

Gravimetrie und Schwerevariationen

Ludger Timmen

Leibniz Universität Hannover

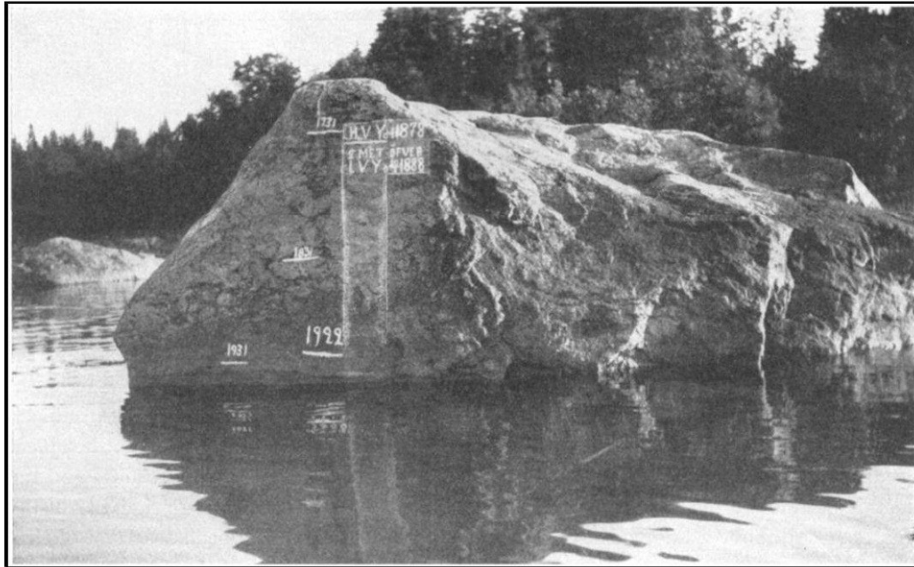
(timmen@ife.uni-hannover.de)

Gliederung:

1. Fundamentales zur Absolutgravimetrie
2. Genauigkeit und „Offset“
3. Relativgravimetrie
4. Geo-Anwendungen & Komplementarität der Messmethoden
5. Gezeiten und nicht-gezeitenbedingte Schwerevariationen
6. Fennoskandische Landhebung
7. Resümee

Beobachtung der „festen Erde“ und der Hydrosphäre

“Rudman Stone” oder “Celsius Rock”, Insel Lövgrund, erste Markierung von 1731

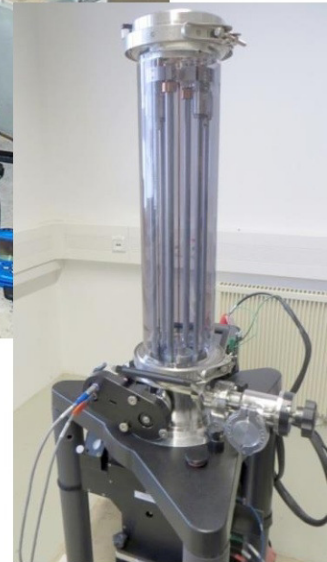
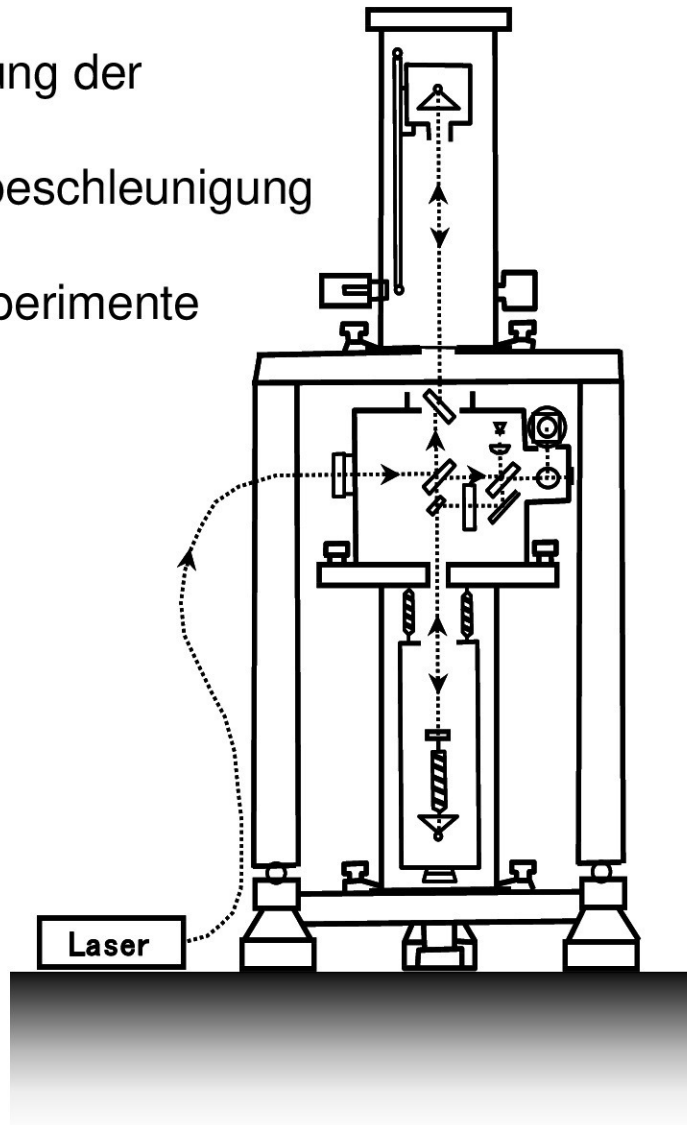


Anders Celsius 1743: 13 mm/Jahr
Absinken der Seeoberfläche seit 1731;
Evaporation oder “Loch im Boden” ?

Scheinbare Landhebung!

FG5:

Bestimmung der absoluten Schwerebeschleunigung durch Freifallexperimente (Drops).

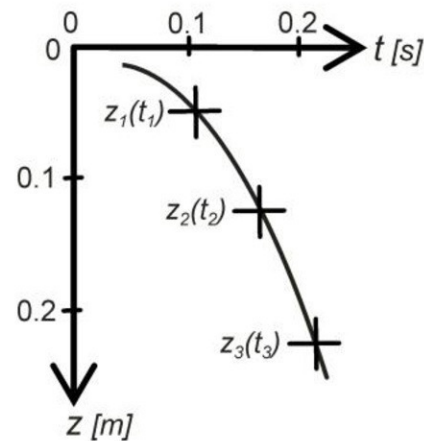


Absolutgravimetrie: Ausgleichung von Zeit- u. Wegmessungen

Beobachtungsgleichung:

$$z(t) = z_0 \left(1 + \frac{1}{2} \gamma t^2 + \frac{1}{24} \gamma t^4 \right) + v_0 \left(t + \frac{1}{6} \gamma t^3 \right) + \frac{1}{2} g_0 \left(t^2 + \frac{1}{12} \gamma t^4 \right),$$

ca. 1200 Zeit/Weg-Datenpaare



$$t = t' + \frac{z}{c}$$

Vorteile der Absolutgravimetrie:

- kein Referenzpunkt notwendig
- Netzgenauigkeit unabhängig von räumlicher Ausdehnung

Stationsbestimmung mit FG5-220

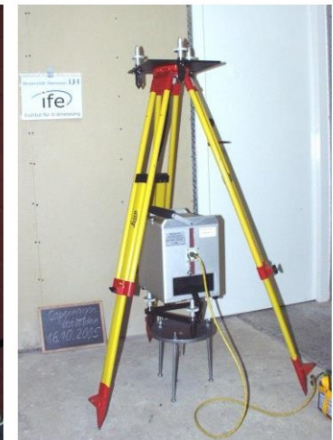
- 1 Set: 50 Drops, $\Delta t = 10$ s
- 1 Run: 24 Sets, $\Delta t = 30$ min
- 1 Stationsbestimmung: ≥ 2 Runs (2 Nächte)
- 3 Tage Intervall von Station zu Station



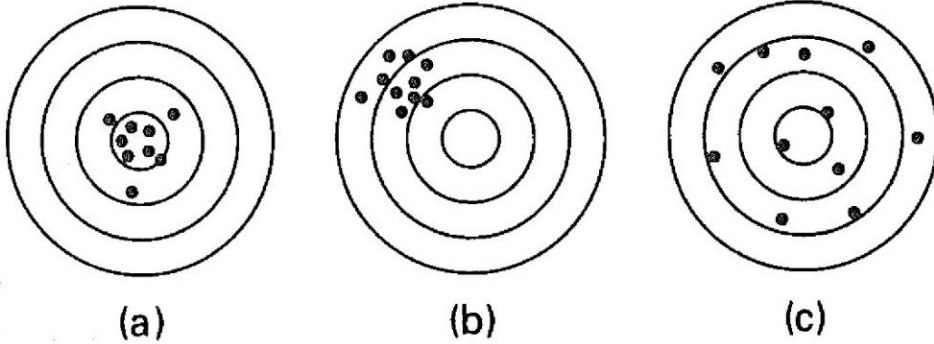
Zusätzliche Arbeiten:

Nivellement zu Höhenmarken, See, Fluss

Relativen Messungen: Gradient, Zentrierungen



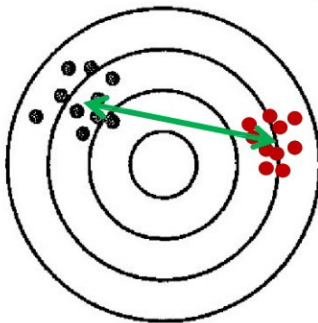
Genauigkeit und „Offset“



Verteilung der Einzelmessungen:

