

Das Geowissenschaftliche Gemeinschaftsobservatorium Schiltach (BFO)

**BFO-Team: Peter Duffner¹, Thomas Forbriger², Bernhard Heck¹,
Malte Westerhaus¹, Rudolf Widmer-Schnidrig³ und Walter Zürn**

¹ Geodätisches Institut (GIK), Institut für Technologie Karlsruhe (KIT)

² Geophysikalisches Institut (GPI), Institut für Technologie Karlsruhe (KIT)

³ Institut für Geophysik, Universität Stuttgart

1 Das Observatorium

Das geowissenschaftliche Gemeinschaftsobservatorium Schiltach, auch bekannt als Black Forest Observatory (BFO), ist eine Forschungseinrichtung des Karlsruher Instituts für Technologie und der Universität Stuttgart und wird von den Geodätischen und Geophysikalischen Instituten beider Universitäten betrieben (siehe Abb. 128). Es wurde in den Jahren 1970 bis 1972 in der Nähe von Schiltach/Schwarzwald eingerichtet und befindet sich in der stillgelegten Grube St. Anton im Heubach, in der zwischen 1770 und 1850 Silber und Kobalt abgebaut wurde.

Initiator dieses interuniversitären Projektes war Prof. Stephan Müller, der 1964 als erster Lehrstuhlinhaber des neu geschaffenen Geophysikalischen Instituts (GPI) nach Karlsruhe berufen worden war. Nach der Abberufung von Prof. Müller an die ETH Zürich im Jahr 1970 übernahm Dr. Hermann Mälzer vom Geodätischen Institut (GIK) die Fortführung der Arbeiten zum Aufbau und 1971 die Leitung des Observatoriums. Nach der Versetzung von Prof. Mälzer in den Ruhestand ging die Leitung des Observatoriums 1988 an Prof. Hans-Georg Wenzel über. 1999 übernahm Prof. Bernhard Heck; im Oktober 2018 ist die Leitungsfunktion an seinen Nachfolger Prof. Hansjörg Kutterer übergegangen.



Abb. 128: Blick auf das Laborhaus des BFO mit dem Eingang zum Stollen. Foto: Irina Westermann, KIT.

Der Auf- und Ausbau des Observatoriums inklusive der Absicherung und Erweiterung der bestehenden Stollenanlage (vgl. Abb. 129) sowie die Errichtung von Laborhaus und erdmagnetischer Hütte wurden von der Stiftung Volkswagenwerk finanziert. Spätere bauliche Maßnahmen wurden vom Universitätsbauamt Karlsruhe übernommen. Zur instrumentellen Ausstattung hat neben den beteiligten Universitäten und Instituten die Deutsche Forschungsgemeinschaft wesentlich beigetragen. Das Observatorium mit den geographischen Koordinaten 48.3301°N , 8.3295°E ist mit Bedacht im zentralen Bereich des Schwarzwaldes fernab von anthropogenen Rauschquellen wie Industrie und Verkehr angelegt worden. Die Messinstrumente im Innern des ehemaligen Silberbergwerks sind umgeben von solidem Gestein des

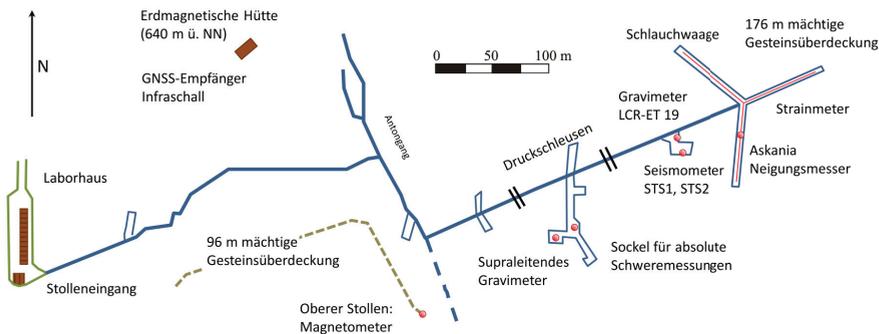


Abb. 129: Stollenplan des BFO in der Grube Anton mit den Standorten der wichtigsten Messgeräte.

Nordausläufers der Triberger Granitmasse und befinden sich in Tiefen von bis zu 170 m unter der Erdoberfläche sowie in einer Entfernung von bis zu 700 m vom Eingang des Stollens. Dies schafft thermisch sehr stabile Messbedingungen. Zu den Besonderheiten, die das BFO gegenüber anderen geodynamischen Observatorien und seismologischen Stationen auszeichnen, gehören zwei dicht am Fels abschließende Druckschleusen. Sie bieten Schutz gegenüber direkten Luftdruckeinflüssen auf die Instrumente und tragen entscheidend zur thermischen Stabilität bei. Wegen dieser günstigen Messbedingungen und der hochpräzisen Messinstrumente, die am BFO betrieben werden, ist das Observatorium international bekannt als eine der rauschärmsten Stationen der globalen seismologischen Netzwerke. Insbesondere im langperiodischen Bereich (Perioden zwischen einer Stunde und 100 Sekunden) setzt das BFO internationale Standards für seismologische Messungen wie z. B. die freien Eigenschwingungen der Erde.

Die Arbeits- und Forschungsschwerpunkte am BFO lassen sich in drei Bereiche gliedern:

- a) kontinuierliche Erfassung und Publikation von Deformationen des Erdkörpers sowie zeitlicher Änderungen des Erdschwere- und Erdmagnetfeldes in einem sehr breiten Frequenzbereich;
- b) Bereitstellung eines international einzigartigen Umfelds zum Test von geodynamischen Messgeräten;
- c) Analyse von freien und erzwungenen Schwingungen des Erdkörpers zur Verbesserung der Kenntnis des strukturellen Aufbaus des Erdkörpers und der Interaktionen im System Erde.

Aufbauend auf dem Bericht von Mälzer und Wenzel (1993) anlässlich der 125-Jahr-Feier des GIK sollen im Folgenden die Maßnahmen zur kontinuierlichen Fortführung des Observatoriumsbetriebs, aktuelle Forschungsergebnisse sowie die Einbindung des BFO in den Lehrbetrieb des KIT vorgestellt werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den vergangenen 25 Jahren mit kurzen Rückblicken auf die Gründungszeit sowie einem Ausblick in die Zukunft.

2 Umbrüche

Prof. Bernhard Heck übernahm die Leitung des BFO in einer Zeit der Umbrüche, die den Betrieb des Observatoriums in der bisherigen Form mehr als einmal gefährdeten. Dem unermüdlichen Einsatz und dem Geschick von Bernhard Heck, in Verbindung mit der fortgesetzten Unterstützung durch die ehemalige Universität Karlsruhe (TH), das KIT und die Universität Stuttgart, ist es zu verdanken, dass der Betrieb des Observatoriums kontinuierlich

mit gleichbleibend hohen Ansprüchen an die Qualität der Daten und Analysen fortgesetzt werden konnte.

