

Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen
Hindenburgufer 247
24106 Kiel

^E
29. MRZ. 1999
^D
26. MAI 1999

**Institut für Erdmessung
Universität Hannover
Dezember 1998**

Schlußbericht
zum
BMBF-Forschungsvorhaben:

**"Überwachung vertikaler Massenbewegungen an
deutschen Meerespegeln durch absolute
Schweremessungen"**

Förderkennzeichen: MTK 0554

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Torge,
Bearbeiter: Dipl.-Ing. Frank Rehren

N^o 33240 dit.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

1. Projektplanung.....	1
1.1 Leistungsfähigkeit der Gravimetrie.....	1
1.2 Stationsauswahl.....	2
2. Das JILAG-3 Absolutgravimeter.....	5
2.1 Meßprinzip.....	5
2.2 Meßgenauigkeit.....	6
2.3 Jodstabilisierter Helium-Neon Laser.....	7
3. Absolutgravimetrie und Mikroseismik.....	11
3.1 Ursachen und Frequenzbänder der Mikroseismik.....	11
3.2 Schwingungsdämpfungsplattform M-EVIS.....	12
3.3 Seismisches Registriersystem.....	13
4. Absolute Schweremessungen.....	15
4.1 Rohdatenauswertung.....	15
4.2 Workstation HP-Apollo.....	15
4.3 Langzeitkontrolle auf Referenzstationen.....	15
4.4 Laservergleich.....	16
4.5 Vermessung des Pegelkontrollnetzes und Resultate.....	18
4.6 Berücksichtigung von Störsignalen.....	21
5. Relative Schweremessungen.....	29
5.1 Meßprinzip.....	29
5.2 Eichung der Relativgravimeter.....	30
5.3 Vermessung des Pegelkontrollnetzes.....	31
5.4 Auswertung und Vergleich mit Absolutgravimetrie.....	33
5.5 Zentrierungs- und Pegelanschlußmessungen.....	35
6. Reduktion von Gezeiten und Luftdruckeffekten.....	38
6.1 Gravimetrische Gezeiten.....	38
6.2 Luftdruckschwankungen.....	39
Zusammenfassung.....	43
Literatur.....	45
Anhang:	
A Stationsbeschreibungen.....	47
B JILAG-3 Messungen.....	61
C Gezeitenparameter.....	81

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Nicht-gezeitenbedingte zeitliche Schwereänderungen aufgrund von Massenverlagerungen (TORGE 1989).....	1
Abb. 1.2: Stationsübersicht des gravimetrischen Kontrollnetzes.....	4
Abb. 2.1: Funktionsschema des Absolutgravimeters JILAG-3 (WENZEL 1989).....	5
Abb. 2.2: Einzelergebnisse Absolutgravimetervergleich BIPM 1994 (MARSON et al. 1995)...	7
Abb. 2.3: Ergebnisse der bisherigen Absolutgravimetervergleiche am Bureau International des Poids et Mesures (MARSON et al. 1995).....	8
Abb. 2.4: Prinzip der Wellenlängenstabilisierung des im JILAG-3 bis 1995 integrierten He-Ne Lasers (TIMMEN 1994, untere Abbildung nach NIEBAUER 1987).....	9
Abb. 2.5: Laserfrequenz des frequenzstabilisierten HeNe Lasers in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur (RÖDER 1994).....	10
Abb. 3.1: Günstige Aufstellung des Absolutgravimeters JILAG-3 zur Minimierung von Floor-Recoil Effekten (TIMMEN 1994).....	12
Abb. 4.1: Zeitreihen der JILAG-3 Absolutschweremessungen auf den Stationen Clausthal und Hannover.....	17
Abb. 4.2: Absolute Schweremessungen mit „Frei-Fall“ Gravimetern auf der Station Potsdam/Telegrafenberg.....	18
Abb. 4.3: Streuung von JILAG-3 Einzeldrop Resultaten auf Stationen mit unterschiedlichen Umgebungseinflüssen.....	19
Abb. 4.4: Ausgleichsresiduen bei gestörten Datensätzen, Station Clausthal.....	23
Abb. 4.5: Registrierte Neigungen der Gravimeter-Aufstellfläche in Richtung der JILAG-3 Interferometerbasis bei unterschiedlicher Aufstellung, Station Clausthal.....	24
Abb. 4.6: Mittleres Phasen- und Amplitudenspektrum der Neigungen (Tilt) in Richtung der Interferometerbasis; Station Clausthal, Stativbeine auf Pfeiler.....	25
Abb. 4.7: Mittleres Phasen- und Amplitudenspektrum der Neigungen (Tilt) in Richtung der Interferometerbasis; Station Clausthal, Stativbeine neben Pfeiler.....	26
Abb. 4.8: Vergleich der Amplitudenspektren mit und ohne Erregerschwingung (“Schraubenziherversuch“).....	27
Abb. 5.1: Konstruktionsschema von LCR-Gravimetern (aus RÖDER 1994).....	30
Abb. 5.2: Relativgravimetrische Verbindungsmessungen im Pegelkontrollsystem.....	32
Abb. 5.3: Diff. zwischen Relativgravimetrie (freie Netzausgleichung) und Absolutmessungen	35
Abb. 5.4: Pegelanschlußmessungen Büsum.....	36

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1: Beobachtung von deutschen Meerespegeln innerhalb verschiedener Projekte.....	3
Tab. 4.1: Ergebnisse der JILAG-3 Absolutgravimetermessungen auf den Stationen des Pegelkontrollsystems.....	21
Tab. 4.2: Vergleich des ungefilterten bzw. gefilterten JILAG-3 Absolutschwerewertes mit unabhängigen Messungen.....	27
Tab. 5.1: Zahl der Verbindungsmessungen zwischen den Absolutstationen im Pegelkontrollsystem und Standardabweichungen.....	33
Tab. 5.2: Relativgravimetrie Pegelkontrollsystem, freie Netzausgleichung. Differenzen zu den JILAG-3 Absolutschweremessungen.....	34
Tab. 5.3: Kombinationslösung Pegelkontrollsystem: ausgeglichene Schwerewerte und Standardabweichung.....	34
Tab. 5.4: Zentrierungs- bzw. Pegelanschlußmessungen, Gravimeterstatistik Teilnetz Ostsee. .	36
Tab. 6.1: Gezeitenparameter Station Rostock: Gravimetervergleich.....	39
Tab. 6.2: Gezeitenregistrierung Rostock: Vergleich beobachteter und synthetischer Gezeitenparameter.....	40
Tab. 6.3: Gezeitenparameter Helgoland: Vergleich beobachteter und synthetischer Gezeitenparameter.....	41
Tab. 6.4: Lineare Luftdruckkoeffizienten aus Gezeitenregistrierungen.....	41

Einleitung

Neuere Auswertungen von Langzeitregistrierungen deutscher Meerespegel deuten in einigen Fällen auf eine Vergrößerung des bisher beobachteten eustatischen Meeresspiegelanstiegs von 15 cm/Jahrhundert hin. Für den Bereich der deutschen Nordseeküste leitet z.B. LOHRBERG (1989) aus der Analyse der Pegelmessungen der letzten Jahrzehnte einen Wasserstandsanstieg von 1.5 ... 6 mm/a ab. Andere Untersuchungen finden jedoch bei einem säkularen Trend von 15cm/Jahrhundert keine erkennbare Beschleunigung in den letzten Jahren (LASSEN 1991). Als Ursache für einen Anstieg werden u.a. die Auswirkungen globaler Klimaveränderungen vermutet (HANNAH 1989).

Die beobachteten Trends in den Wasserstandsregistrierungen zeigen zunächst nur relative Höhenänderungen zwischen den Pegelstandorten und dem lokalen mittleren Meeresspiegel auf. Die Ursachen für solche relativen Höhenänderungen können vielfältiger Natur sein und variieren sowohl im regionalen als auch im globalen Rahmen. So findet LEONHARD (1988) im deutschen Nordseebereich örtliche Bewegungen bis zu -3mm/a.

Als wichtiger Faktor, der in seinen Auswirkungen auf die Pegelablesungen ähnliche Beträge erreichen kann wie die prognostizierte Änderung des globalen mittleren Meeresspiegels, sind vertikale Massenbewegungen im Bereich der Pegelstationen zu berücksichtigen. Um Erkenntnisse über diese Bewegungen zu erhalten, stehen verschiedene geodätische Meßmethoden zur Verfügung. Neben der Radiointerferometrie auf langen Basen (engl. Very Long Baseline Interferometrie VLBI), Laserdistanzmessungen zu Satelliten (Satellite Laser Ranging SLR), dem Globalen Positionierungssystem (Global Positioning System GPS) und dem geometrischen Nivellement können auch präzisionsgravimetrische Methoden zur Detektion vertikaler Massenbewegungen eingesetzt werden. In Kombination relativer und absoluter Techniken lassen sich damit globale bzw. regionale Kontrollsysteme zur Erfassung von Landhebungen bzw. -senkungen aufbauen. Diese kostengünstige Alternative (bzw. unabhängige Kontrolle) zu den aufwendigen Raumverfahren wird deshalb auch international vorgeschlagen (CARTER et al. 1989), Pilotprojekte laufen u. a. auf Hawaii (CARTER et al. 1988) und im Mittelmeer (SEa Level Fluctuations (SELF) PROJECT).

Das *Institut für Erdmessung (IfE)* der *Universität Hannover* hat 1993 - finanziert durch das *Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF)* - mit der Einrichtung eines gravimetrischen Kontrollnetzes entlang der deutschen Küstenlinien begonnen. Im Rahmen des auf vier Jahre angelegten Forschungsprojektes „Überwachung vertikaler Massenbewegungen an deutschen Meerespegeln durch absolute Schweremessungen“, MTK 0554, wurden bis 1997 in der Nähe von 11 ausgewählten Meerespegeln Schweremessungen mit dem JILAG-3 Absolutgravimeter des *IfE* durchgeführt. Außerdem wurden drei Referenzstationen mit Küstenentfernungen >150km, auf denen bereits langjährige Meßreihen mit JILAG-3 vorlagen, im Rahmen dieses Projekts wiederholt beobachtet. Zur unabhängigen Kontrolle der Absolutmessungen wurden die Schweredifferenzen zwischen den Absolutstationen mit Relativgravimetern bestimmt. Dabei wurden auch benachbarte Stationen des Deutschen Schweregrundnetzes (DSGN), das in den Jahren 1994 und 1995 unter Federführung des damaligen *Instituts für Angewandte Geodäsie* (heute: *Bundesamt für*

Kartographie und Geodäsie) neu vermessen wurde, mit einbezogen. Zur Überprüfung bzw. Verbesserung der vorhandenen Modelle zur Gezeitenreduktion im Küstenbereich wurden auf drei Stationen Langzeitregistrierungen mit LaCoste&Romberg-Relativgravimetern, ausgerüstet mit elektronischen Feedbacksystemen des *Ife*, durchgeführt.

Als genauigkeitsbeschränkender Faktor bei Absolutschweremessungen ist u.a. der Einfluß seismischer Schwingungen zu nennen. Besonders bei unruhigen Umgebungsbedingungen (anthropogene und natürliche Mikroseismik, z.B. durch Meeresbewegungen) oder bei ungünstigen Stationseigenschaften (Beschaffenheit der Gravimeteraufstellfläche) kann der abgeleitete Schwerewert verfälscht werden. Im Rahmen des Projekts wurden deshalb zusätzliche Messungen zur Erfassung seismischer Störeinflüsse durchgeführt und analysiert.

1. Projektplanung

1.1 Leistungsfähigkeit der Gravimetrie

Zeitliche Schwereänderungen resultieren aus Gezeitenkräften (gravimetrische Gezeiten des Erdkörpers, Attraktions- bzw. Auflasteffekte durch Verlagerung ozeanischer Wassermassen), aus Veränderungen des Erdrotationsvektors und aus Veränderungen von Dichteverteilungen (Massenverlagerungen), die sowohl in tieferen Teilen des Erdkörpers (z.B. Massentransporte im Erdmantel) als auch in oberflächennahen Bereichen (z.B. tektonisch bedingte Massenverschiebungen, Grundwasser- und Luftdruckschwankungen) stattfinden können.

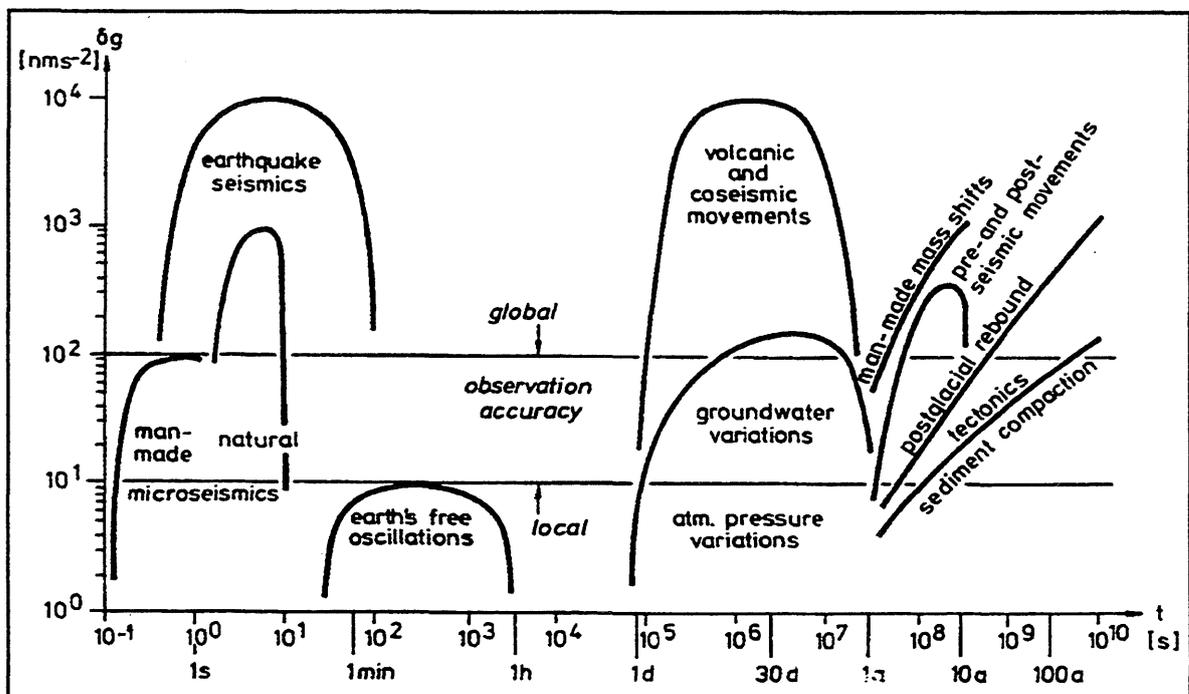


Abbildung 1.1: Nicht-gezeitenbedingte zeitliche Schwereänderungen aufgrund von Massenverlagerungen (TORGE 1989).

Schwereänderungen aufgrund von Massenverlagerungen treten mit unterschiedlicher örtlicher und zeitlicher Ausdehnung auf (Abb. 1.1). *Globale* Schwereänderungen (Ausdehnung $>10^4$ km) können durch Vorgänge im Erdinnern (Verschiebungen des exzentrischen Erdkerns gegenüber dem Erdmantel, Mantelkonvektion) oder in der Lithosphäre (Plattentektonik) verursacht werden. *Regionale* Schwereänderungen ($10^2 \dots 10^4$ km) treten im Zusammenhang mit postglazialen, isostatischen Ausgleichsprozessen, Gebirgsbildung oder Sediment-Kompaktion auf. *Lokale* Schwereänderungen ($10^0 \dots 10^2$ km) werden hauptsächlich durch seismo-tektonische Vorgänge und Verlagerungen im Zusammenhang mit Erdbeben oder mit Bewegungen entlang von Falten- oder Bruchzonen verursacht. Letztlich müssen auch menschliche Aktivitäten in dieser Kategorie genannt werden, zum Beispiel bei der Entnahme von Rohstoffen oder bei größeren Baumaßnahmen.

Oberflächennahe Massenverlagerungen können als Dichteänderungen der gravitativ wirkenden Körper aufgefaßt werden. Sie sind in der Regel mit Krustenbewegungen verbunden, die Verschiebungen des Beobachters im Erdschwerefeld zur Folge haben. Als Schwereänderungen machen sich Veränderungen der Beobachtungsposition hauptsächlich dann bemerkbar, wenn

sie entlang der Lotlinie (d.h. in der vertikalen Komponente) erfolgen. Gravimetrische Meßverfahren sind deshalb zur Detektion von Höhenänderungen geeignet, vorausgesetzt daß die aus anderen Ursachen resultierenden zeitlichen Schwereänderungen anhand ausreichend genauer Reduktionsmodelle aus den Beobachtungen entfernt werden können.

Nach Reduktion periodischer Effekte (Gezeiten, Polbewegung) enthält eine gemessene Schwereänderung den kombinierten Effekt aus vertikaler Positionsänderung und dem integralen Einfluß aller damit verbundenen Massenverlagerungen. Zur Umrechnung von *Schwereänderungen* δg in *Höhenänderungen* δH sind also Informationen bzw. Annahmen über die den Schwereänderungen zugrundeliegenden Massenverlagerungen nötig. Bei vertikalen Positionsänderungen ohne Massenverlagerungen ist der Freiluft-Schweregradient

$$\frac{\delta g}{\delta H} = -3 \mu\text{ms}^{-2} / \text{m} \quad (1)$$

zur Umrechnung anzusetzen. Müssen Massenverlagerungen berücksichtigt werden (großräumige Vorgänge), so wird in erster Näherung häufig ein Bouguer-Plattenmodell herangezogen (TORGE 1989):

$$\delta g = -2 \frac{g}{R} \delta H + 2 \pi G \rho \delta H \quad (2)$$

- mit R : Erdradius (~ 6370 km)
 g : Schwerebeschleunigung (~ 9.8 ms⁻²)
 G : Gravitationskonstante ($= 6.673 \cdot 10^{-11}$ m³kg⁻¹s⁻²)
 ρ : Dichte (Erdkruste ~ 2670 kgm⁻³).

Setzt man die angegebenen Werte für R, g, G und ρ in (2) ein, so erhält man:

$$\frac{\delta g}{\delta H} = -2 \mu\text{ms}^{-2} / \text{m} \quad (3)$$

Gelingt es demnach, Schwereänderungen mit einer Genauigkeit von 30...50 nms⁻² nachzuweisen, so können mit gravimetrischen Methoden Höhenänderungen in einer Größenordnung von 1...2.5 cm aufgedeckt werden. Die Unsicherheit des Umrechnungsfaktors geht dabei als Fehler in die aus Schweremessungen abgeleiteten Höhenänderungen ein (TORGE 1986). Lokal gültige Umrechnungsfaktoren lassen sich aus dem Vergleich mit wiederholten geometrischen Höhenmessungen berechnen, hierzu stehen in Zukunft die von anderen Institutionen durchgeführten Nivellements und GPS-Höhenbestimmungen zur Verfügung. Bei einer angenommenen Genauigkeit der gravimetrischen „Nullmessung“ von $\pm 5 \cdot 10^{-8}$ wäre also eine erste Wiederholungsmeßkampagne nach etwa 20 Jahren sinnvoll.

1.2 Stationsauswahl

In Absprache mit den zuständigen Wasser- und Schifffahrtsdirektionen wurden 11 Hauptpegel an der deutschen Nord- und Ostseeküste ausgewählt. Die Stationen für die absoluten Schweremessungen sollten im Umkreis von 10 km um diese Pegel liegen. Ein Mindestabstand von 1 km zur Küstenlinie sollte eingehalten werden, um den Einfluß von Störsignalen (direkte Attraktionswirkung der Wassermassen, erhöhte Mikroseismik durch Meeresbrandung) klein zu

halten. Es wurde außerdem darauf geachtet, daß die Pegel auch im Rahmen anderer Projekte (BMBF-Forschungsvorhaben "Präziser Höhenanschluß des Helgoländer Pegels" (SEEBER und TORGE 1997), "Baltic Sea Level Project" (z.B. KAKKURI 1995)) beobachtet werden, so daß eine zusätzliche geometrische Überwachung durch GPS gewährleistet ist (Tab. 1.1).

Station	Baltic Sea LevelProject ¹⁾	Anschluß Pegel Helgoland ²⁾	Deutsches Schweregrundnetz ³⁾	Gezeitenregistrierung ⁴⁾	Absolute Schweremessung ⁵⁾
Borkum	x	x			x
Helgoland	x	x		x	x
Wilhelmshaven		x			
Bremerhaven		x			x
Cuxhaven		x			x
Büsum		x			x
Pellworm		x			
Wittdün (Amrum)		x			
Hörnum (Sylt)		x			
Dagebühl		x			
List (Sylt)	x	x			x
Flensburg			x		
Hamburg			x		
Travemünde	x				x
Wismar					x
Warnemünde	x		x	x	x
Saßnitz	x				x
Koserow					x

Tabelle 1.1: Beobachtung von deutschen Meerespegeln innerhalb verschiedener Projekte.

- 1) GPS-Projekt zur Vereinheitlichung des vertikalen Datums der Ostsee-Anrainerstaaten.
- 2) GPS-Projekt zur Bestimmung der NN-Höhe des Meerespegels Helgoland durch Übertragung von den umliegenden Festlandspegeln.
- 3) Station des Deutschen Schweregrundnetzes (DSGN), das 1976 eingerichtet wurde und u.a. zum Nachweis zeitlicher, nicht gezeitenbedingter Schwereänderungen dient. Seit 1994 besteht es aus 30 Stationen, auf denen vom Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG) in den Jahren 1994/95 absolute und teilweise auch relativgravimetrische Messungen durchgeführt wurden (z.B. TORGE, REINHART et al. 1995).
- 4) Im Rahmen des BMBF-Forschungsvorhabens "Überwachung vertikaler Massenbewegungen an deutschen Meerespegeln durch absolute Schweremessungen" durchgeführte gravimetrische Gezeitenregistrierung.
- 5) Im Rahmen des BMBF-Forschungsvorhabens "Überwachung vertikaler Massenbewegungen an deutschen Meerespegeln durch absolute Schweremessungen" durchgeführte Absolutschweremessung.

Absolute Schweremessungen mit dem hier eingesetzten JILAG-3 Gravimeter erfordern eine möglichst stabile Aufstellung in einem Gebäude (RÖDER 1994). Um auch auf längere Sicht

einen möglichst problemlosen Stationszugang zu gewährleisten, wurden zum einen ausschließlich Gebäude ausgewählt, die im öffentlichen Besitz sind und an denen zum anderen in absehbarer Zeit keine größeren baulichen Veränderungen zu erwarten sind.

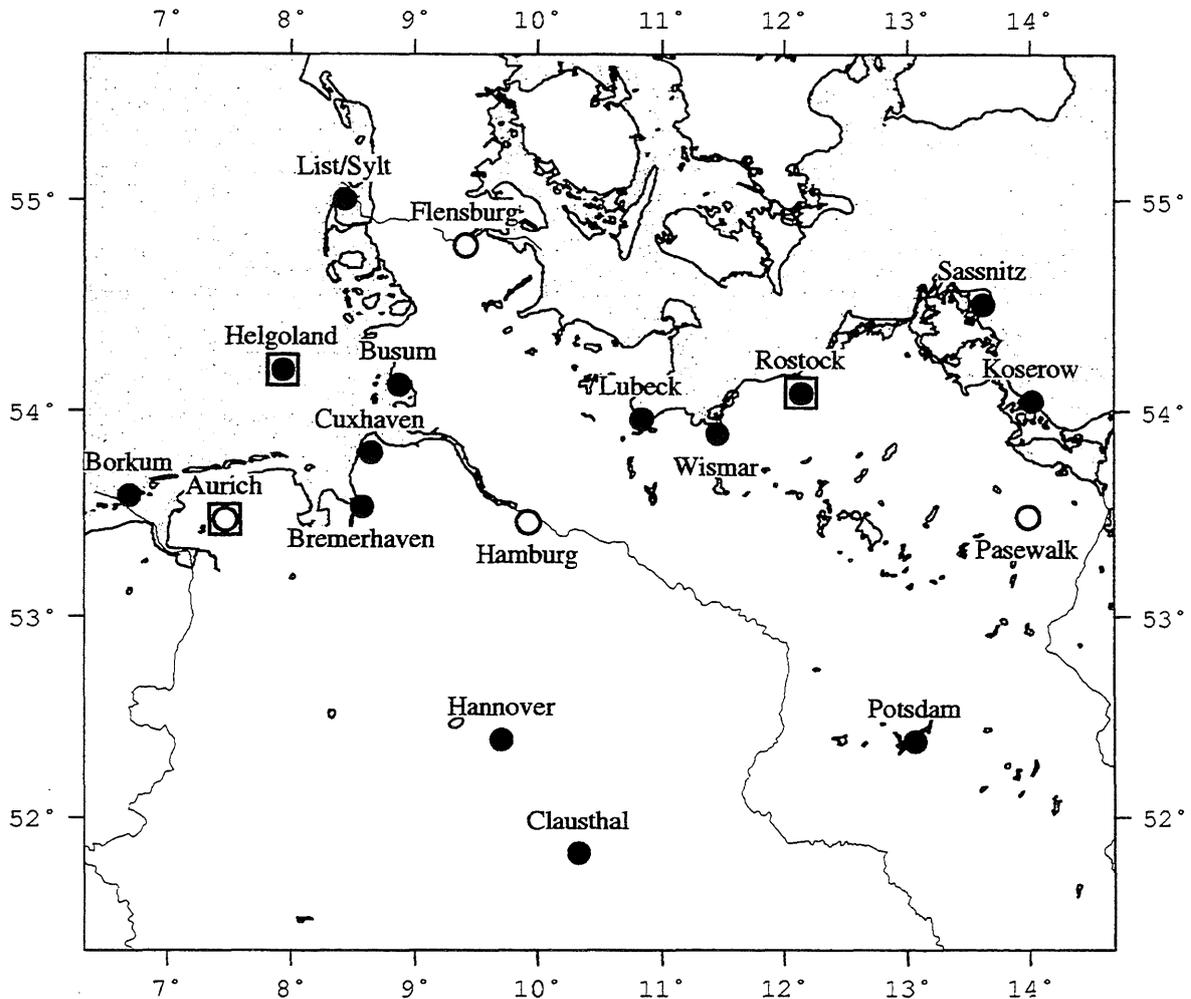


Abbildung 1.2: Stationsübersicht des gravimetrischen Kontrollnetzes (● Absolutstationen zur Pegelüberwachung, ○ Station des DSGN, □ Registrierung gravimetrischer Gezeiten).

Neben diesen lagemäßigen bzw. logistischen Aspekten wurde besonderer Wert auf die Beschaffenheit der Gebäude gelegt. So wurden ausschließlich Gebäude ausgewählt, die älter als 10 Jahre sind, um setzungsbedingte Höhenänderungen der Absolutstationen möglichst auszuschließen. Es mußte außerdem eine stabile Aufstellfläche für das Absolutgravimeter vorhanden sein, um instrumentell bedingte, systematische Verfälschungen der Messungen weitgehend zu vermeiden (Kap. 3).

In Abbildung 1.2 wird eine Übersicht über sämtliche ausgewählte Stationen gegeben. Neben den Pegelpunkten sind auch die im Küstenbereich liegenden Punkte des Deutschen Schweregrundnetzes (DSGN) und die drei Punkte der Inlandbasis Hannover - Clausthal - Potsdam dargestellt. Ebenfalls eingetragen sind die drei Stationen, an denen gravimetrische Gezeitenregistrierungen durchgeführt wurden. Sie sollen zur verbesserten Modellierung gezeiten- bzw. luftdruckbedingter Schwereänderungen im Küstenbereich beitragen (Kap. 6).

2. Das JILAG-3 Absolutgravimeter

Die Absolutgravimeter der JILAG-Serie wurden von Prof. J. E. Faller und Mitarbeitern am Joint Institute for Laboratory Astrophysics (JILA) in Boulder, Colorado/USA, entwickelt (FALLER et al. 1983). Das JILAG-3 wird seit 1986 am Institut für Erdmessung betrieben und wurde seitdem weltweit zu mehr als 140 Absolutschwerebestimmungen eingesetzt. Da das Instrument sowie die am IfE bisher benutzten Beobachtungs- und Auswertemethoden bereits gut dokumentiert sind (TORGE 1993, RÖDER 1994, TIMMEN1994), werden an dieser Stelle nur die Hauptmerkmale zusammengefaßt.

2.1 Meßprinzip

Das JILAG-3 arbeitet nach dem "Frei-Fall"-Prinzip, d.h. der Stationsschwerewert g wird aus Weg-Zeit Paaren abgeleitet, die zu einem nur vom Erdschwerefeld beschleunigten Körper gemessen werden. Die Streckenmessung basiert auf dem Prinzip des Michelson-Interferometers, wobei ein frequenzstabilisierter Helium-Neon Laser als Längenstandard dient. Das von diesem Laser ausgesandte Licht konstanter Wellenlänge wird aufgespalten in einen Meß- und einen Referenzstrahl. Der Meßstrahl wird von der fallenden Testmasse (Reflektor-Prisma) reflektiert, während der Referenz-Laserstrahl auf ein fixiertes Referenzprisma gelenkt wird (Abb. 2.1). Die Überlagerung der beiden Strahlen nach der Reflektion führt zu einem Interferenzsignal, dessen Nulldurchgänge von einer Photodiode abgetastet werden. Die Zeitzuordnung dieser Nulldurchgänge geschieht über ein Rubidium-Atomnormal und einen Zeitintervallmesser (Universal Time Interval Counter der Firma Hewlett Packard).

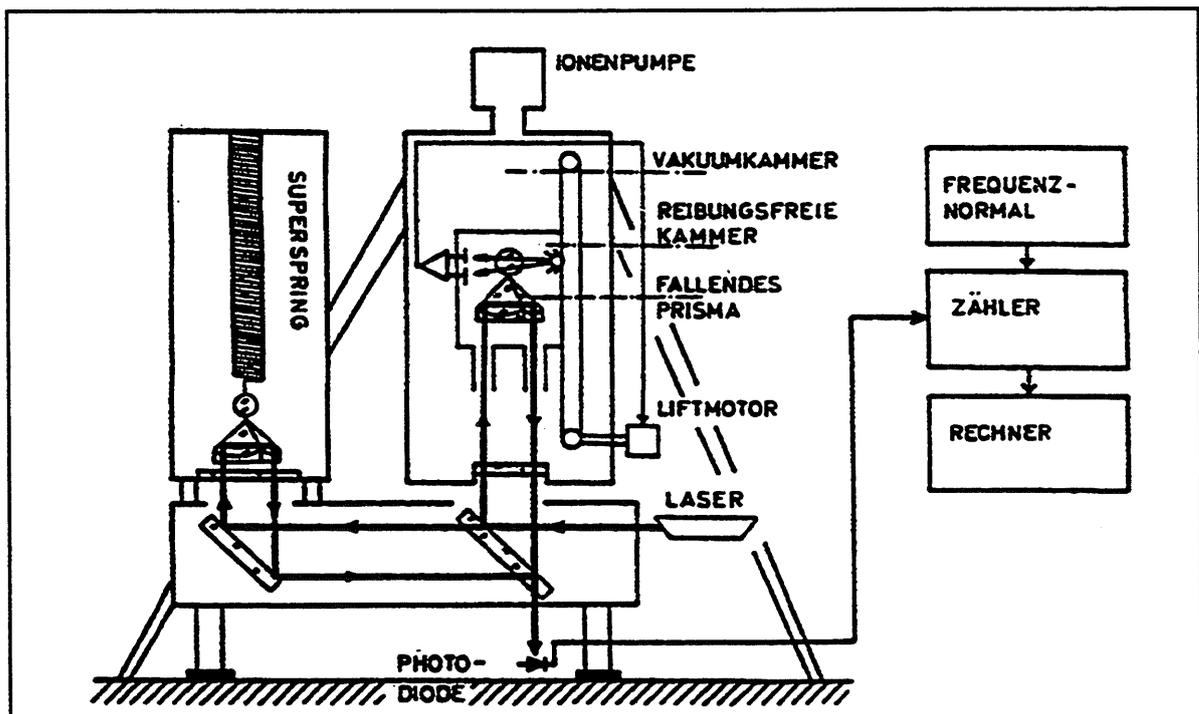


Abbildung 2.1: Funktionsschema des Absolutgravimeters JILAG-3 (WENZEL 1989).

In der Fallkammer des JILAG-3 wird kontinuierlich ein Hochvakuum (10^{-4} Pa) gehalten. Das fallende Prisma wird gegen die noch verbleibenden Luftmoleküle durch eine mitbeschleunigte

Kammer abgeschirmt ("reibungsfreie" Kammer). Eventuell auf den Referenz-Reflektor einwirkende mikroseismische Erschütterungen werden durch Verwendung eines langperiodischen Federsystems weitgehend absorbiert. Die Eigenperiode dieser sogenannten "Superspring" wird elektronisch von 1s auf bis zu 60 s verlängert. Die Fallhöhe in den JILA-Instrumenten beträgt 0.25m, entsprechend einer durchschnittlichen Fallzeit von 0.22s. Pro Fallversuch kommt es zu ca. 800.000 Nulldurchgängen des Interferenzsignals, von denen jeder 4000. zur Auswertung herangezogen wird. Auf diese Weise erhält man für jeden Fallversuch 200 Weg-Zeit Paare, aus denen über eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten die Schwerebeschleunigung g berechnet wird. Der Stationsschwerewert ergibt sich als Mittelwert aus 1500...3000 Fallversuchen.

2.2 Meßgenauigkeit

Die absolute Genauigkeit eines mit dem JILAG-3 bestimmten Stationsschwerewertes wird bisher mit $0.10 \mu\text{ms}^{-2}$ (TIMMEN 1994) bzw. $0.05 \mu\text{ms}^{-2}$ (RÖDER 1994) abgeschätzt. Die relative Genauigkeit (Wiederholbarkeit bei Messung mit dem selben Instrument, Präzision) wird von TIMMEN (1994) mit $0.07 \mu\text{ms}^{-2}$ angegeben. Es muß jedoch berücksichtigt werden, daß die tatsächliche Genauigkeit einer Schweremessung nur schwer bestimmt werden kann, da der "wahre" Schwerewert immer unbekannt ist und kein "Standard"-Absolutgravimeter existiert. Rein instrumentelle Fehlerabschätzungen anhand der JILAG-3 Konstruktionsmerkmale sind auch nur bedingt zur Ableitung realistischer Genauigkeitsmaße geeignet, da sie immer die Gefahr in sich bergen, nicht alle Gravimeter-bedingten systematischen Fehler richtig erkannt zu haben. Als Grundlage der o.g. Zahlenwerte dienen deshalb Vergleiche mit anderen Absolutgravimetern (absolute Genauigkeit), Wiederholungsmessungen mit JILAG-3 und Vergleiche mit Ergebnissen der Relativgravimetrie (relative Genauigkeit). Die in diesen Angaben enthaltenen Fehler können unterteilt werden in:

- zeitunabhängige konstruktionsbedingte Fehler des JILAG-3 Systems,
- zeit- und ortsabhängige Fehler des Gravimeters, z.B. durch Alterung und Verschleiß von Bauteilen (Kap. 2.3), unterschiedliche Stationsstabilität (Kap. 3.1), ...
- zeit- und ortsabhängige Fehler durch Reduktionsunsicherheiten (nicht oder unzureichend modellierte tatsächliche Schwereänderungen mit Ausnahme des gesuchten Signals „vertikale Positionsänderung“ (siehe Kap. 6)).

