

# Simultane Messungen mit zehn Scintrex-CG-5-Gravimetern im stationären Parallelbetrieb

## Simultaneous Measurements with ten Scintrex CG-5 Gravimeters in a Stationary Mode

Ron Schlesinger, Matthias Cieslack

Eine mehrtägige parallele Schwereregistrierung mit zehn Scintrex-CG-5-Gravimetern wurde 2013 auf einem Messpfiler der gravimetrischen Referenzstation Bad Homburg durchgeführt, um Unterschiede im Messverhalten individueller Gravimetersensoren herauszufinden. Als Referenz stand ein parallel messendes Supraleitgravimeter des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) zur Verfügung. Bei den individuellen Sensoren des gleichen Scintrex-Bautyps wurden lineare und vereinzelt auch quadratische Standdriften ermittelt und die individuellen Driften als Folge der vorangegangenen Transporte und der instrumentellen Anpassungen an die stationären Bedingungen sichtbar. Ein instrumententypisches Einlaufverhalten in der Neigung und der Sensortemperatur konnte festgestellt werden. Eine vergleichende Analyse mit Allan-Varianz und Wavelet-Diagramm aller geprüften Instrumente lässt Rückschlüsse auf die Qualität der Sensoren und deren Eignung für präzise Schweremessungen zu.

**Schlüsselwörter:** Relativgravimeter, lineare Drift, quadratische Drift, Sensorrauschen, Allan-Varianz, Wavelet-Analyse, Scintrex, CG-5

*The idea of this comparison was to find differences in the characteristic of individual gravimeter sensors. Therefore, ten CG-5 gravimeters measured at the same time on the same pier at the gravimetric reference station Bad Homburg. A parallel recording superconducting gravimeter of the BKG provided a precise reference value. It could be shown, that the individual sensors had their particular linear drift and in one case even a strong quadratic drift. After transportation to the site, all instruments have shown similar tilt and temperature behavior in their start-up phase. To quantify the behavior of the instruments, Allan-variance and a wavelet transform were calculated for each gravimetric dataset. This allows a ranking in quality and an overview of the appropriate instrument for precise gravity measurements.*

**Keywords:** Relative gravimeter, linear drift, quadratic drift, sensor noise, Allan variance, wavelet-analysis, Scintrex, CG-5

### 1 HINTERGRUND

Während des „3. Erfahrungsaustauschs der Scintrex-CG-5-Anwender in Deutschland“ in Koblenz (19.02.–20.02.2013) wurden die Ergebnisse einer mehrtägigen simultanen Schwereregistrierung mit den Scintrex-CG-5-Instrumenten der Universität Bonn und des Landesamts für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz diskutiert. Daraus entwickelte sich die Idee, erneut solch eine Parallelregistrierung mit den Gravimetern aller Teil-

nehmer des Erfahrungsaustauschs über die Osterfeiertage 2013 durchzuführen. Die gravimetrische Referenzstation im Schloss Bad Homburg vom Referat „Metrologie der Schwere“ des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (BKG) erschien dafür besonders geeignet. Sie ist seit 1980 in Betrieb und mit einem kontinuierlich messenden supraleitenden Gravimeter ausgestattet. Die vier ca. 1,80 m tief gegründeten Messpfiler sind auf anstehenden Fels

Nr.	Institution	Beobachter
044	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)	Falk
191	Universität Stuttgart	Schlesinger
202	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)	Falk, Lothhammer
211	Leibniz-Institut für angewandte Geophysik (LIAG)	Vogel
496	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)	Reinhold
500	Universität Hamburg	Dehghani
647	Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz (LVermGeo)	Cieslack
670	Landesamt für Vermessung und Geoinformation des Freistaats Thüringen (TLVermGeo)	Gantze
807	Universität Bonn	Shabanloui
955	Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN)	Plüß

Tab. 1 | Instrumentennummer und Institutionen der Vergleichsmessung

Beobachter	Software	Publikation
Cieslack	Matlab	Homepage LVermGeo RP
Falk	TSoft	4. Scintrex-Anwendertreff
Schlesinger	Matlab	4. Scintrex-Anwendertreff
Shabanloui	Matlab	Vortrag Geodätische Woche
Vogel	Excel	Jahresbericht LIAG

Tab. 2 | Auswertung bisher

errichtet und vom Rest des Observatoriums entkoppelt, welches wiederum über eine Stabilisierung für Temperatur und Luftfeuchte verfügt /Wilmes & Falk 2006/. Für die zehn überprüften Gravimeter mit einem Beschaffungspreis von ca. 90 000 Euro pro Einzelinstrument (vgl. Tab. 1) lagen somit im Messkeller des Schlosses optimale, stabile Messbedingungen vor. Das Team des BKG übernahm die wissenschaftliche und technische Organisation dieser Vergleichskampagne im Messlabor. Da die Ergebnisse des Vergleichs bisher in zu geringem Umfang der Öffentlichkeit präsentiert wurden (vgl. Tab. 2), sollen sie nun einem breiteren Publikum vorgestellt werden.

## 2 VERSUCHSAUFBAU

Im gravimetrischen Labor des Referats „Metrologie der Schwere“ des BKG wurde der Pfeiler C für die Vergleichsmessung genutzt (Abb. 1). In unmittelbarer Nachbarschaft auf Pfeiler E befindet sich das dauerhaft installierte Supraleitgravimeter SG044. Alle zehn Instrumente fanden ausreichend Platz auf der 1,73 m × 1,72 m großen Pfeilerplatte (Abb. 2). Die Temperaturschwankungen waren aufgrund der Klimatisierung des Labors ( $\pm 0,2$  °C) vernachlässigbar.

Um die Umgebungseinflüsse zu kompensieren, verfügt das SG044 neben dem Barometer über verschiedene Temperatursensoren, Neigungs- und Druckmesser. Auf Grundlage der sehr langen

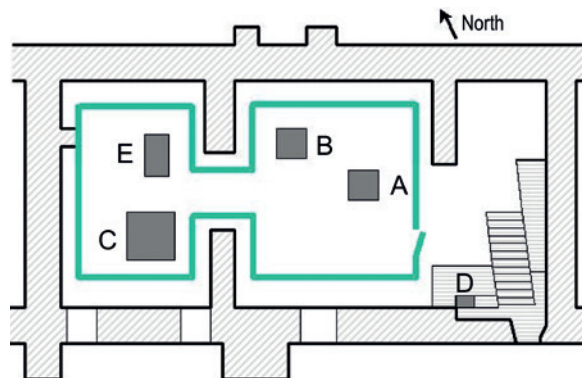


Abb. 1 | Grundriss des gravimetrischen Labors Bad Homburg /Wilmes &amp; Falk 2006/



Abb. 2 | Zehn Scintrex CG-5 auf dem Pfeiler C im Messlabor Bad Homburg sowie das SG044 auf Pfeiler E (hinten links)

Messdatenreihe des Supraleitgravimeters sind hochgenaue Gezeitenreduktionen für Bad Homburg bekannt. Diese wurden zusammen mit den Luftdruckreduktionen mithilfe der Barometerdaten des SG044 für die Auswertung der Datenreihen der zehn Scintrex CG-5 zur Verfügung gestellt. Die Daten der Scintrex-Gravimeter wurden versehentlich mit einer Rate von 1/61 Hz (55 s Messintervall + 6 s Mittelbildung und Speicherung der Daten) statt 1/60 Hz gemessen. Für die Vergleichbarkeit der Schweresignale wurde die Zeitreihe des SG044 auf 1/60 Hz interpoliert. Im Signal des SG044 war die Instrumentendrift von etwa 4  $\mu\text{Gal}$  pro Jahr im fünftägigen Vergleichszeitraum vernachlässigbar. Für die zehn Federgravimeter lag damit eine sehr gute Referenzzeitreihe vor.

