

Krustendeformation und Schwereänderungen im seismischen Eigenschwingungsband durch Vorgänge in der Atmosphäre – ein Fallbeispiel

Crustal Deformation and Gravity Variations in the Frequency Band of the Seismic Normal Modes Caused by Processes in the Atmosphere – A Case Study

Walter Zürn, Ludger Timmen

Am Beispiel einer akustischen Schwerewelle wird anhand von neun Registrierungen des Black Forest Observatory (Schiltach, SW-Deutschland) gezeigt, wie Vorgänge in der Atmosphäre im Frequenzband der seismischen Eigenschwingungen Schwereänderungen und Krustendeformationen verursachen. Durch einfache Regressionen mit dem lokalen Barometerdruck lassen sich diese Störsignale teilweise aus den Registrierungen entfernen.

Schlüsselwörter: Schwere, Krustendeformation, Barometerdruck

For the case of an acoustic-gravity wave and nine different records from the Black Forest Observatory (Schiltach, Germany), it is shown how processes in the atmosphere cause gravity changes and crustal deformations in the frequency band of the seismic normal modes. Using simple regressions with the local barometric pressure, the disturbances can be partially removed from the records.

Keywords: Gravity, crustal deformation, atmospheric pressure

1 EINLEITUNG

In der Seismologie sind die durch starke Erdbeben angeregten Eigenschwingungen der Erde eine wichtige Quelle von Informationen über die Beben selbst und auch über die Struktur des Erdinneren. Unter Struktur versteht man dabei die Verteilung der Dichte und der elastischen Moduln des Materials, aus dem der Planet aufgebaut ist. Die Dämpfung der Schwingungen lässt Schlüsse auf die anelastischen Eigenschaften zu. Da die Eigenfrequenzen der Schwingungen sehr niedrig (bis zu 0,3 mHz herunter) und damit die auftretenden Bodenbeschleunigungen sehr klein sind, ist es eine messtechnische Herausforderung, Eigenschwingungsdaten mit hohem Störabstand zu gewinnen.

Das Karlsruher Institut für Technologie und die Universität Stuttgart betreiben über ihre geophysikalischen und geodätischen Insti-

tute das Geowissenschaftliche Gemeinschaftsobservatorium bei Schiltach im Schwarzwald, auch Black Forest Observatory (BFO) genannt. Das BFO hat die oben genannte Herausforderung angenommen und versucht bestmögliche Eigenschwingungsdaten zu registrieren, die dann in globalen und regionalen Datenzentren zur Verfügung gestellt werden. Verschiedene unbeteiligte Autoren stellen fest, dass das BFO diese Aufgabe in hervorragender Weise erfüllt /Beauduin et al. 1996/, /Freybourger et al. 1997/, /Banka & Crossley 1999/, /Berger et al. 2004/. Die dazu verwendeten Messgeräte sind u. a.: ein supraleitendes Gravimeter (GWR SG-056) mit zwei Sensoren, ein Federgravimeter (LaCoste-Romberg ET-19), zwei Drei-Komponenten-Breitbandseismometersätze (Streckeisen STS-1 und STS-2), ein Zwei-Komponenten-Bohrloch-Neigungs-

messer (ASKANIA), eine 120 m lange Differenzdruck-Schlauchwaage sowie drei 10-m-Invardraht-Extensometer (Typ Cambridge) in einer 120°-Anordnung (Azimute N2°E, N60°E, N300°E). Alle Geräte sind unter Tage im Granitstollen aufgestellt, mit Horizontalabständen zur Oberfläche von mehr als 450 m und mit einer Gesteinsüberdeckung von mehr als 150 m (z. B. <https://www.gpi.kit.edu/BFO.php>). Die hohe Qualität der Daten wird bewiesen durch die erste eindeutige Beobachtung der torsionalen Grundmode der Erde (OT2, Periode 44 Minuten) mit den Extensometern des BFO /Widmer et al. 1992/, /Dahlen & Tromp 1998, S. 287/ sowie die Entdeckung der torsionalen Hintergrundschwingungen der Erde mit den Breitband-Horizontalseismometern /Kurrle & Widmer-Schnidrig 2008/. Die sehr langperiodischen Rayleighwellen, die durch die paroxysmalen Ausbrüche des El Chichón in Mexiko 1982 und des Mount Pinatubo 1991 auf den Philippinen angeregt wurden, wurden ebenfalls am BFO entdeckt, mit dem Gravimeter ET-19 /Widmer & Zürn 1992/, Zürn & Widmer 1996/.

Wenn die Stärke des Nutzsignals nicht beeinflusst werden kann, ist der einzige Weg zu einer Verbesserung des Störabstands die Reduktion der Störungen bzw. des Rauschens. Dazu müssen die einzelnen Störquellen zuerst identifiziert werden. Als Beispiel kann hier /Forbriger 2007/ dienen, der Störungen in breitbandigen Vertikalseismogrammen durch magnetische Stürme identifiziert und Methoden zu deren Beseitigung vorgeschlagen hat.

