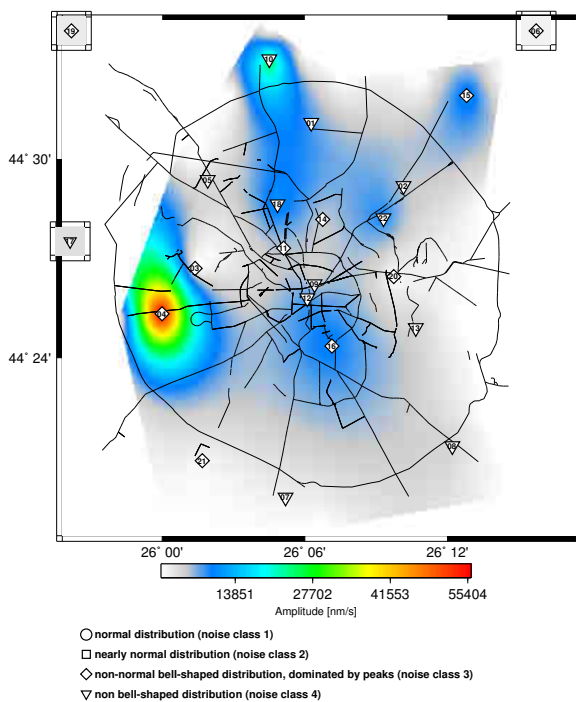


Abbildung 4.6: Median der 95.45-Perzentile des seismischen Rauschens von 8-40 mHz zwischen 06-09 Uhr UTC, Ost-Komponente.

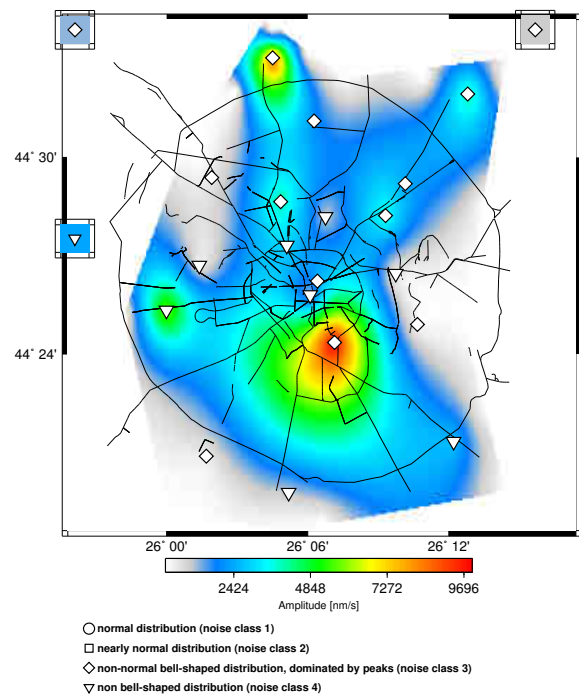


Abbildung 4.7: Median der 95.45-Perzentile des seismischen Rauschens von 8-40 mHz zwischen 21-01 Uhr UTC, Ost-Komponente.

Die Stationen URS06, URS17 und URS19 liegen außerhalb des dargestellten Stadtgebietes.

4.2 Frequenzbereich 40 mHz bis 0.6 Hz

Die Bodenbewegung im Frequenzbereich 0.04-0.6 Hz wird im Stadtgebiet von Bukarest in Zeiten starker Anregung von Meereseismik unterschiedlicher Quellgebiete dominiert. Diese übertrifft zeitweise das vor Ort erzeugte seismische Rauschen in drei Frequenzbändern deutlich in Amplitude und Leistung. Im Frequenzband 0.09-0.18 Hz sind in Zeiten verstärkter Anregung weit entfernter Quellgebiete Oberflächenwellen der sekundären Meereseismik dominierend (siehe Abbildung 4.8, Tage 3-5 und 9-11), teilweise ist auch ein erheblicher Einfluss der primären Meereseismik im Frequenzband 0.04-0.09 Hz nachweisbar. Bei höheren Frequenzen von 0.18-0.6 Hz sind Oberflächenwellen der Meereseismik aus näheren Quellgebieten im Schwarzen Meer, in der Marmara See und im Mittelmeer vorherrschend. Aufgrund der geringen Distanz zu diesen Gebieten und der daraus folgenden geringeren Dämpfung und Dispersion der Oberflächenwellen ist das Spektrum dieser Meereseismik breitbandiger, hochfrequenter und zeigt eine deutliche Abhängigkeit vom anregenden Wellenklima (siehe S. 4). Das Spektrogramm (Abbildung 4.8) zeigt ein am dritten Tag beginnendes Ereignis der Meereseismik aufgrund erhöhter Windgeschwindigkeiten im Bereich der Marmara See und des Schwarzen Meeres, dessen Frequenzverlauf von Entwicklung und Zugverlauf des Sturmsystems abhängig ist (Beispiel siehe S. 58).

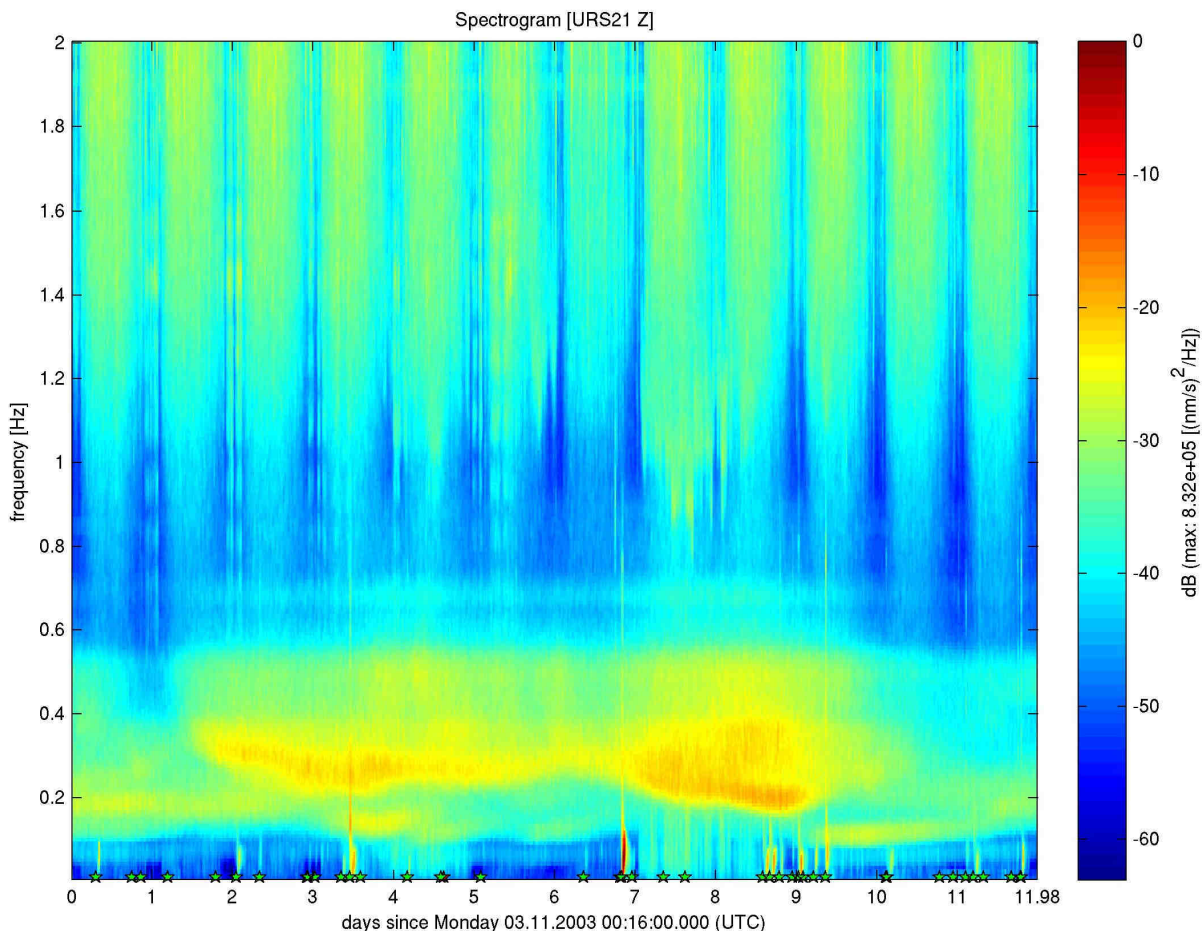
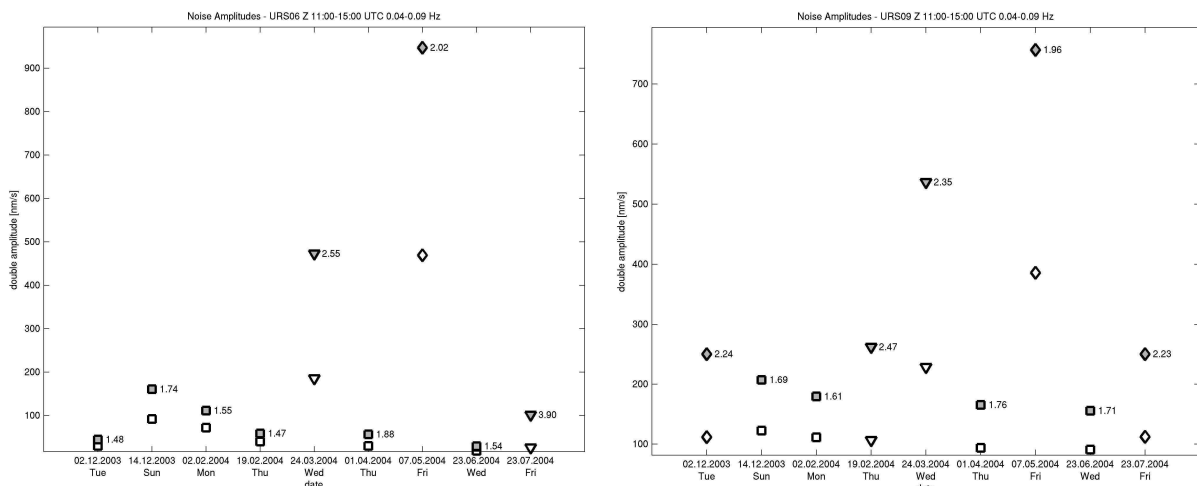


Abbildung 4.8: 12-Tage-Spektrogramm der Vertikal-Komponente von 8 mHz bis 2 Hz an Station URS21, süd-westlich des Stadtzentrums.

Im Folgenden wird anhand dieser drei Frequenzbänder genauer auf die entsprechende Meereseismik und das urbane seismische Rauschen eingegangen.

4.2.1 Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz

Die Hauptquellen seismischer Bodenbewegung in Bukarest sind im Frequenzbereich von 0.04-0.09 Hz Wind, primäre Meereseismik und anthropogene Aktivität. Dabei stellen Wind und primäre Meereseismik die stärksten im gesamten Großraum Bukarest sporadisch wirkenden Quellen dar, während der anthropogene Einfluss einen zeitlich sehr regelmäßigen und standortabhängigen Einfluss aufweist. Bei der Auswahl der auszuwertenden Zeitreihen wurden bewusst Zeiten mit sehr starker Meereseismik vermieden, um den anthropogenen Einfluss möglichst ungestört zu untersuchen (siehe S. 37). Die Rauschamplituden auf der Vertikal-Komponente von Station URS06 außerhalb des Stadtgebietes ((links) Abbildung 4.9) zeigen, wie zuvor bei den tieferen Frequenzen, eine deutliche Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und seismischem Rauschen zwischen 11-15 Uhr am 24.03.04 und 07.05.04. Die 95.45-Perzentilen liegen an Tagen mit geringer Windgeschwindigkeit auf der Vertikal-Komponente von Station URS06 zwischen 30-100 nm/s und steigen am 24.03.04 und 07.05.04 auf 180 nm/s bzw. 480 nm/s an.



(links) **Abbildung 4.9:** 95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz von 11-15 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS06.

(rechts) **Abbildung 4.10:** 95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz von 11-15 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09. (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).

Ein Vergleich mit den Rauschamplituden an Station URS09 im Stadtzentrum ((rechts) Abbildung 4.10) zeigt die durch die anthropogene Aktivität erhöhten Amplituden zwischen 75-125 nm/s gegenüber dem stadtfernen Standort von URS06. Der Einfluss der Windanregung am 24.03.04 und 07.05.04 auf das seismische Rauschen bleibt aufgrund der großen Amplituden (235 nm/s bzw. 385 nm/s) klar erkennbar. Die an URS06 relativ erhöhten Rauschamplituden am 14.12.03 (90 nm/s) und 02.02.04 (70 nm/s) treten jedoch an URS09 aufgrund des hier dominanten anthropogenen Rauschens kaum noch hervor. In den Nachtstunden zwischen 21-01 Uhr (Abbildung 4.11) sind nach Abnahme der Windgeschwindigkeit am 24.03.04 und 07.05.04 keine erhöhten Rauschamplituden mehr feststellbar.

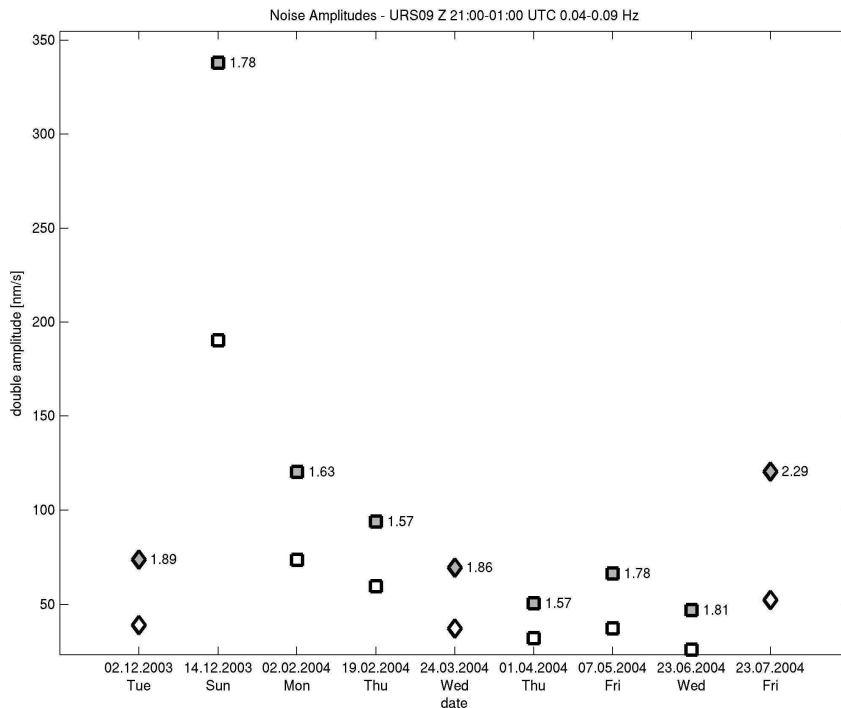


Abbildung 4.11: 95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz von 21-01 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).

Die Rauschamplitude betrug in den Nachtstunden des 14.12.03 an allen Stationen >180 nm/s und am 02.02.04 >70 nm/s (siehe auch URS09, Abbildung 4.11). Der Mittelwert der Mediane der 95.45-Perzentilen in den Nachtstunden aller Stationen beträgt 58 nm/s. Ursache für die am 14.12.03 und 02.02.04 relativ dazu im gesamten Netzwerk erhöhten Rauschamplituden ist jeweils ein Ereignis primärer und sekundärer Meeresmikroseismik.

Daher wurden mit den Zeitreihen der vertikalen Bodenschwinggeschwindigkeit von 21-01 Uhr am 14.12.03 und, zum Vergleich mit niedrigem seismischen Rauschen, am 02.12.03 fk-Analysen mit gleitenden Fenstern durchgeführt. Es wurden 150 Zeitfenster mit einer Länge von je 240 Sekunden und einem Abstand von 60 Sekunden über die Zeitreihen geschoben und jeweils Langsamkeit und Rückazimut bestimmt. Abbildung 4.12 und Abbildung 4.13 zeigen die Energiedichte in dB normiert auf das Gesamtmaximum der fk-Analysen für Rückazimut und Langsamkeit über die Zeit. Das jeweilige Energiedichtemaximum der einzelnen fk-Analysen ist mit einem weißen Stern markiert. Am 14.12. fallen im gesamten Zeitraum Rayleigh-Wellen mit einer Langsamkeit zwischen 25 und 35 s/° und einem variierenden Rückazimut zwischen 300-30° ein (Abbildung 4.12). Dies umfasst die Küsten des Atlantiks von der Bretagne bis Nord-Norwegen. Die Zeitreihe zeigt insgesamt ein in der Amplitude gleich bleibendes, nahezu normalverteiltes Rauschen (Rauschklasse 2). Am 02.12.03 scheinen mehrfach Rayleigh-Wellen mit einer Langsamkeit von 20-30 s/° aus den zwei Einfallsrichtungen 50-100° und 300-350° einzufallen. Die Unterschiede der berechneten Energiedichten sind allerdings mit weniger als 3 dB und teilweise sogar weniger als 1 dB im Wertebereich von 0-360° für den Rückazimut sehr gering (siehe Abbildung 4.13). Eine verlässliche Bestimmung des Rückazimuts ist nicht möglich. Am 02.12.03 ist zwischen 21-01 Uhr kein klarer Einfall von Oberflächenwellen der Meeresmikroseismik erkennbar. Die 95.45-Perzentile betrug am 02.12.03 an den URS-Stationen des verwendeten Arrays 30-40 nm/s im Vergleich zu 180-200 nm/s am 14.12.03. Die Amplitudenunterschiede

zwischen Meereseismik und lokal erzeugtem Rauschen sind am 02.12.03 geringer und erklären die schlechten Ergebnisse der fk-Analyse und die insgesamt geringere 95.45-Perzentile.

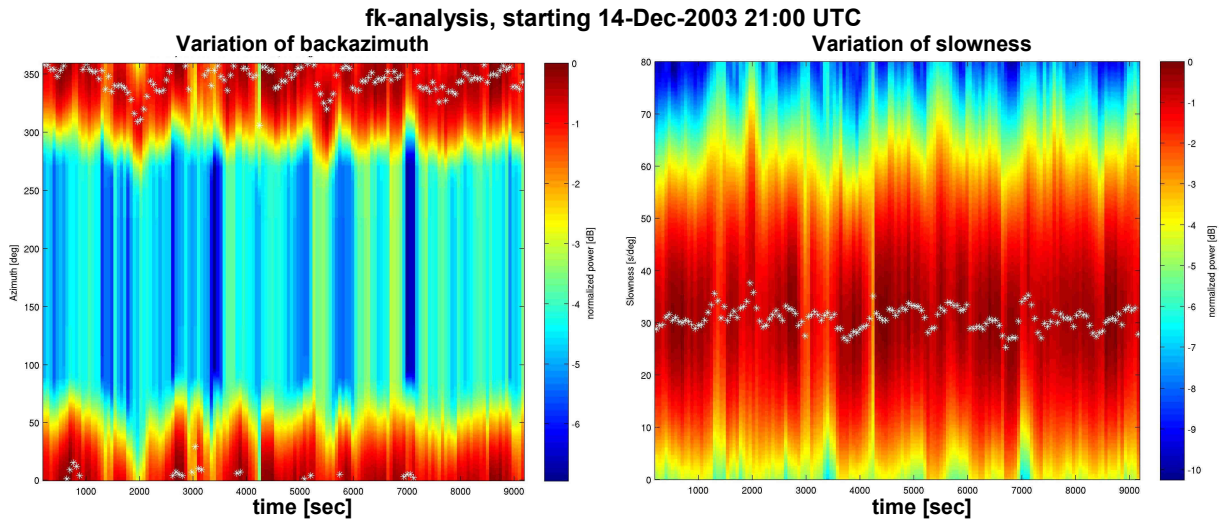


Abbildung 4.12: Zeitlicher Verlauf von Rückazimut und Langsamkeit am 14.12.2003 ab 21 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz.

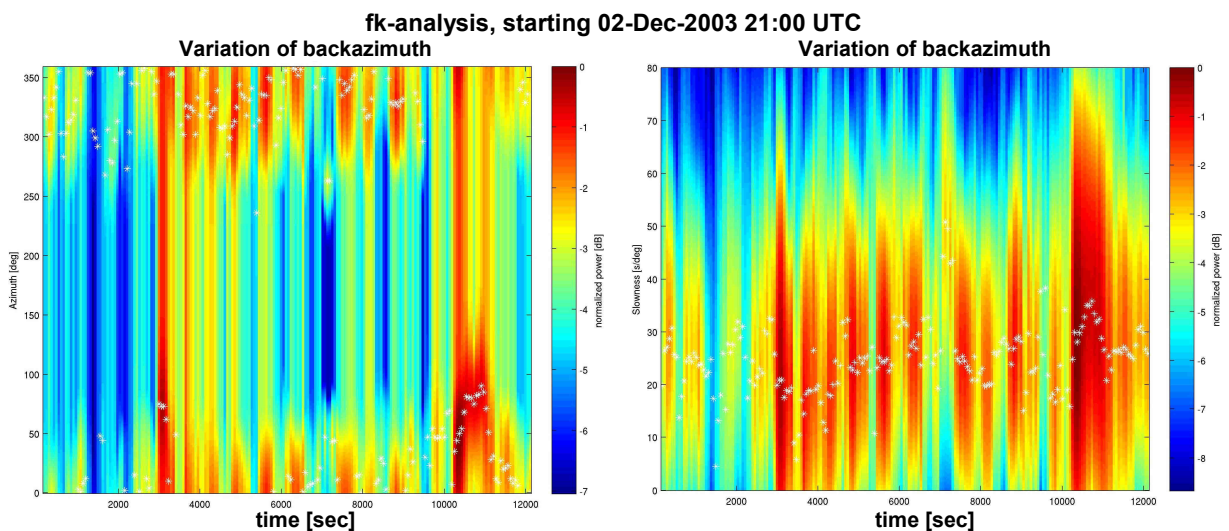


Abbildung 4.13: Zeitlicher Verlauf von Rückazimut und Langsamkeit am 02.12.2003 ab 21 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz.

Die Darstellung des seismischen Rauschens zwischen 11-15 Uhr auf der Vertikal-Komponente über das Stadtgebiet (Abbildung 4.14) zeigt eine Zunahme der Rauschamplituden von den Randbezirken (~70 nm/s) zum Stadtzentrum (~110-140 nm/s) sowie einige Stationen mit stark erhöhten Rauschamplituden wie URS04 (230 nm/s), URS16 (311 nm/s) und URS11 (410 nm/s). Betrachtet man die Tag/Nacht-Unterschiede an den Stationen in dB und den Median der 95.45-Perzentilen auf der Vertikal-Komponente in den Nachtstunden (Tabelle 4.3) wird deutlich, dass die Mehrheit der Stationen nachts Rauschamplituden im Bereich 31-41 nm/s und nur Tag/Nacht-Unterschiede zwischen 5-10 dB aufweisen. Im Vergleich dazu zeigen die innerstädtischen Stationen URS09 und URS12 mit Rauschamplituden zwischen 39-49 nm/s und einem Tag/Nacht-Unterschied kleiner 10 dB erstaunlich gering erhöhte Rauschamplituden, die auf einen geringen Einfluss des täglichen Verkehrs auf das seismische Rauschen zwischen 0.04-0.09 Hz schließen lassen.

Auffällig sind dagegen, wie bereits im Frequenzbereich 8-40 mHz, einige Stationen, die relativ große Rauschamplituden zwischen 54-332 nm/s und/oder Tag/Nacht-Unterschiede größer 10 dB aufweisen. Stationen mit besonders großen Rauschamplituden wie URS16 (332 nm/s) und URS19 (139 nm/s) zeigen die geringsten Tag/Nacht-Unterschiede mit 0.2 bzw. 4.1 dB, die Quellen sind also Tag und Nacht aktiv. Stationen mit nachts kaum erhöhten Rauschamplituden wie z.B. URS20 (49 nm/s) und URS14 (32 nm/s) die Unterschiede größer 10 dB aufweisen liegen offensichtlich im Einflussbereich nachts nicht aktiver Quellen. Die Stationen URS04 und URS11 zeigen sowohl erhöhte Rauschamplituden nachts (54-77 nm/s) als auch große Tag/Nacht-Unterschiede (11-15 dB). Außer für die Stationen URS17 und URS19 ist anhand eines Stadtplans erkennbar, dass alle Stationen mit nächtlichen Rauschamplituden größer 50 nm/s und/oder Tag/Nacht-Unterschieden größer 10 dB auf der Vertikal-Komponente näher als 1000 m an Industriegebieten und Gleisanlagen liegen (siehe auch Seite 42). Station URS11 liegt etwa 1.5 km vom Bukarester Hauptbahnhof *Gara de Nord* entfernt.

Station	Median 95.45-Perzentile in nm/s 21-01 Uhr UTC Vertikal	Verhältnis Tag/Nacht in dB Vertikal	Verhältnis Tag/Nacht in dB Nord-Süd	Verhältnis Tag/Nacht in dB Ost-West
URS01	32	9.3	19.1	15.3
URS02	33	7.5	7.5	8.5
URS03	37	5.8	-0.3	0.2
URS04	54	11.1	12.9	19.3
URS05	36	8.5	19.1	13.0
URS06	31	7.0	4.1	3.2
URS07	34	8.1	9.9	10.1
URS08	34	6.1	4.9	2.3
URS09	39	8.8	5.3	8.3
URS10	31	7.0	6.3	4.8
URS11	77	15.1	11.2	4.6
URS12	49	9.5	9.4	10.8
URS13	45	10.3	24.9	22.3
URS14	32	11.3	23.4	17.0
URS15	25	7.7	8.5	10.6
URS16	332	0.2	2.9	0.2
URS17	56	2.5	-2.6	-6.0
URS18	35	8.1	11.6	11.5
URS19	139	4.1	6.9	3.8
URS20	49	12.6	5.5	4.8
URS21	36	5.3	5.9	4.3
URS22	43	4.3	4.5	4.3

Tabelle 4.3: Verhältnis der 95.45-Perzentilen (Median) zwischen Tag (06-09 Uhr) und Nacht (21-01 Uhr) im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz an URS-Stationen mit STS-2 Seismometer in dB.

Insgesamt wird das seismische Rauschen im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz flächenhaft von zeitlich begrenzten Meereseismik- und Windereignissen und lokal von starken anthropogenen Quellen dominiert. Die anthropogenen Quellen sind wie im Frequenzbereich 8-40 mHz bei der Industrie und dem Schwerlastverkehr zu suchen und sind teilweise dauerhaft aktiv oder zeigen ein tageszeitabhängiges Verhalten.

