

# Geodätische Bestimmung von Bodenbewegungen im Bereich des Erftsprungsystems

Barbara Görres, Bernd Sager und James Campbell

## Zusammenfassung

Der in der Niederrheinischen Bucht intensiv betriebene Braunkohleabbau stellt einen der umfangreichsten Eingriffe in die gewachsene Umwelt dar. Neben den in geologischen Zeiträumen ablaufenden tektonischen Bewegungen der Erdoberfläche gehören die durch Grundwasserentzug hervorgerufenen Bodenabsenkungen, die in besonderen Fällen Schäden an Straßen und Gebäuden verursachen, zu den weniger augenfälligen, aber dennoch folgenreichen Auswirkungen auf die Landschaft. Am so genannten Donatussprung, einem südwestlich von Köln gelegenen geologisch besonders aktiven Teil des Erftsprungsystems, sind aus GPS-Messungen Punktbewegungen bis zu 5 mm/Jahr für die Lage und bis zu 20 mm/Jahr für die Höhe ermittelt worden, die im Zusammenhang mit der Betrachtung terrestrischer Messungen, hier insbesondere von Präzisionsnivellierungen, in unmittelbarer Nachbarschaft der Verwerfung ein konsistentes dreidimensionales Verschiebungsbild liefern. Für die hochsignifikanten Bewegungen werden mögliche Modellansätze diskutiert.

## Summary

*The intensive browncoal mining activities occurring since the mid-fifties of the last century in the Lower Rhine Embayment have caused massive landscape changes in these areas. Less obvious but equally dramatic are the effects on the ground surface such as soil movements which are mainly due to groundwater withdrawal. Larger discontinuities in the pattern of motion tend to appear at pre-existing fault lines and are causing sizable damage to buildings and roads. Precision levelling, and in recent years also GPS, are being used to measure these motions and monitor their behaviour with high precision. As a recent example, the measurements in the deformation network on the Donatussprung have yielded displacements of up to 5 mm/yr in horizontal and 20 mm/yr in vertical direction. The highly significant pattern of motion invites several possible interpretations, which are discussed here.*

## 1 Einleitung

Etwa ein Drittel der Landesfläche Nordrhein-Westfalens ist sowohl von bergbaubedingten Bodenbewegungen als auch von rezenten tektonischen Erdkrustenbewegungen betroffen. Hierzu gehört insbesondere auch der südliche Teil der Niederrheinischen Bucht, in dem das GPS-Untersuchungsnetz Donatussprung angelegt wurde. Das Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen (LVRaM NRW) kommt seinem gesetzlichen Auftrag zur Erhaltung des Festpunktfeldes nach, indem durch Wiederholungsmessungen die Bewegungsraten quantifiziert werden, um so-

wohl Lagekoordinaten als auch die Höhen der Festpunkte zu aktualisieren (Fröhlich und Müller 1986, Kremers 1990, Spata et al. 1993, Haupt 1999). Wurden zur Bestimmung der Lagekoordinaten bis vor etwa zehn Jahren hierzu die klassischen terrestrischen Messverfahren der Triangulation und Trilateration durchgeführt, sind diese mittlerweile durch GPS abgelöst.

Die mit den Sümpfungsmaßnahmen des Braunkohleabbaus im Raum zwischen Köln und Aachen nördlich der Eifel einhergehenden Bodenbewegungen werden seit Jahrzehnten messtechnisch erfasst und dokumentiert. Die Bestimmung von Höhenänderungen erfolgt hierzu überwiegend durch Präzisionsnivellierungen, im Wesentlichen die so genannten amtlichen Leitnivellierungen, die im Rheinischen Braunkohlerevier zur Beobachtung von Bergsenkungen seit den 50er Jahren flächendeckend und in regelmäßigen Zeitabständen von durchschnittlich vier Jahren durchgeführt werden (Fröhlich und Müller 1986, Rathsmann 1986, Haupt 1999).

Nachdem lokale Lagedifferenzen im Bereich bewegungsaktiver Störungen seit langem in Abstimmung zwischen Bergbaubetreibern und Katasterverwaltungen im Kataster berücksichtigt wurden, wurde zur Untersuchung der Lagedeformationen mit übergeordnetem Raumbezug das Untersuchungsnetz Donatussprung angelegt, in dem schon nach ersten Analyseberechnungen der Epochen 1979 (terrestrische Messungen des trigonometrischen Netzes 2. und 3. Ordnung im Zuge der TP-Netzerneuerung) und 1992 (erste GPS-Epoche) Lagedeformationen erkennbar wurden (Sager 1995). Es war gelungen, im Nahbereich des Erftsprungs Lagedeformationen von über 5 cm zwischen den beiden Epochen signifikant nachzuweisen (Abb. 1). Die in der Zwischenzeit hinzugekommenen GPS-Epochen sollen genaueren Aufschluss über den Charakter des Bewegungsbildes geben.