Es ist seit Langem üblich, bei der Analyse von Erdzeitenregistrierungen simultan zu einem Gezeitenmodell das lokale Barometerdrucksignal mit in die Ausgleichung einzubeziehen. Wenn man das nämlich nicht tut, bleiben (speziell bei der Schwere) in den Residuen starke, mit dem lokalen Luftdruck korrelierte Signale übrig (s. z. B. /Wenzel 1997/, /Rabbal & Zschau 1985/). Das Rauschen im Frequenzband der Eigenschwingungen ist ebenfalls von Einflüssen der Atmosphäre dominiert /Müller & Zürn 1983/, /Beauduin et al. 1996/, /Zürn & Widmer 1995/, /Kroner et al. 2005/, /Zürn & Wielandt 2007/, /Zürn et al. 2007/, /Zürn & Meurers 2009/. Atmosphärische Vorgänge, die bei diesen Frequenzen eine starke Rolle spielen, sind zum Beispiel durchziehende Kaltfronten, Konvektionszellen (auch im Zusammenhang mit Gewittern) und akustische Schwerewellen.

Im Folgenden wird am Beispiel einer akustischen Schwerewelle, z. B. /Nappo 2002/, gezeigt, wie verschiedene Beobachtungsgrößen im BFO auf diese Welle reagieren und wie stark diese vom lokalen Barometerdruck beeinflusst werden. Viele weitere Beispiele sind in der oben genannten Literatur zu finden.

2 BEOBACHTUNGEN

AM 1. DEZEMBER 2010

An diesem Tag konnte man im Barometerdruck am BFO zwischen etwa 12.30 und 13.30 UTC einen quasiperiodischen Wellenzug mit einer dominanten Frequenz von 1,7 mHz beobachten, der mit hoher

Wahrscheinlichkeit einer akustischen Schwerewelle zuzuordnen ist. Es gibt leider nur diese lokale Luftdruckregistrierung, sodass weitere Eigenschaften der Welle nicht ermittelt werden konnten. *Abb. 1* zeigt zwei verschiedene Zeitfenster vom 1. Dezember mit diesem Signal. Am BFO sind die oben genannten Sensoren hinter zwei Druckschleusen installiert, die Variationen des Luftdrucks direkt an den Geräten im Eigenschwingungsband sehr stark dämpfen. Die Schleusen verhalten sich dem Luftdruck gegenüber wie Tiefpassfilter mit Zeitkonstanten von mindestens 30 Stunden, sodass der direkte Einfluss des Barometerdrucks im Eigenschwingungsband auf die Geräte vernachlässigt werden kann. In *Abb. 1* unten ist der hinter der ersten Schleuse direkt am SG-056 registrierte Luftdruck ebenfalls dargestellt, allerdings um den Faktor 50 verstärkt, um die Restschwankungen sichtbar zu machen. Die deutliche Welle im Außendruck ist hier nicht zu erkennen. Nicht abschirmbar dagegen sind natürlich die Gravitation der Luftmassen mit variabler Dichte und der durch ihre variable zeitliche und räumliche Verteilung erzeugte Auflasteffekt als Deformation der Erdkruste.

In *Abb. 2* sind die Signale dargestellt, die von Sensoren am BFO aufgezeichnet wurden, zusammen mit der Schwingung (oben) des Atmosphärendrucks. Letztere wurde mit einem Faktor von $3,5 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}/\text{hPa}$ multipliziert, um sie gemeinsam mit vier Schwereänderungen bzw. vertikalen Beschleunigungen (darunter) darzustellen. Man erkennt die große Ähnlichkeit der Schweresignale zum Luftdruck, allerdings mit einer kleinen Phasenverschiebung. Ganz unten sind die beiden horizontalen Beschleunigungen oder Neigungen dargestellt. Für die Darstellung wurden diese Signale mit dem Faktor 0,10 multipliziert. Man erkennt wieder die große Ähnlichkeit zum Luftdrucksignal. Die N-S-Komponente ist völlig in Phase mit dem Druck, während die E-W-Komponente deutliche Phasenver-

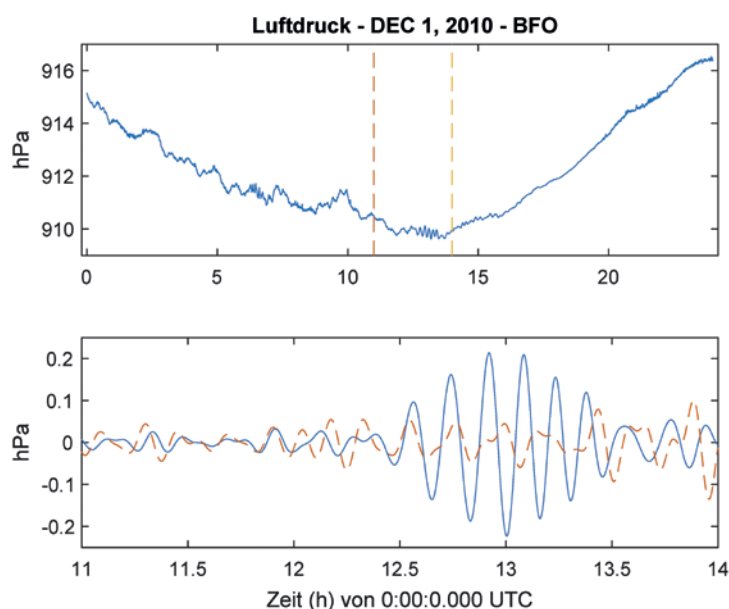


Abb. 1 | Barometerdruck am 1. Dezember 2010 am BFO. Oben: Verlauf über den ganzen Tag mit mehreren klaren wellenartigen Variationen. Die durchgezogene Kurve unten ist der markierte Ausschnitt des zwischen 1,25 und 2,5 mHz bandpassgefilterten Luftdrucks oben. Es handelt sich bei diesem Wellenzug mit großer Wahrscheinlichkeit um eine fast monochromatische akustische Schwerewelle mit einer dominierenden Frequenz von 1,7 mHz. Die gestrichelte Kurve unten ist der Luftdruck hinter der ersten Druckschleuse beim SG-056 multipliziert mit dem Faktor 50.