4.2 Frequenzbereich 40 mHz bis 0.6 Hz

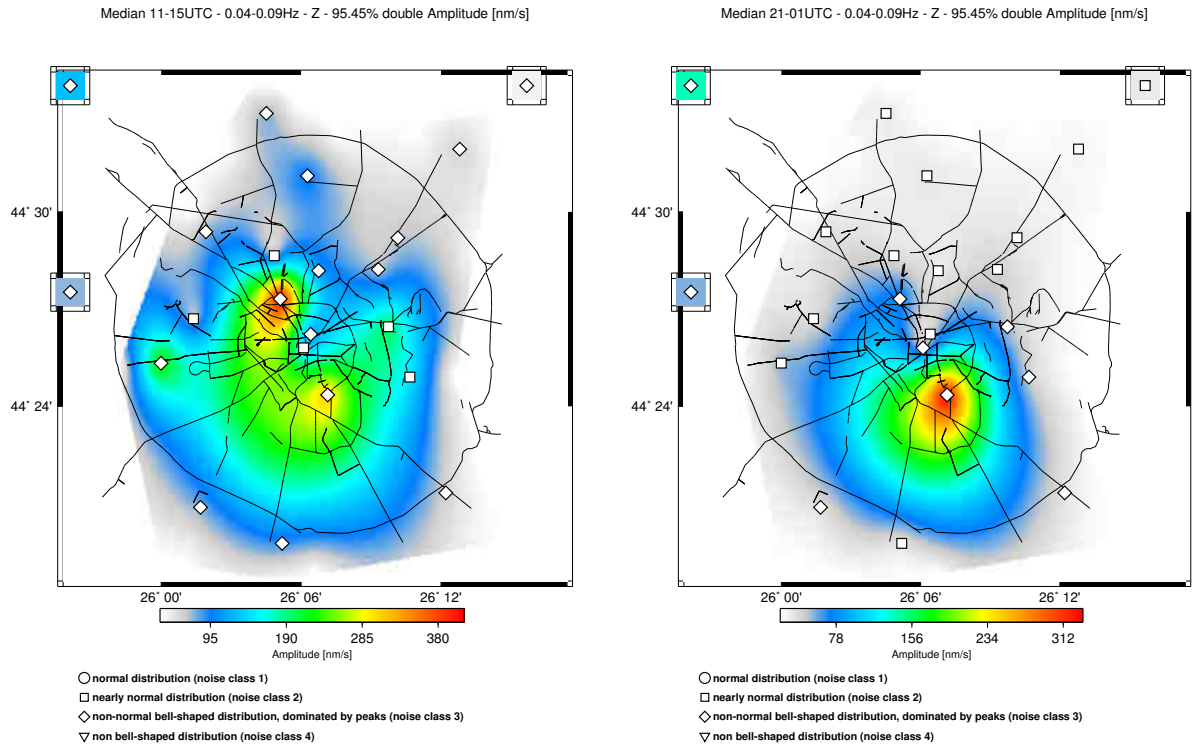


Abbildung 4.14: Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz, Vertikal-Komponente.

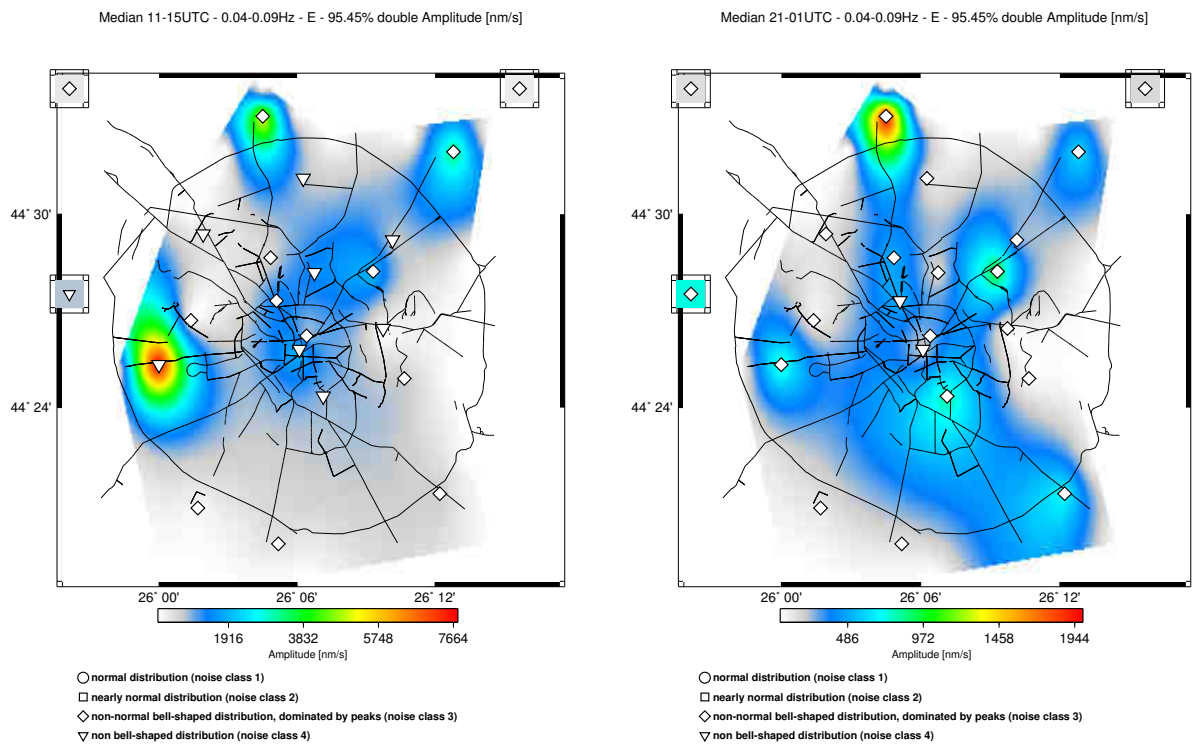


Abbildung 4.15: Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz, Ost-West-Komponente.

4.2.2 Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz

Das seismische Rauschen im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz weist im gesamten URS-Netzwerk einen Jahrestrend mit abnehmenden Amplituden vom Winter zum Sommer und gleichzeitig einen Trend zunehmender Amplituden von Süden nach Norden auf. Wie bereits im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz wurden auch im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz die größten Amplituden aufgrund eines Ereignisses der primären und sekundären Meereseismik am 14.12.03 gemessen. Im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz betrug die 95.45-Perzentile am 14.12.03 zwischen 11-15 Uhr an allen Stationen mit STS-2 Seismometer auf der Vertikal-Komponente ~ 100 nm/s. Im Gegensatz dazu zeigen die 95.45-Perzentilen im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz im gleichen Zeitraum einen klaren Nord-Süd-Trend von 500 nm/s im Süden (URS21 und URS07) bis zu 2000 nm/s im Norden (URS06). Auf den Horizontal-Komponenten ist der Trend ebenfalls beobachtbar mit ~ 1200 nm/s im Süden (URS07, URS08, URS21) und ~ 4000 nm/s im Norden (URS06, URS10, URS18). Alle Stationen zeigen die anhand URS06 (Abbildung 4.16) und URS09 (Abbildung 4.17) gezeigte jahreszeitliche Abnahme der 95.45-Perzentilen, die auf allen drei Bewegungsrichtungen Vertikal, Nord-Süd und Ost-West stattfindet. Auf der Vertikal-Komponente nimmt die 95.45-Perzentile vom 19.02.04 bis zum 23.07.04 in den Nachtstunden an URS06 im Norden von 1000 nm/s auf 120 nm/s und an URS21 im Süden von 290 nm/s auf 85 nm/s ab.

Auch im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz findet man den Einfluss des Windes auf das seismische Rauschen. Die Rauschamplituden zwischen 11-15 Uhr (21-01 Uhr) am 07.05. liegen zwischen 200 nm/s (130 nm/s) bei URS21 im Süden und 500 nm/s (240 nm/s) im Norden (URS06; Abbildung 4.16). In welcher Beziehung dabei der allgemeine Nord-Süd-Trend, lokal unterschiedliche Windgeschwindigkeiten und die Bebbauung zueinander stehen, ist unklar.

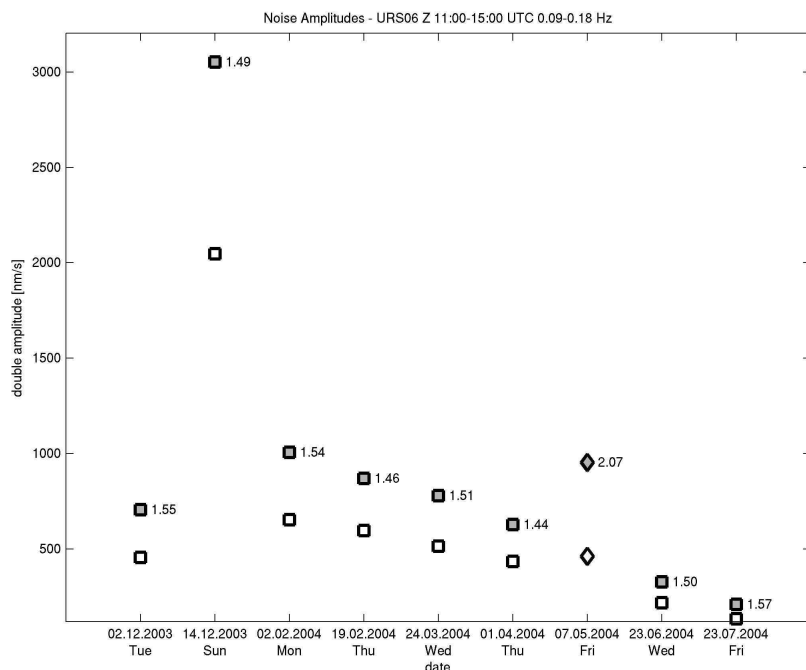


Abbildung 4.16: 95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz von 11-15 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS06 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).

4.2 Frequenzbereich 40 mHz bis 0.6 Hz

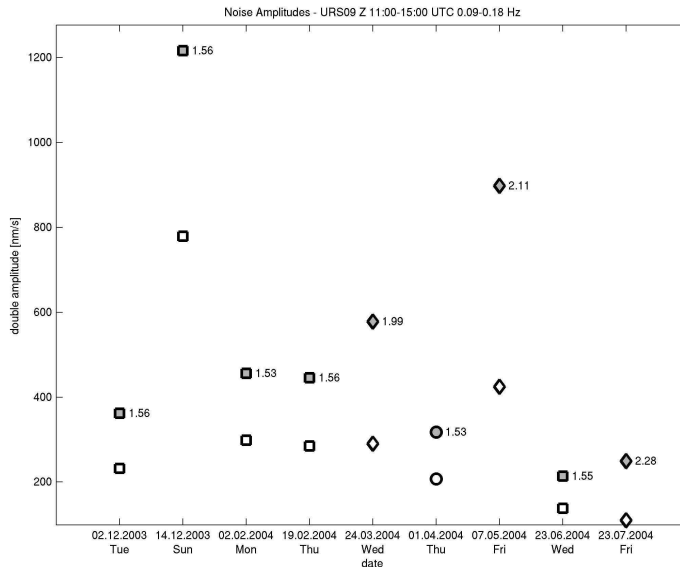


Abbildung 4.17: 95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz von 11-15 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).

Der festgestellte Nord-Süd-Trend ist mit der Jahreszeit und der Tageszeit stabil. Abbildung 4.18 zeigt den Median der 95.45-Perzentilen für die Tag- und Nachtstunden auf der Vertikal-Komponente im Stadtgebiet. Die Stationen URS06 und URS19 weit außerhalb des Stadtgebietes weisen tagsüber mit 480 nm/s bzw. 430 nm/s und in den Nachtstunden mit 350 bzw. 305 nm/s im Median die höchsten Rauschamplituden auf. Eine anthropogene Ursache für den Nord-Süd-Trend ist unwahrscheinlich, lediglich an den Stationen URS04 und URS16 sind mit Sicherheit erhöhte Rauschamplituden aufgrund anthropogenen Rauschens gemessen worden.

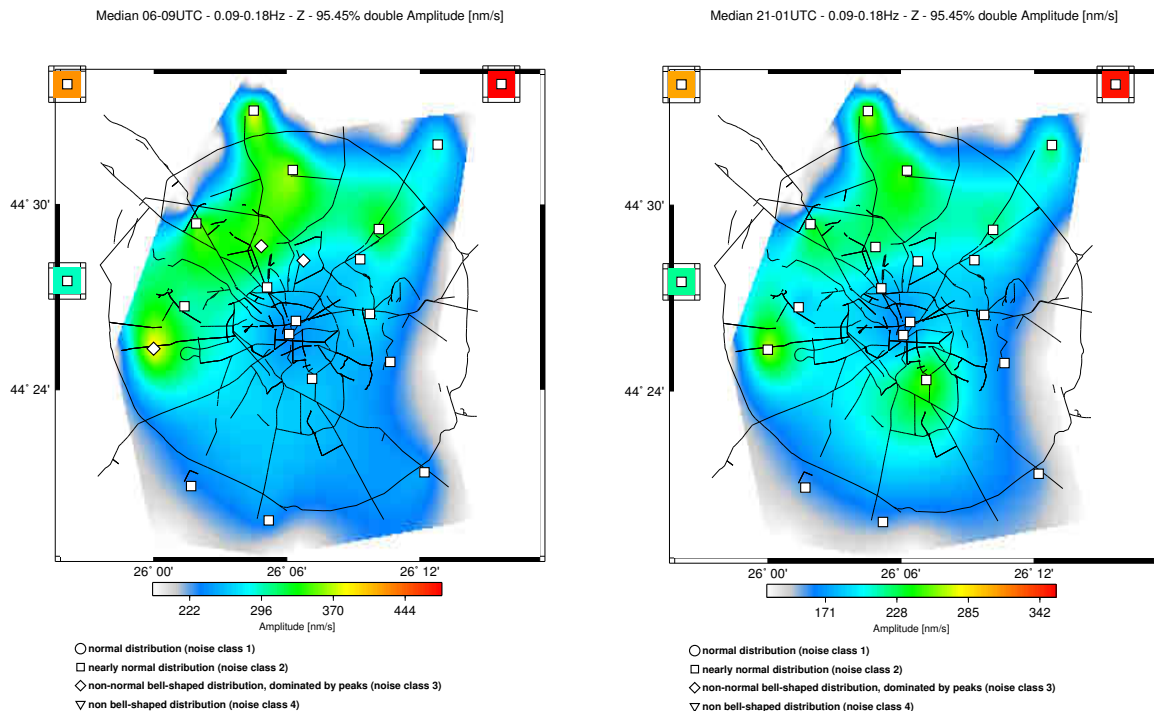


Abbildung 4.18: Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz, Vertikal-Komponente.

Eine Betrachtung der Tag/Nacht-Unterschiede im Median zeigt einen geringen Einfluss der Tageszeit auf das seismische Rauschen zwischen 0.09-0.18 Hz. Die Unterschiede liegen auf der Vertikal-Komponente bei allen Stationen unter 4.2 dB (siehe Tabelle 4.4). Sie sind deutlich geringer als bei den tieferen Frequenzen. URS16 weist, wie bereits im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz, mit 0.3 dB keinen nennenswerten Tag/Nacht-Unterschied auf, hat aber mit 254 nm/s eine relativ große Rauschamplitude. Wie bereits im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz ist an dieser Station eine ununterbrochen aktive anthropogene Quelle Ursache für die erhöhte Rauschamplitude. Auf den Horizontal-Komponenten liegen die Unterschiede der Rauschamplituden zwischen Tag und Nacht unter 8 dB und sind ebenfalls geringer als bei den tieferen Frequenzen.

Station	Median 95.45-Perzentile in nm/s 21-01 Uhr UTC Vertikal	Verhältnis Tag/Nacht in dB Vertikal	Verhältnis Tag/Nacht in dB Nord-Süd	Verhältnis Tag/Nacht in dB Ost-West
URS07	156	3.8	7.5	6.1
URS21	155	3.4	3.0	3.3
URS08	155	4.1	2.8	2.1
URS16	254	0.3	2.6	2.6
URS13	163	3.3	7.0	3.0
URS04	271	3.3	6.6	7.3
URS12	165	3.0	2.9	3.3
URS09	171	3.1	3.2	3.5
URS20	178	3.7	3.9	4.5
URS03	186	4.1	3.5	3.5
URS17	217	2.7	2.2	-0.3
URS11	182	3.6	3.1	5.4
URS14	196	2.9	4.8	4.1
URS22	193	2.9	3.3	4.1
URS18	222	3.9	5.9	7.2
URS02	219	3.7	3.9	4.2
URS05	233	3.4	6.6	4.4
URS01	246	3.4	4.6	4.5
URS15	225	2.3	5.8	5.0
URS10	270	3.1	5.2	5.0
URS19	305	2.9	5.2	4.6
URS06	350	2.8	4.2	4.1

Tabelle 4.4: Verhältnis der 95.45-Perzentilen (Median) in den Zeiträumen 06-09 Uhr und 21-01 Uhr UTC in dB zwischen 0.09-0.18 Hz, Stationen sortiert von Süd nach Nord.

Eine nahe liegende Erklärung dieses jahreszeitlichen Trends ist eine Abnahme der sekundären Meereseismik nach Ende der Sturmsaison in den Wintermonaten im Bereich des Atlantiks. Es wurden fk-Analysen mit gleitenden Fenstern wie bereits im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz für die Zeitreihen von 11-15 Uhr am 14.12.03 und zum Vergleich am 23.06.04 durchgeführt (siehe Abbildung 4.20 und Abbildung 4.21). Am 14.12.03 ist der erwartete Einfall von Oberflächenwellen mit einem Rückazimut von $\sim 300^\circ$ - 50° und einer Langsamkeit von 28 - 40 s/ $^\circ$ entsprechend der bereits beobachteten primären Meereseismik festzustellen. Am 23.06.04 ergeben die fk-Analysen der einzelnen Fenster jeweils im gesamten Wertebereich des Rückazimuts von 0 - 360° Energiedichten, die sich um weniger als 1 dB unterscheiden (vertikale Linien gleicher Farbe in Abbildung 4.21). Die Langsamkeit ist immer kleiner 8 s/ $^\circ$. Ursache dafür kann vollkommen unkorreliertes seismisches Rauschen oder eine Quelle innerhalb des Arrays sein. Die sekundäre Meereseismik im Großraum Bukarest ist am 23.06.04 so gering, dass aufgrund des vor Ort erzeugten seismischen Rauschens keine am Array eben einfallende Welle identifizierbar ist.

4.2 Frequenzbereich 40 mHz bis 0.6 Hz

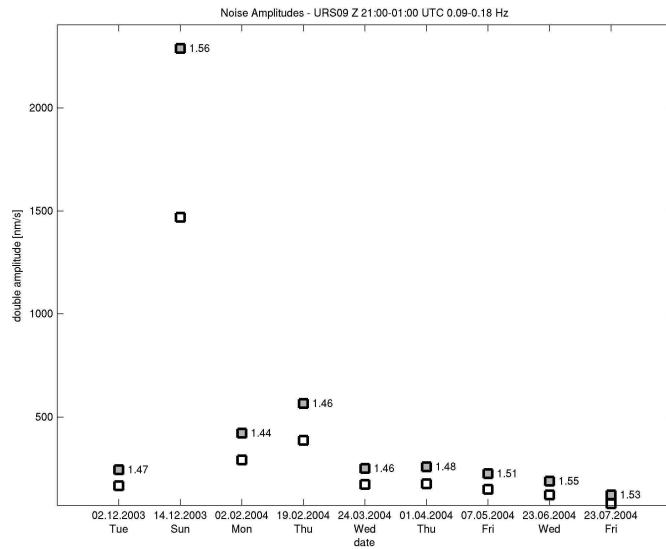


Abbildung 4.19: 95.45-Perzentilen der Bodenschwingungsgeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz von 21-01 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).

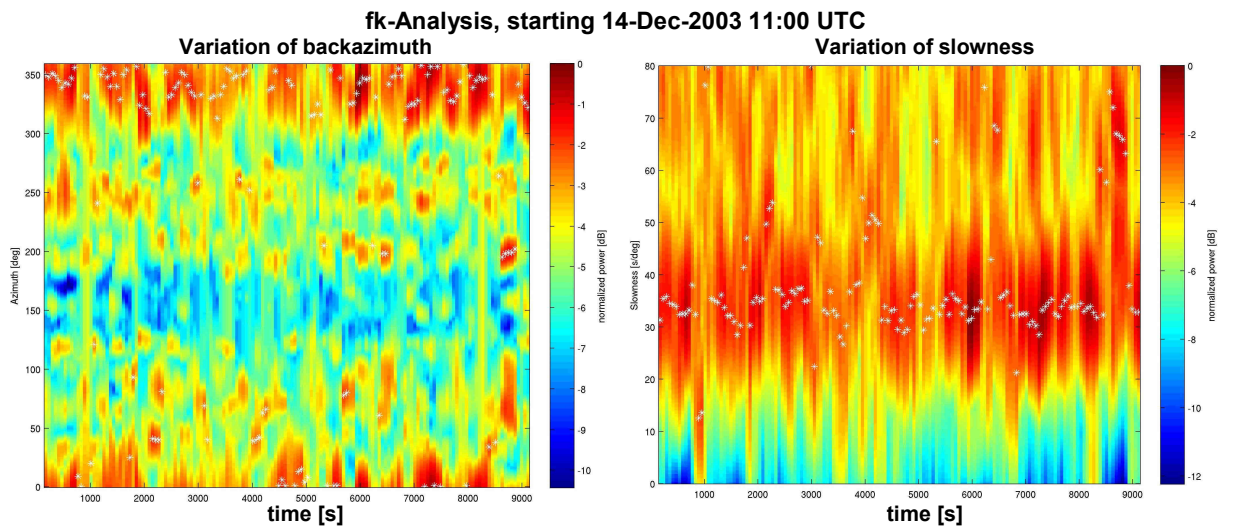


Abbildung 4.20: Zeitlicher Verlauf von Rückazimut und Langsamkeit am 14.12.2003 ab 11 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz.

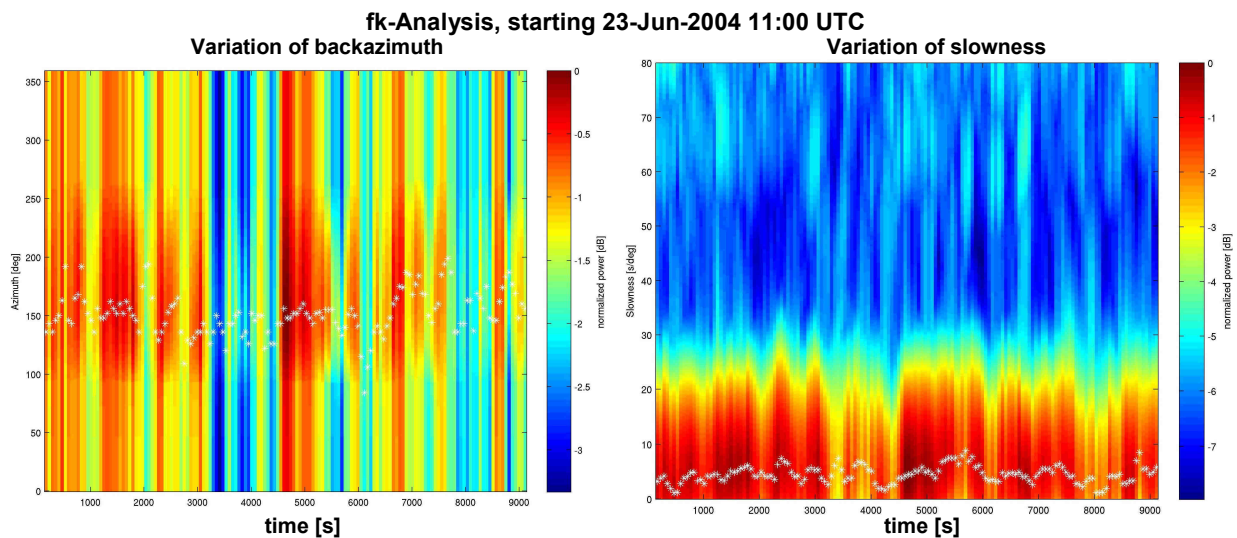


Abbildung 4.21: Zeitlicher Verlauf von Rückazimut und Langsamkeit am 23.06.2004 ab 11 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz.

4.2.3 Frequenzbereich 0.18-0.6 Hz

An allen Stationen ist die Leistung des seismischen Rauschens sowohl auf der Vertikal- als auch den Horizontal-Komponenten jederzeit von ~ 0.18 - 0.25 Hz gegenüber den Frequenzbereichen 0.04 - 0.09 Hz und 0.6 - 1 Hz um ~ 10 dB bis zu 40 dB erhöht. Die absolute Leistungsdichte und die Breite des Frequenzbandes ist dabei zeitlich variabel und verbreitert sich zeitweise bis auf ~ 0.18 - 0.6 Hz (siehe Abbildung 4.8, S. 48). Die Abgrenzung zu tieferen Frequenzen ist aufgrund einer Überlagerung mit der sekundären Meereseismik allerdings schwierig. Aufgrund der dauerhaften aber wechselhaften Anregung seismischer Wellen zwischen 0.18 - 0.6 Hz im gesamten Netzwerk ist die Meereseismik aus nahen Quellgebieten die wahrscheinlichste Ursache, wobei deren Änderungen unmittelbar die Änderungen des anregenden Wellenklimas widerspiegeln (Bromirski und Duennebieer, 2002; siehe auch Seite 4). Das 4-Tage-Spektrogramm beginnend am 11.02.04 (Abbildung 4.22) zeigt am 11.02.04 eine erhöhte Leistungsdichte im Frequenzbereich 0.2 - 0.3 Hz gegenüber den tieferen und höheren Frequenzen, wie sie üblicherweise im gesamten Netzwerk besteht. Am 12.02.04 ist der Beginn eines Ereignisses der Meereseismik aufgrund eines Sturms über der Marmara See und dem Schwarzen Meer anhand einer Steigerung der Leistungsdichte im Frequenzbereich 0.2 - 0.5 Hz um 20 - 35 dB erkennbar. Das Leistungsdichtemaximum liegt zu Beginn zwischen 0.25 - 0.4 Hz, im Laufe des 12.02.04 verlagert es sich zum Frequenzbereich 0.18 - 0.3 Hz. Am 14.02.04 verschmälert es sich wieder auf den Frequenzbereich 0.2 - 0.3 Hz bei einer Leistungsdichte wie vor dem Ereignis.