Dies betraf in erster Linie die wissenschaftlichen und technischen Stellen mit Arbeitsplatz in Schiltach. 1999 ging mit Walter Grossmann einer der beiden Techniker in den Ruhestand. Seine Stelle wurde seitens des GPI in anderen Bereichen eingesetzt und stand für das BFO nicht mehr zur Verfügung. Die zweite Technikerstelle konnte nach dem Ausscheiden von Heinz Otto im Jahre 2005 auf Grund des seit 1996 geltenden Solidarpaktes zur Hochschulfinanzierung und -steuerung in Baden-Württemberg nicht sofort neu besetzt werden. Im Rahmen von intensiven Verhandlungen mit den Leitungen der Universitäten Karlsruhe (TH) und Stuttgart konnte eine Lösung gefunden werden, an der sich beide Einrichtungen finanziell beteiligen. Damit waren die Grundlagen für den Weiterbetrieb des Observatoriums in der bisherigen Form gewährleistet. Im Februar 2006 wurde Peter Duffner eingestellt, der seitdem die vielfältigen mechanischen und elektrotechnischen Aufgaben am BFO durchführt. Den Hausmeister- und Putzdienst am Observatorium übernehmen seit Beginn der 1970er Jahre Mitglieder der benachbart wohnenden Familie Hauer.

Auch die Neubesetzung der beiden Wissenschaftlerstellen am BFO verlief nicht völlig problemlos. Es bestand ein erhöhter Druck, Arbeitsplätze aus Schiltach an die einstellenden Institute zu verlagern und das BFO verstärkt über Fernwartung zu betreuen. Diese Diskussion wurde letztendlich durch eine Entscheidung des Rektors der Universität Karlsruhe (TH), Prof. Horst Hippler, mit dem Hinweis auf die beträchtlichen Auswirkungen auf die Datenqualität des Observatoriums beendet. Im Herbst 2000 wurde Dr. Rudolf Widmer-Schnidrig am Geophysikalischen Institut der Universität Stuttgart als Nachfolger von Dr. Dieter Emter eingestellt, 2003 folgte Dr. Thomas Forbriger vom Geophysikalischen Institut des KIT als Nachfolger von Dr. Walter Zürn. Der Arbeitsplatz der beiden Wissenschaftler ist weiterhin am Observatorium, allerdings müssen sie im Vergleich zur Periode ab 1970 deutlich mehr Aufgaben an ihren Heimatinstitutionen übernehmen, was zu einer nicht unerheblichen Doppelbelastung führt.

Nach der Wegberufung von Prof. Hans-Georg Wenzel im Jahre 1999 an die Universität Hannover wurde diese Professorenstelle im Rahmen des Solidarpaktes nicht wiederbesetzt; der hiermit verbundene Aufgabenbereich wurde dem Lehrstuhl von Prof. Bernhard Heck zugeschlagen. Als Ausgleich wurde eine neue Wissenschaftlerstelle geschaffen, auf der im Herbst 1999 Dr. Malte Westerhaus eingestellt wurde. Er übernimmt am GIK seitdem als "rechte Hand" von Prof. Heck Aufgaben im Bereich des administrativen Betriebs des BFO. Unterstützt wurde und wird er dabei von den Lehrstuhl-Sekretärinnen Christel Hahn (bis 2001), Diana Bracko (bis 2013) und Martina Pfersching (ab 2014). Auch an den tragenden Institutionen

fand zu Beginn des Jahrtausends ein Generationenwechsel statt. Die derzeitigen Direktoren Prof. Nico Sneeuw (Geodätisches Institut Stuttgart), Prof. Manfred Joswig (Geophysikalisches Institut Stuttgart) und Prof. Andreas Rietbrock (Geophysikalisches Institut Karlsruhe) stehen wie ihre Vorgänger hinter dem BFO und unterstützen den Betrieb in vielfältiger Weise.

Als ein ständiger äußerer Bedrohungsherd, der mittel- und unmittelbar den Weiterbetrieb des Observatoriums gefährdete, erwies sich in den letzten beiden Dekaden der Ausbau der Windenergie. Vibrationen durch Luftverwirbelung zwischen Rotorblättern und Mast, Eigenschwingungen der Anlage sowie Drehmomente auf Grund von Laständerungen koppeln in den Untergrund ein und breiten sich in Form elastischer Wellen aus. Windkraftanlagen (WKA) tragen damit in bestimmten Frequenzbereichen zu einer Erhöhung des Grundrauschens bei. Die konkreten Auswirkungen waren zu Beginn der 2000er Jahre noch weitgehend unerforscht. Inzwischen sind sie für eine Reihe von seismologischen Breitbandstationen, verschiedene Stationsgeometrien und -geologien sowie unterschiedliche Wetterlagen quantitativ nachgewiesen worden (z. B. Stammer und Ceranna, 2016). Die Stärke der Beeinflussung hängt dabei wesentlich von der relativen Lage zwischen WKA und Station, der Topographie, dem Aufbau und den elastischen Eigenschaften des Untergrundes sowie dem Frequenzband ab, in dem die Beobachtungen durchgeführt werden. Vorhersagen dazu sind außerordentlich schwierig, konkrete Aussagen sind erst nach Installation einer WKA in Stationsnähe möglich.

Diese Situation erschwerte die Verhandlungen zur Vermeidung der Auswirkungen von WKA auf das Observatorium Schiltach. Auf der anderen Seite war auch die Anzahl möglicher Investoren in der Nachbarschaft des BFO nicht im Vorhinein bekannt. Es war also ein Kompromiss zu finden, der den potentiellen Interessen beider Seiten Genüge tat. Nach mehreren Verhandlungsrunden mit den beteiligten Ministerien in Baden-Württemberg, lokalen Behörden und der Fürstlich-Fürstenbergischen Forstverwaltung (FFF) als Vertreter des Besitzers des BFO-Stollens einigte man sich schließlich auf einen Schutzradius von 5 km um das Observatorium. Darüber hinaus wurde eine Pachtzahlung vereinbart, die vom KIT unter Beteiligung der Universität Stuttgart getragen wird. Die Verträge mit der FFF sind auf 50 Jahre angelegt, sodass der Weiterbestand des BFO langfristig gesichert ist.

Inzwischen sind einige WKA in Entfernungen > 6 km zum BFO errichtet worden, eine weitere direkt am Rand der Schutzzone ist im Stadium der fortgeschrittenen Planung. Der Abstand scheint ausreichend groß zu sein, sodass bisher keine signifikanten Auswirkungen auf die langperiodische Seismologie als zentrales Forschungsgebiet am BFO erkannt wurden. Allerdings ist eine Beeinträchtigung der vom Landeserdbendienst Baden-Württemberg

genutzten kurzperiodischen Signalanteile nicht ausgeschlossen. Quantitative Untersuchungen zu den potentiellen Störungen sind derzeit im Gange.

3 Instrumentarium

Das Supraleitende Doppelkugelgravimeter GWR SG-056 (Abb. 130) stellt die bedeutendste Erweiterung des Instrumentariums im Messstollen des BFO während der vergangenen 25 Jahre dar. Es wurde 2009 über das Programm für Forschungsgrößegeräte der DFG unter Beteiligung des Landes Baden-Württemberg über die Universitäten Karlsruhe (TH) und Stuttgart beschafft und in einer geschützten Kammer in der ehemaligen Pendelkammer des Observatoriums installiert (Abb. 131). Die Funktionsweise dieses Schweresensors basiert auf dem Prinzip der magnetischen Levitation. Zwei supraleitende Hohlkugeln aus Niob werden in einem durch supraleitende Spulen aufrechterhaltenen, extrem konstanten Magnetfeld zum Schweben gebracht. Durch Schwereänderungen und Trägheitskräfte hervorgerufene Änderungen in den vertikalen Positionen der Kugeln werden über ein Feedback-System erfasst und kompensiert. Die dazu notwendigen elektrischen Ströme sind proportional zur Beschleunigungsänderung und stellen das Messsignal dar.