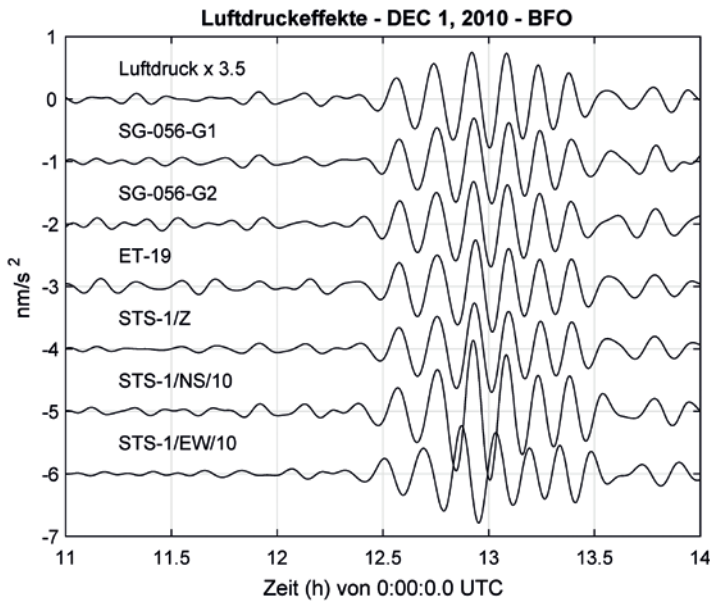


Abb. 2 | Bandpass-gefilterte Störsignale am BFO im Frequenzband von 1,25 MHz bis 2,5 MHz, verursacht durch die in Abb. 1 dargestellte akustische Schwerewelle in der Atmosphäre. Von oben nach unten: Luftdruck, schwere untere Kugel des SG-056, leichte obere Kugel des SG-056, ET-19, STS-1/Z, STS-1/NS und STS-1/EW. Die oberste Kurve wurde mit dem Faktor 3,5 $\text{nm}\cdot\text{s}^{-2}/\text{hPa}$, die beiden untersten Signale mit dem Faktor 0,10 multipliziert, um sie in die Größenordnung der vier Vertikalbeschleunigungs-Signale zu bringen. Während die sechs obersten Signale fast in Phase sind, weicht die E-W-Beschleunigung deutlich ab.

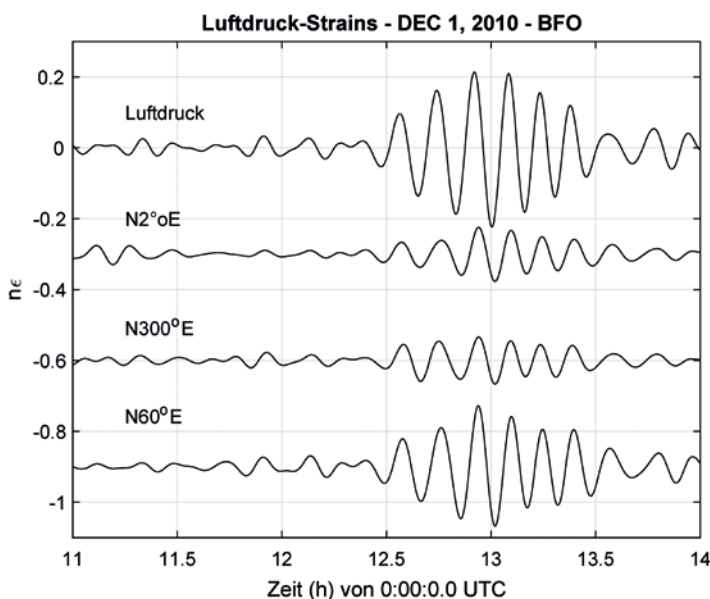


Abb. 3 | Bandpass-gefilterte Strain-Störsignale am BFO im Frequenzband von 1,25 bis 2,5 MHz, verursacht durch die in Abb. 1 dargestellte akustische Schwerewelle in der Atmosphäre. Von oben: Luftdruck (multipliziert mit $1,0 \text{ n}\epsilon/\text{hPa}$), Signale, die von den drei Strainmetern aufgezeichnet wurden. $\text{n}\epsilon$ steht für 10^{-9} in der Deformation.

schiebungen in der Größenordnung von 90° zeigt (Extremwerte sind etwa zeitgleich mit den Nulldurchgängen im Luftdruck). Abb. 3 zeigt oben wieder das Luftdrucksignal (hier multipliziert mit dem Faktor $1,0 \text{ n}\epsilon/\text{hPa}$ wegen der Einheiten) und darunter die von den drei Extensometern registrierten linearen Deformationen. Die Ähn-

lichkeit der Signale ist deutlich zu erkennen, ebenso wie eine kleine Verzögerung der Deformationen gegenüber dem Druck.