Seit 1981 werden am *Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)* in Sèvres bei Paris internationale Vergleichskampagnen mit Absolutgravimetern unterschiedlichen Typs durchgeführt. Während des Pegelprojekts, über das hier berichtet wird, fand ein solcher Vergleich 1994 statt. Neben vier JILA-Gravimetern nahmen erstmalig auch fünf FG-5 Instrumente teil, die aus der gleichen Entwicklungslinie wie die JILA Gravimeter stammen und als deren Weiterentwicklung angesehen werden können. Sie zeichnen sich u.a. durch die Verwendung eines modifizierten Mach-Zender "in-line" Interferometers (NIEBAUER 1995) aus. Im Gegensatz zu den JILA-Gravimetern muß das Laserlicht im FG-5 zwischen den beiden Interferometerarmen keine horizontale Distanz überbrücken. Es ist daher wesentlich unempfindlicher gegenüber (stationsabhängigen) Neigungen oder anderen Bewegungen der Interferometerbasis während der Fallversuche.

Die Ergebnisse des Sèvres-Vergleichs 1994 sind in Abb. 2.2 dargestellt. Die Resultate der einzelnen Gravimeter auf verschiedenen Beobachtungsstationen wurden zum Vergleich mit Hilfe relativgravimetrischer Verbindungsmessungen auf einen Punkt zentriert. Für ein einzelnes Instrument kann daraus eine Standardabweichung von $0.03\text{-}0.04 \mu\text{ms}^{-2}$ abgeleitet werden. Diese Standardabweichung enthält jedoch nicht die Unsicherheiten, die durch langfristige Schwereänderungen (z.B. durch Grundwasser oder Baumaßnahmen) entstehen, da fast alle Messungen innerhalb weniger Tage durchgeführt wurden. Im Vergleich zu den vorherigen Sèvres-Kampagnen, die jeweils im Abstand von 4-5 Jahren stattfanden, ist eine Abnahme der Streuung von ca. $0.10 \mu\text{ms}^{-2}$ (1981/82) auf $0.03 \mu\text{ms}^{-2}$ (1994) festzustellen (Abb. 2.3). Dabei soll jedoch nicht unerwähnt bleiben, daß bis auf eine Ausnahme (1989) in jeder Kampagne Außreißer mit Differenzen bis zu $0.50 \mu\text{ms}^{-2}$ zum Gesamtmittel auftraten. Das im Rahmen dieses Projektes eingesetzte JILAG-3 Gravimeter weicht vom Mittelwert 1994 um $+0.028 \mu\text{ms}^{-2}$ ab.

Am Absolutgravimetervergleich am BIPM im November 1997 nahm das IfE ebenfalls teil. Das JILAG-3 Ergebnis differiert vom Resultat 1994 um weniger als $+0.05 \mu\text{ms}^{-2}$ (1997-1994).

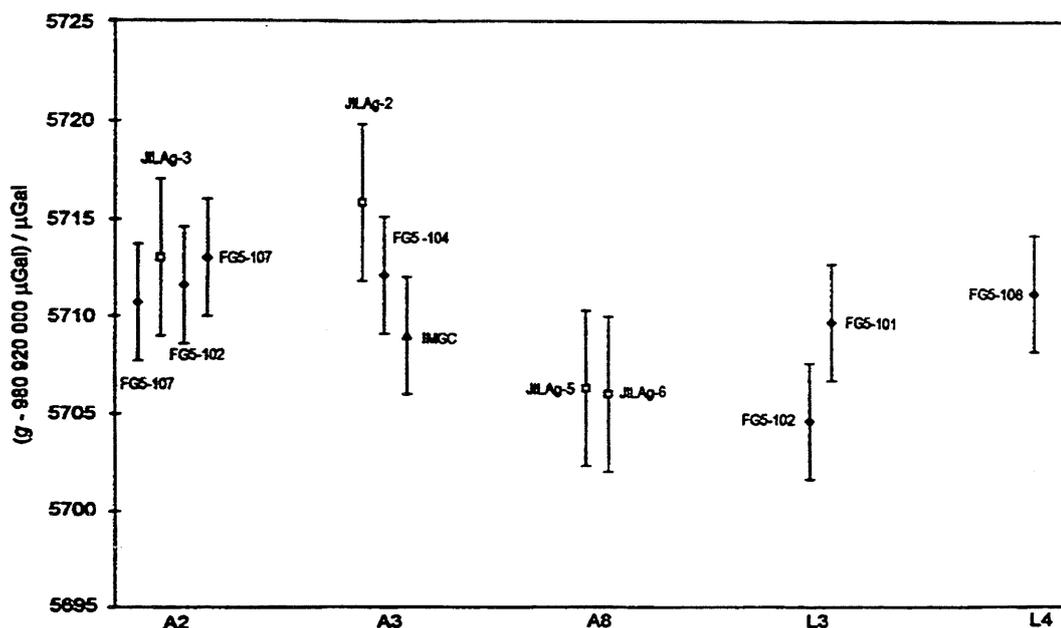


Abbildung 2.2: Einzelergebnisse Absolutgravimetervergleich BIPM 1994 (MARSON et al. 1995). Schwerewerte bezogen auf Station A0, Referenzhöhe 0.90m.

2.3 Jodstabilisierter Helium-Neon Laser

Seit 1986 diente ein noch im JILA eingebauter frequenzstabilisierter He-Ne-Gaslaser als Längenstandard des JILAG-3 Absolutgravimeters. Das Stabilisierungsprinzip beruht bei diesem Lasertyp auf zwei orthogonal zueinander polarisierten Axialmodi f_{\perp} und f_{\parallel} innerhalb der Dopplerbandbreite der Neon-Emissionslinie ($f_{\text{Ne}}=474 \text{ THz}$). Sie haben eine Frequenzdifferenz von etwa 700 MHz. Wird der Abstand zwischen den Resonatorspiegeln des Lasers (21 cm) durch Beheizen verändert, so nimmt die Lichtstärke des einen Modus zu, während im anderen

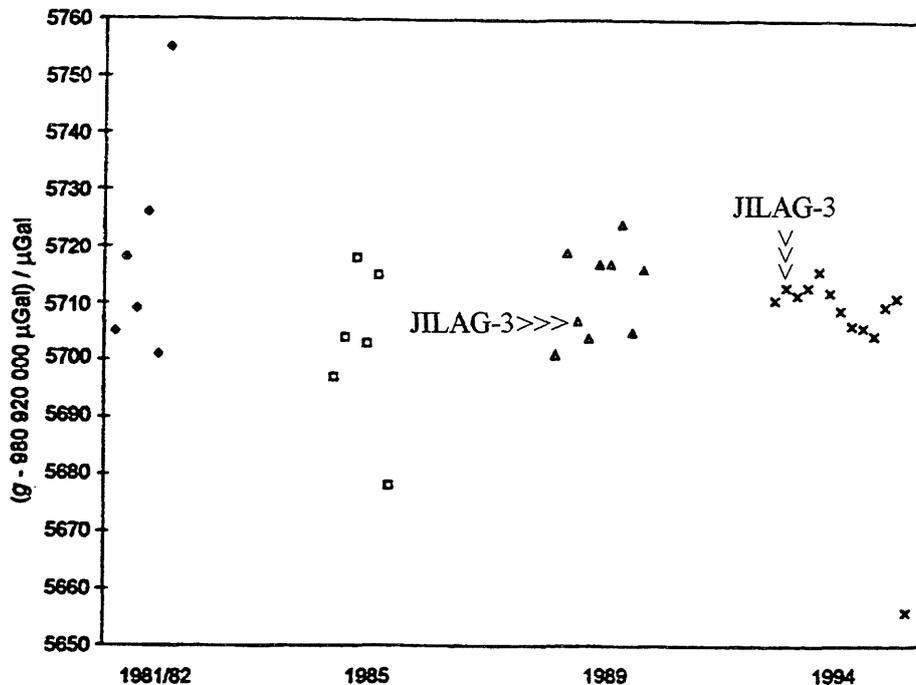


Abbildung 2.3: Ergebnisse der bisherigen Absolutgravimetervergleiche am Bureau International des Poids et Mesures (MARSON et al. 1995).

Modus die Lichtstärke abnimmt. Mit Hilfe zweier identischer Photodioden werden diese Lichtstärken in Spannungen U_I und U_{II} umgewandelt. Über eine Feedback-Regelung kann der Abstand zwischen den Resonatorspiegeln so variiert werden, daß die Spannungsdifferenz $U=U_I-U_{II}$ konstant bleibt und somit die Frequenzen f_I und f_{II} stabilisiert sind (Abb. 2.4). Für interferometrische Messungen wird nur das Laserlicht des Axialmodus I benutzt. Wegen der Symmetrie des Dopplerprofils sind dann zwei Stabilisierungsmodi möglich, um einen bestimmten Wert für $U=\text{const}$ einzustellen. Das im Stabilisierungsmodus "rot" ausgesandte Licht hat eine kleinere Frequenz ($f_{I,\text{rot}}$) als f_{Ne} , während im Modus "blau" die Frequenz $f_{I,\text{blau}}$ größer als f_{Ne} ist. Das Mittel dieser beiden Frequenzen fällt aber nur annähernd mit f_{Ne} zusammen. Untersuchungen von NIEBAUER (1987) mit den Lasern der sechs JILA-Gravimeter über einen Zeitraum von fünf Wochen ergaben lineare Driften für $f_{I,\text{rot}}$ und $f_{I,\text{blau}}$ mit entgegengesetztem Vorzeichen (teilweise symmetrisches Driftverhalten). Die Mittelfrequenzen änderten sich im Mittel um -4.3 MHz/a ($\pm 0.8 \text{ MHz/a}$) entsprechend $9 \cdot 10^{-9}/\text{a}$ ($\pm 1.7 \cdot 10^{-9}/\text{a}$).

Während Kurzzeitdriften im Frequenzverhalten der Einzelmodi durch abwechselnde Messungen im "roten" und im "blauen" Modus und anschließende Mittelbildung weitgehend eliminiert werden können, muß das Driftverhalten der Mittelfrequenz durch Kalibriermessungen kontrolliert werden. Entsprechende Laseruntersuchungen am IfE ergaben eine Langzeitdrift von -1.7 MHz/a oder $-4 \cdot 10^{-9}/\text{a}$. Außerdem wurden temperaturabhängige periodische Frequenzänderungen mit einer Amplitude von ca. 2 MHz und einer Periode von etwa 7°C gefunden (Abb. 2.5), die in Form einer Lasertemperaturkorrektur des Schwerewertes berücksichtigt werden. Beim JILAG-3 würde eine nicht erkannte Laserfrequenzänderung von 1 MHz eine scheinbare Schwereänderung von 20 nms^{-2} verursachen.

Im Dezember 1994 wurde der frequenzstabilisierte He-Ne-Gaslaser durch einen jodstabilisierten He-Ne Laser, MODEL 100 ersetzt. Der Laser wurde aus Mitteln dieses BMBF-For-

schungsvorhabens von der Firma Winters Electro-Optics, Inc., Longmont, Colorado/USA erworben. Die Konstruktion dieses Lasers basiert auf einem Prototyp, der über mehrere Jahre am *Bureau International des Poids et Mesures* entwickelt wurde und dort seine hohe Präzision und Zuverlässigkeit schon bewiesen hat.

Die Laserfrequenz ist bei diesem Typ an Frequenzen gekoppelt, die Absorptionslinien für Hyperfeinstruktur-Übergänge von $^{127}\text{Jod}_2$ darstellen. Die Niveaus dieser Hyperfeinstruktur-Übergänge sind hochstabil bei Berücksichtigung bestimmter Umgebungsbedingungen. Der Laser stellt somit eine direkte Realisierung der SI-Definition des Meters dar und erfordert deshalb keine Kalibrierung (NIEBAUER et al. 1995), vorausgesetzt, die in QUINN (1994) angegebenen Umgebungsparameter werden beim Laserbetrieb eingehalten (CHARTIER et al. 1995).

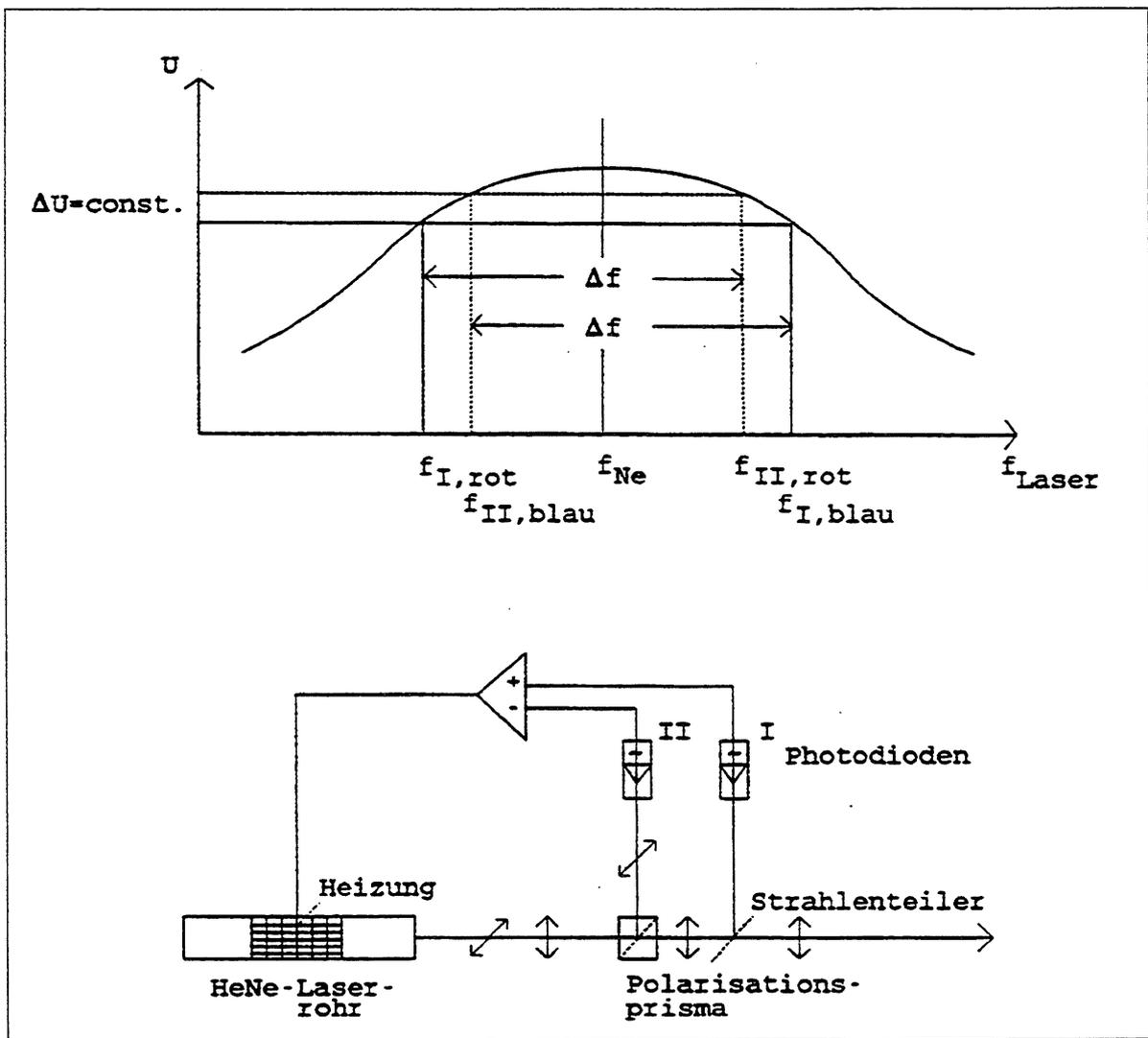


Abbildung 2.4: Prinzip der Wellenlängenstabilisierung des im JILAG-3 bis 1995 integrierten He-Ne Lasers (TIMMEN 1994, untere Abbildung nach NIEBAUER 1987).

Die absolute Genauigkeit wird vom Hersteller mit $1\text{-}2\cdot 10^{-10}$ angegeben (entsprechend $2\text{nm}\cdot\text{s}^{-2}$ für den abgeleiteten Schwerewert) und liegt damit mehr als eine Größenordnung höher als die mit heutigen Absolutgravimetern erreichbare Genauigkeit (Kap. 2.2). Verglichen mit dem

herkömmlichen frequenzstabilisierten He-Ne Laser entfällt aufgrund der hohen Langzeitstabilität der Laserfrequenz die Notwendigkeit zur regelmäßigen Kalibrierung und zur Messung in zwei verschiedenen Stabilisierungsmodi. Temperatureffekte der in Abb. 2.5 gezeigten Art konnten bei diesem Lasertyp bisher nicht nachgewiesen werden.

Aufgrund herstellerbedingter Verzögerungen wurde der jodstabilisierte He-Ne Laser leider erst Ende April 1994 geliefert und in das Absolutgravimeter eingebaut. Während die ersten Probemessungen auf der Station Clausthal im Juni 1994 noch erfolgreich verliefen, mußte der Laser schon im Juli 1994 aufgrund eines Defekts zum Hersteller in die USA zurückgeschickt werden. Ende August 1994, kurz nach der Rückkehr des Lasers, traten bei Testmessungen auf der Station Hannover erneut Probleme auf, die nur in den USA behoben werden konnten. Der Laser stand deshalb wiederum für mehrere Wochen nicht zur Verfügung. Um die anstehenden Absolutschweremessungen nicht noch weiter verschieben zu müssen, wurde entschieden, die Messungen im Pegelkontrollsystem zunächst noch mit dem herkömmlichen Laser durchzuführen.

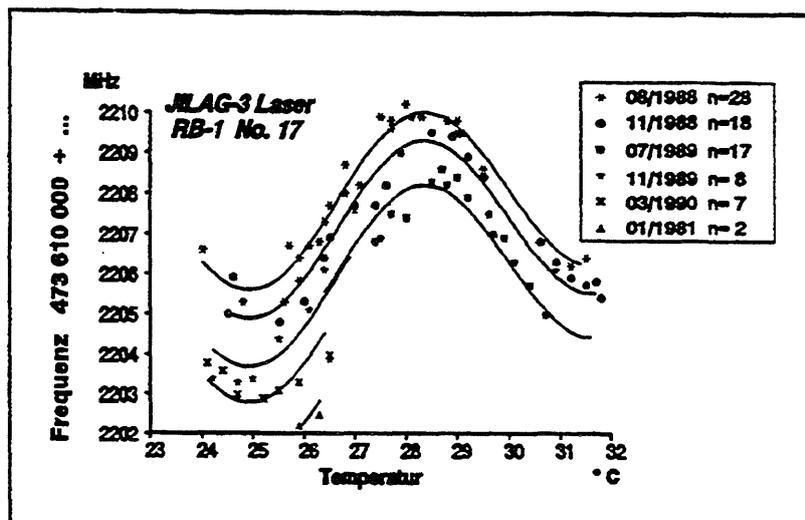


Abbildung 2.5: Laserfrequenz des frequenzstabilisierten HeNe Lasers in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur (RÖDER 1994).

Der bisher letzte Laser-Austausch fand im Dezember 1994 statt. Seitdem wurde, unterbrochen von Zwangspausen durch wiederholte Reparaturen (siehe Kap. 4.5), ausschließlich der jodstabilisierte He-Ne Laser bei den Absolutschwerebestimmungen mit dem JILAG-3 eingesetzt.

3. Absolutgravimetrie und Mikroseismik

Das Ergebnis eines einzelnen Fallexperiments ist abhängig von Bodenbewegungen, die während des Drops von der Aufstellfläche des Absolutgravimeters auf dessen Meßeinrichtung, die Interferometerbasis, übertragen werden. Bei Instrumenten des JILA-Typs sind während des Drops auftretende Neigungen der Interferometerbasis als besonders kritisch erkannt worden, da sie zu unterschiedlichen Weglängen von Meß- und Referenzlaserstrahl (Kap. 2.1) und somit zu Verfälschungen der interferometrischen Streckenmessung führen können. Im Pegelprojekt sind wegen der teilweise weniger stabilen Aufstellung im Küstenbereich Fehler dieser Art in höherem Maße zu erwarten.

3.1 Ursachen und Frequenzbänder der Mikroseismik

Mikroseismische Signale können nach HANADA (1990) in drei Arten unterteilt werden:

- *Natürliche Mikroseismik* wird durch Umweltvorgänge erzeugt, die nicht menschlichen Ursprungs sind (Wetter, Bewegungen in den Meeren). Sie treten im langperiodischen Frequenzband auf, besonders deutlich im Bereich von 0.1 bis 0.3 Hz.
- *Anthropogene Mikroseismik* resultiert aus menschlichen Aktivitäten (z.B. laufende Motoren, Straßen- und Zugverkehr). Bei diesen Signalen, die verstärkt in Innenstädten bzw. in der Nähe von Ballungszentren auftreten, dominiert der Frequenzbereich von 2 bis 30 Hz.
- Vom Absolutgravimeter gehen *instrumentelle Vibrationen* aus. Das Auslösen eines Drops und die motorbetriebene Abwärtsbewegung der mit der Testmasse beschleunigten Kammer bewirken Erschütterungen, die sich über das Stativ der Freifallkammer und die Aufstellfläche des Gravimeters auf die Interferometerbasis übertragen können. Diese Rückkopplungseffekte werden oft als "*Floor-Recoil*" bezeichnet und liegen im Frequenzbereich > 5 Hz.

Die beiden erstgenannten Typen von Mikroseismik wirken zufällig auf die abgeleiteten Einzeldropergebnisse, da der Zeitpunkt der Dropauslösung im Normalfall unabhängig von der Phasenlage der umgebungsbedingten Störsignale ist. Der Stationsmittelwert aus einer Vielzahl von Einzeldropergebnissen wird deshalb nicht verfälscht. Es ist jedoch unter Umständen eine größere Anzahl von Fallexperimenten durchzuführen, da das Meßrauschen in Abhängigkeit von den Amplituden und der spektralen Verteilung dieser Störsignale verstärkt wird (Kap. 4.5).

Instrumentell verursachte Vibrationen können hingegen zu systematischen Fehlern des Stationsmittelwerts führen, da ihre Phasenlage direkt mit dem Droppingmechanismus gekoppelt ist. Da die Auswirkungen solcher Rückkopplungseffekte von der Beschaffenheit und Länge des Übertragungsweges zwischen den Stativbeinen der Fallkammer und der Interferometerbasis abhängen, ist besonderes Augenmerk auf die Auswahl bzw. Anlage von Absolutschwerestationen zu legen. Eine weitgehende Separierung der Interferometerbasis von den Stativbeinen der Fallkammer kann durch Aufstellung auf einem Beobachtungspfeiler erreicht werden, der nur über den Untergrund mit dem umgebenden Fußboden verbunden ist (Abb. 3.1). Solche speziellen Beobachtungspfeiler sind jedoch nicht überall verfügbar bzw. können nicht auf jeder Station angelegt werden. In diesen Fällen muß entweder eine optimale seismische Isolierung der Interferometerbasis gewährleistet sein (Kap. 3.2), oder die eventuell

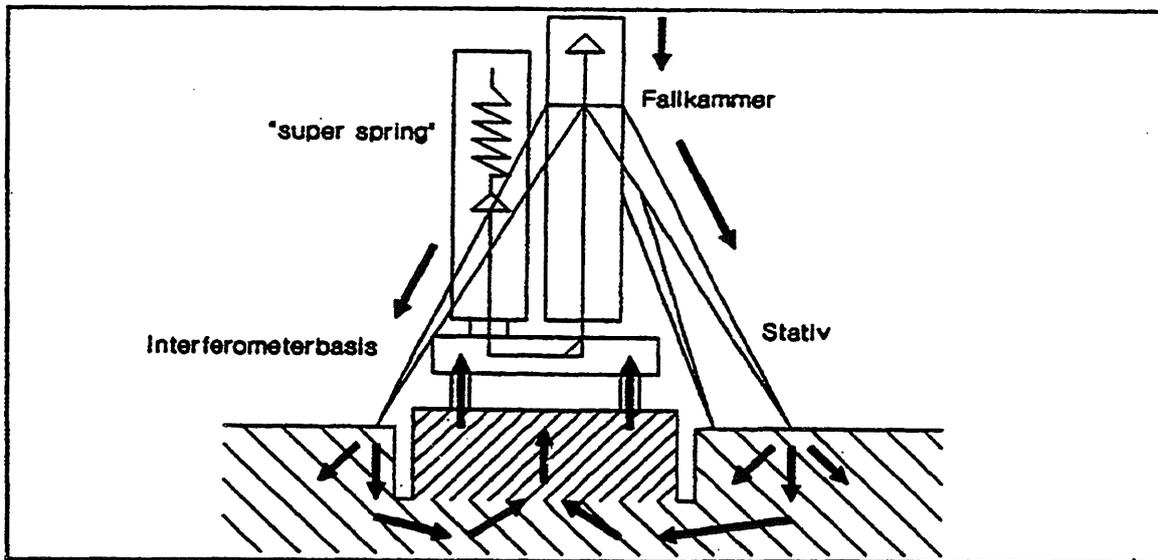


Abbildung 3.1: Günstige Aufstellung des Absolutgravimeters JILAG-3 zur Minimierung von Floor-Recoil Effekten (TIMMEN 1994).

auftretenden Erschütterungen müssen bei der Auswertung der Absolutgravimeter-Rohdaten berücksichtigt werden (Kap. 4.6).

3.2 Schwingungsdämpfungssystem M-EVIS

Um die Interferometerbasis des JILAG-3 während der Fallexperimente gegen Erschütterungen abzuschirmen, wurde das elektronische Schwingungsdämpfungssystem M-EVIS aus Mitteln dieses Forschungsvorhabens bestellt. Dabei handelt es sich um eine transportable schwingungsgedämpfte Plattform, die Vibrationen mit Hilfe aktiver Servosteuerung kompensieren kann. Als das System im August 1993 geliefert wurde zeigte sich im Testbetrieb, daß die Plattform in der Lage ist, mittel- bis kurzperiodische Schwingungen der Aufstellfläche mit Frequenzen > 1 Hz auszugleichen. Gleichzeitig wurden jedoch im langperiodischen Frequenzbereich < 1 Hz, für den der Hersteller keine genauen Spezifikationen geben konnte, zusätzliche Schwingungen erzeugt. Trotz intensiver Bemühungen seitens des Herstellers konnte dieses nicht voraussehbare Problem leider nicht gelöst werden. Das *Institut für Erdmessung* sah sich deshalb gezwungen, das Schwingungsdämpfungssystem an den Hersteller zurückzugeben.

Aufgrund der unbefriedigenden Ergebnisse mit M-EVIS wurde anschließend nicht mehr das Ziel verfolgt, die JILAG-3 Interferometerbasis mit Hilfe aktiver Systeme seismisch zu isolieren. Größere Rückkopplungseffekte durch stark schwingende Fußböden werden nun durch seismische Testmessungen schon bei der Punkterkundung weitgehend ausgeschlossen (Kap. 4.6). Außerdem wurde versucht, sämtliche Bewegungen der Aufstellfläche während der Fallexperimente simultan zu erfassen (Kap. 3.3) und später aus diesen seismischen Registrierungen Korrekturwerte für die JILAG-3 Meßwerte abzuleiten (Kap. 4.6).

3.3 Seismisches Registriersystem

Im Rahmen eines von der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* (DFG) finanzierten Projekts wurde am IfE 1992 ein Breitbandseismometer STS-2 der Firma Streckeisen/Schweiz angeschafft. Aus Mitteln des BMBF-Forschungsvorhabens "Überwachung vertikaler Massenbewegungen an deutschen Meerespegeln" wurde es um zwei elektronische Neigungsmesser Talyvel 3, einen Trägerfrequenzmeßverstärker PEEKEL CA252 und um eine Registriereinheit mit Massenspeicher erweitert.

Das dreiachsige Seismometer erfaßt Bodenbewegungen in drei zueinander orthogonalen Komponenten (X-,Y-Achse horizontal, Z-Achse vertikal). Der Hersteller gibt für das Instrument einen definierten Meßbereich von 0.008 bis > 50 Hz an, so daß das o.a. Spektrum mikroseismischer Störsignale weitgehend erfaßt wird. Für die Talyvel-Neigungsmesser wird vom Hersteller keine Frequenzübertragungsfunktion angegeben. Vergleiche mit parallel registrierten Seismometerdaten lassen jedoch auf eine obere Bandbegrenzung bei > 50 Hz schließen.

Zur Erfassung und Speicherung der Meßwerte wurde aus Mitteln des Projekts ein IBM-AT kompatibler, portabler Personal Computer Carry VIP 486-33i beschafft. Mit Hilfe einer eingebauten Analog/Digital Wandlerkarte und der Erfassungsssoftware RT-MessView können bis zu 8 Kanäle mit einer Frequenz von 1 kHz abgetastet und die Meßwerte auf einem magnetischen Massenspeicher (Wechselmedien Syquest 88MB) abgelegt werden. Um die zeitliche Zuordnung zwischen Fallversuch und seismischen Daten zu gewährleisten, wird neben den seismischen Signalen auf einem dieser Kanäle ein Triggersignal für den Flug des Fallkörpers mitregistriert.

Das Registriersystem wird bei Punkterkundungen zur Auswahl der Absolutschwerestationen und zur simultanen Erfassung der bei den Schweremessungen mit JILAG-3 auftretenden Mikroseismik eingesetzt (Kap. 4.6).

4. Absolute Schweremessungen

4.1 Rohdatenauswertung

Aus jedem JILAG-3 Fallexperiment erhält man 200 Weg-Zeit Paare (Kap. 2.1), von denen 191 in eine Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen (z.B. PELZER 1985) zur Bestimmung der Schwerebeschleunigung g einfließen. Die zugehörigen Beobachtungsgleichungen lauten:

$$z_i = z_0 \left(1 + \frac{1}{2} \gamma t_i^2 \right) + v_0 \left(t_i + \frac{1}{6} \gamma t_i^3 \right) + \frac{1}{2} g_0 \left(t_i^2 + \frac{1}{12} \gamma t_i^4 \right) + \dots \quad (4)$$

mit	z_i :	Position zum Zeitpunkt t_i
	z_0 :	Position zum Zeitpunkt t_0
	v_0 :	Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_0
	g_0 :	Schwerebeschleunigung für $z=0$
	γ :	vertikaler Schweregradient

Streng betrachtet ist dieser Ansatz als allgemeines Ausgleichungsproblem zu behandeln, da nicht nur die Distanz- sondern auch die Zeitbeobachtungen als Meßgrößen mit Fehlern behaftet sind. Deshalb glich (TIMMEN 1994) Testdatensätze mit unterschiedlich starken Störsignalen sowohl nach dem "klassischen" Verfahren nach vermittelnden Beobachtungen als auch als Allgemeinfall der Ausgleichsrechnung aus. Er erhielt maximale Differenzen von 22 nms^{-2} für Mittelwerte aus 900-1200 Fallexperimenten, konnte jedoch nicht entscheiden, welcher Ausgleichungsansatz die besseren Resultate liefert. Das Hauptproblem wurde im Fehlen von a-priori Informationen für das stochastische Modell erkannt. Zusätzlich zu instrumentell oder reduktionsbedingten Fehlerquellen (Kap. 2.2) ist deshalb eine Auswerteunsicherheit von 10 nms^{-2} für einen Run- (300 Drops) bzw. Stationsmittelwert zu berücksichtigen. Daneben zeigen die Ergebnisse jedoch deutlich, daß das in Gleichung (4) dargestellte funktionale Modell Mängel besonders dann aufweist, wenn in den beobachteten Daten Störsignale enthalten sind.

4.2 Workstation HP Apollo 735

Aus den Mitteln des Projekts wurde 1993 eine Hewlett-Packard Apollo 735 Workstation am IfE angeschafft und in Betrieb genommen. Die am Institut vorhandenen Programme, u.a. zur Auswertung absoluter Schweremessungen, Gezeitenanalyse und Ausgleichung gravimetrischer Netze, wurden auf diesem Rechner implementiert und erweitert. Der Hauptteil der nachfolgend dargestellten Berechnungen wurde auf dieser Workstation durchgeführt.

4.3 Langzeitkontrolle auf Referenzstationen

Vergleichsmessungen mit anderen Absolutgravimetern, wie sie z.B. seit 1981 am BIPM durchgeführt werden, können einen Beitrag zur Abschätzung der absoluten Genauigkeit eines Gravimeters liefern (Kap. 2.2). Instrumentelle Driften oder plötzlich auftretende systematische Fehler eines Instruments können auch durch Langzeitbeobachtungen auf stabilen Stationen mit einem genau bekannten Schwerewert erkannt werden. Außerdem sind mit Hilfe solcher

Messungen Aussagen zur Präzision des Instruments möglich. Hierbei ist jedoch sicherzustellen, daß zeitliche Schwereänderungen (z.B. durch Grundwasserstandsänderungen) an der betreffenden Station nicht auftreten bzw. hinreichend genau modellierbar sind.

Das JILAG-3 wird seit 1986 in regelmäßigen Abständen zur Absolutschwerebestimmung auf der Station Hannover (Beobachtungspfeiler im Gravimeterlabor des *IfE*) eingesetzt. Ebenfalls seit 1986 wurden Messungen auf einem Beobachtungspfeiler im Keller des Instituts für Geophysik der Technischen Universität Clausthal durchgeführt. Diese Station zeichnet sich gegenüber der Station Hannover durch wesentlich geringere umweltbedingte Störsignale aus. Zusammen mit der Station Potsdam (Gravimeterkeller des GeoForschungsZentrums, Telegrafenberg) dienen diese beiden Stationen als küstenferne Stützpunkte zur Langzeitkontrolle des Pegelkontrollsystems.

Abbildung 4.1 stellt die über den genannten Zeitraum von 11 Jahren auf den Stationen Hannover und Clausthal ermittelten Schwerewerte dar. Für eine einzelne Schwerebestimmung (jeweils Mittelwerte aus 1500...3000 Drops) ergeben sich dabei in Bezug auf das jeweilige Gesamtmittel Standardabweichungen von $0.08 \mu\text{ms}^{-2}$ (Hannover) bzw. $0.04 \mu\text{ms}^{-2}$ (Clausthal). Für eine Station allein betrachtet enthalten diese Werte außer dem zufälligen Fehleranteil lediglich zeitabhängige Fehler des Gravimeters und der verwendeten Reduktionsmodelle. Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Stationen miteinander, so werden Unterschiede in den zeit- und ortsabhängigen Fehlern durch Reduktionsunsicherheiten sowie in den ortsabhängigen instrumentellen Fehlern deutlich. Als genauigkeitsbeeinflussende Faktoren sind dabei für die Station Hannover die Großstadtlage sowie die Gründung des Beobachtungspfeilers in Sediment (Sand) zu nennen.

In den Abbildungen ist eine Abnahme der Streuung von 1986/87 bis 1991 erkennbar. In diesem Zeitraum wurden einige instrumentelle und methodische Verbesserungen im Messungsablauf und in der Rohdatenauswertung vorgenommen, die aus den Erfahrungen der ersten Messungsjahre resultierten (TIMMEN et al. 1993). Die Mittelwerte bleiben an beiden Stationen nahezu konstant.