Im Gebiet der südlichen Niederrheinischen Bucht unterhält das Geodätische Institut der Universität Bonn seit 1993 ein regionales GPS-Untersuchungsnetz HEIKO (Höhenänderungen in Eifel und Köln-Bonner Bucht), um rezente Bodenbewegungen mittels GPS zu beobachten (Görres 1996, Görres und Campbell 1998). Es wurden spezielle Strategien festgelegt, um insbesondere die höchstmögliche Höhengenauigkeit zu erzielen. So sind simultane Beobachtungen auf allen Punkten und eine Messdauer von  $3^* 24$  h mit einem möglichst einheitlichen Instrumentarium erforderlich. Insbesondere wurde großer Wert auf die Punktauswahl hinsichtlich der Langzeitstabilität der Vermarkung, der Zentriermöglichkeiten und der Horizontfreiheit gelegt. Das Netz HEIKO dient in den hier vorgestellten Analysen als übergeordneter Rahmen

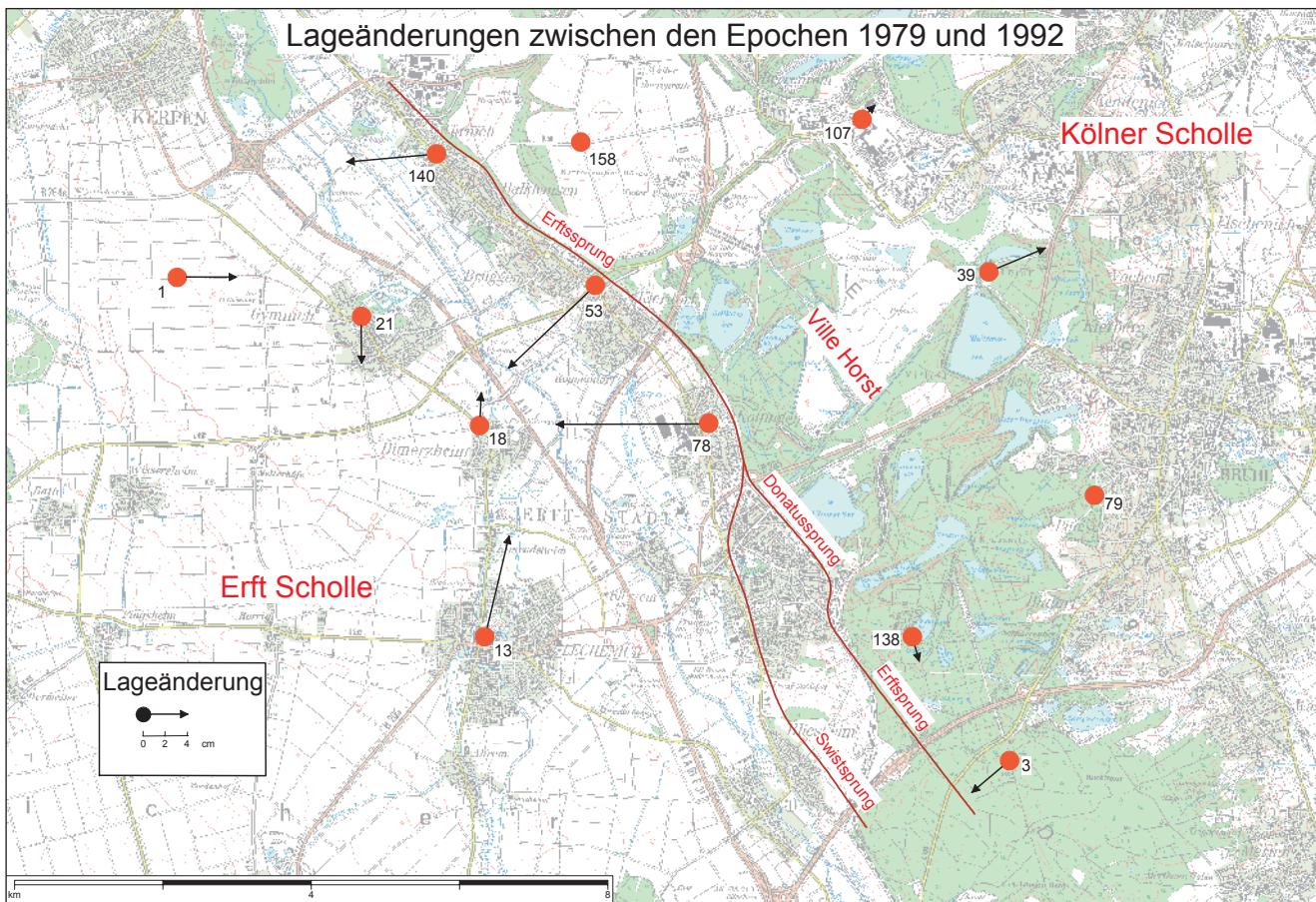
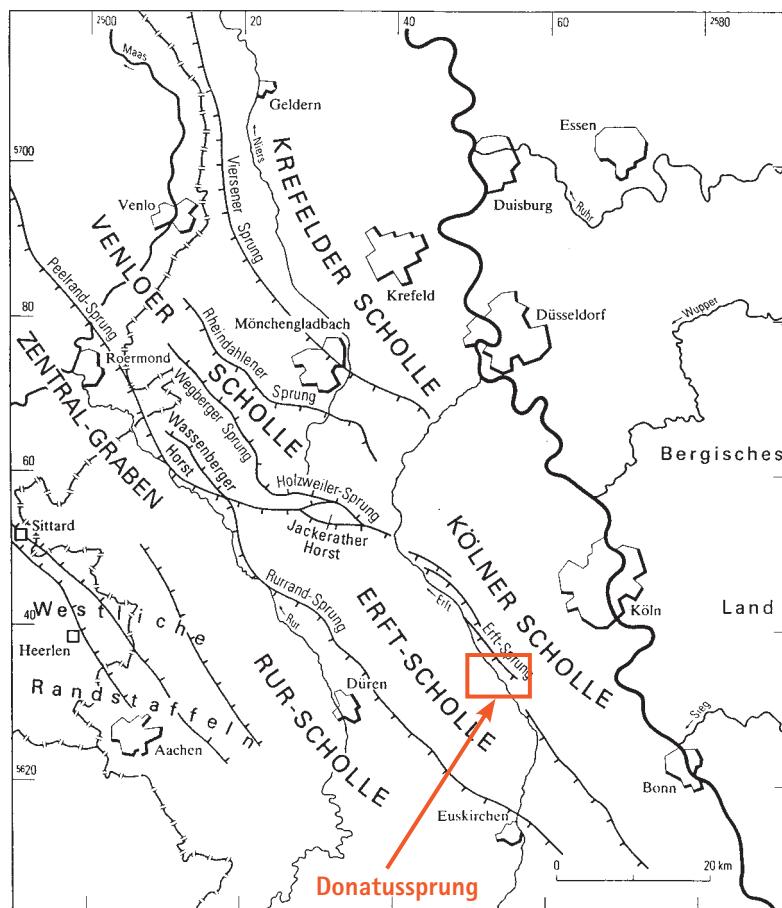