3 LUFTDRUCK-ADMITTANZEN UND DISKUSSION

Bei der Analyse von Schwerezeiten wird mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate neben einem Modell der Erdzeiten /Wenzel 1997/ der lokale Barometerdruck mit in das Modell aufgenommen. Man erhält einen Regressionskoeffizienten mit der Einheit $\text{nm}\cdot\text{s}^{-2}/\text{hPa}$. Dieser Regressionskoeffizient ist ein Schätzwert der sogenannten Admittanz, die einen kausalen physikalischen Zusammenhang zwischen messbaren Variablen beschreiben soll. Bei den vorliegenden Bandpass-gefilterten Daten wird entsprechend vorgegangen, indem an die jeweiligen Signale der simultan registrierte Luftdruck, sowie dessen Hilbert-Transformierte, eine lineare Drift und eine Konstante als Modell mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate angefitet wird. Die Hilbert-Transformierte einer Zeitserie hat die Eigenschaft, dass sie bei allen Frequenzen genau in Quadratur zur Zeitreihe verläuft /Fischer 1969/; daher wird sie hier eingesetzt, um die Phasenverschiebung zwischen Luftdruck und Störsignale zu modellieren. Dies hat sich bei früheren Untersuchungen als effizient erwiesen /Zürn et al. 2007/. Die bei dieser linearen Regression gefundenen Koeffizienten sind für die neun Signale (Abb. 2 und 3) in der Tab. 1 zusammen mit der gefundenen Varianzreduktion (in %) aufgelistet, wie sie in der Spaltenüberschrift definiert ist. Mit einer Ausnahme (86 %) sind alle Zahlen größer als 90 %, was zeigt, dass diese Korrekturmethode sehr effizient ist (in diesem speziellen Fall, aber siehe auch /Zürn & Wielandt 2007/, /Zürn et al. 2007/). Die verbleibenden Residuen der neun Signale nach Abzug der Luftdruck-Korrektur sind in Abb. 4 und Abb. 5 mit derselben Skalierung (zum einfacheren Vergleich) wie die Signale selbst in Abb. 2 und Abb. 3 und dem Luftdruck dargestellt.

/Zürn & Wielandt 2007/ beschreiben Gedankenexperimente zum Einfluss von harmonischen Luftdruckänderungen auf Messgeräten, in denen als Sensor eine träge Masse verwendet wird. Die beschriebenen Effekte sind nicht abschirmbar und stören auch die besten seismologischen Instrumente an den ruhigsten Stationen. Für vertikale Akzelerometer sind dies erstens die Gravitationswirkung der Atmosphäre, zweitens der Freilufteffekt und drittens der Trägheitseffekt durch die Vertikalbewegung der Station, die durch die variierende Auflast erzeugt wird. Für horizontale Akzelerometer ist es erstens die Gravitationswirkung, zweitens die Neigung (der überwiegende Anteil) und drittens der Trägheitseffekt durch die Horizontalbewegung des Instrumentenstandorts. Für Extensometer (Strainmeter) sind es ausschließlich die Deformationen. Die Trägheitseffekte sind proportional zum Quadrat der Frequenz und erzeugen somit eine Frequenzabhängigkeit der Gesamtwirkung. Diese führt genau im Eigenschwingungsband zu einem Vorzeichenwechsel der Luftdruckadmittanz zur Schwere /Zürn & Wielandt 2007/, /Zürn & Meurers 2009/. Bei noch höheren Frequenzen der

BFO – Luftdruck-Admittanzen bei 1,7 mHz Dezember 1, 2010 – 11:00-14:00 UTC				
Instrument	Einheit	p_a	$H(p_a)$	$\frac{\sigma_0^2 - \sigma_1^2}{\sigma_0^2} \times 100 \%$
Schwere				
SG-056-G1	nm·s ⁻² /hPa	-2,840	-1,364	96,4
SG-056-G2	nm·s ⁻² /hPa	-2,885	-1,079	94,9
LCR-ET19	nm·s ⁻² /hPa	-2,775	-1,565	95,3
STS-1-Z	nm·s ⁻² /hPa	-2,805	-1,407	98,0
Tilt				
STS-1-NS	nm·s ⁻² /hPa	-42,732	-7,454	93,8
STS-1-EW	nm·s ⁻² /hPa	8,312	30,215	93,7
Deformation				
St-0-N2°E	nε/hPa	0,261	0,173	86,1
St-3-N300°E	nε/hPa	0,256	0,139	90,4
St-4-N60°E	nε/hPa	0,673	0,477	96,5

Tab. 1 | Admittanzen des Luftdrucks p_a und seiner Hilbert-Transformierten $H(p_a)$ zu Schwere (bzw. Vertikalbeschleunigung), Tilt (bzw. Horizontalbeschleunigung) und Strain am BFO, bestimmt mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate und damit erreichte Varianz-Reduktionen. Beim SG-056 ist G1 die von der schwereren, unteren Kugel, G2 die von der leichteren, oberen Kugel gemessene Schwereänderung.