Abb. 130: Das SG-056 mit der Steuerungs- und Registrierungselektronik. Alle Sensoren im Stollen sind über Lichtleiterkabel mit dem Laborhaus verbunden. Nur spezielle Arbeiten werden direkt an den Sensoren durchgeführt (Thomas Forbriger, vorn, und Peter Duffner). Foto: Markus Breig, KIT.



Abb. 131: Das Supraleitende Gravimeter SG-056 ist in einer speziellen Schutzkammer im BFO-Stollen untergebracht. Der zur Heliumverflüssigung notwendige Kompressor befindet sich in einer benachbarten Felskammer. Foto: Markus Breig, KIT.

Die Schweresensoren werden mittels einer Kühlung durch flüssiges Helium bei einer Temperatur von -269°C betrieben. Der große Vorteil eines Supraleitenden Gravimeters gegenüber herkömmlichen Federgravimetern ist die Langzeitstabilität des tragenden Magnetfeldes. Dadurch wird es möglich, langperiodische Erdgezeiten und Schwereänderungen auf Grund von Rotationeigenschaften der Erde im Periodenbereich von Monaten bis Jahren zu messen. Das SG-056 wird am BFO aber nicht allein als reiner Schweresensor, sondern als breitbandiger seismologischer Beschleunigungssensor betrieben. Rudolf Widmer-Schnidrig (2003) konnte nachweisen, dass Supraleitende Gravimeter im Frequenzbereich unterhalb von $0,001\text{ mHz}$ den dedizierten Breitbandseismometern überlegen sind und dadurch neue Einblicke auch im Frequenzband der Erdeigenschaften ermöglichen. Das SG-056 am BFO ist weltweit das erste Doppelkugelinstrument mit zwei gleich großen, aber verschiedenen schweren Niob-Kugeln. Die obere Kugel besitzt die übliche Masse von $4,34\text{ g}$, die untere Kugel hat eine ca. viermal so große Masse von $17,7\text{ g}$. Dadurch erhoffte man sich einen Beitrag zu der Frage, ob die mit



Abb. 132: Peter Duffner bei der Installation der permanenten GNSS-Antenne. Im Hintergrund befindet sich die Messhütte, in der sich u. a. Instrumente zur regelmäßigen Messung der Orientierung des Erdmagnetfeldes befinden.

der Erhöhung der Masse einhergehende Verringerung des thermisch verursachten Rauschens zu einer messbaren Verbesserung der Signalqualität führen würde. Eine Untersuchung von Rosat und Hinderer (2011) scheint diese Annahme zu bestätigen. Danach ist der untere Sensor des SG-056 der am wenigsten gestörte Sensor im globalen Netzwerk der Supraleitenden Gravimeter. Durch fortgesetzte Arbeiten zur Kalibrierung und zum besseren Verständnis der Eigenschaften des Instruments und seiner elektronischen Komponenten soll die Genauigkeit der Schweremessungen mit dem SG-056 weiter erhöht werden (Forbriger und Heck, 2018).

Die Installation des SG-056 wurde durch weitere Maßnahmen flankiert. Um zwischen langperiodischen Schwereänderungen und möglichen tektonisch bedingten Höhenänderungen der Region unterscheiden zu können, wurde neben der außerhalb des Stollens gelegenen Messhütte des BFO eine kontinuierlich registrierende GNSS-Station errichtet (Abb. 132). 2017 wurden die Antenne und der GNSS-Empfänger durch das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg erneuert und die Station als eine von drei Monitoringstationen in das *SAPoS*[®]-Netzwerk des Landes übernommen.

Die ehemalige Pendelkammer mit dem SG-056 befindet sich hinter der ursprünglichen Druckschleuse des BFO-Stollens. Um die übrigen Sensoren von den unumgänglichen Installationsarbeiten am SG und thermischen Emissionen des Kompressors zur Heliumverflüssigung abzuschirmen wurde eine zweite Druckschleuse im Stollen hinter der Kammer eingebaut. Beide Schleusen wirken als einfache Tiefpassfilter für Luftdruck- und Temperaturvariationen mit Zeitkonstanten von ca. 40 Stunden und tragen erheblich zu der rauscharmen Messumgebung am BFO bei. Hinter der zweiten Schleuse arbeiten derzeit die folgenden Messgeräte:

- ein LaCoste-Romberg Erdgezeiten-Gravimeter ET-19 mit elektrostatischem Feedback (LCR ET-19)
- drei Streckeisen STS-1 Breitbandseismometer (Ost-, Nord- und Vertikalkomponente)
- ein Streckeisen STS-2 Drei-Komponenten-Breitbandseismometer
- ein ASKANIA Zwei-Komponenten-Vertikalpendel mit modernisierter Elektronik
- drei 10 m lange Invardraht-Strainmeter (Typ Cambridge) in den Azimuten N2°O, N60°O, und N300°O
- eine 111 m lange Schlauchwaage (Typ Horsfall) im Azimut N331°O.

Weitere instrumentelle Erneuerungen und Verbesserungen betrafen die magnetischen Sensoren. Im Jahre 2000 wurde entschieden, die magnetischen Messgeräte aus der Messhütte in den oberen Stollen der Grube Anton zu verlegen, um den Einfluss von Temperaturschwankungen zu reduzieren. In den folgenden Jahren wurden dort ein Overhauser Protonenmagnetometer

GSM-90 sowie ein 3-Komponenten FGE Fluxgate Magnetometer des dänischen meteorologischen Institutes (DMI) installiert (Widmer-Schnidrig u. a., 2018). Lediglich die regelmäßigen Messungen zur Orientierung des Magnetfeldes finden weiter in der Messhütte statt. Diese Maßnahmen trugen zu einer erheblichen Verbesserung der Datenqualität bei, und 2006 erhielt das BFO den Status eines offiziellen magnetischen Observatoriums im INTERMAGNET-Netzwerk.

Komplettiert wird das Instrumentarium am BFO durch diverse meteorologische Sensoren. Alle am BFO erfassten Daten werden in Nahe-Echtzeit durch internationale Datenzentren publiziert: Data Management Center der Incorporated Research Institution for Seismology (IRIS DMC) an der Universität Washington in Seattle, Seismologisches Zentralobservatorium (SZO) an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover, INTERMAGNET in Edinburgh, GNSS Datenzentrum am Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) in Frankfurt sowie dem Informationssystem und Datenzentrum (IGETS-ISDC) am GeoForschungsZentrum Potsdam. Die Daten stehen kostenfrei für die Nutzung durch Wissenschaftler und Öffentlichkeit zur Verfügung.

4 Aktuelle Forschung

Die kontinuierliche Erfassung der Beobachtungsgrößen mit möglichst hohem Signal-Rausch-Abstand ist die Grundaufgabe am BFO. Dieser Auftrag erfordert eine ständige technische Wartung der Sensoren und der Infrastruktur am BFO durch die vor Ort arbeitenden Mitarbeiter. Datenmonitore ermöglichen die tägliche optische Kontrolle der Messdaten, bei Störungen werden unverzüglich Gegenmaßnahmen ergriffen. Darüber hinaus tragen die eigenen Forschungsarbeiten der Mitarbeiter mit den BFO-Daten erheblich zur Datenqualität bei, da auf diese Weise auch kleinste technische Unregelmäßigkeiten frühzeitig erkannt werden.

Eine weitere wesentliche Voraussetzung für die Datenqualität am BFO sind spezielle Experimente und Forschungsarbeiten zu den Ursachen des seismischen Rauschens. Eine der wichtigsten natürlichen Störquellen sind Luftdruckvariationen. Sie übertragen sich mittels gravimetrischer Attraktion und Bodendeformationen auf die Beschleunigungs- und Deformationssensoren und limitieren die technisch erreichbare Sensitivität der Messinstrumente. Die intensive Beschäftigung mit diesem Phänomen seit Beginn der 1980er Jahre führten zu einem besseren Verständnis dieser Effekte und zur Entwicklung von Korrekturansätzen sowohl für Vertikal- als auch Horizontalkomponenten (Müller und Zürn, 1983; Zürn und Widmer, 1995; Zürn und Wielandt, 2007; Zürn u. a., 2007). Thomas Forbriger analysierte

magnetische Störungen in den Daten der Breitbandseismometer. Er konnte nachweisen, dass sich Variationen des Magnetfeldes direkt in scheinbare Beschleunigungen der Sensormasse übertragen (Forbriger, 2007; Forbriger u. a., 2010). Sofern die magnetische Sensitivität individuell für jedes Beobachtungsinstrument bestimmt ist, können die Störungen mittels paralleler Magnetfeldregistrierungen deutlich reduziert werden. Die am BFO abgeleiteten Korrekturansätze kommen nicht nur den eigenen Instrumenten, sondern allen Stationen der nationalen und internationalen seismischen Netzwerke zu Gute.

Aufbauend auf der Datenqualität leistet das BFO international anerkannte Forschungsbeiträge auf den Gebieten der Erdzeitenforschung und der langperiodischen Seismologie. Als das BFO 1972 seine Arbeit aufnahm, stand die hochpräzise Erfassung und Bestimmung von Amplituden und Phasen der Erdzeitsignale in Schwere-, Neigungs- und Dehnungsregistrierungen im Fokus. Aus den Resultaten sollten Love'sche Zahlen berechnet und mit entsprechenden Ergebnissen der bei sehr viel höheren Frequenzen abgeleiteten seismologischen Erdmodelle verglichen werden. Es war jedoch von Beginn an klar, dass zusätzliche Signale wie Ozeanauflasten, lokale Verzerrungen des Deformationsfeldes sowie die zum Teil nur unzureichend genau bekannten in-situ Kalibrierfaktoren dieses Unterfangen erheblich erschweren würden.

Während der ersten zwei Dekaden am BFO wurden verschiedene Schlüsselexperimente zur Validierung der lokalen Störungen des Gezeitendeformationsfeldes durch Hohlräume, Topographie und geologische Inhomogenitäten durchgeführt (siehe Zürn, 2014). Neigungs- und Strainmeter unterschiedlicher Bauart wurden an verschiedenen Stellen des Stollensystems betrieben und die lokalen elastischen Effekte präzise beschrieben (Emter und Zürn, 1985). Begleitet wurden die Messungen durch 2D-Finite-Elemente-Modellierungen. Durch diese international beachtete Testserie konnte die Existenz dieser Effekte eindeutig nachgewiesen und quantifiziert werden.

Ende der 1980er Jahre trat die Erdzeitenforschung am BFO etwas weiter in den Hintergrund, da es zu jener Zeit nicht möglich war, ozeanische Auflasten und lokale elastische Effekte ausreichend genau zu modellieren. Eine Ausnahme bildeten Untersuchungen zur Erdkernresonanz, die im ganztägigen Gezeitenband zu veränderten Amplituden und Phasen einiger Partialtiden führt. Die aus Gezeitenmessungen berechneten Eigenperioden dieser Rotationseigenschwingung der Erde wichen von den Ergebnissen theoretischer Erdmodelle ab, was u. a. durch eine um 300 - 600 m erhöhte Elliptizität der Kern-Mantelgrenze erklärt werden konnte (Neuberg u. a., 1990).

Dank der erweiterten Möglichkeiten der Messtechnik und vor allem der immensen Steigerung der numerischen Modellierungskapazitäten konnte die Gezeitenforschung am BFO in den letzten Jahren wieder intensiviert werden. Sogenannte "gleitende", d. h. zeitsensitive Erdgezeitenanalysen der Registrierungen von Supraleitenden Gravimetern am BFO und anderer im globalen geodynamischen Netzwerk (GGP) vereinigten Observatorien deckten scheinbare zeitliche Veränderungen der Erdgezeitenamplituden im Promille-Bereich sowie Phasenänderungen von wenigen Zehntelgrad auf. Sofern man annimmt, dass sich die Übertragungseigenschaften der Erde auf einer Zeitskala von Jahrzehnten nicht verändert haben, können diese zeitlichen Variationen der Erdgezeitenparameter im Wesentlichen erklärt werden durch

- Zusatzsignale, die im Modell des anregenden Gezeitenpotentials nicht enthalten sind, z. B. nichtlineare Ozeangezeiten, Modulation der Ozeangezeiten durch veränderlichen Wasserstand oder Strahlungszeiten (Temperatur, Luftdruck)
- Fehler im mathematischen Analysemodell, z. B. eine unzureichende Modellierung der Resonanzeigenschaften der Erde oder eine unzureichende Trennung verschiedener Einflussgrößen.

Vor dem Hintergrund dieser Beobachtungen läuft derzeit ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördertes Forschungsprojekt am BFO mit zwei Doktorandenstellen (Eva Schroth, GIK und Adam Ciesielski, GPI). In enger Kooperation mit internationalen Forschergruppen, die sich mit der hydrodynamischen Modellierung der globalen Ozeane befassen, soll der Einfluss der Ozeangezeiten auf die Messungen am BFO und weiteren GGP-Stationen im Detail studiert werden. Ozeanmodelle der neuesten Generation sagen u. a. jährliche Variationen der halbtägigen Hauptgezeitenwelle voraus, deren Größenordnung, verknüpft mit plausiblen elastischen Übertragungsfunktionen der Erdkruste, die SG-Analyseergebnisse erklären könnten. Die Modelle der verschiedenen Arbeitsgruppen sind hinsichtlich ihrer Wirkung auf die GGP-Stationen aber noch nicht konsistent (siehe Abb. 133). Sollten sich die bisherigen Befunde bestätigen, so könnten global verteilte Supraleitende Gravimeter unter bestimmten Voraussetzungen zur Validierung numerischer Ozeanmodelle herangezogen werden. Dies wäre u. a. auch ein Beitrag zur verbesserten Signaltrennung heutiger und zukünftiger Schwerefeld-Satellitenmissionen.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projektes ist eine Fortentwicklung des mathematischen Erdgezeitenanalyseverfahrens. Damit soll im Wesentlichen eine verbesserte, durch den Nutzer beeinflussbare Trennung verschiedener Anteile in der Reaktion des Systems Erde auf das anregende Gezeitenpotential ermöglicht werden. Damit knüpft das Projekt an die wegweisenden Arbeiten des früheren BFO-Direktors Hans-Georg Wenzel an, der in den 1980er und

1990er Jahren das derzeitige Standardmodell (ETERNA) zur Erdgezeitenanalyse entwickelte (Hartmann und Wenzel, 1995; Wenzel, 1997b,a).

Der zweite Forschungsschwerpunkt am BFO seit Beginn der Messungen in 1972 ist die langperiodische Seismologie, insbesondere das Studium der den Erdkörper umrundenden Oberflächenwellen nach (mittel)-starken Erdbeben sowie die Erdeisenschwingungen. Durch die außerordentlich günstigen Beobachtungsbedingungen im Messstollen des Observatoriums gelangen den Mitarbeitern am BFO dabei einige zu ihrer Zeit weltweit einzigartige Beobachtungen und Interpretationen.

Nach einem schweren Erdbeben im Südpazifik (Macquarie Islands, 23.05.1989, $M=8,2$) konnten Walter Zürn und Rudolf Widmer-Schmidrig erstmals die torsionale Grundmode ${}_0T_2$ nachweisen, bei der sich bildlich gesprochen zwei Hälften der Erdkugel mit einer Periode von 44 Minuten gegeneinander verdrehen (Widmer u. a., 1992). Trotz ihrer geringen Amplitude von unter einem Nanometer pro Meter ließen sich die dabei auftretenden Dehnungen mit den im Stollen installierten Invardraht-Strainmetern signifikant aufzeichnen. Es handelte sich dabei

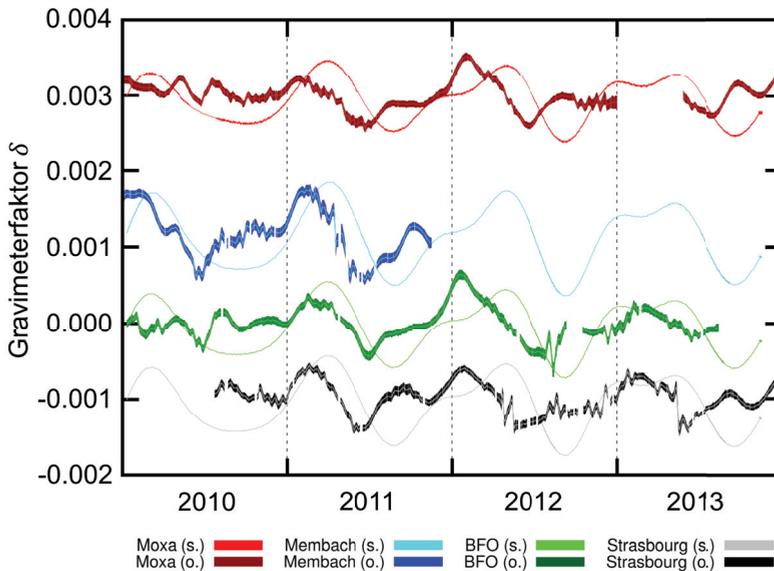


Abb. 133: Variationen der Gezeitenantwortfunktion der Erde für die halbtägige Mondwelle M2 an vier GGP-Stationen. Die Skala gibt die Veränderungen des Gravimeterfaktors (Verhältnis der beobachteten und der anregenden Gezeitenamplitude) bezüglich eines festen Referenzwertes an. (o) steht für beobachtet, (s) steht für den Schwereeffekt, der durch die nach dem Ozeanmodell "Stormtide" vorhergesagten Massenverlagerungen an den Messstationen erzeugt wird (Schroth u. a., 2016).

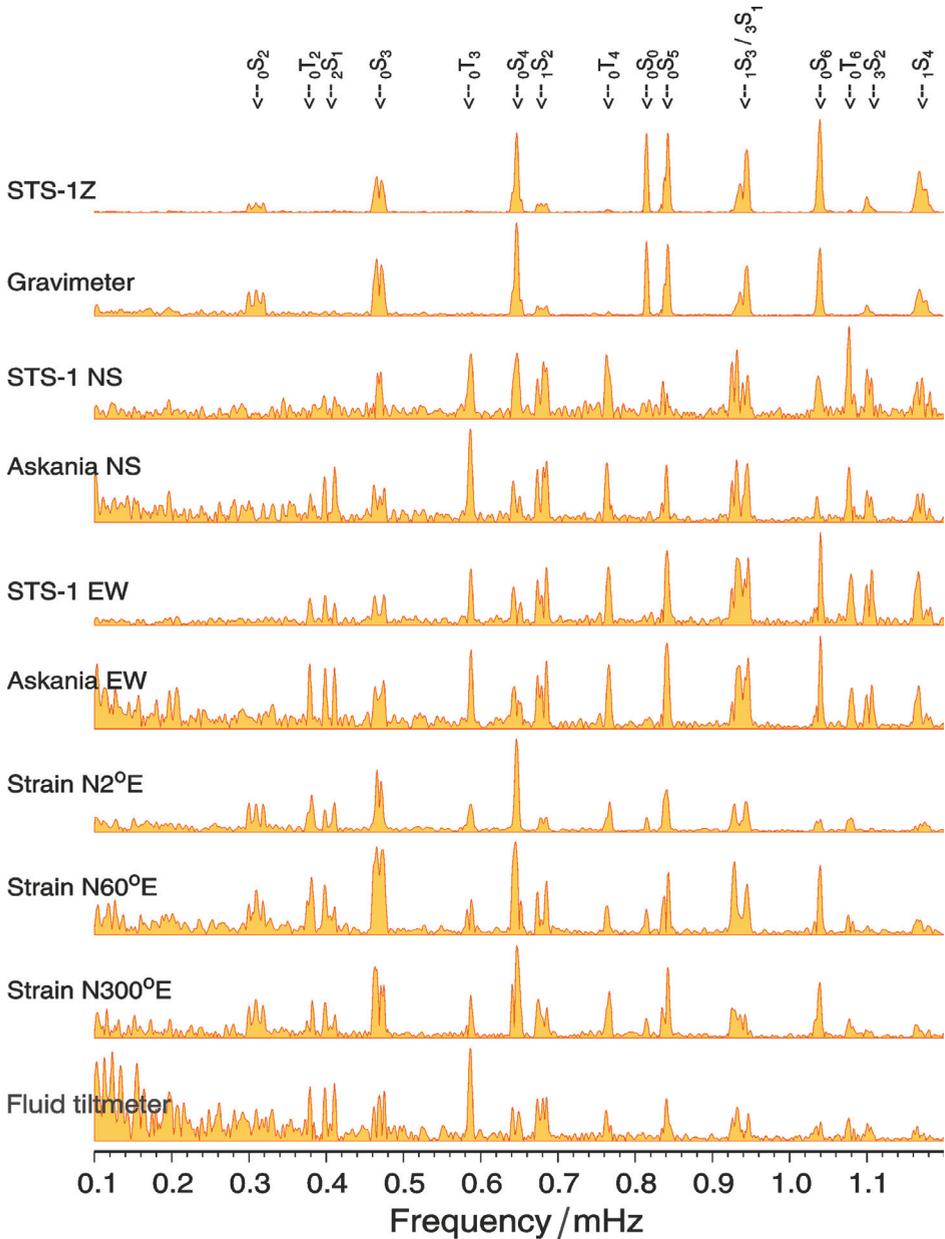


Abb. 134: Spektrum der durch das M=9,2 Sumatra-Beben vom 26.12.2004 angeregten Eigenschwingungen der Erde, aufgezeichnet von verschiedenen Breitbandsensoren am BFO (STS-1 Seismometer, LaCoste-Romberg-Gravimeter ET-19, Askania-Vertikalpendel, Strainmeter, Horsfall-Schlauchwaage).

um die erste unzweifelhafte instrumentelle Beobachtung dieser Schwingung. Bis in die 2000er Jahre hinein war das BFO die einzige seismologische Station, an der diese Beobachtung wiederholt gelang. Erst das Sumatra-Beben am 26.12.2004 mit einer Magnitude $M=9,2$ regte die Erdeigenschwingungen zu derart großen Amplituden an, dass eine Registrierung der ${}_0T_2$ -Mode und anderer schwer beobachtbarer Schwingungen an vielen Stationen des globalen seismologischen Netzwerkes möglich war (vgl. Abb. 134).

Die präzise Bestimmung der Eigenschwingungsfrequenzen sowie deren Aufspaltung durch Inhomogenitäten des Erdkörpers ermöglicht die Ableitung verbesserter Strukturmodelle des Erdinneren (Häfner und Widmer-Schmidrig, 2013). Dabei erhöht die große Zahl unabhängiger Messsysteme, mit denen die Erdeigenschwingungen der großen Erdbeben mit sehr gutem Signal-Rauschverhältnis am BFO registriert werden konnten, die Zuverlässigkeit der Analysen und Ergebnisse. Amplituden und Amplitudenverhältnisse der verschiedenen Sensoren werden genutzt, um Störungen durch lokale elastische Strukturen wie Hohlräume oder geologische Inhomogenitäten auch im Eigenschwingungsband zu studieren und zu quantifizieren. Die Redundanz der Messsysteme am BFO ermöglichte u. a. auch den Nachweis der Coriolis-Kopplung der toroidalen Eigenschwingungsmoden (Zürn u. a., 2000).

Während des paroxysmalen Ausbruchs des Pinatubo am 15.06.1991 wurde mit dem Federgravimeter des BFO eine völlig neue Quelle von Erdeigenschwingungen entdeckt (Widmer und Zürn, 1992; Zürn und Widmer, 1996). Resonanzeffekte zwischen der aufsteigenden Eruptionswolke und der darüber liegenden Atmosphäre regten die Erdoberfläche zu Schwingungen in einem sehr engen Frequenzband an. Diese extern angeregten Schwingungen breiten sich wie die Oberflächenwellen (Rayleighwellen) nach einem Erdbeben aus und konnten rund um die Erde registriert werden. Nach dieser Entdeckung wurden drei weitere Vulkaneruptionen (Karakatau 1883, Mount St. Helens 1980, El Chichon 1982) ermittelt, die ähnliche Schwingungen erzeugten.

International einiges Aufsehen erregte die Entdeckung von toroidalen Hintergrundeigenschwingungen der Erde in den EW-Komponenten der Breitbandseismometer STS-1 und STS-2 am BFO (Kurrle und Widmer-Schmidrig, 2008). Es war aus Analysen der seismischen Vertikalkomponenten bereits erkannt, dass die fundamentalen sphäroidalen Moden der Erde im Frequenzbereich zwischen 2 und 7 mHz kontinuierlich angeregt werden. Als mögliche Quellen wurden die Atmosphäre und Schwerewellen in den Ozeanen diskutiert. Nach der Identifizierung der fundamentalen toroidalen Moden in den seismischen Horizontalkomponenten muss jedoch der vermutete Anregungsmechanismus ernsthaft hinterfragt werden; die Diskussion ist derzeit noch nicht abgeschlossen.

5 Akademische Lehre

Die Forschungsaktivitäten der BFO-Mitarbeiter bieten vielfältige Möglichkeiten für Abschlussarbeiten an den mit dem BFO verbundenen Universitätsinstituten. Bisher wurden in über 50 Diplom- und Masterarbeiten und mehr als 10 Dissertationen, unter Betreuung durch BFO-Mitarbeiter, Themen und Problemstellungen des Observatoriums bearbeitet. Dabei wurden Daten der BFO-Sensoren benutzt. Derzeit läuft das oben erwähnte DFG-finanzierte Forschungsprojekt mit zwei Doktorandenstellen am Observatorium. Darüber hinaus fungierten BFO-Wissenschaftler als externe Gutachter und Prüfer für Dissertationen und Habilitationen an den Universitäten Strasbourg, Louvain-la-Neuve, Cambridge, Paris, Utrecht, Chambéry, Jena und Helsinki. Die von den BFO-Wissenschaftlern und den von ihnen betreuten Studierenden an den Universitäten durchgeführten Forschungsarbeiten und den dabei erzielten Forschungsergebnissen sind in ca. 200 Publikationen dokumentiert.

Das BFO ist über Vorlesungs- und Übungsthemen, Exkursionen und ein mehrtägiges Observatoriumspraktikum direkt in die Studiengänge der beteiligten Institute am KIT eingebunden. Bereits im Bachelorstudiengang haben Studierende der Geophysik die Möglichkeit, einen



Abb. 135: Johannes Käufl (links), Masterstudent am GPI, und Thomas Forbriger bei der Installation eines Breitbandseismometers auf dem Testsockel im BFO-Stollen. Foto: Irina Westermann, KIT.

ersten Einblick in die Arbeit an einem seismologischen Observatorium zu bekommen. Im Rahmen der Master-Veranstaltungen "Physics of seismic instruments" am GPI und "Rezente Geodynamik" am GIK wird jedes Jahr eine eintägige Exkursion ans BFO durchgeführt, die den Studierenden die zusätzliche Möglichkeit bietet, theoretische Konzepte der seismologischen Beobachtungstechniken anhand der Implementierung moderner Messinstrumente zu diskutieren. Eine weitere Vertiefung der Inhalte findet seit 2012 im Rahmen des Observatoriumspraktikums (BFO Winter School) statt. Unter der Leitung von Thomas Forbriger befassen sich Studierende des GPI drei Tage lang mit der Installation und Kalibrierung von Breitbandseismometern unter Observatoriumsbedingungen (siehe Abb. 135). Damit bietet das BFO einzigartige Gelegenheiten, theoretische Kenntnisse zu vertiefen und praktische Erfahrungen mit modernsten seismologischen Beobachtungstechniken zu gewinnen.

6 Das BFO als Testeinrichtung

Über die Jahrzehnte seines Bestehens hat sich das BFO einen international anerkannten Status als Testeinrichtung für Breitbandseismometer erarbeitet. Die Voraussetzungen dafür sind die rauscharme Messumgebung, das Vorhandensein von hochpräzisen Vergleichsinstrumenten sowie die ständig vorhandene Unterstützung der Gastexperimente durch die Mitarbeiter vor Ort. Vergleichbare Bedingungen werden nur an sehr wenigen seismologischen Observatorien im globalen Netzwerk vorgefunden.

Ein herausragendes Beispiel für die Nutzung des BFO durch Gastwissenschaftler ist der Test von neuentwickelten Seismometern, die für den Flug zum Mond und zum Mars vorgesehen sind. In den Jahren 2012 und 2017 wurden die Spezifikationen eines sehr breitbandigen (Very Broad Band, VBB) Seismometers, eine Entwicklung von Wissenschaftlern am Institut de Physique du Globe in Paris (IPGP) in Kooperation mit der ETH Zürich und dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, in mehreren Testreihen im Vergleich zu den BFO-Seismometern validiert (vgl. Abbildungen 136 und 137). Das VBB-Seismometer befindet sich derzeit im Rahmen der NASA-Mission INSIGHT auf dem Weg zum Mars. Nach erfolgreicher Landung, voraussichtlich am 26.11.2018, wird es seismische Wellen aufzeichnen und damit wichtige Erkenntnisse über den inneren Aufbau des Planeten liefern. Rudolf Widmer-Schnidrig gehört als Vertretung des BFO zum Science Team der Mission und wird aus erster Hand mit den Daten arbeiten können. Ebenfalls am BFO getestet wurden drei kurzperiodische Seismometer der japanischen Raumfahrtbehörde Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), die im Rahmen der japanischen Mondmission SELENE2 eingesetzt werden sollen.

Weitere Beispiele für die Nutzung des BFO als Testeinrichtung sind:

- 1994 paralleler Betrieb des SG-102 (Leihgabe des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, BKG) und des BFO-Federgravimeters ET-19. Es konnte nachgewiesen werden, dass das Signal-Rausch-Verhältnis des ET-19 (und der STS-1 Z-Komponente) im Frequenzbereich der Erdeigenschwingungen dem SG-Gravimeter überlegen war. Diese Beobachtung stimulierte den Hersteller, GWR Instruments in San Diego, USA, zu weiteren Verbesserungen der instrumentellen Eigenschaften der SG-Gravimeter.
- Mehrwöchiger Test eines Laser-interferometrischen Seismometers 2000/2001 (Akito Araya, japanische Kollaboration TAMA zur Detektion von Gravitationswellen).
- Langzeittest eines STS-1-Seismometers (iSTS1) mit Laser-interferometrischen Wegaufnehmern (Mark Zumberge, UCSD La Jolla, Californien, USA, seit 2012).
- Wiederholt Testmessungen durch unterschiedliche Herstellerfirmen kommerzieller Breitbandseismometer und Beschleunigungssensoren.
- Vergleichstests von Neigungsmessern kleiner Bauart (Lippmann-Tiltmeter) zur Überwachung des Ringlasers an der geodätischen Fundamentalstation Wettzell.

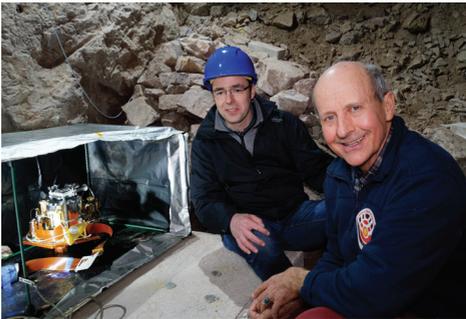


Abb. 136: Rudolf Widmer-Schnidrig und Marco Bierwirth vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS, Göttingen) während der Einrichtung der Testumgebung für das Mars-Seismometer. Foto: Philippe Labrot (IPGP, Paris).

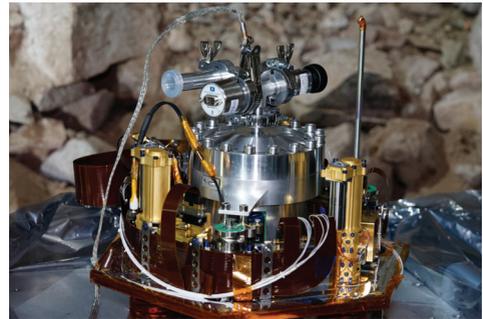


Abb. 137: Blick auf das von einem internationalen Konsortium entwickelte VBB-Seismometer. Ein baugleiches Instrument befindet sich derzeit auf dem Flug zum Mars. Foto: Philippe Labrot (IPGP, Paris).

7 Ausblick

Im Oktober 2018 übernahm Prof. Hansjörg Kutterer als Nachfolger von Prof. Bernhard Heck die Leitung des BFO. Unter seiner Leitung soll die herausragende Stellung des Observatoriums im Globalen Seismologischen Netzwerk (GSN) und in anderen internationalen Netzwerken weiter gestärkt und die Kapazitäten und Angebote im Bereich der Lehre ausgebaut werden. So ist unter anderem die Beschaffung von zwei neuentwickelten langperiodischen Seismometern (STS-6 und Trillium T360) geplant, die für die hochpräzise Erfassung von Erdeigenschwingungen eingesetzt werden sollen. Die derzeit verwendeten STS-1 Seismometer wurden in den 1970er Jahren von der Firma Streckeisen entwickelt und gelten als die besten Breitbandseismometer im GSN, werden aber nicht mehr hergestellt. Mit dem neuentwickelten STS-6 Seismometer möchte die Firma an die Qualität dieser erfolgreichen Linie anknüpfen und gleichzeitig die Handhabung der Geräte verbessern.

Trillium T360 und STS-6 werden als potentielle Nachfolger des STS-1 im GSN diskutiert, bisher wurde jedoch die Qualität der STS-1 Seismometer von diesen Instrumenten noch nicht erreicht. Mit der Beschaffung solcher Geräte wird das BFO von Beginn an in Praxistests und Nutzungsmöglichkeiten involviert sein und könnte, wie im Falle der SG-Gravimeter, durch quantitative Vergleiche und Beschreibung der Geräteeigenschaften eine wichtige Rolle bei der Weiterentwicklung der langperiodischen Seismometer spielen. Gleichzeitig würde das BFO, wenn sich die Erwartungen an die Neuentwicklungen erfüllen sollten, frühzeitig von den damit erweiterten Beobachtungsmöglichkeiten profitieren.

Weitere Investitionen dienen der Konsolidierung bzw. weiteren Verbesserung der Einbindung des BFO in nicht-seismische Netzwerke. So soll unter anderem mit der Beschaffung magnetischer Induktionsspulen die Bandbreite der am BFO beobachteten Erdmagnetfeldvariationen erweitert werden. Radar-Corner-Reflektoren zur Unterstützung der SAR-Interferometrie sollen in Verbindung mit der permanenten GNSS-Station die Einbindung des BFO in überregionale geodätische Netze verstärken und die Beobachtungskapazität für tektonische Bewegungen verbessern.

Auch die Lehre soll durch den Einsatz spezieller, moderner Breitbandseismometer inklusive Datenerfassung gestärkt werden. Das Equipment soll Studierenden im Rahmen von Abschlussarbeiten, dem dreitägigen Observatoriumspraktikum (Winter School) oder auch den Lab-Rotations im kommenden Masterstudiengang Remote Sensing and Geoinformation am GIK für längere Zeit zur Verfügung gestellt werden, ohne dafür auf Geräte zurückgreifen zu müssen, die eigentlich für den Observatoriumsbetrieb vorgesehen sind.

Literatur

- Emter, D. und Zürn, W. (1985): Observation of local elastic effects on earth tide tilts and strains. In: *Earth Tides*. Hrsg. von J. C. Harrison. New York: Van Nostrand Reinhold, S. 309–327.
- Forbriger, T. und Heck, A. (2018): Frequency response of the superconducting gravimeter SG056. In: *Festschrift zu Verabschiedung von Prof. B. Heck*. Hrsg. von A. Heck und PSG-Gruppe. Karlsruher Institut für Technologie: Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, S. 57–67. DOI: DOI10.5445/KSP/1000080212.
- Forbriger, T., Widmer-Schmidrig, R., Wielandt, E., Hayman, M. und Ackerley, N. (2010): Magnetic field background variations can limit the resolution of seismic broad-band sensors. *Geophysical Journal International* 183(1):303–312. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04719.x.
- Forbriger, T. (2007): Reducing magnetic field induced noise in broad-band seismic recordings. *Geophysical Journal International* 169(1):240–258.
- Häfner, R. und Widmer-Schmidrig, R. (2013): Signature of 3-D density structure in spectra of the spheroidal free oscillation ${}_0S_2$. *Geophysical Journal International* 192(1):285–294. DOI: 10.1093/gji/ggs013.
- Hartmann, T. und Wenzel, H.-G. (1995): The HW95 tidal potential catalogue. *Geophysical Research Letters* 22(24):3553–3556. DOI: 10.1029/95GL03324.
- Kurrle, D. und Widmer-Schmidrig, R. (2008): The horizontal hum of the Earth: a global background of spheroidal and toroidal modes. *Geophysical Research Letters* 35(6):1–5. DOI: 10.1029/2007GL033125.
- Mälzer, H. und Wenzel, H.-G. (1993): Das Geowissenschaftliche Gemeinschaftsobservatorium Schiltach. In: *Festschrift zur 125-Jahr-Feier des Geodätischen Instituts*. Universität Fridericiana Karlsruher (TH): Geodätisches Institut, S. 61–64.
- Müller, T. und Zürn, W. (1983): Observation of gravity changes during the passage of cold fronts. *Journal of Geophysics* 53:155–162.
- Neuberg, J., Hinderer, J. und Zürn, W. (1990): On the Complex Eigenfrequency of the Nearly Diurnal Free Wobble and its Geophysical Interpretation. In: *Variations in Earth Rotation*. Hrsg. von D. D. McCarthy und W. E. Carter. American Geophysical Union (AGU), S. 11–16. ISBN: 9781118666531. DOI: 10.1029/GM059p0011.
- Rosat, S. und Hinderer, J. (2011): Noise Levels of Superconducting Gravimeters: Updated Comparison and Time Stability. *Bull. Seism. Soc. Am.* 101(3):1233–1241. DOI: 10.1785/0120100217.
- Schroth, E., Forbriger, F., Westerhaus, M., Müller, M., Mehra, A. und Liu, L. (2016): Investigation of the non-stationary ocean loading with ARTOFS and STORMTIDE ocean models. 18th International Symposium on geodynamics and Earth Tides, Trieste, 5.-9. Juni 2016.
- Stammler, K. und Ceranna, L. (2016): Influence of Wind Turbines on Seismic Records of the Gräfenberg Array. *Seismological Research Letters* 87(5):1075. DOI: 10.1785/0220160049.
- Wenzel, H.-G. (1997a): Analysis of earth tide observations. In: *Tidal Phenomena*. Hrsg. von H. Wilhelm, W. Zürn und H.-G. Wenzel. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 59–75. DOI: 10.1007/BFb0011457.
- Wenzel, H.-G. (1997b): Tide-generating potential for the earth. In: *Tidal Phenomena*. Hrsg. von H. Wilhelm, W. Zürn und H.-G. Wenzel. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 9–26. DOI: 10.1007/BFb0011455.
- Widmer, R. und Zürn, W. (1992): Bichromatic excitation of long-period Rayleigh and air waves by the Mount Pinatubo and El Chichón volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters* 19(8):765–768. DOI: 10.1029/92GL00685.
- Widmer, R., Zürn, W. und Masters, G. (1992): Observation of low-order toroidal modes from the 1989 Macquarie Rise event. *Geophysical Journal International* 111(2):226–236. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1992.tb00572.x.
- Widmer-Schmidrig, R. (2003): What Can Superconducting Gravimeters Contribute to Normal-Mode Seismology? *Bulletin of the Seismological Society of America* 93(3):1370–1380. DOI: 10.1785/0120020149.
- Widmer-Schmidrig, R., Duffner, P., Forbriger, T. und Zürn, W. (2018): Observing the Earth's magnetic field in an underground observatory: a case study from BFO. In: *Festschrift zu Verabschiedung von Prof. B. Heck*. Hrsg. von A. Heck und PSG-Gruppe. Karlsruher Institut für Technologie: Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, S. 281–293. DOI: DOI10.5445/KSP/1000080251.
- Zürn, W. (2014): Listening to the Earth. In: Bohlen, T., Bonjer, K.-P., Forbriger, T., Fuchs, K., Gottschämmer, E., Heidbach, O., Hubral, P., Knopf, P., Mann, J., Müller, B., Prodehl, C., Ritter, J., Wenzel, F., Wilhelm, H. und Zürn, W. *50 Years Geophysical Institute Karlsruhe, 1964 to 2014 – Expectations and Surprises*. Hrsg. von C. Prodehl. Karlsruhe, Germany: Geophysical Institute (KIT), Karlsruhe, S. 285–310. DOI: 10.5445/IR/1000043692.
- Zürn, W., Exß, J., Steffen, H., Kroner, C., Jahr, T. und Westerhaus, M. (2007): On reduction of long-period horizontal seismic noise using local barometric pressure. *Geophysical Journal International* 171(2):780–796. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2007.03553.x.

- Zürn, W., Laske, G., Widmer-Schmidrig, R. und Gilbert, F. (2000): Observation of Coriolis coupled modes below 1 mHz. *Geophysical Journal International* 143(1):113–118. DOI: 10.1046/j.1365-246x.2000.00220.x.
- Zürn, W. und Widmer, R. (1996): World-Wide Observation of Bichromatic Long-Period Rayleigh-waves Excited During the June 15, 1991 Eruption of Mount Pinatubo. In: *Fire and Mud : Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines*. Hrsg. von C. Newhall und R. Punongbayan. Seattle: Philippine Institute of Volcanology, Seismology, Quezon City und University of Washington Press, S. 615–624.
- Zürn, W. und Wielandt, E. (2007): On the minimum of vertical seismic noise near 3 mHz. *Geophysical Journal International* 168(2):647–658. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.03189.x.
- Zürn, W. und Widmer, R. (1995): On noise reduction in vertical seismic records below 2 mHz using local barometric pressure. *Geophysical Research Letters* 22(24):3537–3540. DOI: 10.1029/95GL03369.