Abb. 1: Lagedeformationen im Netz Donatussprung aus dem Vergleich der Epochen 1979 (terrestrische Messung) und der GPS-Messung 1992 (nach Sager 1995) mit signifikanten Lageänderungen an den Punkten 53, 78, 140; Sprungverlauf nach Deutscher Planungsatlas 1976



für die im Netz Donatussprung bisher beobachteten GPS-Epochen.

## 2 Geologische Situation des Donatussprungs

Die Niederrheinische Bucht lässt sich als junges tektonisches Senkungsgebiet beschreiben, dessen südlicher Teil, die Köln-Bonner Bucht, keilförmig in das Rheinische Schiefergebirge hineinreicht (Ahorner 1962). Geprägt von so genannter Bruchschollentektonik können hier größere Störungssysteme unterschieden werden. Zu den bis in die heutige Zeit aktivsten Zonen gehört das von Nordwest nach Südost verlaufende Erftsprungsystem, das die Erftscholle von der Kölner Scholle trennt (Abb. 2). Zwischen dem Erftsprungsystem und der Kölner Scholle erstreckt sich ein ca. 5 km breiter, »Ville« genannter, geologischer Horst, der sich landschaftlich um ca. 50 m gegenüber den Nachbarschollen heraushebt. Während die Erftscholle in geologischen Zeiträumen tief abgesunken ist und

Abb. 2: Tektonische Gliederung der Niederrheinischen Bucht (Deutscher Planungsatlas 1976)



Abb. 3: Im Gelände sichtbarer Verlauf des Donatussprungs

alle Schichten in nordöstlicher Richtung gekippt sind, ist die Kölner Scholle relativ stabil geblieben (Quitzow und Vahlensieck 1955).

Bei den Störungen handelt es sich vorwiegend um Schrägabschiebungen mit Einfallwinkeln von ca. 50° bis 70°, die sowohl durch tektonische Prozesse als auch durch die großräumigen Grundwasserabsenkungen (Sümpfungsmaßnahmen) zur Trockenhaltung der großen Braunkohletagebaue verursacht werden (Ahorner 1962). Da aufgrund unterschiedlicher Schichtung und unterschiedlichen Einsinkens in erdgeschichtlichen Zeiträumen die einzelnen Erdschollen aus hydrologischer Sicht gegeneinander an den Störungsflächen abgedichtet sind, ist ihr aktuelles durch die Grundwasserabsenkungen hervorgerufenes Bewegungsverhalten als weitgehend unabhängig voneinander zu betrachten.