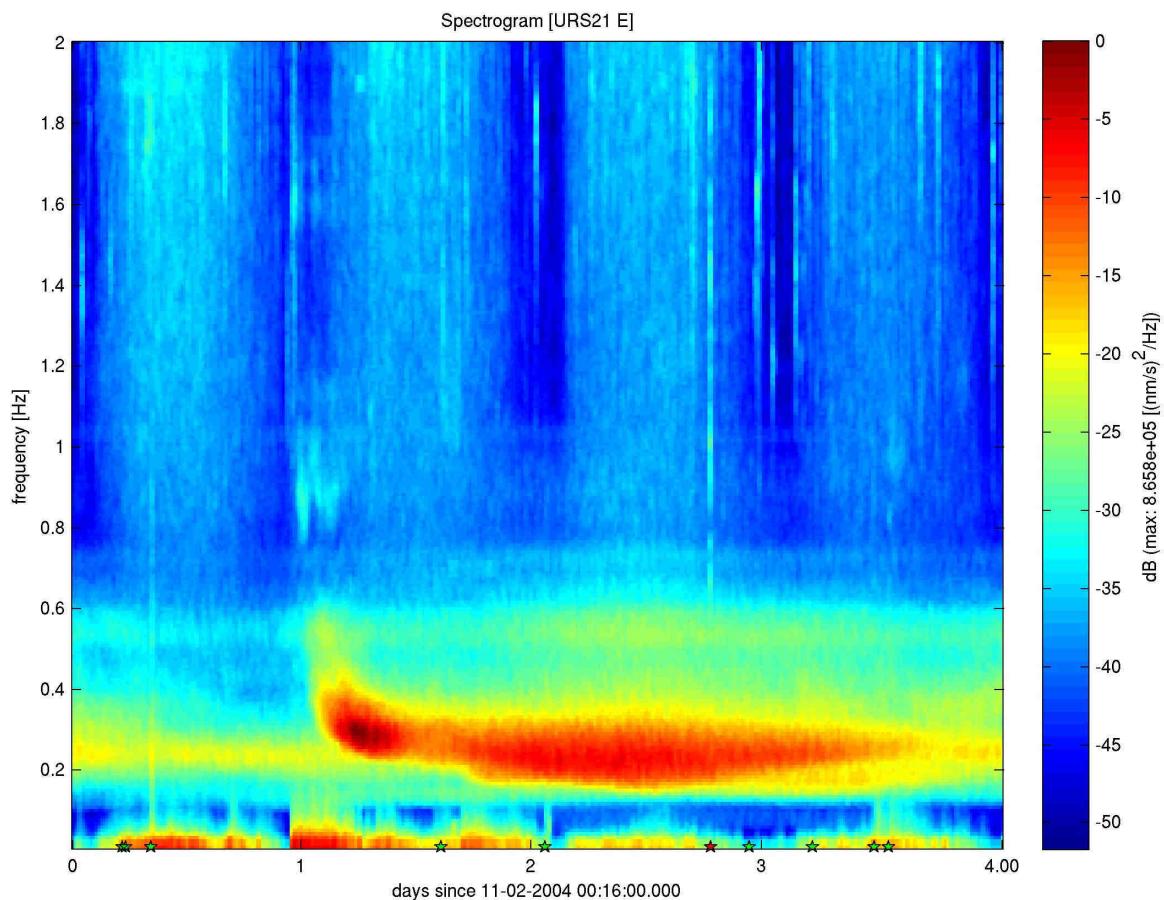


Abbildung 4.22: Spektrogramm eines Ereignisses der Meereseismik im Frequenzbereich von 8 mHz bis 2 Hz der Ost-West-Komponente an Station URS21.

Da keine Messdaten von Bojen zur Verfügung stehen, zeigt Abbildung 4.23 die frei verfügbaren Windgeschwindigkeiten ab dem 11.02.04 in Bukarest und in den rumänischen Küstenstädten Konstantza und Mangalia. In Bukarest erreicht der Wind zeitweise eine Maximalgeschwindigkeit von 6 m/s (vgl. Abbildung 4.22 < 0.1 Hz). In den Küstenstädten beginnt am 11.02.04 die Windgeschwindigkeit von 3-5 m/s auf über 15 m/s anzusteigen, die höchsten Windgeschwindigkeiten werden am 12.02.04 und 13.02.04 erreicht. Am 13.02.04 beginnt die Wetterberuhigung, bis der Wind am 14.02.04 wieder die Ausgangswindgeschwindigkeit erreicht hat. Die Zu- und Abnahme der Windgeschwindigkeit korreliert zeitlich mit der Entwicklung der Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0.18-0.6 Hz.

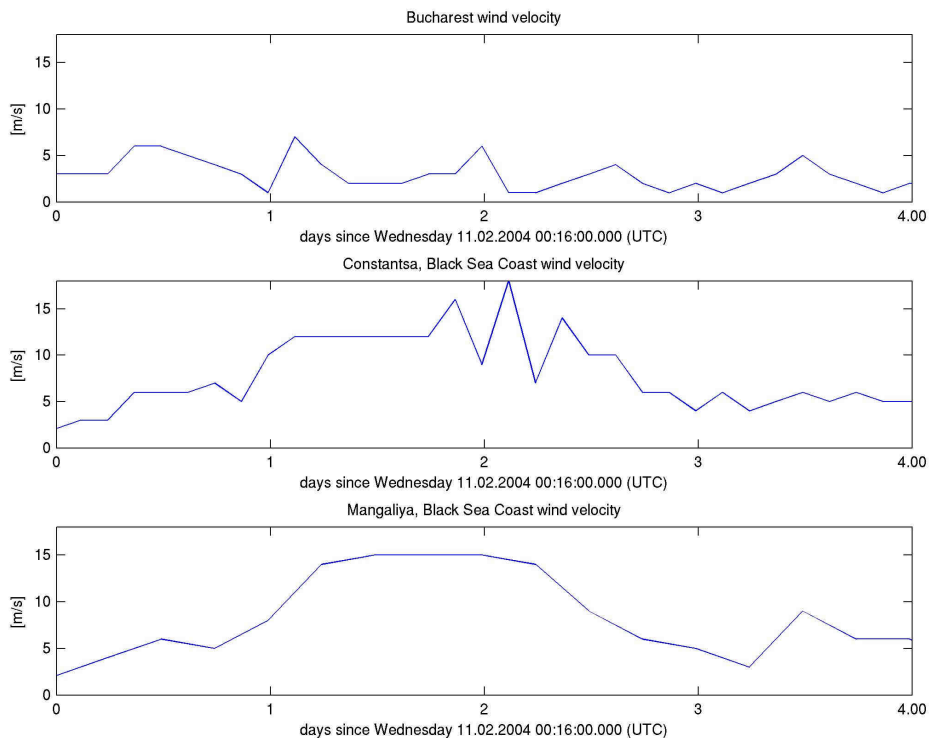


Abbildung 4.23: Windgeschwindigkeiten ab dem 11.02. in Bukarest und den Küstenstädten Konstantza und Mangalia in m/s.

Für die ersten Stunden des Ereignisses am 12.02.04 von 00:00 Uhr bis 10:30 Uhr, innerhalb denen die stärkste Änderung der Frequenz des Leistungsdichtemaximums stattfindet, wurde eine fk-Analyse im Frequenzbereich 0.18-0.6 Hz für die Vertikal-Komponente durchgeführt. Die fk-Analysen wurden für Fenster mit einer Länge von je 240 Sekunden und einem Abstand von 60 Sekunden berechnet. Die fk-Analyse (Abbildung 4.24) zeigt zu Beginn bei Frequenzen bis zu 0.6 Hz den Einfall von Rayleigh-Wellen mit einem Rückazimut von $150-166^\circ$ und einer Langsamkeit von $100-120 \text{ s}^\circ$. Binnen der ersten vier Stunden ändern sich zeitgleich mit der Frequenz der maximalen Leistungsdichte der Rückazimut auf $\sim 140-158^\circ$ und die Langsamkeit auf $80-90 \text{ s}^\circ$ bei einer Frequenz von 0.25-0.35 Hz. Im weiteren Verlauf des Sturms am 13.02.04 liegt das Leistungsdichtemaximum im Frequenzbereich 0.18-0.35 Hz. Die Einfallsrichtung ändert sich nicht mehr, die Langsamkeit liegt aufgrund der nun ebenfalls angeregten tieferen Frequenzen im Bereich von $45-90 \text{ s}^\circ$. Die Änderung des Rückazimuts entspricht einer Bewegung des Sturms von der Marmara See über den Bosphorus ins Schwarze Meer innerhalb der ersten 4 Stunden. Danach erfolgte die Hauptanregung im Schwarzen Meer. Der Frequenzabfall ist eine Folge der verstärkten Anregung tieffrequenter Wasserschwerewellen mit Zunahme der Windgeschwindigkeit. Der Effekt könnte

durch die Vergrößerung der Wasserfläche im Schwarzen Meer noch verstärkt werden. Die Änderung der Langsamkeit zeitgleich mit der Frequenzänderung erklärt sich direkt aus der Dispersion der Oberflächenwellen.

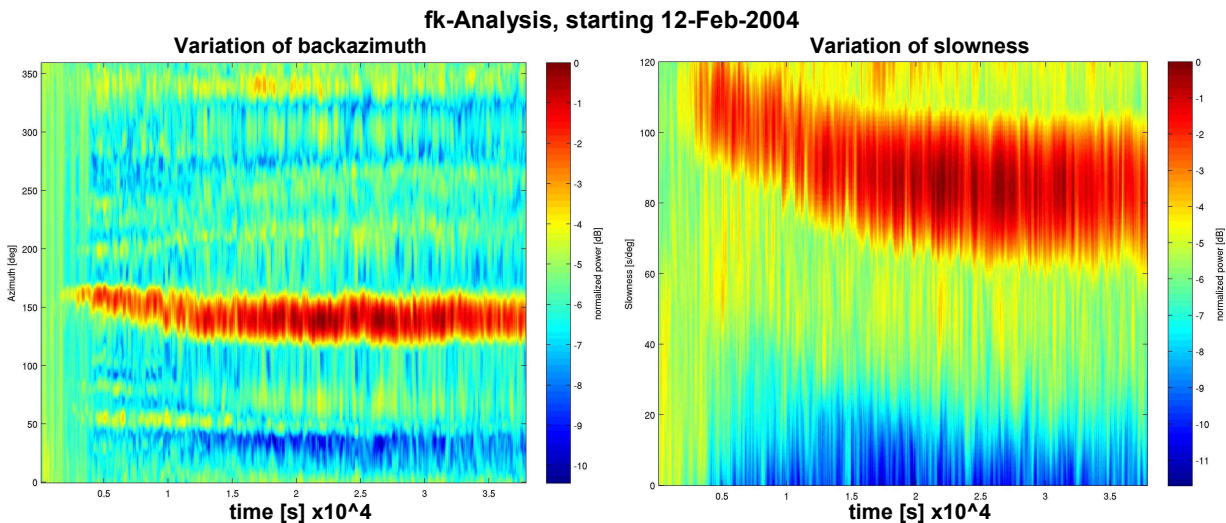


Abbildung 4.24: Zeitlicher Verlauf von Rückazimut und Langsamkeit am 12.02.04 von 00:00-10:30 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.18-0.6 Hz. Man beachte, wie sich die Eigenschaften des Wellenfeldes mit der Bewegung des Sturms ändern.

Während sich die Leistungszunahme des seismischen Rauschens zwischen 0.25-0.6 Hz grob mit Windgeschwindigkeiten über 7-8 m/s an der Küste des Schwarzen Meeres korrelieren lässt, bleibt die Leistung zwischen 0.18-0.25 Hz dauerhaft im gesamten Netzwerk erhöht. Mehrere fk-Analysen zwischen 0.18-0.25 Hz bei ruhiger Wetterlage am Schwarzen Meer blieben erfolglos. Es konnten unter diesen Bedingungen im Frequenzbereich 0.18-0.25 Hz kein Auftreten von Oberflächenwellen beobachtet werden. Die fk-Analysen über mehrere Stunden ergaben immer Langsamkeiten unter 5 s° , wobei das Energiedichtemaximum unsystematisch im gesamten Wertebereich des Rückazimuts von $0-360^\circ$ springt. Die Ursache dafür ist bislang unklar.

Eine mögliche Erklärung wären sich ändernde Ausbreitungsbedingungen für Oberflächenwellen im Großraum Bukarest in diesem Frequenzbereich. Bei der Untersuchung der oberflächennahen Untergrundeigenschaften mit Hilfe von Oberflächenwellen konnte Sèbe (2006) lediglich Love-, aber keine Rayleigh-Wellen identifizieren. Darüber hinaus stellte Ziehm (2006) bei der Analyse der H/V-Spektralverhältnisse ein Maximum im H/V-Verhältnis bei etwa 0.2 Hz fest, wobei sich die Frequenz des Maximums von Süden nach Norden von 0.25 Hz nach 0.09 Hz verschiebt. Ziehm (2006) vermutet die Ursache des Maximums im H/V-Spektrum und dessen Frequenzverschiebung in einer Diskontinuität zwischen den Kreide- und Tertiär-Schichten, die von Süden nach Norden abtaucht. Die Frequenzverschiebung korreliert räumlich mit der festgestellten Zunahme der Rauschamplitude von Süden nach Norden, die im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz und auch von 0.18-0.25 Hz festgestellt wurde (siehe Abbildung 4.25). Ob diese Phänomene ursächlich zusammenhängen ist unklar. Im Frequenzbereich von 0.18-0.25 Hz beträgt die Zunahme der Mediane der 95.45-Perzentilen zwischen 21-01 Uhr von 240 nm/s (URS21) bis 650 nm/s (URS06). Wieder weichen wenige Stationen im Stadtgebiet vom Trend ab, dazu gehören erneut URS04 (597 nm/s) sowie die Stationen URS25 (408 nm/s), URS07 (403 nm/s) und URS13 (320 nm/s), die alle geringe Entfernungen unter 1500 Metern zu Industrie- und Gleisanlagen aufweisen. Die Unterschiede der Mediane zwischen Tag und Nacht liegen an allen Stationen und auf allen

Komponenten unter 3 dB. Damit weist der Frequenzbereich 0.18-0.25 Hz die geringsten Tag/Nachtunterschiede überhaupt auf.

Ein Vergleich der Rauschamplituden zwischen den Tag und Nachtstunden im Frequenzbereich 0.18-0.25 Hz an Station URS09 (Abbildung 4.26) am 07.05.04 zeigt nach wie vor einen Einflusses des Windes auf das seismische Rauschen. Zwischen 11-15 Uhr beträgt die 95.45-Perzentile 360 nm/s, in den Nachtstunden 220 nm/s. Die Ursache der erhöhten Rauschamplituden am 14.12.04. sowie am 19.02.04 und 24.03.04 sind jeweils mehrtägige, durchschnittliche Ereignisse der Meereseismik aus dem Bereich der Marmara See und des Schwarzen Meeres.

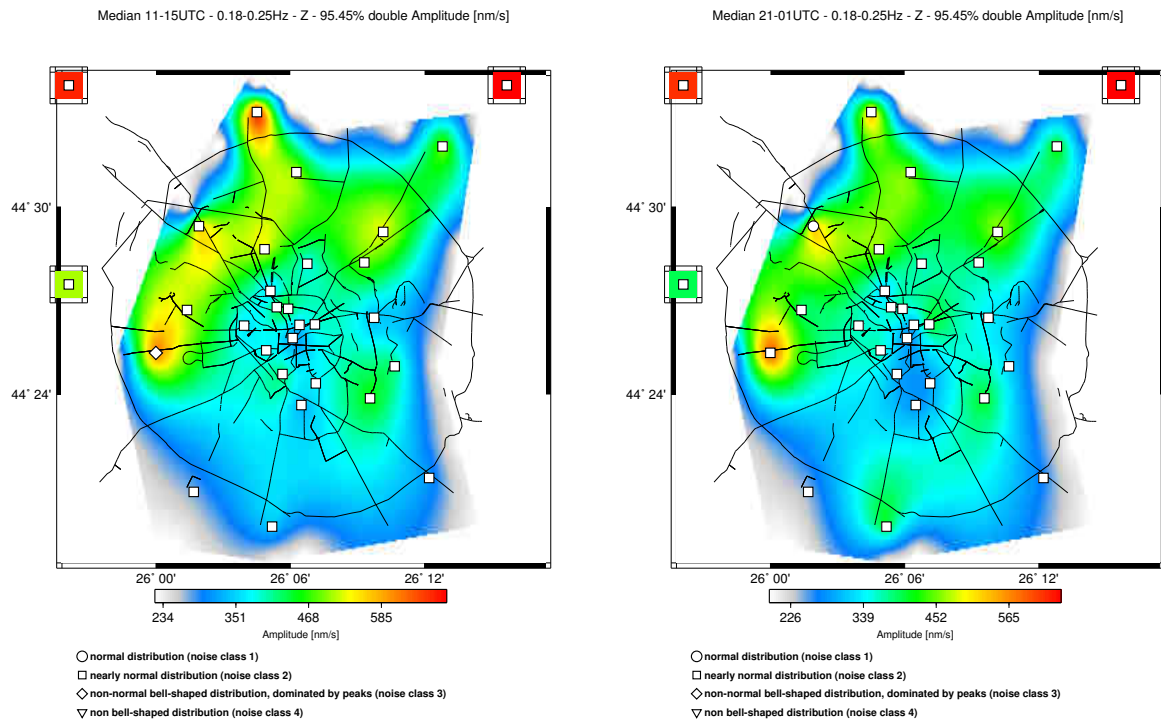


Abbildung 4.25: Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.18-0.25 Hz, Vertikal-Komponente.

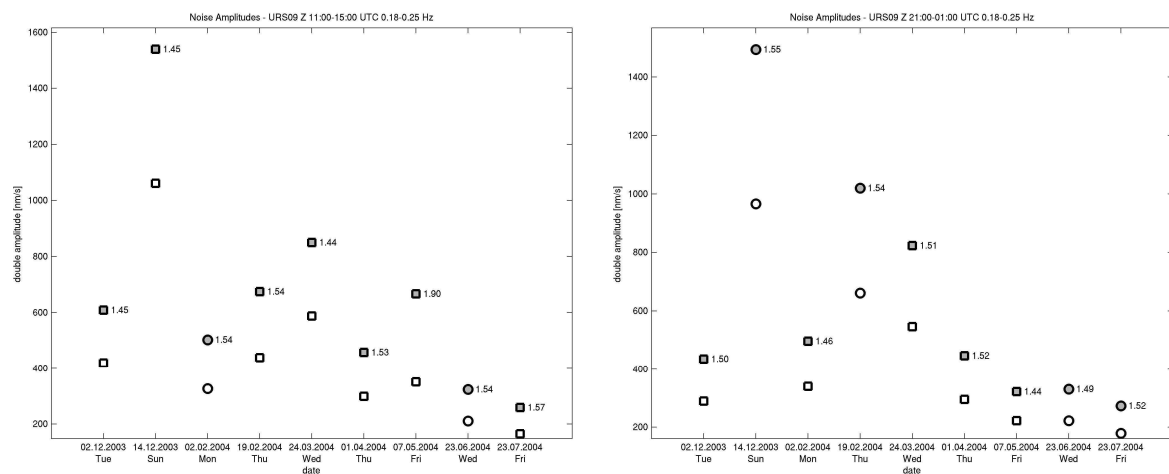


Abbildung 4.26: 95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.18-0.25 Hz von 06-09 Uhr und 21-01 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 (Symbole siehe Abbildung 4.3 S. 44).

4 Resultate

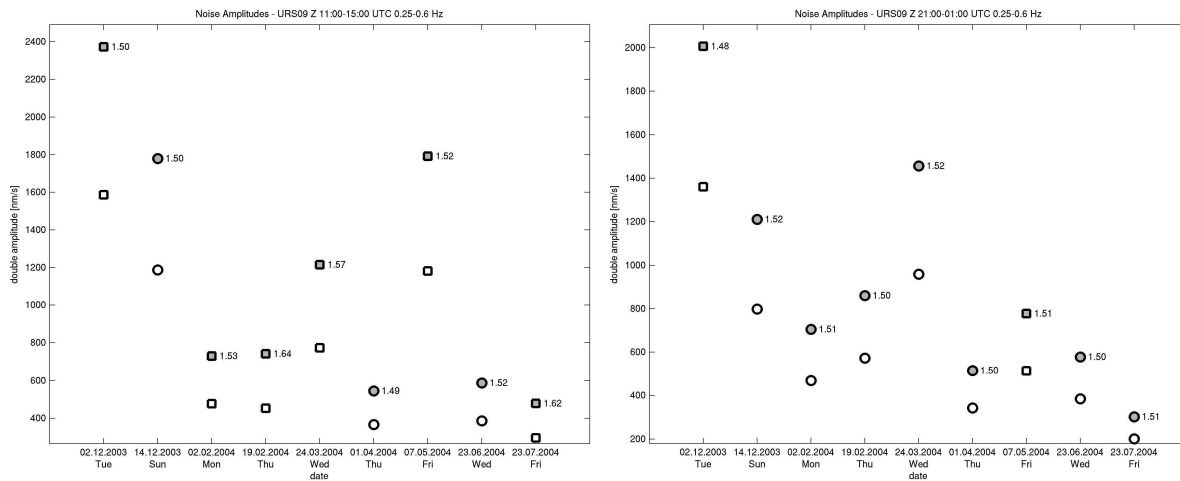


Abbildung 4.27: 95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.25-0.6 Hz von 06-09 Uhr und 21-01 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).

Im Frequenzbereich 0.25-0.6 Hz nimmt der Einfluss des Windes auf das seismische Rauschen wieder zu, die Rauschamplituden liegen am 07.05.04 von 11-15 Uhr an allen Stationen zwischen 800-1200 nm/s und von 21-01 Uhr zwischen 400-600 nm/s. Am 24.03.04 liegen die Rauschamplituden in beiden Zeiträumen aufgrund eines Ereignisses der lokalen Meereseismik zwischen 800-1000 nm/s. Der 14.12.04 stellt mit erhöhten Rauschamplituden im gesamten Frequenzbereich der Meereseismik von 0.04-0.6 Hz eine Ausnahme dar. Auch im Frequenzbereich 0.25-0.6 Hz sind die Rauschamplituden am 14.12.03 mit ebenfalls 800-1000 nm/s ungewöhnlich hoch. Ursache ist ein bereits am 14.12.03 einsetzendes Ereignis der primären und sekundären Meereseismik (Rückazimut 300-360°), das sein Leistungsmaximum am 15.12.03 erreichte und die Küsten des Atlantiks in der Bretagne, an den Britischen Inseln und in Norwegen umfasste. Dies überlagerte sich mit einem gleichzeitig stattfindenden Ereignis der Meereseismik von 0.18-0.5 Hz aus dem Bereich der Marmara See und des Schwarzen Meeres. Im Frequenzbereich von 0.25-0.6 Hz weisen die Rauschamplituden keinen Nord-Süd-Trend mehr auf. Erhöhte Rauschamplituden zwischen 600-900 nm/s auf der Vertikal-Komponente wurden im Nord-Westen der Stadt an den Stationen URS04, URS03, URS05 und URS18 gemessen. Die Amplitudenunterschiede zwischen Tag und Nacht sind gering und liegen auf der Vertikal-Komponente zwischen -1.8-3.4 dB und auf den Horizontalen-Komponenten zwischen -2.1-8 dB. Sie sind vergleichbar mit denen im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz.

4.2 Frequenzbereich 40 mHz bis 0.6 Hz

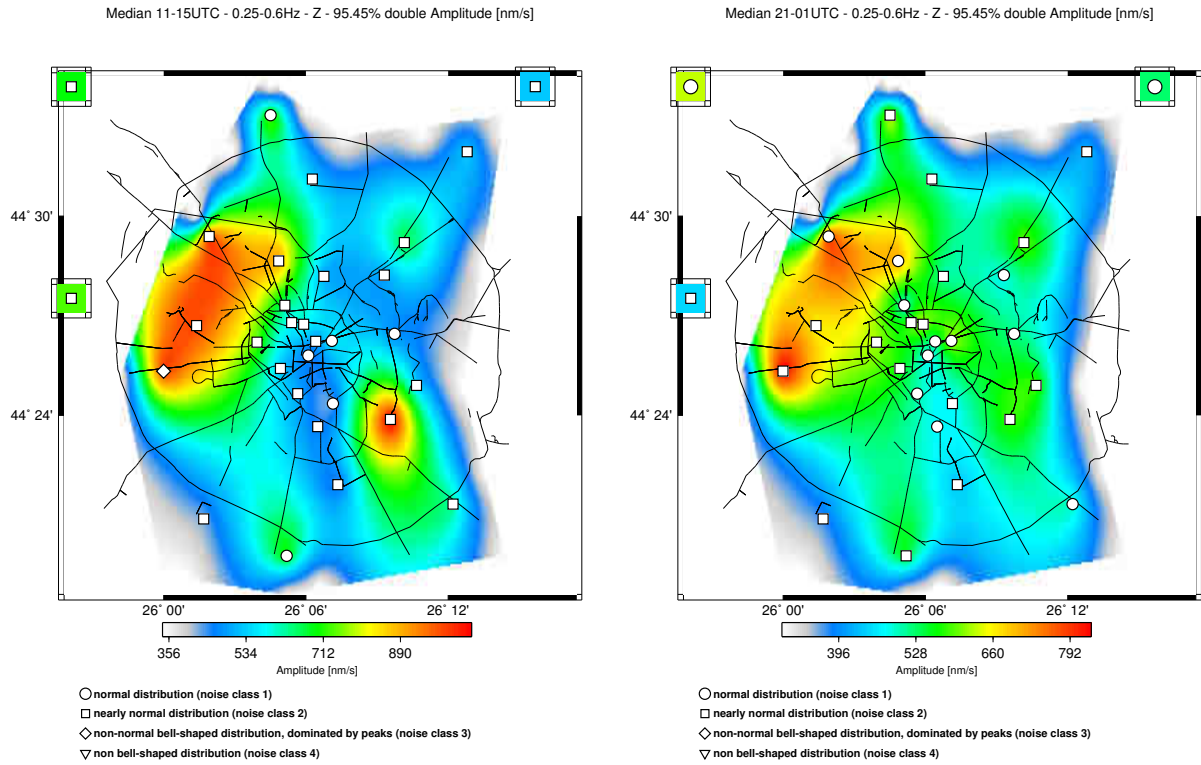


Abbildung 4.28: Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.25-0.6 Hz, Vertikal-Komponente.