Luftdruckvariationen werden auch seismische Wellen angeregt, die sich mit ihren eigenen Geschwindigkeiten ausbreiten, wie zum Beispiel die langperiodischen Rayleighwellen bei Vulkanausbrüchen (s. o.), und kurzperiodische seismische Wellen bei Tornados /Tatom & Vitton 2001/ und anderen Stürmen. Trägheitssensoren können zwischen den verschiedenen Beiträgen nicht unterscheiden (übrigens auch nicht bei seismischen Signalen), deshalb muss bei der Interpretation zu Modellen gegriffen werden. Diese reichen von einfachen analytischen physikalischen Vorstellungen /Zürn et al. 1999/, /Zürn & Wielandt 2007/, /Zürn et al. 2007/ bis zu detaillierten Modellen der Stationsumgebung mit Finiten Elementen /Kroner et al. 2005/, /Steffen et al. 2005/, /Steffen 2006/, /Gebauer et al. 2010/.

Die gefundenen Admittanzen haben für die vertikalen Beschleunigungen (Schwere) eine sinnvolle physikalische Größenordnung. Die Schwerewirkung einer unendlich ausgedehnten Luftschicht mit nur vertikaler Dichteveriation über einem starren Halbraum würde zu einem Regressionskoeffizienten von $-4,27 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}/\text{hPa}$ führen. Die beobachteten Koeffizienten sind überall etwas kleiner, was auf den gegenläufigen Beitrag der Auflasteffekte und Abweichungen vom obigen Modell zurückgeführt werden kann. Natürlich ist die Luftdruckverteilung in der Atmosphäre viel komplizierter, besonders bei den relativ hohen Frequenzen hier. Für sehr lange Perioden wurden Korrekturmethode auf der Basis von realistischen Wettermodellen (u. a. ATMACS, /Klügel & Wziontek 2009/) entwickelt, die aber bei 1,7 mHz nicht brauchbar sind, weil die räumliche und zeitliche Auflösung dafür zu grob ist.

Die Unterschiede in den Beträgen der Admittanzen zur Schwere in Tab. 1 sind maximal etwa 2 %, was nicht signifikant ist. Die negativen Vorzeichen bedeuten hier, dass die Schwere abnimmt, wenn der Luftdruck größer wird, weil der größte Beitrag die Gravitationswirkung der Atmosphäre ist. Keine Erklärung gibt es im Moment dafür, dass die Varianzreduktion nur deshalb so hoch ist, weil die Hilbert-Transformierte des Luftdrucks mit in die Ausgleichung genommen wurde. Die dazugehörigen Koeffizienten sind signifikant und unterscheiden sich um bis zu etwa 50 %. Die Hilbert-Transformierte fängt die in Abb. 2 und Abb. 3 zu sehenden Phasenverschiebungen auf. /Zürn et al. 2007/ entwickelten ein einfaches Modell für eine sich horizontal ausbreitende sinusförmige Welle des Luftdrucks über einem elastischen Halbraum und zeigen, dass in diesem Fall die Neigungen proportional zur Hilbert-Transformierten des Luftdrucks sind. Dies ist aber für die Vertikalkomponenten eigentlich nicht relevant.

Die Admittanz zu der Beschleunigung (Neigungen, Tilt) in N-S-Richtung ist mehr als eine Größenordnung größer als in vertikaler Richtung. Das negative Vorzeichen bedeutet, dass sich der Sockel, auf dem das Seismometer steht, nach S neigt, wenn der Luftdruck höher wird. Da diese Neigung ziemlich gut dem Luftdruck folgt, muss es sich um eine durch den Luftdruck lokal erzeugte Deformation handeln. Dieser starke Effekt entsteht wahrscheinlich dadurch, dass der Sockel mit dem STS-1/N-S-Seismometer direkt unten an die S-Wand der Kammer anzementiert ist. Bei Luftdruckerhöhung beult sich die Kammerwand nach S aus und nimmt den Sockel mit, was zu einer Neigung der Sockeloberfläche nach S führt. Dieses stark anomale Resultat wurde auch anhand anderer Daten vom gleichen Gerät bereits von /Zürn et al. 2007, Tab. 2/ beobachtet, allerdings wurde hier der Koeffizient am oberen Ende des Spektrums bestimmt. Ein stark verfeinertes FE-Modell lieferte für die Position des STS-1/N-S-Seismometers einen Wert von $-13.2 \text{ nm} \cdot \text{s}^{-2}/\text{hPa}$, also etwa 1/3 des hier beobachteten Werts. Dieser schon hohe Wert wurde nur erreicht, wenn die Druckschleuse im Modell eingebaut wurde, d. h. wenn der äußere Luftdruck die Kammer nicht von innen stützt. Wie in /Zürn et al. 2007/ diskutiert, muss dies auf kleinräumige Inhomogenitäten zurückgeführt werden. Wegen Untersuchungen der Gezeiten, die dieses Gerät aufzeichnet, ist klar, dass es sich um einen starken Hohlraumeffekt handeln muss /Zürn & Emter 1995/. Die Reaktion des Standorts des Seismometers entspricht dem von /Zürn et al. 2007/ beschriebenen einfachen „lokalen Deformationsmodell“, mit dem aber der signifikante Beitrag der Hilbert-Transformierten nicht erklärt werden kann.