- a) präzise und genau
- b) präzise und nicht genau
- c) genau nach 11 Messungen

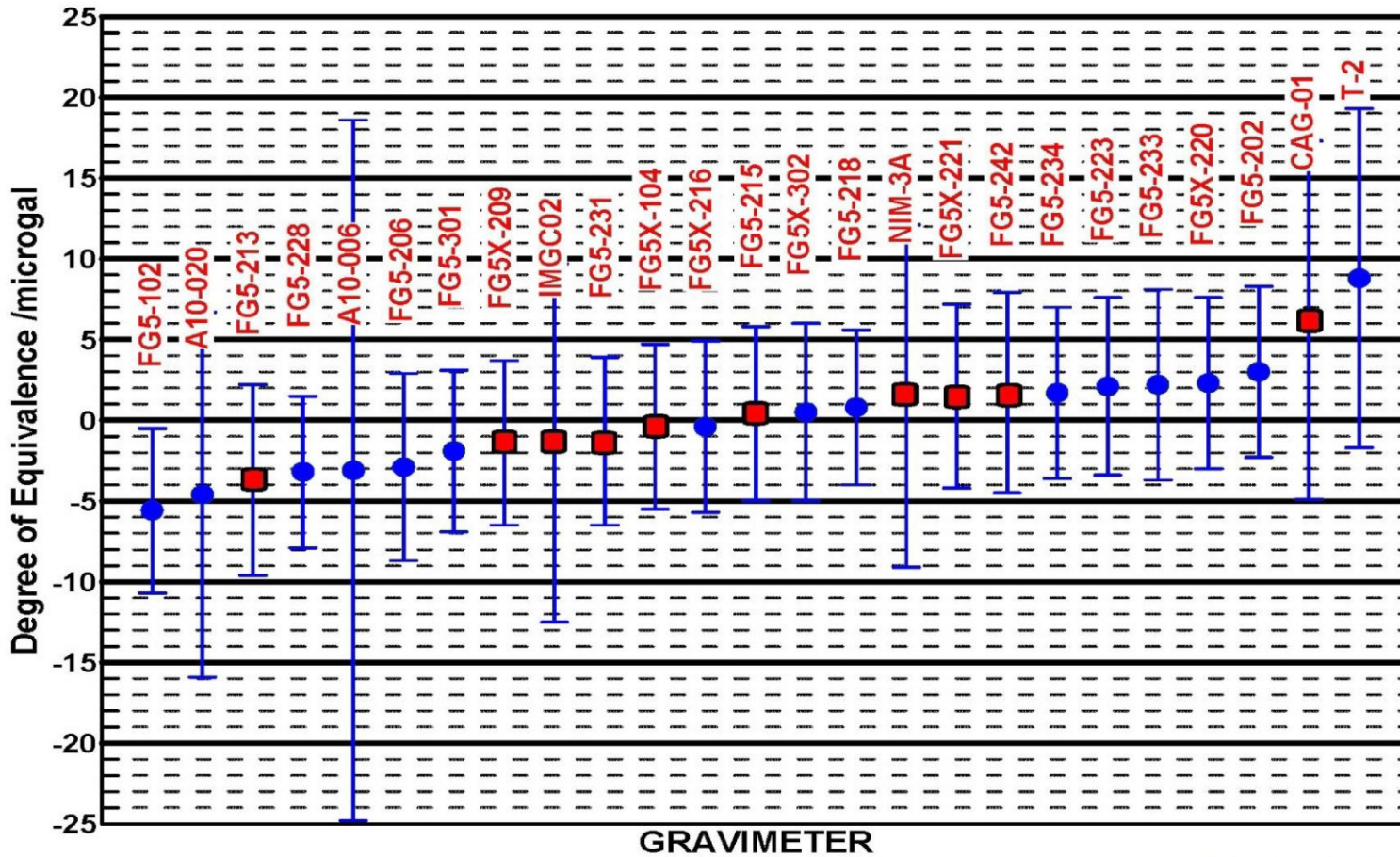
Gravimetervergleich



Strategie in Absolutgravimetrie
(Geowissenschaften):

- Präzise Freifallexperimente mit Langzeitstabilität (Wiederholbarkeit)
- Vergleiche mit anderen Gravimetern (“offset” Bestimmung)
- Beurteilung der Historie anderer Gravimeter
- Sicherstellen der Genauigkeit der Zeit- und Laser-Standards ($\leq 10^{-10}$)

Internationaler Vergleich von Absolutgravimetern (ICAG-2013)



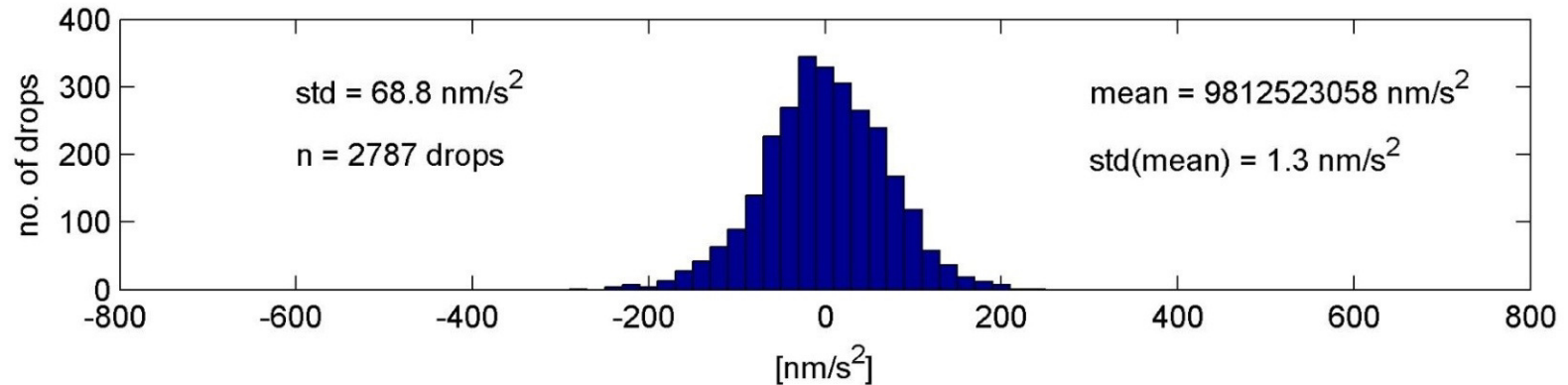
CCM.G-K2 Key Comparison

Olivier Francis¹, Henri Baumann² and all the participants

¹ University of Luxembourg (Organizer)

² Federal Institute of Metrology METAS (Pilot)

Genauigkeit einer Stationsbestimmung



Fehler in g aufgrund von

- Aufstellung und kleiner instrumenteller Fehler,
- Atmosphäre (residualer Effekt),
- Gezeiten (resid. Eff.)

zusätzlich:

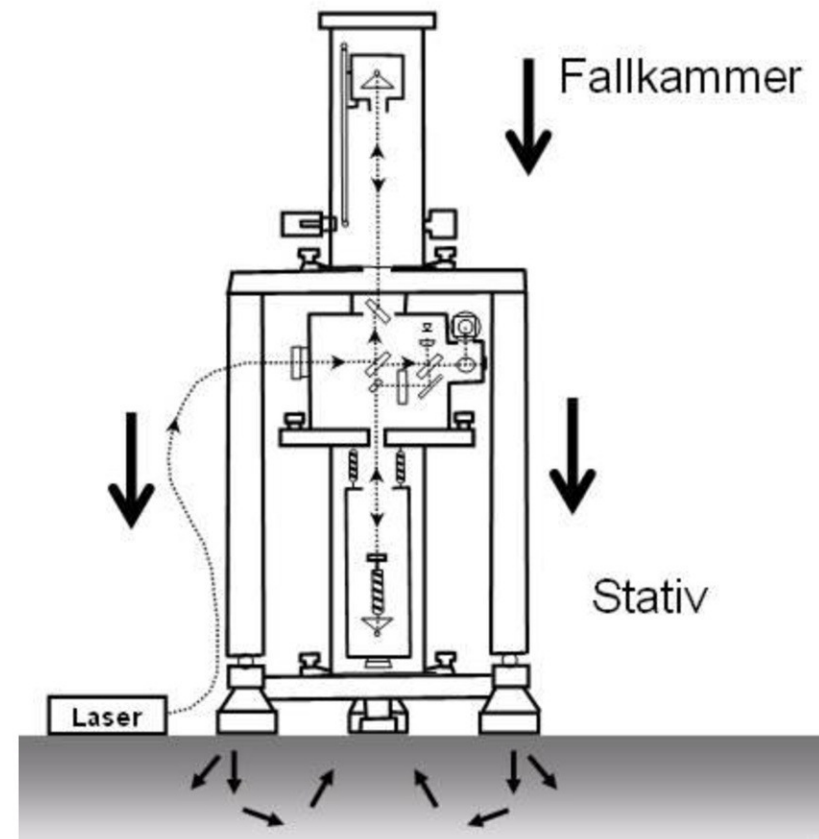
- Bodenfeuchte / Grundwasser
- durch einseitigen anhaltenden Wind verursachte Wassermassenverlagerungen

Instrumentelle Fehler
+ fehlerhafte Reduktionen \Rightarrow $s(\text{AG})_{\text{FG5-220}} \approx 2 - 3 \mu\text{Gal}$

Genauigkeit: Störbeschleunigungen während des Freifalls

- Natürliche Seismik: See-Mikroseismik, Wind 0.1 . . . 0.2 Hz;
- “man-made” Seismik: Verkehr, Maschinen 2 . . . 60 Hz ;
- Instrumentelle Vibrationen (dropping Mechanismus) und Bodenreaktion (plötzliche Entlastung durch Testmasse), 5 Hz . . .

⇒ systematische Verfälschung
des Stationsergebnisses !



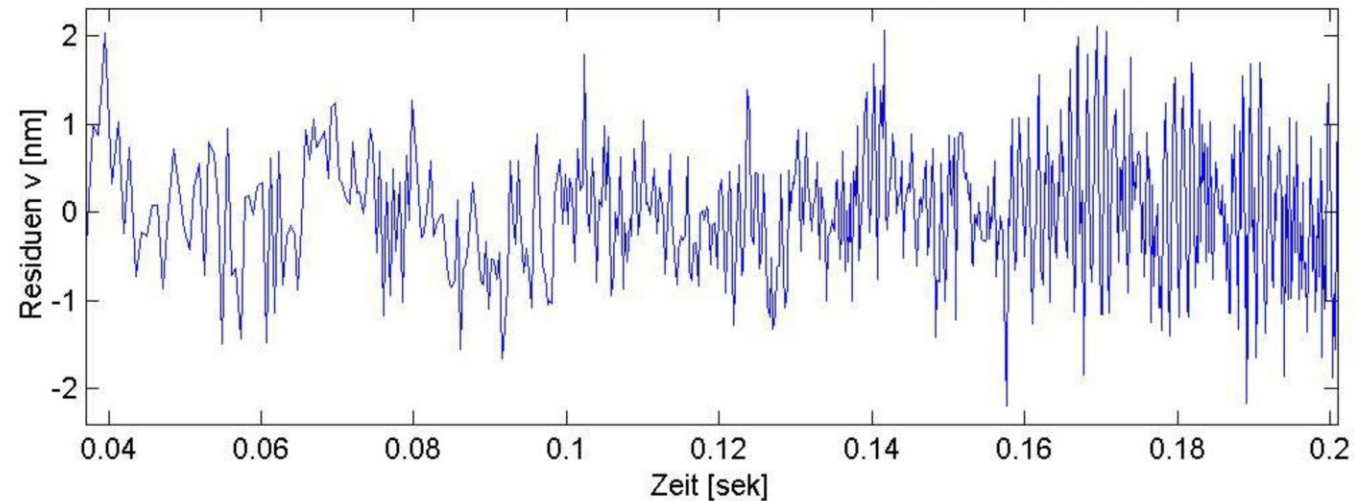
„Floor-Recoil“ Effekt, instr. Vibrationen