4.3 Frequenzbereich 0.6 bis 1 Hz

Im Frequenzbereich von 0.6-1 Hz sind durch dynamische Windlast verursachte Schwingungen von Gebäuden und Bewuchs, die in den Boden einkoppeln, die leistungsstärkste Quelle des seismischen Rauschens im Großraum Bukarest. Abbildung 4.29 zeigt die Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0.6-1 Hz an Station URS21 als 7-Tage-Spektrogramm der Vertikal-Komponente, beginnend am Montag dem 22.03.04. Am 22.03.04 erreicht der Wind zum ersten Mal eine Spitzengeschwindigkeit von 8 m/s. Im Vergleich zum 23.03.04, an dem die Windgeschwindigkeit nur 3 m/s erreichte, zeigt sich eine Zunahme der Leistungsdichte im Frequenzbereich von 0.8-1.2 Hz um ~12 dB zur gleichen Tageszeit. Deutlich wird der bereits von mehreren Autoren beobachtete „Schwellwert“ der Windgeschwindigkeit von 4-5 m/s (siehe S. 7), ab dem der Einfluss des Windes auf das seismische Rauschen stark zunimmt. Am 24.03.04 und 25.03.04 werden Spitzenwindgeschwindigkeiten von 9 m/s erreicht, im Vergleich zum 23.03.04 beträgt die Leistungszunahme nun bis zu ~20 dB im Frequenzbereich 0.6-1.2 Hz. Auf den Horizontal-Komponenten sind die durch Eigenschwingungen des nahen Physik-Hochhauses (10 Stockwerke; Eigenperiode ~1.6 Hz; Rehor, 2007) angeregten Bodenbewegungen mit Frequenzen um 1.6 Hz erkennbar (Abbildung 4.2).

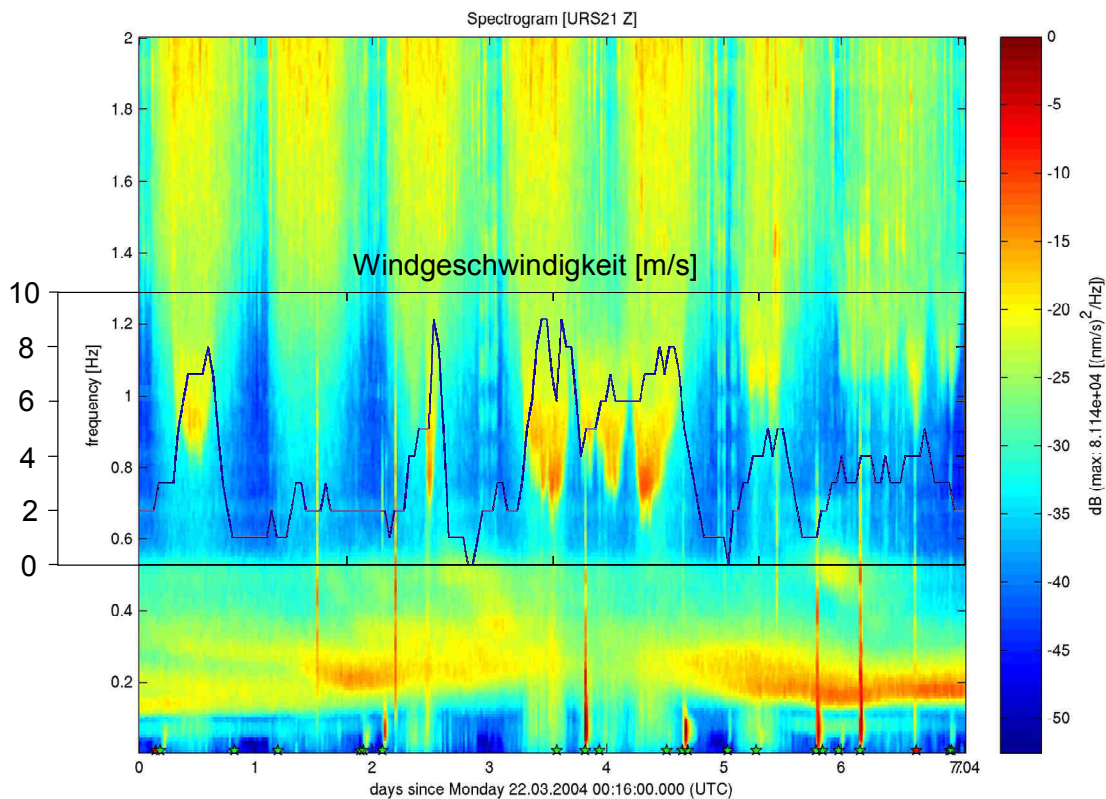


Abbildung 4.29: Spektrogramm der Vertikal-Komponente von Station URS21 von 8 mHz bis 2 Hz und Windgeschwindigkeit in m/s.

Das Spektrum der eingekoppelten Schwingungen und deren H/V-Verhältnis wird im Frequenzbereich >0.6 Hz maßgeblich von der umgebenden Bebauung beeinflusst und unterscheidet sich entsprechend von Station zu Station. Dies stimmt mit der von Ziehm (2006) gemachten Beobachtung überein, dass sich die sonst stabilen H/V-

Verhältnisse an den URS-Stationen ab Windgeschwindigkeiten größer 4 m/s deutlich und unsystematisch ändern.

Das seismische Rauschen von 0.6-1 Hz ist in der Regel normalverteilt und zeigt im Vergleich zu tieferen und höheren Frequenzen geringere Amplitudenschwankungen mit der Zeit. An Standorten mit geringem anthropogenen Einfluss (z.B. URS06, Abbildung 4.30) sind die Rauschamplituden bei Windgeschwindigkeiten unter 4 m/s nahezu konstant. Stationen im Stadtgebiet (z.B. URS09, Abbildung 4.31) zeigen im Frequenzbereich von 0.6-1Hz einen anthropogenen Einfluss in Form deutlich größerer Rauschamplituden sowie eines größeren Tag/Nacht-Unterschieds und einer Abhängigkeit vom Wochentag.

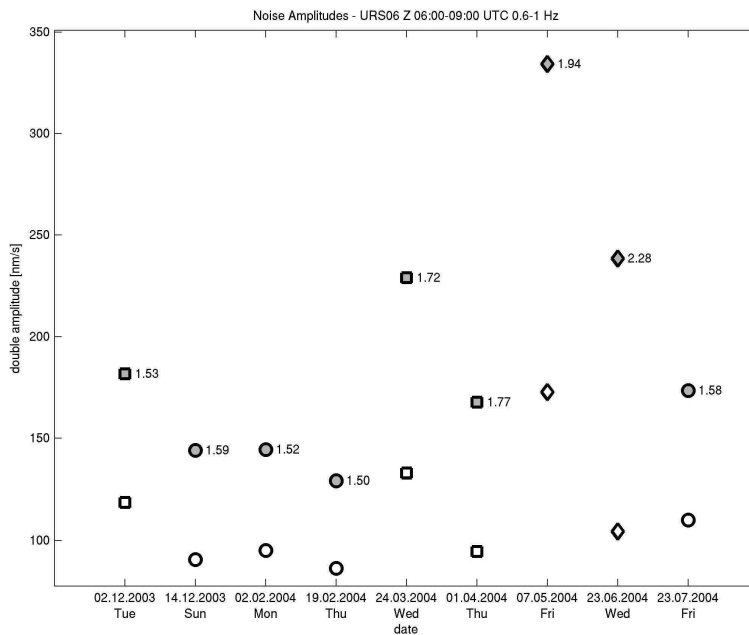


Abbildung 4.30: 95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.6-1 Hz von 06-09 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS06 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).

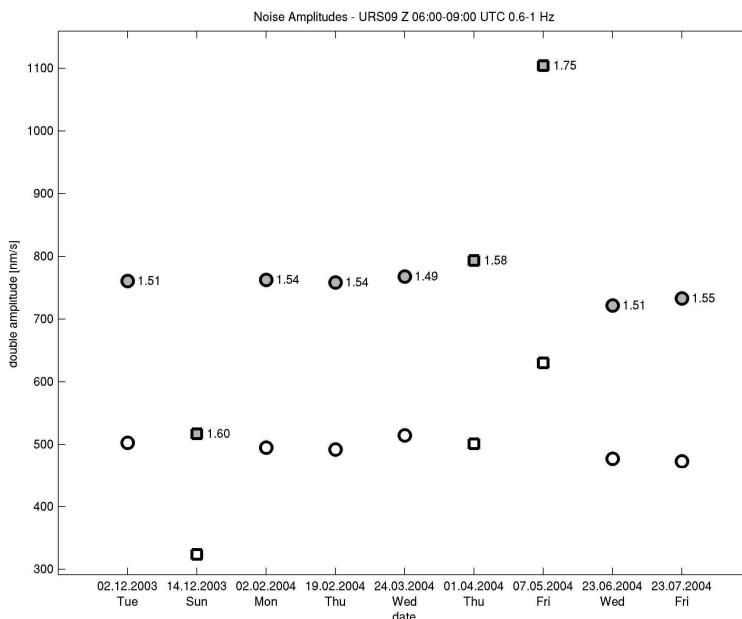


Abbildung 4.31: 95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.6-1 Hz von 06-09 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).

Alle Stationen im Stadtzentrum zeigen wie Station URS09 deutlich geringere Rauschamplituden an Sonntagen. Die Rauschamplituden an Werktagen sind im Frequenzbereich von 0.6-1 Hz nahezu konstant. Nachts betragen die Unterschiede der Mediane der 95.45-Perzentilen zwischen URS06 außerhalb der Stadt und dem Stadtzentrum (URS09, URS12) ~ 10 dB. Der Tag/Nacht-Unterschied an allen Stationen beträgt auf der Vertikal-Komponente im Mittel 5 dB und maximal 8 dB, auf den Horizontal-Komponenten im Mittel 8 dB und maximal 11 dB. Der Unterschied der 95.45-Perzentilen mit der Tageszeit und dem Ort sind größer als im Frequenzbereich der Meeresmikroseismik von 0.04-0.6 Hz. Deutlich erkennbar ist der anthropogene Einfluss im Frequenzbereich 0.6-1 Hz anhand der Interpolation der 95.45-Perzentilen zwischen 06-09 Uhr am Montag, 02.02.04, über das Stadtgebiet (Abbildung 4.32). Die Rauschamplitude nimmt im Stadtgebiet von den Außenbereichen (~ 170 nm/s) zum Innenstadtbereich zu und erreicht Maxima im Stadtzentrum (~ 500 nm/s) und bei Station URS23 (700 nm/s). Das Rauschen an Station URS23 weist neben der großen Amplitude auch eine große Anzahl transienter Ereignisse auf (Rauschklasse 3). Der Standort von URS23 befindet sich unmittelbar gegenüber dem Werksgelände der Kvaerner I.M.G.B., einem der wenigen EU-marktfähigen rumänischen Schwermaschinenbau-Unternehmen (bfai, 2006) in der Bulevardul Metalurgiei.

2004-02-02 06-09UTC - 0.6-1Hz - Z - 95.45% double Amplitude [nm/s]

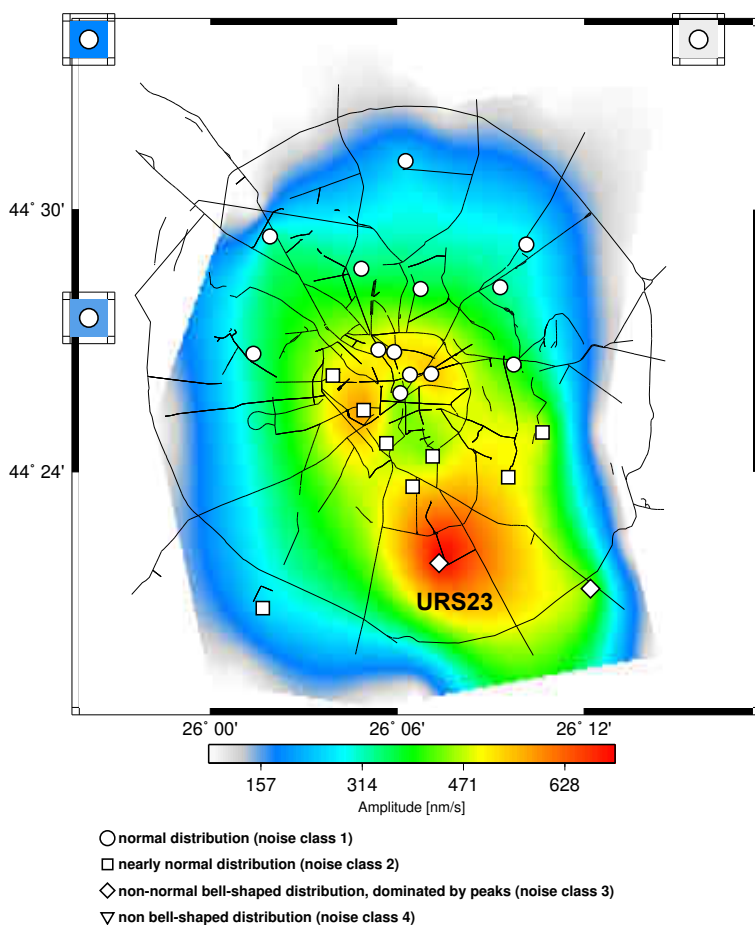


Abbildung 4.32: Median der 95.45-Perzentilen von 06-09 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.6-1 Hz, Vertikal-Komponente.

4.3 Frequenzbereich 0.6 bis 1 Hz

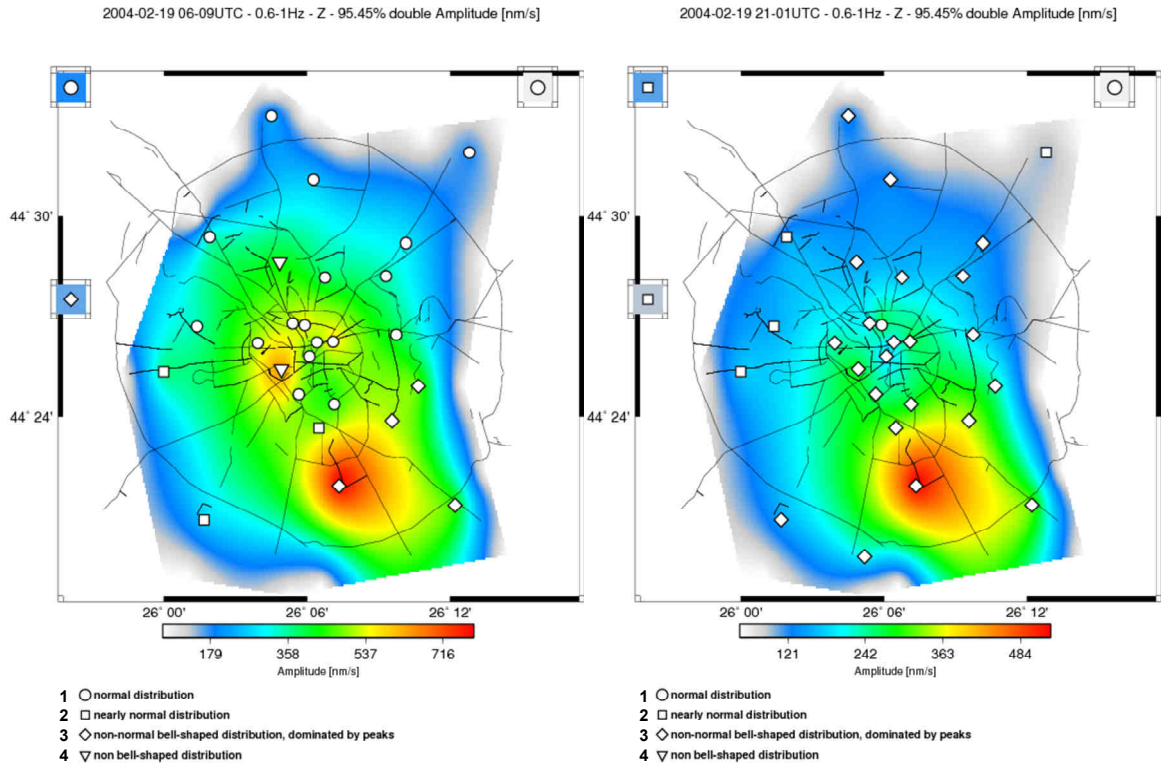


Abbildung 4.33: Unterschiedlicher Charakter des seismischen Rauschen im Frequenzbereich 0.6-1 Hz bei Tag (06-09 Uhr) und Nacht (21-01 Uhr), Median der 95.45-Perzentilen.

In den Zeiträumen 06-09 Uhr und 11-15 Uhr ist das seismische Rauschen im Stadtzentrum trotz erhöhter Amplituden normalverteilt (Rauschklassen 1 und 2). Ein Vergleich am 19.02.04 mit den Zeitreihen von 21-01 Uhr (Abbildung 4.33) zeigt neben einer Amplitudenabnahme auch eine Veränderung des seismischen Rauschens, welches nun eine große Anzahl transienter Ereignisse aufweist (Rauschkategorie 3). Daraus lässt sich schließen, dass der anthropogene Anteil am seismischen Rauschen aus transienten Ereignissen ähnlicher Amplitude besteht. Deren Anzahl nimmt im Zusammenhang mit der anthropogenen Aktivität zu- bzw. ab und führt tagsüber zu einem in der Summe normalverteiltem seismischen Rauschen (Zentraler Grenzwertsatz, siehe S. 15).

4.4 Frequenzbereich 1-25 Hz

Im Frequenzbereich >1 Hz wandelt sich der Charakter des seismischen Rauschens im Großraum Bukarest gegenüber tieferen Frequenzen. Auffallend ist eine Veränderung des Amplitudenverhältnisses zwischen vertikaler und horizontaler Bodenschwinggeschwindigkeit. Tabelle 4.5 enthält die über alle Stationen gemittelten H/V-Amplitudenverhältnisse für alle Frequenzbereiche. Diese wurden anhand der Mediane der 95.45-Perzentilen als Quotient aus dem mittleren Median der beiden Horizontal-Komponenten und dem Median der Vertikal-Komponente berechnet. Die H/V-Amplitudenverhältnisse zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen Tag und Nacht. Die angegebenen Verhältnisse wurden anhand der 95.45-Perzentilen aller Zeitreihen von 06-09 Uhr bestimmt.

Frequenzbereiche [Hz]	mittleres H/V-Verhältnis aller Stationen	min. H/V-Verhältnis	max. H/V-Verhältnis
0.008-0.04	55	1.1	270
0.04-0.09	12	0.7	46
0.09-0.18	3.1	1.8	6.8
0.18-0.25	2.2	0.9	3.4
0.25-0.6	1.6	0.9	3.2
0.6-1	2.0	1.5	2.4
1-25	0.7	0.4	1.1
25-45	1.0	0.2	9.4
10.5-12.5	0.7	0.4	1.2
13.7-16.7	0.7	0.1	1.4
22-25	0.7	0.2	3.4

Tabelle 4.5: Über alle Stationen gemittelte H/V-Verhältnisse als Quotient aus mittlerem Median der 95.45-Perzentilen der Horizontal-Komponenten und dem Median der 95.45-Perzentilen der Vertikal-Komponente für alle untersuchten Frequenzbereiche.

Mit zunehmender Frequenz wird das H/V-Verhältnis kleiner. Ab einer Frequenz von etwa 1 Hz weist das Rauschen auf der Vertikal-Komponente eine größere Amplitude als auf den Horizontal-Komponenten auf. Nur wenige Stationen weichen davon ab, z.B. im Frequenzbereich 1-25 Hz bei den Stationen URS23 und URS29. Bei den höheren Frequenzen von 25-45 Hz tritt dies bei den Stationen URS08, URS14, URS16, URS19, URS23, URS29 und URS31 auf. Die Änderung der H/V-Verhältnisse bei Frequenzen > 0.25 Hz könnte dadurch entstehen, dass die überwiegende Anzahl anthropogener Quellen Schwingungen mit einem H/V-Verhältnis kleiner 1 einkoppeln. Für Frequenzen unterhalb von 0.15 Hz hat eine Untersuchung von Forbriger (2006) einen deutlichen Einfluss von Punktlasten auf das H/V-Verhältnis gezeigt. Die Neigung des gesamten Seismometers wird in die Horizontal-Komponenten eingekoppelt und verursacht stark positive H/V-Verhältnisse. Als zu erwartende zeitveränderliche Punktlasten gibt Forbriger (2006) unter anderem sich bewegende Fahrzeuge und Windeinwirkung auf Gebäude an.

Die durch anthropogene Aktivität angeregten Bodenbewegungen sind zum einen kurze, transiente Ereignisse (Peaks) und zum anderen periodische Schwingungen durch Motoren und drehende Maschinen aller Art. Dabei weisen sowohl die transienten Ereignisse als auch die periodischen Schwingungen häufig große Amplitudenunterschiede untereinander auf. Die Zeitreihen sind daher selten normalverteilt (siehe Zentraler Grenzwertsatz, S. 15). Tabelle 4.6 zeigt, wie viele der 2223 ausgewerteten Zeitreihen des seismischen Rauschens im Frequenzbereich 1-25 Hz den Rauschklassen 1 bis 4 zugewiesen wurden. Da das seismische Rauschen über den Tag keine systematischen Änderungen aufweist, wurden die Zeitreihen der

Zeiträume 06-09 Uhr und 11-15 Uhr zusammengefasst und denen der Nachtstunden von 21-01 Uhr gegenübergestellt.

Frequenzbereich 1-25 Hz	Tag (06-09 Uhr und 11-15 Uhr)		Nacht (21-01 Uhr)	
	Ausgewertete Zeitreihen	1482		741
davon	Anzahl	%	Anzahl	%
Rauschklasse 1	31	2.1 %	5	0.7 %
Rauschklasse 2	515	34.8 %	113	15.2 %
Rauschklasse 3	867	58.5 %	552	74.5 %
Rauschklasse 4	69	4.6 %	71	9.6 %

Tabelle 4.6: Rauschklassenstatistik der ausgewerteten Zeitreihen im Frequenzbereich 1-25 Hz.

Betrachtet man die Verteilung der Rauschklassen genauer, tritt der bereits im Frequenzbereich 0.6-1 Hz beobachteter Effekt (siehe Abbildung 4.28, S. 63) zutage, dass sich der Charakter des seismischen Rauschens mit der Tageszeit ändert. In den Tagesstunden liegt der Anteil der von kurzen transienten Ereignissen dominierten Zeitreihen (Rauschklasse 3) bei etwa 58 Prozent (siehe Tabelle 4.6). Der Anteil der Zeitreihen mit einer Normalverteilung (Rauschklasse 1) ist mit 2.1 Prozent sehr gering. Allerdings wurden über 34 Prozent der Zeitreihen die Rauschklasse 2 zugeordnet, d.h. ihre Verteilung weicht nur geringfügig von der Normalverteilung ab. In der Nacht verringert sich die Anzahl der Einzelereignisse aufgrund anthropogener Aktivität. Die Rauschamplitude nimmt insgesamt ab, doch die Zeitreihen werden jetzt von den weiterhin auftretenden transienten Ereignissen dominiert. Der Anteil der Zeitreihen mit Rauschklasse 3 erhöht sich zu Ungunsten der Rauschklassen 1 und 2 auf etwa 75 Prozent. Mit fast 10 Prozent hat sich der Anteil der Zeitreihen, denen die Rauschklasse 4 zugeordnet wurde, verdoppelt. Eine Kontrolle aller Zeitreihen der Rauschklasse 4 ergab, dass 33 der 140 betroffenen Zeitreihen aufgrund der Dominanz periodischer Signale dieser Rauschklasse zugeordnet wurden. Die restlichen Zeitreihen wiesen aufgrund großer Amplitudenunterschiede innerhalb der Zeitreihen ein Schwankungsmaß größer 60% auf (siehe S. 22).

Das seismische Rauschen im Frequenzbereich von 1-25 Hz zeigt einen deutlichen Tag/Nacht-Unterschied (Tabelle 4.7). Das Verhältnis der Mediane beträgt auf allen Komponenten im Mittel 10-11 dB. Mit Ausnahme von Station URS22 ist der Tag/Nacht-Unterschied auf der Vertikal-Komponente an allen Stationen größer als 7 dB. Der Median an Station URS22 beträgt in der Nacht mit 14777 nm/s das Vierfache des nächtlichen Stationsdurchschnitts. Ursache ist eine Tag und Nacht aktive, anthropogene Quelle. Aufgrund der zeitgleich deutlich geringeren Amplituden an den nächst gelegenen Stationen URS02 (3900 nm/s) und URS20 (5080 nm/s) muss die Ursache in unmittelbarer Umgebung liegen. Anhand des Stadtplans ist das direkt benachbarte *Depot Colentina* des Bukarester Verkehrsbetriebs R.A.T.B. als mögliche Quelle zu nennen. Stationen mit geringen Rauschamplituden in den Nachtstunden unter 2000 nm/s weisen gleichzeitig die größten Tag/Nacht-Unterschiede über 14 dB auf.

Station	Median 95.45-Perzentile in nm/s 21-01 Uhr UTC Vertikal	Verhältnis Tag/Nacht in dB Vertikal	Verhältnis Tag/Nacht in dB Nord-Süd	Verhältnis Tag/Nacht in dB Ost-West
URS01	1195	16.8	14.5	14.3
URS02	3946	9.4	7.6	7.2
URS03	1635	16.4	11.8	11.5
URS04	4212	13.1	12.0	10.6
URS05	3300	11.2	10.6	10.7
URS06	270	17.3	16.4	16.6
URS07	2120	14.5	14.5	16.1
URS08	2200	9.0	7.3	8.5
URS09	5715	12.0	11.8	11.8
URS10	2464	10.3	10.0	10.4
URS11	5367	10.1	9.8	9.8
URS12	6025	8.3	8.7	8.6
URS13	3855	11.2	10.7	10.1
URS14	2700	16.7	17.6	16.8
URS15	1000	12.3	12.1	11.7
URS16	5364	11.5	11.0	10.2
URS17	893	14.0	13.1	12.6
URS18	3015	7.6	8.2	7.3
URS19	2556	6.8	6.1	3.5
URS20	5080	7.9	5.7	7.0
URS21	1637	17.0	13.0	15.0
URS22	14777	0.8	1.6	2.1
URS23	4375	7.8	7.8	7.4
URS24	2470	11.0	9.1	9.7
URS25	5170	11.4	5.0	5.5
URS26	4220	11.0	11.2	11.1
URS27	4132	13.3	11.0	11.6
URS28	2596	13.3	11.9	11.4
URS29	5000	9.7	8.4	9.1
URS31	4217	10.4	9.8	9.9
URS32	7306	11.2	7.9	7.6
URS33	4070	12.8	12.0	11.7
Mittelwert	3840	11	10	10

Tabelle 4.7: Verhältnis der 95.45-Perzentilen (Median) zwischen Tag (06-09 Uhr) und Nacht(21-01 Uhr) im Frequenzbereich 1-25 Hz in dB.

Tagsüber (06-09 Uhr und 11-15 Uhr) beträgt der Median der 95.45-Perzentilen auf der Vertikal-Komponente (Abbildung 4.34) außerhalb der Stadt (URS19, URS17, URS15) 4000-5000 nm/s. An Station URS06 ist das seismische Rauschen von 1-25 Hz mit 2000 nm/s am geringsten. Von den Außenbereichen der Stadt (URS01, URS08, URS21) mit 8000-12000 nm/s nimmt das Rauschen zum Stadtzentrum (URS09, URS12, URS31) auf 12000-18000 nm/s zu. Vergleichbar hohe Rauschamplituden erreichen Stationen mit geringem (< 1000 Meter) Abstand zu Industriegebieten (z.B. URS13, URS20, URS26, URS04, URS14, ...). Die größten Rauschamplituden werden an Station URS32 gemessen. Der Standort dieser Station weist im Norden, Westen und Süden Abstände kleiner als 1000 m zu Industriegebieten auf und grenzt im Osten an die Innenstadt. Der Abstand zum berühmten Bukarester Parlamentsgebäude beträgt 2000 m, zum Hauptbahnhof 1800 m, d.h. es ist ständig auch mit einem hohen Verkehrsaufkommen zu rechnen. Die 95.45-Perzentilen im Zeitraum 06-09 Uhr und 11-15 Uhr sind an allen Stationen am Sonntag, 14.12.03, deutlich geringer als die der Werkzeuge (Bsp. siehe Abbildung 4.35). Der Unterschied zum Median der Perzentilen beträgt zwischen 3-8 dB. In den

4.4 Frequenzbereich 1-25 Hz

Nachtstunden zwischen 21-01 Uhr besteht kein systematischer Unterschied zwischen den Werktagen und dem Sonntag.

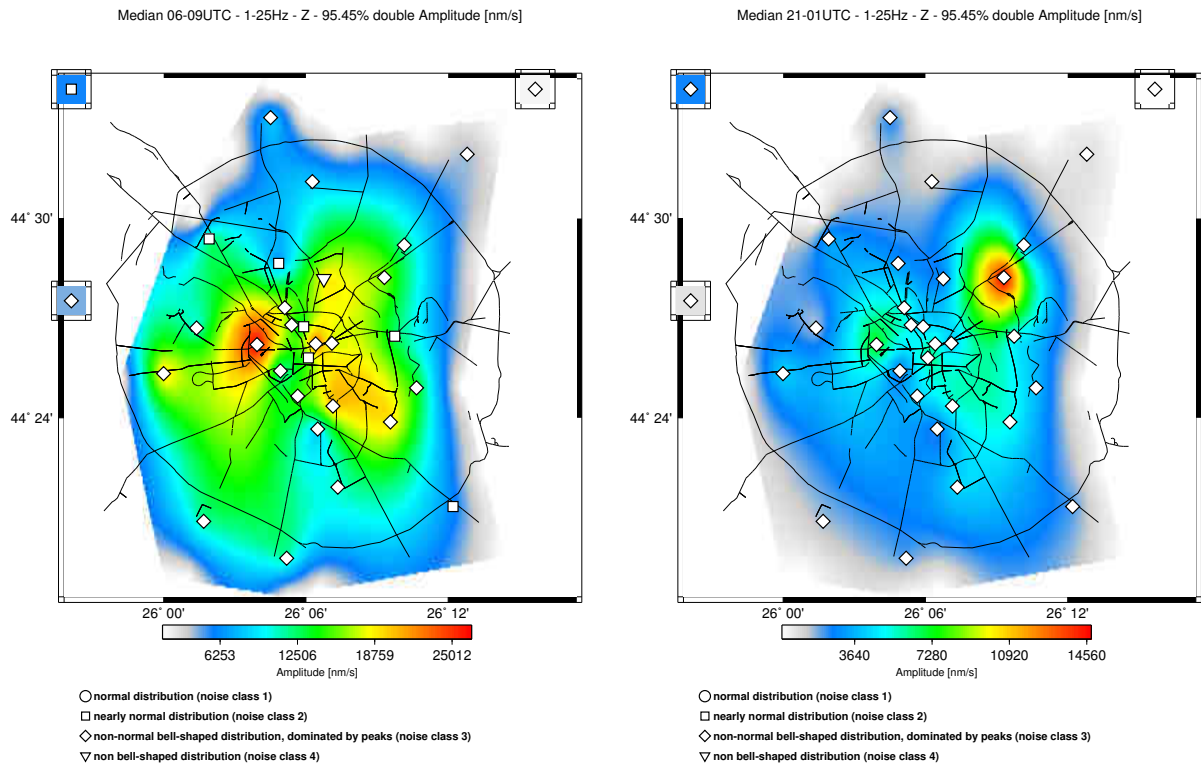


Abbildung 4.34: Median der 95.45-Perzentilen von 06-09 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 1-25 Hz, Vertikal-Komponente.

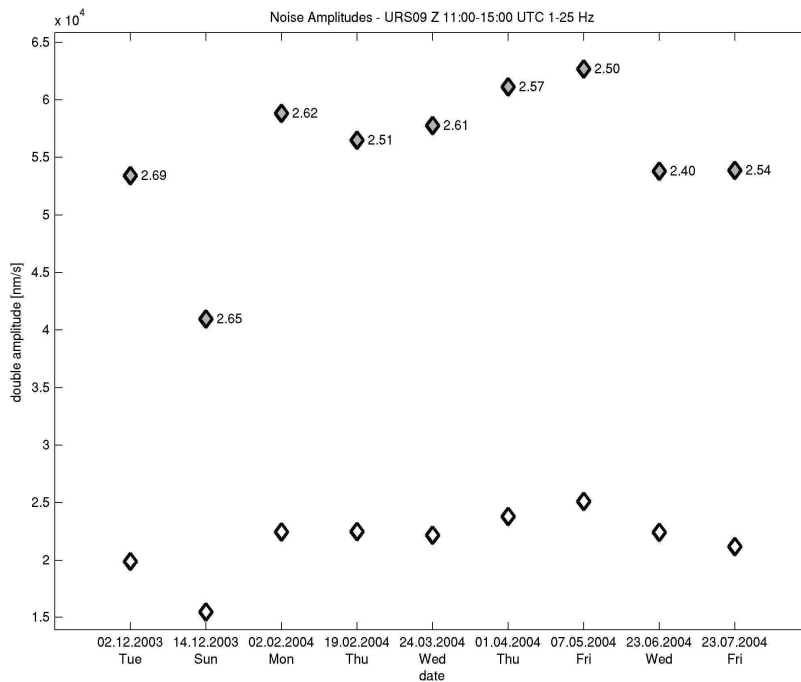


Abbildung 4.35: 95.45-Perzentilen der Bodenschwingungsgeschwindigkeit im Frequenzbereich 1-25 Hz von 21-01 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).

Hauptursachen des anthropogenen seismischen Rauschens von 1-25 Hz sind Verkehr und Industrie (siehe S. 4). Als Beispiel dient das 28-Tage-Spektrogramm der Vertikal-Komponente von Station URS31 (Abbildung 4.36). Der Standort von URS31 befand sich im Innenstadtbereich unmittelbar an einer Hauptverkehrsstraße (Bulevardul Magheru). Deutlich erkennbar ist der Tag/Nacht-Unterschied als Erhöhung der Leistungsdichte im gesamten Frequenzbereich von 2-40 Hz zwischen ~10-20 dB unter 15 Hz und bis zu ~30 dB über 35 Hz. Den Einfluss periodischer Schwingungen von Drehstrommotoren (siehe auch S. 5) auf das seismische Rauschen zeigt sich in Form schmaler Frequenzbänder erhöhter Leistungsdichte. An Station URS31 sind die eingekoppelten Schwingungen von Motoren mit 8 Polen, 6 Polen, und 4 Polen beobachtbar (siehe Tabelle 2.2, S. 6; Markierungen im Spektrogramm). Schmalbandige Linien erhöhter Leistungsdichte bei anderen Frequenzen (z.B. bei ~32 Hz, siehe Abbildung 4.36) stammen von Motoren, die mit Frequenz-Umrichtern betrieben werden. Die Mehrzahl der Motoren an Station URS31 wird nur tagsüber betrieben, der mit einer Drehfrequenz von 32 Hz arbeitende Motor läuft ununterbrochen.

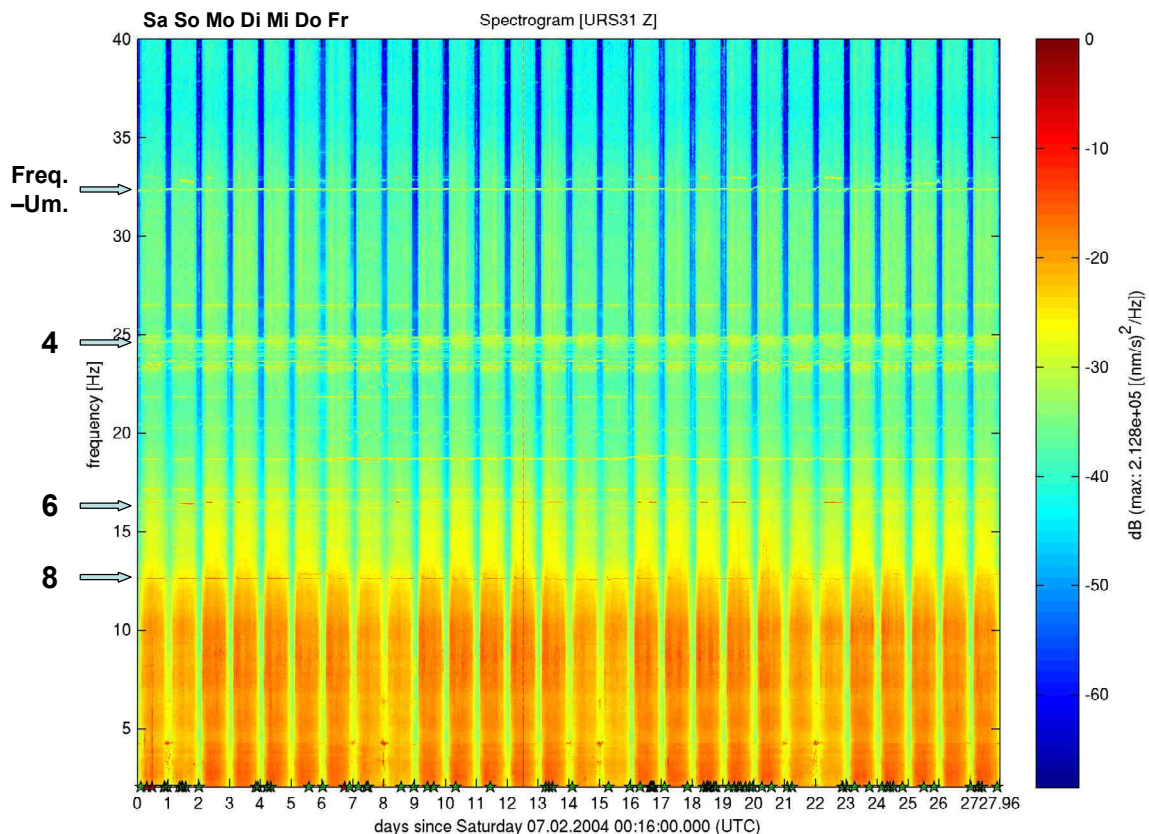


Abbildung 4.36: 28-Tage-Spektrogramm von 2-40 Hz der Vertikal-Komponente an Station URS31 im Stadtzentrum. Übliche Drehstrommotor-Frequenzen sind mit der entsprechenden Polzahl des Motors markiert.

An allen Stationen des URS-Netzwerks sind periodische Schwingungen von Drehstrommotoren messbar. Anzahl und Amplitude solcher periodischen Schwingungen sind von Station zu Station sehr unterschiedlich. Am häufigsten sind Motoren mit 8, 6 und 4 Polen vertreten. Der Versuch, den Standort solcher Motoren mit Array- bzw. Lokalisierungsmethoden mit mindestens 3 Stationen konkret im Stadtgebiet zu lokalisieren, ist bislang gescheitert. Bei Frequenzen über 3 Hz waren die Schwingungen von keinem Motor an mehr als einer Station zu beobachten. Die hochfrequenten Schwingungen sind bereits bei Stationsabständen von wenigen

hundert Metern aufgrund der Dämpfung im sonstigen Rauschen nicht mehr zu identifizieren. Um den Einfluss solcher Motoren im Stadtgebiet dennoch räumlich untersuchen zu können, wurden auch die 95.45-Perzentilen in den drei Frequenzbändern 10.5-12.5 Hz (8 Pole), 13.7-16.7 Hz (6 Pole) und 22-25 Hz (4 Pole) bestimmt. Abbildung 4.37 zeigt die Mediane der bestimmten 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr im Stadtgebiet für die Frequenzbänder 10.5-12.5 Hz (links) und 13.7-16.7 (rechts). Die höchsten Amplituden werden im Stadtzentrum und im Bereich der großen Industriegebiete erreicht (Lage der Industriegebiete siehe auch Abbildung 4.38). Die Tag/Nacht-Unterschiede in diesen drei Frequenzbändern betragen an den URS-Stationen zwischen 1-30 dB und zeigen größere Standortunterschiede als das seismische Rauschen im gesamten Frequenzbereich von 1-25 Hz.

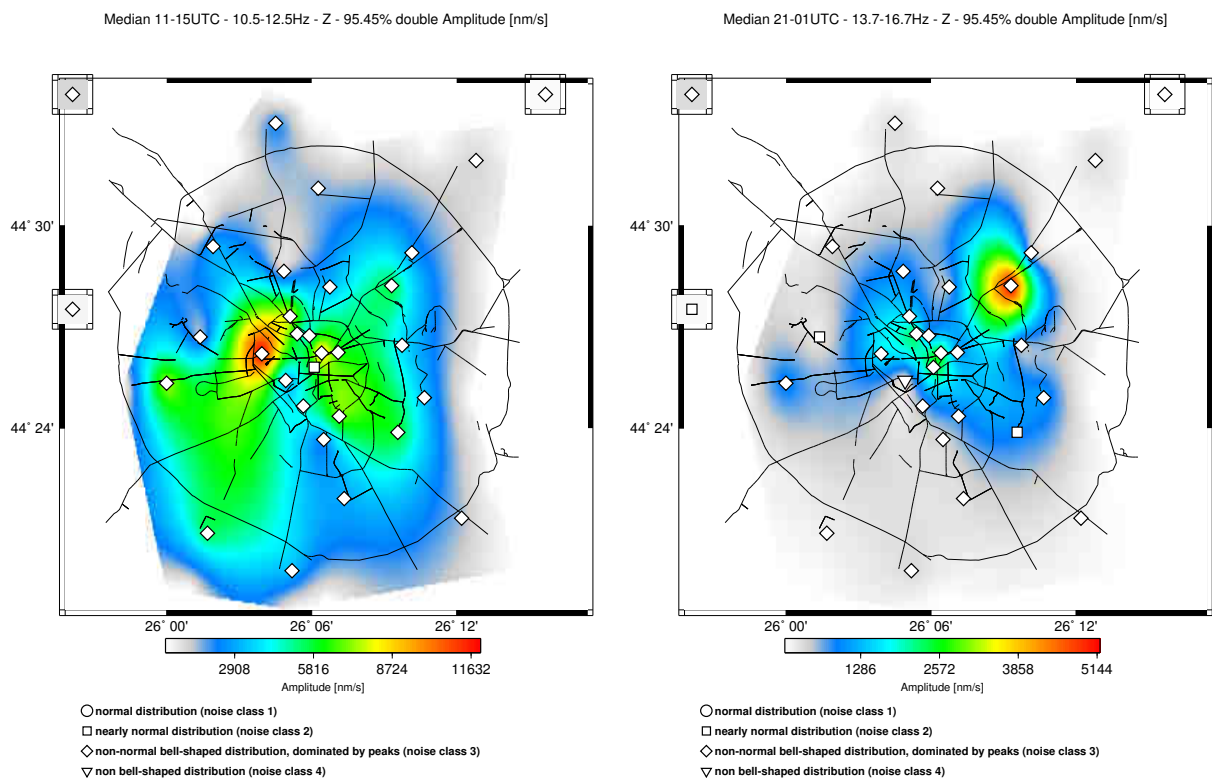


Abbildung 4.37: Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr UTC im Frequenzbereich 10.5-12.5 Hz (links) und 13.7-16.7 Hz (rechts), Vertikal-Komponente.

Bei Frequenzen unter 3 Hz konnten die Schwingungen einiger Motoren an mehreren Stationen gleichzeitig beobachtet werden. Die Identifizierung erfolgte anhand zeitgleicher Ein- und Ausschaltvorgänge. Tabelle 4.8 enthält 4 Motoren unter 3 Hz, deren Schwingungen an mehr als 3 Tagen beobachtbar waren.

Nr.	Frequenz [Hz]	URS-Stationen
1	2.34 ± 0.04	13, 16, 25, 8, 20, 22, 27
2	2.04 ± 0.02	26, 33, 09, 12, 28, 16, 29
3	1.92 ± 0.02	13, 20, 15
4	1.42 ± 0.02	05, 03, 18, 29, 14, 12, 10

Tabelle 4.8: Tieffrequente Motoren im Stadtgebiet mit Frequenz und Stationen, an denen die eingekoppelten Schwingungen beobachtbar waren. Die Stationen sind absteigend nach Amplitude der jeweiligen Schwingungen sortiert.

Es war nicht möglich, anhand der Einschaltvorgänge eindeutige Einsatzzeiten für eine Lokalisierung zu bestimmen. Das Einschalten erfolgt nicht in Form einer plötzlich einsetzenden Schwingung der entsprechenden Frequenz, sondern als stetige Amplitudenzunahme. Denkbare Ursache ist, dass die Motoren mit langsam zunehmender Last angefahren werden, um starke Drehmomentschwankungen zu vermeiden. Anhand der Stationen, an denen die Schwingungen beobachtbar waren, und deren Amplitudenunterschiede ist eine qualitative Eingrenzung der Standorte möglich (Abbildung 4.38).

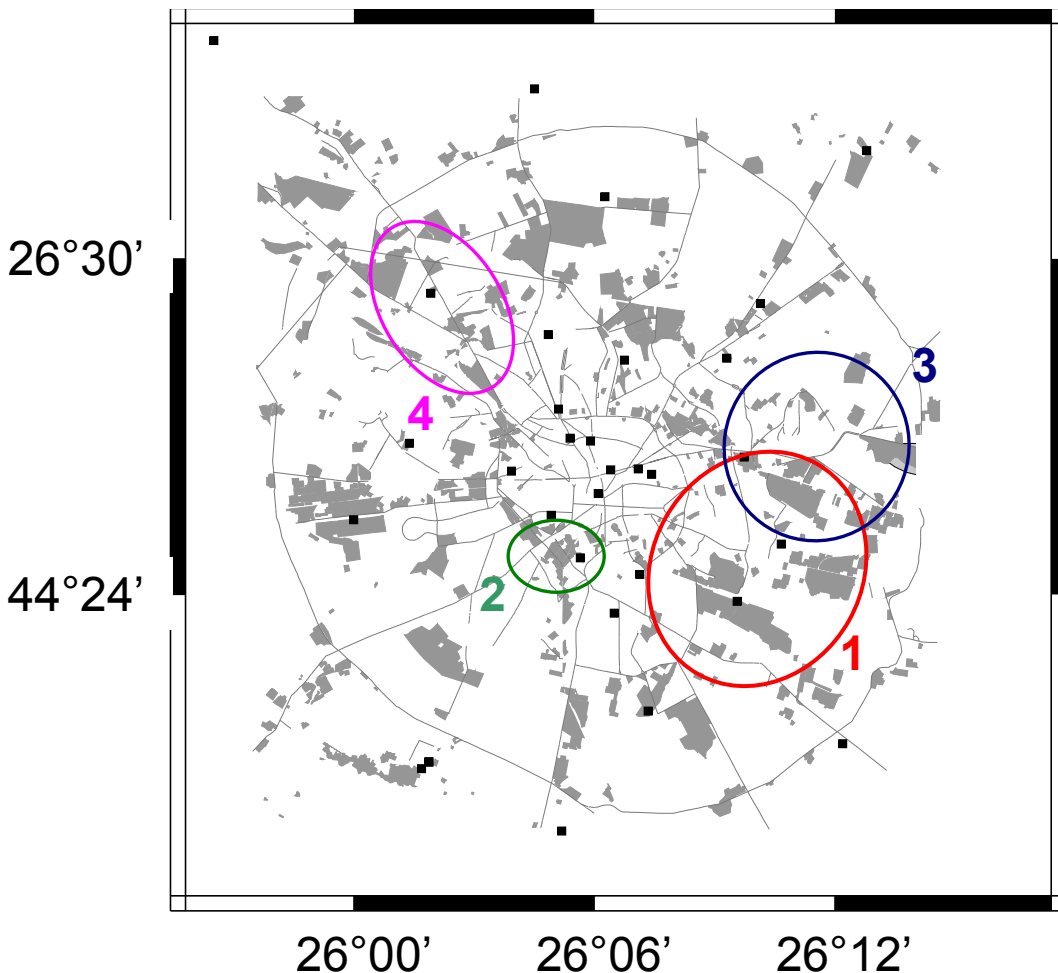


Abbildung 4.38: Stadtgebiet von Bukarest und eingegrenzte Standorte von starken Drehstrommotoren (Ellipsen) mit Frequenzen unter 3 Hz. Motoren 1-4 siehe Tabelle 4.8. Graue Flächen markieren Industriegebiete und Anlagen der rumänischen Bahn.

4.5 Frequenzbereich 25-45 Hz

Im Frequenzbereich 25-45 Hz sind anthropogene Aktivität und Wind die Hauptquellen des seismischen Rauschens im Großraum Bukarest. Der Tag/Nacht-Unterschied ist mit 13 dB im Stationsmittel nur geringfügig größer als im Frequenzbereich 1-25 Hz (10-11 dB). Allerdings sind die Standortunterschiede mit einer Spannweite des Tag/Nacht-Unterschieds von 0.3-31 dB im URS-Netzwerk wesentlich größer (siehe Tabelle 4.9). Wie bereits im Frequenzbereich 1-25 Hz wurden die kleinsten Rauschamplituden auf der Vertikal-Komponente mit 51 nm/s im Median der 95.45-Perzentilen von 21-01 Uhr an der am weitesten von der Stadt entfernten Station URS06 gemessen. Der Tag/Nacht-Unterschied ist mit ~7 dB auf der Vertikal-Komponente von URS06 gering. Vergleicht man den Median und den Tag/Nacht-Unterschied an Station URS06 mit dem Mittelwert aller Stationen von 531 nm/s bzw. 13 dB, dann wird der große anthropogene Einfluss im Stadtgebiet deutlich.

Station	Median 95.45-Perzentile in nm/s 21-01 Uhr UTC Vertikal	Verhältnis Tag/Nacht in dB Vertikal	Verhältnis Tag/Nacht in dB Nord-Süd	Verhältnis Tag/Nacht in dB Ost-West
URS01	500	17.6	10.9	11.7
URS02	477	14.1	14.3	15.1
URS03	114	30.7	27.2	24.9
URS04	447	18.8	16.8	15.5
URS05	360	10.7	11.3	10.4
URS06	51	6.7	5.5	5.4
URS07	170	14.6	18.5	16.4
URS08	408	4.7	6.0	4.8
URS09	945	13.3	14.7	13.4
URS10	582	9.5	11.2	13.4
URS11	312	14.1	13.9	14.9
URS12	1087	8.7	6.6	7.9
URS13	450	16.9	19.9	16.0
URS14	305	29.3	30.9	30.7
URS15	240	20.1	17.6	18.3
URS16	414	13.0	14.0	13.6
URS17	126	13.2	13.7	13.6
URS18	552	7.2	8.5	7.5
URS19	610	0.3	1.6	0.1
URS20	332	13.7	14.3	6.3
URS21	69	16.9	17.7	16.8
URS22	3425	3.4	3.2	3.4
URS23	245	6.3	9.7	11.8
URS24	327	15.8	12.5	11.5
URS25	517	17.0	10.1	3.4
URS26	310	11.3	10.5	10.6
URS27	690	15.3	9.5	12.4
URS28	137	19.8	22.2	22.7
URS29	1292	6.6	7.9	8.9
URS31	467	14.7	17.1	17.2
URS32	696	8.8	9.9	9.6
URS33	315	17.6	17.2	17.0
Mittelwert	531	13	13	13

Tabelle 4.9: Verhältnis der 95.45-Perzentilen (Median) zwischen Tag (06-09 Uhr) und Nacht (21-01 Uhr) im Frequenzbereich 25-45 Hz in dB für alle Bewegungsrichtungen.

Die größte Rauschamplitude weist in der Nacht, wie im Frequenzbereich 1-25 Hz, die Station URS22 mit 3425 nm/s auf. Im Stadtzentrum werden Werte von 800-1200 nm/s erreicht. Stationen im Stadtbereich, die in der Nacht geringe Amplituden zwischen 70-200 nm/s aufweisen, zeigen gleichzeitig die größten Tag/Nacht-Unterschiede von 14-30 dB. Die räumliche Verteilung der maximalen Amplituden im Frequenzbereich von 25-45 Hz ist am Tag und in der Nacht derjenigen im Frequenzbereich von 1-25 Hz sehr ähnlich. Die höchsten Amplituden werden im Stadtzentrum (URS09, URS12, URS29) und in Industrienähe (URS13, URS20, URS04) erreicht (siehe Abbildung 4.39).

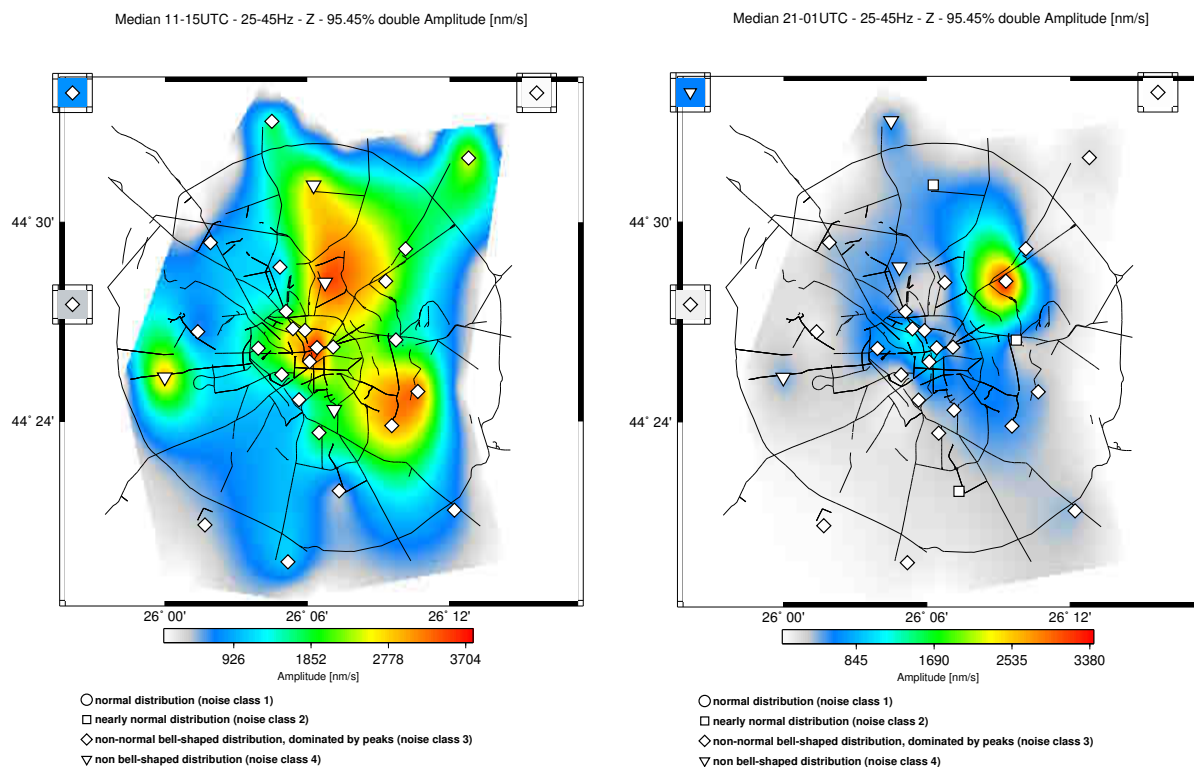


Abbildung 4.39: Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 25-45 Hz, Vertikal-Komponente.

Bei Stationen, deren Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr weniger als 1000 nm/s beträgt, sind am 24.03.04 und 07.05.04 erhöhte Rauschamplituden aufgrund der erhöhten Windgeschwindigkeiten feststellbar. Dies sind Stationen außerhalb oder in den Randbereichen von Bukarest (z.B. URS06, URS08, URS17). Der im Frequenzbereich 1-25 Hz am Tag an allen Stationen auftretende Unterschied der 95.45-Perzentilen zwischen Werktagen und Sonntag ist von 25-45 Hz nur noch an Stationen im Innenstadtbereich feststellbar und beträgt dort 3-8 dB. Wie im Frequenzbereich 1-25 Hz besteht dieser Unterschied in der Nacht nicht.

4.6 Rauschspektren

Im Folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften des seismischen Rauschens im Großraum Bukarest anhand der Rauschspektren der Vertikal-Komponente an den Stationen URS06 (außerhalb der Stadt) und URS09 (im Stadtzentrum) kurz nachvollzogen und ein Vergleich mit dem New Global Noise Model (Peterson, 1993 und siehe S. 8) gezeigt.

Abbildung 4.40 zeigt die Rauschspektren am 23.06.04 um 13 Uhr. Primäre und sekundäre Meereseismik sind sehr schwach, die Windgeschwindigkeit betrug 1 m/s. Zum Vergleich sind das New Low Noise Model (grün) und das New High Noise Model (rot) ebenfalls dargestellt.

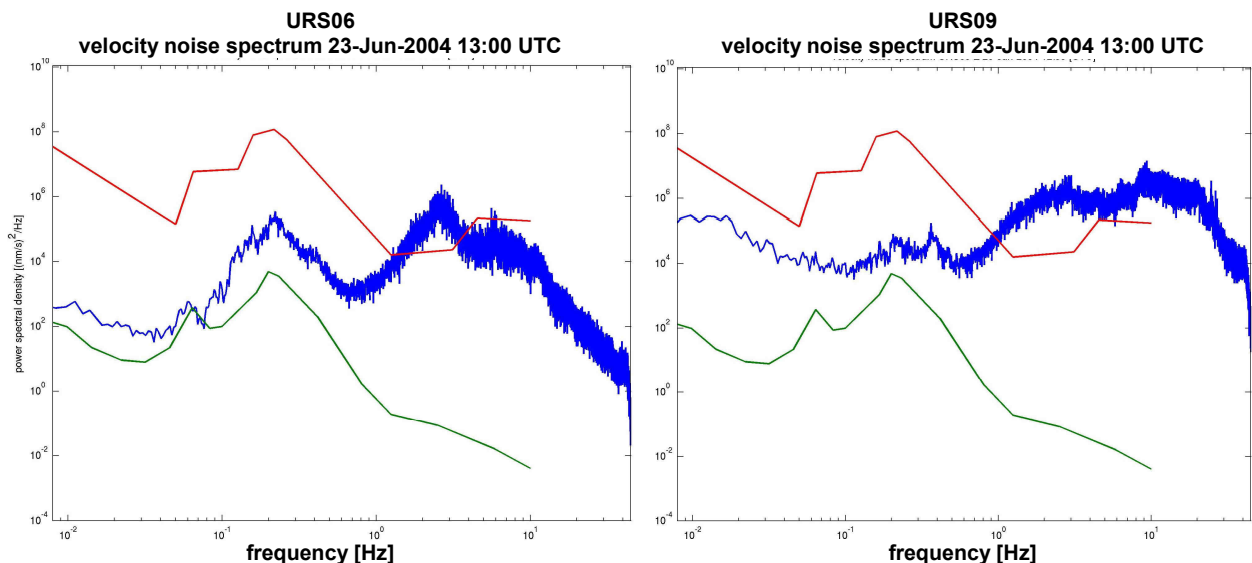


Abbildung 4.40: Rauschspektren der Vertikal-Komponenten von Station URS06 (links) und URS09 (rechts) um 13 Uhr UTC am 23.06.04 von 8 mHz bis 45 Hz. Tag mit schwacher primärer und sekundärer Meereseismik. Grün: Low Global Noise Model Rot: New High Global Noise Model.

An Station URS06 sind trotz der im Vergleich zu den Wintermonaten schwachen Meereseismik das Maximum der primären ($\sim 0,06$ Hz) und sekundären ($\sim 0,2$ Hz) Meereseismik klar erkennbar. Unterhalb von 0,1 Hz liegt das Rauschspektrum maximal 10 dB oberhalb des NLNM. Bei Station URS09 sind aufgrund des stärkeren anthropogenen Rauschens kein Maximum der primären und kaum das Maximum der sekundären Meereseismik zu erkennen. Die Leistungsdichte ist bei URS09 etwa 40 dB oberhalb des NLNM. An URS06 liegt das Maximum bei 0,2 Hz ~ 6 dB über dem an URS09 und zeigt noch mal den Trend zunehmender Amplituden von Süden nach Norden. Die Abnahme der Leistungsdichte mit steigender Frequenz wie beim NLNM zeigen beide Rauschspektren nicht. Ab 0,5 Hz an Station URS09 und ab 0,7 Hz an Station URS06 nimmt die Leistungsdichte wieder zu und überschreitet bei 1 bzw. 1,5 Hz das NHNM. An URS06 wird ein Maximum ~ 20 dB oberhalb des NHNM bei 2,8 Hz erreicht. Zu höheren Frequenzen hin fällt das Rauschspektrum wieder unter das NHNM, bleibt aber immer bis zu 60 dB über dem NLNM. Bei URS09 bleibt das Rauschspektrum konstant bis zu 20 dB oberhalb des NHNM.

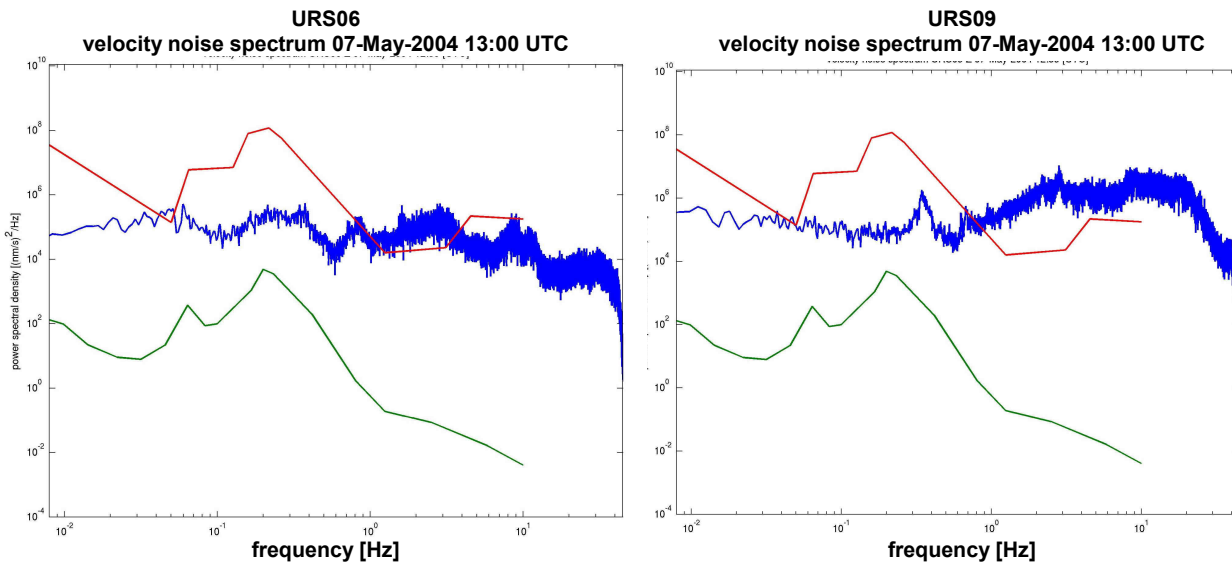


Abbildung 4.41: Rauschspektren der Vertikal-Komponenten von Station URS06 (links) und URS09 (rechts) um 13 Uhr UTC am 07.05.04 von 8 mHz bis 45 Hz. Starkwindereignis, Windgeschwindigkeit 7 m/s um 13 Uhr UTC. Grün: Low Global Noise Model Rot: New High Global Noise Model.

Während des Starkwindereignisses am 07.05.04 um 13 Uhr (Abbildung 4.41) zeigen die Rauschspektren der Stationen URS06 und URS09 einen sehr ähnlichen Verlauf. Unterhalb von ~ 0.15 Hz sind die Leistungsdichten deutlich erhöht. Sie erreichen bei 0.06 Hz das NHNM und liegen bei 8 mHz um ~ 20 dB (URS09) bzw. um ~ 30 dB (URS06) darunter. Im Vergleich mit dem Rauschspektrum bei niedrigen Windgeschwindigkeiten (Abbildung 4.40) überschreiten die Rauschspektren an beiden Stationen das NLNM bereits bei 0.9 Hz. Bei höheren Frequenzen unterscheidet sich das Spektrum von URS09 aufgrund des starken anthropogenen Rauschens kaum von dem bei niedrigen Windgeschwindigkeiten. Bei URS06 bleibt zwischen 15-40 Hz der Abfall der Leistungsdichte um ~ 20 dB aufgrund der Windeinwirkung aus. Der starke Leistungsabfall von 40-45 Hz ist eventuell bereits ein unerwünschter Effekt der Anti-Aliasing-Filter der Datenerfassungsgeräte. Abbildung 4.42 zeigt die Rauschspektren in der Nacht des 14.12.04 während des starken primären und sekundären Meereseismikereignisses. An beiden Stationen sind die entsprechenden Maxima nun deutlich erkennbar. Das Maximum der primären Meereseismik liegt bei beiden Stationen ~ 27 dB oberhalb des NLNM. Das Maximum der sekundären Meereseismik erreicht bei URS06 das NHNM und liegt bei URS09 ~ 10 dB darunter.

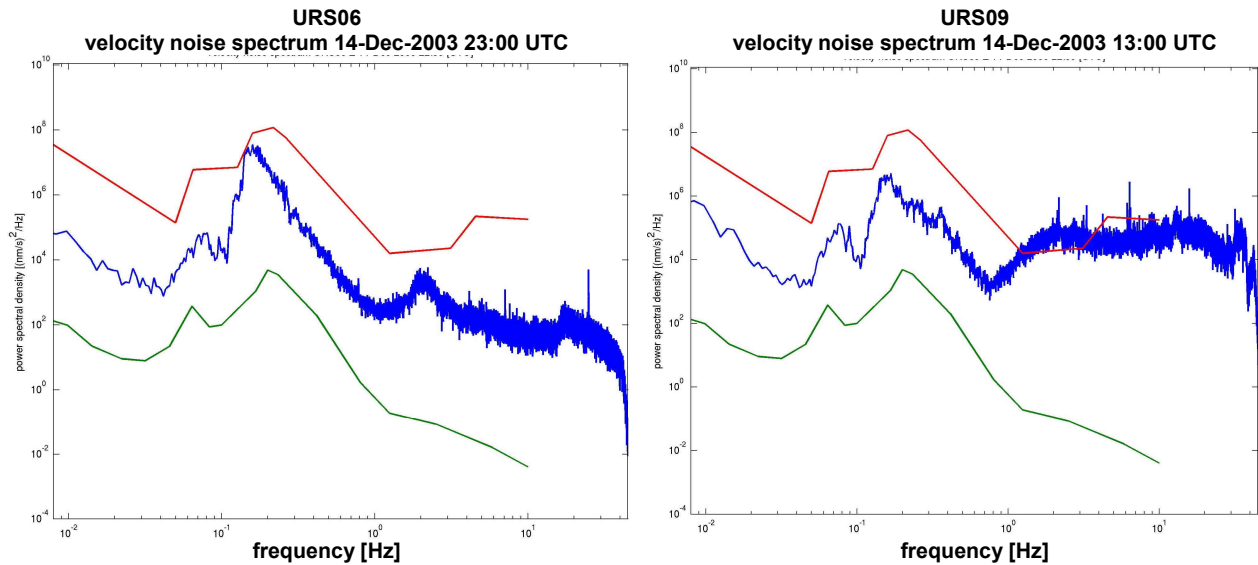


Abbildung 4.42: Rauschspektren der Vertikal-Komponenten von Station URS06 (links) und URS09 (rechts) um 23 Uhr UTC am 14.12.03 von 8 mHz bis 45 Hz. Im Zeitfenster überdurchschnittlich starker primärer und sekundärer Meereseismik des Atlantiks. Grün: Low Global Noise Model Rot: New High Global Noise Model.

Das Verhältnis der Rauschspektren zwischen den Stationen und dem NGNM ist entsprechend den Rauschamplituden im Zeitbereich sehr unterschiedlich und tageszeitabhängig. Für jede Station wurde in den 3 Zeiträumen 06-09 Uhr UTC, 11-15 Uhr UTC und 21-01 Uhr UTC ein Median-Rauschspektrum aus den Rauschspektren der neun ausgewerteten Tage berechnet. Insgesamt wurde bei der Auswertung an keiner Station und in keinem Zeitraum ein Unterschreiten des NLNM festgestellt. Im Frequenzbereich von 8-10 mHz liegen die Median-Rauschspektren aller Stationen mit STS-2 Seismometer, mit Ausnahme der Stationen URS16 und URS19, tageszeitunabhängig unterhalb des NHNM. An Station URS16 beträgt der Unterschied zum NHNM bei Tag und Nacht etwa +8 dB, an Station URS19 etwa +3 dB. An einigen Tagen wird im Frequenzbereich 8-10 mHz das NHNM an den Stationen URS16, URS11, URS20 und URS19 bis zu 25 dB überschritten. Im Frequenzbereich von 0.001-0.6 Hz wurde an keiner Station das NHNM überschritten, allerdings am 14.12.03 an Station URS06 erreicht (s.o.). Bei starken Ereignissen der Meereseismik ist mit einem Überschreiten des NHNM, besonders an Stationen im Norden, zu rechnen.

Im Frequenzbereich 0.5-0.9 Hz liegen die Median-Rauschspektren aller Stationen jederzeit unterhalb des NHNM. Am Tag wird im Frequenzbereich 0.9-3 Hz an allen Stationen das NHNM überschritten, teilweise um mehr als 20 dB. Nachts liegen im Frequenzbereich 0.9-3 Hz alle Stationen außer URS06 im Bereich ± 10 dB um das NHNM. Nur an Station URS06 bleibt das Rauschspektrum im gesamten Frequenzbereich von 0.008-45 Hz unterhalb des NHNM. Im Frequenzbereich von 3-10 Hz bestehen große Unterschiede zwischen den Stationen und an den einzelnen Tagen. Die Median-Rauschspektren liegen im Frequenzbereich 3-10 Hz am Tag zwischen -10 dB bis +30 dB und in der Nacht zwischen -30 dB bis +10 dB um das NHNM. Das New Global Noise Model endet bei 10 Hz.

5 Zusammenfassung

Für die Analyse des urbanen seismischen Rauschens bietet der URS-Datensatz aufgrund der langen kontinuierlichen Messung mit 100 Hz und dem dichten innerstädtischen Stationsnetz beste Voraussetzungen. Um die Veränderungen des seismischen Rauschens in Abhängigkeit von der Zeit und der Frequenz untersuchen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit zuerst mit MATLAB Programme zur Berechnung von Spektrogrammen für Zeitreihen mit einer Länge von wenigen Stunden bis zu mehr als 4 Wochen erstellt (siehe Programmbeschreibungen, S. 93). An der relativ zum Stadtzentrum ruhigen Station URS21 wurden zu Vergleichszwecken für alle drei Komponenten (Vertikal, Nord-Süd und Ost-West) 7-Tage- und 28-Tage-Spektrogramme für den gesamten Messzeitraum erstellt.

Es hat sich bei dieser Arbeit bewährt, die Analyse des breitbandigen seismischen Rauschens von 8 mHz bis 45 Hz mit einer vergleichenden Untersuchung von Langzeit-Spektrogrammen zu beginnen. Es ermöglicht unter anderem die Auswahl geeigneter Zeiträume und Frequenzbereiche für die Bestimmung von Rauschamplituden im Zeit- und Frequenzbereich. Um die Variationen des seismischen Rauschens mit der Tageszeit auflösen zu können, wurden die Tage in drei Zeiträume unterteilt: Vormittag (06-09 Uhr UTC), Nachmittag (11-15 Uhr UTC) und Nacht (21-01 Uhr UTC), wobei die lokale Zeit UTC+2h beträgt. Für die Analyse im Zeitbereich wurden Frequenzbereiche anhand der frequenzabhängigen Dominanz bestimmter Quellen des seismischen Rauschens gewählt. In Bukarest waren dies die anthropogene Aktivität und Wind (8-40 mHz und 0.6-45 Hz) sowie die Meeresmikroseismik (0.04-0.6 Hz). Diese Frequenzbereiche wurden zum Teil in weitere Frequenzbänder unterteilt. Insgesamt wurden für 12 Frequenzbänder (siehe Tabelle 3.8, S. 39) Rauschamplituden im Zeitbereich bestimmt. Langzeit-Spektrogramme eignen sich außerdem hervorragend für die Korrelation mit Messwerten anderer Parameter, um deren Einfluss auf das seismische Rauschen zu untersuchen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss des Windes auf das seismische Rauschen in Bukarest untersucht. Eine Korrelation von Spektrogrammen mit der Windgeschwindigkeit (siehe Abbildung 4.29, S. 64) ergab eine signifikante Leistungszunahme der in den Untergrund eingekoppelten Schwingungen ab einer Windgeschwindigkeit von 4-5 m/s in den Frequenzbereichen 8-40 mHz und oberhalb von 0.6 Hz.

Um das seismische Rauschen ohne den Einfluss seismischer Ereignisse zu untersuchen, wurden Zeiträume ohne Ankunft seismischer Wellen bestimmt. Dazu wurde ein Katalog potentiell im Großraum Bukarest messbarer Ereignisse erstellt und 9 Tage für die Bestimmung von Rauschamplituden ausgewählt (siehe S. 35). Es hat sich für die Auswertung als hilfreich erwiesen, die anhand des zusammengestellten Katalogs berechneten theoretischen Ankunftszeiten in Langzeit-Spektrogrammen zu markieren (siehe Abbildung 4.2, S. 43). Dies ermöglicht die schnelle Unterscheidung ankommender Erdbebenwellen von transienten Ereignissen innerhalb des Netzwerkes.

Die Bestimmung der Rauschamplituden im Frequenzbereich erfolgte durch die Berechnung von Rauschspektren (siehe S. 28) um 07:30 Uhr UTC, 13 Uhr UTC und 23 Uhr UTC. Die Bestimmung von Rauschamplituden im Zeitbereich erwies sich als schwierig. Aufgrund von andauernden Änderungen der Amplitude und/oder transienten Ereignissen innerhalb einer Zeitreihe ist deren Standardabweichung alleine für die Beurteilung des seismischen Rauschens nicht geeignet. Daher wurde in der Vergangenheit oft auf eine Angabe von Rauschamplituden im Zeitbereich verzichtet oder die Bestimmung von Rauschamplituden wurde von einem Analysten

manuell vorgenommen. Ein Kompromiss stellt die Ableitung von RMS-Amplituden aus Spektren dar. Für diese Arbeit wurden Rauschamplituden in 12 Frequenzbereichen für alle drei Bewegungsrichtungen sowohl für die Bodenschwinggeschwindigkeit als auch für die Bodenverschiebung bestimmt. Im Idealfall standen Daten von allen 31 Seismometern zur Verfügung. Dies entspricht 1152 Zeitreihen für jeden untersuchten Zeitraum. Insgesamt mussten über 50000 Zeitreihen ausgewertet werden. Eine manuelle Bestimmung von Rauschamplituden im Zeitbereich ist bei diesen Datenmengen praktisch nicht möglich.

Um eine automatische Auswertung der Zeitreihen zu ermöglichen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein statistischer Ansatz entwickelt und mit MATLAB realisiert (siehe S. 20 und Programmbeschreibungen, S.97). Die Bestimmung der Rauschamplitude im Zeitbereich erfolgt über die Angabe der 95.45-Perzentile, d.h. der Doppelamplitude innerhalb deren Wertebereich 95.45 Prozent der Zeitreihen-Werte liegen, und einer Klassifizierung der untersuchten Zeitreihe. Dem Verfahren liegt zu Grunde, dass sich das seismische Rauschen als Überlagerung von Signalen vieler unterschiedlicher Quellen einem normalverteilten Zufallsprozess annähert (Zentraler Grenzwertsatz, S. 15). Für die Klassifizierung sind Ausmaß und Charakter der Abweichungen von der Normalverteilung von Bedeutung. Besteht die Zeitreihe einen χ^2 -Anpassungstest (S. 21) auf Normalverteilung wird der Zeitreihe die Rauschklasse 1 zugeordnet. Den Rauschklassen 2 und 3 werden Zeitreihen zugewiesen, deren Häufigkeitsverteilungen aufgrund kurzer transienter Ereignisse (Peaks) mit zunehmenden Maß eine Wölbung gegenüber der Normalverteilung in Form eines positiven Exzesses aufweisen. Die Rauschklasse 4 umfasst Zeitreihen, deren Häufigkeitsverteilungen, z.B. aufgrund dominierender periodischer Signalanteile, stark von der Normalverteilung abweichen und in der Regel keine Glockenform mehr aufweisen.

Das vorgestellte Verfahren ermöglicht die Bestimmung untereinander vergleichbarer Rauschamplituden im Zeitbereich an verschiedenen Orten und/oder Zeiten und macht Aussagen über die eventuell vorliegende Dominanz einzelner oder weniger Quellen und deren Charakter.

Die Analyse des seismischen Rauschens bestätigt die Erwartung einer deutlichen Tageszeitabhängigkeit des seismischen Rauschens oberhalb von 1 Hz aufgrund anthropogener Aktivität. Überraschend wurde an vielen Stationen im Stadtbereich eine ebenso deutliche Tageszeitabhängigkeit im Frequenzbereich von 8-40 mHz festgestellt (siehe S. 42). Systematische Änderungen mit dem Wochentag und wiederkehrende Wochenrhythmen wurden erkennbar (siehe Abbildung 4.1, S. 41). Als Quellen zahlreicher sehr schmalbandiger periodischer Signale mit Frequenzen oberhalb 1 Hz konnten Drehstrommotoren identifiziert werden (siehe S. 5 und Abbildung 4.36, S. 72). Das durch anthropogene Aktivität verursachte Rauschen zeigt große räumliche Unterschiede. Die größten Rauschamplituden wurden an Stationen im Stadtzentrum und in der Nähe von Industrie- und Gleisanlagen gemessen.

Das seismische Rauschen im Frequenzbereich der Meeresmikroseismik von 0.04-0.6 Hz (S. 48) wird wenig von anthropogener Aktivität beeinflusst und umfasst in Bukarest nicht nur die primäre (0.04-0.09 Hz) und sekundäre (0.09-0.18 Hz) Meeresmikroseismik. Im Frequenzbereich von 0.18-0.6 Hz stellt die Meeresmikroseismik aus nahen Quellgebieten im Schwarzen Meer und der Marmara See die leistungsstärkste Quelle seismischer Bodenbewegung in Bukarest dar. Der Frequenzbereich von 0.18-0.6 Hz konnte im Großraum Bukarest noch in die zwei Frequenzbänder 0.18-0.25 Hz der dauerhaft angeregten Meeresmikroseismik und

0.25-0.6 Hz der sporadisch angeregten Meereseismik aus nahen Quellgebieten unterteilt werden. Die sporadisch angeregte Meereseismik korreliert mit Stürmen über dem Schwarzen Meer und der Marmara See. Die Bewegung und Entwicklung von Sturmsystemen konnte mit Spektrogrammen und f_k -Analysen im Frequenzbereich von 0.18-0.6 Hz nachvollzogen werden (siehe S. 4 und S. 58). Im Frequenzbereich von 0.09-0.25 Hz wurde ein ausgeprägter und zeitstabiler Nord-Süd-Trend abnehmender Rauschamplituden festgestellt (S. 54). Dieser korreliert räumlich und in der Frequenz mit einer von Ziehm (2006) festgestellten Frequenzverschiebung eines Maximums des H/V-Spektralverhältnisses im Großraum Bukarest. Ob dies ursächlich zusammenhängt ist bislang unklar.

Die Analyse des seismischen Rauschens im Großraum Bukarest ist noch nicht abgeschlossen. Die frequenzabhängige Zusammensetzung des Wellenfeldes ist noch weitgehend unklar und die Möglichkeiten der f_k -Analyse noch nicht ausgeschöpft. Für eine abschließende Quantifizierung des seismischen Rauschens, auch in Bezug auf Jahreszeit, herrschende Windgeschwindigkeit und Meereseismik, sollte eine Auswertung weiterer Tage erfolgen. Der festgestellte Nord-Süd-Trend im Frequenzbereich von 0.09-0.25 Hz wirft im Zusammenhang mit den Ergebnissen der H/V-Analyse Fragen nach dem Einfluss der Untergrundbeschaffenheit auf.

Im Laufe dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass die Analyse des seismischen Rauschens ein wichtiges Hilfsmittel für moderne Verfahren wie die H/V-Spektralanalyse ist. Die Verwendung solcher Verfahren zur Bestimmung von Untergrundeigenschaften in Städten nimmt zu und ist auf die Kenntnis des urbanen seismischen Rauschens angewiesen. Der statistische Ansatz zur Bestimmung von Rauschamplituden im Zeitbereich hat sich bewährt und bietet noch Möglichkeiten der weiteren Verbesserung. Die Berechnung von Langzeit-Spektrogrammen und die Bestimmung von Rauschamplituden im Zeit- und Frequenzbereich mit MATLAB ist für die großen Datenmengen moderner Array-Experimente geeignet, und erlaubt problemlos die Einbindung weiterer Parameter wie z.B. Windgeschwindigkeit, Temperatur und Grundwasserspiegel.

Literaturverzeichnis

- Acernese, F. et al. (2004). Properties of seismic noise at the Virgo site. *Classical and Quantum Gravity*, **21**, S433-S440.
- Bachmann, A. (2003). Ein wirklichkeitsnaher Ansatz der böenerregten Windlasten auf Hochhäuser in Frankfurt/Main. Dissertation Technische Universität Darmstadt.
- Bard, P.-Y. und SESAME Projektpartner (2004). Nature of noise wavefield WP08. SESAME Final report. http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/SES_TechnicalDoc.htm, Deliverable D13.08.
- Barstow, N., G.H. Sutton und J.A. Carter (1989). Particle motion and pressure relationships of ocean bottom noise: 3900 m depth; 0.003 to 5 Hz. *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 1185-1188.
- Basler, H. (1994). Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung und statistischen Methodenlehre, 11. Auflage. Physica-Verlag, Heidelberg.
- Bendat, J.S. und A.G. Piersol (1986). Random Data: Analysis and measurement procedures, second edition. John Wiley & Sons Inc., Vereinigte Staaten von Amerika.
- Bokelmann G.H.R. und S. Baisch (1999). Nature of Narrow-Band Signals at 2.083 Hz. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, Nr. 1, 156-164.
- Bormann, P., K. Wylegalla und K. Klinge (1997). Analysis of broadband seismic noise at the German Regional Seismic Network and search for improved alternative station sites. *Journal of Seismology* , 1:357-380.
- Bormann, P. (1998). Conversion and comparability of data presentations on seismic background noise. *Journal of Seismology*, 2:37-45.
- Bromirski, P.D., R.E. Flick und N. Graham (1999). Ocean wave height determined from inland seismometer data: Implications for investigating wave climate changes in the NE Pacific. *Journal of Geophysical Research*, **104**, Nr. 9, 20.753-20.766.
- Bromirski, P.D. und F.K. Duennebieer (2002). The near-coastal microseism spectrum: Spatial and temporal wave climate relationships. *Journal of Geophysical Research*, **107**, Nr B8, ESE 5, 1-20.
- Bronstein, I.N., K.A. Semendjaev, G. Musiol und H. Mühlig (2001). Taschenbuch der Mathematik, 5. Auflage. Verlag Harri Deutsch, Deutschland.
- bfai (2006). Branche kompakt – Maschinenbau und Anlagenbau – Rumänien, 2006. Bundesagentur für Außenwirtschaft (Hrsg.), www.bfai.de.
- Bungum, H.S., S. Mykkeltveit und T. Kvaerna (1985). Seismic noise in Fennoscandia, with emphasis on high frequencies. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 1489-1514.

- Buttkus, B. (1991). Spektralanalyse und Filtertheorie in der angewandten Geophysik. Springer Verlag, Berlin.
- Capon, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceeding of the IEEE*, **57**, Nr. 8.
- Carter, J., N. Barstow, P. Pomeroy, E. Chael und P. Leahy (1991). High frequency seismic noise as a function of depth. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **81**, 1101-1114.
- Chen Q., L. Li, G. Li, L. Chen, W. Peng, Y. Tang, Y. Chen und F. Wang (2004). Seismic features of vibration induced by train. *Acta Seismologica Sinica*, **17**, Nr. 6, 715-724.
- Coward D., D. Blair, C. Zhao und R. Burman (2003). Vehicle-induced seismic effects at a gravitational wave observatory. *Review of Scientific Instruments*, **74**, Nr. 11, 4846- 4854.
- Degrande, G. und L. Schillemans (2001). Free field vibrations during the passage of a Thalys high-speed train at variable speed. *Journal of Sound and Vibration*, **247**, Nr. 1, 131-144.
- Forbriger, T. (2006). Low-frequency limit for H/V studies due to tilt. Poster bei: AG Seismologie. 4.-6. Oktober 2006, Gräfenberg, Deutschland.
- Evans, J.B. (2005). Vibration control for a 25 MW steam-turbine generator installation near academic teaching and research laboratories. *Twelfth International Congress on Sound and Vibration*, Lisabon.
- Gueguen P., P.-Y. Bard und F.J. Chavez-Garcia (2002). Site-city seismic interaction in Mexico city-like Environments: An Analytical Study. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, Nr. 2, 794-811.
- Hasselmann, K. (1963). A statistical analysis of the generation of microseisms. *Rev. Geophys.*, **1**, 177-210.
- Haubrich, R. A. und K. McCamy (1969). Microseisms: Coastal and pleagic sources. *Rev. Geophys.*, **7**, 539-571.
- IEC 60034-14:2003 (2003). Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56mm and higher – Measurement, evaluation and limits of vibration severity. German version EN 60034-14:2004. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verlag, Berlin.
- Kennett, B.L.N. und E.R. Engdahl (1991). Traveltime for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*, **105**, 429-465.
- Kibblewhite, A.C. und K.C. Ewans (1985). Wave-wave interactions, microseisms, and infrasonic ambient noise in the ocean. *J. Acoust. Soc. Am.*, **78**, 981-994.
- Lay, T. und T. Wallace (1995). Modern global seismology. Academic Press, San Diego, Vereinigte Staaten von Amerika.

- Longuet-Higgins, M.S. (1950). A theory of the origin of microseisms. *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 243, 1-35.
- Peterson, J. (1993). Observations and modelling of seismic background noise. U.S. Department of Interior, Geological Survey Open-File Report 93-322.
- Pyl L., G. Degrande, G. Lombaert und W. Haegman (2004). Validation of a source-receiver model of road traffic induced vibrations in buildings. *Journal of Engineering Mechanics, Proceedings of the ASCE*, **130**(12), 1377-1406.
- Raileanu, V. (2006). Persönliches Gespräch im Rahmen eines Arbeitstreffen des Sonderforschungsbereich 461. Universität Karlsruhe, Deutschland.
- Rehor, L. (2007). Bestimmung einer Gebäudeantwort mit Breitbandregistrierungen. In Bearbeitung.
- Ritter, J.R.R., S.F. Balan, K.-P. Bonjer, T. Diehl, T. Forbriger, G. Marmureanu, F. Wenzel und W. Wirth (2005). Broadband urban seismology in the Bucharest metropolitan area. *Seism. Res. Lett.*, **76**, 573-579.
- Sachs, L. (1978). Angewandte Statistik: Statistische Methoden und ihre Anwendung, 5. Auflage. Springer Verlag, Berlin.
- Stammler, K. (1993). SeismicHandler-programmable multichannel data handler for interactive and automatic processing of seismological analyses. *Comp. Geoscience*, **19**, 2062-2076.
- Sèbe, O. (2006). The shear wave velocity underneath Bucharest city from surface waves analysis with the URS broadband network. In Bearbeitung.
- Sudhaus, H. (2004). Bestimmung der seismischen Dämpfung in der Vrancea Region mit multipler Fenstertechnik. Diplomarbeit, Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe, Deutschland.
- Van der Hoven, I. (1957). Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. *Journal of Meteorology*, **14**, 160-164.
- Ward H. und R. Crawford (1966). Wind-induced vibrations and building modes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **56**, 793-813.
- Webb S.C., (1998). Broadband seismology and noise under the ocean. *Rev. Geophys.*, **36**(1), 105-142.
- Welch, P. (1967). A direct digital method of power spectrum estimation. *IBM J. Res. Dev.*, **5**, 141.
- Withers, M., R.C. Aster, C.J. Young und E.P. Chael (1996). High-Frequency Analysis of Seismic Background Noise as a Function of Wind Speed and Shallow Depth. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, Nr. 5, 1507-1515.

Yamanaka H., M. Dravinski und H. Kagami (1993). Continuous measurements of microtremors on sediments and basement in Los Angeles, California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **83**, Nr. 5, 1595-1609.

Young C.J., E.P. Chael, M. Withers und R.C. Aster (1996). A Comparison of the high-frequency (>1 Hz) surface and subsurface noise environment at three sites in the United States. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **86**, Nr. 5, 1516-1528.

Ziehm, J. (2006). Seismisches Monitoring einer Großstadt, Analyse von H/V-Spektralverhältnissen. Diplomarbeit, Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe, Deutschland.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Böenspektrum nach VAN DER HOVEN (1957).	7
Abbildung 2.2:	synthetische Zeitreihe aus Zufallszahlen einer Normalverteilung.	9
Abbildung 2.3:	Summenhäufigkeitsfunktion der synthetischen Zeitreihe aus Abbildung 2.2.	10
Abbildung 2.4:	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der synthetischen Zeitreihe aus Abbildung 2.2.	11
Abbildung 2.5:	Histogramm der synthetischen Zeitreihe aus Abbildung 2.2.	12
Abbildung 2.6:	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der synthetischen Zeitreihe aus Abbildung 2.2 mit 95.45-Perzentile (rot) und 99.73-Perzentile (grün).	14
Abbildung 2.7:	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der sinusförmigen Schwingung $A(t)=30\sin(2\pi t)$ [nm/s].	16
Abbildung 2.8:	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Summe aus zwei sinusförmigen Schwingungen $A(t)=5\sin(2\pi t)+15\sin(20\pi t)$ [nm/s].	16
Abbildung 2.9:	a) Normalverteilte, stationäre Zeitreihe b) Nicht normalverteilte, instationäre Zeitreihe des seismischen Rauschens von 1-25 Hz an Stationen des URS-Netzwerks.	19
Abbildung 2.10:	Zeitreihe der Rauschkategorie 1 mit Histogramm (blau) und geschätzter Normalverteilung (grün gestrichelt).	23
Abbildung 2.11:	Zeitreihe der Rauschkategorie 2 mit Histogramm (blau) und geschätzter Normalverteilung (grün gestrichelt).	24
Abbildung 2.12:	Zeitreihe der Rauschkategorie 3 mit Histogramm (blau) und geschätzter Normalverteilung (grün gestrichelt).	25
Abbildung 2.13:	Zeitreihe der Rauschkategorie 4 mit Histogramm (blau) und geschätzter Normalverteilung (grün gestrichelt).	26
Abbildung 2.14:	Rauschspektrum der Bodenschwinggeschwindigkeit im Vergleich mit dem New Low Noise Model (grün) und dem New High Noise Model (rot).	28
Abbildung 2.15:	a) Zeitreihe mit Zeitfenstern b) Leistungsdichtespektren für Zeitfenster c) Matrixschema der berechneten Leistungsdichten d) Spektrogramm	29
Abbildung 2.16:	fk-Diagramm, am URS-Array einfallende Rayleigh-Wellen der sekundären Meeresmikroseismik des Atlantiks.	31
Abbildung 3.1:	Großraum Bukarest mit URS-Standorten.	34
Abbildung 4.1:	Variabilität des seismischen Rauschens im Frequenzbereich von 8 mHz bis 40 Hz an Station URS09 im Stadtzentrum von Bukarest– 28 Tage Spektrogramm der Vertikal-Komponente, Sterne markieren theoretisch berechnete Ankunftszeiten von Erdbebenwellen (siehe Tabelle 3.4, S. 36).	41
Abbildung 4.2:	Spektrogramm des seismischen Rauschens im Frequenzbereich 8 mHz bis 2 Hz an Station URS21, Nord-Süd Komponente.	43
Abbildung 4.3:	95.45-Perzentilen (weiß) und 99.73-Perzentilen (grau) mit Peakfactor der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 8-40 mHz von 11-15 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Ost-West-Komponente von Station URS21. Symbole: Kreis (Rauschkategorie 1), Quadrat (RK 2), Raute (RK 3), Dreieck (RK 4).	44
Abbildung 4.4:	95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 8-40 mHz von 21-01 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Ost-West-Komponente von Station URS21 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).	45
Abbildung 4.5:	95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 8-40 mHz von 11-15 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS21 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).	45
Abbildung 4.6:	Median der 95.45-Perzentile des seismischen Rauschens von 8-40 mHz zwischen 06-09 Uhr UTC, Ost-Komponente.	47
Abbildung 4.7:	Median der 95.45-Perzentile des seismischen Rauschens von 8-40 mHz zwischen 21-01 Uhr UTC, Ost-Komponente.	47
Abbildung 4.8:	12-Tage-Spektrogramm der Vertikal-Komponente von 8 mHz bis 2 Hz an Station URS21, süd-westlich des Stadtzentrums.	48
(links) Abbildung 4.9:	95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz von 11-15 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS06.	49

(rechts) Abbildung 4.10:	95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz von 11-15 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09. (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).	49
Abbildung 4.11:	95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz von 21-01 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).	50
Abbildung 4.12:	Zeitlicher Verlauf von Rückazimut und Langsamkeit am 14.12.2003 ab 21 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz.	51
Abbildung 4.13:	Zeitlicher Verlauf von Rückazimut und Langsamkeit am 02.12.2003 ab 21 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz.	51
Abbildung 4.14:	Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz, Vertikal-Komponente.	53
Abbildung 4.15:	Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz, Ost-West-Komponente.	53
Abbildung 4.16:	95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz von 11-15 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS06 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).	54
Abbildung 4.17:	95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz von 11-15 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).	55
Abbildung 4.18:	Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz, Vertikal-Komponente.	55
Abbildung 4.19:	95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz von 21-01 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).	57
Abbildung 4.20:	Zeitlicher Verlauf von Rückazimut und Langsamkeit am 14.12.2003 ab 11 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz.	57
Abbildung 4.21:	Zeitlicher Verlauf von Rückazimut und Langsamkeit am 23.06.2004 ab 11 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.09-0.18 Hz.	57
Abbildung 4.22:	Spektrogramm eines Ereignisses der Meeresmikroseismik im Frequenzbereich von 8 mHz bis 2 Hz der Ost-West-Komponente an Station URS21.	58
Abbildung 4.23:	Windgeschwindigkeiten ab dem 11.02. in Bukarest und den Küstenstädten Konstanta und Mangalia in m/s.	59
Abbildung 4.24:	Zeitlicher Verlauf von Rückazimut und Langsamkeit am 12.02.04 von 00:00-10:30 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.18-0.6 Hz. Man beachte, wie sich die Eigenschaften des Wellenfeldes mit der Bewegung des Sturms ändern.	60
Abbildung 4.25:	Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.18-0.25 Hz, Vertikal-Komponente.	61
Abbildung 4.26:	95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.18-0.25 Hz von 06-09 Uhr und 21-01 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 (Symbole siehe Abbildung 4.3 S. 44).	61
Abbildung 4.27:	95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.25-0.6 Hz von 06-09 Uhr und 21-01 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).	62
Abbildung 4.28:	Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.25-0.6 Hz, Vertikal-Komponente.	63
Abbildung 4.29:	Spektrogramm der Vertikal-Komponente von Station URS21 von 8 mHz bis 2 Hz und Windgeschwindigkeit in m/s.	64
Abbildung 4.30:	95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.6-1 Hz von 06-09 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS06 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).	65
Abbildung 4.31:	95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 0.6-1 Hz von 06-09 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-	

	Komponente von Station URS09 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).	65
Abbildung 4.32:	Median der 95.45-Perzentilen von 06-09 Uhr UTC im Frequenzbereich 0.6-1 Hz, Vertikal-Komponente.	66
Abbildung 4.33:	Unterschiedlicher Charakter des seismischen Rauschen im Frequenzbereich 0.6-1 Hz bei Tag (06-09 Uhr) und Nacht (21-01 Uhr), Median der 95.45-Perzentilen.	67
Abbildung 4.34:	Median der 95.45-Perzentilen von 06-09 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 1-25 Hz, Vertikal-Komponente.	71
Abbildung 4.35:	95.45-Perzentilen der Bodenschwinggeschwindigkeit im Frequenzbereich 1-25 Hz von 21-01 Uhr UTC an verschiedenen Tagen auf der Vertikal-Komponente von Station URS09 (Symbolerklärung siehe Abbildung 4.3 S. 44).	71
Abbildung 4.36:	28-Tage-Spektrogramm von 2-40 Hz der Vertikal-Komponente an Station URS31 im Stadtzentrum. Übliche Drehstrommotor-Frequenzen sind mit der entsprechenden Polzahl des Motors markiert.	72
Abbildung 4.37:	Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr UTC im Frequenzbereich 10.5-12.5 Hz (links) und 13.7-16.7 Hz (rechts), Vertikal-Komponente.	73
Abbildung 4.38:	Stadtgebiet von Bukarest und eingegrenzte Standorte von starken Drehstrommotoren (Ellipsen) mit Frequenzen unter 3 Hz. Motoren 1-4 siehe Tabelle 4.8. Graue Flächen markieren Industriegebiete und Anlagen der rumänischen Bahn.	74
Abbildung 4.39:	Median der 95.45-Perzentilen von 11-15 Uhr und 21-01 Uhr UTC im Frequenzbereich 25-45 Hz, Vertikal-Komponente.	76
Abbildung 4.40:	Rauschspektren der Vertikal-Komponenten von Station URS06 (links) und URS09 (rechts) um 13 Uhr UTC am 23.06.04 von 8 mHz bis 45 Hz. Tag mit schwacher primärer und sekundärer Meeresmikroseismik. Grün: Low Global Noise Model Rot: New High Global Noise Model.	77
Abbildung 4.41:	Rauschspektren der Vertikal-Komponenten von Station URS06 (links) und URS09 (rechts) um 13 Uhr UTC am 07.05.04 von 8 mHz bis 45 Hz. Starkwindereignis, Windgeschwindigkeit 7 m/s um 13 Uhr UTC. Grün: Low Global Noise Model Rot: New High Global Noise Model.	78
Abbildung 4.42:	Rauschspektren der Vertikal-Komponenten von Station URS06 (links) und URS09 (rechts) um 23 Uhr UTC am 14.12.03 von 8 mHz bis 45 Hz. Im Zeitfenster überdurchschnittlich starker primärer und sekundärer Meeresmikroseismik des Atlantiks. Grün: Low Global Noise Model Rot: New High Global Noise Model.	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Angeregte Frequenzen in Abhängigkeit von der Zug-Geschwindigkeit nach (Degrande und Schillemans, 2001).	5
Tabelle 2.2:	Typische Drehfrequenzen von Drehstrom-Motoren bei einer Betriebsfrequenz von 50 Hz.	6
Tabelle 2.3:	Perzentile und entsprechende Vielfache der Standardabweichung einer Normalverteilung.	13
Tabelle 2.4:	Kriterien für Rauschklasse 3.	25
Tabelle 2.5:	Grenzwerte für Rauschklasse 4.	26
Tabelle 3.1:	URS-Stationen mit Stationsname, Sensortyp, Standort und Messzeitraum.	33
Tabelle 3.2:	Auswahlkriterien für regional- und teleseismische Ereignisse.	35
Tabelle 3.3:	Empirische Konstanten für die Laufzeitberechnung.	35
Tabelle 3.4:	Symbole zur Markierung berechneter Ankunftszeiten von seismischen Wellen.	36
Tabelle 3.5:	Verfügbare Wetterdaten.	36
Tabelle 3.6:	Ausgewertete Tage ohne Erdbebenwellen.	37
Tabelle 3.7:	Ausgewertete Zeiträume pro Tag.	37
Tabelle 3.8:	Frequenzbereiche für die Bestimmung der Rauschamplituden im Zeitbereich.	39
Tabelle 3.9:	Name und Verwendungszweck der erstellten Programme.	39
Tabelle 4.1:	Median der 95.45-Perzentilen in nm/s der ausgewerteten Zeitreihen von 06-09 Uhr UTC im Frequenzbereich von 8-40 mHz und deren Standardabweichung für Stationen mit STS-2 Seismometern.	42
Tabelle 4.2:	Verhältnis der 95.45-Perzentilen (Median) zwischen Tag (06-09 Uhr) und Nacht(21-01 Uhr) im Frequenzbereich 8-40 mHz an URS-Stationen mit STS-2 Seismometer in dB.	46
Tabelle 4.3:	Verhältnis der 95.45-Perzentilen (Median) zwischen Tag (06-09 Uhr) und Nacht(21-01 Uhr) im Frequenzbereich 0.04-0.09 Hz an URS-Stationen mit STS-2 Seismometer in dB.	52
Tabelle 4.4:	Verhältnis der 95.45-Perzentilen (Median) in den Zeiträumen 06-09 Uhr und 21-01 Uhr UTC in dB zwischen 0.09-0.18 Hz, Stationen sortiert von Süd nach Nord.	56
Tabelle 4.5:	Über alle Stationen gemittelte H/V-Verhältnisse als Quotient aus mittlerem Median der 95.45-Perzentilen der Horizontal-Komponenten und dem Median der 95.45-Perzentilen der Vertikal-Komponente für alle untersuchten Frequenzbereiche.	68
Tabelle 4.6:	Rauschklassenstatistik der ausgewerteten Zeitreihen im Frequenzbereich 1-25 Hz.	69
Tabelle 4.7:	Verhältnis der 95.45-Perzentilen (Median) zwischen Tag (06-09 Uhr) und Nacht(21-01 Uhr) im Frequenzbereich 1-25 Hz in dB.	70
Tabelle 4.8:	Tieffrequente Motoren im Stadtgebiet mit Frequenz und Stationen, an denen die eingekoppelten Schwingungen beobachtbar waren. Die Stationen sind absteigend nach Amplitude der jeweiligen Schwingungen sortiert.	74
Tabelle 4.9:	Verhältnis der 95.45-Perzentilen (Median) zwischen Tag (06-09 Uhr) und Nacht (21-01 Uhr) im Frequenzbereich 25-45 Hz in dB für alle Bewegungsrichtungen.	75

Programmbeschreibungen

Aufgrund des teilweise erheblichen Umfangs der Programme wird im Folgenden Funktion und Bedienung der von mir erstellten Programme kurz zusammengefasst und auf die Kopie von Quellcode verzichtet. Um das Nachvollziehen zu erleichtern, wird ggf. die Eingabe der Programme nachempfunden. Dabei deutet >> den MATLAB Prompt an. Werte in eckigen Klammern ([1]) sind Standardwerte, die durch drücken der ENTER-Taste bestätigt werden.

Programm *spektrogramme.m*

Das Programm *spektrogramme.m* für MATLAB berechnet Spektrogramme nach dem in Abbildung 2.15 auf S. 29 dargestellten Prinzip. Die Zeitreihen müssen im Q-File-Format des Programms SeismicHandler vorliegen (Stammler, 1993). Die Berechnung erfolgt für jede im Q-File enthaltene Zeitreihe. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erwartet das Programm bereinigte und bandpassgefilterte Zeitreihen (siehe S. 37). Spektrogramme werden im Jpeg-Format mit 300 dpi abgespeichert. Die maximale Länge der Zeitreihen ist vom verwendeten Rechner abhängig und lag zum Zeitpunkt der Arbeit bei ~48 Stunden bei einer Abtastrate von 100 Hz.

>> Anzahl Q-Files [1]

Das Programm berechnet beliebig viele Q-Files sequentiell. Alle im Folgenden gemachten Angaben gelten für **alle** Q-Files.

>> Name des Q-Files:

Die Abfrage wird wiederholt, bis alle Dateinamen eingegeben wurden. Die Eingabe kann mit oder ohne einer der Endungen .QHD bzw. QBN erfolgen.

>> Einheit der Zeitreihen:

>> 1: Displacement (nm)

>> 2: Velocity (nm/s)

>> 3: Acceleration (nm/s²)

>> 4: andere

Enthält der Dateiname eine der Abkürzungen DISP, VEL oder ACC wird die entsprechende Option als Standardeinstellung bereits ausgewählt. Bei Option 4 wird die Einheit abgefragt.

>> Verzeichnis-Titel:

Alle erstellten Spektrogramme werden in dem neu angelegten Verzeichnis mit dem angegebenen Namen abgespeichert.

>> Tiefste Frequenz fuer Plot in Hz [0=automatisch]

>> Grenz-Frequenz fuer Plot in Hz [3 Hz]

>> Hoechste Frequenz fuer Plot in Hz [45 Hz]

Die Darstellung erfolgt mit linearer Frequenzachse (siehe S. 29). Um breitbandige Daten auswerten zu können, wird der Frequenzbereich anhand der Grenz-Frequenz

geteilt und insgesamt werden drei Spektrogramme ausgegeben (tiefste Frequenz bis Grenz-Frequenz; Grenz-Frequenz bis höchste Frequenz; tiefste bis höchste Frequenz). Die hier gemachten Angaben gelten für alle Zeitreihen in allen Q-Files. Falls Q-Files Zeitreihen von unterschiedlichen Seismometern enthalten, sind eventuelle Unterschiede bei der Eigenperiode zu beachten! Bei Eingabe einer Null(0) als tiefste Frequenz, wählt das Programm für jede Zeitreihe automatisch den Kehrwert der Eigenperiode des Seismometers als tiefste Frequenz. Dafür wurde eine Datenbank integriert, die die Stationsnamen des URS-Netzwerks mit den jeweiligen Eigenperioden enthält. Die Datenbank kann für zukünftige KABBA-Projekte erweitert werden.

>> Auswahl Fenster-Funktion
>> 1) Boxcar
>> 2) 20%-Cosinusfenster
>> 3) Adaptive Multiple Taper

Auswahl der Fensterfunktion, mit der die Zeitabschnitte für die Leistungsdichtespektren ausgeschnitten werden sollen. Standardeinstellung ist die Berechnung der Leistungsdichtespektren mit der *Adaptive Multiple Taper*-Methode nach Sudhaus (2004).

>> Abschnittslänge in Sekunden [120]:

Abfrage der Länge des Zeitabschnitts, der für ein Leistungsdichtespektrum verwendet wird. Diese bestimmt als Kehrwert sowohl die tiefste im Spektrogramm darstellbare Frequenz als auch die Frequenzauflösung.

>> Zeitabstand in Sekunden [30]:

Abfrage des Abstands der Zeitabschnitte. Bei Werten kleiner der Abschnittslänge überlappen sich die ausgeschnittenen Zeitabschnitte. Der Zeitabstand beeinflusst die Zeitauflösung der Spektrogramme.

>> Normierung AUCH auf gemeinsames Maximum? Ja(1)/Nein(0) [0]

Die berechneten Spektrogramme werden standardmäßig mit einer Farbskala normiert auf die maximale Leistungsdichte des Spektrogramms in dB dargestellt und abgespeichert. Wird hier „Ja“ gewählt, wird jedes Spektrogramm ein zweites Mal mit einer Normierung auf das Leistungsdichtemaximum aller Spektrogramme abgespeichert.

Programm *wochenspektrogramm.m*

Das Programm *wochenspektrogramm.m* für MATLAB berechnet Langzeit-Spektrogramme von wenigen Tagen bis zu mehreren Monaten. Die Langzeit-Spektrogramme werden (bei Standardeinstellungen) mit einem mittleren Leistungsdichtespektrum alle 32 Minuten als Durchschnitt aus 16 Leistungsdichtespektren aufeinander folgender Zeitabschnitte mit einer Länge von je 120 Sekunden berechnet. Für die Berechnung der 16 Leistungsdichtespektren wird die *Adaptive Multiple Taper*-Methode nach Sudhaus (2004) verwendet. Die Zeitreihen müssen einzeln im Q-File-Format des Programms SeismicHandler vorliegen (Stammler, 1993). Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erwartet das Programm bereinigte und bandpassgefilterte Zeitreihen (siehe S. 37). Aufgrund der Datenmengen müssen Spektrogramme für mehr als 7 Tage (bei 100 Hz Abtastrate) auf mehrere Q-Files aufgeteilt werden. Die Reihenfolge der Q-Files (Name beachten) muss der Reihenfolge der enthaltenen Zeitabschnitte entsprechen. Die Zeitabschnitte in den Q-Files müssen sich gegenseitig um eine Stunde (bei 100 Hz Abtastrate) überlappen! Um mehrere Langzeit-Spektrogramme über Nacht oder am Wochenende berechnen zu können, verfügt das Programm über eine „Nachtfunktion“, dazu müssen sich alle Q-Files für ein Spektrogramm in einem eigenen Verzeichnis befinden. Wird das Programm im darüber liegenden Verzeichnis gestartet, werden die Verzeichnisse sequentiell abgearbeitet und aus den jeweils enthaltenen Q-Files ein Langzeit-Spektrogramm erstellt.

>> Programm-Modi:

- >> Modus 0: Beliebige Anzahl Q-Files nacheinander angeben
- >> Modus 1: Alle Q-Files im aktuellen Verzeichnis verwenden
- >> Modus 2: Nachtmodus (ein Spektrogramm pro Unterverzeichnis)
- >> Programm-Modus [0]:

>> Verzeichnis-Titel:

siehe Programm *spektrogramme.m*, S. 93.

>> Einheit der Zeitreihen [nm/s]:

Einheit für Beschriftung.

>> Laenge der Zeitabschnitte in Sekunden [120]:

s.o. Die Länge beeinflusst die Frequenzauflösung des Spektrogramms.

>> (gerade) Anzahl der Abschnitte fuer Mittelwert [16]:

Anzahl der Zeitabschnitte, aus denen die mittleren Leistungsdichtespektren für die Spektrogramme berechnet werden. Beeinflusst die Zeitauflösung des Spektrogramms.

>> Tiefste Frequenz fuer Plot in Hz [0.008]:

>> Grenz-Frequenz fuer Plot in Hz [3 Hz]:

>> Hoechste Frequenz fuer Plot in Hz [45 Hz]:

siehe Programm *spektrogramme.m*, S. 93. Die automatische Auswahl der tiefsten Frequenz steht noch nicht zur Verfügung.

>> Ankunftszeiten von Erdbebenwellen markieren? ja(1)/nein(0)

Das Programm greift auf die Funktion *bebenkatalog.m* (s.u.) zurück. Enthält der Katalog potentiell in Bukarest messbarer Ereignisse (siehe S. 35) im Zeitraum des Spektrogramms Ankunftszeiten für teleseismische oder lokale Erdbeben, werden diese mit grünen bzw. roten Sternen markiert.

Programme *wetterdaten.m* und *bebenkatalog.m*

Die Funktionen *wetterdaten.m* und *bebenkatalog.m* können von allen MATLAB Programmen gestartet werden. Nach Übergabe der Start- und Endzeit werden alle im Zeitbereich verfügbaren meteorologischen Parameter (siehe S. 36) dargestellt bzw. die im Katalog (siehe S. 35) enthaltenen Erdbeben aufgelistet. Für den Benutzer stehen die Programme *wetterauskunft.m* und *bebensuche.m* zur Verfügung. Das Programm *bebensuche.m* bietet außerdem die Möglichkeit, nach Zeiträumen ohne potentielle Ankunft von Erdbebenwellen zu suchen. Nach Angabe der Mindestdauer und den Sperrzeiten vor und nach den theoretisch berechneten Ankunftszeiten von Erdbeben werden die entsprechenden Zeiträume ausgegeben. Mit den Standardeinstellungen umfassen die Sperrzeiten bei lokalen Erdbeben 60 Sekunden vor und 10 Minuten nach der theoretisch berechneten Ankunftszeit. Bei teleseismischen Erdbeben umfassen sie 60 Sekunden vor und 180 Minuten nach der theoretisch berechneten Ankunftszeit. Dieses Verfahren mit Funktionen erlaubt die Einbindung beliebiger weiterer Parameter in die Auswertung mit MATLAB.

Programm *rauschspektren.m*

Das Programm *rauschspektren.m* für MATLAB berechnet Rauschspektren der eingelesenen Zeitreihen (siehe S. 28). Die Zeitreihen müssen im Q-File-Format des Programms SeismicHandler vorliegen (Stammler, 1993). Die Bestimmung erfolgt für jede im Q-File enthaltene Zeitreihe. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erwartet das Programm bereinigte und bandpassgefilterte Zeitreihen (siehe S. 37). Alle Zeitreihen müssen mit einem Bandpass von der Eigenperiode des Seismometers bis zur Nyquist-Frequenz gefiltert worden sein. Es können beliebig viele Q-Files sequentiell abgearbeitet werden. Die Stationen der eingelesenen Zeitreihen müssen in der bereits für das Programm *spektrogramme.m* beschriebenen Datenbank enthalten sein. Die Länge der verwendeten Zeitabschnitte für ein Leistungsspektrum des Rauschspektrums beträgt das Sechsfache der Eigenperiode des Seismometers. Die Berechnung der Rauschspektren erfolgt und Verwendung eines Hamming-Fensters mit der MATLAB-Funktion **pwelch()**. Die Darstellung des Rauschspektrums erfolgt von der Eigenperiode des Seismometers bis zur Nyquist-Frequenz. Zum Vergleich kann das New Global Noise Model mit dargestellt werden (siehe S. 8). Die berechneten Rauschspektren werden zur weiteren Verwendung in einer MATLAB Datendatei *.mat* abgespeichert.

Programm *rauschamplituden.m*

Das Programm *rauschamplituden.m* für MATLAB ist die Umsetzung des in dieser Arbeit vorgestellten statistischen Ansatzes zur Bestimmung von Rauschamplituden im Zeitbereich und der Klassifizierung von Zeitreihen (siehe S. 20ff). Die Zeitreihen müssen im Q-File-Format des Programms SeismicHandler vorliegen (Stammler, 1993). Die Bestimmung erfolgt für jede im Q-File enthaltene Zeitreihe. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erwartet das Programm bereinigte und bandpassgefilterte Zeitreihen (siehe S. 37). Alle Zeitreihen eines Q-Files müssen identisch gefiltert worden sein. Es können beliebig viele Q-Files sequentiell abgearbeitet werden. Dem Programm können im Voraus beliebig viele Frequenzbänder mit Frequenzbereich und Kürzel bekannt gemacht werden. Enthält der Dateiname eines Q-Files ein Filter-Kürzel, werden automatisch die entsprechenden Informationen verwendet. Ist kein Kürzel enthalten, werden die benötigten Informationen für dieses Q-File interaktiv abgefragt. In Zukunft wird das Programm mit originalen Zeitreihen arbeiten und selbst filtern können. Das externe Vorbereiten und Abspeichern von Zeitreihen nach Anwendung unterschiedlicher Filter ist dann nicht mehr notwendig. Um Q-Files mit Zeitreihen von unterschiedlichen Seismometern verwenden zu können, wurde eine Datenbank integriert, die Stationsnamen und Informationen über das jeweils verwendete Seismometer enthält. Zeitreihen werden nur verwendet, falls die größere Eckperiode des angewendeten Bandpassfilters kleiner oder gleich der Eigenperiode des Seismometers ist. Dies gilt auch bei Zeitreihen, die bereits gefiltert eingelesen werden. Daher ist keine Aufteilung von Q-Files mit Zeitreihen eines gesamten Arrays nach Seismometer-Typen notwendig.

Nach Angabe der zu verwendenden Q-Files kann gewählt werden, ob für alle Zeitreihen ein Plot mit Zeitreihe, Histogramm und weiteren statistischen Informationen ausgegeben und gespeichert werden soll. Wird „Nein“ gewählt, werden nur Plots für Zeitreihen mit der Rauschklasse 4, 5 oder 0 ausgegeben (siehe S. 26ff).

Pro eingelesenem Q-File erfolgt die Ausgabe von einer MATLAB Datendatei *.mat* und einem ASCII-File *.txt* für die Verwendung mit GMT und Tabellenkalkulationen. Beide Dateien enthalten für jede Zeitreihe des Q-Files folgende Informationen: Name des Q-Files, Breite und Länge der Station, Stationsname, Komponente, 95.45-Perzentile, 99.73-Perzentile, Zeitreihen-Maximum, Zeitreihen-Minimum, Zeitreihen-Mittelwert, Zeitreihen-Standardabweichung, Rauschklasse, Filter, Peakfactor, Wölbung, Schiefe, Null-Hypothese auf Normalverteilung und eine Reihe weiterer im Programm dokumentierter statistischer Parameter.

Das Programm *rauschamplituden.m* verwendet die Funktionen **ksdensity()**, **chi2gof()** und **normpdf()** der *MATLAB Statistics Toolbox* und benötigt eine entsprechende Lizenz.

Programm *cityplot.gmt*

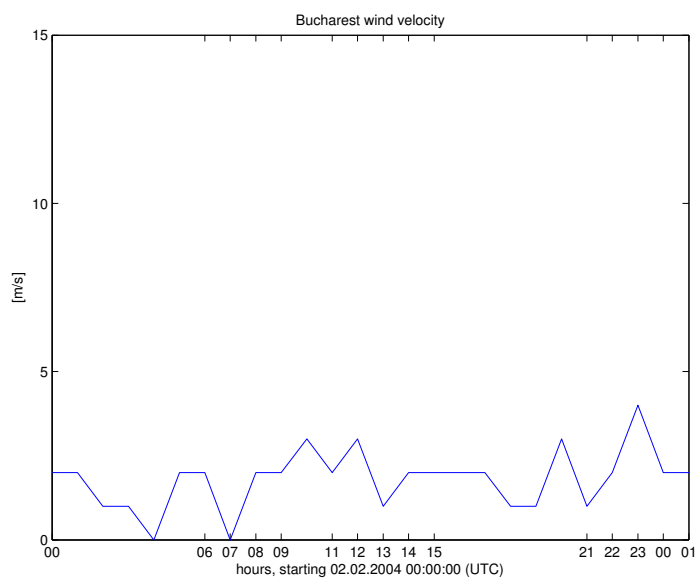
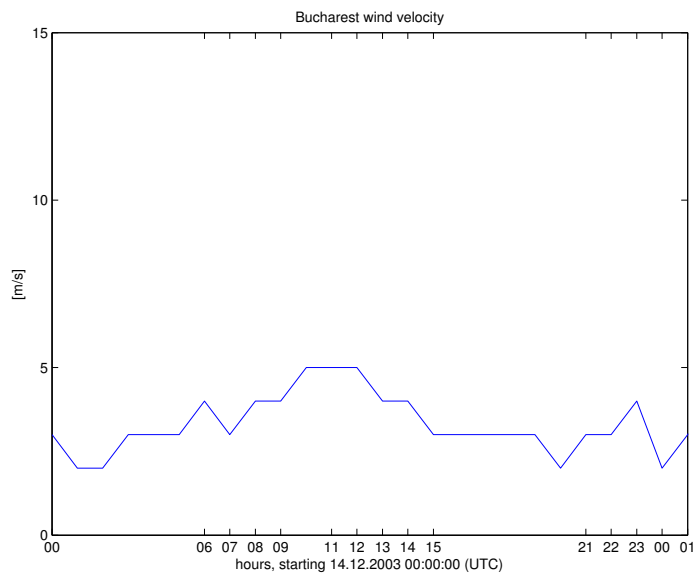
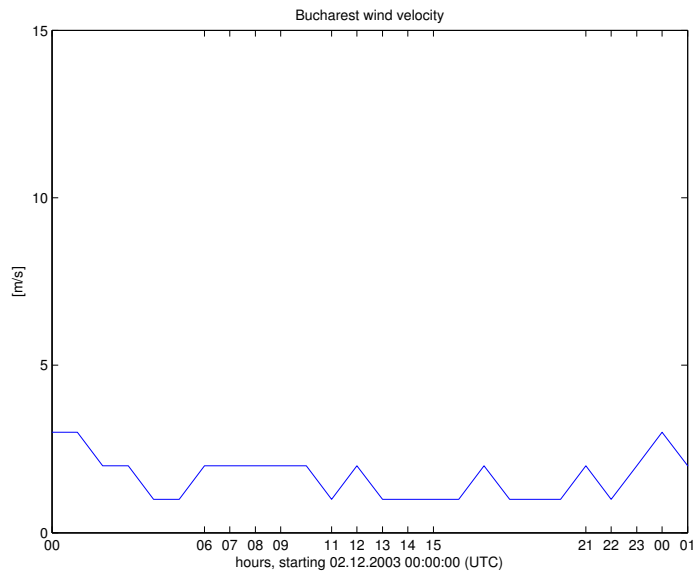
Das Programm *cityplot.gmt* für GMT verwendet die vom Programm *rauschamplituden.m* ausgegebenen ASCII-Dateien und erstellt wahlweise aus den 95.45-Perzentilen, 99.73-Perzentilen oder den Zeitreihen-Spannweiten an den Stationen eine Interpolation über das Stadtgebiet von Bukarest. Die außerhalb liegenden Stationen URS06, URS17 und URS19 werden in eigenen Kästen angezeigt. Die Interpolation wird an den Randbereichen der Stadt auf 90 Prozent des kleinsten Messwertes der Stationen festgelegt, um ein Fortlaufen der Interpolation am Rand zu vermeiden. Die erstellten Karten (Beispiel siehe Abbildung 4.6, S. 47) stellen ein visuelles Werkzeug zur Darstellung der räumlichen Unterschiede des seismischen Rauschens dar. Bei großen Stationsabständen über 2000 m besitzt die dargestellte interpolierte Rauschamplitude zwischen den Stationen keine Aussagekraft über die Realität.

Programm *AUTOFK.SHC*

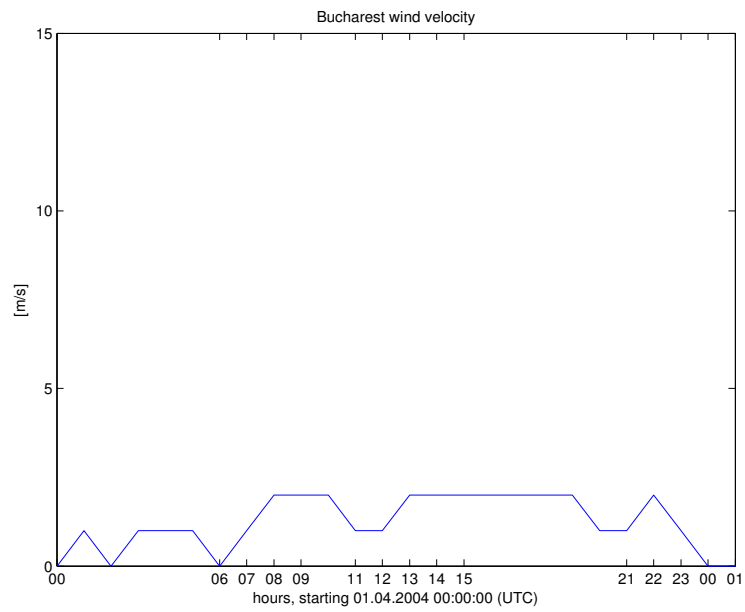
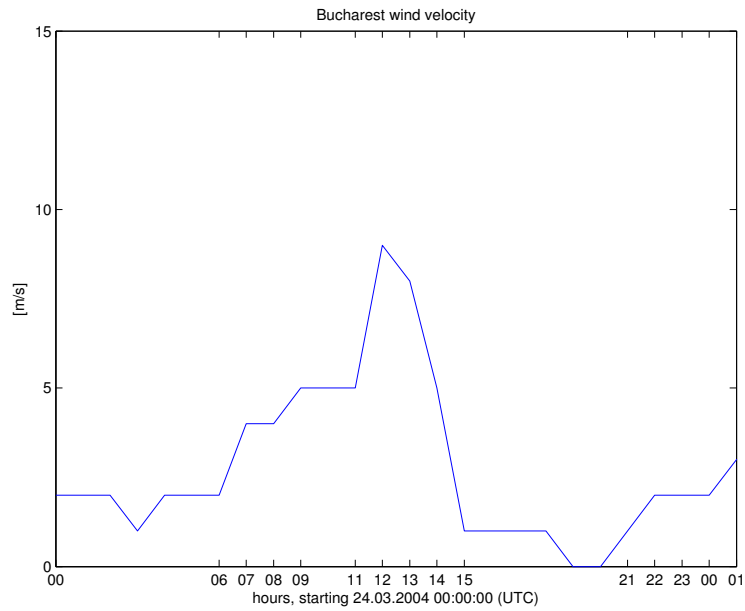
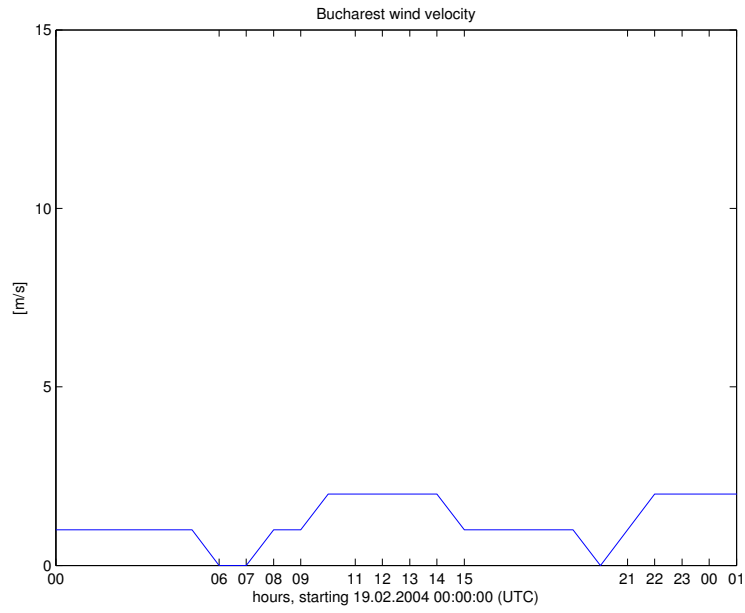
Das Programm *AUTOFK.SHC* für SeismicHandler, das Shell-Skript *fkslidingscript* und die MATLAB Programme *fksingle.m*, *fkslidingplot.m* und *fkslidingsave.m* sind die von mir erstellte Erweiterungen einer Programm-Kombination zur fk-Analyse von Klaus Stammler. Die Original-Kombination beinhaltet das Programm FK.SHC für SeismicHandler, das Fortran-Programm *fk* und das MATLAB Programm *fk.m* und erlaubt die fk-Analyse eines in SeismicHandler ausgewählten Zeitabschnitts. Nach Ausführung des Befehls *fk* in SeismicHandler, wird in einer weiteren Konsole vom Benutzer das Fortran-Programm *fk* gestartet. Dieses führt mit denen vom SeismicHandler Programmteil abgespeicherten Daten eine fk-Analyse durch, die ebenfalls abgespeichert wird. Danach kann mit MATLAB vom Benutzer das Programm *fk.m* ausgeführt werden, welches die mit Hilfe des Fortran-Programms erstellte Datei einliest und das fk-Diagramm darstellt (Beispiel siehe Abbildung 2.16, S. 31).

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte Programmiererweiterung ermöglicht die automatische Durchführung von fk-Analysen direkt aus SeismicHandler. Die beschriebene Programm-Prozedur wird automatisch durchgeführt. Nach Beendigung der fk-Analyse kehrt das Programm zum Prompt von SeismicHandler zurück. Außerdem kann eine automatische fk-Analyse mit gleitenden Fenstern durchgeführt werden. Nach Auswahl von Fensterlänge, Fensterabstand und Startzeitpunkt in SeismicHandler wird die Analyse automatisch durchgeführt. Die einzelnen fk-Diagramme werden im Jpeg-Format abgespeichert. Nach Berechnung aller fk-Diagramme wird die Energiedichte normiert auf das Gesamtmaximum der fk-Analysen in dB jeweils für Rückazimut und Langsamkeit über die Zeit dargestellt (Beispiel siehe Abbildung 4.12 und Abbildung 4.13, S. 51).

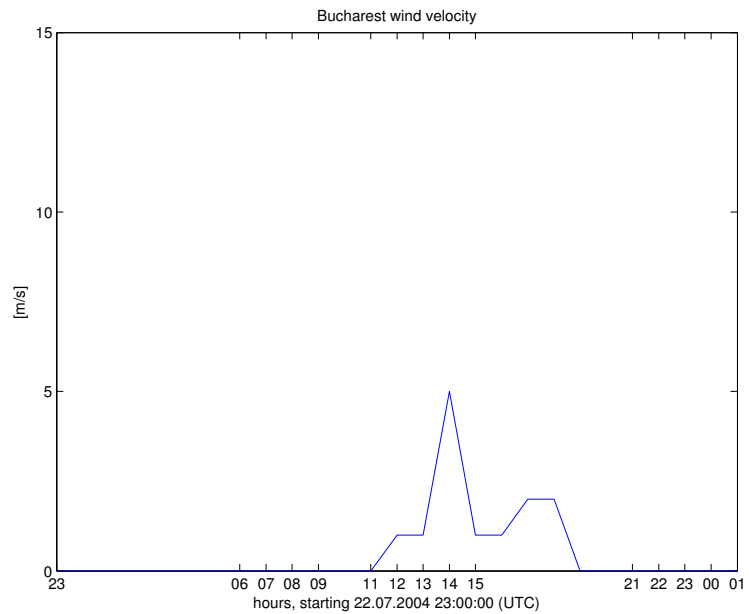
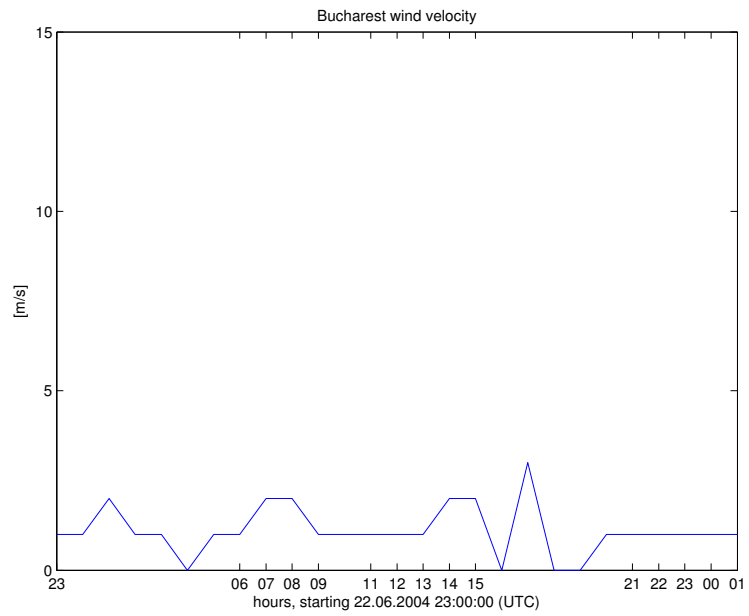
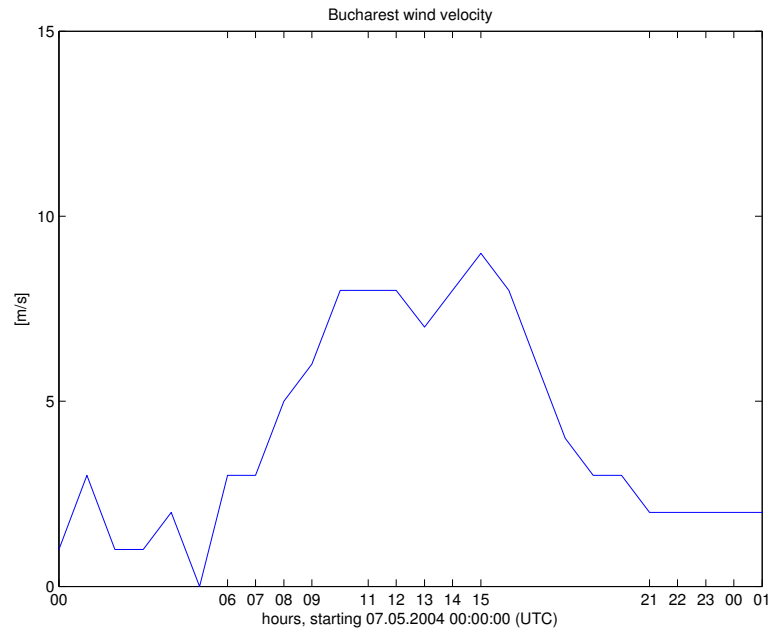
Windgeschwindigkeiten



Windgeschwindigkeiten



Windgeschwindigkeiten



Windgeschwindigkeiten

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Joachim Ritter für die hervorragende Betreuung dieser Diplomarbeit. Er stand jederzeit für meine Fragen und zur Diskussion bereit. Die angenehme und konstruktive Atmosphäre in seiner Arbeitsgruppe machte die Diplomarbeit zur intensivsten und lernreichsten Zeit meines Studiums.

Weiterhin möchte ich Thomas Forbriger, Oliivièr Sèbe und Julia Ziehm für die zahlreichen anregenden Diskussionen im Laufe des letzten Jahres danken. Sie waren mir eine große Hilfe und Motivation. Henriette Sudhaus danke ich für ihre Unterstützung aus dem fernen Zürich bei einigen wichtigen Fragen.

Beate Jaskolla und Britta Wawerzinek danke ich für eine tolle Zeit, die Büro 210 zu mehr als einem guten Arbeitsplatz gemacht haben.

Mein letzter Dank geht an meine Eltern Inge und Werner Groos. Sie haben mich die ganzen Jahre nicht nur finanziell unterstützt, sondern auch immer ermutigt, meinen Weg zu gehen. Ohne ihre tatkräftige Unterstützung wäre diese Arbeit nicht entstanden. Viele Diskussionen, Korrektur gelesene Seiten und die Möglichkeit die Diplomarbeit zu drucken, waren mir eine große Hilfe.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln erstellt habe.

Karlsruhe, 6. Februar 2007

Jörn Groos