Die Situation ist völlig anders für die E-W-Beschleunigung. Die Admittanz des direkten Luftdrucks ist nur etwa dreimal so groß wie für die Vertikalkomponente, wobei das positive Vorzeichen eine Neigung in E-Richtung bedeutet. Dagegen ist die Admittanz der Hilbert-Transformierten hier sehr hoch, bedingt durch die in Abb. 2 sichtbare hohe Phasenverschiebung des Signals gegenüber dem lokalen Luftdruck. Dies entspricht in etwa der erwarteten Reaktion auf eine sich in E-W-Richtung ausbreitende Druckwelle, wie in /Zürn et al. 2007/ ausführlich beschrieben. Auch im Fall dieser Komponente ist die Admittanz der Hilbert-Transformierten der größte je am BFO beobachtete Wert.

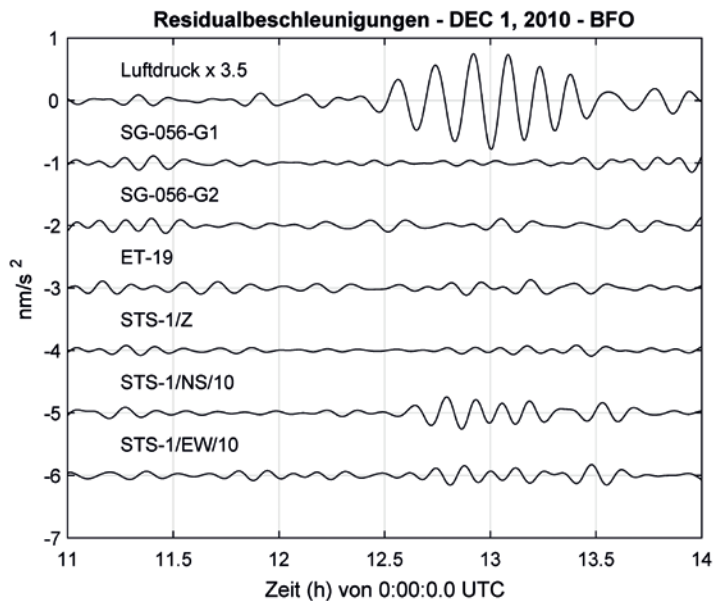


Abb. 4 | Wie Abb. 2, hier aber mit den Residual-Beschleunigungen nach der Barometer-Korrektur. Der Luftdruck und die horizontalen Beschleunigungen sind mit denselben Faktoren wie in Abb. 2 multipliziert. Die Effizienz der Korrekturen kann durch Vergleich mit Abb. 2 beurteilt werden.

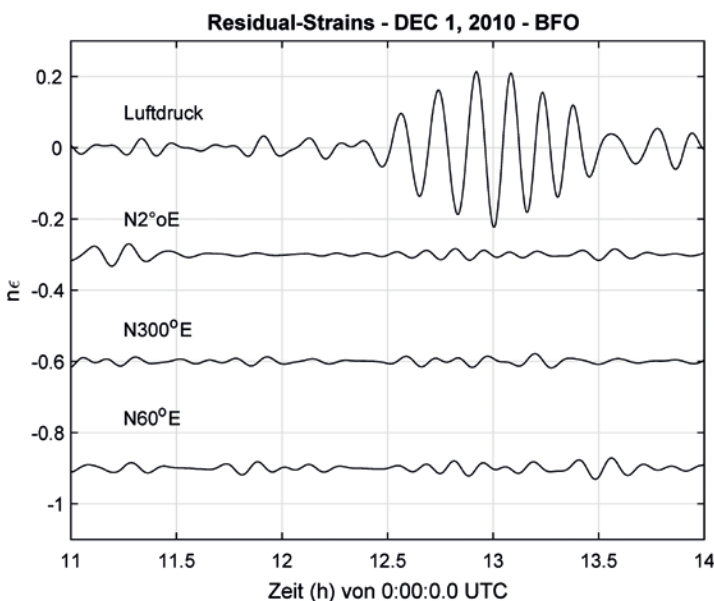


Abb. 5 | Wie Abb. 3, hier aber mit den Residual-Strains nach der Barometer-Korrektur. Der Luftdruck ist mit demselben Faktor wie in Abb. 3 multipliziert. Die Effizienz der Korrekturen kann durch Vergleich mit Abb. 3 beurteilt werden.

Auch die Admittanzen des Luftdrucks zum Strain sind physikalisch in der richtigen Größenordnung, haben das richtige Vorzeichen (Kompression des Gesteins bei erhöhtem Luftdruck) und sind durch sinnvolle physikalische Modelle erklärbar. Die empfindlichste Komponente (Azimut N60°E) ist die lineare Deformation entlang einer Richtung, die fast senkrecht zur Längsrichtung des Höhenrückens verläuft, in dem sich das BFO befindet. Es könnte sich also um einen topographischen Effekt handeln. Es liegen geringe Phasenverschiebungen der Effekte gegenüber dem Luftdruck vor

(Abb. 3), die durch die Hilbert-Transformierte aufgefangen werden. Die Admittanzen fallen nicht aus dem Rahmen der üblichen Werte, wie sie zum Beispiel bei Korrekturen von Eigenschwingungsregistrierungen verwendet wurden /Zürn et al. 2015, Tab. 1/. Diese Zahlen lassen sich gut mit den Ergebnissen der FE-Modelle /Steffen et al. 2005/, /Steffen 2006/ vergleichen, nur die Phasenverschiebungen sind nicht wirklich verstanden.