Ein an der Oberfläche besonders auffälliger Abschnitt der Verwerfung im Raum Erftstadt-Liblar wird wegen seiner Nähe zum ehemaligen Tagebau »Donatus« als Donatussprung bezeichnet. Stellenweise ist der Verlauf des Donatussprungs vor Ort durch Geländestufen und deutlich sichtbare Bergschäden an der Störungslinie gut zu erkennen (Abb. 3).

### 3 GPS-Messungen im Deformationsnetz Donatusprung

#### 3.1 Netzaufbau

Das Deformationsnetz Donatusprung wurde vom Landesvermessungsamt NRW im Jahre 1992 auf der Grundlage des trigonometrischen Netzes 2. und 3. Ordnung angelegt (Sager 1995) und umfasste zu diesem Zeitpunkt dreizehn trigonometrische Punkte mit einem Punktabstand von durchschnittlich 3.7 km bei einer Gesamtausdehnung von 11 km in NW-SO-Richtung sowie 8.5 km in NO-SW-Richtung auf dem Gebiet des Rhein-Erft-Kreises

(vgl. Abb. 1). Nach gesicherten geologischen Erkenntnissen befinden sich sechs Punkte auf dem geologisch stabilen Ville-Horst nordöstlich und sieben Punkte auf der Erftscholle südwestlich der Verwerfungslinie Donatusprung. Das Netz wird für die hier beschriebenen Untersuchungen als Verdichtungsnetz des GPS-Netzes HEIKO betrachtet und dient der Erfassung der relativen Verschiebungen der Erftscholle gegenüber dem Ville-Horst.

In der Ortslage Liblar befindet sich als Ergänzung des GPS-Netzes eine die Verwerfungslinie senkrecht überquerende Kontroll-Linie mit Vermessungspunkten, die die Rheinbraun AG (heute RWE Power) bereits 1986 zur Untersuchung der Bodenbewegungen angelegt hatte. Die Linie umfasst den Entfernungsbereich von einigen hundert Metern beiderseits der an dieser Stelle besonders gut durch Schäden bzw. Risse im Asphalt und in Mauern erkennbaren Verwerfungslinie (Abb. 3). Ihre genaue lagemäßige Darstellung ist nicht zur Veröffentlichung freigegeben. Auf Anregung des LVermA NRW wurde sie in Zusammenarbeit mit der Rheinbraun AG 1996 auf 21 Punkte erweitert, von denen zwei (357 und 548) seit 1997 Bestandteil des GPS-Netzes Donatusprung sind. Alle Punkte der Linie werden periodisch von RWE Power und LVermA NRW terrestrisch in Lage und Höhe bestimmt, um lokale Auswirkungen der Verwerfung in Form von Setzungsunterschieden und Horizontalverschiebungen zu untersuchen (Sager 1998).

#### 3.2 Messkampagnen

Drei GPS-Kampagnen wurden im November 1992 (Sager 1995), April 1997 (Bisdorff und Janssen 1997) und im März 2000 (Fischer und Frauenrath 2000) durchgeführt. Zwar waren für die Messungen im GPS-Netz HEIKO die eingangs erwähnten Strategien entwickelt worden, um eine höchstmögliche Höhengenauigkeit zu erzielen (Görres und Campbell 1998), jedoch konnten im Netz Dona-

tussprung diese Vorgaben nur teilweise eingehalten werden. Die Vermarkungen entsprechen den Forderungen eines TP-Netzes (vgl. Sager 1995), sind aber für die Bestimmungen von Deformationen im Millimeterbereich nur bedingt geeignet. Auch ist der Horizont an manchen Punkten deutlich eingeschränkt. Ferner konnte aus logistischen Gründen weder eine gleichzeitige Besetzung aller Punkte erfolgen, noch die geforderte lange Beobachtungsdauer eingehalten werden. Im Jahre 1992 betrug die Dauer pro Session nur 1.5 Stunden, 1997 4 Stunden und 2000 3 Stunden, wobei 1997 und 2000 jeder Punkt immerhin mindestens zweimal besetzt werden konnte. Die Beobachtungen erfolgten 1992 mit vier ASHTECH XII GPS-Empfängern durch das LVermA NRW, während bei den beiden letzten Kampagnen mit sieben TRIMBLE 4000SSE/SSI in einer Kooperation von LVermA NRW und Geodätischem Institut der Universität Bonn beobachtet wurde. Durch die genannten Umstände musste gegenüber den Auswertungen im Netz HEIKO mit gewissen Genauigkeitseinbußen gerechnet werden.

#### 4 Auswertung der GPS-Beobachtungen

Wurden die Messungen von 1992 noch als zweistufige Auswertung mit dem ASHTECH-eigenen Programm GPPS als basislinienweise Auswertung und anschließender Ausgleichung der Basislinienkomponenten am LVermA NRW ausgewertet, erfolgte die Auswertung der beiden Wiederholungsmessungen DONA1997 und DONA2000 mit der Bernese GPS Software am Geodätischen Institut nach den für das GPS-Netz HEIKO entwickelten Strategien (Görres und Campbell 1998). Auch für die vergleichsweise geringe Netzausdehnung werden präzise IGS-Bahndaten sowie die ionosphärenfreie Linearkombination verwendet, um Resteinflüsse der ionosphärischen Refraktion, die bis zu 10 ppm (Wanninger 2001) betragen können, auszuschließen. Zur Modellierung der troposphärischen Refraktion werden für jede Station Parameter für den troposphärischen Laufzeitfehler in Zenitrichtung mitgeschätzt. Die Ausgleichung erfolgt in einem Guss als Netzlösung.

Wegen der in 1997 und 2000 durchgeführten Doppelbesetzung jedes Punktes können neben der Gesamtlösung auch zwei getrennte Netzlösungen erstellt werden, aus denen sich die Genauigkeit als Standardabweichung des Mittels für Doppelmessungen angeben lässt (Tab. 1):

$$\sigma = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sum d_i d_i}{n}}$$

mit  $d_i$  = Differenz der beiden Sessionen pro Standpunkt i,  
 $n$  = Anzahl der Standpunkte

Für die Kampagne DONA92 lassen sich aufgrund der fehlenden Doppelbesetzung der Punkte keine gleichwertigen Genauigkeitsmaße ermitteln. Der Vergleich der Basislinienkomponenten einzelner doppelt gemessener Basislinien führt zu einer zu optimistischen Genauigkeit von

Tab. 1: Standardabweichung des Mittels für Doppelmessungen in mm

	DONA1997	DONA2000
Lage	10.0	7.7
Höhe	8.6	5.3

2 mm für die Lage- und 5 mm für die Höhenkomponente. Es kann jedoch für alle Komponenten in allen Kampagnen davon ausgegangen werden, dass die Koordinatenergebnisse mit einer Standardabweichung  $\leq 1$  cm ermittelt wurden.

#### 5 Verschiebungsichten im Netz Donatussprung aus GPS-Messungen

Auf der Grundlage der drei Kampagnenlösungen werden für jeden Messpunkt Verschiebungsvektor und Bewegungsraten ermittelt (Tab. 2). Die Orientierung des Netzes wird mit GPS-Systemgenauigkeit durch die Verwendung der präzisen Bahndaten realisiert (Görres und Campbell 1998) und die translatorische Festlegung über die im System HEIKO ermittelten Koordinaten (ITRF92) und Bewegungsraten des Punktes ERFR vorgenommen. Für jeden Messpunkt wird über alle jeweils vorhandenen Kampagnenergebnisse zur Bestimmung der Bewegungsraten eine lineare Regression für jede Koordinate berechnet. Aus dem Vergleich der Sessionlösungen der einzelnen Kampagnen werden die zugehörigen Genauigkeiten bestimmt, um für die Bewegungsraten die entsprechenden Genauigkeiten anzugeben.

Die Genauigkeit der ermittelten Raten ist mit Werten zwischen 0.1 und 2.7 mm für die beiden Lagekomponenten und 0.6 bis 3.9 mm für die Höhe recht heterogen. Die Ursache hierfür liegt zum einen in der unterschiedlichen Anzahl der Epochen, die zur Ratenbestimmung herangezogen wurden: Während insgesamt drei so genannte »Donatus-Kampagnen« stattgefunden haben, liegen für KIER und KOTT darüber hinaus zwei weitere Beobachtungsepochen aus den Kampagnen HEIKO96 und HEIKO2000 (jeweils  $3 \cdot 6$  h) vor. Die Stationen ERFL und ERFR sind Beobachtungspunkte des Netzes HEIKO und somit seit 1993 jährlich für  $3 \cdot 24$  h besetzt worden. Die besonders große Ungenauigkeit von Punkt 3 ist sicherlich damit zu begründen, dass sich dieser Punkt im Wald befindet und die Antenne auf einem ca. 8.50 m hohen Mast aufgebaut werden muss. Überdies musste er, ebenso wie Punkt 140 im Jahr 2000, vor der Kampagne 1997, im alten Zentrum wiederhergestellt werden, wobei die Zentrierelemente für die Lage mit Millimetergenauigkeit, für die Höhe aber nur mit cm-Genauigkeit bestimmt werden. Zur Bestimmung der Raten für die Höhenkomponente wurden für diese beiden Punkte daher nur jeweils zwei Epochen verwandt. Die beiden Punkte der Deformationslinie 357 und 548 wurden erst 1997 eingerichtet, weshalb auch hier noch keine »echten« Genauigkeiten angegeben werden können,

Tab. 2: Bewegungsraten und wrms für das Netz Donatussprung aus drei GPS-Kampagnen; die Standardabweichung einer Beobachtung mit durchschnittlichem Gewicht (wrms) gibt die Streuung der Einzelergebnisse um die ausgleichende Gerade an:

$$wrms = \sqrt{\frac{\sum p_i v_i v_i}{\sum p_i}}$$

mit  $v_i$  = Residuen der Einzelmessung pro Beobachtungsepoke i,  
und  $p_i$  = Gewichtung der Einzeloepochen.

Stationsname	Breite (N-S)		Länge (O-W)		Höhe	
	Änderungsrate [mm/Jahr]	wrms [mm]	Änderungsrate [mm/Jahr]	wrms [mm]	Änderungsrate [mm/Jahr]	wrms [mm]
ERFL = 1	+ 1.0 ± 0.5	2.6	+ 0.9 ± 0.3	1.7	- 21.9 ± 0.6	3.3
ERFR = 107	+ 0.5 ± 0.4	2.2	- 0.3 ± 0.5	2.2	- 2.4 ± 0.6	3.4
KIER = 53	+ 0.0 ± 0.8	2.7	- 5.9 ± 1.2	3.7	- 7.3 ± 2.0	8.3
KOTT = 78	- 1.9 ± 0.3	1.0	- 4.6 ± 0.3	0.9	- 5.9 ± 2.5	10.2
3	- 0.2 ± 1.0	2.4	+ 0.8 ± 2.7	6.8	- 4.7	
13	- 1.6 ± 1.4	3.5	- 1.3 ± 0.4	1.1	- 20.7 ± 3.8	9.9
18	- 1.6 ± 0.6	1.4	- 2.1 ± 0.7	1.7	- 17.8 ± 1.7	4.4
21	- 2.0 ± 0.4	1.1	- 3.8 ± 1.0	2.6	- 17.7 ± 3.8	10.0
39	- 0.6 ± 0.7	1.8	- 0.9 ± 0.1	0.2	- 2.3 ± 3.9	10.2
79	- 0.4 ± 1.2	3.0	- 0.9 ± 0.2	0.4	- 2.2 ± 1.9	4.9
134	+ 0.2 ± 1.3	3.1	- 0.4 ± 0.3	0.8	- 0.6 ± 0.7	1.8
140	- 3.0 ± 0.6	1.6	- 5.1 ± 1.0	2.5	- 2.4	
158	- 0.1 ± 0.6	1.5	+ 1.1 ± 2.2	5.4	- 4.7 ± 2.2	5.8
357	- 1.6		- 2.1		- 4.7	
548	- 5.0		- 3.6		- 4.1	

sondern für die Abbildungen 4 und 5 eine Abschätzung zu ± 1 mm/Jahr vorgenommen wurde. Letztendlich müssen aber alle aus nur drei Beobachtungsepochen ermittelten Genauigkeiten noch als unsicher bestimmt angesehen werden.

In der Darstellung der Bewegungsvektoren (Geschwindigkeiten in mm/Jahr) auf dem Kartenhintergrund in Abb. 4 für die Lage und Abb. 5 für die Höhe, wird offenbar, dass sich die Punkte gruppenweise bewegen. Während alle Punkte auf der Kölner Scholle keine oder nur geringe Bewegungsraten sowohl in Lage als auch in der Höhe aufweisen, sind alle Stationen der Erftscholle von mehr oder minder starken Bewegungen betroffen. Zunächst fällt auf, dass sich (mit einer Ausnahme) alle Punkte der Erftscholle in südwestlicher Richtung in etwa rechtwinklig von der Verwerfung weg bewegen. Es kann außerdem klar unterschieden werden, dass die unmittelbar an der Verwerfung gelegenen Punkte relativ große horizontale Bewegungsraten bis zu 5.9 mm/Jahr, aber nur kleine Absenkungsbeträge bis maximal 7.3 mm/Jahr aufweisen, während bei zunehmender Entfernung von der Verwerfung (hier zwischen 3 und 4 km) die horizontale Bewegungsraten bis auf 4 mm/Jahr zurückgeht, die Absenkungsraten jedoch auf bis zu 21.9 mm/Jahr zunimmt.

Die Ursache für die abweichende Bewegungsrichtung des Punktes 1 (ERFL) bleibt näher zu untersuchen (vgl. Abschnitt 7). Auffallend ist ebenfalls ein großer Bewegungsvektor des Punktes 357 der Deformationslinie, der sich bereits auf dem Ville-Horst, aber nur 21 m von der Verwerfung entfernt befindet. Die kleinen Absenkungs-

beträge einzelner ebenfalls auf dem Ville-Horst liegender Punkte mögen ihre Ursache darin haben, dass sich diese Punkte (39, 79, 134, 158) auf Rekultivierungsgebiet befinden und weiterhin Setzungen unterworfen sein können.

## 6 Einbeziehung terrestrischer Ergebnisse

Die mit GPS beobachteten Höhenänderungen werden durch Untersuchungen, die in demselben Gebiet im Rahmen des SFB 350, Teilprojekt C1 »Höhen- und Schwereänderungen in der Niederrheinischen Bucht« (Keysers 2001, Campbell et al. 2002) durchgeführt wurden, untermauert. Hier wurde u.a. eine Nivellementslinie aus dem Netz der Leitnivelllements (Fröhlich und Müller 1986, Haupt 1999) ausgewählt, die den Erftsprung nordwestlich von Liblar im Bereich Balkhausen – Tünich überquert (Keysers 2001, S. 43, vgl. Abb. 5) und insgesamt neun auch für Schweremessungen genutzte Nivellements-punkte umfasst. Aus den z.T. bereits seit 1963 im zweijährigen Rhythmus beobachteten Höhen können für den aktuellen Zeitraum (1990 bis 2001) Höhenänderungen abgeleitet werden (Tab. 3).

Bedingt durch den geknickten Verlauf der Nivellementslinie liegen vier der neun Punkte (E3 bis E6) im Hangenden der Erftscholle sehr nahe am Sprung, zwei weitere (E7 und E8) im Liegenden auf dem Ville-Horst, ebenfalls nahe am Sprung. Während die vier Punkte E3 bis E6 im Hangenden mit 4 bis 6 mm/Jahr bereits eine deutliche Senkung erfahren, weisen die zwei Punkte E7 und

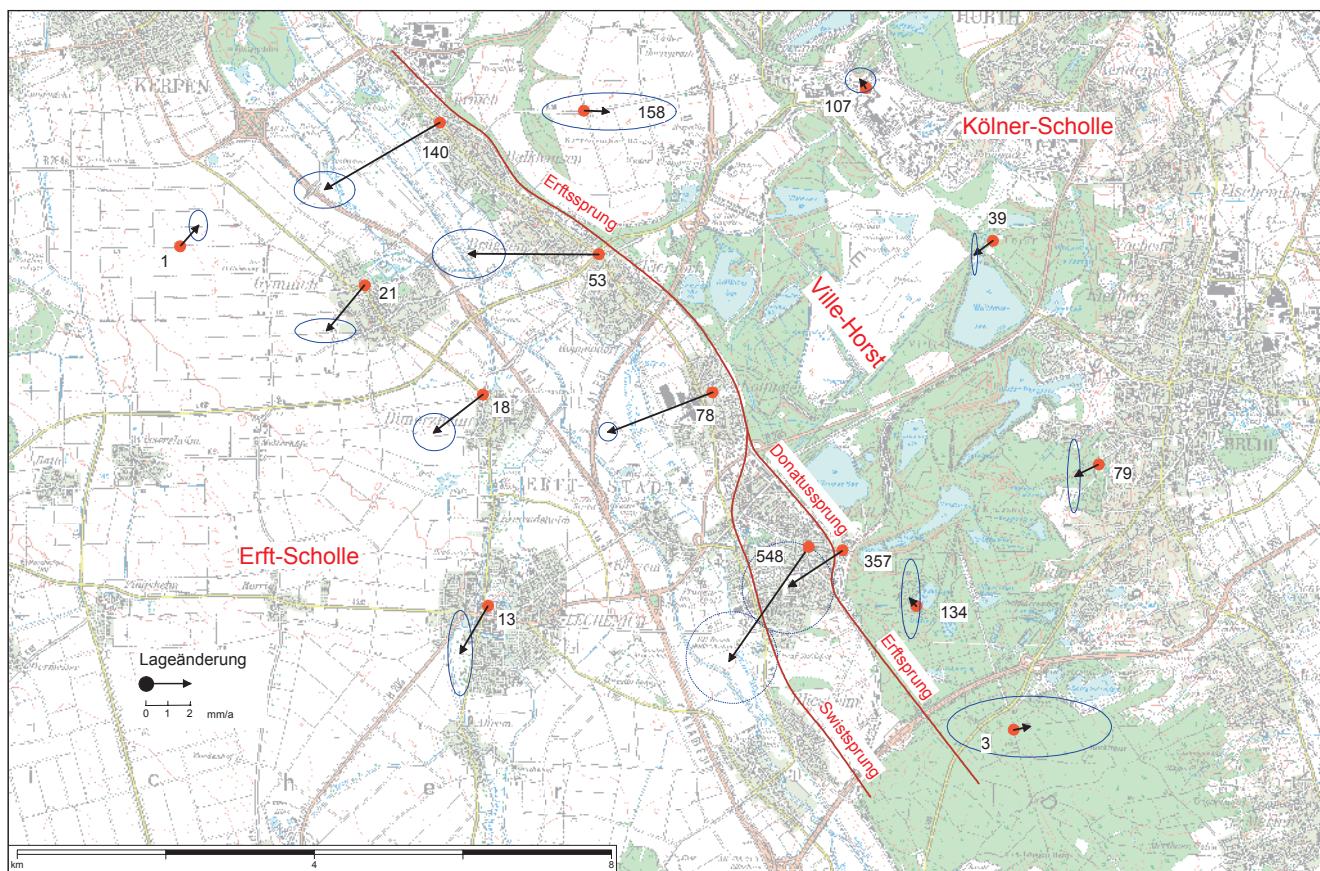


Abb. 4: Horizontale Bewegungsraten aus drei GPS-Messungen 1992, 1997 und 2000 (Werte für 357 und 548 nur aus 1997 und 2000, Genauigkeit daher geschätzt)