Eine längere Zeitreihe liegt auch für Potsdam, den dritten Punkt der Inlandbasis des Pegelkontrollnetzes vor. Hier wurden seit 1976 absolute Schweremessungen durchgeführt, zunächst mit einem sowjetischen GABL Frei-Fall Gravimeter und ab 1988 mit dem JILAG-3 des Instituts für Erdmessung (TORGE et al. 1991). Die Einzelergebnisse differieren auf dieser Station für das JILAG-3 um maximal $0.10 \mu\text{ms}^{-2}$. Die in die GABL-Ergebnisse und die ersten beiden JILAG-3 Messungen noch hineininterpretierbare periodische Schwereänderung mit einer Amplitude von ca. $0.25 \mu\text{ms}^{-2}$ und einer Periodenlänge von ca. 12 Jahren (ELSTNER et al. 1991) wird durch die neueren Schweremessungen 1994 und 1997 nicht bestätigt (Abb. 4.2).

4.4 Laservergleich

Im Rahmen dieses Projekts wurde der herkömmliche Helium-Neon Laser im JILAG-3 im Dezember 1994 durch einen jodstabilisierten He-Ne Laser ersetzt (Kap 2.3). Die Messungen auf den Referenzstationen Clausthal und Hannover, die mit dem jodstabilisierten Laser durchgeführt wurden, sind in Abbildung 4.1 mit * gekennzeichnet. Während sich auf der Station Clausthal in Abhängigkeit vom Lasertyp keine systematischen Unterschiede im abgeleiteten Schwerewert zeigten, lagen die ersten drei Meßergebnisse mit dem Jod-Laser in Hannover ca. $0.07 \mu\text{ms}^{-2}$ unter den mit dem HeNe-Laser erzielten Ergebnissen. Dabei ist nicht

auszuschließen, daß diese Differenz auch durch tatsächliche, bisher nicht modellierte Schwereänderungen an der Station verursacht sein kann.

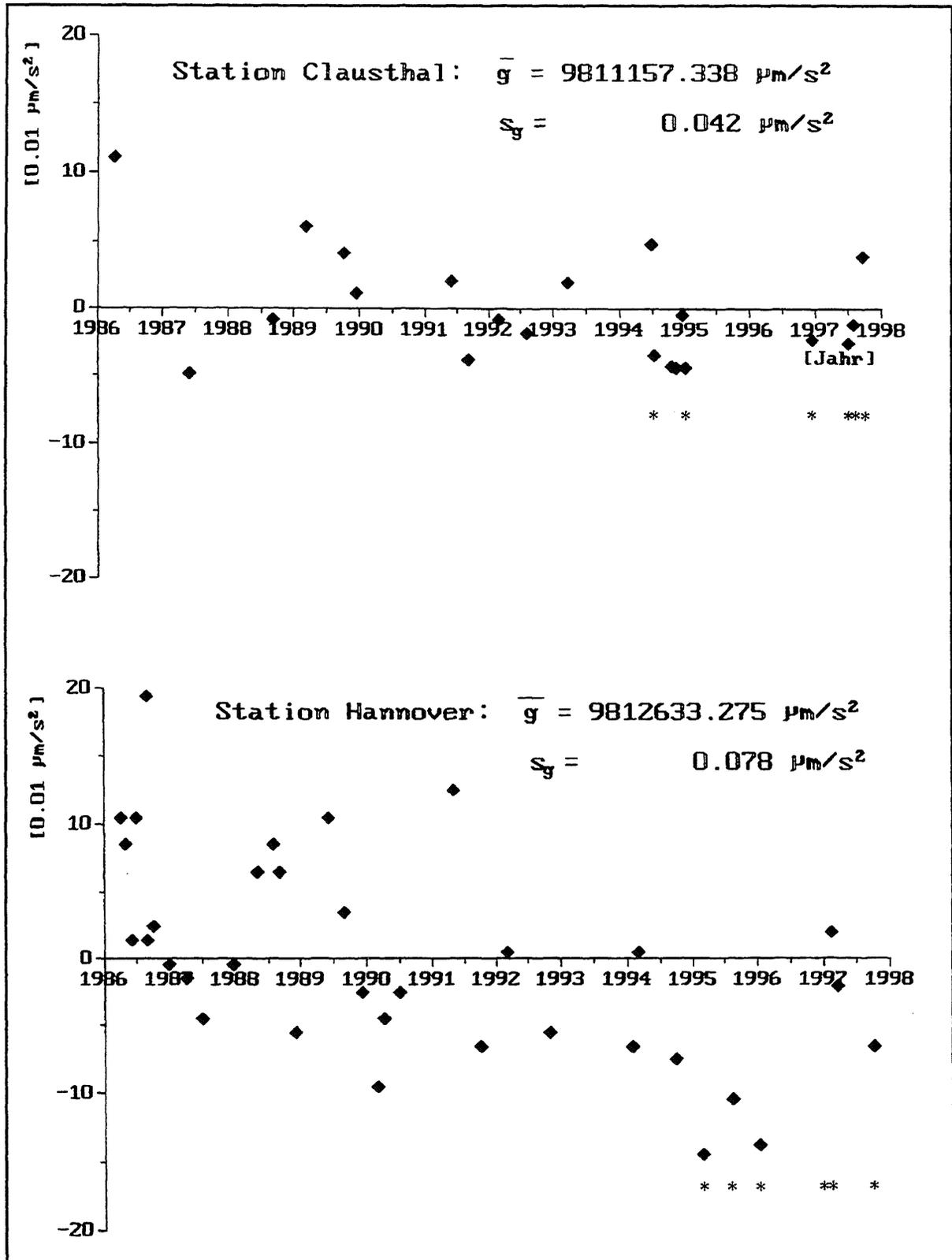


Abbildung 4.1: Zeitreihen der JILAG-3 Absolutschweremessungen auf den Stationen Clausthal und Hannover.

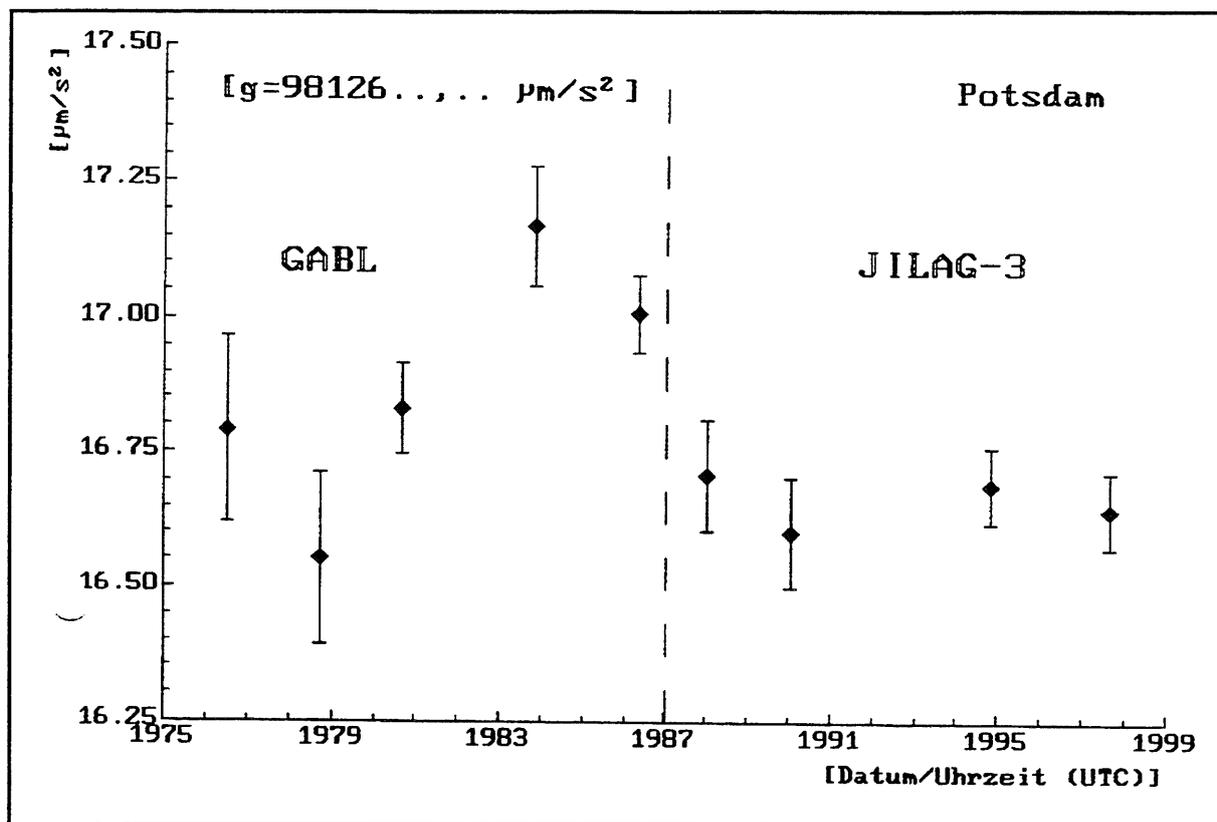


Abbildung 4.2: Absolute Schweremessungen mit „Frei-Fall“ Gravimetern auf der Station Potsdam/Telegrafenberg.

4.5 Vermessung des Pegelkontrollnetzes und Resultate

Abweichend von der ursprünglichen Planung konnte das Pegelkontrollnetz nicht in zwei durchgehenden Absolutgravimeter-Kampagnen beobachtet werden. Der Beginn der Absolutmessungen mußte aufgrund der in Kap 2.3 dargestellten Laser-Probleme zunächst mehrfach verschoben werden. Um die daraus resultierende zeitliche Verzögerung nicht zu groß werden zu lassen, wurden schließlich die ersten Messungen im östlichen Teil des Pegelkontrollnetzes im Herbst 1994 noch mit dem herkömmlichen He-Ne Laser durchgeführt. Auf den Stationen Cuxhaven (Juli 1994), Bremerhaven und Büsum (Spätsommer 1995) konnte dann der jodstabilisierte He-Ne-Laser eingesetzt werden.

Es stellte sich heraus, daß die Meßergebnisse - besonders an der Nordseeküste - sehr stark von der Stationslage bzw. von den Wetterbedingungen abhängen. Diese Effekte waren teilweise erwartet, führten aber z.B. auf der Station Bremerhaven dazu, daß die Beobachtungen aufgrund sich ändernder Wetterlagen mehrfach unterbrochen werden mußten. Zur Ableitung eines verlässlichen Schwerewertes auf dieser Station wurde deshalb ein Messungszeitraum von mehreren Wochen notwendig.

Die Abhängigkeit der Meßergebnisse von den Umgebungsbedingungen wird deutlich, wenn man die Differenzen der Einzeldropsergebnisse zum Stationsmittelwert betrachtet. Als Beispiel stellt Abbildung 4.3 die Abweichungen der Einzeldrop-Ergebnisse auf den Stationen Clausthal, Rostock und Bremerhaven zum jeweiligen Stationsmittelwert dar. Während die Standardabweichung eines Drops auf der Station Clausthal nur ca. $0.15 \mu\text{m/s}^2$ beträgt, schwanken die Einzeldropsergebnisse auf der Station Bremerhaven mit einer Standardabweichung von $5 \mu\text{m/s}^2$.

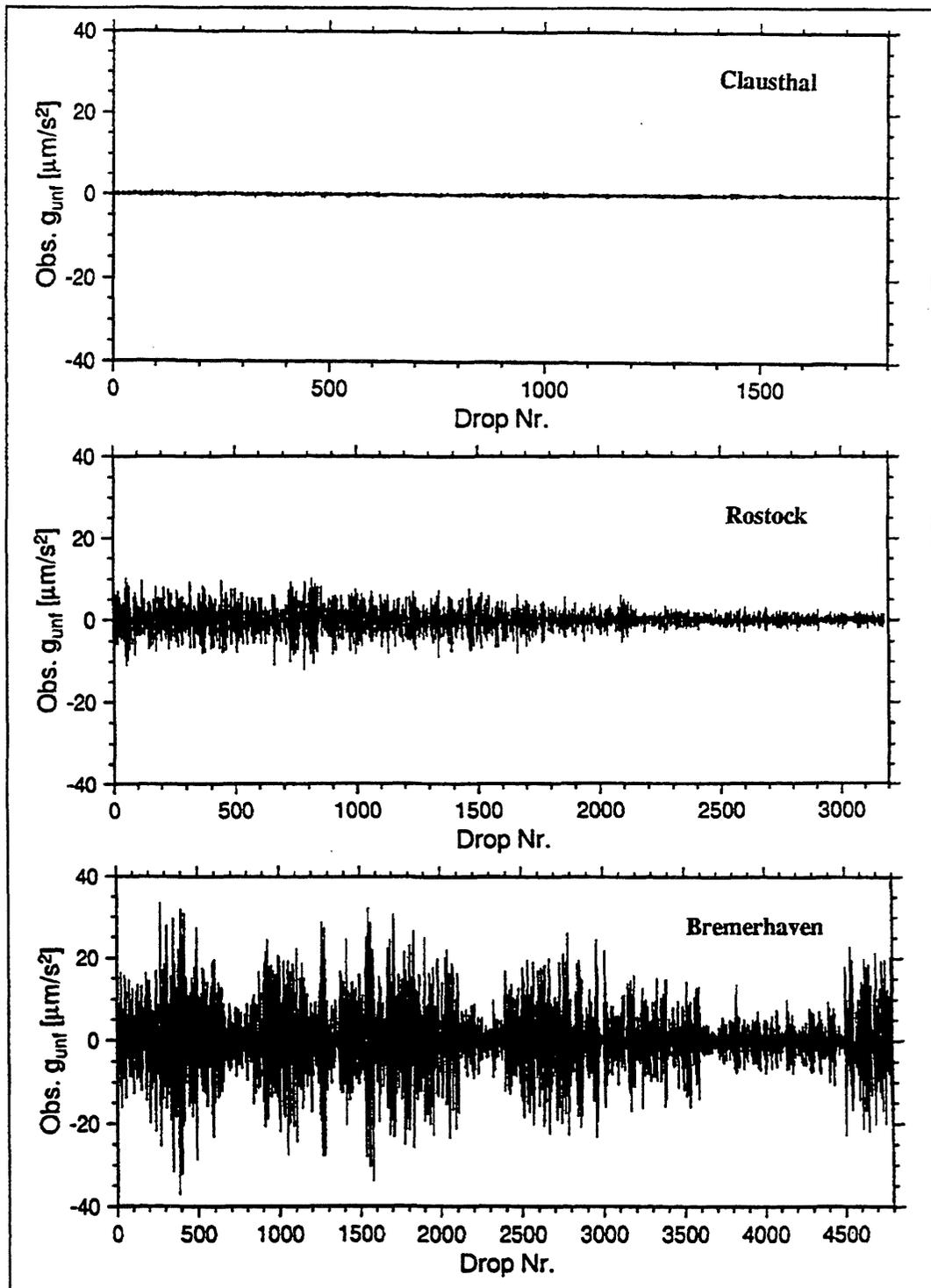


Abbildung 4.3: Streuung von JILAG-3 Einzeldrop Resultaten auf Stationen mit unterschiedlichen Umgebungseinflüssen.

Die Messungen in Rostock zeigen die Abhängigkeit des Meßrauschens von den Umgebungsbedingungen. Während der Messungen nahm der Wind kontinuierlich von der Stärke 6 auf die Stärke 3-4 ab, entsprechend verkleinert sich die Standardabweichung des Einzeldrops von anfangs $4 \mu\text{m/s}^2$ auf $1 \mu\text{m/s}^2$. Hinzu kommt, daß der letzte Run in Rostock zur

Nachtzeit gemessen wurde, so daß auch die anthropogenen Einflüsse durch Verkehr etc. minimiert wurden. In Bremerhaven beträgt die Standardabweichung des Einzeldrops maximal $20 \mu\text{m/s}^2$, bei ruhigen Wetterlagen wird dagegen ein noch akzeptabler Wert von $2...3 \mu\text{m/s}^2$ erreicht.

Als Ursache für die teilweise sehr großen Einzeldropabweichungen wurde neben den erwähnten Umgebungsbedingungen zunächst auch eine eventuelle Dejustierung der JILAG-3 Superspring (Kap. 2.1) vermutet. Bei entsprechenden Untersuchungen im Gravimeterlabor des IfE konnten jedoch im Rahmen der herstellungsbedingten Toleranzen keine Abweichungen vom Normalzustand festgestellt werden. Da außerdem der jodstabilisierte He-Ne Laser erneut zur Reparatur in die USA geschickt werden mußte (Austausch der defekten Laserröhre), konnten im Sommer 1996 keine weiteren Absolutmessungen durchgeführt werden. Nach der Reparatur folgten Kalibriermessungen in Clausthal im Winter 1996/97.

In diesem Zeitraum wurde außerdem die Diskriminatorelektronik des JILAG-3 auf eventuelle Abhängigkeiten von der Amplitude des Interferenzsignals getestet. Solche Abhängigkeiten, die unter Umständen zu systematischen Fehlern bis zu $0.15 \mu\text{m/s}^2$ führen können, wurden bei anderen Absolutgravimetern der JILAG- bzw. FG5-Serien festgestellt (MARSON et al. 1995). Da die Diskriminatorelektronik des JILAG-3 bereits 1989 modifiziert wurde, mußten für dieses Instrument gesonderte Untersuchungen durchgeführt werden. Signifikante Abhängigkeiten von der Signalamplitude waren dabei nicht nachweisbar. Lediglich bei sehr kleinen Signalamplituden, mit denen in der Praxis nicht gemessen wird, kommt es zu Verfälschungen des beobachteten Absolutschwerewertes.

Im Frühjahr 1997 wurden die Absolutmessungen im Pegelkontrollsystem auf den Stationen Helgoland und List/Sylt fortgesetzt. Als letzter Punkt im Pegelkontrollsystem wurde im September 1997 Lübeck-Travemünde beobachtet. Auf die ursprünglich geplante, komplette Zweitvermessung des Pegelkontrollsystems wurde angesichts der bereits vorhandenen Kontrollmöglichkeit durch umfangreiche Relativmessungen (Kap. 5) verzichtet. Die Wiederholungsmessungen wurden auf die ausgewählten Stationen Cuxhaven, Koserow, Saßnitz und Potsdam beschränkt.

In Tabelle 4.1 sind die absoluten Schwerewerte der gemessenen Stationen zusammengestellt, wie sie sich nach der Rohdaten-Auswertung mit dem herkömmlichen funktionalen Modell (4) ohne Berücksichtigung von Störsignalen ergeben. Die angegebenen Standardabweichungen ergeben sich aus der Streuung der Run-Mittelwerte. Sie stellen ein Maß für die Präzision dar und repräsentieren damit nur einen Teil der in Kap. 2.2 diskutierten „Genauigkeit“. Die Standardabweichungen sind recht homogen. Diese Homogenität wurde erreicht durch Messungshäufung bei größerer Standardabweichung des Einzeldrops. Auffallend ist die große Differenz zwischen den beiden Messungen in Koserow 1994 und 1997. Dazu muß bemerkt werden, daß sämtliche Relativmessungen (einschl. Schwerenetz 1. Ordnung der Landesvermessung Mecklenburg-Vorpommern) auf eine systematische Abweichung der Messung 1994 von ca. $0.20 \mu\text{m/s}^2$ deuten. Die Kalibriermessungen in Clausthal, die nur wenige Wochen vor bzw. nach der Koserow Messung stattfanden, wiesen keine signifikanten Abweichungen vom langjährigen Mittelwert auf. Als Erklärung dieser Differenz können deshalb nur lokale Schwereänderungen oder eine nicht reproduzierbare Fehlfunktion des Instruments vermutet werden. Das 1994 angelegte Exzentrum in unmittelbarer Nähe der Absolutstation wurde zwischenzeitlich zerstört, sodaß eine Überprüfung sehr lokaler Massenverlagerungen (z.B. Gebäudesetzungen) nicht mehr möglich ist.

Station ($h_{ref} = 0m$)	Epoche	Schwerewert [$\mu m/s^2$]	Standard- abweichung [$\mu m/s^2$]
Bremerhaven	1987	9813596.33	0.10*
	1995	9813596.28	0.03
Cuxhaven	1987	9813736.88	0.10*
	1994	9813736.90	0.04
	1997	9813736.74	0.02
Büsum	1995	9814329.77	0.02
Helgoland	1997	9814014.00	0.01
List/Sylt	1997	9815206.02	0.03
Lübeck	1997	9814062.56	0.01
Wismar	1994	9814181.11	0.01
Rostock	1994	9814288.14	0.02
	1997	9814475.87	0.02
Saßnitz	1994	9814475.99	0.02
	Mittel	9814475.93	
Koserow	1994	9814130.13	0.02
	1997	9814130.39	0.02

Tabelle 4.1: Ergebnisse der JLAG-3 Absolutgravimetermessungen auf den Stationen des Pegelkontrollsystems. Schwerewerte von 1987 (Bremerhaven, Cuxhaven) zentriert auf neue Absolutstationen. * Standardabweichungen 1987 sind geschätzte Werte, da aufgrund der geringen Run-Anzahl keine vergleichbare Präzision berechnet werden kann.

Nicht erfaßt werden mit den o.g. Standardabweichungen instrumentell bzw. stationsbedingte systematische Fehler, die bei jedem Drop in gleicher Weise wirken und somit auch den berechneten Stationsmittelwert verfälschen. Daher wurde im Postprocessing besonderer Wert auf die Detektion bzw. Eliminierung solcher (systematischer) Störsignale gelegt.

4.6 Berücksichtigung von Störsignalen

Wird ein gestörter Datensatz mit dem in Kap. 4.1 angegebenen funktionalen Modell ausgeglichen, so ergeben sich z.B. die in Abb. 4.4 gezeigten Ausgleichungsresiduen. Sowohl in den Residuen eines Einzeldrops wie auch in den akkumulierten Residuen eines Runs (300 Drops) sind systematische Anteile erkennbar. Um diese systematischen Anteile im Ausgleichungsmodell berücksichtigen zu können, muß der funktionale Ansatz (4) erweitert werden. Da die Störsignale offensichtlich periodischen Charakter haben, geschieht dies im Normalfall durch den zusätzlichen Ansatz harmonischer Schwingungen im funktionalen Modell:

$$z_i = z_0 \left(1 + \frac{1}{2} \gamma t_i^2 \right) + v_0 \left(t_i + \frac{1}{6} \gamma t_i^3 \right) + \frac{1}{2} g_0 \left(t_i^2 + \frac{1}{12} \gamma t_i^4 \right) + \dots$$

$$\sum_{k=1}^{n_s} a_k \sin(\omega_k t_{ik}) + b_k \cos(\omega_k t_{ik}) \quad (5)$$

$$a_k = A_k \cos \varphi_k \quad \omega_k = 2 \pi f_k$$

$$b_k = A_k \sin \varphi_k$$

mit

n_s :	Anzahl der gefundenen Störsignale
k :	Störsignal Nr. ...
A_k :	Amplitude des Signals Nr. k
ω_k :	Phasenverschiebung des Signals Nr. k
f_k :	Frequenz des Signals Nr. k

Die hier benötigten Näherungswerte für die Frequenzen f_k wurden bisher aus einer Periodogramm-Analyse (PRESS und RYBICKI 1989) der Residuen nach Ausgleichung der Rohdaten aus dem Modell (4) gewonnen.

Seitdem das seismische Registriersystem parallel zu den JILAG-3 Absolutmessungen eingesetzt wird, steht für jedes Fallexperiment ein zusätzlicher unabhängiger Datensatz zur Verfügung, der Informationen über die aufgetretenen Bodenbewegungen enthält. Diese Datensätze haben den Vorteil, daß sie mit einer hohen Erfassungsrate (1 kHz) und mit äquidistanten Stützpunktabständen aufgezeichnet werden können. Die Analyse dieser Datensätze, sowohl im Zeit- wie auch im Spektralbereich, gestaltet sich recht einfach, da auf herkömmliche Methoden der Signalverarbeitung (Fast-Fourier-Transformation, FFT) zurückgegriffen werden kann. Die Weg-Zeit-Paare als Meßergebnisse des Absolutgravimeters können aufgrund des in Kap. 2.1 geschilderten Meßprinzips bezüglich der Zeitbasis nicht äquidistant verteilt sein, da die beschleunigte Testmasse zu Beginn des Fallexperiments langsamer durch die äquidistanten Messungsebenen fällt als am Ende des Drops.

Zur Aufdeckung systematischer Störungen bietet es sich an, die mittleren seismischen Signale bezüglich einer Meßposition für eine Vielzahl von Fallexperimenten einer Aufstellung zu betrachten. Im Idealfall (keine bzw. nur zufällige Störsignale) würde sich hier eine "Nulllinie" ergeben. Die Abbildung 4.5 zeigt solche mittleren Störsignale an der Station Clausthal für einen Zeitraum von ca. 1 s. Dargestellt sind Registrierungen des Neigungsmessers in Richtung der Interferometerbasis (Tilt). Der Zeitpunkt der Dropauslösung liegt in dieser Grafik bei 257 ms, wieder aufgefangen wird die Testmasse bei 478 ms. Verglichen mit der Aufstellung "Stativbeine neben Pfeiler" (Abb. 4.5, unten), die auf dieser Station eine bestmögliche Isolierung der Interferometerbasis gegen instrumentelle Erschütterungen bedeutet, resultieren aus der Aufstellung "Stativbeine auf Pfeiler" (Abb. 4.5, oben) bis zu 5fach größere Störsignale.

Zur Charakterisierung der vorhandenen Störsignale ist eine Darstellung im Spektralbereich nützlich. Auch hier wurde zur Aufdeckung von Systematiken auf mittlere Amplituden- bzw.

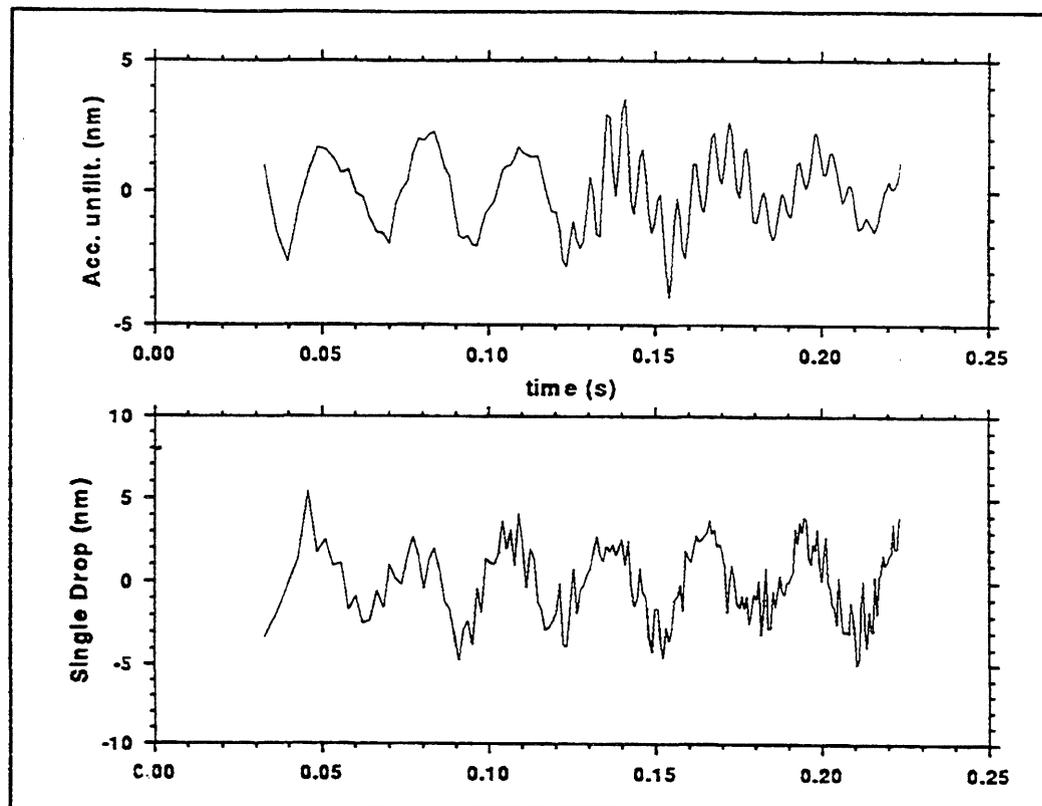


Abbildung 4.4: Ausgleichsresiduen bei gestörten Datensätzen, Station Clausthal (Stativbeine auf Beobachtungspfeiler); oben: Akkumulierte Residuen eines Runs (300 Drops), unten: Residuen Einzeldrop.

Phasenspektren zurückgegriffen. Abbildung 4.6 zeigt diese Spektren für den Clausthal-Aufbau "Stativbeine auf Pfeiler" (300 Drops). Außer den Mittelwerten sind auch die Standardabweichungen für die Einzelamplituden bzw. -phasen dargestellt. Schwingungen einer bestimmten Frequenz wurden dann als systematisch erkannt (in Abb.4.6 mit * markiert), wenn die mittlere Amplitude mindestens 3mal so groß ist wie die Standardabweichung einer Einzelamplitude dieser Frequenz. Wenn es sich bei den Störsignalen tatsächlich um Schwingungen handelt, die direkt mit den mechanischen Erschütterungen während des Fallexperiments zusammenhängen, so müssen diese Signale auch in jedem seismischen Datensatz mit annähernd gleichen Phasenlagen in Bezug auf den Zeitpunkt der Dropauslösung vorkommen. Im mittleren Phasenspektrum wurde deshalb jede Frequenz markiert, an der die Standardabweichung der Einzeldrop-Phase unterhalb eines geeigneten Schwellwerts (30) lag.

Dieser Schwellwert wurde aufgrund des Abtast-Intervalls von 1 ms und des abzudeckenden Frequenzbereichs 2...80 Hz als sinnvoll erachtet.

Vergleicht man Amplituden- und Phasenspektrum miteinander, so fällt auf, daß sich die als systematisch erkannten Frequenzen weitgehend entsprechen. Sie liegen bei ca. 18, 33, 38, 42 und >58 Hz. Diese Frequenzen können als a-priori Information für die Ausgleichung nach (5) benutzt werden.

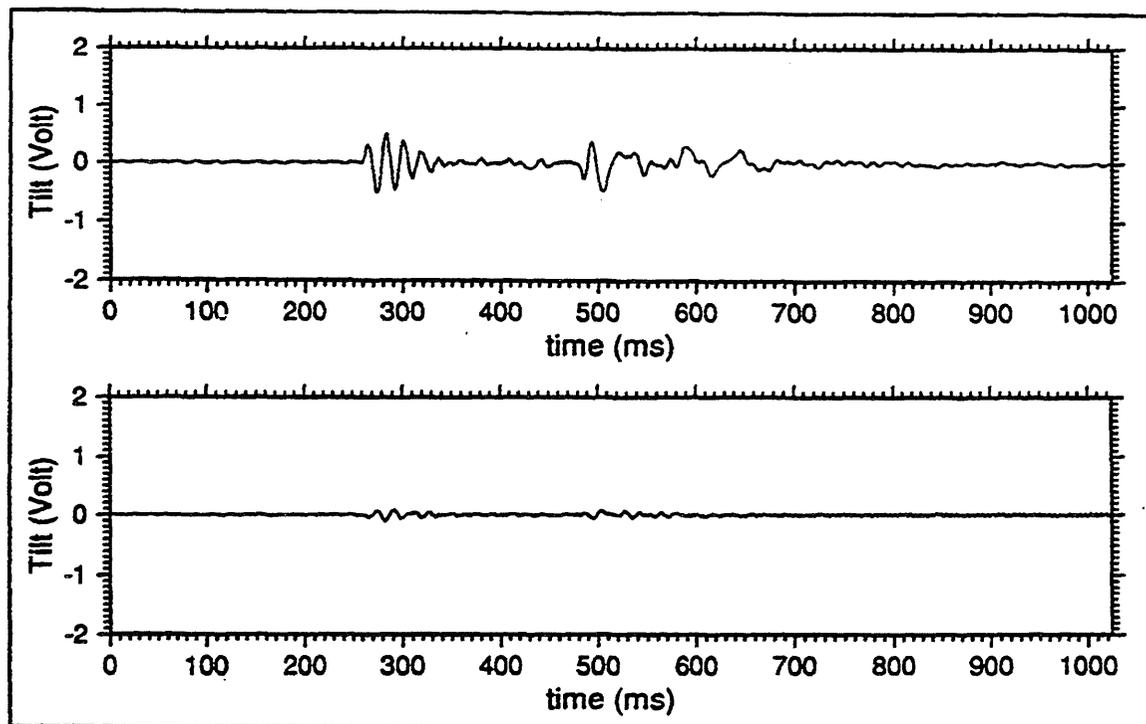


Abbildung 4.5: Registrierte Neigungen der Gravimeter-Aufstellfläche in Richtung der JILAG-3 Interferometerbasis bei unterschiedlicher Aufstellung, Beobachtungspfeiler Station Clausthal.

Bemerkenswert ist, daß die Frequenz mit der größten mittleren Amplitude (50 Hz) im Phasenspektrum nicht als systematisch gekennzeichnet wird. Die mittlere Phasenlage von Schwingungen dieser Frequenz liegt bei 180° . Dies deutet im Zusammenhang mit der großen Standardabweichung von ca. 110° auf eine zufällige Verteilung der Phasenlagen hin. Vermutlich sind Schwingungen dieser Frequenz auf die Stromversorgung des Absolutgravimeters zurückzuführen (Wechselspannung 50 Hz), von der bestimmte Bauteile offensichtlich auch zu mechanischen Schwingungen angeregt werden.

Werden auf der Station Clausthal die Stativbeine auf den umgebenden Fußboden gesetzt, so sind in den mittleren Spektren keine systematischen Schwingungen zu erkennen (Abb. 4.7). Es kann deshalb bei diesem Aufbau von einer nahezu störungsfreien Messung ausgegangen werden. Die Stationen des Pegelkontrollnetzes verfügen jedoch nicht über separate Beobachtungspfeiler. Die Stativbeine stehen auf diesen Stationen ebenso wie die Interferometerbasis auf dem selben Fußboden. Der Einfluß instrumentell erzeugter Erschütterungen muß deshalb besonders in Betracht gezogen werden.

Deshalb wurden bereits bei der Stationsauswahl die Fußbodeneigenschaften überprüft. Um die Verhältnisse während der JILAG-3 Messungen zu simulieren, wurde ein Schraubenzieher aus 20 cm Höhe auf die mögliche Gravimeter-Aufstellfläche fallengelassen. Die dadurch erzeugten Bodenbewegungen wurden aufgezeichnet und einer Fourier-Analyse unterzogen. Zusätzlich wurden Abschnitte ausgewertet, die keinen "Schraubenzieherversuch" enthielten, um Informationen über das umgebungsbedingte Hintergrundrauschen ableiten zu können.

In Abbildung 4.8 ist beispielhaft das Ergebnis dieser Untersuchungen für die X-Komponente des Seismometers (in Richtung der Interferometerbasis) in Rostock dargestellt. Diese Station erwies sich im Hinblick auf die Fußbodeneigenschaften als die kritischste Station des gesamten

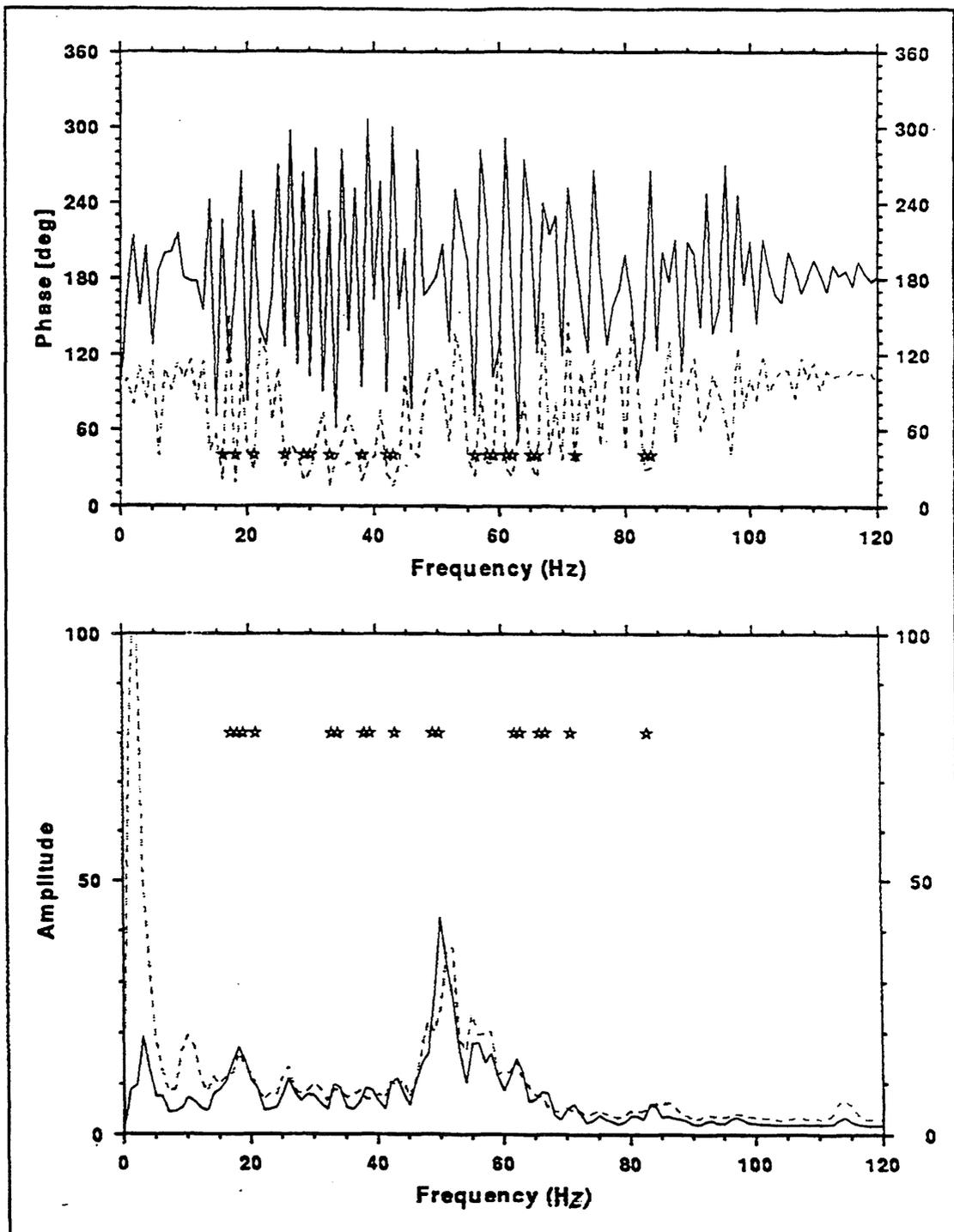


Abbildung 4.6: Mittleres Phasen- und Amplitudenspektrum der Neigungen (Tilt) in Richtung der Interferometerbasis; Station Clausthal, Stativbeine auf Pfeiler (300 Drops) (--- = 3fache (Amplituden) bzw. einfache (Phasen) Standardabweichung der Einzelwerte, * = erkannte systematische Störsignale).

Pegelkontrollsystems. Während die deutliche Amplitudenspitze bei 50 Hz schon im Hintergrundrauschen vorhanden ist (Stromversorgung, siehe oben), treten, angeregt durch den Aufprall, im Frequenzbereich von 30...35 Hz sowie bei > 80 Hz wesentlich stärkere Amplituden auf. Da die Übertragungsfunktion des Seismometers für Bereiche > 80 Hz nicht

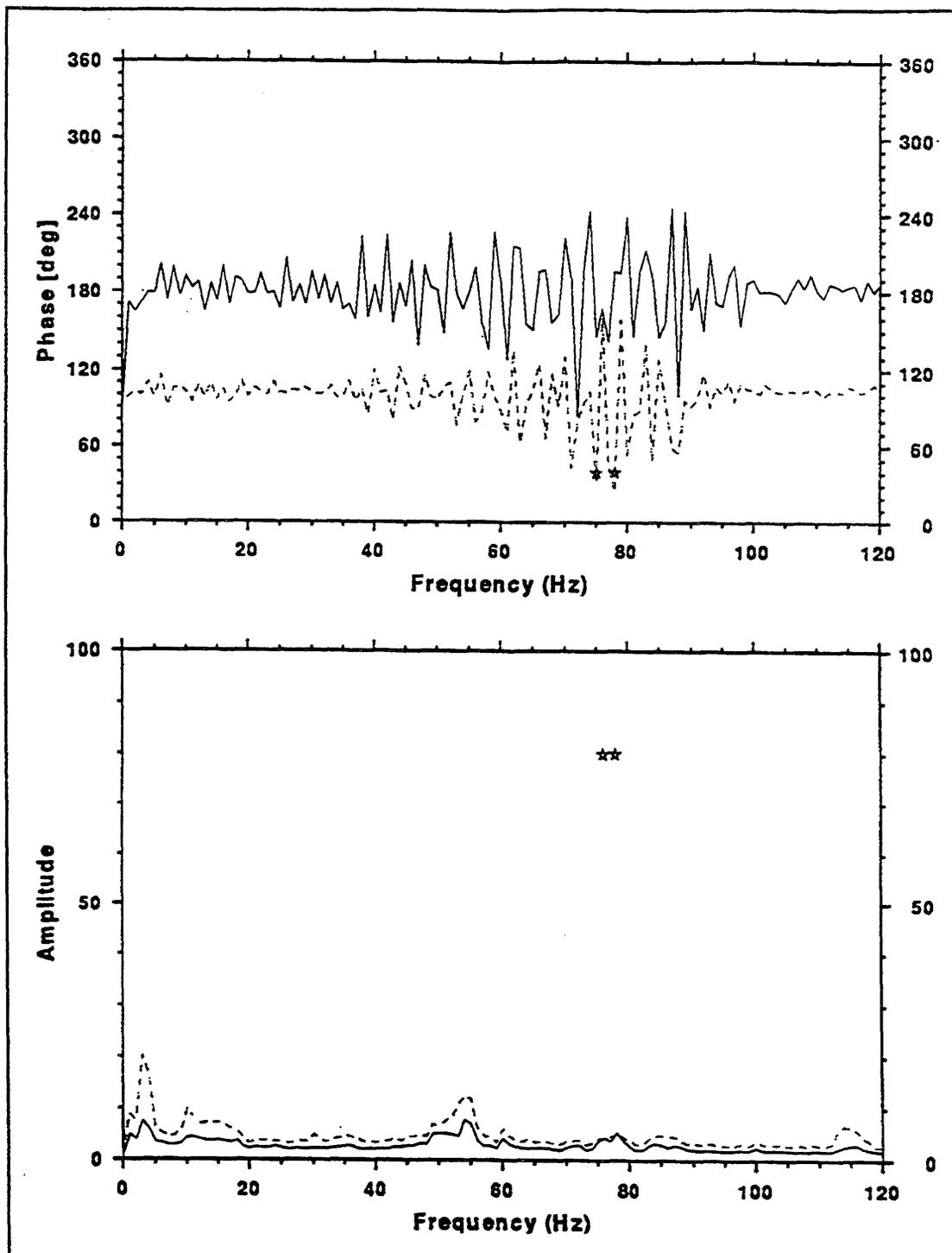


Abbildung 4.7: Mittleres Phasen- und Amplitudenspektrum der Neigungen (Tilt) in Richtung der Interferometerbasis; Station Clausthal, Stativbeine neben Pfeiler (300 Drops) (--- 3fache (Amplituden) bzw. einfache (Phasen) Standardabweichung der Einzelwerte).

definiert ist, kann nicht ausgeschlossen werden, daß die in diesem Bereich registrierten Amplituden auf Resonanzeffekte des Seismometers zurückzuführen sind und somit keine tatsächlichen Bodenbewegungen repräsentieren. Bei Frequenzen von ca. 33 Hz muß auf dieser Station jedoch auch während der JILAG-3 Messungen mit Störsignalen gerechnet werden.

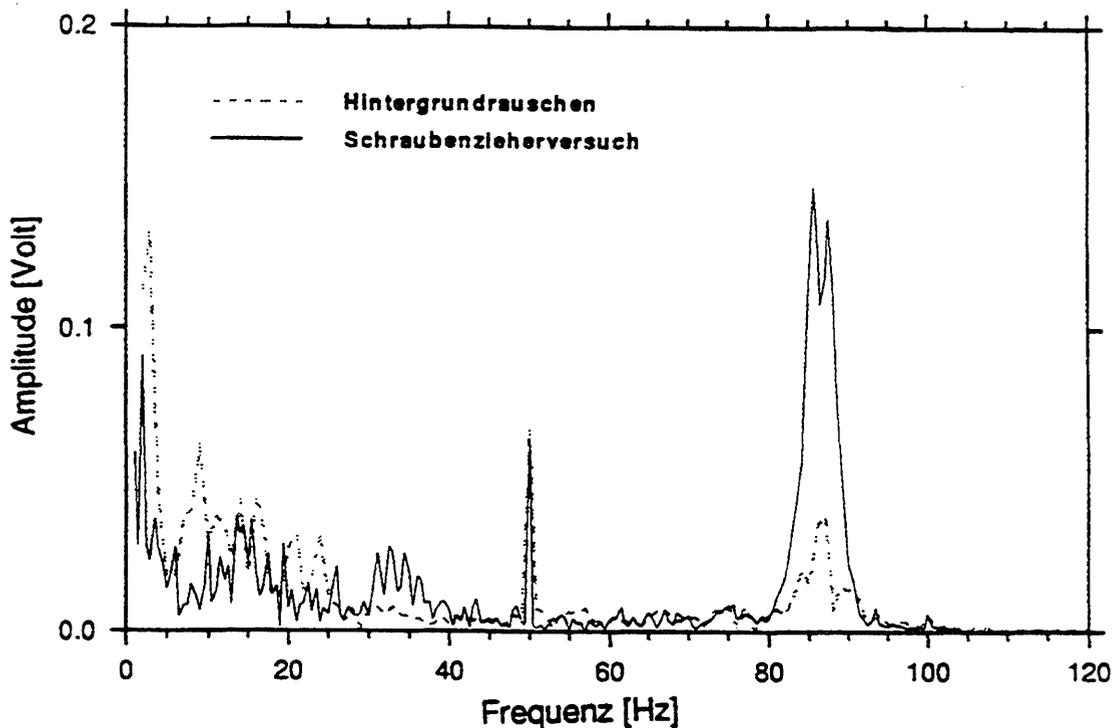


Abbildung 4.8: Vergleich der Amplitudenspektren mit und ohne Erregerschwingung ("Schraubenzieherversuch"); X-Komponente Seismometer, Station Rostock.

Station Rostock Messung	Schwerewert [0.01 $\mu\text{m/s}^2$]	Differenz zu JILAG-3 _{ungef.} [0.01 $\mu\text{m/s}^2$]	Differenz zu JILAG-3 _{gef.} [0.01 $\mu\text{m/s}^2$]
JILAG-3ungef.	981428813.8	-	10.3
JILAG-3gef.	803.5	-10.3	-
FG-5 (BKG)	797.0	-16.8	-6.5
Relativanschluß von			
Potsdam (JILAG-3)	798.2	-15.6	-5.3
Wismar (")	796.1	-17.7	-7.4
Saßnitz (.....".....)	795.0	-18.8	-8.5

Tabelle 4.2: Vergleich des ungefilterten bzw. gefilterten JILAG-3 Absolutschwerwertes mit unabhängigen Messungen.

Da die Station Rostock/Universität aber schon im Rahmen der Neuvermessung des Deutschen Schweregrundnetzes (DSGN) mit dem FG-5 Absolutgravimeter des Instituts für Angewandte Geodäsie (IfAG) beobachtet wurde, haben wir auf die Wahl eines alternativen Beobachtungspunktes verzichtet. Erwartungsgemäß ergab sich auf dieser Station bei der Auswertung der Gravimeterrohdaten die größte Differenz ($0.10 \mu\text{ms}^{-2}$) zwischen der herkömmlichen Auswertung nach (4) und dem Ausgleichungsansatz mit Berücksichtigung von Störsignalen (5). Die erzielte Genauigkeitssteigerung läßt sich abschätzen, wenn der "ungefilterte" und der "gefilterte" Absolutwert mit unabhängigen Messungen verglichen

werden (Tab. 4.2). So verringert sich die Differenz des FG-5 Ergebnisses zum JILAG-3 durch die Filterung von -168 auf -65 nms^{-2} . Überträgt man den Rostocker Schwerewert relativgravimetrisch von den benachbarten Absolutstationen Potsdam, Wismar und Saßnitz und vergleicht mit der JILAG-3 Messung in Rostock, so ergibt sich - übereinstimmend für alle drei Anschlüsse - eine Differenz von $\sim -160 \text{ nms}^{-2}$. Nach Filterung der JILAG-3 Rohdaten reduziert sich die Differenz auf $\sim -60 \text{ nms}^{-2}$. Auf den anderen Stationen des Pegelkontrollnetzes wurden derartige systematische Effekte nicht festgestellt.

5. Relative Schweremessungen

Das JILAG-3 wurde seit 1987 zusammen mit LaCoste&Romberg- (LCR-) Relativgravimetern zur Vermessung von Schwerenetzen eingesetzt. Dabei konnte nachgewiesen werden, daß relative Schweremessungen bei einer ausreichenden Zahl von Überbestimmungen kompatibel zu Absolutbeobachtungen mit JILAG-3 sind (RÖDER 1994), sie können die Zuverlässigkeit von Absolutschweremessungen erhöhen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, daß Niveau und Maßstab eines Schwerenetzes in kombinierten Ausgleichungen im Regelfall von den Absolutmessungen geliefert werden, so daß die Relativmessungen nicht als vollständig unabhängiger Datensatz angesehen werden können.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden relative Schweremessungen für vier verschiedene Aufgaben vorgesehen:

- Regionale Verbindungsmessungen zwischen den Absolutstationen zur Kontrolle der JILAG-3 Messungen,
- Bestimmung vertikaler Schweregradienten auf den Absolutstationen zur Reduktion der Absolutschwerewerte auf Bodenniveau,
- Anlage von Exzentren zur Sicherung der Absolutpunkte,
- Anschlußmessungen zu zwei Pegelfestpunkten (Niv.-Punkte) in direkter Umgebung des Schreibpegels.

Während die regionalen Verbindungsmessungen mit den LCR-Gravimetern aufgrund größerer Schwereunterschiede zwischen den Absolutstationen hauptsächlich im Spindelmodus beobachtet werden mußten, konnten die drei letztgenannten Aufgaben ausschließlich unter Nutzung des genaueren Feedbackmodus durchgeführt werden.

5.1 Meßprinzip

Seit einigen Jahrzehnten werden für Präzisionschweremessungen Gravimeter der Firma LaCoste&Romberg (LCR) eingesetzt. Das Meßprinzip dieser Instrumente ist in Abb. 5.1 dargestellt. Auf einen horizontalen Waagebalken übt die Schwerebeschleunigung ein Drehmoment aus, das durch eine schräg angreifende Meßfeder kompensiert wird. Die Geometrie dieses Feder/Masse-Systems ist so konzipiert, daß bereits kleine Schwereänderungen zu einer großen Auslenkung des Waagebalkens aus seiner definierten Nullage führen. Die Auslenkungen können mittels eines mechanischen Systems bestehend aus Meßspindel, Zahnradgetriebe und Hebelsystem rückgängig gemacht werden, indem der Aufhängepunkt der Meßfeder vertikal verschoben wird. Der Verschiebungsbetrag wird in Zählwerkseinheiten am Instrument abgelesen und kann dann mit Hilfe von Eichparametern, die der Hersteller in Form einer Eich-tabelle liefert, in relative Schwerewerte umgerechnet werden.

Speziell für die Bestimmung kleiner Schwereunterschiede von 1 bis 100 μms^{-2} , wie sie z.B. als Reduktions- bzw. Zentrierungselemente bei der Absolutgravimetrie auftreten, wurden die LCR Gravimeter des IfE mit einem zusätzlichen elektronischen Meß- und Regelsystem ausgestattet. Dieses SRW Feedbacksystem nutzt die Ausgangsspannung am kapazitiven Abgriff (CPI) des Gravimeters, um eine Regelspannung aufzubauen, die wiederum den Kondensatorplatten des CPI zugeführt wird. Sie ist so bemessen, daß die von ihr erzeugte elektrostatische Kraft den Waagebalken in seine Nullage zurückführt und dort hält. In der aktuellen Version SRW-E verfügt das Feedbacksystem über einen Meßbereich von 250 μms^{-2} (RÖDER et al. 1988).

Neben der höheren Meßgenauigkeit bei der Bestimmung kleiner Schweredifferenzen zeichnet sich das System durch eine Steigerung der Meßgeschwindigkeit bei hoher Ablesegenauigkeit aus.

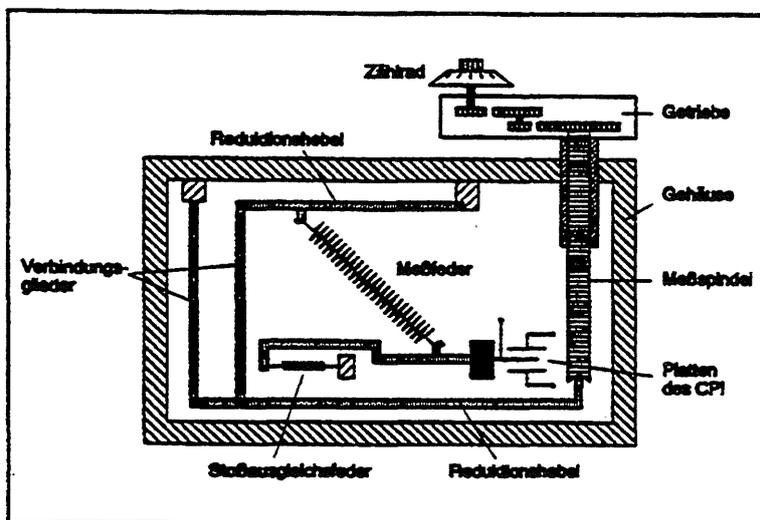


Abbildung 5.1: Konstruktionsschema von LCR-Gravimetern (aus RÖDER 1994).

Seit einigen Jahren vertreiben auch die Firmen Zero Length Spring (ZLS) und Scintrex Relativgravimeter mit Meßgenauigkeiten von $0.05\text{-}0.10 \mu\text{ms}^{-2}$.

Die ZLS-Instrumente basieren auf LCR-Gravimetern, die mit einem ZLS-Feedbacksystem und peripheren Kontrolleinheiten (Schrittmotor zur Spindelverstellung, HP-Palmtop Computer zur Ablesung und Steuerung) zur Automatisierung der Ablesung erweitert wurden.

Das Gravimeter der Firma Scintrex ist eine Weiterentwicklung der WORDEN-Gravimeter, die bis in die 70er Jahre bei Schweremessungen erfolgreich eingesetzt wurden. Das Meßsystem dieser Instrumente ist aus Quarz gefertigt, während in LCR-Gravimetern der Waagebalken durch eine Metallfeder in der Nulllage gehalten wird. Schweremessungen mit Scintrex-Gravimetern können deshalb nicht durch Magnetfeldschwankungen beeinflusst werden. Quarzsysteme haben allerdings den Nachteil, daß wesentlich größere instrumentelle Driften auftreten können. Der Hersteller wirkt diesem Effekt durch besondere Abschirmung des Meßsystems gegenüber Temperaturschwankungen und die Möglichkeit zur „online“-Korrektur der Meßwerte anhand eines regelmäßig zu überprüfenden linearen Driftparameters entgegen. Der Meßablauf ist wie beim ZLS-Gravimeter bis auf die Aufstellung des Instruments vollständig automatisiert.

5.2 Eichung der Relativgravimeter

Eichparameter für Gravimeter können sowohl zeit- als auch ortsabhängig sein. Wartungs- und Reparaturmaßnahmen am Meßsystem, mechanische und thermische Schocks oder auch Materialalterung können zu Änderungen der Eichfunktion führen. Bei Eichmessungen in Einsatzgebieten unterschiedlicher geographischer Breite ergaben sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Schwere- bzw. Spindelbereich teilweise hochsignifikant unterschiedliche Eichparameter (RÖDER 1994). Für hohe Genauigkeitsanforderungen reicht deshalb die Benutzung der Herstellereichfunktion nicht aus. In speziell angelegten Eichsystemen, die aus

einer ausreichenden Anzahl stabiler Beobachtungsstationen mit geeigneten Stützpunkt-
abständen und genau bekannten Schweredifferenzen bestehen, können zusätzliche polynomiale
und periodische Eichparameter bestimmt bzw. kontrolliert werden.

Das Gravimeter-Eichsystem Hannover umfaßt eine vertikale Eichlinie mit einer max.
Schweredifferenz von $222 \mu\text{ms}^{-2}$ in einem Universitätsgebäude (Hochhaus) sowie die Eichlinie
Cuxhaven - Oberharz mit einer Ausdehnung von $3079 \mu\text{ms}^{-2}$ (KANNGIESER et al. 1983). Für
alle in diesem Projekt eingesetzten Gravimeter sind die Maßstabsfaktoren und die periodischen
Eichparameter aus Messungen in diesem Eichsystem bekannt. Die Standardabweichung der
ausgeglichenen Maßstabsfaktoren liegt für LCR-Modell G Gravimeter bei $1.5...3 \cdot 10^{-5}$. Die
Amplituden der periodischen Eichterme wurden mit Standardabweichungen von $5...20 \text{ nms}^{-2}$
bestimmt.

Die Eichung der Feedbacksysteme wird regelmäßig auf der vertikalen Eichlinie Hannover
kontrolliert. Die Standardabweichung des linearen Feedback-Eichfaktors ergibt sich dabei
i.a. zu besser als $0.3 \cdot 10^{-3}$. Über einen längeren Zeitraum hinweg ergeben sich allerdings
Schwankungen in einer Größenordnung von $0.5...1 \cdot 10^{-3}$. Diese Werte können als realistisches
Maß für die Langzeitstabilität des Meßsystems angesehen werden.

5.3 Vermessung des Pegelkontrollnetzes

Es war geplant, die Relativmessungen möglichst zeitgleich mit den Absolutmessungen
durchzuführen, damit eine direkte Kontrollmöglichkeit zwischen den beiden Meßverfahren
gegeben ist. Aufgrund der erwähnten Verzögerungen bei den Absolutmessungen durch den
defekten Jod-Laser (Kap. 2.3), wurde mit den Relativmessungen ebenfalls erst im Herbst 1994
begonnen.

Es wurden insgesamt sieben verschiedene Gravimeter eingesetzt. Dabei handelte es sich um 4
LCR-Gravimeter des Instituts für Erdmessung (D014, G079, G298, G709), ein LCR-
Gravimeter mit ZLS-Erweiterung (G368), ein LCR-Modell D Gravimeter (D023) der
Niedersächsischen Landesvermessung und ein Scintrex CG3-M, das von der
Landesvermessung Mecklenburg-Vorpommern zur Verfügung gestellt wurde. Außerdem
wurde eine Booster-Erweiterung des SRW-Feedbacks (Meßbereich $\sim 1000 \mu\text{m/s}^2$) bei einigen
Messungen mit dem G298 eingesetzt. In dieser Konfiguration wird das Gravimeter im
folgenden mit G298B bezeichnet. Bei Benutzung der herkömmlichen SRW-Feedbacksysteme
wird an den Gravimeternamen ein „F“ angehängt (z.B. G298F).

Die Messung der Schweredifferenzen erfolgte - soweit möglich - nach dem Stepverfahren,
wobei die Schweredifferenzen zwischen den Pegelstationen mindestens 3 mal gemessen
wurden (A-B-A-B-C-B-C-D-...). Dabei wurde im Normalfall mit vier Gravimetern gleichzeitig
beobachtet. Zur Datenaufbereitung und zur Ausgleichung der Meßwerte wurde das
Programmpaket GRAV (WENZEL 1993) benutzt. Das Programm führt eine Ausgleichung
vermittelnder Beobachtungen durch, wobei Absolutschwerewerte und Schweredifferenzen als
Beobachtungen eingeführt werden können. Außer zur Berechnung von Stationsschwerewerten
kann das Programm auch zur Bestimmung von Eich- und Driftparametern für die eingesetzten
Relativgravimeter benutzt werden.

Im Herbst 1994 wurden zunächst vier Punkte des Pegelkontrollnetzes im südlichen Ostseeraum
(Wismar, Rostock, Saßnitz, Koserow) relativgravimetrisch verbunden, zusätzliche
Verbindungen wurden zwischen der Station Rostock und dem Basispunkt Potsdam, dem

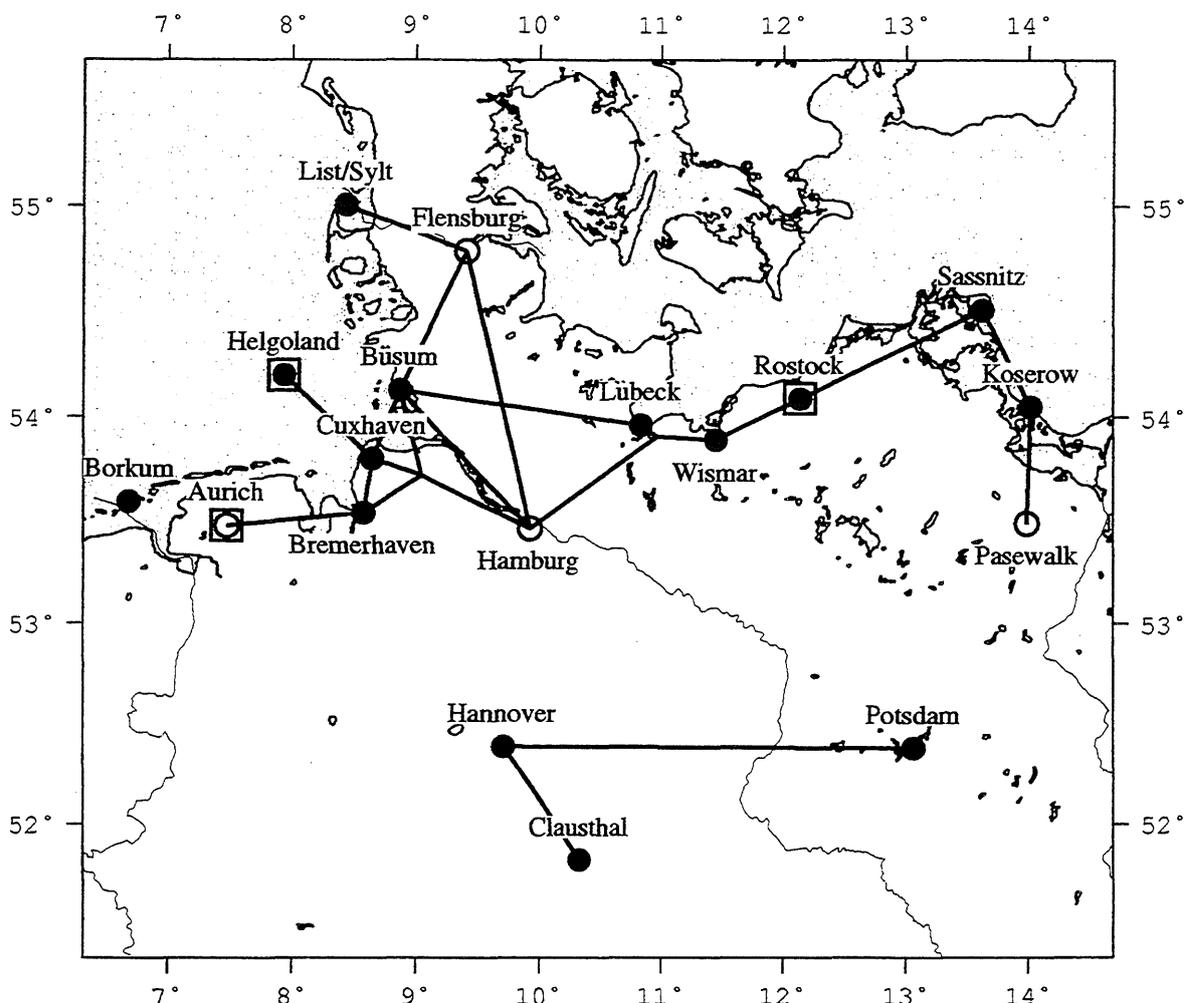


Abbildung 5.2: Relativgravimetrische Verbindungsmessungen im Pegelkontrollsystem.

Basispunkt Hannover und der Station Wismar sowie zwischen den Referenzstationen Hannover und Potsdam gemessen. Außerdem wurde die Station Pasewalk angeschlossen (DSGN-Station).

Eine zweite Meßkampagne wurde im September 1995 im Bereich der Weser/ Elbmündung durchgeführt (Bremerhaven, Cuxhaven, Büsum). In diesem Bereich konnten zusätzlich einige ältere JILAG-3 - Messungen zu Vergleichszwecken herangezogen werden (Erdmagnetisches Observatorium in Wingst, 1987, Bremerhaven und Cuxhaven, 1987). Die alten Absolutstationen Bremerhaven und Cuxhaven wurden jedoch aufgrund extremer Küstennähe (Alfred-Wegener-Institut Bremerhaven) bzw. wegen der ungünstigen Beschaffenheit der Gravimeter-Aufstellfläche (Marinedepot Cuxhaven-Altenwalde) nur noch als Exzentren benutzt und an die neuen Absolutstationen angeschlossen. Die Zentrierungsmessungen konnten im genaueren Feedback-Modus durchgeführt werden.

Wiederholungsmessungen im Bereich der Weser-Ems Mündung fanden im September und November 1996 statt. Im November 1996 wurde auch die Verbindung dieses Teilnetzes mit den Stationen im südlichen Ostseeraum hergestellt. Weitere Verbindungsmessungen zwischen den Teilnetzen wurden im Februar 1997 durchgeführt. Der Bereich südliche Ostsee wurde im Februar 1997 erneut vermessen. Dabei wurden auch die DSGN-Stationen Flensburg, Hamburg

und Aurich einbezogen. Nach Auswertung der Absolutmessungen auf Borkum wurde auf einen relativgravimetrischen Anschluß verzichtet, da die dortigen Umgebungsbedingungen offensichtlich keine präzisen Schweremessungen zulassen. Eine Übersicht über alle gemessenen Verbindungen wird in Abbildung 5.2 gegeben. Insgesamt wurden 341 Schweredifferenzen mit 10 verschiedenen Gravimetern bzw. Meßsystemen beobachtet.

5.4 Auswertung und Vergleich mit der Absolutgravimetrie

Da die Relativmessungen zur (möglichst unabhängigen) Kontrolle der JILAG-3 Messungen dienen sollen, wurde zunächst eine freie Netzausgleichung der gesamten Relativbeobachtungen gerechnet. Die gemessenen Absolutschwerewerte wurden in die Ausgleichung mit einem so geringen Gewicht eingeführt, daß sie lediglich den Datumsdefekt der Relativmessungen beheben. In Tabelle 5.1 findet sich die Zahl der ausgewerteten Verbindungen und die erzielten Genauigkeiten (Standardabweichungen aus der freien Netzausgleichung). Die Standardabweichung für eine einmal gemessene Schweredifferenz liegt zwischen 0.11 und 0.20 μms^{-2} , was der in anderen Netzen bei Schweredifferenzen dieser Größenordnung erzielten Präzision entspricht (z.B. RÖDER 1994). Die kleinsten Standardabweichungen finden sich bei dem Scintrex CG-3M Gravimeter und den mit SRW-Feedbacksystem ausgerüsteten LCR-Gravimetern. Die Standardabweichung der ausgeglichenen Schweredifferenzen benachbarter Stationen liegt im Mittel bei 0.05 μms^{-2} . Damit haben Absolut- und Relativgravimetrie etwa die gleiche Genauigkeit, so daß die Relativgravimetrie als Kontrolle für die JILAG-3 Messungen geeignet ist.

Instrument	Anzahl Verbindungen	Standardabweichung einer einmal gemessenen Schweredifferenz [nm/s^2]
D014	50	202.
D023	20	154.
G079	45	163.
G298	57	154.
G709	47	187.
G368	9	200.
D014F	25	166.
G298F	39	102.
G709F	10	116.
G298B	19	145.
CG3-M	20	111.

Tabelle 5.1: Zahl der Verbindungsmessungen zwischen den Absolutstationen im Pegelkontrollsystem und Standardabweichungen.

Vergleicht man die Stationsschwerewerte der freien Netzausgleichung mit den JILAG-3 Beobachtungen, so ergeben sich die in Tab. 5.2 bzw. Abb. 5.3 gezeigten Differenzen. Hierzu muß bemerkt werden, daß an der Station Koserow ausschließlich die JILAG-3 Messung von 1997 herangezogen wurde. Die Absolutmessung von 1994 wurde, in Anbetracht der ungewöhnlich großen Differenz von 0.26 μms^{-2} , nicht mehr verwendet, da drei verschiedene

Relativ-Meßkampagnen (2 Kampagnen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens, Messung des Schwerenetzes 1. Ordnung durch die Landesvermessung Mecklenburg-Vorpommern) diesen Wert nicht bestätigen konnten (siehe auch Kapitel 4.3). An der Station Cuxhaven wurden zwei unterschiedliche Epochen (1994,1997) in die Ausgleichung eingeführt. Für die Anschlußmessung nach Helgoland (1994) wurde der 1994 beobachtete Absolutwert benutzt.

Station	Diff. (Rel.-Abs.) [nm/s ²]
Bremerhaven	64
Cuxhaven '94	37
Cuxhaven '97	-81
Büsum	34
Helgoland	-37
List/Sylt	21
Lübeck	-113
Wismar	30
Rostock	-61
Saßnitz	104
Koserow '97	1

Tabelle 5.2: Relativgravimetrie Pegelkontrollsystem, freie Netzausgleichung. Differenzen zu den JILAG-3 Absolutschweremessungen.

Station ($h_{\text{Ref.}} = 0\text{m}$)	Schwere [$\mu\text{m/s}^2$]	Standardabweichung [$\mu\text{m/s}^2$]
Bremerhaven	9813596.34	0.03
Cuxhaven '94	9813736.93	0.04
Cuxhaven '97	9813736.68	0.03
Büsum	9814329.80	0.03
Helgoland	9814013.99	0.04
List/Sylt	9815206.02	0.05
Lübeck	9814062.51	0.04
Wismar	9814181.14	0.03
Rostock	9814287.98	0.03
Saßnitz	9814476.00	0.03
Koserow '97	9814130.37	0.03

Tabelle 5.3: Kombinationslösung Pegelkontrollsystem: ausgeglichene Schwerewerte und Standardabweichung.

Die größte Differenz ergibt sich an der Station Lübeck. Die RMS-Differenz beträgt 63 nms^{-2} . Sie enthält Fehler der Absolut- und der Relativgravimetrie, für das einzelne Meßverfahren ist die Annahme einer Standardabweichung von $0.05 \mu\text{ms}^{-2}$ also realistisch.

Abschließend wurde eine kombinierte Ausgleichung gerechnet, in welche die Absolutmessungen mit einer Standardabweichung von 50 nms^{-2} eingeführt wurden (siehe auch Kap. 2.2). Damit erhält man für die Pegelstationen neben den reinen Absolutwerten (Kap. 4.5) einen zweiten Satz von Schwerewerten, der das gesamte Beobachtungsmaterial (Absolut- und Relativmessungen) berücksichtigt (Tab. 5.3). Die Standardabweichungen der ausgeglichenen Schwerewerte variieren zwischen 0.03 und 0.05 nms^{-2} .

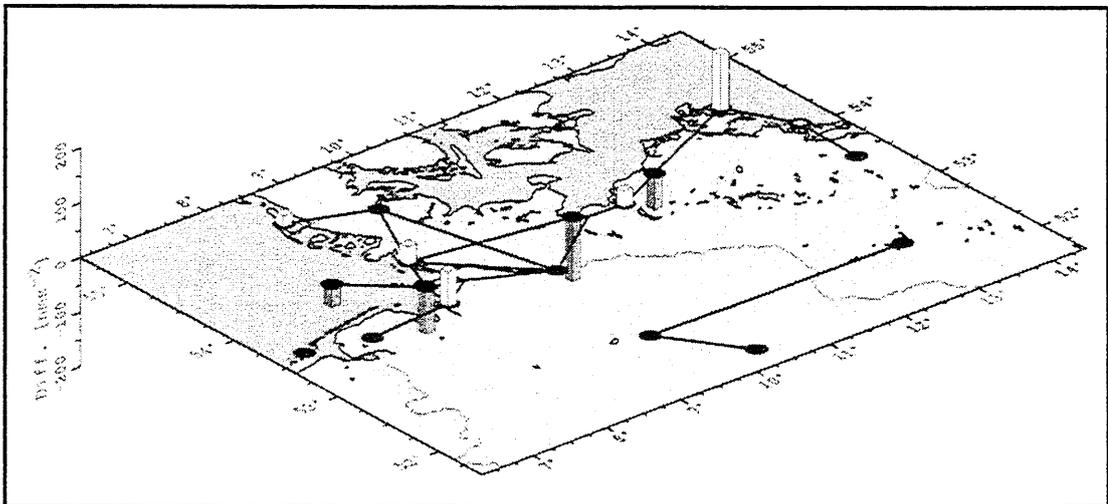


Abbildung 5.3: Differenzen zwischen Relativgravimetrie (freie Netzausgleichung) und Absolutmessungen.

5.5 Zentrierungs- und Pegelanschlußmessungen

Um die JILAG-3 Ergebnisse direkt mit den Ergebnissen der Relativgravimetrie vergleichen zu können (und für spätere Anschlußmessungen), wird der gemessene Absolutschwerewert von der JILAG-3 Referenzhöhe auf die Instrumentenhöhe der Relativgravimeter reduziert werden können. Dazu sind Informationen über den vertikalen Schweregradienten notwendig. Er wurde auf jeder Station mit zwei LCR-Relativgravimetern im Feedbackmodus (Kap. 5.1) bestimmt, indem die Schweredifferenz zwischen einem Punkt in Bodenniveau und einem Punkt in 1m Höhe mit jedem Gravimeter 10x gemessen wurde. Die Ergebnisse sind bei den Stationsbeschreibungen der Absolutstationen im Anhang A angegeben. Die Standardabweichung der Gradienten liegt bei 0.01 - $0.02 \mu\text{m/s}^2$.

In der direkten Umgebung der Absolutstationen (meistens an Nachbargebäuden) wurde zu Sicherheitszwecken jeweils ein Exzentrum angelegt. Die Schweredifferenzen zwischen Zentren und Exzentren wurden, wie die vertikalen Schweregradienten, mit jeweils zwei LCR-Gravimetern im Feedbackmodus hochgenau bestimmt (Handtransport). Die Exzentren können später zusammen mit den Pegelfestpunkten zur Aufdeckung lokaler Schwereänderungen (z.B. durch Gebäudesetzungen) dienen.

Schließlich wurden die Schwerewerte von den Absolutstationen relativgravimetrisch auf die Höhenfestlegung der Schreibpegel übertragen. Diese ist in den meisten Fällen durch mindestens drei Nivellementpunkte in unmittelbarer Umgebung des Pegels definiert. Davon wurden jeweils zwei ausgewählt, die - teilweise unter Nutzung eines Hilfsstativs - für die Messung mit LCR-Gravimetern geeignet waren.

Die Schweredifferenz zur Absolutstation wurde mit 2-4 LCR-Gravimetern im Feedbackmodus mehrfach gemessen. Dabei waren Kraftfahrzeug-Transporte (Fahrzeiten zwischen 15 und 75 Minuten/Verbindung) nötig. Die Schweredifferenzen betragen maximal $100 \mu\text{m/s}^2$. Die im Teilnetz Ostsee erzielten Genauigkeiten sowie die Anzahl der dort gemessenen Verbindungen können Tab. 5.4 entnommen werden. Die Standardabweichungen der ausgeglichenen Schweredifferenzen zur Absolutstation lagen bei 17 nms^{-2} für die Exzentren bzw. bei $28 - 46 \text{ nms}^{-2}$ für die Pegelfestpunkte.

Instrument	Handtransport		Autotransport	
	Verbindungen	Standardabweichung [nm/s ²]	Verbindungen	Standardabweichung [nm/s ²]
D023	-	-	2	-
D023F	-	-	8	150
G079F	-	-	12	95
G298F	29	61	42	108
G709F	28	66	37	141

Tabelle 5.4: Zentrierungs- bzw. Pegelanschlußmessungen, Gravimeterstatistik Teilnetz Ostsee. Genutzte Verbindungen und Standardabweichungen für eine einmal gemessene Schweredifferenz.

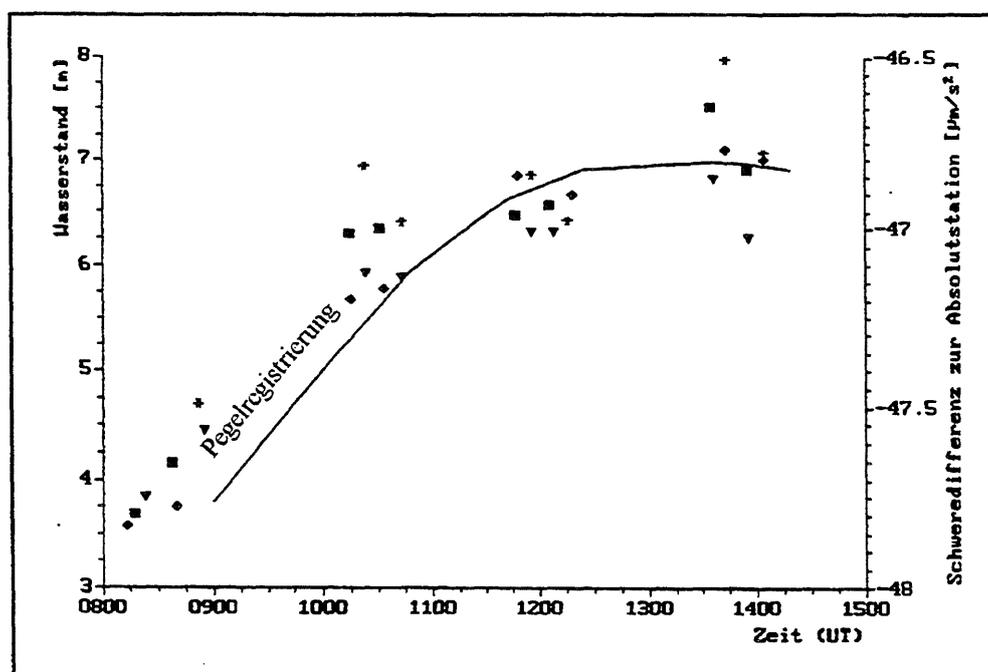


Abbildung 5.4: Pegelanschlußmessungen Büsum. Ablesung Schreibpegel und Schweredifferenzen zur Absolutstation (4 LCR-Gravimeter auf 2 Pegelfestpunkten).

Im Bereich der Nordseeküste traten bei den Pegelanschlußmessungen Schwierigkeiten auf, da hier aufgrund des teilweise erheblichen Tidenhubs mit größeren Schwereänderungen aufgrund der direkten Attraktionswirkung der Wassermassen zu rechnen ist. Als Beispiel wird in Abbildung 5.4 das Ergebnis der Pegelanschlußmessungen an der Station Büsum gezeigt. Die hohe Korrelation der Schweredifferenzen zur Absolutstation mit der Pegelregistrierung ist deutlich erkennbar. Eine Modellierung dieses Effekts mit einem Genauigkeitsniveau $< 0.05 \mu\text{ms}^{-2}$ ist möglich, wenn eine ausreichende Anzahl von Messungen bei unterschiedlichen Wasserständen vorliegt. Eine Übertragung der Schwere von der Absolutstation zu den Pegelfestpunkten erscheint daher sinnvoll.

Das Genauigkeitspotential des Nivellements über kurze Distanzen wird allerdings nicht erreicht. Für die lokale Kontrolle von Höhenänderungen zwischen Schreibpegel und Absolutstation sollten deshalb weiterhin Nivellement-Messungen in Betracht gezogen werden.

6. Reduktion von Gezeiten und Luftdruckeffekten

6.1 Gravimetrische Gezeiten

Neben der gravimetrischen Vermessung des Kontrollnetzes wurden in dem Projekt auch gravimetrische Erdgezeiten an den Stationen Rostock, Aurich und Helgoland registriert (Abb. 1.2). Damit sollen die synthetischen Erdgezeitenparameter überprüft werden.

Von Juni bis Oktober 1993 wurde die Gezeitenregistrierung am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Außenstelle Rostock, durchgeführt. Zum Einsatz kamen zwei LaCoste&Romberg Federgravimeter mit eingebautem Feedback-System (LCR-G709F und LCR-G298F). Beide Gravimeter wurden vor und nach dem Einsatz in Rostock auf der vertikalen Eichbasis Hannover geeicht (Genauigkeit besser 0.5×10^{-4}). Die Meßwerte wurden mit Hilfe eines PREMA 5001 Digitalmultimeters und eines HP200-Mikrocomputers minütlich erfaßt. Die Frequenzübertragungsfunktion des gesamten Registriersystems wurde mit Hilfe einer künstlich erzeugten Sprungfunktion ermittelt und in der Auswertung als instrumentelle Phasenverschiebung berücksichtigt.

Die Rohdaten wurden einer umfangreichen Datenvorverarbeitung unterzogen, in der Sprünge, grobe Fehler und Registrierlücken entfernt wurden. Diese Vorverarbeitung geschah mit Hilfe des Programms PRETERNA, das - ebenso wie das für die spätere Gezeitenanalyse benutzte Programm ETERNA - von Prof.H.-G.Wenzel, Universität Karlsruhe, stammt (WENZEL 1993).

Anschließend wurden Gezeitenparameter (Amplitudenfaktor , Phasenverschiebung) für 13 Wellengruppen der TAMURA Gezeitenpotentialentwicklung sowie ein Regressionsparameter für den stationären Luftdruck in einer Ausgleichung nach kleinsten Quadraten berechnet (Anhang C). Die Ergebnisse für die vier größten täglichen und halbtägigen Tiden sind in Tabelle 6.1 angegeben. Die eingesetzten Instrumente stimmen für die einzelnen Wellengruppen auf einem Niveau besser 1 nm/s überein.

In Tabelle 6.2 werden die aus Messungen abgeleiteten Parameter mit den a-priori bekannten, aus geophysikalischen Erdmodellen und ozeanischen Modellen synthetisierten Gezeitenparametern (TIMMEN und WENZEL 1994) verglichen. Die Differenzen liegen bei maximal 2.3 nms^{-2} . Für den gesamten Parametersatz kann damit von einer Übereinstimmung besser als 10 nm/s^{-2} ausgegangen werden. Es erscheint daher nicht notwendig, im südlichen Ostseeraum weitere Gezeitenregistrierungen durchzuführen.

Von Dezember 1993 bis April 1994 wurde die Gezeitenregistrierung in der Station Aurich (Kinderklinik des Kreiskrankenhauses) durchgeführt. Es wurden 2 LCR-Gravimeter (LCR-G709F, LCR-D014F) eingesetzt. Für einige Wochen wurde zusätzlich das LCR-D023F der niedersächsischen Landesvermessung zur Parallelregistrierung aufgebaut. Der Vergleich der beobachteten mit synthetischen Gezeitenparametern fällt an dieser Station ähnlich günstig aus wie in Rostock. Größere Abweichungen treten lediglich bei der M2-Tide auf.

Die dritte gravimetrische Gezeitenregistrierung wurde von August bis Dezember 1996 im ehemaligen Schulbunker auf der Insel Helgoland durchgeführt. Aufgrund der Insellage ergaben sich hier erwartungsgemäß größere Differenzen zu den synthetischen Gezeitenparametern (Tab. 6.3).

Amplitudenfaktoren				
Wellengruppe	LCR-G709F	LCR-G298F	Differenz	in [nm/s ²]
O1	1.1524 ±0.0009	1.1535 ±0.0006	-0.0011	0.3
P1K1	1.1398 ±0.0006	1.1414 ±0.0004	-0.0016	0.7
M2	1.1839 ±0.0010	1.1878 ±0.0005	-0.0039	0.9
S2	1.1832 ±0.0022	1.1860 ±0.0011	-0.0028	0.3
Phasenverschiebungen				
Wellengruppe	LCR-G709F	LCR-G298F	Differenz	in [nm/s ²]
O1	0.119 ±0.044	0.163 ±0.029	0.044	0.3
P1K1	0.155 ±0.031	0.158 ±0.021	0.003	0.0
M2	1.381 ±0.050	1.401 ±0.024	0.020	0.1
S2	0.417 ±0.107	0.313 ±0.052	-0.104	0.3

Tabelle 6.1: Gezeitenparameter Station Rostock: Gravimetervergleich.

Aufgrund der geringen Ausdehnung der Insel Helgoland ist es nicht möglich, direkte gravitative Effekte aufgrund von Wasserstandsänderungen der Nordsee auszuschließen. In die Gezeitenanalyse flossen deshalb Wasserstandsinformationen (Registrierung des Meeresspiegels Helgoland) mit ein. Zur Modellierung des Einflusses reichte ein zusätzlicher linearer Parameter aus. Er ergab sich zu $40 \text{ nms}^{-2}/\text{m}$, kann also nicht vernachlässigt werden.

6.2 Luftdruckschwankungen

Luftdruckschwankungen beeinflussen den Stationsschwerewert in zweierlei Hinsicht. Als *Primäreffekt* wird die direkte gravitative Wirkung der vorhandenen Luftmassen bezeichnet, während der *Sekundäreffekt* die indirekte Wirkung durch Deformationen der Erdoberfläche als Folge sich ändernder Auflasten enthält. Der gesamte Luftdruckeffekt kann nach (MERRIAM 1992) bis zu $0.30 \mu\text{ms}^{-2}$ betragen.

Der Luftdruckeinfluß wird in der Regel mit Hilfe eines linearen Luftdruckkoeffizienten berücksichtigt. Lokale Regressionsparameter können aus Registrierungen zeitlicher Schwereänderungen mit paralleler Luftdruckerfassung abgeleitet werden. Typische Werte liegen

zwischen -3 und $-4 \text{ nms}^{-2}/\text{hPa}$. Die Luftdruckreduktion berechnet sich dann in Abhängigkeit vom gemessenen Luftdruck p und dem höhenabhängigen Normalluftdruck p_n nach:

$$\Delta g_{\text{Luft}} = \alpha \left(p - p_n \right) \quad \text{nm/s}^2 .$$

(hPa)

Der Normalluftdruck p_n wird durch die Standardatmosphäre nach DIN4050 definiert, die weitgehend kompatibel mit der U.S. Standardatmosphäre 1962 ist:

$$p_n = 1013.25 \left(\frac{\left(1 - 0.0065 H_{(m)} \right)}{288.15} \right)^{5.2559} \quad \text{hPa} .$$

Falls kein lokaler Regressionsparameter bekannt ist, wird gemäß der IAG Resolution Nr. 9, 1983, der Wert $\alpha = -3 \text{ nms}^{-2}/\text{hPa}$ für die Luftdruckreduktion benutzt.

Amplitudenfaktoren				
Wellengruppe	Beobachtet	Modell	Differenz	in [nm/s^2]
O1	1.1535	1.1483	0.0052	1.8
P1K1	1.1424	1.1376	0.0048	2.3
M2	1.1863	1.1794	0.0069	2.1
S2	1.1854	1.1816	0.0038	0.5
Phasenverschiebungen				
Wellengruppe	Beobachtet	Modell	Differenz	in [nm/s^2]
O1	0.177	0.125	0.052	0.3
P1K1	0.151	0.133	0.018	0.1
M2	1.386	1.558	-0.172	0.9
S2	0.333	0.557	-0.224	0.6

Tabelle 6.2: Gezeitenregistrierung Rostock: Vergleich beobachteter und synthetischer Gezeitenparameter.

Amplitudenfaktoren				
Wellengruppe	Beobachtet	Modell	Differenz	in [nm/s^2]
O1	1.1512	1.1511	0.0001	0.0
P1K1	1.1370	1.1322	0.0048	2.0
M2	1.1970	1.1538	0.0432	11.1
S2	1.1842	1.1687	0.0155	1.9
Phasenverschiebungen				
Wellengruppe	Beobachtet	Modell	Differenz	in [nm/s^2]
O1	0.090	-0.027	0.116	0.7
P1K1	-0.016	0.207	-0.224	1.8
M2	1.639	-0.194	1.833	9.8
S2	2.652	1.318	1.334	3.3

Tabelle 6.3: Gezeitenparameter Helgoland: Vergleich beobachteter und synthetischer Gezeitenparameter.

In den Stationen Rostock, Aurich und Helgoland wurden bei der Gezeitenanalyse (Kap. 6.1) lineare Regressionskoeffizienten mitgeschätzt (Tab. 6.4). Auf der Station Rostock weicht der gemessene Wert ($-3.82 \text{ nms}^{-2}/\text{hPa}$) stärker vom IAG Standardwert ($-3 \text{ nms}^{-2}/\text{hPa}$) ab. Während der Rostock-Registrierung (3,5 Monate) betrug die maximale Luftdruckdifferenz 35 hPa. Nimmt man diesen Wert als maximale Luftdruckschwankung an, so können durch ausschließliche Verwendung des Standardwertes $-3 \text{ nms}^{-2}/\text{hPa}$ auf dieser Station Fehler bis zu 29 nms^{-2} verursacht werden.

Instrument	Rostock	Aurich	Helgoland
LCR-D014F	-	-2.85	-
LCR-G079F	-	-	-3.26
LCR-G298F	-3.72	-	-
LCR-G709F	-3.94	-2.66	-4.74
Mittelwert	-3.83	-2.75	-4.00

Tabelle 6.4: Lineare Luftdruckkoeffizienten aus Gezeitenregistrierungen [$\text{nms}^{-2}/\text{hPa}$]

Zusammenfassung

Das Institut für Erdmessung (IfE) hat im Rahmen des BMBF-Forschungsvorhabens „Überwachung vertikaler Massenbewegungen an deutschen Meerespegeln durch absolute Schwere-messungen“ ein gravimetrisches Kontrollnetz an der deutschen Nord- und Ostseeküste eingerichtet und eine überprüfte Erstvermessung durchgeführt.

Das gravimetrische Kontrollnetz besteht im Endausbau aus 10 Stationen in der Nähe bedeutender Meerespegel (Bremerhaven, Cuxhaven, Helgoland, Büsum, List/Sylt, Lübeck, Wismar, Rostock, Saßnitz, Koserow) und den drei Referenzstationen Hannover, Clausthal und Potsdam mit Küstenentfernungen $> 150\text{km}$. Besonders im Bereich der Nordseeküste wurde bei den Schwere-messungen mit dem JILAG-3 Absolutgravimeter die Abhängigkeit der Resultate von den Umgebungseinflüssen (Wind, Dünung) deutlich. Auf allen Stationen konnte durch entsprechende Variation des Beobachtungszeitraum eine Präzision von $0.01\text{-}0.04 \mu\text{m/s}^2$ für den Stationsschwerewert erreicht werden. Die Ergebnisse auf der Insel Borkum waren leider nicht zur Ableitung eines präzisen Schwerewertes geeignet, obwohl dort mehrere Tage lang bei verhältnismäßig ruhigen Umgebungsbedingungen mit JILAG-3 beobachtet werden konnte.

Auf den Stationen Rostock (1993), Aurich (1994) und Helgoland (1996) wurden jeweils viermonatige Registrierungen gravimetrischer Gezeiten durchgeführt, um die vorhandenen Modelle zur Reduktion zeitlicher Schwereänderungen im Küstenbereich zu überprüfen. Die abgeleiteten Gezeitenparameter stimmen mit Modellparametern, die aus Erd- bzw. Ozeanmodellen synthetisiert wurden, sehr gut überein (Abweichungen $< 10 \text{ nms}^{-2}$ mit Ausnahme der Insel Helgoland). Im Zuge der Gezeitenanalyse wurden außerdem lineare Regressionskoeffizienten für den Einfluß des stationären Luftdrucks auf Schwere-messungen an diesen Punkten berechnet. Auf Helgoland mußte zusätzlich ein linearer Parameter zur Berücksichtigung von Wasserstandsänderungen in Ansatz gebracht werden.

Im Rahmen des Projekts wurden zwei wesentliche instrumentelle Neuerungen am IfE eingeführt:

Der seit 1986 im JILAG-3 Absolutgravimeter betriebene frequenzstabilisierte He-Ne Laser wurde im Dezember 1994 durch einen jodstabilisierten He-Ne Laser ersetzt, der über eine wesentlich höhere Langzeitstabilität verfügt (Frequenzstabilität $1\text{-}2 \cdot 10^{-10}$, entsprechend 2 nms^{-2} für die gemessenen Schwerewerte).

Das Schwingungsdämpfungssystem M-EVIS, das ursprünglich zur seismischen Isolierung der JILAG-3 Interferometerbasis gegen Bodenbewegungen gedacht war, erwies sich nach einer kurzen Testphase im Herbst 1993 für Zwecke der Absolutgravimetrie als ungeeignet und wurde an den Hersteller zurückgegeben. Stattdessen wurde das bereits am Institut vorhandene Breitbandseismometer STS-2 um eine Registriereinrichtung mit Massenspeicher und um zwei elektronische Neigungsmesser vom Typ TALYVEL 3 mit Trägerfrequenzmeßverstärker PEEKEL CA252 erweitert. Mit diesem seismischen Registriersystem können nun Bodenbewegungen der Absolutgravimeter-Aufstellfläche in drei zueinander orthogonalen Komponenten (2 horizontal, 1 vertikal) sowie Neigungen der Aufstellfläche in zwei Komponenten erfaßt werden. Das System wurde zur Erkundung von Absolutstationen und zur simultanen Erfassung von Störsignalen bei Messungen mit JILAG-3 erfolgreich eingesetzt. Die Filterung der Absolutgravimetermessungen mit Hilfe parallel registrierter seismischer Daten ergab für die Station Rostock einen Korrekturwert von $0.1 \mu\text{m/s}^2$. Die dadurch erreichte Genauigkeitssteigerung konnte mit Hilfe unabhängiger Messungen nachgewiesen werden.

Parallel zu den Absolutmessungen wurden die Schweredifferenzen zwischen den einzelnen Stationen mit mehreren Relativgravimetern unterschiedlichen Typs gemessen. Beim Vergleich der Ergebnisse aus Relativ- und Absolutgravimetrie traten Differenzen in einer Größenordnung von $0.07 \mu\text{ms}^{-2}$ auf. Da dieser Wert Fehleranteile aus Absolut- und Relativgravimetrie enthält, wurde formal eine Genauigkeit von $5 \cdot 10^{-8} \text{ms}^{-2}$ für das Pegelkontrollnetz erreicht. An zwei Stationen traten Differenzen von $0.20 \mu\text{ms}^{-2}$ zwischen einzelnen Meßkampagnen auf, deren Ursache nicht eindeutig geklärt werden konnte. Hier sind evtl. auch tatsächliche zeitliche Schwereänderungen in Betracht zu ziehen.

Die kombinierte Ausgleichung der Absolut- und Relativmessungen führt zu Standardabweichungen von $0.03\text{-}0.05 \mu\text{m/s}^2$ für die ausgeglichenen Schwerewerte. Die vor Beginn des Projekts angestrebte Meßgenauigkeit von $0.05 \mu\text{ms}^{-2}$ konnte somit erreicht werden. Die bei der Erstvermessung des Pegelkontrollnetzes erzielte Genauigkeit stellt für den Küstenbereich ein Ergebnis dar, das bisher nur bei Inlandsnetzen mit wesentlich günstigeren Bedingungen der Regelfall war. Damit wird eine Höhenkontrolle im Zentimeter-Niveau gravimetrisch möglich, das Pegelkontrollnetz bildet somit aufgrund seines absoluten Bezugs eine sinnvolle und unabhängige Ergänzung zu den (relativen) geometrischen Raumverfahren. Es kann für zukünftige präzisionsgravimetrische Projekte im Küstenbereich als Referenznetz dienen, insbesondere für die Wiederholungsmessung des Pegelkontrollnetzes im Abstand von rund 20 Jahren.

Literatur

- CARTER, W.E., E. WILIAM, D.G. AUBREY, T. BAKER, C. BOUCHER, C. LEPROVOST, D. PUGH, W.R. PELTIER, M. ZUMBERGE, R.R. RAPP, R.E. SCHUTZ, K.O. EMERY, D.B. ENFIELD (1989): Geodetic fixing of tide gauge bench marks. Commission on Mean Sea Level and Tides, International Association for Physical Sciences of the Ocean, Woods Hole Oceanographic Institute, Woods Hole, Mass., technical report 89-31.
- CARTER, W.E., M. Chin, J.R. MACKAY, G. PETER, W. SCHERER, J. DIAMANTE (1988): Global absolute sea level: the Hawaiian Network. *Marine Geodesy*, Vol. 12, 247-257.
- CHARTIER, J.-M., A. CHARTIER, J. LABOT, M. WINTERS (1995): Absolute gravimeters: status report on the use of iodine-stabilized He-Ne lasers at 633 nm. Fourth International Comparison of Absolute Gravimeters, *Metrologia*, Vol. 32, 181-184.
- FALLER, J.E., Y.G. GUO, J. GESCHWIND, T.M. NIEBAUER, R.L. RINKER, J. XUE (1983): The JILA portable absolute gravity apparatus. Bureau Gravimetrique International, *Bulletin d'Information*. No. 53, 87-97.
- HANADA, H. (1990): Simultaneous determination of gravitational acceleration and ground vibrations by free fall experiments. *Bulletin Géodésique*, Vol. 64, 207-218.
- HANNAH, J. (1989): A long term sea level change scenario and its implications for geodetic networks. *Marine Geodesy*, Vol. 13, 91-100.
- KAKKURI, J. (1995): The Baltic Sea Level Project. In: *Coordinate Systems, GPS, and the Geoid*. Reports of the Finnish Geodetic Institute, No. 95:4.
- LASSEN, H. (1991): Örtliche und zeitliche Variationen des mittleren Tidemittelwassers in der südöstlichen Nordsee. *Zeitschrift für Vermessungswesen* 116, 149-155.
- LOHRBERG, W. (1989): Änderungen der mittleren Tidewasserstände an der Nordseeküste. Sonderdruck aus *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 33, H. 5/6, 166-172.
- MARSON, I., J.E. FALLER, G. CERUTTI, P. De MARIA, J.-M. CHARTIER, L. ROBERTSSON, L. VITUSHKIN, J. FRIEDERICH, K. KRAUTERBLUTH, D. STIZZA, J. LIARD, C. GAGNON, A. LOTHAMMER, H. WILMES, J. MÄKINEN, M. MURAKAMI, F. REHREN, M. SCHNÜLL, D. RUESS, G.S. SASAGAWA (1995): Fourth International Comparison of Absolute Gravimeters. *Metrologia*, Vol. 32, No. 3, 137-144.
- MERRIAM, J.B. (1992): Atmospheric pressure and gravity. *Geophysical Journal International*, No. 109, 488-500.
- NIEBAUER, T.M. (1987): New absolute gravity instruments for physics and geophysics. Ph.D. thesis, Uni. of Colorado, Dep. of Physics, Boulder, Colorado.
- NIEBAUER, T.M., G.S. SASAGAWA, J.E. FALLER, R. HILT, F. KLOPPING (1995): A new generation of absolute gravimeters. Fourth International Comparison of Absolute Gravimeters. *Metrologia*, Vol. 32, No. 3, 159-180, S vres.

- PELZER, H. (1985):** Grundlagen der mathematischen Statistik und der Ausgleichsrechnung. In: Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II (Hrsg. Pelzer), 3-120, Verlag K. Wittwer, Stuttgart.
- PRESS, W. H., J.B. RYBICKI (1989):** Fast algorithm for spectral analysis of unevenly sampled data. The Astronomical Journal, No. 338, 277-280.
- QUINN, T.J. (1994):** Mise en Pratique of the Definition of the Metre. Metrologia, Vol. 30, 523-541.
- REHREN, F., M. SCHNÜLL (1995):** Absolute Gravity Determination With JILAG-3 - Data Evaluation Using Additional Seismic Information. Vortrag, XXI General Assembly, Internat. Union of Geodesy and Geophysics, Boulder/Colorado.
- RÖDER, R.H., M. SCHNÜLL, H-G. WENZEL (1988):** SRW feedback for LaCoste-Romberg gravimeters with extended range. Bulletin d'Information, Bureau Gravimetrique International, No. 62, 46-50.
- RÖDER, R.H. (1994):** Zum Einsatz des Absolutgravimeters JILAG-3 in Präzisionsschwerenetzen. Wiss. Arb. der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, Nr. 205.
- SEEBER, G., W. TORGE (1997):** Eine GPS/Geoid-Höhenübertragung zum Meerespegel in Helgoland. Zeitschrift für Vermessungswesen 122, 445-457.
- TIMMEN, L., R.H. RÖDER, M. SCHNÜLL (1993):** Absolute gravity determination with JILAG-3 - improved data evaluation and instrumental techniques. Bulletin Géodesique, Vol. 67, 71-80.
- TIMMEN, L. (1994):** Untersuchungen zur Modellbildung bei der Auswertung absoluter Schweremessungen. Wiss. Arb. der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, Nr. 204.
- TIMMEN, L., H.-G. WENZEL (1994):** Worldwide synthetic gravity tide parameters available on INTERNET. Bureau Gravimetrique International, Bulletin d'Information No. 75, 32-40, Toulouse.
- TORGE, W. (1986):** Gravimetry for monitoring vertical crustal movements: potential and problems. Tectonophysics, No. 130, 385-393.
- TORGE, W. (1989):** Gravimetry. W. de Gruyter, Berlin - New York.
- TORGE, W. (1993):** Gravimetry and Tectonics. In: Geodesy and Geophysics. Publications of the Finnish Geodetic Institute, No. 115, 131-172, Helsinki.
- TORGE, W., E. REINHART, B. RICHTER, H. WILMES, A. FRANKE (1995):** The German Gravity Base Net. XXI General Assembly, International Union of Geodesy and Geophysics, Boulder/Colorado, Pres. Paper.
- WENZEL, H.-G. (1989):** Nutzung von Schweremessungen für die Bestimmung rezenter Krustenbewegungen. In: N. Kersting und W. Welsch (Hrsg.), Rezente Krustenbewegungen. Schriftenreihe Univ. der Bundeswehr München, Heft 39, 109-123.
- WENZEL, H.-G. (1993):** Programmsystem GRAV, Version 1.5, Programm Manual, Geod. Inst. Univ. Karlsruhe, März 1993.

WENZEL, H.-G. (1993): Tidal data processing on a PC. Proceedings of the 12th International Symposium of Earth Tides, Beijing.

Anhang A:

Stationsbeschreibungen

Absolutschwerestation			
Station: Bremerhaven	$\phi = 53.566^\circ$	$\lambda = 8.587^\circ$	H = 5m
Übersicht / Foto:			
- Foto -			
Bemerkungen:			
Die Station liegt im Tiefbunker an der Brookstraße im nördlichen Stadtteil Bremerhaven/Lehe. Zugang nur mit Schlüssel. Hohe Luftfeuchtigkeit im Bunker. Sehr unruhige Station !			
Ansprechpartner:			
Amt für Zivilschutz bei der Feuerwehr Bremerhaven. Herr Albrecht, Zi. 221, Tel. 0471/1420 (Zentrale).			
Detailskizze:			
<p>The sketch shows a floor plan of the station. On the left, there is a staircase labeled 'Eingang SÜD-OST'. Above it is a room labeled 'Schleuse'. To the right of the staircase is a large area labeled 'Aufenthaltsräume'. A benchmark is marked with a height of 2.68 and a spot height of 2.20. An arrow points to the right, indicating the direction of the entrance.</p>			
Institut für Erdmessung, Universität Hannover. Gravim. Pegelkontrollnetz Nord-/Ostseeküste 1997.			

Absolutschwerestation

Station: BÜSUM

 $\phi = 54.130^\circ$ $\lambda = 8.877^\circ$

H = 3.0m

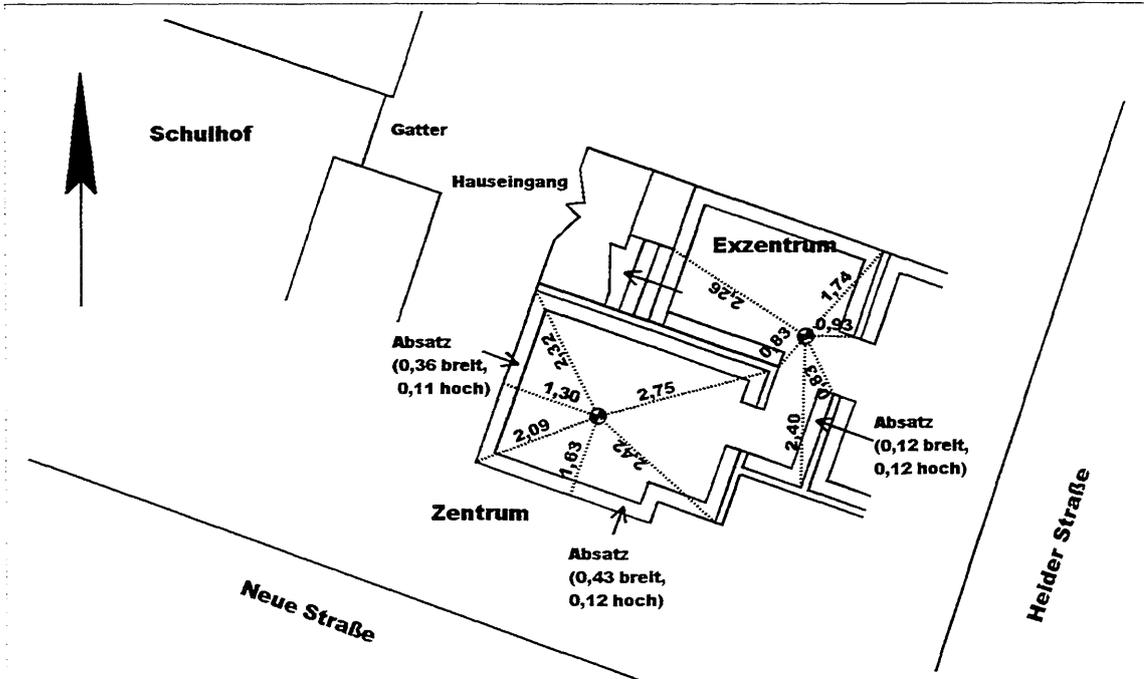
Übersicht / Foto:

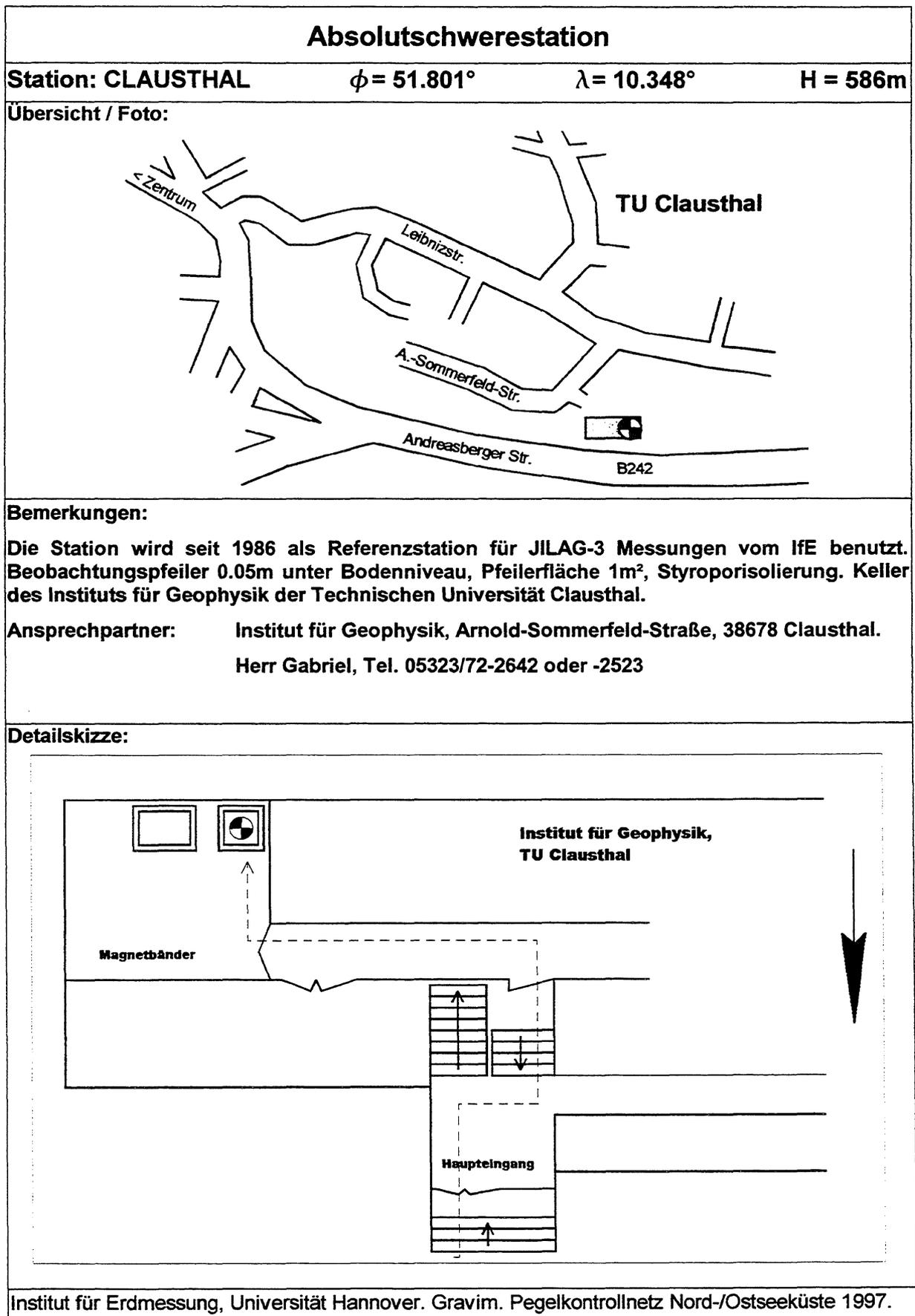
- nicht verfügbar -

Bemerkungen:

Die Station ist über den Schulhof der Realschule Büsum erreichbar. Kellerraum mit niedriger Decke. Zugang nur mit Schlüssel.

Ansprechpartner: Neocorus-Schule Büsum, Neuer Weg 2-4
 Schulleiter Herr Stein, Hausmeister Herr Klatt
 Tel. 04834/9502-0

Detailskizze:



Absolutschwerestation			
Station: CUXHAVEN	$\phi = 53.806^\circ$	$\lambda = 8.649^\circ$	H = 10m
Übersicht / Foto:			
- nicht veröffentlicht -			
Bemerkungen:			
Die Station befindet sich in einem Schutzraum im Werkstattgebäude des Marinemunitionsdepots Oxstedt (Zufahrt von Cuxhaven-Altenwalde). Messung 1987 im Gebäude 11, Raum 015.			
Ansprechpartner: Fregattenkapitän Sabow (Dienststellenleiter), Kap.-Leutnant zur See Hofmann, Oberleutnant zur See Langner, Tel. 04723/3063.			
Detailskizze:			
- nicht veröffentlicht -			
Institut für Erdmessung, Universität Hannover. Gravim. Pegelkontrollnetz Nord-/Ostseeküste 1997.			

Absolutschwerestation			
Station: HANNOVER	$\phi = 52.387^\circ$	$\lambda = 9.714^\circ$	H = 50m
Übersicht / Foto:			
Bemerkungen:			
<p>Die Station ist identisch mit der Station des Deutschen Schweregrundnetzes 1994. Gravimetrielabor des IfE im Keller des Universitätsgebäudes Callinstraße 34 - Kaserne - Beobachtungspfeiler 0.05m über Bodenniveau, Oberfläche 4m².</p>			
<p>Ansprechpartner: Institut für Erdmessung, Schneiderberg 50, 30167 Hannover Herr Schnüll, Tel. 0511/762-3398 oder --2795 (Sekretariat)</p>			
Detailskizze:			
<p>Institut für Erdmessung, Universität Hannover. Gravim. Pegelkontrollnetz Nord-/Ostseeküste 1997.</p>			

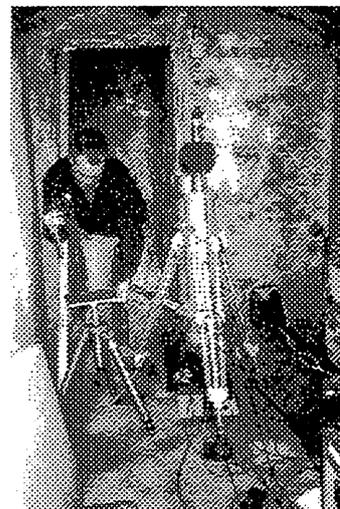
Absolutschwerestation

Station: HELGOLAND

 $\phi = 54.199^\circ$ $\lambda = 7.936^\circ$

H = 15m

Übersicht / Foto:

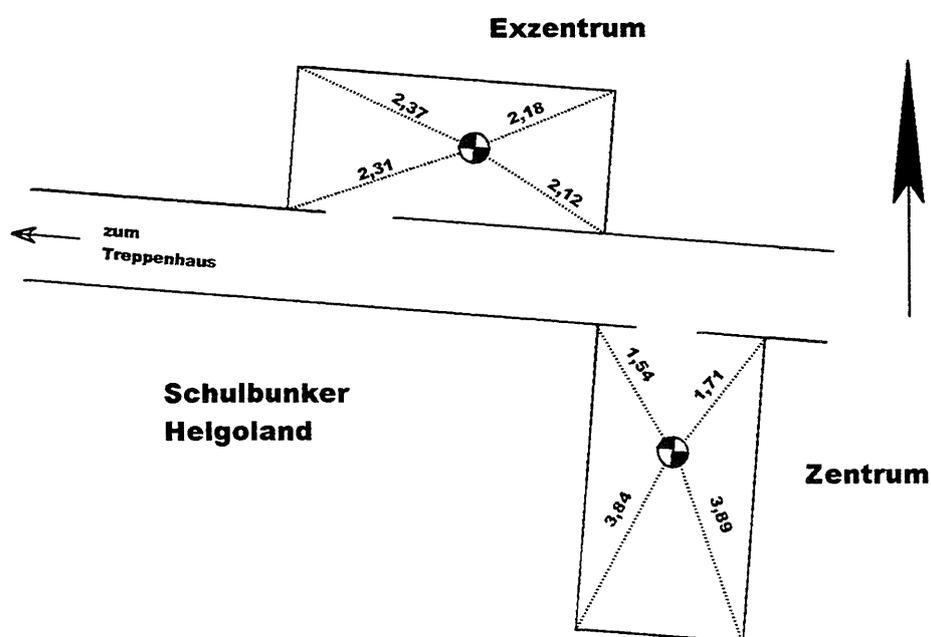


Bemerkungen:

Die Station liegt am Hauptgang des ehemaligen Luftschutzbunkers (Schulbunker) der Insel Helgoland (Eingang bei Friedhof/Kirche). Zugang nur mit Schlüssel über tiefes Treppenhaus (~15m, breite Treppen). Im Bunker Höhlenklima (Heizung erforderlich!).

Ansprechpartner: Gem. Helgoland, Herr Lange oder Herr Dietrichsen, Tel. 04725/80812.
Biolog. Forschungsanstalt, Herr Mangelsdorf, Tel. 04725/7309.

Detailskizze:



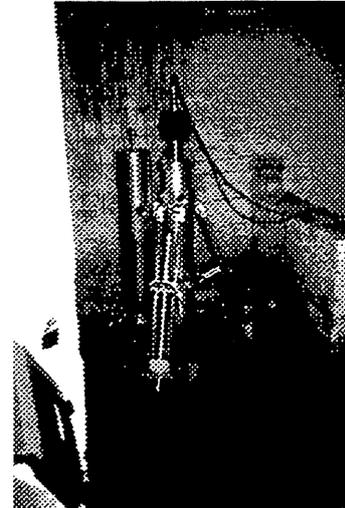
Absolutschwerestation

Station: KOSEROW

 $\phi = 54.048^\circ$ $\lambda = 14.019^\circ$

H = 25m

Übersicht / Foto:



Bemerkungen:

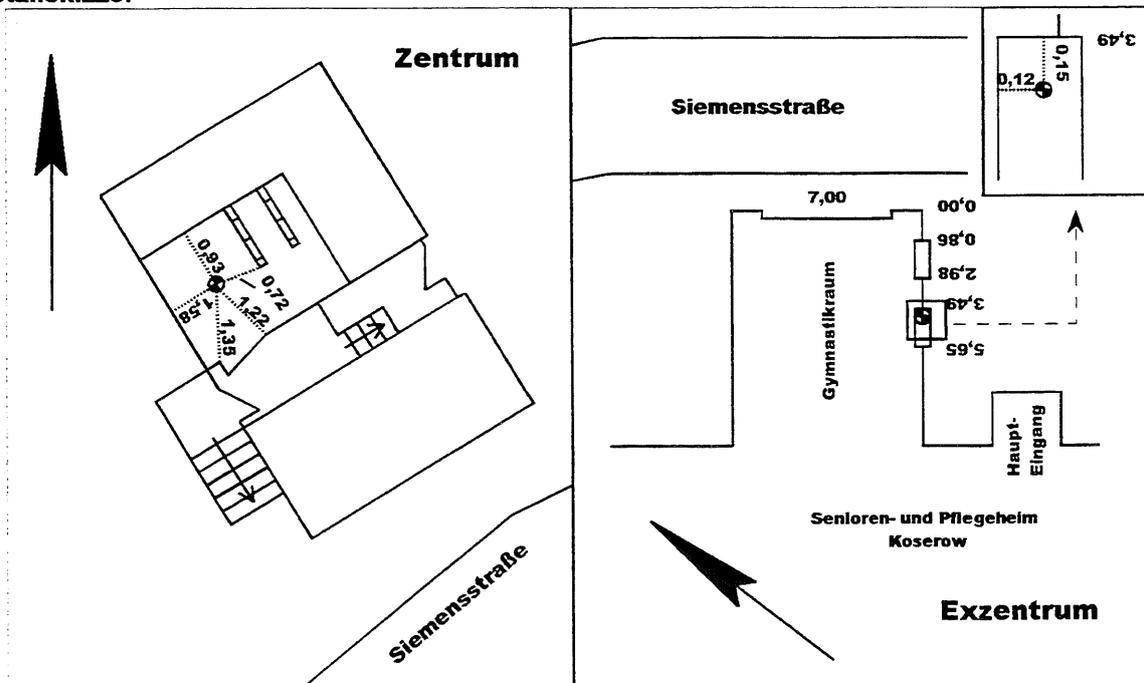
Das Zentrum liegt im Kellerraum eines Nebengebäudes an der Nordseite des Pflegeheims. Zugang nur mit Schlüssel. Exzentrum frei zugänglich.

Ansprechpartner:

Senioren- und Pflegeheim Koserow, Siemensstr. 21

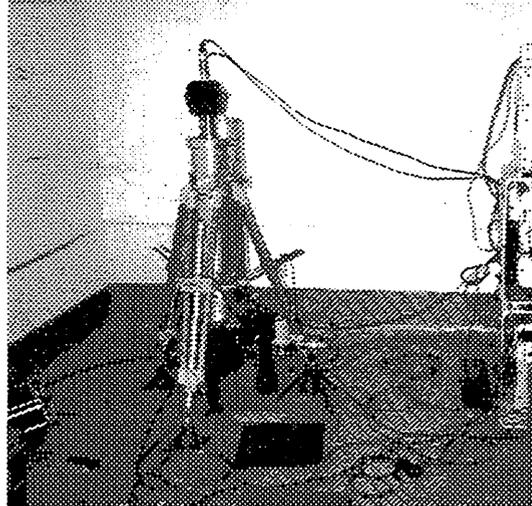
Herr Schaar (Hausmeister), Tel. 038375/91-0, -116 oder -121.

Detailskizze:



Absolutschwerestation**Station: LIST/SYLT** $\phi = 55.020^\circ$ $\lambda = 8.417^\circ$ **H = 2m**

Übersicht / Foto:

**Bemerkungen:**

Die Station liegt in einem Kellerraum des Gebäudes XII der Marineversorgungsschule List.

Ansprechpartner: Kommandeur der Marineversorgungsschule List/Sylt
Thomasplatz 1, 25992 List/Sylt
Tel. 04651/871021

Detailskizze:

-.nicht veröffentlicht -

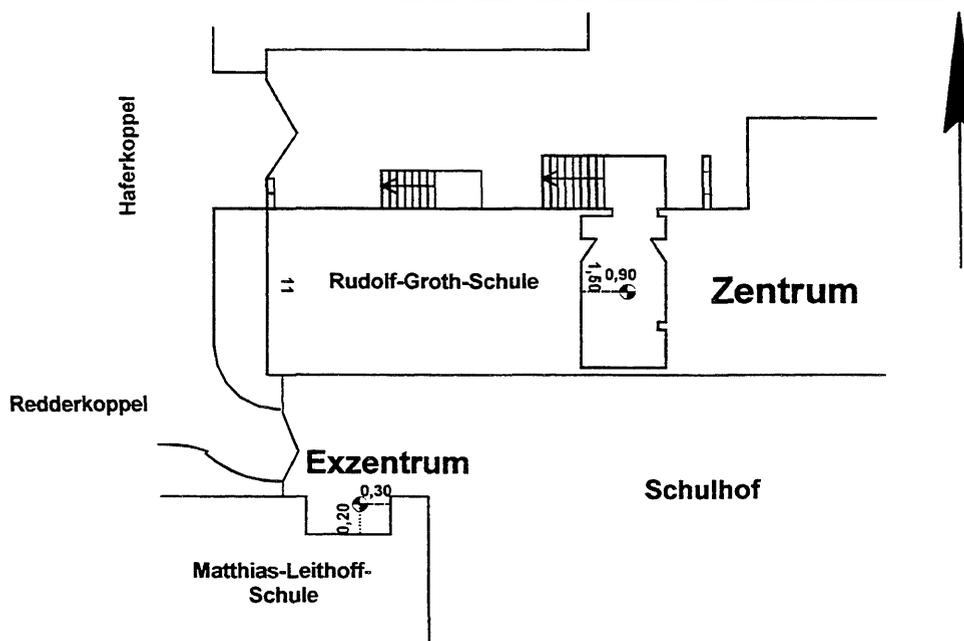
Absolutschwerestation

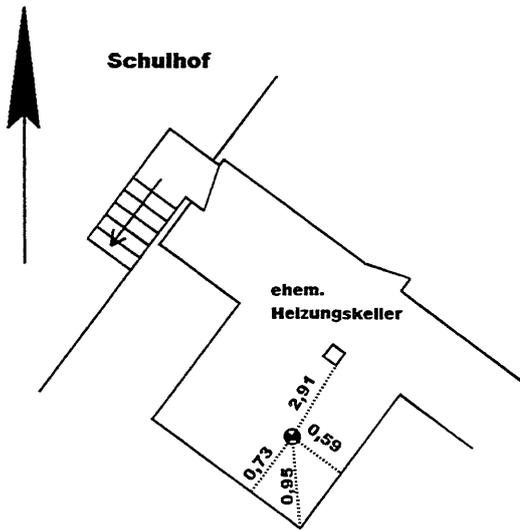
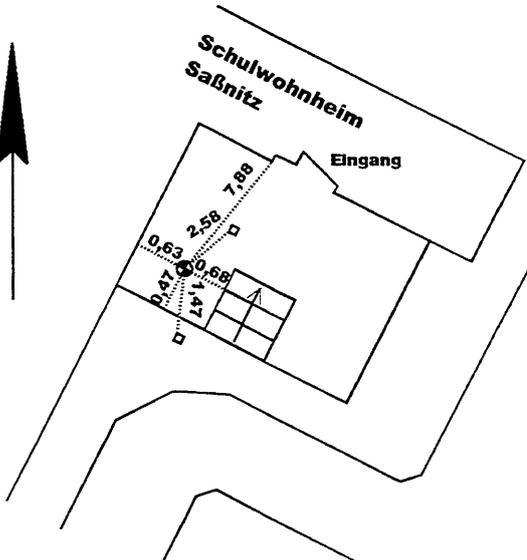
Station: LÜBECK
 $\phi = 53.960^\circ$
 $\lambda = 10.860^\circ$
H = 20m
Übersicht / Foto:

Bemerkungen:

Die Station befindet sich im Keller der Rudolf-Groth-Schule im Lübecker Stadtteil Küchnitz. Zugang nur mit Schlüssel.

Ansprechpartner: Rudolf-Groth-Schule, Haferkoppel 11, 23569 Lübeck
Schulleiter Herr Dogs, Tel. 0451/302554.

Detailskizze:


Absolutschwerestation			
Station: SASSNITZ	$\phi = 54.509^\circ$	$\lambda = 13.620^\circ$	H = 35m
Übersicht / Foto:			
			
Bemerkungen:			
<p>Die Station liegt im ehemaligen Heizungskeller des Berufsschulwohnheims Sassnitz. Am Ortseingang Sassnitz (Linkskurve) von der E22/E251/B96 nach rechts in Straße der Jugend abbiegen. Station liegt auf Anhöhe. Zugang nur mit Schlüssel. Keine Messung am Wochenende. Übernachtungsmöglichkeit im Schulwohnheim.</p>			
<p>Ansprechpartner: Berufsschulwohnheim Sassnitz, Straße der Jugend 7, Herr Scheibe (Heimleiter), Tel. 038392/69-0.</p>			
Detailskizze:			
 <p style="text-align: center;">Zentrum</p>		 <p style="text-align: center;">Exzentrum</p>	
<p>Institut für Erdmessung, Universität Hannover. Gravim. Pegelkontrollnetz Nord-/Ostseeküste 1997.</p>			

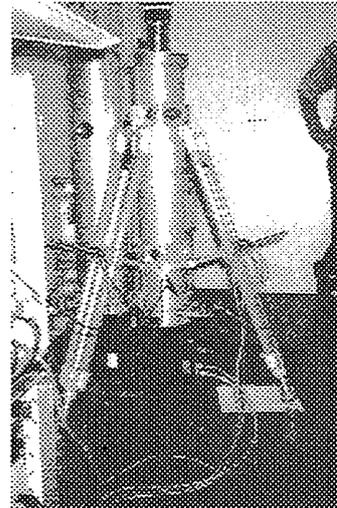
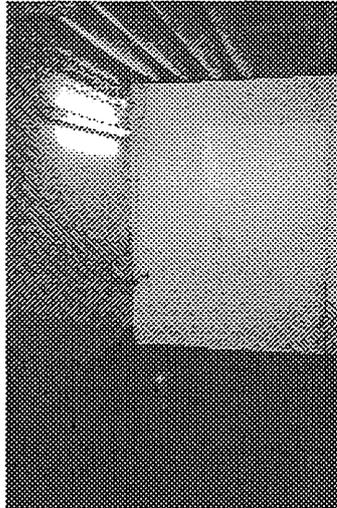
Absolutschwerestation

Station: WISMAR

 $\phi = 53.890^\circ$ $\lambda = 11.450^\circ$

H = 13m

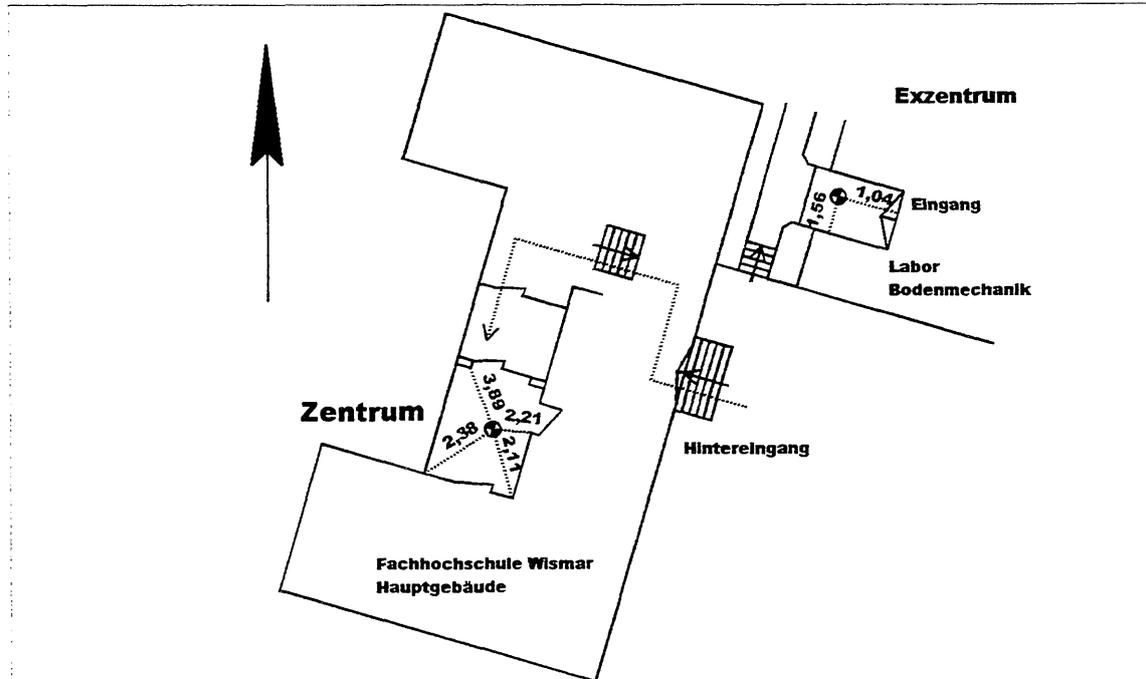
Übersicht / Foto:

**Bemerkungen:**

Die Station liegt im Hauptgebäude der Fachhochschule Wismar (Kellergeschoß). Mit Kfz am besten erreichbar über Hintereingang. Exzentrum im Eingangsbereich des Labors Bodenmechanik der Fakultät für Bauwesen.

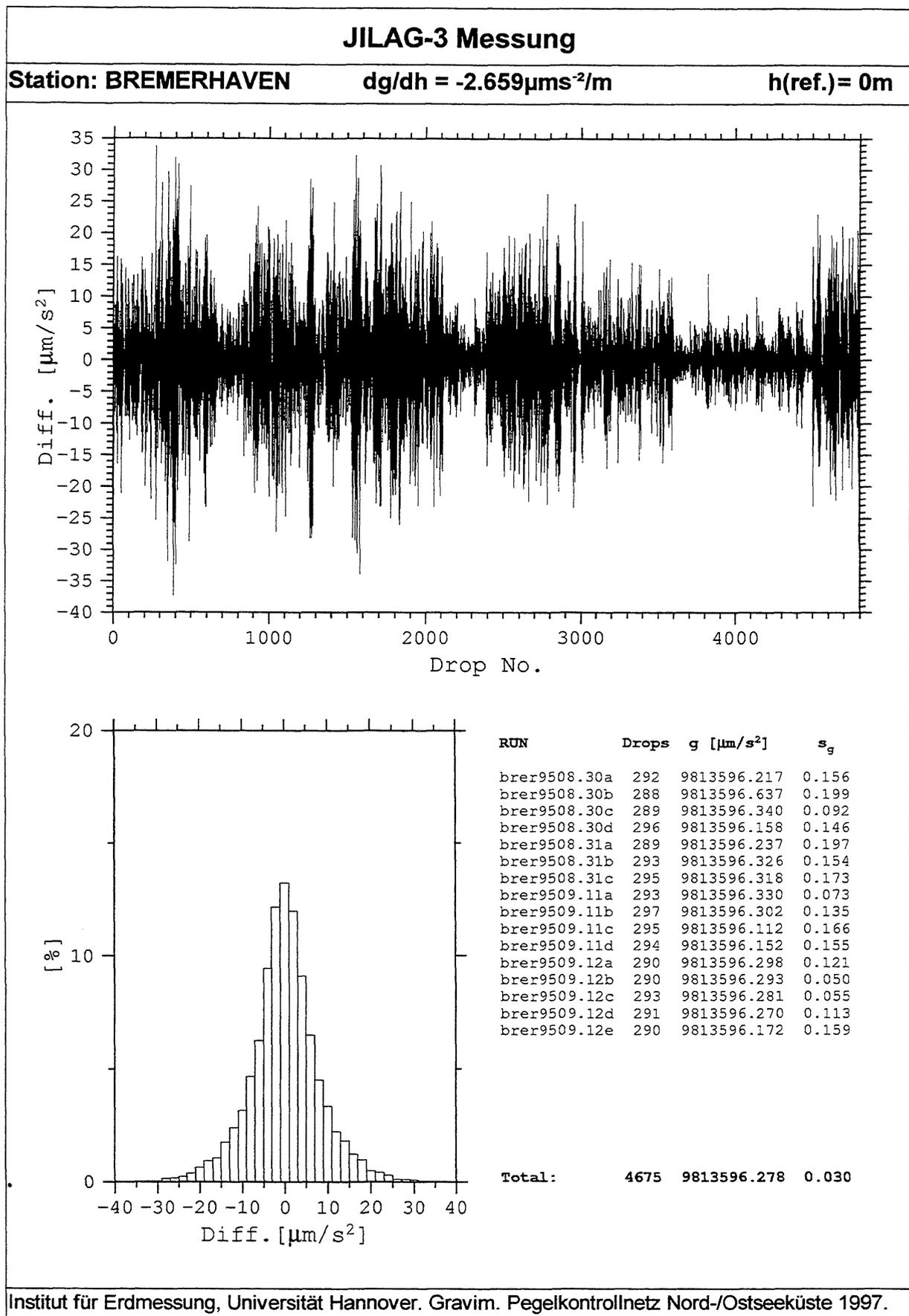
Ansprechpartner:

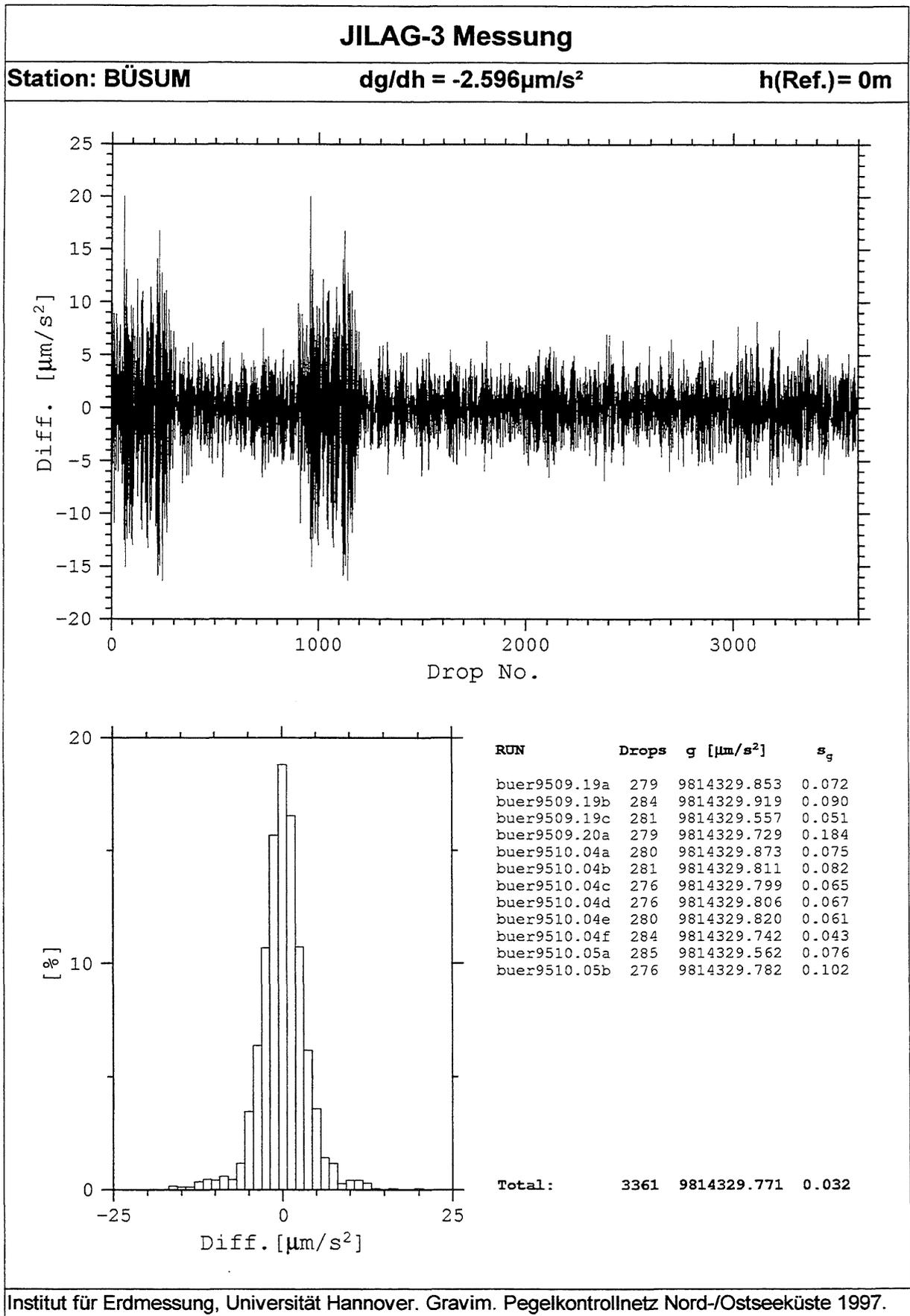
Hochschule Wismar Fachhochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung, Phillip-Müller-Str. 18, 23966 Wismar
Herr Bräutigam (Technologiebeauftragter),
Tel. 03841/753201

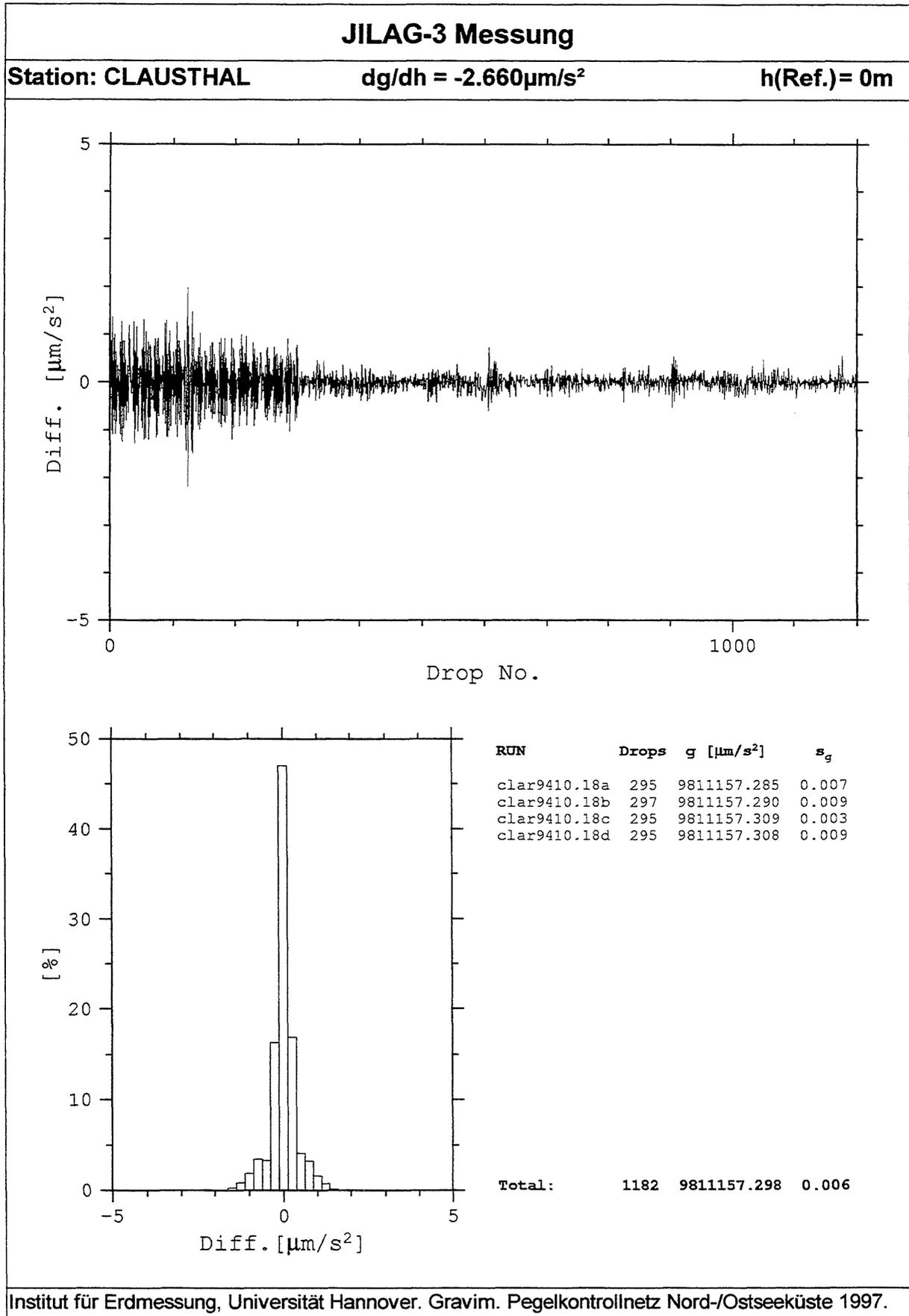
Detailskizze:

Anhang B:

JILAG-3 Messungen





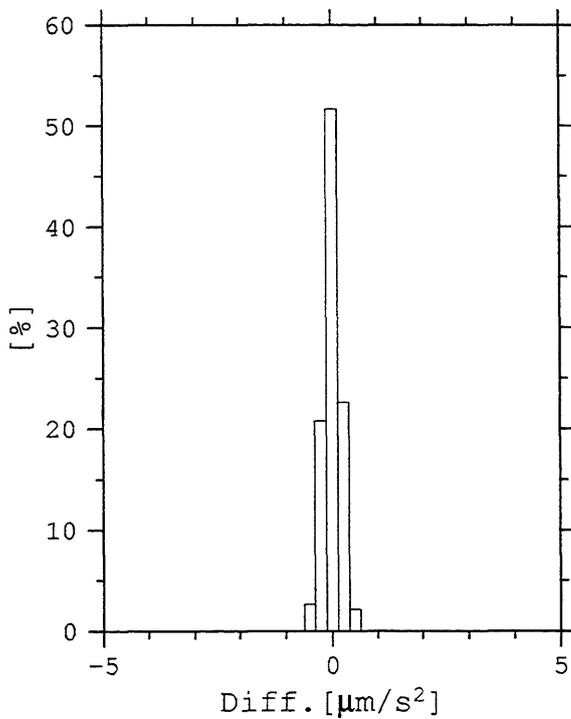
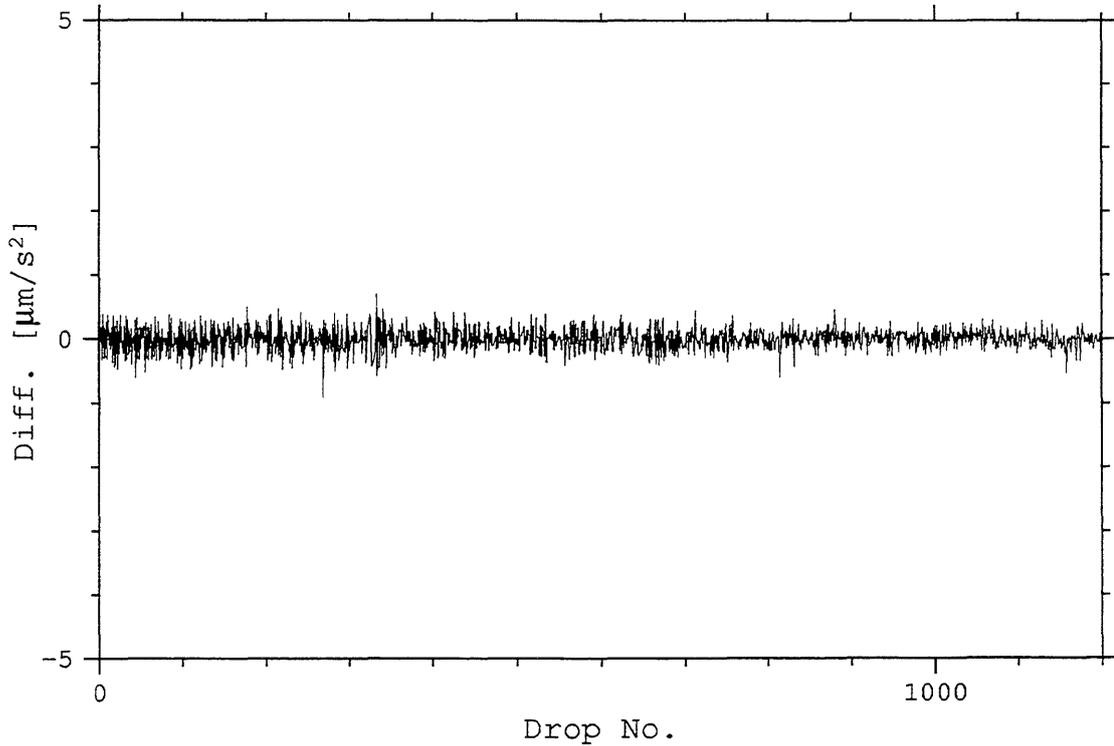


JILAG-3 Messung

Station: CLAUSTHAL

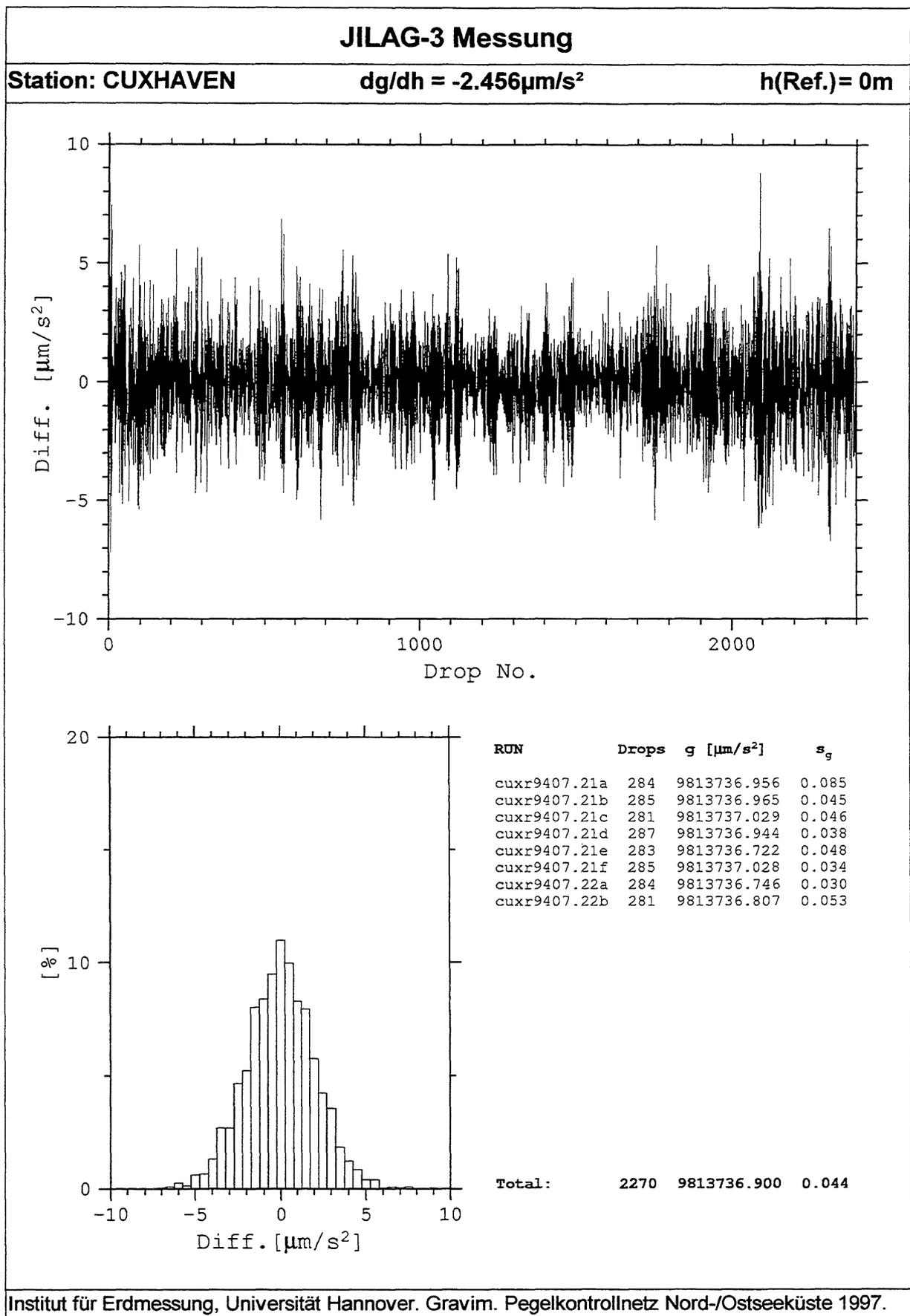
dg/dh = -2.660 $\mu\text{m}/\text{s}^2$

h(Ref.) = 0m



RUN	Drops	g [$\mu\text{m}/\text{s}^2$]	s_g
clar9707.08a	293	9811157.291	0.008
clar9707.08b	290	9811157.329	0.005
clar9707.08b	295	9811157.312	0.008
clar9707.08b	296	9811157.317	0.010

Total: 1174 9811157.312 0.008

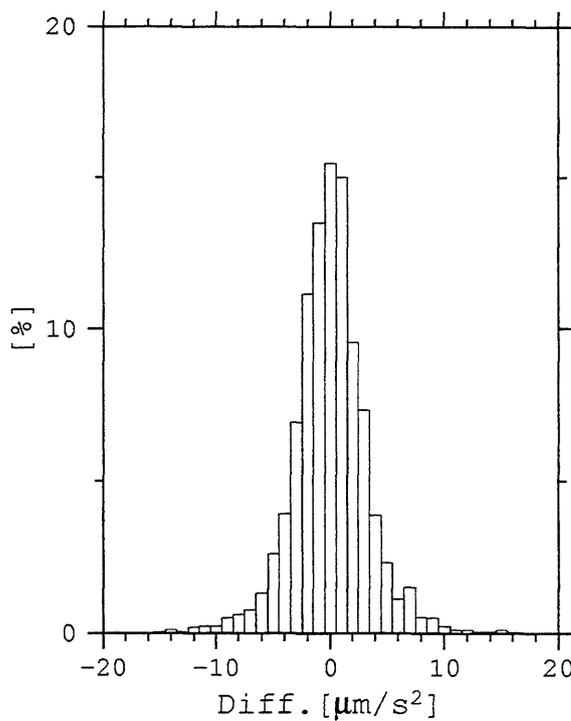
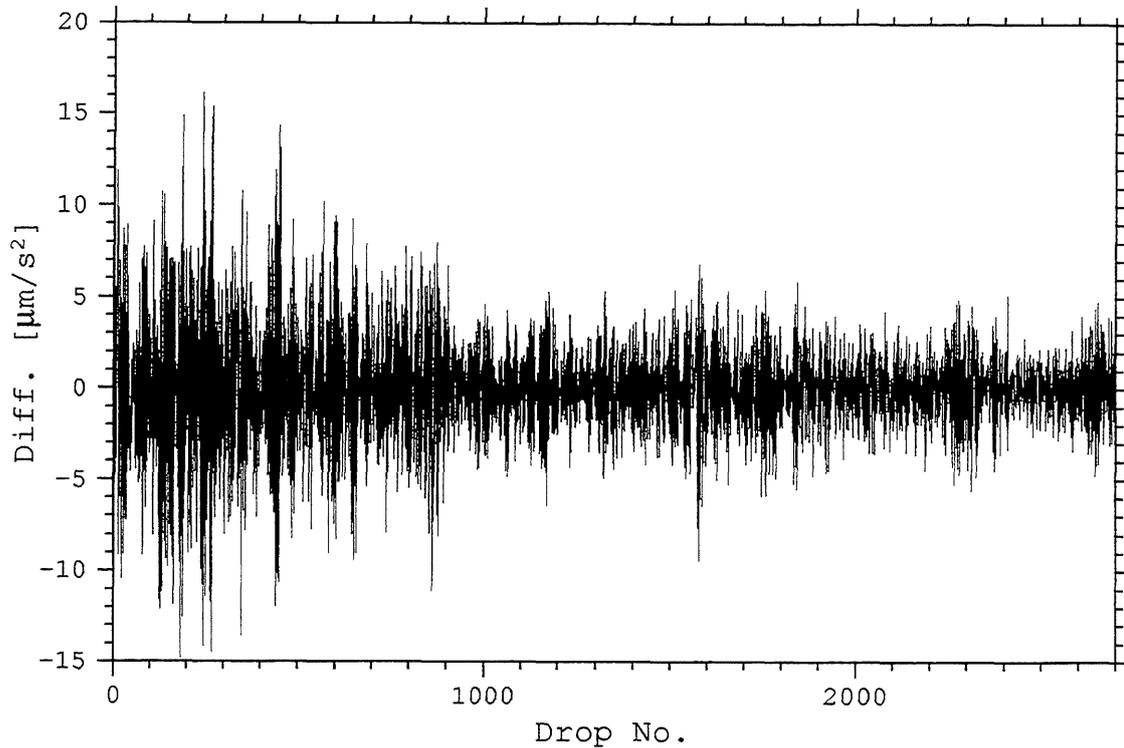


JILAG-3 Messung

Station: CUXHAVEN

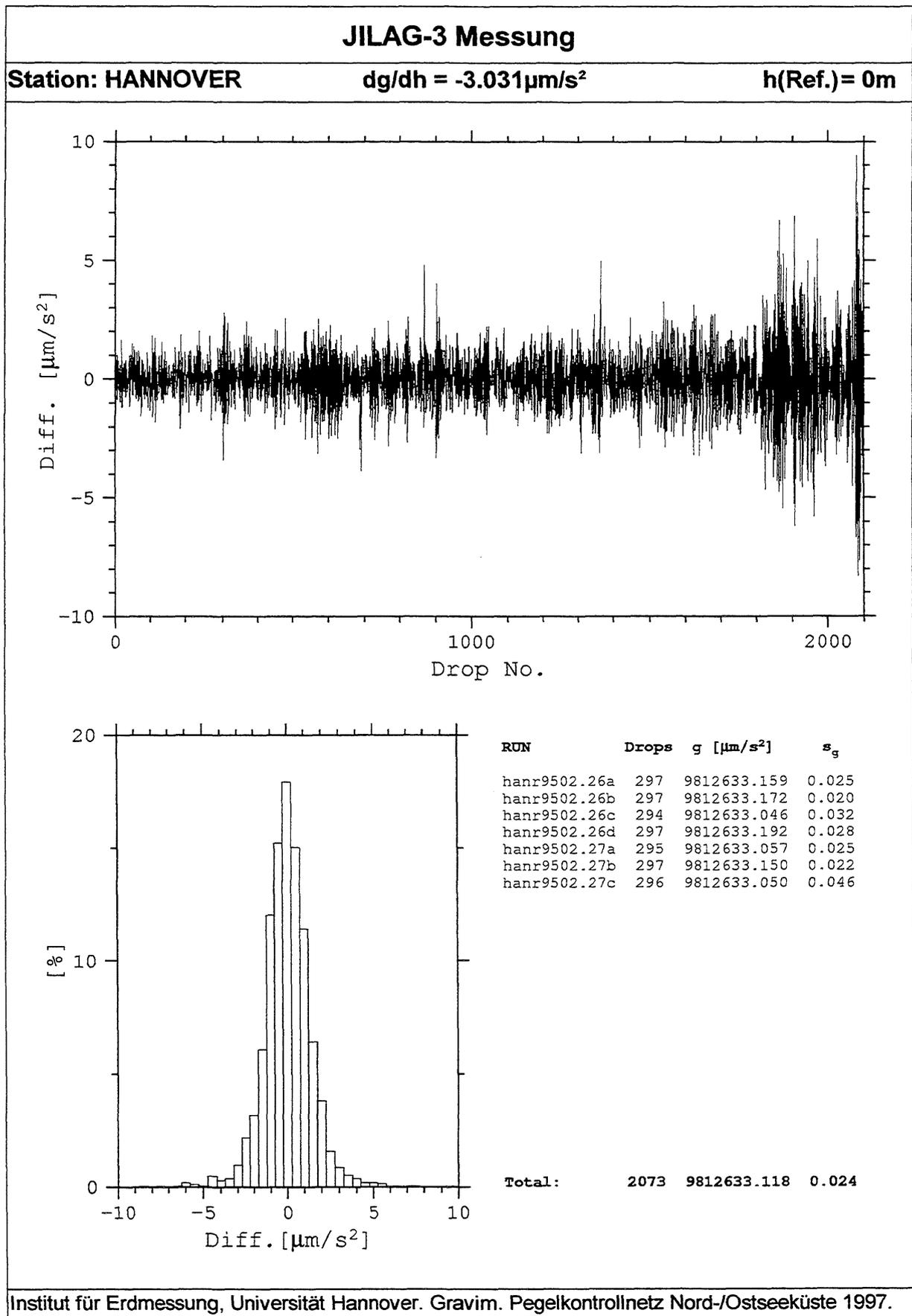
dg/dh = -2.456 $\mu\text{m}/\text{s}^2$

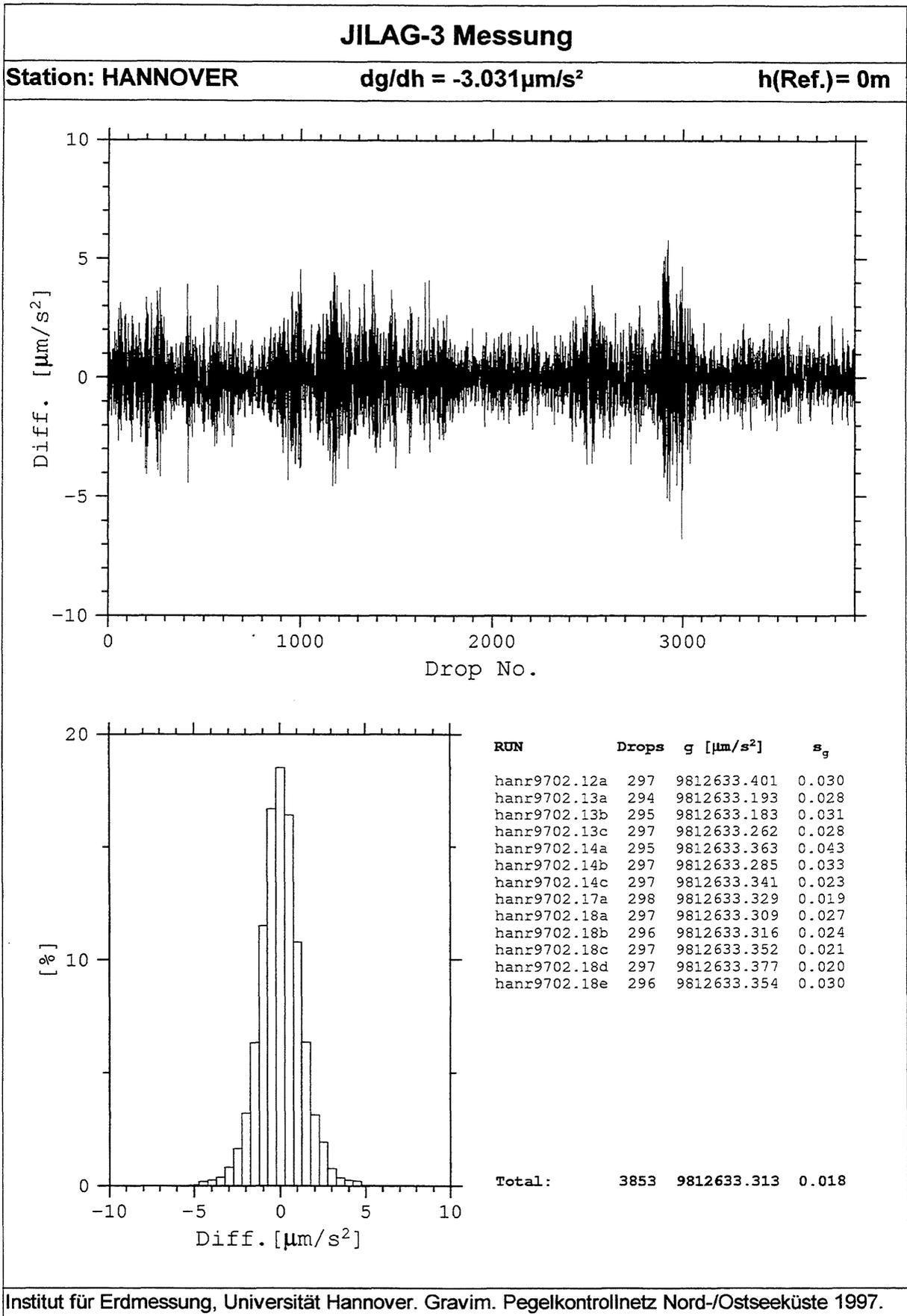
h(Ref.)= 0m

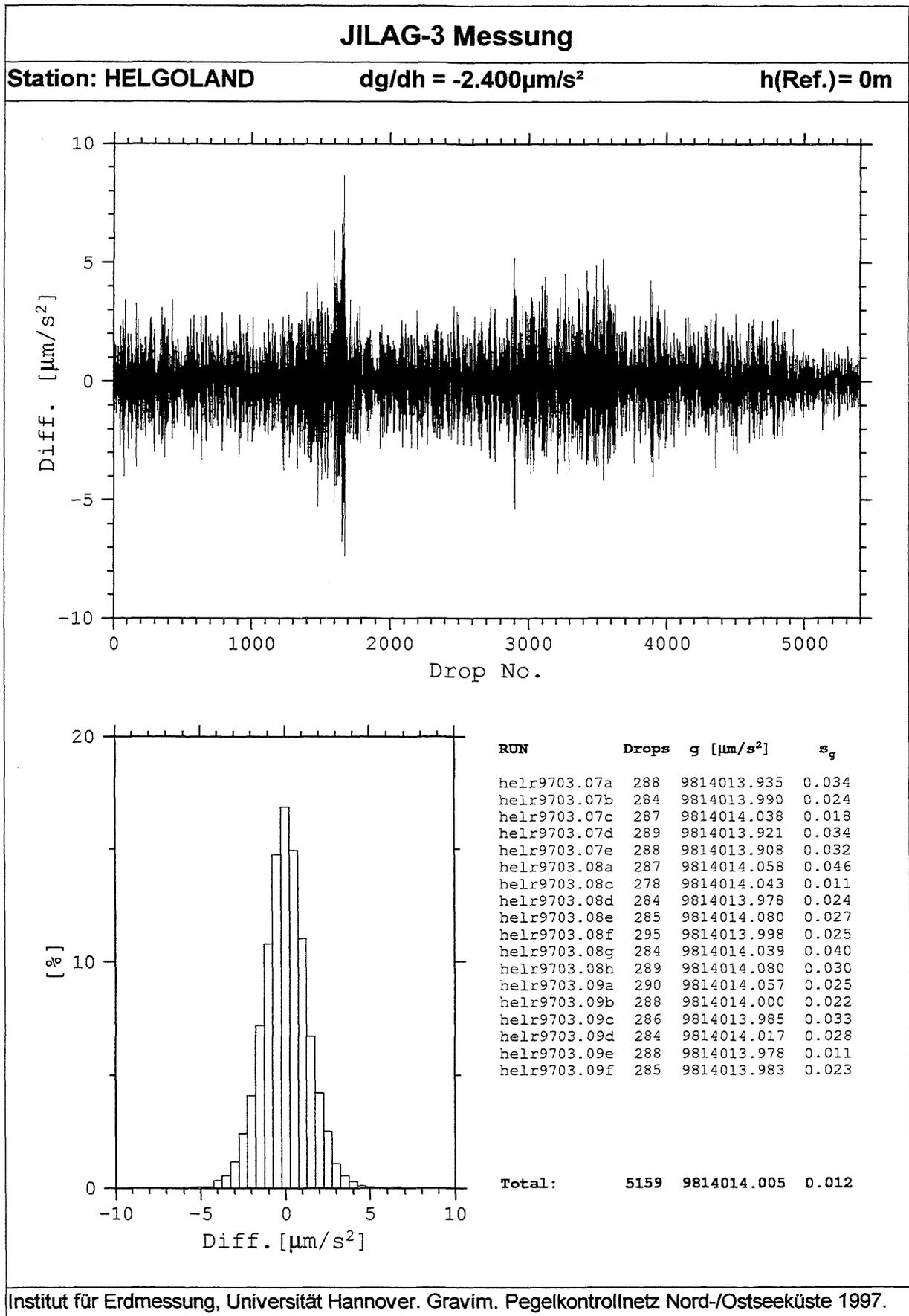


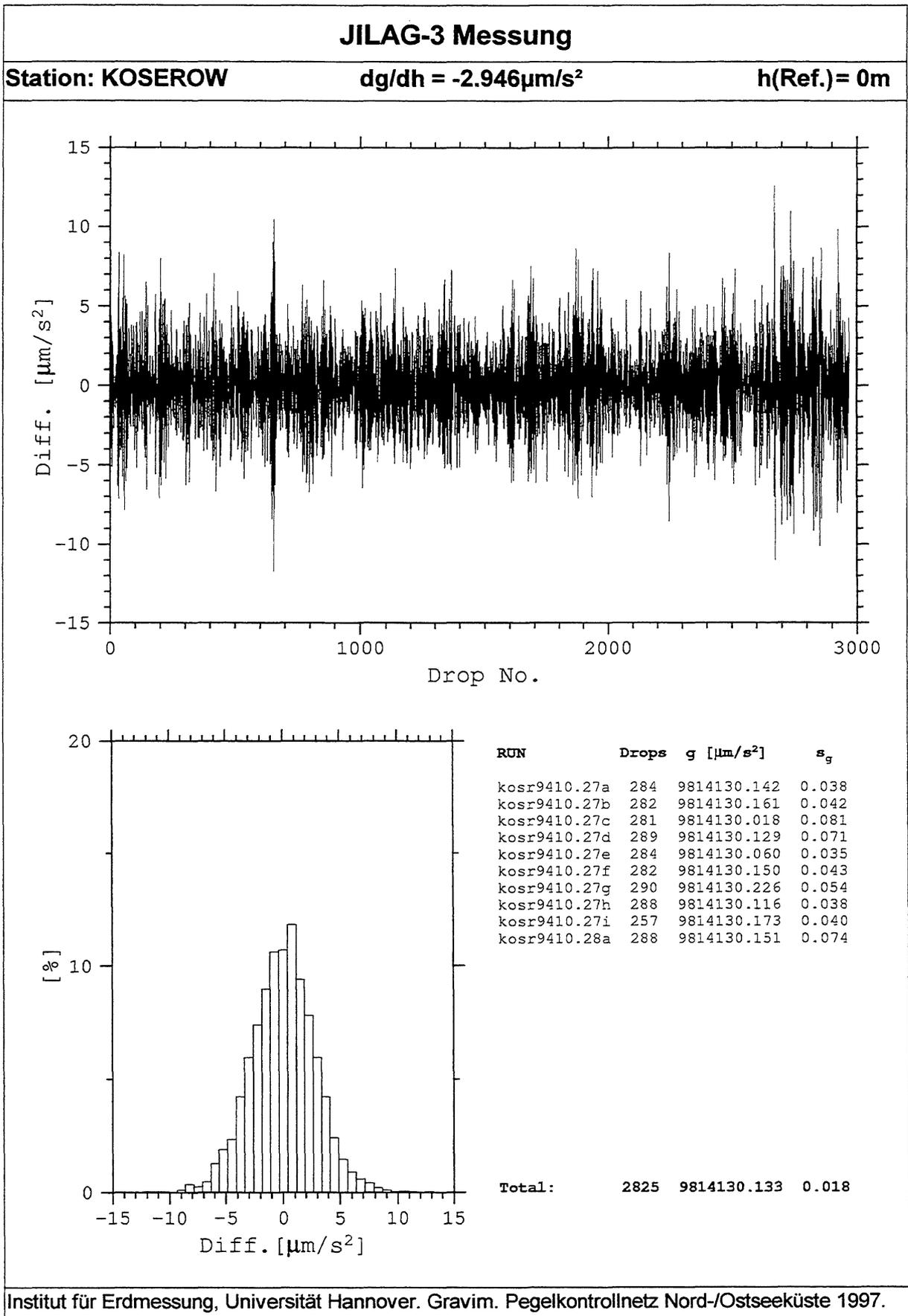
RUN	Drops	g [$\mu\text{m}/\text{s}^2$]	s_g
cuxr9706.09a	285	9813736.690	0.159
cuxr9706.09a	289	9813736.727	0.104
cuxr9706.09a	290	9813736.801	0.086
cuxr9706.10a	288	9813736.768	0.058
cuxr9706.10a	290	9813736.740	0.046
cuxr9706.10a	289	9813736.657	0.056
cuxr9706.10b	292	9813736.771	0.053
cuxr9706.10b	288	9813736.725	0.055
cuxr9706.10b	289	9813736.771	0.035

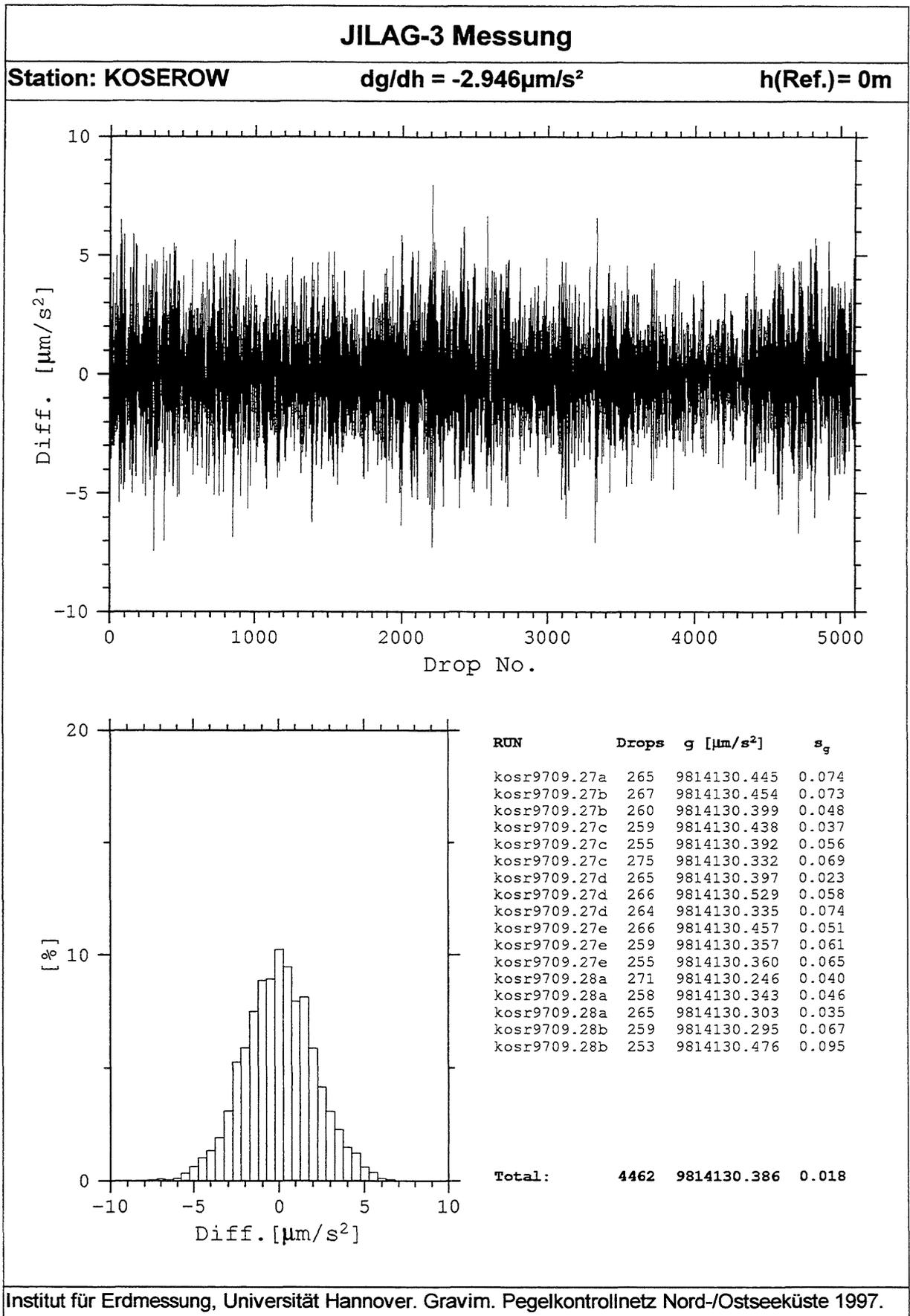
Total: 2600 9813736.739 0.015

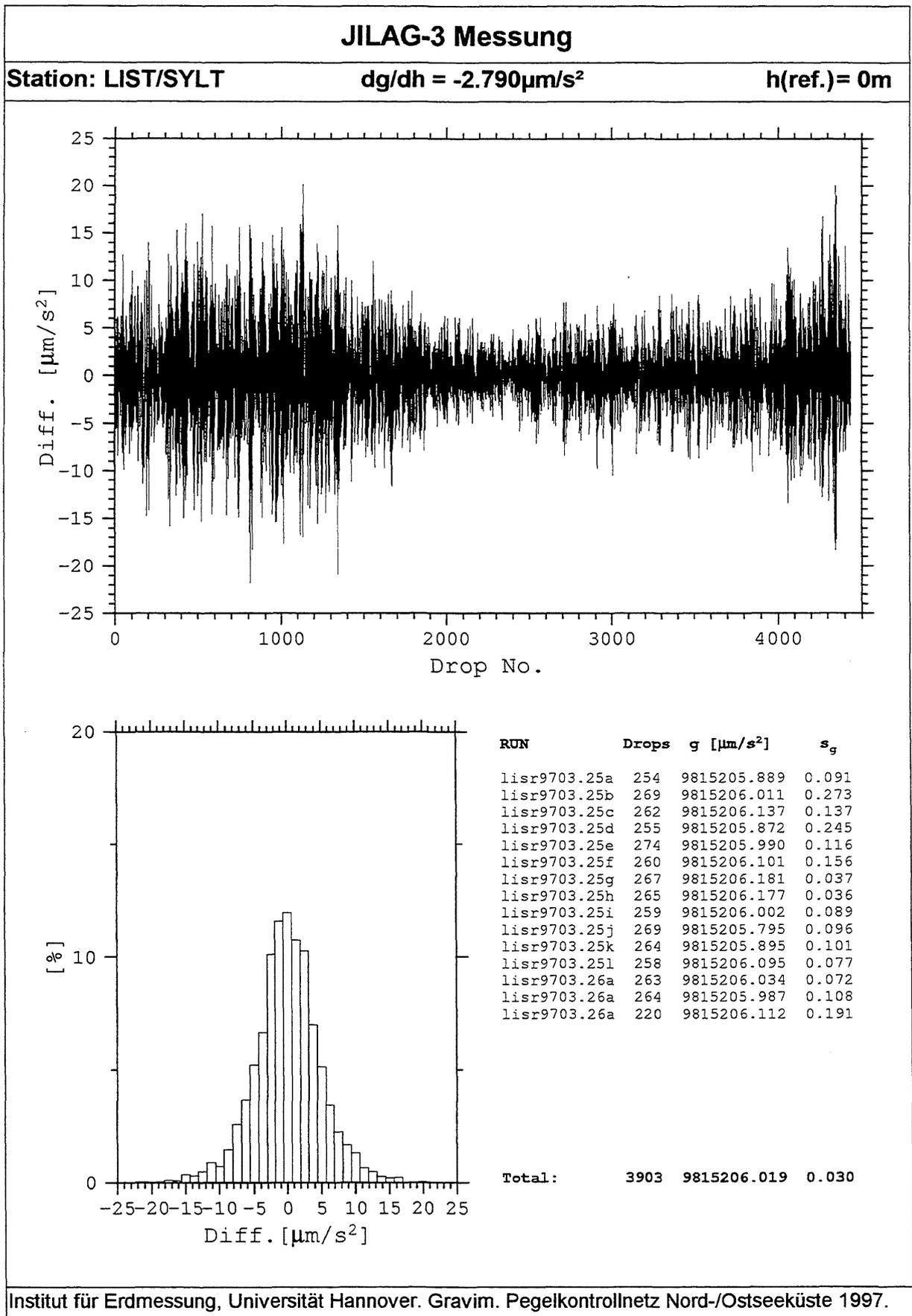


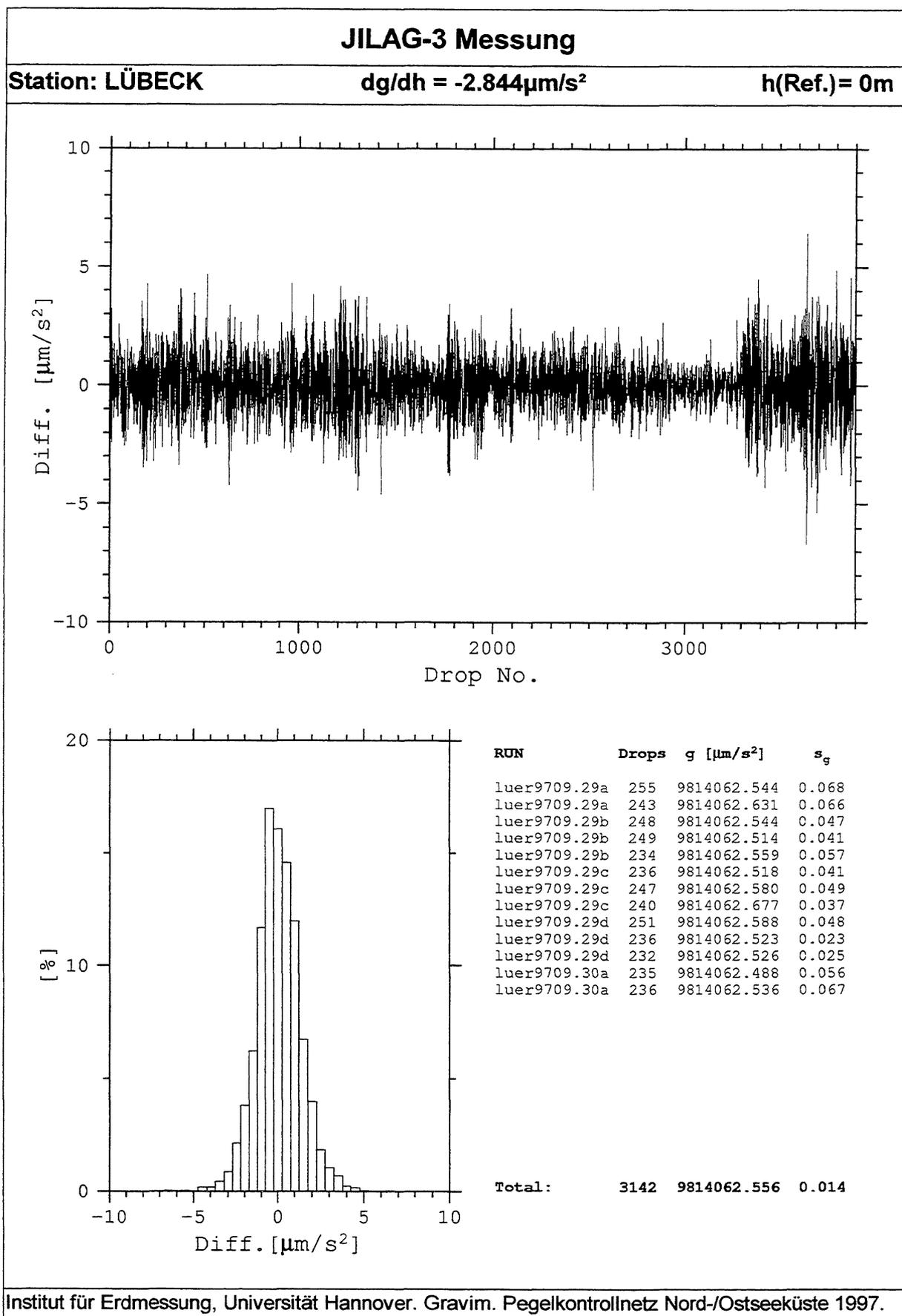


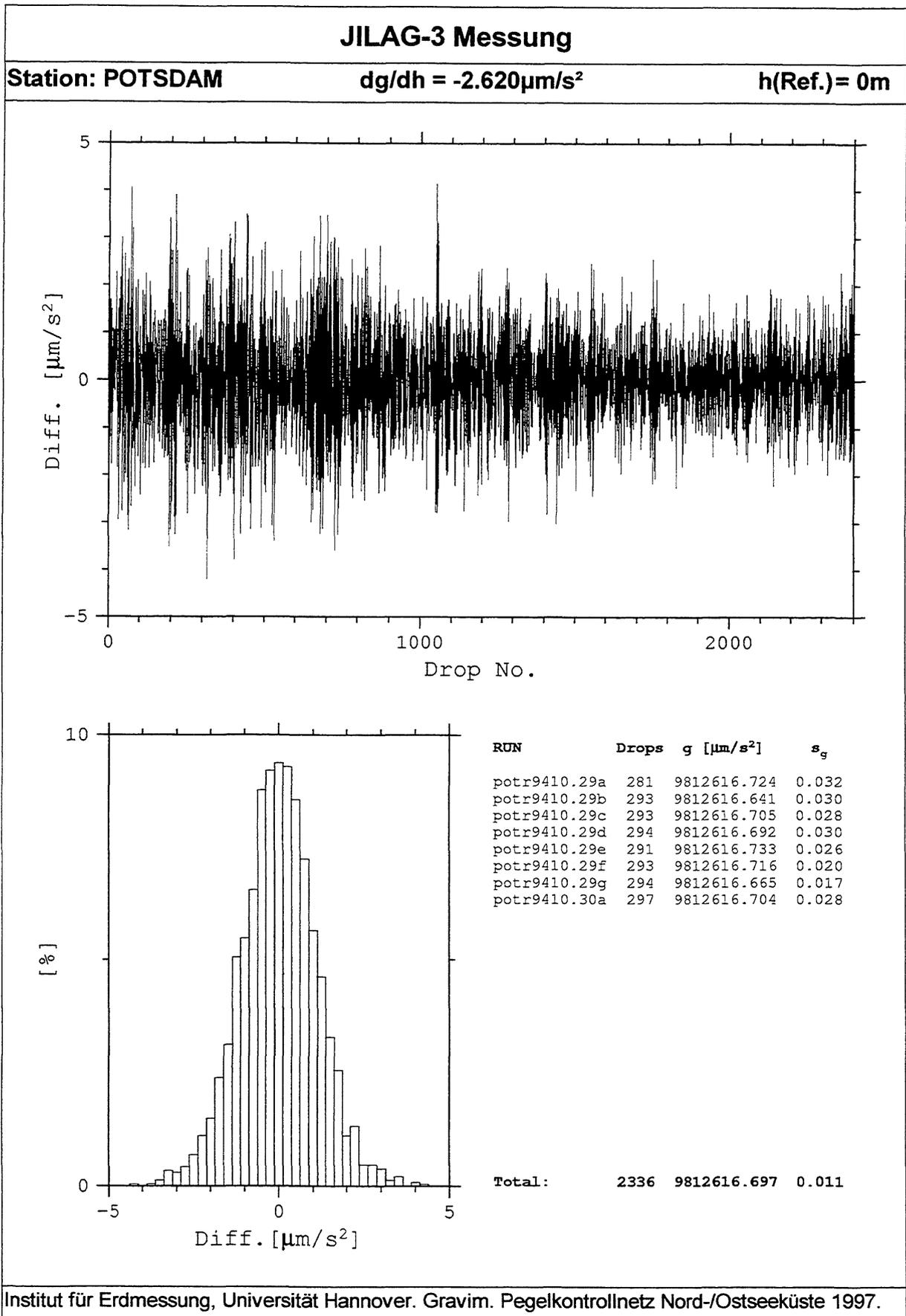


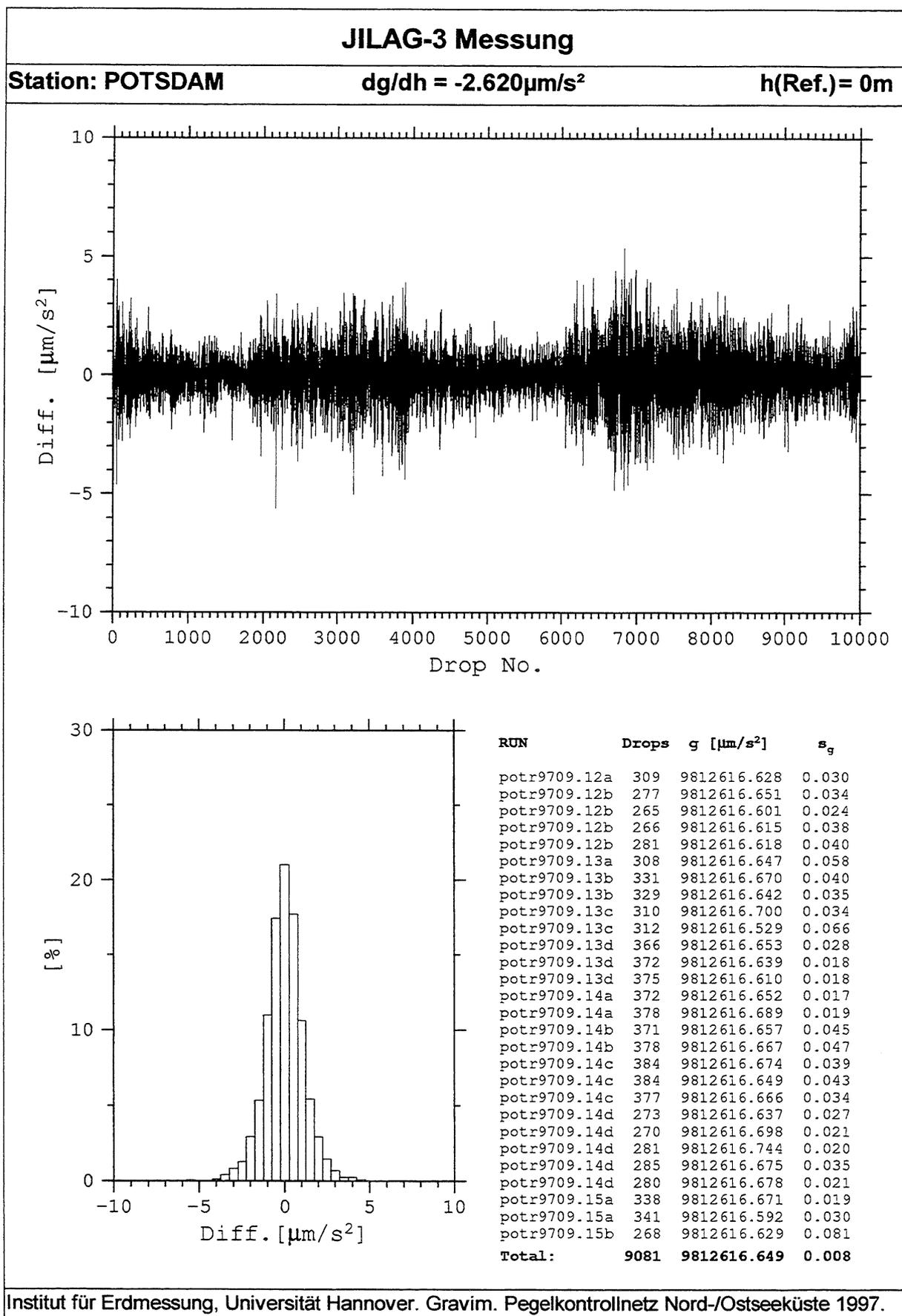










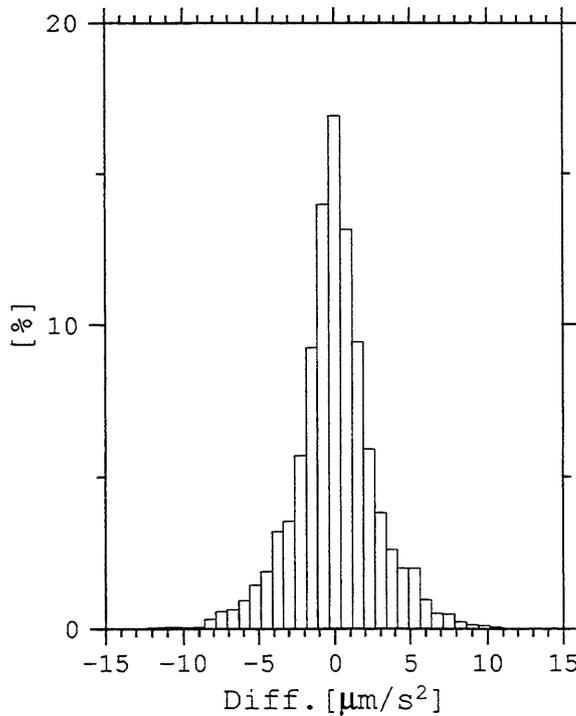
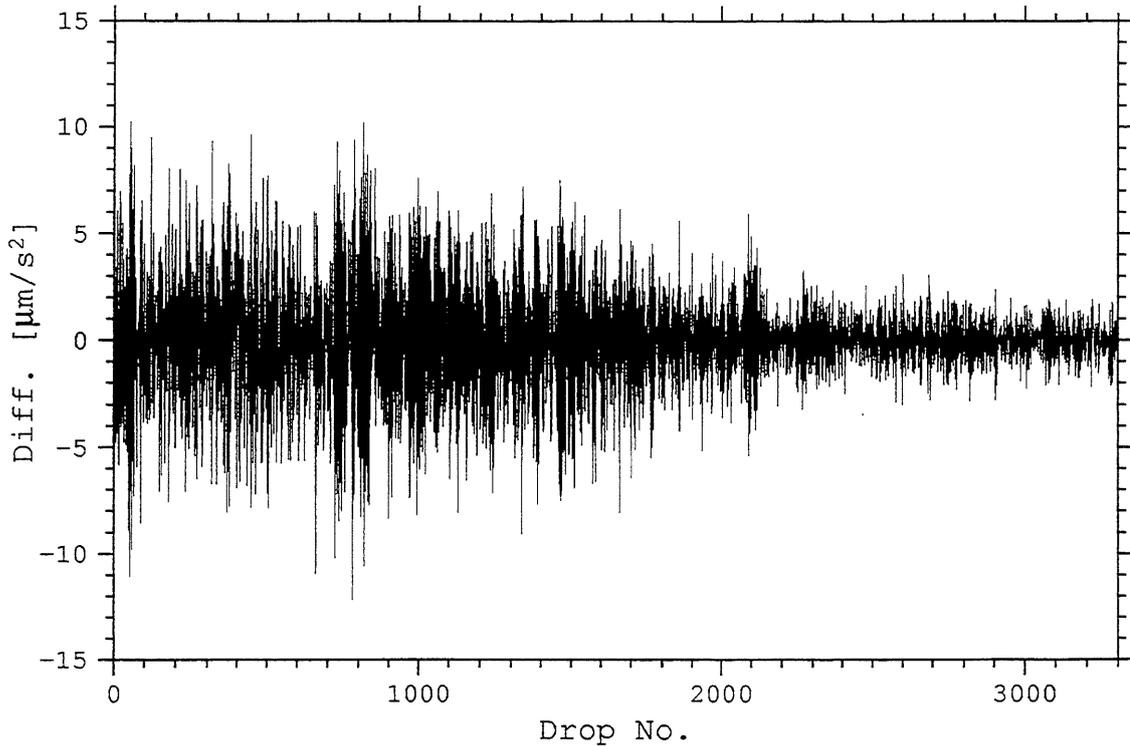


JILAG-3 Messung

Station: ROSTOCK

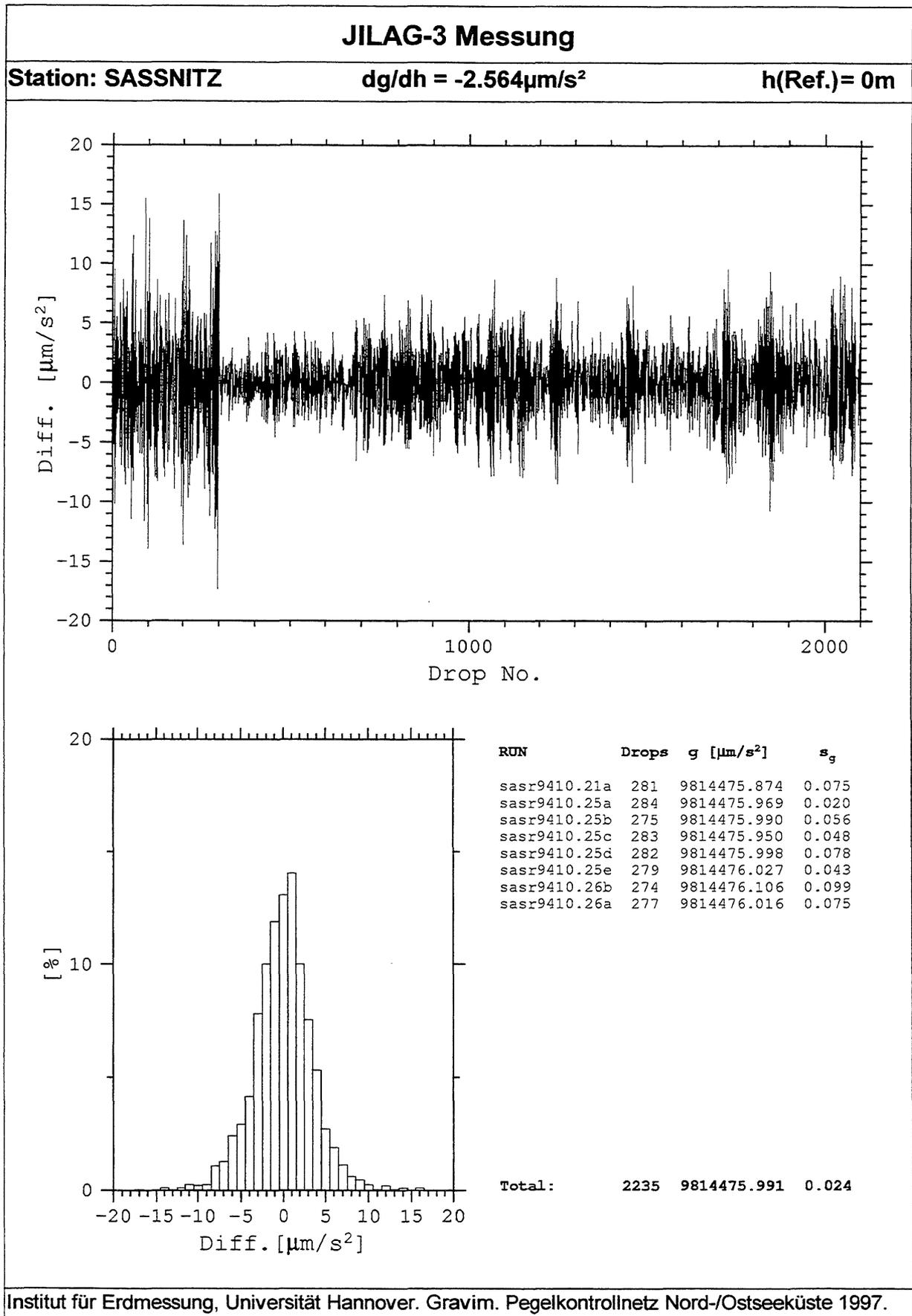
$dg/dh = -2.766 \mu\text{m/s}^2$

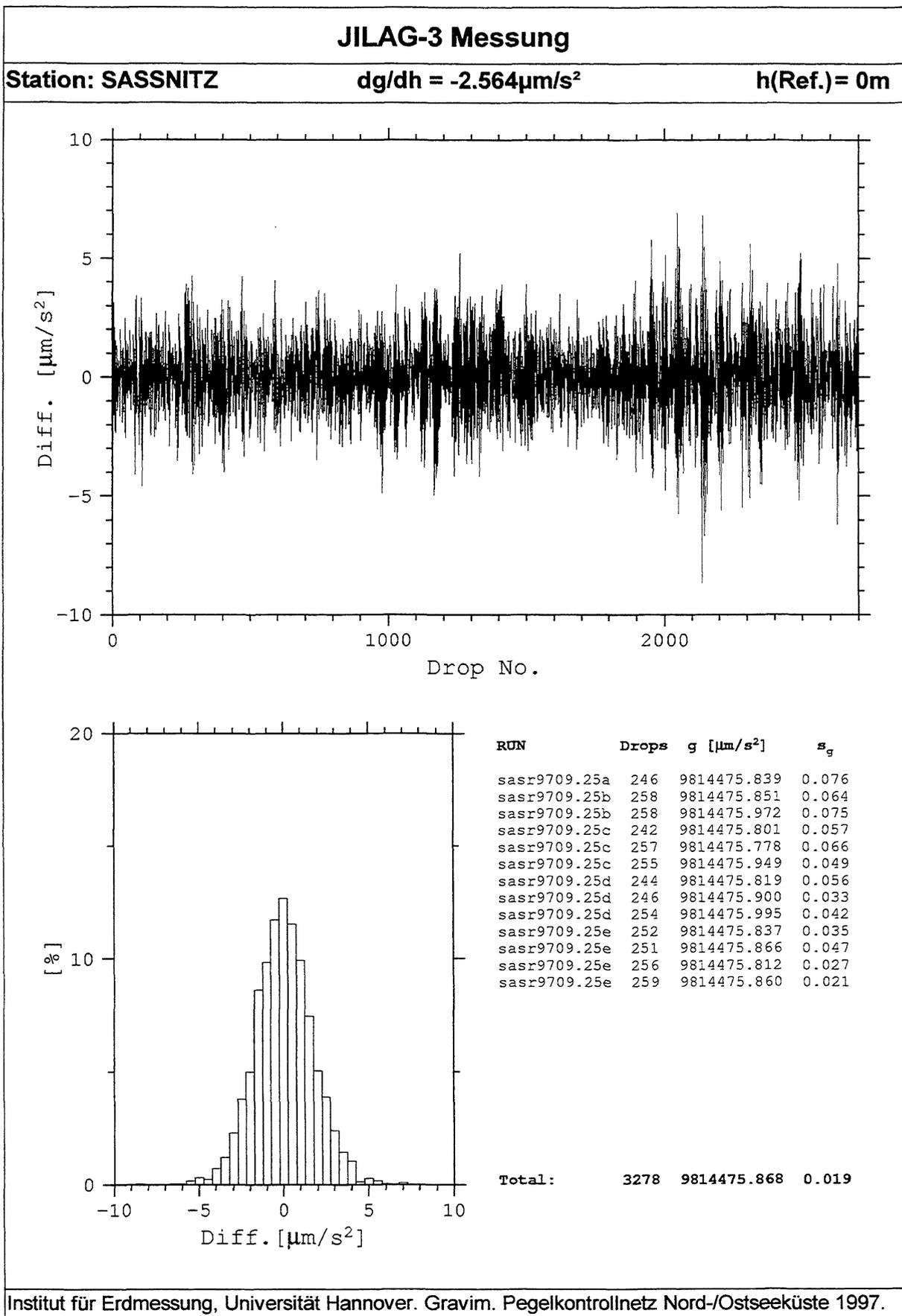
$h(\text{Ref.}) = 0\text{m}$

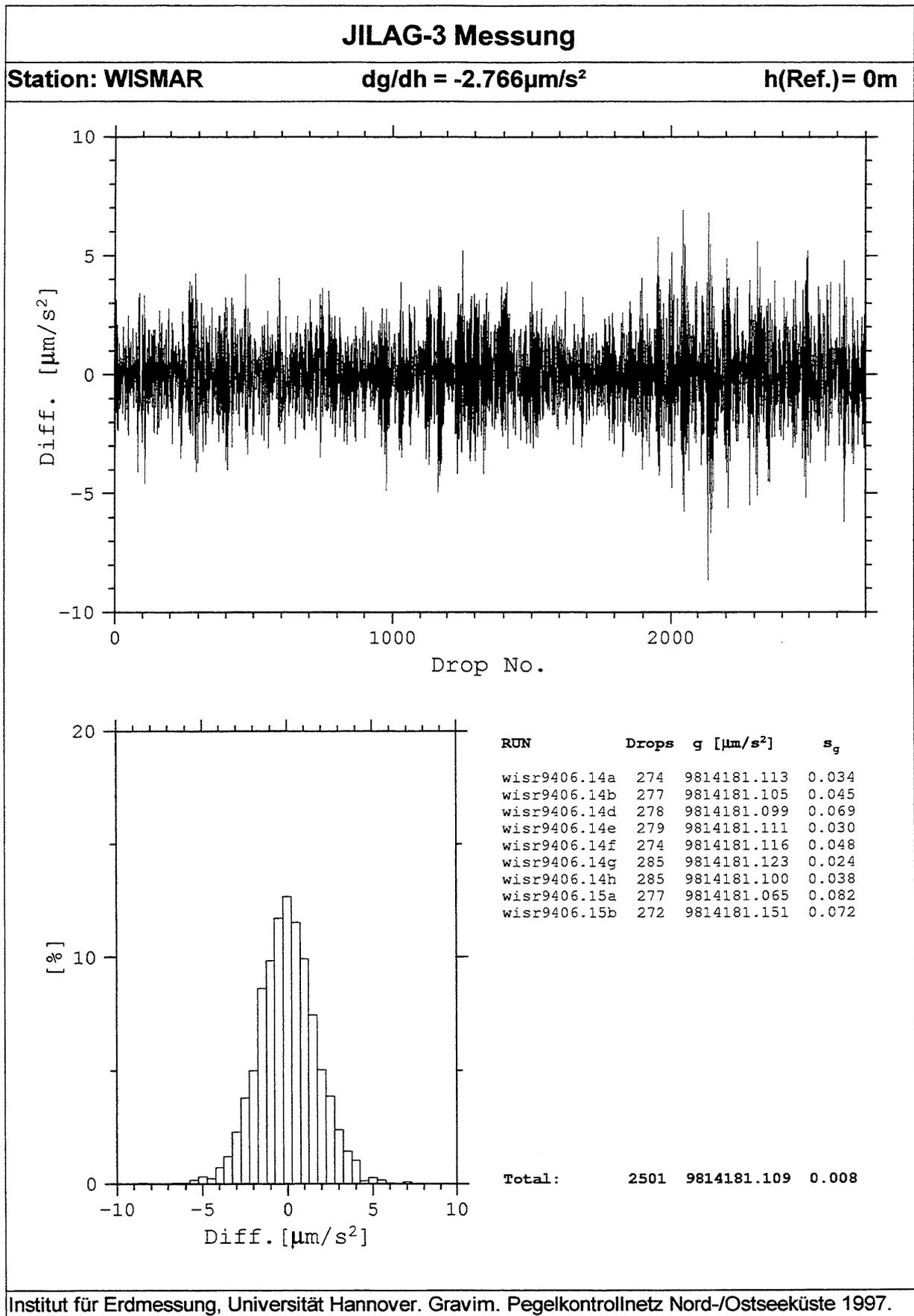


RUN	Drops	g [$\mu\text{m/s}^2$]	s_g
rosr9411.01a	284	9814288.173	0.100
rosr9411.01b	279	9814288.206	0.107
rosr9411.01c	288	9814288.063	0.138
rosr9411.02a	289	9814288.190	0.071
rosr9411.02b	278	9814288.068	0.072
rosr9411.02c	283	9814288.111	0.072
rosr9411.02d	283	9814288.140	0.051
rosr9411.02e	282	9814288.173	0.046
rosr9411.02f	286	9814288.171	0.028
rosr9411.02g	281	9814288.094	0.020
rosr9411.02g	285	9814288.127	0.022

Total: 3118 9814288.138 0.015







Anhang C:

Gezeitenparameter

Die Gezeitenparameter wurden aus einem weltweitem Gitter synthetischer Gezeitenparameter von TIMMEN und WENZEL (1994) interpoliert. Die Tabellen enthalten die Wellengruppen nach Cartwright-Taylor-Edden (CTE) mit den zugehörigen Amplitudenfaktoren und Phasenverschiebungen. Für Hannover und Helgoland sind gemessene Parameter angegeben.

BREMERHAVEN			11	
1	1	-1.0000	.0000	MOS0
2	128	-1.1860	.0527	MF
129	193	-1.1538	-.1630	Q1
194	241	-1.1495	.0525	O1
242	254	-1.1473	.2389	P1
255	333	-1.1332	.1722	K1
334	398	-1.1686	1.6108	N2
399	441	-1.1750	1.1155	M2
442	447	-1.1821	.9327	S2
448	488	-1.1705	.7231	K2
489	505	-1.0688	.0000	M3

BUESUM			11	
1	1	-1.0000	.0000	MOS0
2	128	-1.1867	.0523	MF
129	193	-1.1548	-.1844	Q1
194	241	-1.1495	.0320	O1
242	254	-1.1471	.2523	P1
255	333	-1.1331	.1792	K1
334	398	-1.1622	1.3666	N2
399	441	-1.1663	.9230	M2
442	447	-1.1798	1.1512	S2
448	488	-1.1655	.9473	K2
489	505	-1.0688	.0000	M3

CLAUSTHAL			11	
1	1	-1.0000	0.0000	MOS0
2	128	-1.150	0.0000	LANG
129	193	-1.1511	-0.158	Q1
194	241	-1.1488	0.079	O1
242	254	-1.1478	0.200	P1
255	333	-1.1335	0.145	K1
334	398	-1.1729	1.778	N2
399	441	-1.1830	1.397	M2
442	447	-1.1835	0.580	S2
448	488	-1.1770	0.408	K2
489	505	-1.0690	0.000	M3

CUXHAVEN			11	
1	1	-1.0000	.0000	MOS0
2	128	-1.1864	.0524	MF
129	193	-1.1544	-.1763	Q1
194	241	-1.1495	.0397	O1
242	254	-1.1471	.2471	P1
255	333	-1.1331	.1763	K1
334	398	-1.1646	1.4581	N2
399	441	-1.1696	.9905	M2
442	447	-1.1807	1.0677	S2
448	488	-1.1674	.8622	K2
489	505	-1.0688	.0000	M3

HANNOVER			17	
1	1	-1.0000	0.0000	MOSO
2	128	-1.1640	0.0000	LANG
129	193	-1.1512	-0.2134	Q1
194	219	-1.1616	0.0738	O1
220	241	-1.1516	-1.3057	M1
242	251	-1.1576	0.4142	P1
252	254	-1.0640	-24.3138	S1
255	274	-1.1497	0.3050	K1
275	296	-1.1642	0.5090	J1
297	333	-1.1890	1.4196	OO1
334	374	-1.1808	2.6899	2N2
375	398	-1.1837	2.6594	N2
399	424	-1.1958	1.7202	m ²
425	441	-1.1549	2.2119	L2
442	447	-1.2036	0.9549	S2
448	488	-1.2066	0.6994	K2
489	505	-1.0638	-1.1306	m ³

HELGOLAND			14	G079F
1	1	-1.0000	0.0000	MOSO
2	128	-1.1868	0.0572	LANG
129	193	-1.1356	0.1284	Q1
194	219	-1.1509	0.1268	O1
220	241	-1.1388	-0.9242	M1
242	274	-1.1372	-0.0329	K1
275	296	-1.1722	-0.2122	J1
297	333	-1.1799	0.8327	OO1
334	374	-1.1678	4.8579	2N2
375	398	-1.1803	2.5493	N2
399	424	-1.1949	1.6184	m ²
425	441	-1.1596	0.9905	L2
442	488	-1.1912	0.1380	S2
489	505	-1.0838	0.4619	M3

HELGOLAND			14	G709F
1	1	-1.0000	0.0000	MOSO
2	128	-1.1868	0.0572	LANG
129	193	-1.1391	-0.3183	Q1
194	219	-1.1516	0.1157	O1
220	241	-1.1646	-0.1237	M1
242	274	-1.1454	0.2324	K1
275	296	-1.1696	-0.6416	J1
297	333	-1.1684	-0.3596	OO1
334	374	-1.1872	3.5848	2N2
375	398	-1.1842	2.4058	N2
399	424	-1.1976	1.6696	m ²
425	441	-1.1793	-0.4503	L2
442	488	-1.1906	0.1893	S2
489	505	-1.0584	-0.1848	M3

KOSEROW			11	
1	1	-1.0000	.0000	MOS0
2	128	-1.1786	-.0690	MF
129	193	-1.1491	-.1028	Q1
194	241	-1.1485	.1305	O1
242	254	-1.1482	.1628	P1
255	333	-1.1337	.1015	K1
334	398	-1.1720	1.6237	N2
399	441	-1.1811	1.3372	M2
442	447	-1.1820	.4388	S2
448	488	-1.1758	.2660	K2
489	505	-1.0688	.0000	M3

LIST			11	
1	1	1.0000	0.0000	MOS0
2	128	1.1908	0.0112	MF
129	193	1.1561	-0.2660	Q1
194	241	1.1496	0.0042	O1
242	251	1.1474	0.2882	P1
252	333	1.1334	0.2018	K1
334	398	1.1522	1.1942	N2
399	441	1.1551	1.0823	M2
442	447	1.1778	1.4535	S2
448	488	1.1599	1.2291	K2
489	505	1.0686	0.0000	M3

LUEBECK			11	
1	1	-1.0000	.0000	MOS0
2	128	-1.1826	-.0208	MF
129	193	-1.1509	-.1515	Q1
194	241	-1.1487	.0992	O1
242	254	-1.1481	.2039	P1
255	333	-1.1339	.1380	K1
334	398	-1.1685	1.7477	N2
399	441	-1.1775	1.4314	M2
442	447	-1.1826	.7343	S2
448	488	-1.1742	.5471	K2
489	505	-1.0688	.0000	M3

POTSDAM			11	
1	1	-1.0000	.0000	MOS0
2	128	-1.1793	-.0224	MF
129	193	-1.1500	-.1221	Q1
194	241	-1.1488	.1065	O1
242	254	-1.1480	.1688	P1
255	333	-1.1336	.1115	K1
334	398	-1.1748	1.6992	N2
399	441	-1.1843	1.3650	M2
442	447	-1.1827	.4032	S2
448	488	-1.1778	.2562	K2
489	505	-1.0690	.0000	M3

ROSTOCK			11	
1	1	-1.0000	.0000	MOS0
2	128	-1.1806	-.0551	MF
129	193	-1.1498	-.1336	Q1
194	241	-1.1486	.1180	O1
242	254	-1.1483	.1793	P1
255	333	-1.1339	.1142	K1
334	398	-1.1700	1.7771	N2
399	441	-1.1797	1.5228	M2
442	447	-1.1832	.6272	S2
448	488	-1.1765	.4591	K2
489	505	-1.0688	.0000	M3

SASSNITZ			11	
1	1	-1.0000	.0000	MOS0
2	128	-1.1791	-.0642	MF
129	193	-1.1492	-.1068	Q1
194	241	-1.1485	.1301	O1
242	254	-1.1482	.1672	P1
255	333	-1.1338	.1059	K1
334	398	-1.1719	1.6430	N2
399	441	-1.1810	1.3645	M2
442	447	-1.1824	.4639	S2
448	488	-1.1761	.2861	K2
489	505	-1.0688	.0000	M3

WISMAR			11	
1	1	-1.0000	.0000	MOS0
2	128	-1.1810	-.0432	MF
129	193	-1.1500	-.1360	Q1
194	241	-1.1486	.1134	O1
242	254	-1.1482	.1848	P1
255	333	-1.1339	.1206	K1
334	398	-1.1702	1.7623	N2
399	441	-1.1796	1.4892	M2
442	447	-1.1831	.6295	S2
448	488	-1.1761	.4570	K2
489	505	-1.0688	.0000	M3