Aus den linearen Extensionen in drei jeweils um 120° verschieden Azimuten lässt sich leicht der Flächenstrain berechnen /Widmer et al. 1992/, /Zürn et al. 2015/. Die Admittanzen des Luftdrucks zum Flächenstrain ergeben sich für das direkte Luftdrucksignal zu 0,757 nε/hPa, für die Hilbert-Transformierte zu 0,498 nε/hPa bei einer Varianzreduktion von 95,6 %. Für einen homogenen elastischen Halbraum gibt /Farrell 1972/ als Admittanz des direkten Drucks $-0.5/(\lambda+\mu)$ an, wobei λ und μ die elastischen Lamé-Parameter des Halbraums sind. Setzt man in einer (häufig gemachten) Näherung $\lambda = \mu$, so ergibt sich aus dem Wert 0,757 nε/hPa der Parameter μ zu 33 GPa, ein physikalisch durchaus plausibler Wert.

Trotz der teilweisen Übereinstimmung der Ergebnisse mit Modellen muss man sich immer wieder klar machen, dass unsere Modelle der Dichteverteilung in der Atmosphäre zu einfach sind. Wir haben mit einer lokalen Luftdruckmessung oder am anderen Ende mit einem globalen Modell zu wenig Information bei den langperiodischen seismischen Frequenzen hier. Abgesehen davon befindet man sich bei 1,7 mHz an der Grenze zu dem Bereich, in dem die Erde nicht mehr quasistatisch behandelt werden kann. Die weltweite Beobachtung von seismischen Oberflächenwellen /Zürn & Widmer 1996/ mit Frequenzen von 3,7 mHz und 4,5 mHz zeigt, dass nicht nur der lokale oder regionale Luftdruck zu seismischen Signalen führt, sondern dass sogar globale Reichweiten möglich sind. Die zeitliche Variation der Admittanzen für seismische Signale ist in der hohen Dynamik der Atmosphäre bei seismischen Frequenzen im Eigenschwingungsband begründet und muss erwartet werden. Zurzeit wird in der Umgebung des BFO ein Mikrobarometer-Array aufgebaut, um mehr Information über das Druckfeld zu bekommen. Es besteht Hoffnung, dass damit speziell die Deformationen durch die Variationen in der Atmosphäre besser verstanden werden können.

DANK

Wir bedanken uns bei Ruedi Widmer-Schmidrig, Thomas Forbriger, Erhard Wielandt, Holger Steffen, André Gebauer, Udo Neumann, Helmut Wilhelm und Jacques Hinderer für viele Diskussionen. Wir danken dem anonymen Gutachter für seine gründliche Arbeit, die zur Entdeckung eines kleinen Fehlers führte.