Vor dem Start der Vergleichsmessungen wurden von den Experten der beteiligten Institutionen an den Gravimetern alle instrumentellen Überprüfungen (Offset & Sensitivität der Neigungen, Drift) durchgeführt. Der interne Speicher der Gravimeter wurde gelöscht, Datum und Uhrzeit wurden mit einer Funkuhr verglichen und gegebenenfalls korrigiert. Die Grundeinstellung aller Instrumente wurde auf die Werte aus Tab. 3 festgelegt. Eine Gezeitenreduktion (TideCorrection) sollte nicht angebracht werden. Eine kontinuierliche Korrektur bzgl. Horizontierungsabweichungen (ContTiltCorrection) wurde aber berücksichtigt. Auch eine Grobfehlerelimination (AutoReject) wurde eingeschaltet. Der Parameter ReadTime mit 55 Sekunden besagt, dass über 55 Sekunden

„Autograv Setup“-Parameter	Wert
TideCorrection	no
ContTiltCorrection	yes
AutoReject	yes
TerrainCorrection	no
SeismicFilter	no
SaveRAWdata	no
„Option“-Parameter	
ReadTime	55
NumberOfCycles	99998
LCDHeater	off
RecordAmbientTemperature	yes

Tab. 3 | Einstellung der Gravimeter (die Erklärung der Parameter erfolgt im Text)

hochfrequent Rohdaten abgegriffen werden und dann nach Mittelbildung ein einziger abzuspeichernden Wert erhalten wird. Nach wenigen Sekunden Messpause (für Online-Rechnungen und Abspeichern) wiederholt sich der Messprozess. Auf die Nutzung des vom Hersteller bereitgestellten Filters (SeismicFilter) wurde verzichtet. Die Umgebungstemperatur (RecordAmbientTemperature) wird ebenfalls von jedem CG-5-Instrument mit registriert.

Das Instrument 807 hatte jedoch die „Autograv Setup“-Parameter allesamt auf „no“ eingestellt. Für die kontinuierliche

Neigungskorrektur war diese Einstellung bei den vorhandenen Messbedingungen auf dem Pfeiler vernachlässigbar. Die ausgeschaltete Ausreißerdetektion fiel in diesem Vergleich in der sehr ruhigen Umgebung des Schwerelabors gegenüber den anderen Instrumenten nicht auf (vgl. Registrierung des Erdbebens in Abb. 7). Bei der Abholung der Instrumente wurden die Uhren verglichen und Restabweichungen in Sekunden notiert. Die Gravimeter wurden am 26./27.03. aufgestellt und am 02. bzw. 04.04. abgeholt. Durch eine zweite manuelle Neigungskorrektur in den ersten Stunden der Vergleichskampagne betrug die ungestörte Parallelmessung ca. 4,5 Tage.

Die Instrumentenparameter der zehn beteiligten Scintrex-Gravimeter sind in Tab. 4 dargestellt. Die zehnstellige Seriennummer (SNr), welche zum Zeitpunkt des Vergleichs bei Scintrex vereinfacht das Schema JJMMVVNNN hat, gibt vermutlich Auskunft über Herstellungsjahr (J) und -monat (M), eine interne Nummer von Scintrex (V) und die laufende Nummer (N) in der „Serienproduktion“ bei Scintrex. Die Spalte Firmware zeigt die damals installierte Firmware zum Zeitpunkt des Vergleichs. Die Teilnehmer hatten im Messprotokoll zudem das Jahr der Beschaffung und die Transportart nach Bad Homburg anzugeben. Der Wert Gcal1 ist eine lineare Kalibrierkonstante des Messsystems, um die gemessenen Voltwerte am Analog-Digital-Wandler in Schwerewerte umzurechnen. Drift ist die lineare Standdrift vor der Vergleichsmessung für das jeweilige Instrument. In der Zeile Sensor wird der sogenannte „Sensorcheck“-Wert aus den Instrumenten wiedergegeben, welcher anliegt, um die Probemasse im Gleichgewicht zu halten, und

CG-5	Uni-HH	BKG-Lei	LV-RP	BKG-A10	BKG-FG5	LIAG	LV-TH	LV-NI	Uni-BN	Uni-S
SNr	081240500	081240496	101040647	040300044	930309202	061050211	100840670	120840955	110940807	0608000191
Firmware	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.2	4.1	4.1
Jahr	2009	2009	2011	2004	2007 (1993)	2007	2010	2012	2011	2006
Transport	ICE	PKW	VW Bus	VW Bus	VW Bus	PKW	VW Bus	PKW	PKW	PKW
Gcal1	9516,527	9487,400	9118,221	8867,722	8803,104	8777,807	8594,145	8271,132	7650,078	6721,453
Drift in mGal/d	1,358	0,394	0,828	0,518	0,240	0,465	0,555	3,759	-0,140	0,257
Sensor in V	3,243	3,499	3,291	2,901	2,666	2,922	3,119	3,103	3,199	3,739
TiltxS in arcsec/V	628,772	648,101	682,610	608,808	802,822	640,071	628,279	714,179	640,302	660,409
TiltyS in arcsec/V	645,352	670,040	608,246	609,115	980,432	590,127	622,393	733,798	645,805	655,239
TiltxO in arcsec	-34,566	-52,977	6,827	11,666	60,454	43,105	30,993	-2,473	25,745	-123,232
TiltyO in arcsec	7,133	82,566	-45,118	9,796	-20,764	-44,874	56,776	28,782	24,686	145,640
TempCo in mGal/mK	-0,128	-0,123	-0,127	-0,129	-0,138	-0,136	-0,130	-0,124	-0,122	-0,127
Zeitdiff in s	+1	+1	0	-5	0	+1	-1	-58	0	-4

Tab. 4 | Übersicht der Parameter der Gravimeter sortiert nach Gcal1

der laut Scintrex-Anleitung zwischen 2 und 4 Volt liegen soll und somit wiederum Rückschlüsse über den noch zu erwartenden Messbereich des Instruments möglich macht. TiltxS, TiltyS und TiltxO, TiltyO sind die kalibrierten Werte für die Sensitivität und Offsets in X- und Y-Richtung der verbauten Neigungssensoren in den Instrumenten. Der Wert TempCo ist ein Faktor für die temperaturabhängige Quarzfeder des Sensors; dieser korrigiert Abweichungen der Sensortemperatur von 45 °C.

### 3 DARSTELLUNG DER INTERNEN MESSWERTE

In den folgenden Diagrammen werden die registrierten Messdaten der einzelnen Gravimeter zeitlich parallel und mit einem Versatz in  $y$ -Richtung dargestellt. Vergleicht man die Graphen miteinander, so sind individuelle Verhaltensweisen der untersuchten Gravimeter deutlich zu erkennen.

Es können zwei Untersuchungsabschnitte für den Gesamtvergleichszeitraum (26./27.03. bis 02.04.2013) definiert werden:

1. den Einlauf-/Aklimatisierungszeitraum, welcher nach der zusätzlichen Neigungskorrektur ungefähr am 28.03. um 07.00 (UT) endet und ein Anpassungsverhalten der Gravimeter zum einen aufgrund des vorherigen Transports nach Bad Homburg und zum anderen aufgrund der neuen Umgebung zeigt,
2. den stabilen Vergleichszeitraum mit deutlich stabilerem instrumentellen Verhalten, welcher am 28.03. um 12.00 (UT) beginnt und am 02.04. um 06.00 (UT) endet, da kurz darauf die ersten Instrumente abgeholt werden.

#### 3.1 Lokales Gezeitenmodell

In *Abb. 3* ist gut zu erkennen, dass die interne Gezeitenkorrektur des CG-5 mit der Modellierung nach Longman zu ungenau ist und die nachträgliche Gezeitenkorrektur mit der Software ETGTAB /Timmen & Wenzel 1995/ vorzuziehen ist. Für eine übersichtlichere Darstellung sind die Graphen in *Abb. 3* mit einem Versatz von 2  $\mu\text{Gal}$  und 4  $\mu\text{Gal}$  dargestellt. Ein großer Vorteil für diesen Vergleich war das sehr genaue Gezei-

tenmodell für Bad Homburg aus der Analyse der langjährigen SG044-Zeitreihe. Die resultierende Restkurve des SG044 schwankte um maximal 0,5  $\mu\text{Gal}$  u.a. auch aufgrund geophysikalischer Restsignale, wie ungenügender Luftdruckreduktion bei Wetterunregelmäßigkeiten oder auch durch die Attraktionswirkung eines Fahrzeugs, welches zeitweise auf dem Schlosshof an der Hauswand zum Gravimeterkeller geparkt wurde.

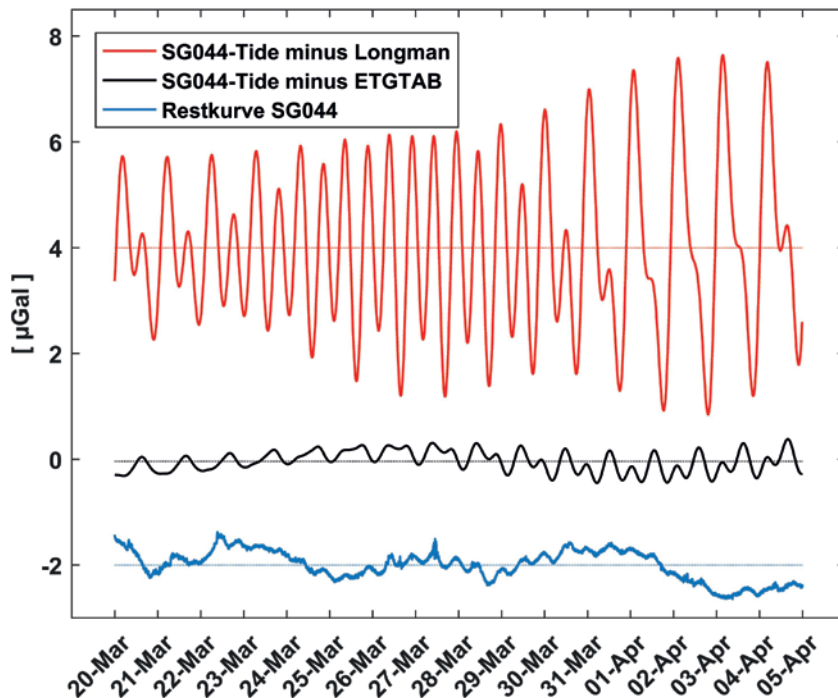


Abb. 3 | Differenzen des lokalen Gezeitenmodells zur internen Longman-Gezeitenreduktion des CG-5 (rot) und den synthetischen Gezeiten des ETGTAB (schwarz); zum Vergleich das geophysikalische Restsignal des SG044 (blau)

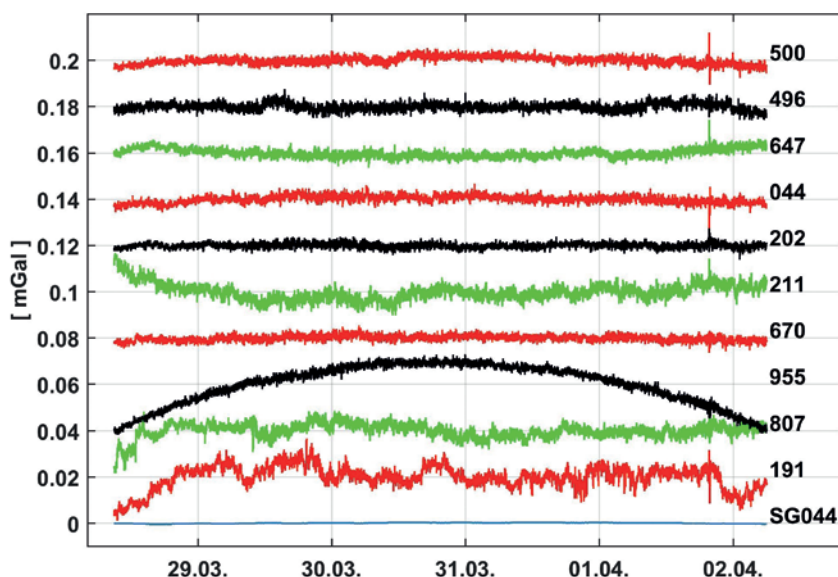


Abb. 4 | Datenreihen nur mit linearer Driftkorrektur (rechts: Gravimeter-SNr.)

### 3.2 Standdrift im stabilen Vergleichszeitraum

Nach Anbringen der hochgenauen Reduktionen (Gezeiten, Luftdruck) an die Messreihen der Scintrex-CG-5-Gravimeter sind im Wesentlichen nur noch interne Ungenauigkeiten der Sensoren zu sehen. Hier fällt zunächst die individuell nachzu-korrigierende Standdrift aller CG-5 während der Messung auf. Diese wird von Alter und Materialeigenschaften der einzelnen Quarzfedern sowie den Einsätzen der Gravimeter einige Wochen bis Monate vor der Vergleichsmessung beeinflusst. Da eine lineare Korrektur nicht bei allen Instrumenten ausreichte (Abb. 4), wurde auch mit einem Polynom 2. Grades korrigiert (Abb. 5). Aus diesen korrigierten Messreihen wurden dann die Driftkorrekturen und die statistischen Parameter für die Messreihen bestimmt (Tab. 5). Signifikant war diese quadratische Korrektur jedoch nur für das Instrument 955, welches zu diesem Zeitpunkt gerade ein halbes Jahr alt war. Die Ausdehnung der Sensorfeder nahm hier noch extrem, aber zugleich gleichmäßig ab. Das zum Zeitpunkt des Vergleichs 1,5 Jahre alte und damit zweitjüngste Instrument 807 hingegen hatte in der Vergleichsmessung fast keine Drift (vgl. Tab. 4).

### 3.3 Anfangsdriften nach dem Transport

Für die Vergleichsmessung gab es keine Vorgaben für den Transport nach Bad Homburg. Neun von zehn Instrumenten wurden mit der Scintrex-Transportbox gebracht. Damit waren extreme Neigungen der Gravimeter während des Transports und somit Hysterese-Effekte eher unwahrscheinlich /Reudink et al. 2014/.

Das Instrument 500 wurde in der Schultertasche von Scintrex mit dem ICE transportiert. Eine Hysterese wäre hier wahrscheinlich, war aber in den Daten nicht zu sehen. Bei diesem Instrument kam es jedoch zu einem plötzlichen Datensprung um ca.  $-13,5$  mGal am Schweresensor am 26.03. zwischen 21.59 bis 03.18 Uhr – sechs Stunden nach dem Aufbau auf dem Messpfeiler. Die Sensormasse war nicht mehr frei beweglich und haftete an einer der Begrenzungen, sodass die Feedback-Messelektronik nur noch einen maximalen Wert lieferte. Die weiteren internen Sensoren

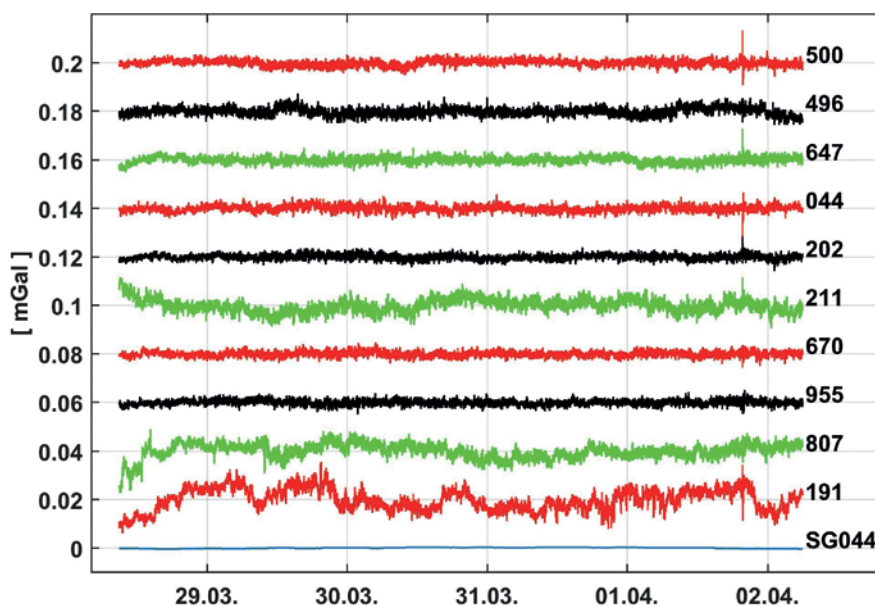


Abb. 5 | Datenreihen nach linearer und quadratischer Driftkorrektur (rechts: Gravimeter-SNr.)

SNr.	Lin. Drift in mGal/Tag	Quadr. Drift in mGal/Tag	max. Abw. Einzelwerte von Null in mGal	min. Abw. Einzelwerte von Null in mGal	Std.abw. einer Einzelmessung in mGal
500	0,415	-0,0006	-0,009	0,013	0,001
496	0,396	0	-0,006	0,007	0,002
647	0,841	0,0007	-0,005	0,013	0,001
044	0,494	-0,0006	-0,011	0,007	0,001
202	0,234	0	-0,006	0,009	0,001
211	0,477	0,0013	-0,009	0,012	0,003
670	0,551	-0,0003	-0,005	0,005	0,001
955	1,536	-0,0049	-0,005	0,005	0,001
807	0,011	-0,0003	-0,017	0,009	0,003
191	0,270	-0,0013	-0,014	0,015	0,005

Tab. 5 | Statistische Parameter der Messreihen

des Instruments liefen einwandfrei während dieser Zeit, ebenso auch die anderen Instrumente auf dem Messpfeiler (vgl. Abb. 6). Ähnliche „Verklebungs“-Effekte am Sensor sind bekannt nach größeren Erschütterungen und lassen sich durch leichtes Klopfen am Instrument wieder lösen.

Die drei Instrumente des BKG zeigten, im Gegensatz zu den anderen Instrumenten, nur im sehr geringen Maß ein auffälliges Einlaufverhalten. Dies lag daran, dass diese schon längere Zeit vor Ort waren. Die Gravimeter 191, 807 und 211 wiesen in den ersten 24 Stunden jeweils eine abklingende Anfangsdrift von ca.  $50$   $\mu$ Gal/Tag auf. Eine deutliche, aber geringere anfängliche Drift zeigten dagegen die Instrumente 647 und 955. Hier waren es etwa  $15$   $\mu$ Gal über ca. 6 Stunden.

Das Instrument 670 zeigte ein sehr geringes Driftverhalten im Schwerewert. Dies könnte daran liegen, dass die Transportbox durch eine zusätzliche Schaumstoffpackung während des Transports geschützt wurde. Im Akklimatisierungszeitraum wurde Instrument 670 jedoch kurz nach dem Aufbau auf dem Pfeiler gestört. Die eingeschaltete Ausreißer-Detektion erzielte genau während dieser kurzen Phase der Messung zu niedrige Schwerewerte.

### 3.4 Neigungsanpassung

In den jeweils ersten drei Stunden der Akklimatisierung verringerte sich bei allen Gravimetern die  $Y$ -Neigung um 15–20 Bogen Sekunden (Abb. 7). Die BKG-Instrumente waren schon länger vor

Ort und zeigten dieses Verhalten nicht. Dieser bekannte Effekt könnte möglicherweise durch die Anordnung der internen Neigungsmesser (vor allem in der  $Y$ -Neigung) bedingt sein. Wie sich bei der Demontage eines defekten CG3 durch das BKG zeigte, sind bei den Scintrex-Gravimetern zum Schutz des Messsystems und zur Isolation gegen Vibrationen spezielle Silikon-Dämpfungselemente aus der Luftfahrtindustrie (Barry T-Mounts) verbaut. Der Sensor mit der Quarzfeder ist daher nur über drei obere und drei untere Silikon-elemente mit der Aufstellfläche des Gravimeters verbunden. Da diese „Schockabsorber“ nicht alle exakt gleichmäßig auf den Beginn der „Ruhe“-Phase reagieren, werden so die Einlaufeffekte nach anfänglicher Horizontierung der Gravimeter erklärbar.

Beim Aufbau auf der Pfeilerplatte wurden die Gravimeter einheitlich nach Norden orientiert. Eine echte Neigung des Pfeilers müsste daher in der Grafik zeitsynchron bei allen Instrumenten gleichzeitig zu sehen sein.

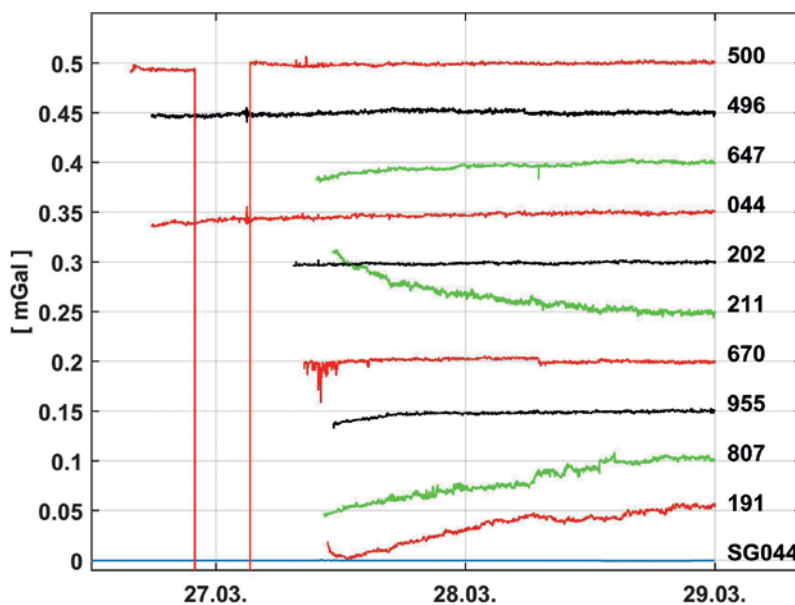


Abb. 6 | Schweremessreihen im Akklimatisierungszeitraum in mGal (rechts: Gravimeter-SNr.)

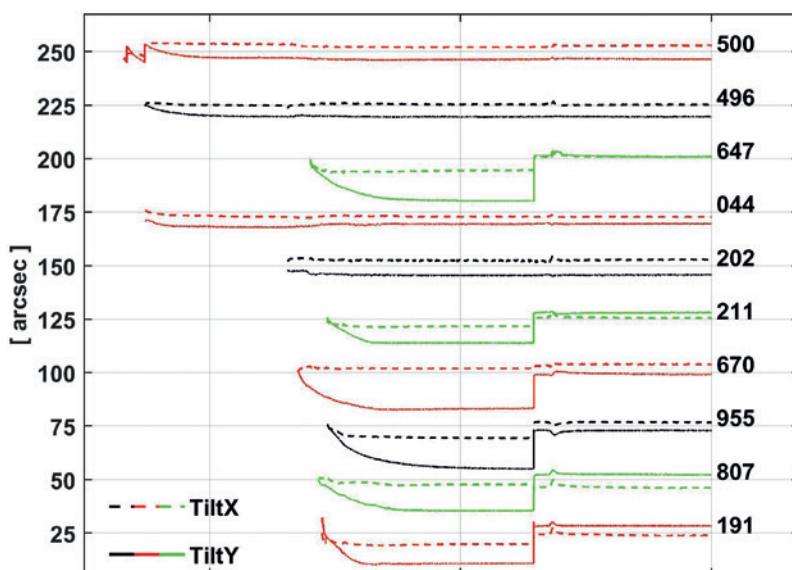


Abb. 7 | Neigungsverhalten im Akklimatisierungszeitraum in Bogensekunden (rechts: Gravimeter-SNr.)

### 3.5 Temperaturanpassung

In der ersten halben Stunde war bei den meisten Instrumenten ein starkes Einlaufverhalten am internen Temperaturabgriff direkt am Schweresensor zu beobachten. Dies betraf insbesondere jene Instrumente, die unmittelbar nach der Ankunft entpackt und sofort zur Datenregistrierung eingeschaltet wurden. Bei den Instrumenten 044, 496 und 202 des BKG ist wiederum zu sehen, dass sie schon vor Ort waren und den Effekt nicht zeigen (Abb. 8).

### 3.6 Erdbeben

Am 01.04.2013 18:53:19 UTC fand ein Erdbeben der Magnitude 5,9 auf 39,45° N und 143,07° E (Küste von Honshu, Japan) in 21 km Tiefe statt. Dieses konnte als einziges Ereignis über dem Rauschlevel mit allen Gravimetern verfolgt werden (Abb. 9). Durch die eingeschaltete Ausreißer-Detektion und der Mittelung der Schwerewerte über eine Minute reagierten alle Sensoren etwas unterschiedlich.

## 4 SIGNALANALYSE

Im Folgenden werden die Zeitreihen der Schweremessungen über den stabilen Vergleichszeitraum analysiert, um die Qualitätsunterschiede der Sensoren quantitativ zu erfassen.

### 4.1 Allan-Varianz

Wie in /Friedrichs 2010/ ausgeführt, wird hier ebenso die Stabilität eines Gravimetersensors mittels Allan-Varianz ermittelt. Allan-Varianzen /Allan 1966/

werden für eine bestimmte Laufzeit im gesamten Vergleichszeitraum errechnet. Daher sind die Diagramme in *Abb. 10* wie folgt zu deuten: In der vertikalen Achse ist die Stabilität des Sensors abzulesen, die dieser im Mittel über die Laufdauer hat. Aus den Diagrammen kann entnommen werden, dass bereits nach einer Messdauer von 15 Minuten die besten Ergebnisse bei allen Sensoren erzielbar sind. Die Instrumente 955 und 202 mit geringem Rauschen unterscheiden sich von den Instrumenten 191 und 807 dahingehend, dass bei Laufzeiten länger als 15 bis 30 Minuten die Stabilität der Instrumente mit stärkerem Rauschen wieder abnimmt und insgesamt etwa  $0,5 \mu\text{Gal}$  schlechter ist. Die gleichen Instrumente zeigen in *Tab. 5* eine höhere Standardabweichung des Mittelwerts. Die ansteigenden Allan-Varianzen für diese Instrumente in der Halbtages- und Tagesperiode (720 min und 1440 min) lassen vermuten, dass die Kalibrierfaktoren (Gcal1) ungenau sind. Bei einer guten Kalibrierung der Gravimeter hingegen (vgl. Instrument 955 und 202 in *Abb. 10*) stabilisieren sich die Allan-Varianzen bei den Untersuchungen der Halbtages- und Tageslaufzeiten. Kalibrierunsicherheiten von bis zu 1 Promille sind nach /Timmen et al.2018/ nicht ungewöhnlich. Sollte es sich, wie im Nachhinein beim Gravimeter 191 festgestellt, um ein Kalibrierfehler von 2 Promille handeln, so kann bei einem fehlerhaft gemessenen Gezeitensignal von ca.  $200 \mu\text{Gal}$  ein Fehler von  $0,4 \mu\text{Gal}$  auftreten. Das SG044 hat eine 100-mal höhere Genauigkeit bei der 15-Minuten-Stabilität. Aufgrund des unmodellierten geophysikalischen Restsignals verringert sich dessen hohe Stabilität aber für Laufzeiten über zwei Stunden wieder.

## 4.2 Wavelets

Auch die Wavelet-Analyse /Louis 1998/ ermöglicht die Bestimmung der Variationen der Daten in einer Messreihe. Diese Analyse bietet zusätzlich den Vorteil einer zeitlichen Zuordnung von Ereignissen aus dem Frequenzbereich. *Abb. 11* zeigt beispielhaft das lokale Gezeitensignal in den Tagen um die Vergleichsmessung in einer kontinuierlichen Wavelet-Analyse mit dem Morlet-Wavelet.

Diese kontinuierliche Wavelet-Analyse mit dem Morlet-Wavelet wird auf alle reduzierten Schweremessreihen der Gravimeter ange-

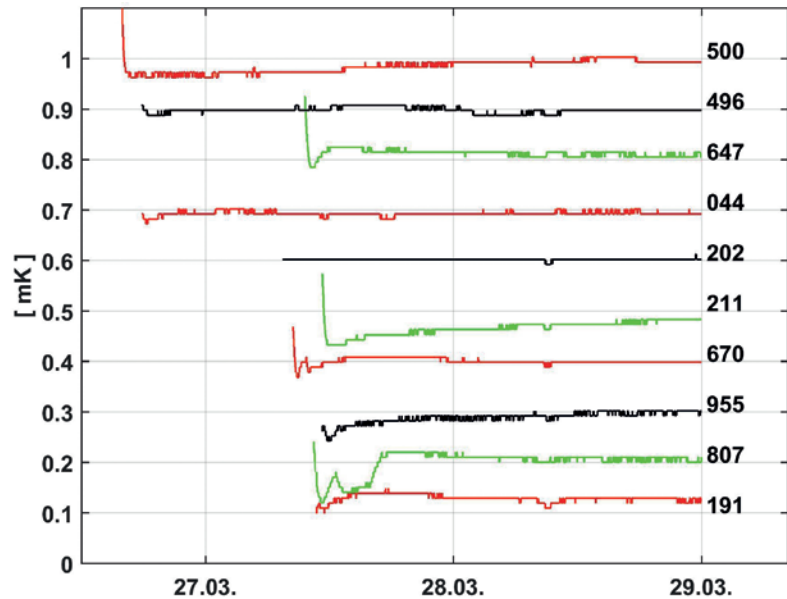


Abb. 8 | Temperaturverhalten im Akklimatisierungszeitraum in mK

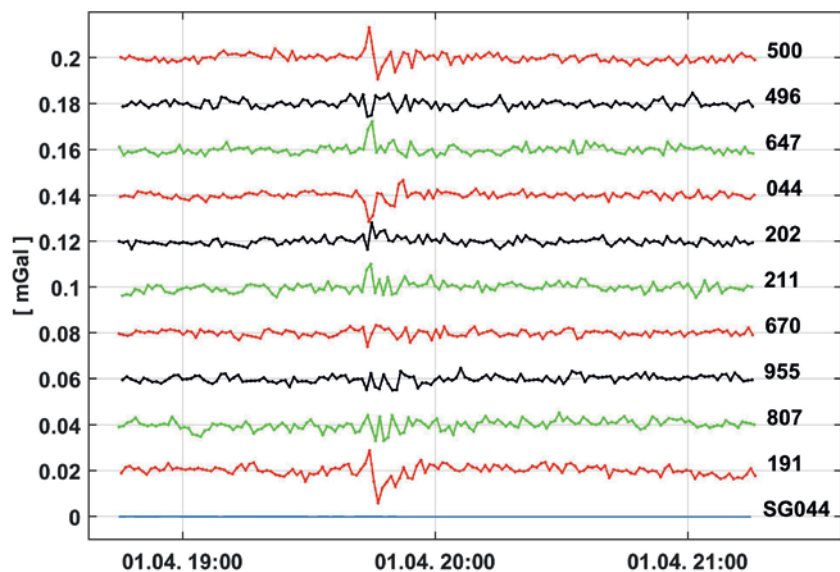


Abb. 9 | Schweredatenreihe während des Erdbebens am 01.04.2013

wandt. Für die beispielhaft ausgesuchten Gravimeter fallen für die Instrumente 191 und 807 mit stärkerem Rauschen die größeren Varianzen mit kräftiger Farbgebung auf (*Abb. 12*). Hier sind bei den Wavelets für den Zeitbereich größer 12 Stunden Magnituden mit bis zu  $2 \mu\text{Gal}$  zu sehen. Wie bei der Analyse mit den Allan-Varianzen werden auch hier die Halbtages- und Tagesperioden von der ungenügenden Kalibrierung des Faktors Gcal1 sichtbar. Im Diagramm des SG044 sind die erhöhten Varianzen im Zeitbereich von 2 bis 24 Stunden sehr gut mit dem geophysikalischen Restsignal zu erklären. Zeitliche Gemeinsamkeiten im Restsignal der Gravimeter sind in den Grafiken nicht zu erkennen. Im direkten Vergleich bleibt in fast allen Grafiken nur die Struktur im Bereich 6 bis 23 Minuten erhalten, die mit der Zeit des Erdbebens vom 01.04. übereinstimmt.

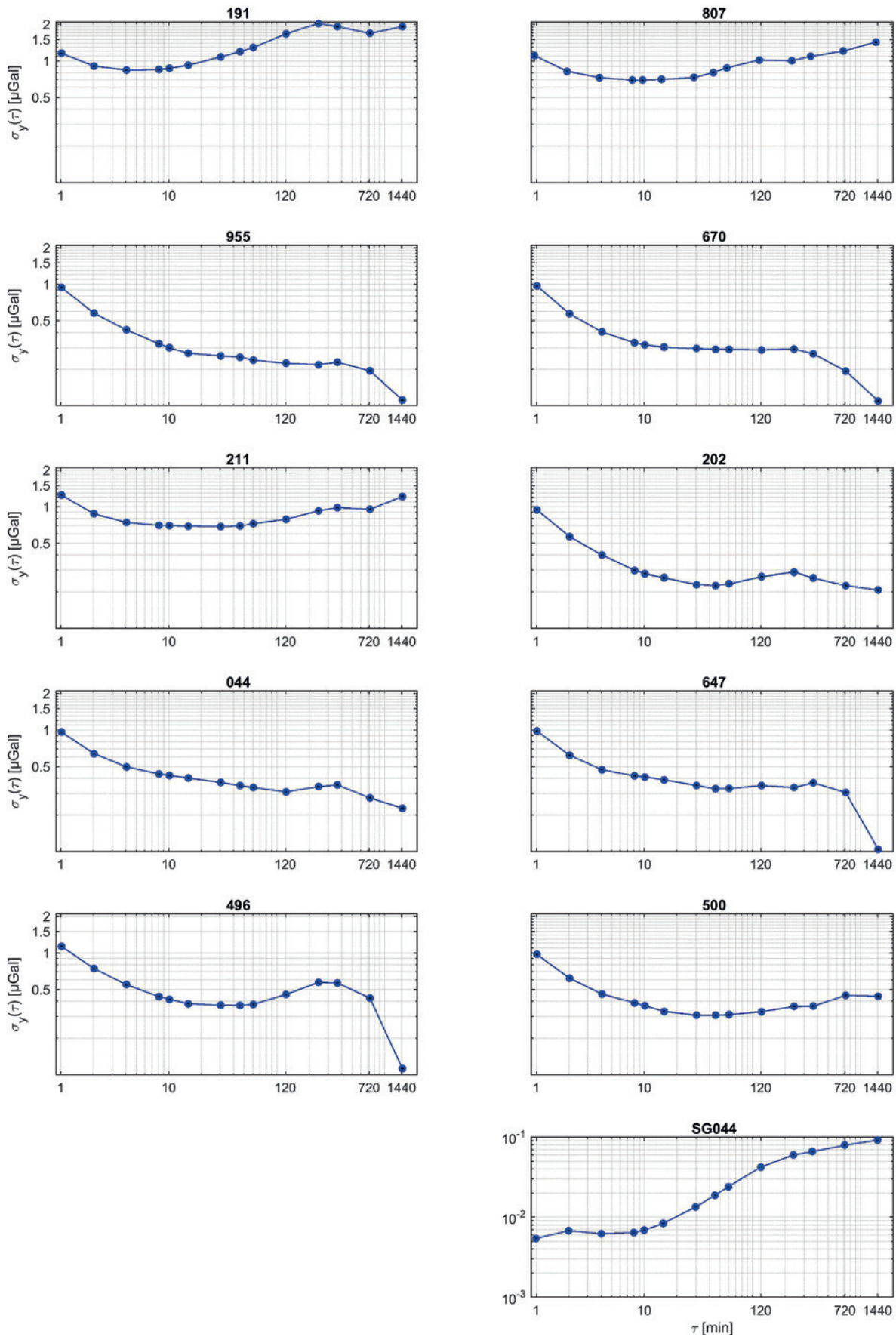


Abb. 10 | Allan-Varianzen in  $\mu\text{Gal}$  für den Zeitbereich vom 28.03. bis zum 02.04.2013 für ausgewählte Laufzeiten in Minuten



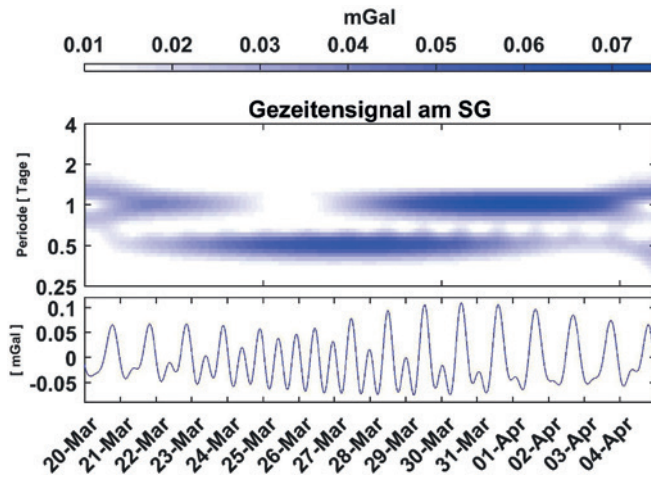


Abb. 11 | Kontinuierliche Wavelet-Transformation am Beispiel des Gezeitensignals

### 5 AUSBLICK

Aus den vorangegangenen Betrachtungen lässt sich feststellen, dass es Qualitätsunterschiede zwischen den Instrumenten gibt. Stellt man das Grundrauschen und das Driftverhalten nach Transport der Sensoren gegenüber, würde man bei Auswahlmöglichkeit für eine präzise Schweremessung sicherlich die Gravimeter 955 oder 202 bevorzugen. Anzumerken ist hierbei, dass das Instrument 955 das Neueste ist und das Instrument 202 den Sensor eines

CG-3M aus dem Jahr 1992 enthält und damit das älteste Gravimeter der Vergleichsgruppe ist. Die Instrumente 807 und 191 zeigen nicht die Qualität der Gravimeter 955 oder 202. Beides sind Instrumente, die innerhalb des universitären Lehrbetriebs häufig durch wenig geübte Personen benutzt werden. Zudem ist eine kontinuierliche Kontrolle der Langzeitstabilität der Gravimeterkalibrierungen für den Lehrbetrieb nur von untergeordneter Bedeutung. Die Unsicherheiten im Maßstab der Gravimeter zeigen sich hier durch erhöhte Varianzen in der Halbtages- und Tagesperiode des Restsignals.

Der technische und organisatorische Ablauf der Messung im Bad Homburg verlief wie erwartet. Alle Teilnehmer konnten Erfahrungen bei der Durchführung einer solchen Vergleichsmessung sammeln. Die Ergebnisse der Messung in Bad Homburg sprechen für eine Wiederholung einer solchen Kampagne.

Für eine weitere Vergleichsmessung ist es empfehlenswert, das Nutzungsverhalten der Instrumente der letzten Monate zu dokumentieren, um das Verhalten der Standdrift zu klären. Die Vereinheitlichung der Pausenzeit zwischen Anfahrt und dem Messaufbau mit anschließender Datenregistrierung (vgl. „Messtechnologie“ in /Falk 1995/) ist mit einer Dokumentation von Transportart/-dauer für genauere Aussagen zum Driftverhalten nach dem Transport nötig. Zur Deutung parallel stattfindender Ereignisse in einigen Datenreihen der Instrumente ist ein Lageplan von den Aufbaupositionen auf dem Pfeiler behilflich. Um die Datenreihen untereinander

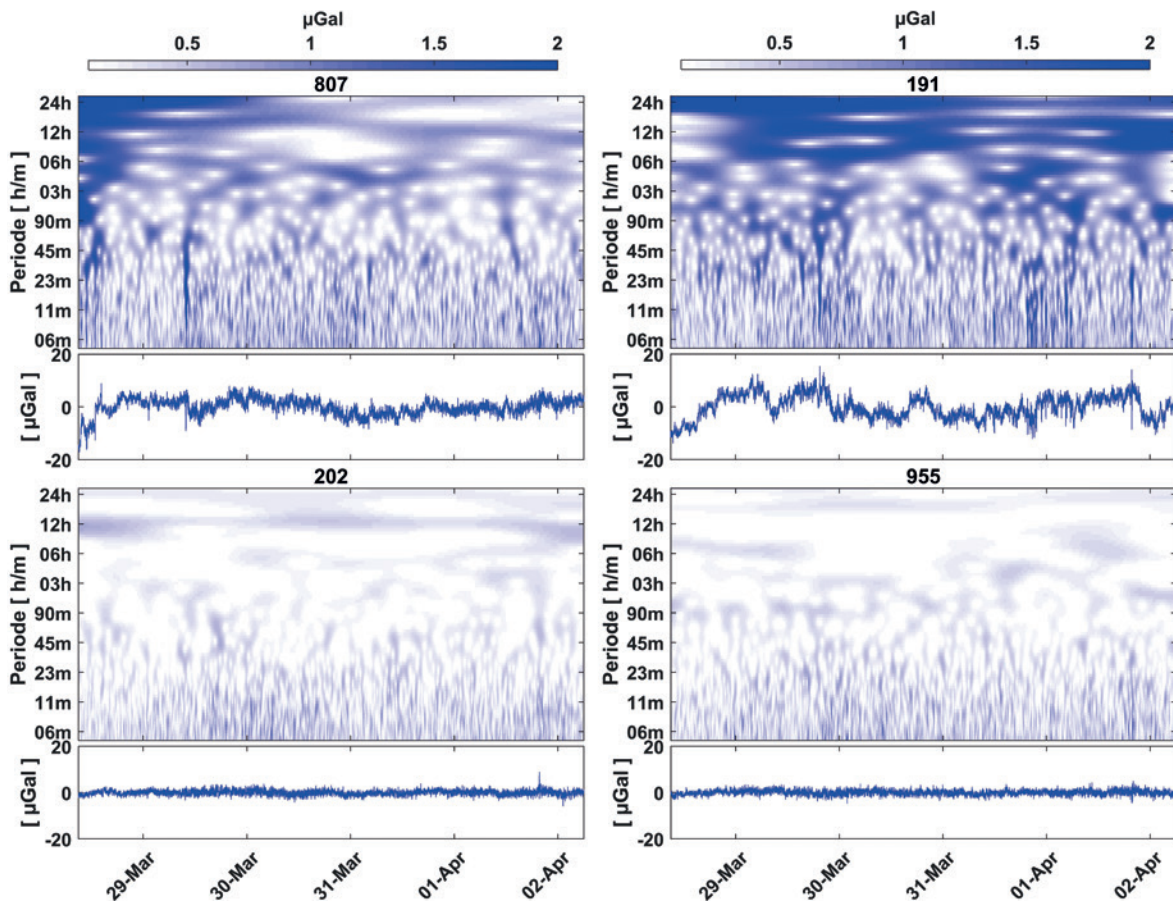


Abb. 12 | Kontinuierliche Wavelet-Transformation (Morlet-Wavelet) ausgewählter Federgravimeter

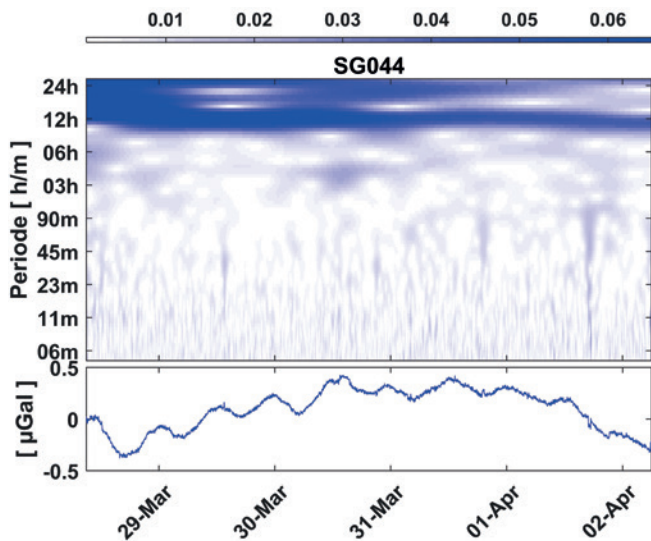


Abb. 13 | Kontinuierliche Wavelet-Transformation (Morlet-Wavelet) des SG044

vergleichbarer zu machen, ist mit einer Messdauer („Duration“) von 57 s und einheitlich ohne Datenfilterung zu registrieren. Informationen zur Bestimmung und Aktualisierung des Kalibrierfaktors „Gcal1“ sind erforderlich zur besseren Deutung der Kalibrierunsicherheit der Instrumente. Bei direktem Vergleich der Signale der Federgravimeter mit dem des Supraleitgravimeters durch Differenzbildung beider Signale wird ein noch genaueres Ergebnis erwartet. In einer weiteren Vergleichsmessung sind ebenso die neuen Scintrex-CG-6-Gravimeter miteinzubeziehen, die nun seit 2016 auch in Deutschland in der Landesvermessung im Einsatz sind.

## DANK

Für die Teilnahme an dieser Vergleichsmessung und die Bereitstellung der Daten danken wir allen beteiligten Institutionen (vgl. *Tab. 1*). Dem Team des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie danken wir herzlich für die unproblematische und professionelle Betreuung im Messlabor von Bad Homburg. Für die zahlreichen fachlichen Kommentare von Herrn Dr.-Ing. Reinhard Falk zu diesem Bericht und die detaillierten Hintergrundinformationen zum Thema bedanken wir uns ganz besonders. Innerhalb des Entstehungsprozesses hat Ludger Timmen zu einer bedeutenden Verbesserung dieses Beitrags beigetragen, wofür wir uns ebenso sehr bedanken.

## LITERATUR

- Allan, D. W. (1966): Statistics of Atomic Frequency Standards. In: Proceedings of the IEEE 54(1966)2, 221–230.
- Cieslack, M. (2017): Erste Erfahrung mit dem weltweit ersten Relativgravimeter des Typs Scintrex CG-6. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 124(2017)8-9, 264–271.
- Falk, R. (1995): Erste Erfahrungen mit dem automatischen Gravimeter SCINTREX CG-3M Autograv. In: Zeitschrift für Vermessungswesen (zfv) 120(1995)1.
- Friedrichs, T. (2010): Analysis of geodetic time series using allan variances. Bachelorarbeit, Universität Stuttgart. DOI: 10.18419/opus-3849.

Groß, B. (2012): Untersuchung des Relativgravimeters Scintrex CG-5. Masterarbeit, Universität Bonn (unveröffentlicht).

Louis, A. K.; Maaß, P.; Rieder, A. (1998): Wavelets: Theorie und Anwendungen. 2. Auflage. Teubner, Stuttgart.

MathWorks (2017): Dokumentation zur Matlab Wavelet Toolbox™. <http://de.mathworks.com/help/wavelet> (01. 12. 2017).

Reudink, R.; Klees, R.; Francis, O.; Kusche, J.; Schlesinger, R.; Shabanloui, A.; Sneeuw, N.; Timmen, L. (2014): High tilt susceptibility of the Scintrex CG-5 relative gravimeters. In: Journal of Geodesy 88(2014), 617–622. DOI: 10.1007/s00190-014-0705-0.

Scintrex Ltd. (2012): CG-5 Operation Manual – Revision 8. Concord, Ontario, Canada. <http://scintrexltd.com/support/product-manuals/>.

Timmen, L.; Falk, R.; Gabriel, G.; Lothhammer, A.; Schilling, M.; Vogel, D. (2018): Das Relativgravimeter-Kalibriersystem Hannover für  $10^{-4}$ -Maßstabsbestimmungen. In: allgemeine vermessungs-nachrichten (avn) 125(2018)5, 140–150.

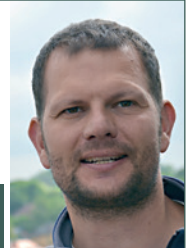
Timmen, L.; Wenzel, H. G. (1995): Worldwide synthetic gravity tide parameters. In: Sünkel, H.; Marson, I. (Hrsg.): Gravity and Geoid. Proceedings IAG Symposium, 113. Springer, Berlin/Heidelberg/New York. 92–101.

Wilmes, H.; Falk, R. (2006): Bad Homburg – a regional comparison site for absolute gravity meters. In: Francis, O.; van Dam, T. (Hrsg.): International Comparison of Absolute Gravimeters in Walferdange (Luxembourg) of November 2003. Vol. 26 of Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Seismologie (ECGS), 29–30, Luxembourg.

Dipl.-Ing. (FH) Ron Schlesinger

UNIVERSITÄT STUTTGART  
GEODÄTISCHES INSTITUT

Geschwister-Scholl-Straße 24D | 70174 Stuttgart  
ron.schlesinger@gis.uni-stuttgart.de



Dipl.-Ing. (FH) Matthias Cieslack

LANDESAMT FÜR VERMESSUNG UND  
GEOBASISINFORMATION RHEINLAND-PFALZ

Von-Kuhl-Straße 49 | 56070 Koblenz  
matthias.cieslack@vermkv.rlp.de