Genauigkeit: Störbeschleunigungen während des Freifalls

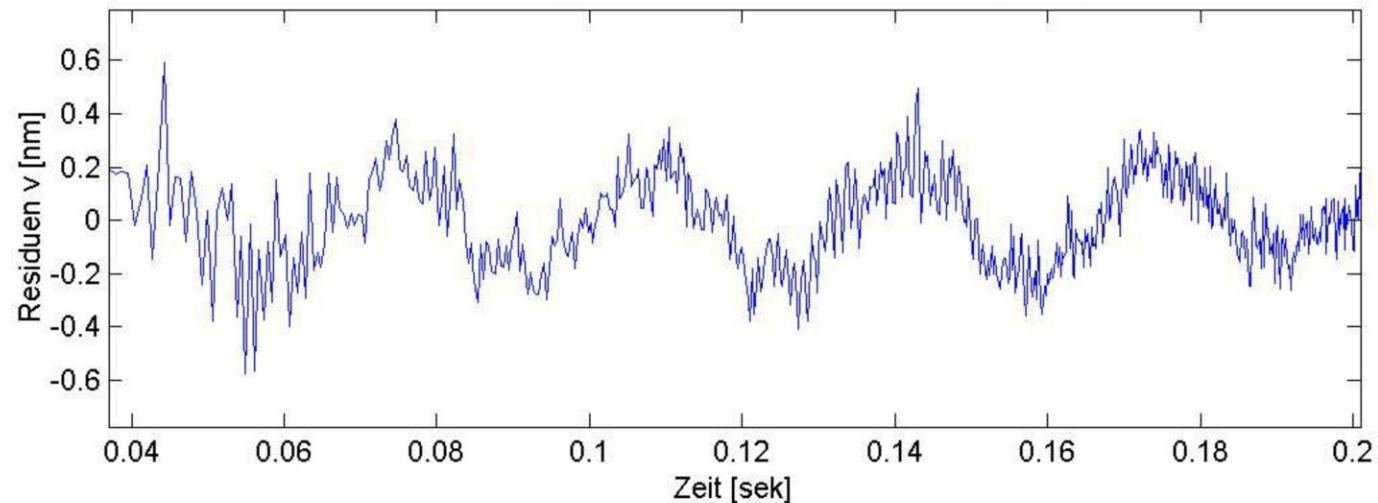
$$z_i \approx \frac{1}{2} g t_i^2$$

Ausgleichs-
verbesserungen:
Einzeldrop
und
Mittel der kumulativen
Dropverbesserungen
(50 Drops)

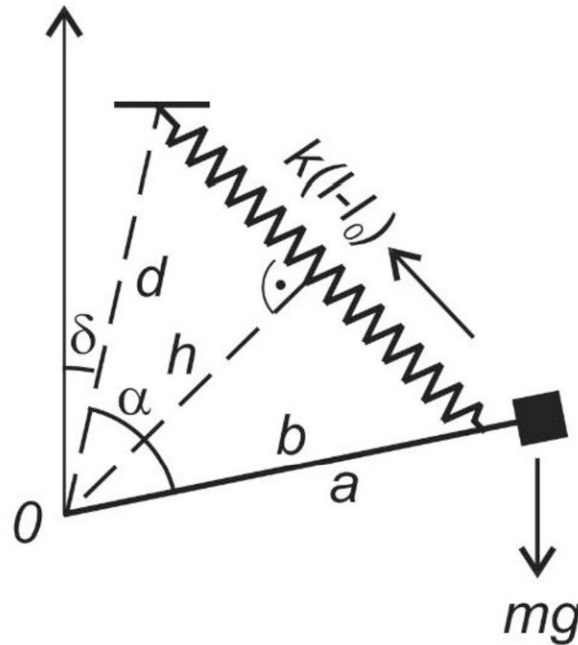
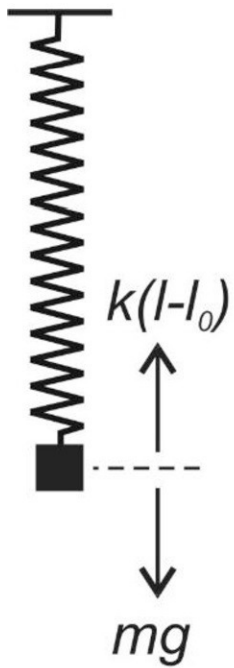
ife-FG5-220_2003Nov18: Residuen des Drops 50, Set 28 (gestört)



ife-FG5-220_2003Nov18: Residuenmittel (gestört)



Relativgravimetrie: Vertikal- / Hebefederwaage



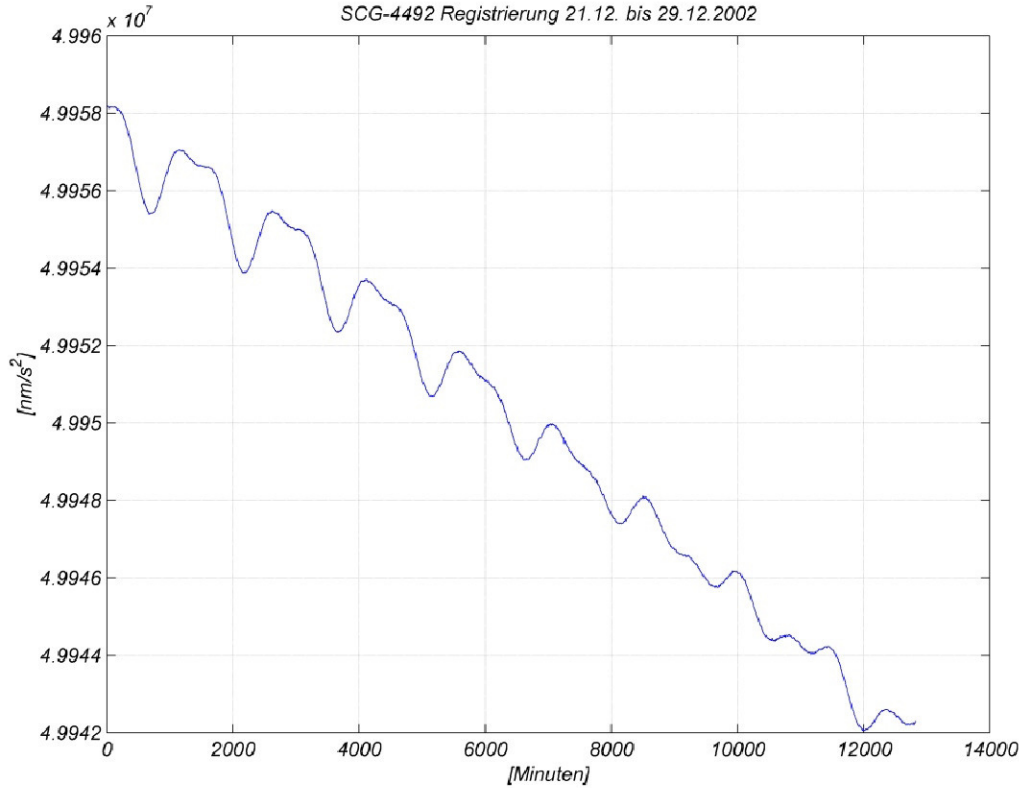
Beobachtungsgleichung:

$$g = N_0 + \sum_{j=1}^p d_j (t - t_0)^j + \sum_{k=1}^m Y_k z^k$$

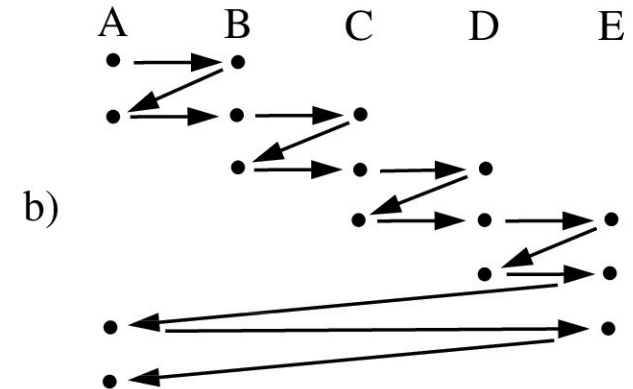
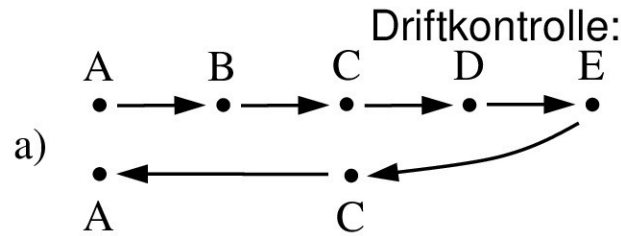


Relativgravimetrie: Vertikal- / Hebelfederwaage

SCG-4492 Registrierung 21.12. bis 29.12.2002



Gravimeterdrift: Ablesung ändert sich mit der Zeit



Relativgravimetrie

FG5

JILAg

A10

CG3+CG5

LCR

appr.
sensor height

1.2 m

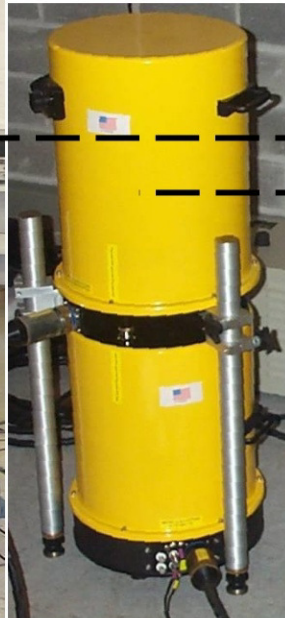
0.8 m

0.7 m

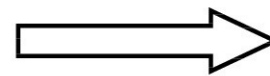
0.25 m

5 cm

3 mm



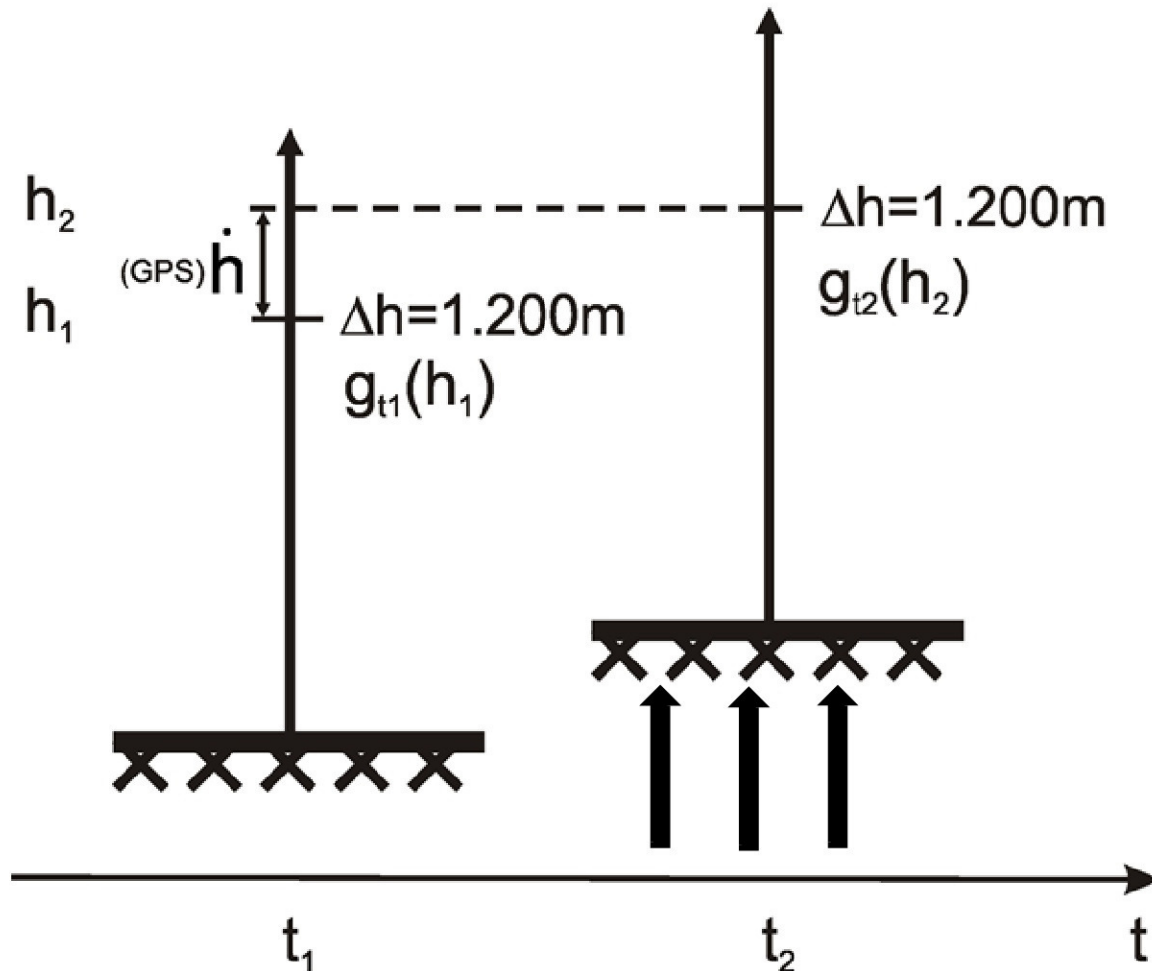
- a) g-Wert entlang der Lotlinie transferieren
- b) Verbindung zu Sicherungspunkten
- c) Messtechnische Bestimmung von "man-made" Massenveränderungen, e.g. Gebäudeumbau

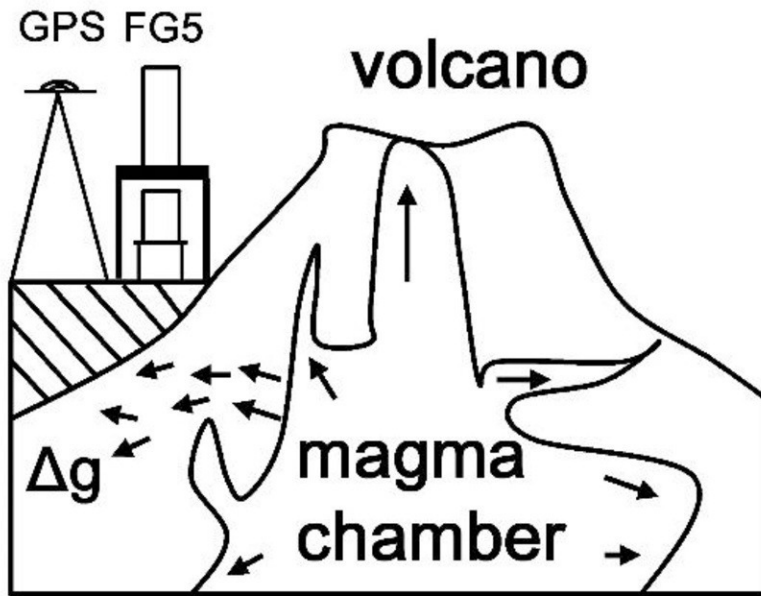


$\pm 1 \dots \pm 2 \mu \text{Gal}$

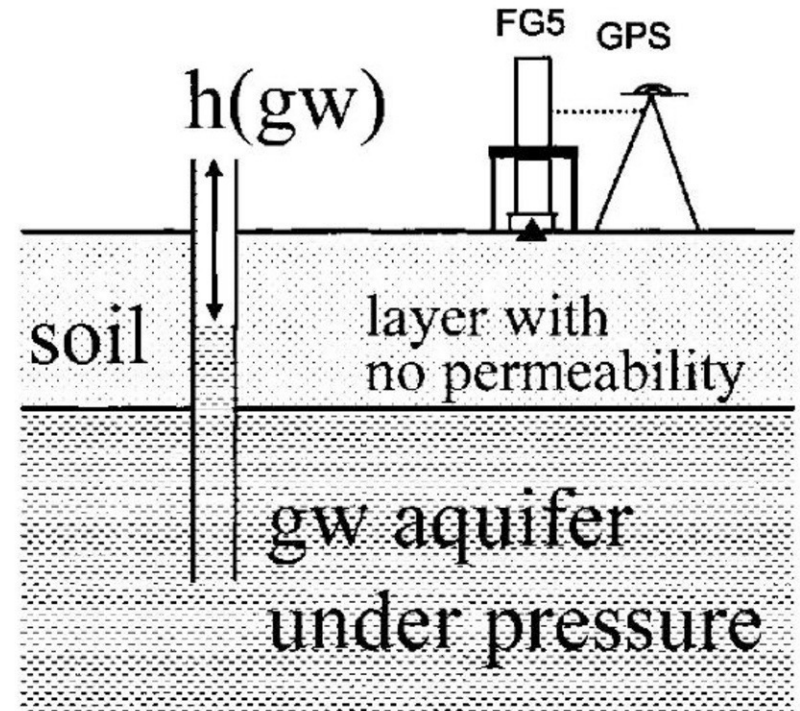
(für kleine Differenzen)

Schwereänderungen aufgrund von vertikalen Bodenbewegungen und Massenverlagerungen





Magmafluss vor Eruption



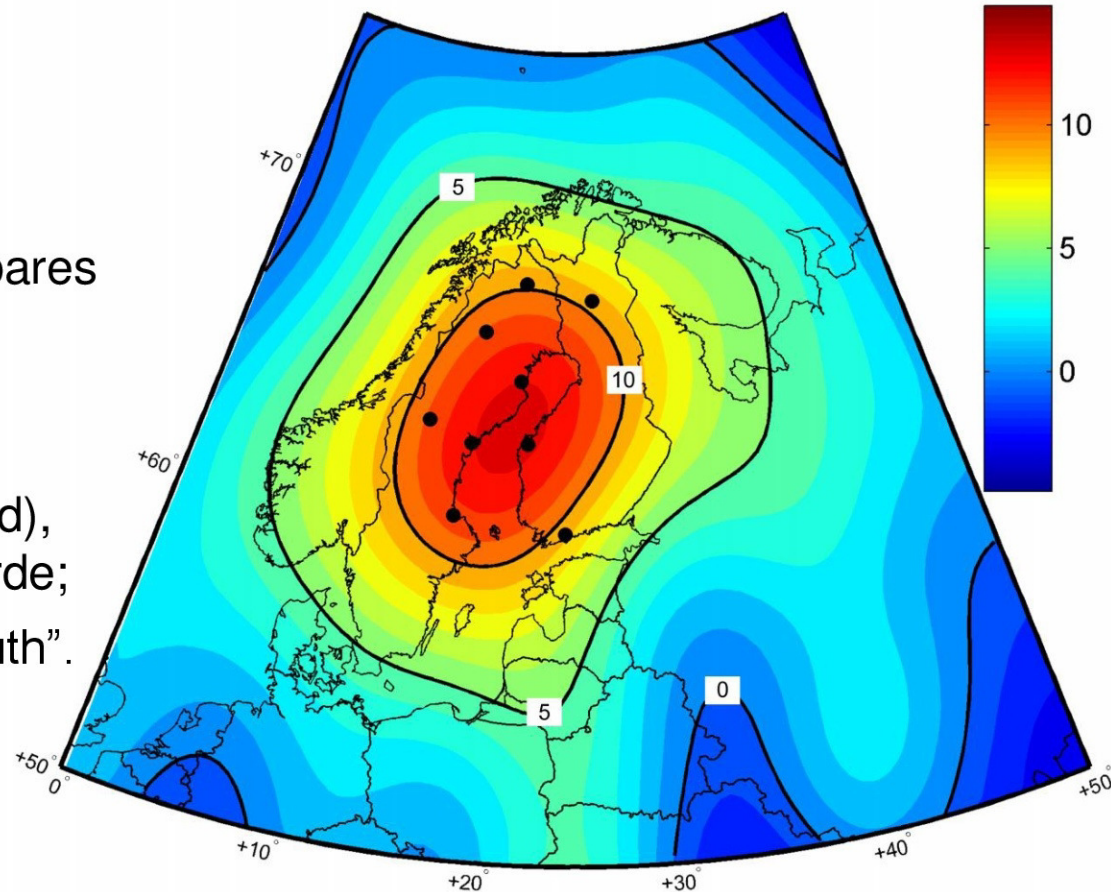
Interpretation von Wasserstandsbeobachtungen

GRACE (2002 - 2017)

[nm/s² pro Jahr]

Synergie mit terrestrischen Methoden:

- Landhebung ist ein messbares Signal im Erdschwerefeld;
- Signalüberlagerungen: Massenvariationen in der Hydrosphäre (Ozean, Land), Atmosphäre und festen Erde;
- Validierung mit "ground truth".



Lineare Schwereänderungen aus monatlichen GRACE-Schwerefeldmodellen (2002-2008)

Geo-Anwendungen & Komplementarität der Messmethoden

SLG ermöglicht für Absolutgravimetrie:

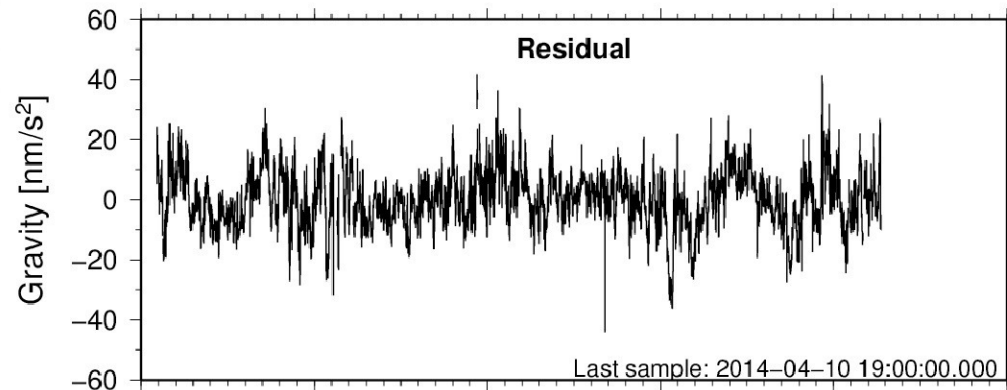
- Erstellen oder Validieren von Reduktionsmodellen;
- Messen von Schwereänderungen, die nicht modellierbar sind



GWR054	FG5-220
stationär	transportabel
Bestimmung von	Bestimmung von
kurzzeit	langzeit
Schwereänderungen	Schwereänderungen



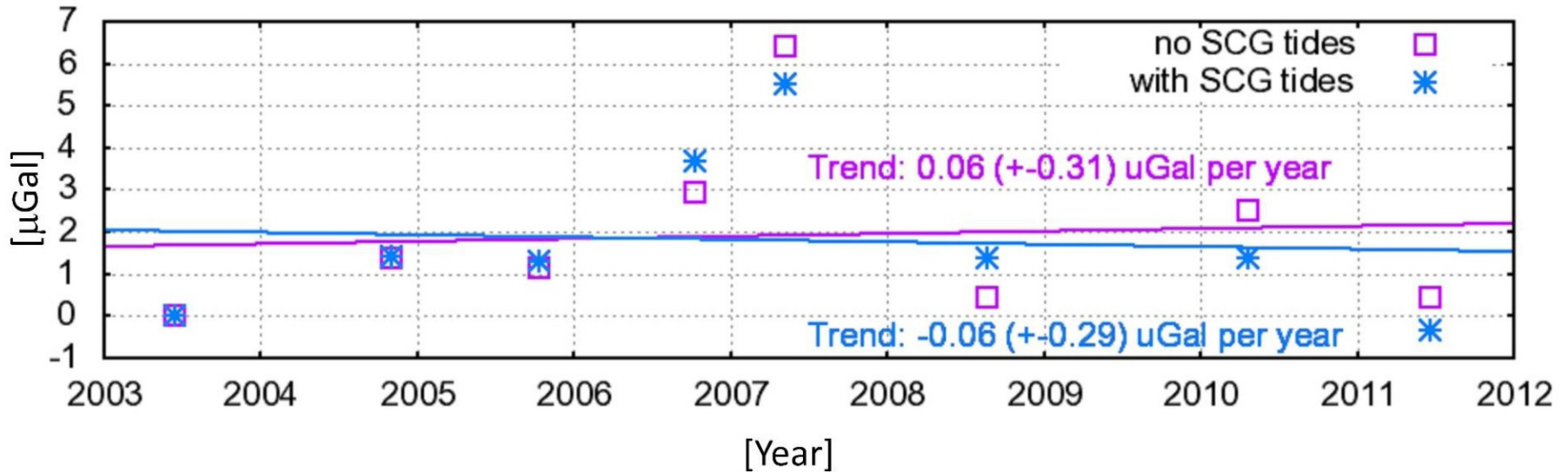
Onsala: Gravimetrie-Observatorium seit 2009



SLG Schweremessungen seit Juni 2009 (von H.-G. Scherneck)

Geo-Anwendungen & Komplementarität der Messmethoden

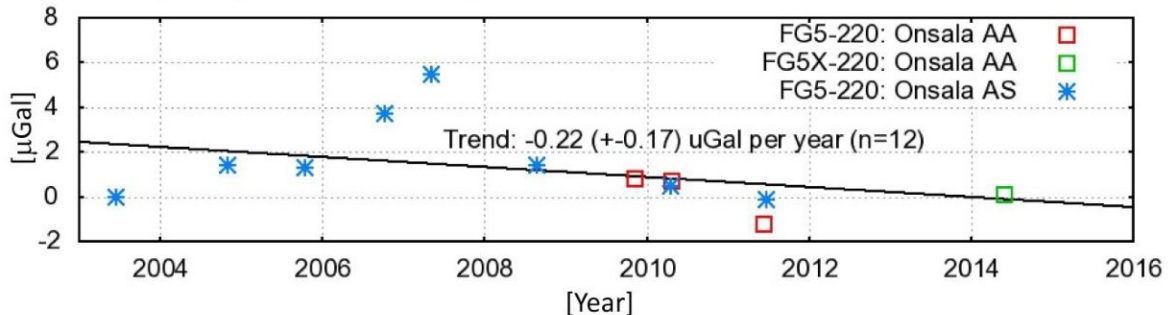
Onsala AS: FG5-220 g-variations until 2011, no/with tides from SCG054



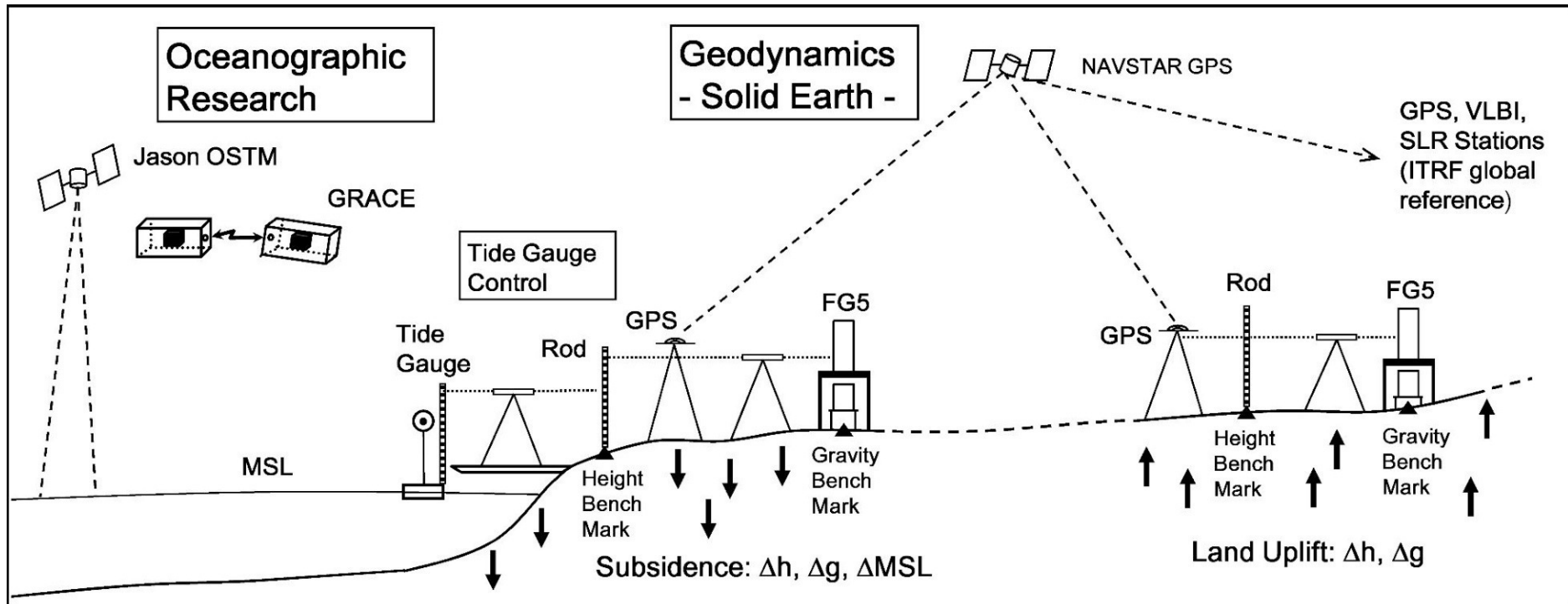
Supraleitgravimeter
GWR#54

Erste positive Überraschung:
beobachtete Gezeitenmodel verändert
den sekularen Trend

Endgültiges Trendergebnis von FG5-220 und GWR#54:



Absolutgravimetrie in einem geodätischen Überwachungsnetz: Anwendungen in einem interdisziplinären Umfeld



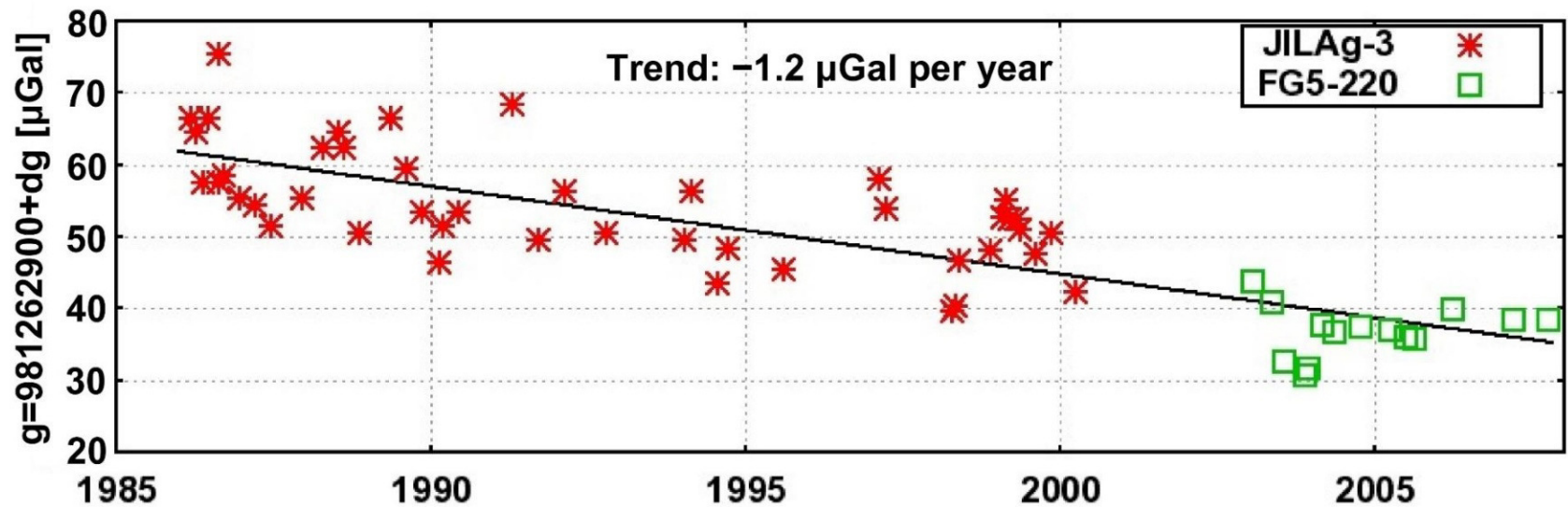
Gezeiten und nicht-gezeitenbedingte Schwerevariationen

Erdgezeitenregistrierung mit Federgravimetern

Hamburg Flottbeck:
Erdfälle durch Subrosion von Salz

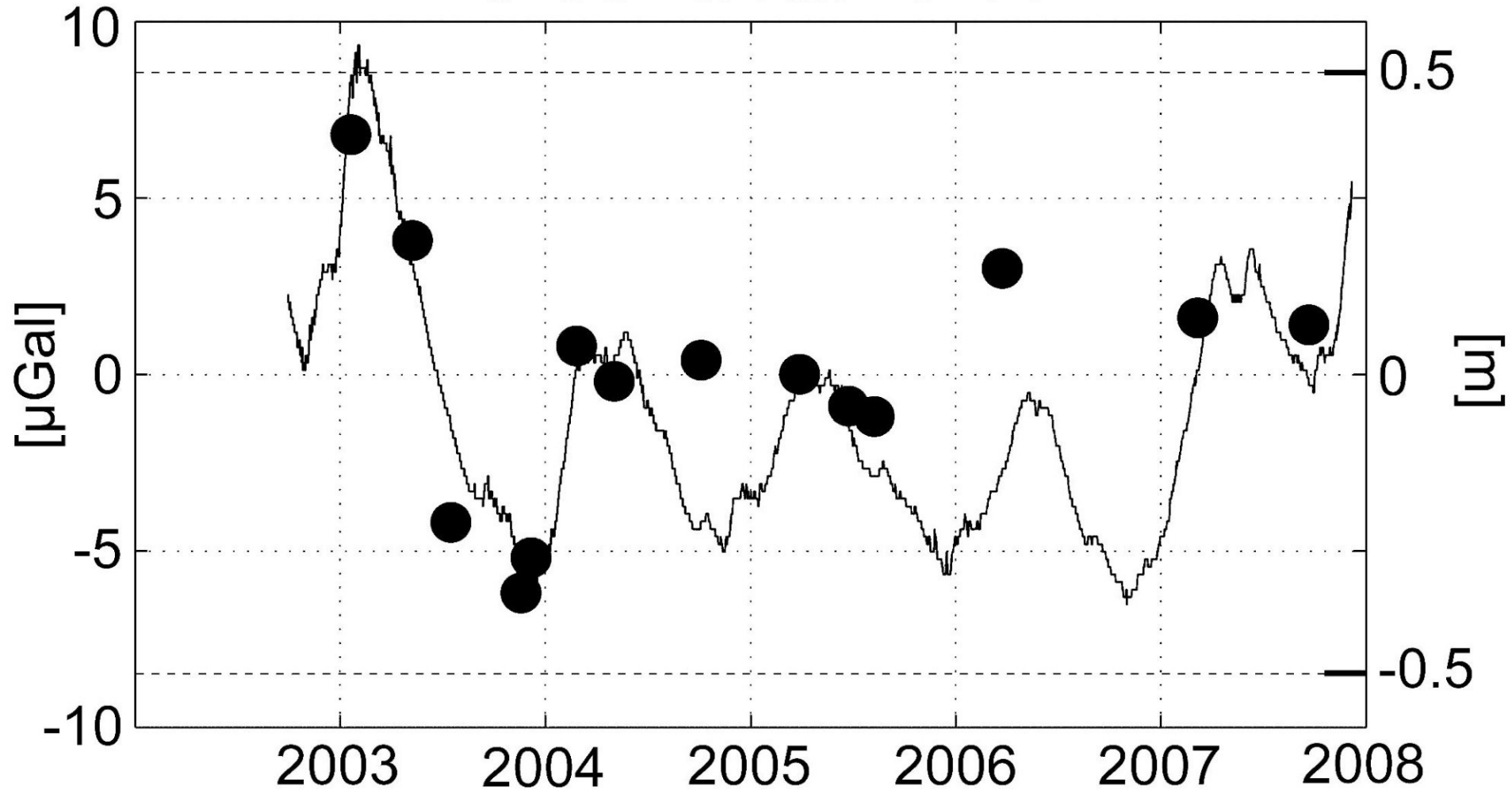


Schweremessungen im Gravimetrielabor der Leibniz Universität Hannover



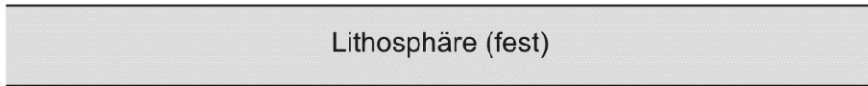
Gezeiten und nicht-gezeitenbedingte Schwerevariationen

Korrelation Grundwasserspiegel und Schwere
am Gravimetrielabor Hannover



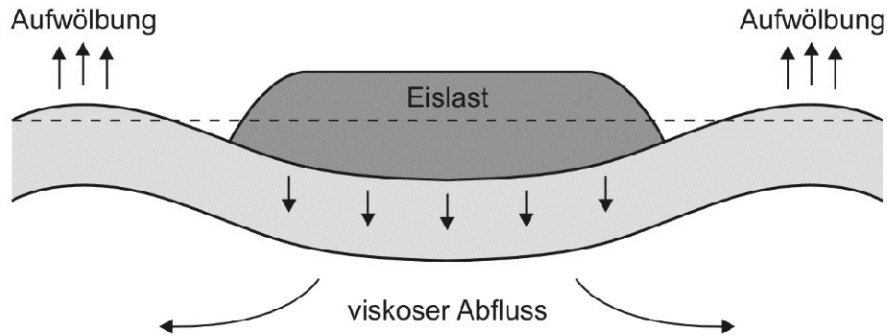
Gezeiten und nicht-gezeitenbedingte Schwerevariationen

1. Ausgangszustand

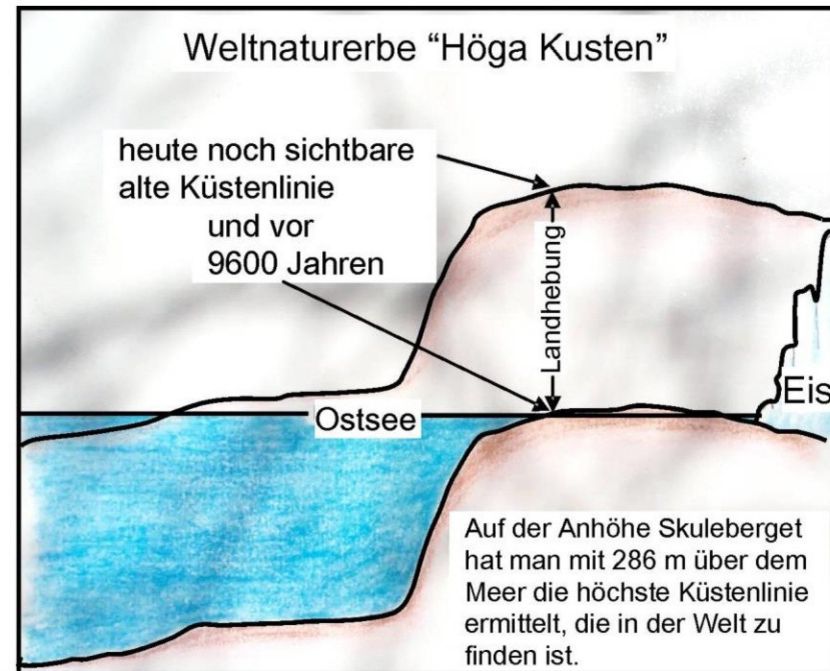
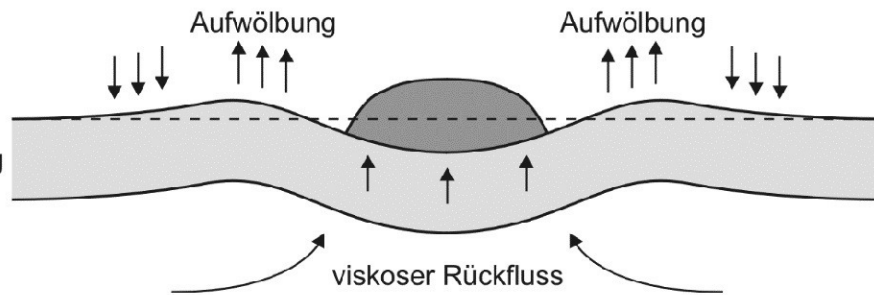


Mantel (viskoelastisch)

2. Auflast

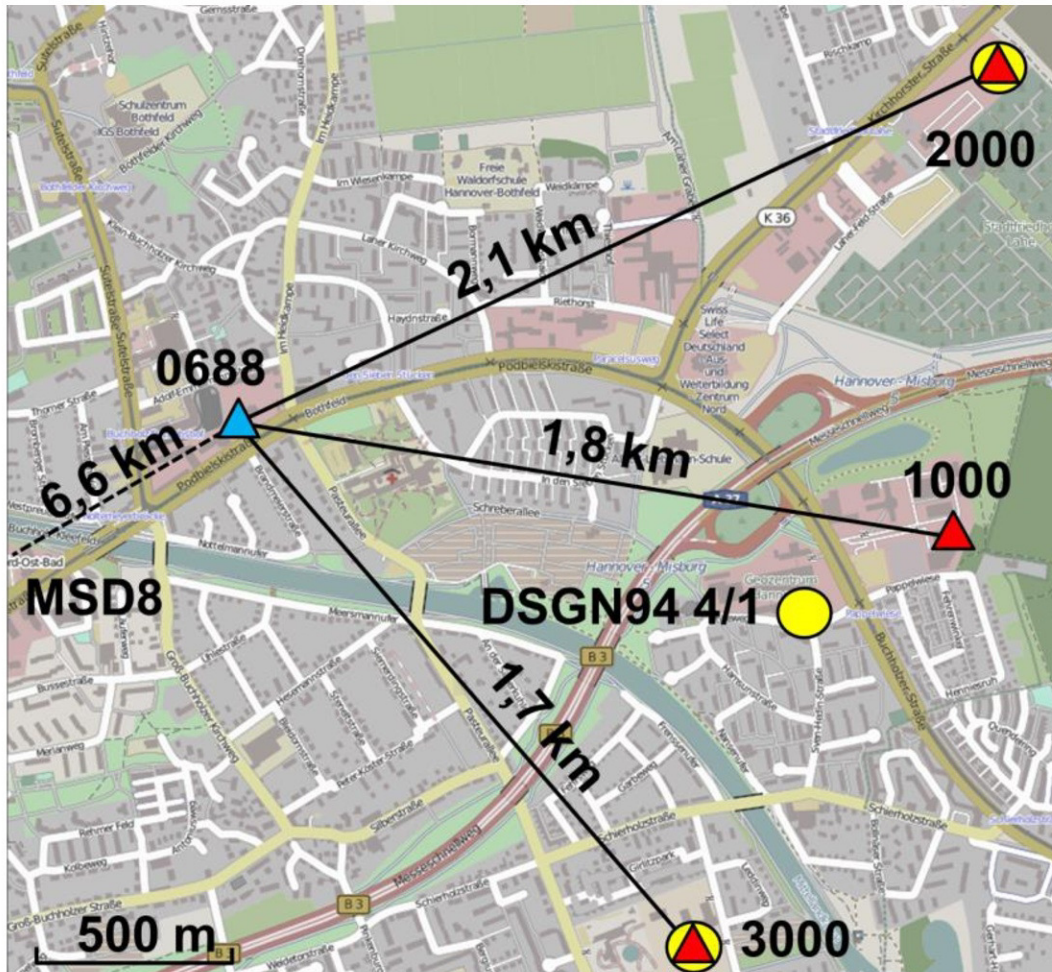


3. Entlastung



Gezeiten und nicht-gezeitenbedingte Schwerevariationen

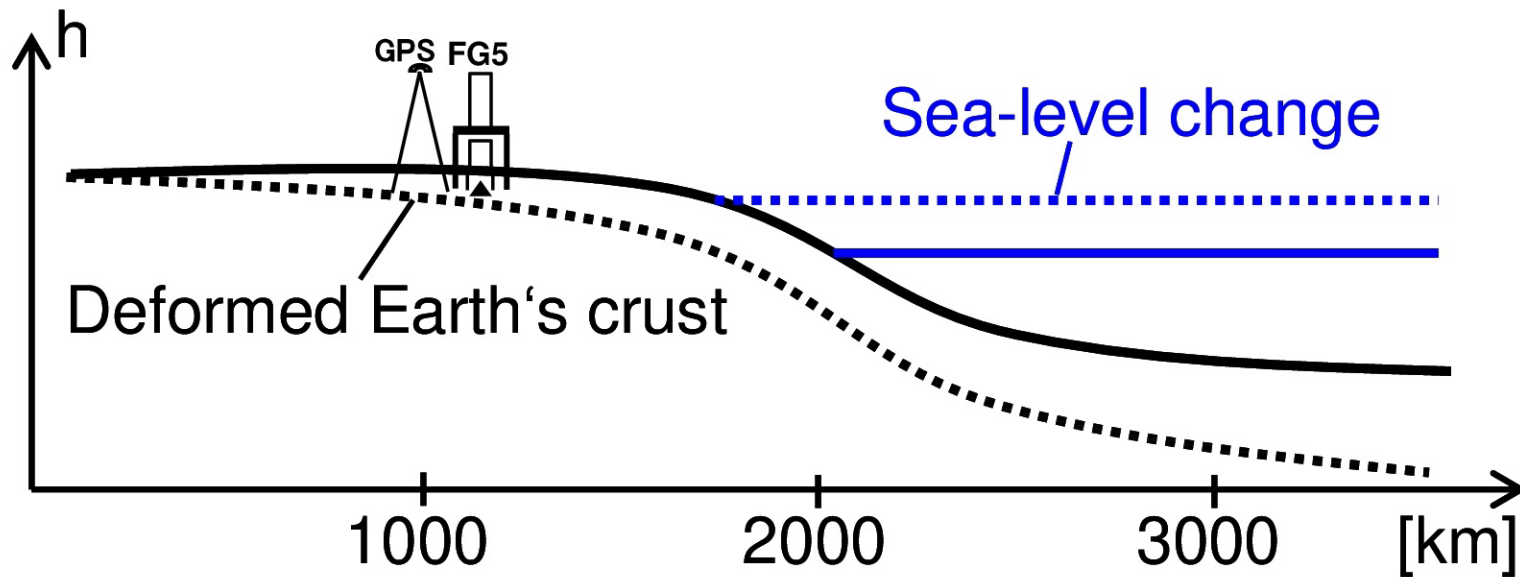
GeneSys Frac-Experiment: hydraulische Stimulation im Zusammenhang mit einem geothermalen Pilotprojekt in Hannover



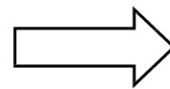
Netz für geometrische und gravimetrische Überwachung des GeneSys Frac-Experiments (Mai 2011).

©OpenStreetMap – Mitwirkende, ODbL

Gezeiten und nicht-gezeitenbedingte Schwerevariationen



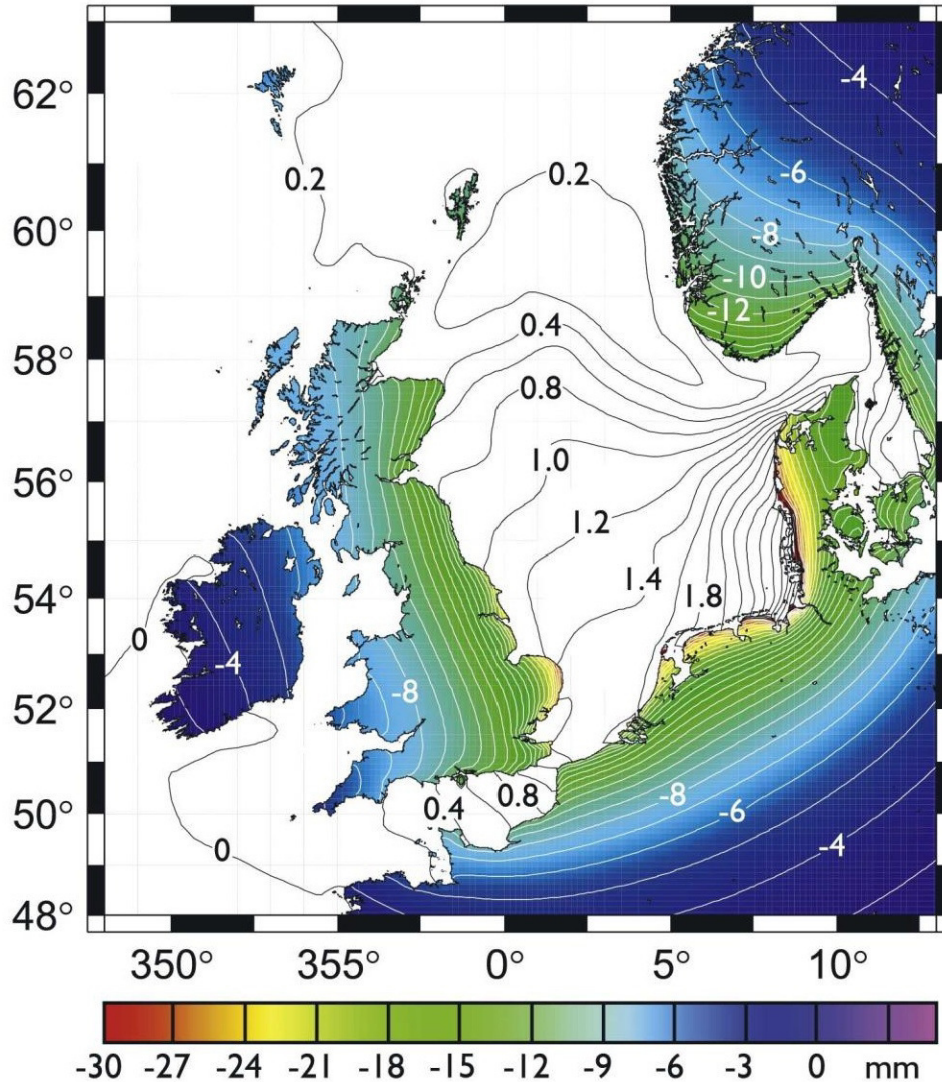
Schwerebeschleunigung aufgrund der **vertikalen Verschiebung** des Beobachtungspunktes (Höhenänderung)



Auswirkung auf Messungen mit GNSS, Absolutgravimetrie und Satellitengravimetrie

Gezeiten und nicht-gezeitenbedingte Schwerevariationen

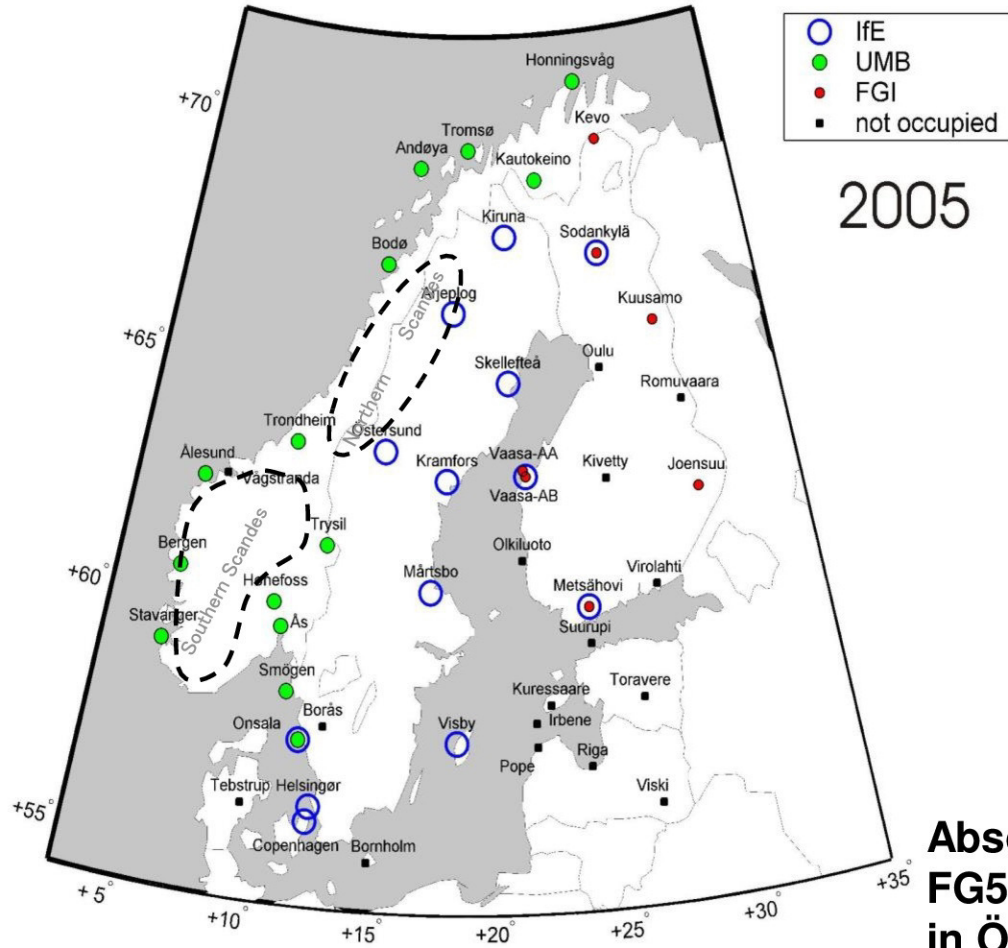
Seeoberfläche während eines Windstaus und Auflasteffekt



Seehöhe (in m) und vertikale
Verschiebung (in mm) um
03:00 UT, 30 Jan. 2000

(Fratepietro, Baker, Williams,
Van Camp 2006, GRL, 33, L06317)

Fennoskandische Landhebung: Punktverteilung



**Station
Skellefteå**



**Absolutgravimeter
FG5-220
in Östersund**

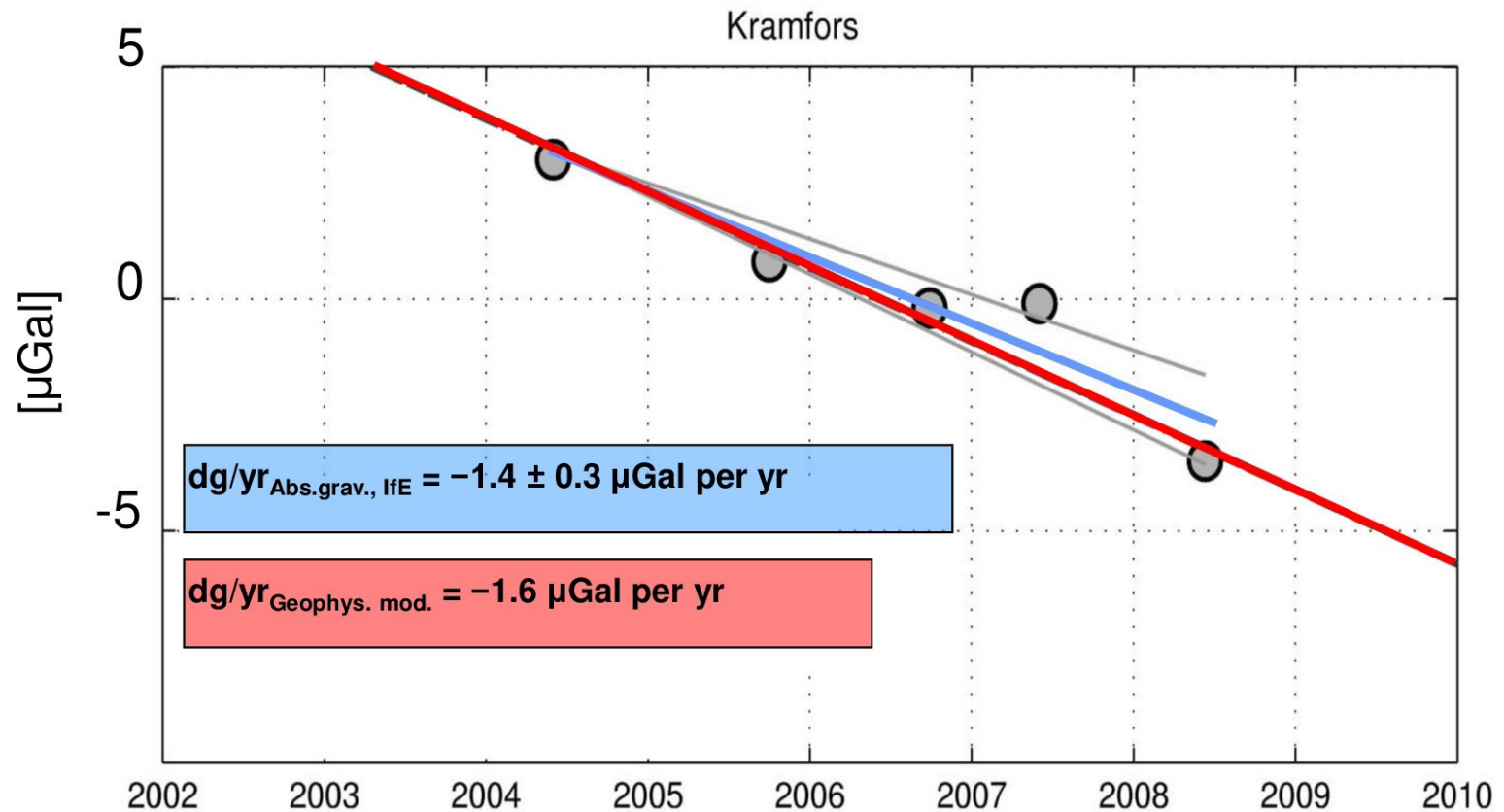
Wichtiger Aspekt für Netzanlage:
keine symmetrische Oberflächendeformation
und Schwereänderung.



Absolutgravimetrisches
Beobachtungssystem mit einer dichten
und gleichmäßigen Stationsverteilung.

Ergebnisse aus Messungen mit FG5-220

Vergleich mit Trends aus geophysikalischen Modellierungen von V. Klemann 2004:



Ergebnisse: Proportionalitätsfaktor zwischen Schwere- und Höhenrate

Verhältnis zwischen Schwereänderungen und vertikaler Oberflächenbewegungen:

Wahr et al. (1995): $\sim -0.65 \text{ cm}/\mu\text{Gal}$ ($\equiv -1.5 \mu\text{Gal}/\text{cm}$)

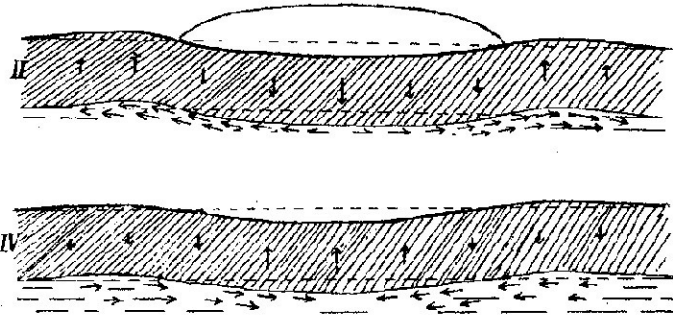
Mäkinen et al. (2005): $-1.60 \text{ to } -2.00 \mu\text{Gal}/\text{cm}$

(Lidberg et al. 2007)

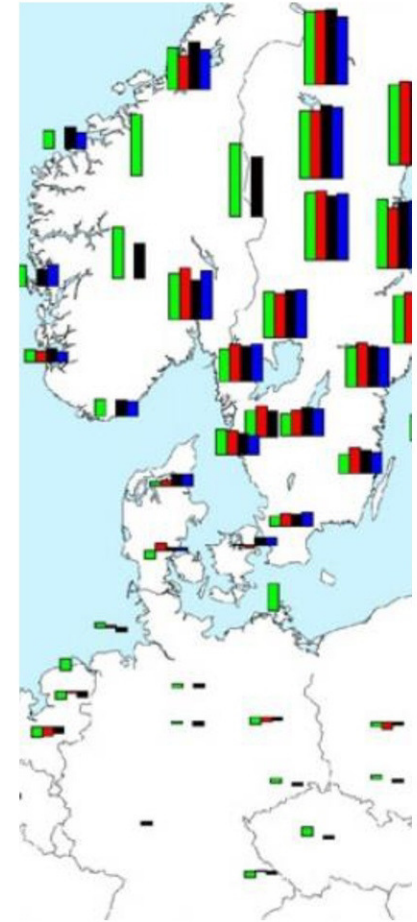
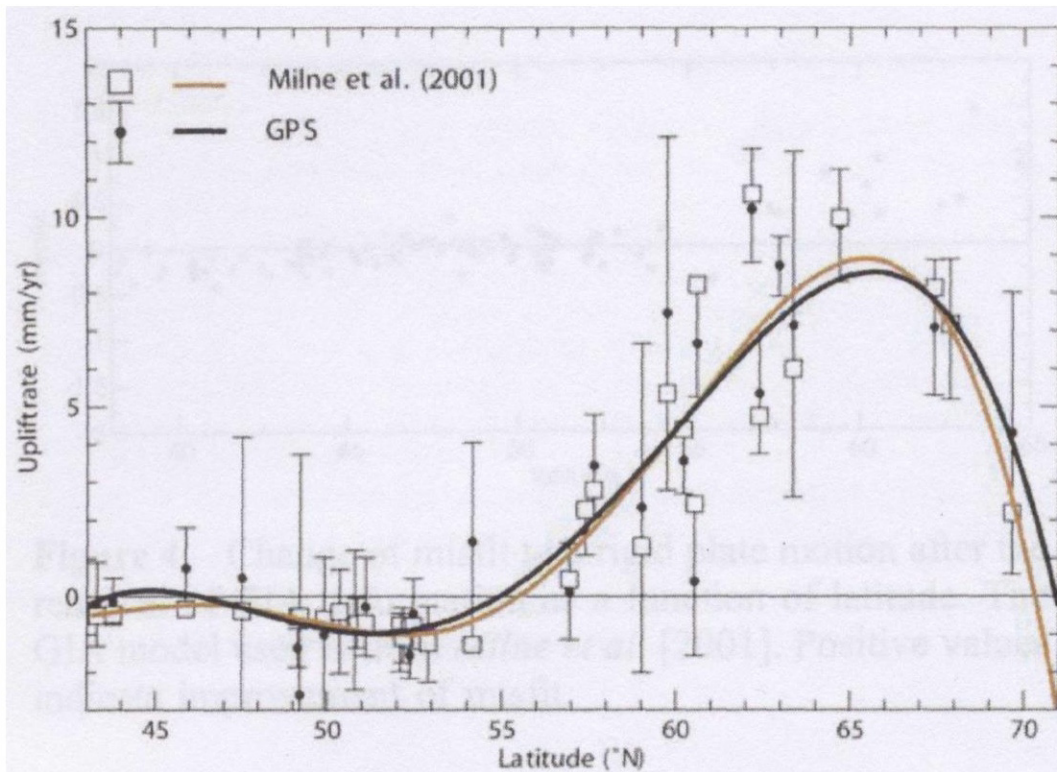
Station	dg/dt (abs.grav.) [$\mu\text{Gal}/\text{yr}$]	dh/dt (BIFROST) [cm/yr]	dg/dh [$\mu\text{Gal}/\text{cm}$]
Arjeplog	-0.87 ± 0.24	0.77 ± 0.02	-1.14 ± 0.31
Kiruna	-1.13 ± 1.10	0.64 ± 0.03	-1.78 ± 1.72
Kramfors	-1.44 ± 0.27	1.02 ± 0.05	-1.41 ± 0.27
Mårtsbo	-1.56 ± 0.39	0.67 ± 0.02	-2.32 ± 0.59
Metsähovi	-0.88 ± 0.52	0.43 ± 0.02	-2.07 ± 1.21
Östersund	-1.48 ± 1.08	0.83 ± 0.02	-1.79 ± 1.30
Skellefteå	-1.88 ± 0.38	0.96 ± 0.02	-1.95 ± 0.40
Vaasa AB	-1.22 ± 0.78	0.86 ± 0.02	-1.41 ± 0.91
Mittel (gewichtet)			-1.63 ± 0.20

(Timmen, Gitlein, Klemann, Wolf (2012), Pure Appl. Geophys.169)

Landsenkungszone um Fennoskandien



Ehemaliger Aufwölbungsbereich ("forebulge") sollte jetzt eine Senkungszone sein.

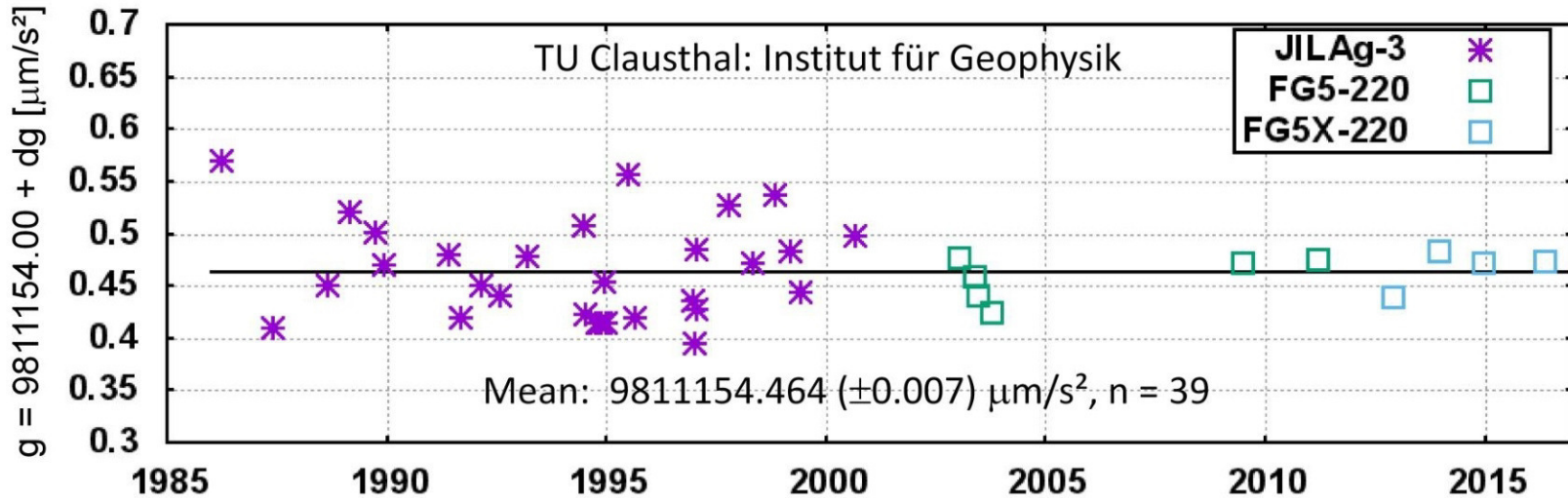


Aus Nocquet et al. 2005: Höhenänderungen als Funktion der Breite

Lidberg et al. 2010: Höhenraten

Landsenkung in Norddeutschland?

Langzeitreihe der Hannoverschen Absolutgravimeter JILAg-3 und FG5(X)-220 am Institut für Geophysik der TU Clausthal (Harz)



➔ Bisher keine Landsenkung (\equiv Schwerezunahme) gravimetrisch gemessen!

Augath (1993), Wanninger et al. (2009):
5-7 cm in 100 Jahren an der
ostfriesischen Nordseeküste

Bungenstock und Schäfer (2009): 1 m
pro 1000 a

- 0.4 m/1000 a als eustatischer
Effekt
(Wasservolumenzunahme)
- 0.6 m/1000 a als isostatischer
Effekt (Landsenkung)

Höhenwertänderungen im Vergleich zum
DHHN92 (Zeitdifferenz bis 35 Jahre)

(aus Feldmann-Westendorff et al. 2016)

Resümee

- Gravimetrie ist ein komplementäres Messverfahren, welches gemeinsam mit geometrischen Verfahren interdisziplinär zum Einsatz kommt.
- Vergleiche mit prädizierten Raten aus GIA-Modellierungen zeigen, dass FG5-220 Absolutmessungen (2003 – 2008) zuverlässige Schweretrends mit Genauigkeitsschätzungen liefern.
- Durch Messungen bestimmter Proportionalitätsfaktor

$$\dot{g} / \dot{h} \approx -1.63 \pm 0.20 \mu\text{Gal} / \text{cm}$$

kann genutzt werden, um ein geometrisches Oberflächendeformationsmodell in Schwereänderungen umzuwandeln, so dass dann ein sehr genaues Validierungsmodell für GRACE-FO zur Verfügung steht (“grundtruth”).

- Die geodätischen Messverfahren (Nivellement, GNSS, Gravimetrie etc.) leisten einen sinnvollen Beitrag zur Bestimmung des Meeresspiegelanstiegs.
- Die Gravimetrie muss effektiver werden (schneller, einfacher, kostengünstiger)!

Quantengravimetrie