LITERATUR

- Banka, D.; Crossley, D. (1999): Noise Levels of Superconducting Gravimeters at Seismic Frequencies. In: *Geophysical Journal International* 139(1999), 87 – 97.
- Beauduin, R.; Lognonné, P.; Montagner, J.-P.; Cacho, S.; Karczewski, J.-F.; Morand, M. (1996): The effects of the atmospheric pressure changes on seismic signals or how to improve the quality of a station. In: *Bulletin of the Seismological Society of America* 86(1996), 1760 – 1769.
- Berger, J.; Davis, P.; Ekström, G. (2004): Ambient Earth noise: a survey of the global seismographic network. In: *Journal of Geophysical Research* 109(2004), B11307, doi: 10.1029/2004JB003408.
- Dahlen, F. A.; Tromp, J. (1998): *Theoretical Global Seismology*. Princeton University Press, 1044 S.
- Farrell, W. E. (1972): Deformation of the Earth by Surface Loads. In: *Reviews of Geophysics and Space Physics* 10(1972), 761 – 797.
- Fischer, F. A. (1969): *Einführung in die statistische Übertragungstheorie*. B. I. Hochschultaschenbücher, 130/130a, Mannheim/Zürich, 187 S.
- Forbriger, T. (2007): Reducing magnetic field induced noise in broadband seismic recordings. In: *Geophysical Journal International* 169(2007), 240 – 258.
- Freybourger, M.; Hinderer, J.; Trampert, J. (1997): Comparative study of superconducting gravimeters and broadband seismometers STS-1/2 in seismic and subseismic frequency bands. In: *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 101(1997), 203 – 217.
- Gebauer, A.; Steffen, H.; Kroner, C.; Jahr, T. (2010): Finite element modelling of atmospheric loading effects on strain, tilt and displacement at multi-sensor stations. In: *Geophysical Journal International* 181(2010), 1593 – 1612, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04549.x.
- Klügel, T.; Wziontek, H. (2009): Correcting gravimeters and tiltmeters for atmospheric mass attraction using operational weather models. In: *Journal of Geodynamics* 48(2009), 204 – 210, doi: 10.1016/j.jog.2009.09.010.
- Kroner, C.; Jahr, T.; Kuhlmann, S.; Fischer, K. D. (2005): Pressure induced noise on horizontal seismometer and strainmeter records evaluated by finite element modelling. In: *Geophysical Journal International* 161(2005), 167 – 178.
- Kurrle, D.; Widmer-Schnidrig, R. (2008): The horizontal hum of the Earth: a global background of spheroidal and toroidal modes. In: *Geophysical Research Letters* 35(2008), L06304, doi: 10.1029/2007GL033125.
- Müller, T.; Zürn, W. (1983): Observation of gravity changes during the passage of cold fronts. In: *J. Geophysics* 53(1983), 155 – 162.
- Nappo, C. J. (2002): *An Introduction to Atmospheric Gravity Waves*. International Geophysics Series 85. Academic Press, Amsterdam, 276 S.
- Rabbal, W.; Zschau, J. (1985): Deformations and Gravity Changes at the Earth's Surface Due to Atmospheric Loading. In: *J. Geophysics* 56(1985), 81 – 99.
- Steffen, H. (2006): The importance of instrument location on barometric pressure-induced noise. In: *Bulletin d'Information des Marées Terrestres* 141(2006), 11293 – 11302.
- Steffen, H.; Kuhlmann, S.; Jahr, T.; Kroner, C. (2005): Numerical modelling of the barometric-pressure induced noise in horizontal components for the observatories Moxa and Schiltach. In: *Journal of Geodynamics* 41(2005), 242 – 252, doi: 10.1016/j.jog.2005.08.011.
- Tatom, F. B.; Vitton, S. J. (2001): The Transfer of Energy from a Tornado into the Ground. In: *Seismological Research Letters* 72(2001), 12 – 21.
- Wenzel, H.-G. (1997): *Analysis of Earth Tide Observations*. In: Wilhelm, H.; Zürn, W.; Wenzel, H.-G. (Hrsg.): *Tidal Phenomena*. Springer, Heidelberg, 60 – 75.
- Widmer, R.; Zürn, W. (1992): Bichromatic excitation of long-period Rayleigh and air waves by the Mount Pinatubo and El Chichón volcanic eruptions. In: *Geophysical Research Letters* 19(1992), 765 – 768.
- Widmer, R.; Zürn, W.; Masters, G. (1992): Observation of low order toroidal modes from the 1989 Macquarie Rise event. In: *Geophysical Journal International* 111(1992), 226 – 236.
- Zürn, W.; Emter, D. (1995): Beobachtung von Hohlraumeffekten mit Seismometern im Observatorium Schiltach. In: *Festschrift Draheim – Kuntz – Mälzer*. Geodätisches Institut, Karlsruhe, 289 – 304.
- Zürn, W.; Exß, J.; Steffen, H.; Kroner, C.; Jahr, T.; Westerhaus, M. (2007): On reduction of long-period horizontal seismic noise using local barometric pressure. In: *Geophysical Journal International* 171(2007), 780 – 796.
- Zürn, W.; Ferreira, A. M. G.; Widmer-Schnidrig, R.; Lentas, K.; Clévéde, E. (2015): High quality lowest-frequency normal mode strain observations at the Black Forest Observatory (SW-Germany) and comparison with horizontal broadband-seismometer data and synthetics. In: *Geophysical Journal International* 203(2015), 1787 – 1803, doi: 10.1093/gji/ggv381.
- Zürn, W.; Meurers, B. (2009): Clear evidence for the sign-reversal of the pressure admittance to gravity near 3 mHz. In: *Journal of Geodynamics* 48(2009), 371 – 377, doi: 10.1016/j.jog.2009.09.040.
- Zürn, W.; Widmer, R. (1995): On noise reduction in vertical seismic records below 2 mHz using local barometric pressure. In: *Geophysical Research Letters* 22(1995), 3537 – 3540.
- Zürn, W.; Widmer, R. (1996): World-Wide Observation of Bichromatic Long-Period Rayleigh-Waves Excited During the June 15, 1991 Eruption of Mount Pinatubo. In: Newhall, C.; Punongbayan, R. (Hrsg.): *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Philippine Institute of Volcanology and Seismology. Quezon City and University of Washington Press, Seattle, 615 – 624.
- Zürn, W.; Widmer-Schnidrig, R.; Bourguignon, S. (1999): Efficiency of Air Pressure Corrections in the BFO-Records of the Balleny Islands Earthquake, March 25, 1998. In: *Bulletin d'Information Marées Terrestres* 131(1999), 10183 – 10194.
- Zürn, W.; Wielandt, E. (2007): On the minimum of vertical seismic noise near 3 mHz. In: *Geophysical Journal International* 168(2007), 647 – 658, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03189.x.

Dr. Walter Zürn

BLACK FOREST OBSERVATORY (SCHILTACH)

Heubach 206 | 77709 Wolfach
walter.zuern@partner.kit.edu

Dr.-Ing. Ludger Timmen

LEIBNIZ-UNIVERSITÄT HANNOVER
INSTITUT FÜR ERDMESSUNG (IFE)Schneiderberg 50 | 30167 Hannover
timmen@ife.uni-hannover.de

Manuskript eingereicht: 15.01.2018 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet