

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIII
Vorwort zur dritten Auflage	XV
Vorwort zur zweiten Auflage	XVII
Zusammenfassung	XIX
Abstract	XXI

I Die Untersuchung der Schwereänderungen und ihrer Ursachen **1**

1 Einleitung **3**

2 Untersuchungsgebiet **5**

2.1 Übersicht: Die Niederrheinische Bucht 5

2.2 Erftsprung 7

2.3 Forschungszentrum Jülich 10

3 Meßmethoden **13**

3.1 Gravimetrie 13

3.1.1 Theoretische Grundlagen 13

3.1.2 Meßinstrument: Das LCR-Gravimeter G-1029 16

3.1.3 Korrektur der Erdzeitenwirkung (ETERNA) 19

3.1.4 Korrektur des Einflusses des Luftdruckes 20

3.1.5 Temperatureinfluß 22

3.1.6 Spindelkalibration 24

3.1.7 Bestimmung des Minimums der Neigungsempfindlichkeit 34

3.2	Geoelektrik	37
3.2.1	Theoretische Grundlagen	37
3.2.2	Untergrund-Charakterisierung anhand des Widerstandes	40
3.2.3	Spezielle Elektrodenanordnungen	43
3.2.4	Observationsfehler ε_{obs}	49
3.2.5	Meßinstrument: Die 4Light-Geoelektrik-Apparatur	50
4	Feldmessungen	53
4.1	Gravimetrie	53
4.1.1	Gravimetrische Feldmessungen	53
4.1.2	Einlaufverhalten des Gravimeters	55
4.1.3	Ablauf einer Stationsmessung	57
4.1.4	Zeitliche Schwere- und Höhenänderungen in der Literatur	58
4.1.5	Zeitliche Änderung der Schweredifferenzen am Erftsprung	60
4.1.6	Zeitliche Höhenänderungen am Erftsprung	69
4.1.7	Zeitliche Änderung der Schweredifferenzen im FZ Jülich	76
4.1.8	Zeitliche Höhenänderungen im FZ Jülich	81
4.2	Geoelektrik	85
4.2.1	Auswahl der Geoelektrik-Standorte	85
4.2.2	Vergleichende Wiederholungsmessung	111
4.2.3	Die eigentlichen Messungen der Widerstands-Zeitreihen	139
4.2.4	Verhältnis der Widerstände beiderseits des Erftsprunges	153
5	Ergebnisse	157
5.1	Bodenfeuchte und Modelle	157
5.1.1	Einflußprinzip von Bodenwasser auf die Schwere	157
5.1.2	Niederschlag	159
5.1.3	Grundwasser	164
5.1.4	Weitere Überlegungen	167
5.2	Korrelation zwischen Bodenfeuchte und Schwereänderung	171
5.3	Fazit	176
5.4	Ausblick	178
	Danksagung	183
	Literaturverzeichnis	185
	A Stollenwerk-Gutachten	199
	B PREDICT (ETERNA) Parameter	201
	C Vegetation am Geoelektrik-Standort Frechen	203

II Informationen zur Handhabung des Gravimeters 205

6	Das La Coste & Romberg-Gravimeter G-1029	209
6.1	Thermostatisierung	209
6.2	Aufbau des Gravimeters	209
6.3	Neigung des Gravimeters/Minimum der Neigungsempfindlichkeit	211
6.4	Einstellung des Zählrades	212
6.5	Umrechnung der Zähler-Ablesung in Milli-Gal	212
6.6	Kapazitäres Abgriffs- (CPI) und <i>Feedback</i> -System	214
6.6.1	Kapazitärer Horizontalpendel-Balkenpositions-Anzeiger	214
6.6.2	<i>Feedback</i> -System	214
7	Feldmessungen	217
7.1	Erdgezeiten-Berechnung (ETERNA)	218
7.2	Ablauf einer Stationsmessung	218
7.3	Spindelkalibration	222
7.4	Bestimmung des Minimums der Neigungsempfindlichkeit	238

III Stationsbeschreibungen zu den gravimetrischen und geoelektrischen Messungen 243

8	Gravimetrie	245
8.1	Erftsprung	245
8.1.1	E1	246
8.1.2	E2	248
8.1.3	E3	250
8.1.4	E4	252
8.1.5	E5 - Referenzmeßpunkt Schweremeßnetz Erftsprung	254
8.1.6	E6	256
8.1.7	E7	258
8.1.8	E8	262
8.1.9	E9	264
8.1.10	E10	267
8.1.11	E11	267
8.2	Jülich	267
8.2.1	J1 - Referenzmeßpunkt Schweremeßnetz FZ Jülich	268
8.2.2	J2	269
8.2.3	J3	270
8.2.4	J4	271
8.2.5	J5	273
8.2.6	J6	274
8.2.7	J7	275

8.3 Bonn	276
9 Geoelektrik	277
9.1 Frechen	277
9.2 Gymnich	285
Backmatter	291
Bibliographie	293
Über den Autor	303
Index	306
Karten	309

Abbildungsverzeichnis

2.1	Niederrheinische Bucht, Schweremeßnetze.	6
2.2	Geologisches Profil durch die NRB.	7
2.3	Lage der Schweremeßpunkte und Geoelektrik-Standorte.	9
2.4	Lage der Schweremeßpunkte in Jülich.	11
3.1	Aufbau des LCR-Gravimeters.	16
3.2	Meßprinzip des LCR-Gravimeters.	17
3.3	Das verwendete LCR-Gravimeter G-1029.	17
3.4	Feedback-Prinzip.	19
3.5	Vergleich von Luftdruck- und Schweredifferenz.	21
3.6	Temperaturvariation am Referenzpunkt.	23
3.7	Temperatur an E5 und Schweredifferenz (E8–E1).	23
3.8	Residuen bei Spindelkalibration ohne periodische Anteile.	27
3.9	Residuen bei Spindelkalibration mit periodischen Anteilen.	27
3.10	Variation des Schwereniveaus g_0	29
3.11	Zeitliche Änderung des linearen FB-Faktors \hat{f}_1 1993 – 2001.	30
3.12	Zeitliche Änderung des linearen FB-Faktors \hat{f}_1 ab 1.8.2000	31
3.13	Zeitliche Änderung des quadratischen FB-Faktors \hat{f}_2 1993 – 2001.	31
3.14	Zeitliche Änderung des quadratischen FB-Faktors \hat{f}_2 ab 1.8.2000.	32
3.15	Zeitliche Änderung der Driftrate während Spindelkalibration.	32
3.16	Wurzel der Kovarianz bei Spindelkalibration.	34
3.17	Bestimmung des Minimums der Neigungsempfindlichkeit.	35
3.18	Zeitliche Änderung des Minimums der Neigungsempfindlichkeit.	36
3.19	Vierpunkt-Elektroden-Anordnung.	40
3.20	Prinzip der Widerstandsmessung mit einer Vierpunkt-Anordnung.	41
3.21	Prinzip einer Pseudosektion.	42
3.22	Elektrodenanordnungen mit ihrem jeweiligen Konfigurationsfaktor.	44
3.23	Sensitivitätssektionen von α -, β - und γ -WENNER Anordnung.	45
3.24	NDIC-Kurven für $L = 5$ m, 15 m, 45 m.	47
3.25	KEYSER-WENNER-Anordnung.	49
4.1	Meßstrategie Sternmessung.	54
4.2	Beginn des Einlaufvorganges des Gravimeters nach Arretierung.	55
4.3	Einlaufverhalten des Gravimeters und Erdzeiten.	56

4.4	Einlaufverhalten und Drift des Gravimeters.	57
4.5	Zeitliche Variation der Schweredifferenzen am Erftsprung I.	62
4.6	Zeitliche Variation der Schweredifferenzen am Erftsprung II.	63
4.7	Vgl. zw. Schweredifferenzen und angepaßtem Jahresgang.	66
4.8	Anpassungen saisonaler Änderungen an die Schwerdifferenzen.	66
4.9	Trigonometrische Anteile der Schweredifferenzenvariationen.	67
4.10	Anteil der linearen zeitlichen Änderung der Schweredifferenzen.	67
4.11	Zeitliche Veränderung der Höhenmeßwerte am Erftsprung.	69
4.12	Höhenänderungen am Erftsprung bezogen auf das Jahr 2001.	70
4.13	Höhenänderungen von E1.	71
4.14	Richtung der Schwerewirkung vor und nach Absinken.	72
4.15	Zeitlicher Verlauf der Schweredifferenzen von J1 bis J4 zu J7.	77
4.16	Zeitlicher Verlauf der Schweredifferenzen von J5 und J6 zu J7.	78
4.17	Schweremeßwerte (<i>J4 – J7</i>) mit Anpassungen.	79
4.18	Anpassung saisonaler Änderungen an die Meßwerte in Jülich.	80
4.19	Trigonometrische Anteile der Anpassung an Meßwerte in Jülich.	80
4.20	Lineare Anteile der Anpassungen an Meßwerte in Jülich.	81
4.21	Höhenänderungen in Jülich.	82
4.22	Aus Höhen- abgeleitete Schwereänderungen, Jülich ab 1990.	83
4.23	Aus Höhen- abgeleitete Schwereänderungen, Jülich ab 1998.	84
4.24	Lageskizze des Geoelektrik-Standortes Frechen.	86
4.25	Lageskizze des Geoelektrik-Standortes Gymnich.	87
4.26	Sonnenweg westlich des Geoelektrik-Standortes Gymnich.	87
4.27	Tiefensondierung Frechen, 29.11.2000, Profil in NW-SE-Richtung.	88
4.28	Tiefensondierung Frechen, 29.11.00, NW-SE, Äquivalenzmodelle.	89
4.29	Tiefensondierung Frechen, 29.11.2000, NE-SW-Profil.	90
4.30	Frechen, Profil-Kartierung, 29.11.2000, SE-NW.	92
4.31	Frechen, Profil-Kartierung, 29.11.2000, NE-SW.	93
4.32	Pseudosektion Frechen, SE-NW, 29.11.2000.	95
4.33	Inversion Frechen, SE-NW, 29.11.2000 (DC2dInvRes).	96
4.34	Pseudosektion Frechen, SW-NE, 29.11.2000.	97
4.35	Laterale Ausdehnung der Aufschüttung.	98
4.36	Tiefensondierung Gymnich, 20.12.2000, Nord-Süd-Profil.	99
4.37	Tiefensondierung Gymnich, 20.12.2000, Ost-West-Profil.	100
4.38	Tiefensondierung Gymnich, 20.12.00, E-W, Äquivalenzmodelle.	101
4.39	Gymnich 20.12.2000, α -WENNER-Kartierung in NS-Richtung.	103
4.40	Gymnich 20.12.2000, α -WENNER-Kartierung in EW-Richtung.	103
4.41	Pseudosektion Gymnich, Nord-Süd-Profil, 20.12.2000.	106
4.42	Inversion Gymnich, Nord-Süd-Profil, 20.12.2000.	107
4.43	Pseudosektion Gymnich, Ost-West-Profil, 20.12.2000.	108
4.44	Inversion Gymnich, Ost-West-Profil, 20.12.2000.	109
4.45	Tiefensondierung Frechen, 01.08.2001, NW-SE-Profil.	112
4.46	Tiefensondierung Frechen, 01.08.01, NW-SE, Äquivalenzmodelle.	114

4.47	Tiefensonndierung Frechen, 01.08.2001, NE-SW-Profil.	114
4.48	Tiefensonndierung Frechen, 01.08.01, NE-SW, Äquivalenzmodelle.	115
4.49	Wiederholung der NW-SE-Profil-Kartierung in Frechen, 01.08.01.	116
4.50	Pseudosektion Frechen, SE-NW-Profil, 01.08.2001.	117
4.51	Inversion Frechen, SE-NW-Profil, 01.08.2001.	118
4.52	Inversion Frechen, SE-NW-Profil, 01.08.2001, geschichtet.	119
4.53	Wiederholung der NE-SW-Profil-Kartierung in Frechen, 01.08.01.	120
4.54	Pseudosektion Frechen, SW-NE-Profil, 01.08.2001.	121
4.55	Inversion Frechen, SW-NE-Profil, 01.08.2001.	122
4.56	Inversion Frechen, SW-NE-Profil, 01.08.2001, geschichtet.	123
4.57	Vergleich der NW-SE-Profil-Kartierungen in Frechen.	126
4.58	Vergleich der Pseudosektionen und Inversionen, Frechen, NW-SE.	127
4.59	Vergleich der NE-SW-Profil-Kartierungen in Frechen.	128
4.60	Vergleich der Pseudosektionen und Inversionen, Frechen, SW-NE.	129
4.61	Geoelektrik-Standort Frechen.	131
4.62	Tiefensonndierung Gymnich, 01.08.2001, West-Ost-Profil.	132
4.63	Tiefensonndierung Gymnich, 01.08.01, W-E, Äquivalenzmodelle.	132
4.64	Wiederholung der E-W-Profil-Kartierung in Gymnich, 22.08.2001.	134
4.65	Pseudosektion Gymnich, Ost-West-Profil, 22.08.2001.	135
4.66	Pseudosektion Gymnich, EW, 22.08.2001, alternative Darstellung.	136
4.67	Gymnich, EW, Vgl. Inversion für geschichteten Untergrund.	137
4.68	Inversion Gymnich, EW, 22.08.2001, alle Konfigurationen.	138
4.69	Vergleich der E-W-Profil-Kartierungen in Gymnich.	139
4.70	Anordnung der Sonden an den Geoelektrik-Standorten.	140
4.71	α -, β -, γ -WENNER-Anordnung und 4Light-Geoelektrik-Apparatur.	140
4.72	Zeitlicher Verlauf der Observationsfehler ε_{obs} in Frechen.	141
4.73	Zeitlicher Verlauf der Observationsfehler ε_{obs} in Gymnich.	142
4.74	Zeitlicher Verlauf der Widerstände ρ_a , α -WENNER, Frechen.	143
4.75	Nutzungsart der Aufschüttungsfläche.	145
4.76	Zeitlicher Verlauf der Widerstände ρ_a , β -WENNER, Frechen.	146
4.77	Zeitlicher Verlauf der Widerstände ρ_a , γ -WENNER, Frechen.	146
4.78	Zeitlicher Verlauf des β/γ -Index in Frechen.	148
4.79	Zeitlicher Verlauf der Widerstände ρ_a , α -WENNER, Gymnich.	149
4.80	Bewegung der Trockengrenze am Geoelektrik-Standort Gymnich.	150
4.81	Zeitlicher Verlauf der internen Nullspannung der 4Light.	152
4.82	Widerstandverhältnis Frechen/Gymnich, kürzeste Auslage.	153
4.83	Widerstandverhältnis Frechen/Gymnich, mittlere Auslage.	154
4.84	Widerstandverhältnis Frechen/Gymnich, längste Auslage.	154
5.1	Monatssummen des Niederschlages am Erftsprung.	160
5.2	Vergleich zwischen Schweremesswerten und Niederschlags-Modell.	162
5.3	Verwerfungen des Erftsprungsystems und Grundwassermeßstellen.	164
5.4	Grundwasserstände beiderseits des Erftsprungsystems.	165

5.5	Grundwasserstände der Meßstellen auf der Kölner Scholle.	166
5.6	Schweredifferenz- und GW-Stands-Variationen am Erftsprung.	166
5.7	$\Phi \cdot h$	168
5.8	$\Delta h(\Phi)$ in m.	169
5.9	Δh [m] in Abhängigkeit von ΔS beider Schollen.	170
5.10	α -WENNER, $\frac{a}{2} = 0.83$ m Widerstände und Schweredifferenzen.	172
5.11	α -WENNER, $\frac{a}{2} = 2.5$ m Widerstände und Schweredifferenzen.	172
5.12	α -WENNER, $\frac{a}{2} = 7.5$ m Widerstände und Schweredifferenzen.	173
5.13	Inversion d. Fits zw. Schweredifferenz u. Widerstandsverhältnis.	174
5.14	Wie vorige Abb. ohne $\frac{a}{2} = 0.83$ m.	175
5.15	Schwerewirkungen unterschiedlicher Massen.	180
6.1	Aufbau des LCR-Gravimeters.	210
6.2	CPI.	214
6.3	Analog Electrostatic Nuller.	215
7.1	Beginn des Einlaufvorganges nach längerer Arretierung.	219
7.2	Einlaufverhalten und Gezeiten.	220
7.3	Einlaufverhalten, Drift und Auswirkung abfallender Spannung.	220
7.4	Erdszeiten während der Spindelkalibration am 28.05.2001.	227
7.5	Spindeleinstellung.	228
7.6	Feedback-Spannung.	228
7.7	Näherungsweise Bestimmung der Feedback-Faktoren.	229
7.8	Residuen, zeitlicher Verlauf.	230
7.9	Residuen bzgl. Skalenteilen.	231
7.10	Residuen bei Berücksichtigung periodischer Anteile.	231
7.11	Zeitliche Variation des Meßwertes des Schwereniveaus g_0	232
7.12	Zeitliche Änderung des linearen Feedback-Faktors 1993-2001.	234
7.13	Zeitliche Änderung des linearen Feedback-Faktors ab 1.8.2000.	234
7.14	Zeitl. Änderung des quadratischen Feedback-Faktors 1993-2001.	235
7.15	Zeitl. Änderung des quadratischen Feedback-Faktors ab 1.8.2000.	235
7.16	Zeitliche Änderung der Driftrate während Spindelkalibration.	236
7.17	Wurzel der Kovarianz σ^2 bei Spindelkalibration.	237
7.18	Gravimeter.	238
7.19	Bestimmung des Minimums der Neigungsempfindlichkeit	239
7.20	Minimum der Neigungsempfindlichkeit	240
7.21	Zeitliche Änderung des Minimums der Neigungsempfindlichkeit.	241
8.1	Lageskizze E1.	246
8.2	Schweremeßpunkt E1.	247
8.3	Lageskizze E2.	248
8.4	Schweremeßpunkt E2.	249
8.5	Lageskizze E3.	250

8.6	Schweremeßpunkt E3.	251
8.7	Lageskizze E4.	252
8.8	Schweremeßpunkt E4.	253
8.9	Lageskizze E5.	254
8.10	Schweremeßpunkt E5.	255
8.11	Lageskizze E6.	256
8.12	Schweremeßpunkt E6.	257
8.13	Lageskizze E7.	258
8.14	Schweremeßpunkt E7, Photographien vom 31.03.2001.	260
8.15	E7: Vermarktung, Photographie vom 01.09.2001.	261
8.16	Lageskizze E8.	262
8.17	Schweremeßpunkt E8.	263
8.18	Lageskizze E9.	264
8.19	Schweremeßpunkt E9, Photographien vom 31.03.2001.	265
8.20	E9, Photographie aus KEYSERS (2001).	266
8.21	Schweremeßpunkt J1.	268
8.22	Schweremeßpunkt J2.	269
8.23	Schweremeßpunkt J3.	270
8.24	Lageskizze J4.	271
8.25	Schweremeßpunkt J4.	272
8.26	Schweremeßpunkt J5.	273
8.27	Schweremeßpunkt J6.	274
8.28	Schweremeßpunkt J7.	275
9.1	Lageskizze des Geoelektrik-Meßgebietes Frechen.	277
9.2	Lageskizze des Geoelektrik-Standortes Frechen.	278
9.3	Geoelektrik-Standort Frechen: 31.03.2001.	279
9.4	Geoelektrik-Standort Frechen: 14.08.2001.	280
9.5	Geoelektrik-Standort Frechen: NE-EW.	281
9.6	Geoelektrik-Standort Frechen: SE-NW.	282
9.7	Geoelektrik-Standort Frechen: Anfang des Weges.	283
9.8	Robinien an der Frechener Straße, gegenüber ENSOTEC GmbH.	284
9.9	Geoelektrik-Meßgebiet Gymnich, Lageskizze.	285
9.10	Geoelektrik-Standort Gymnich: Zaun.	286
9.11	Geoelektrik-Standort Gymnich: Weide.	287

Tabellenverzeichnis

3.1	Parameter bei der Spindel-Kalibration.	25
3.2	Spezifische elektrische Widerstände ausgewählter Materialien.	37
3.3	Median-Wirkungstiefe.	47
3.4	Maximale Wirkungstiefe.	48
4.1	Größe möglicher Fehler bei Schweremessungen.	61
4.2	Parameter bei der Anpassung eines saisonalen Schweresignales.	64
4.3	Fit eines saisonalen Signales an Schweredifferenz-Variationen E.	65
4.4	Vergleich berechneter und gemessener Höhendifferenzänderungen.	74
4.5	Vergleich jährlicher Höhendifferenzänderungen.	74
4.6	Vergleich der linearen zeitlichen Änderungen der Schweredifferenzen.	75
4.7	Fit eines saisonalen Signales an Schweredifferenz-Variationen J.	76
4.8	Tiefensondierung Frechen, 29.11.2000, NW-SE.	89
4.9	Tiefensondierung Frechen, 29.11.2000, NE-SW.	91
4.10	Tiefensondierung Gymnich, 20.12.2000, Nord-Süd.	100
4.11	Tiefensondierung Gymnich, 20.12.2000, E-W, Zweischichtfall.	101
4.12	Tiefensondierung Gymnich, 20.12.2000, E-W, Dreischichtfall.	101
4.13	Tiefensondierung Frechen, 01.08.2001, NW-SE-Profil.	112
4.14	Tiefensondierung Frechen, 01.08.2001, NE-SW-Profil.	113
4.15	Tiefensondierung Gymnich, 01.08.2001, E-W-Profil.	133
4.16	Modell für das Vorrücken der Trockengrenze.	151
5.1	Korrelation Widerstandsverhältnis - Schwereänderung.	175
7.1	Parameter bei der Spindel-Kalibration.	223