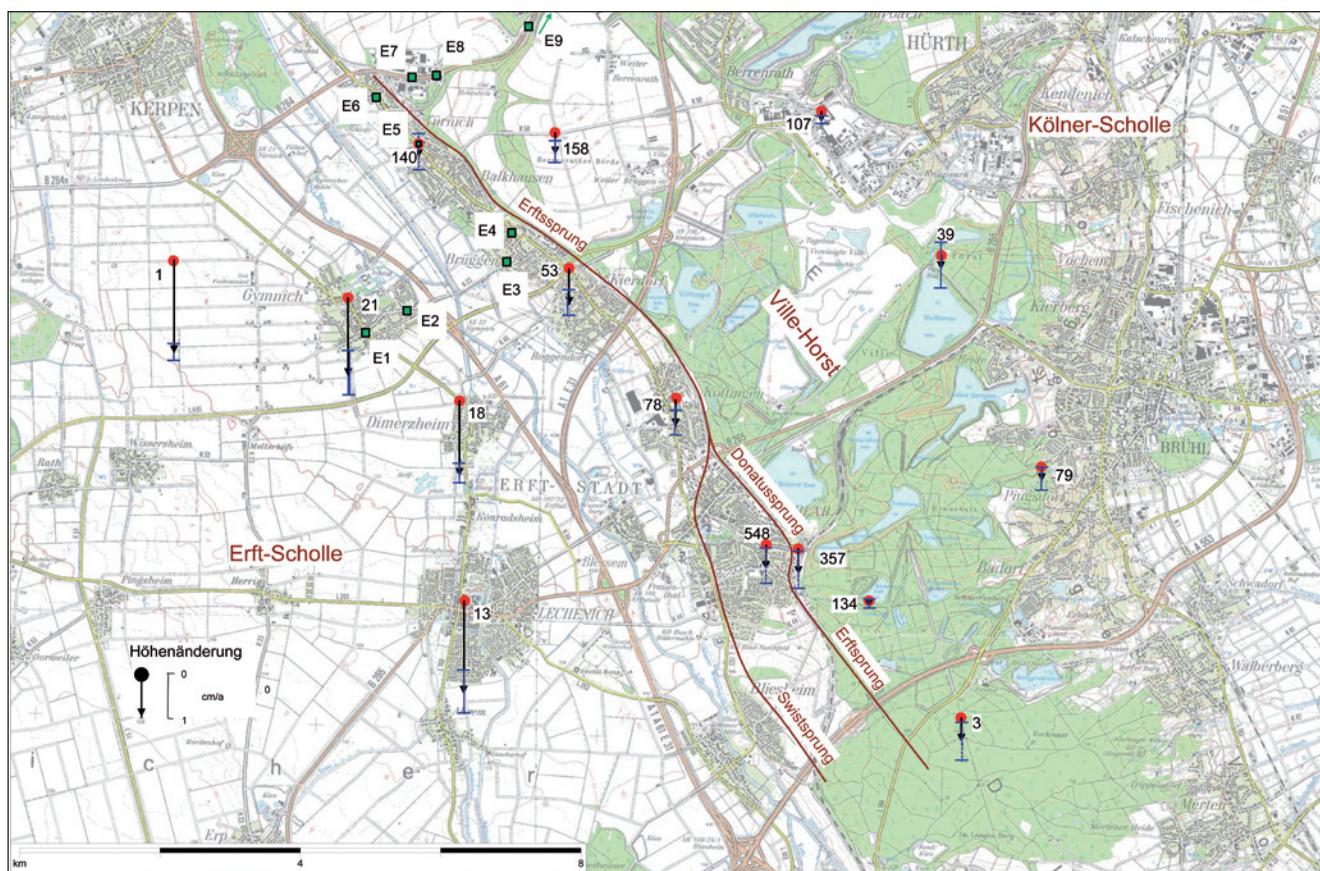


Abb. 5: Vertikale Bewegungsraten aus drei GPS-Messungen 1992, 1997 und 2000 (Werte für 3, 140, 357 und 548 aus nur zwei Epochen, Genauigkeit daher geschätzt); E1 bis E9: Punkte aus dem Leitnivelllement (Keysers 2001).

Tab. 3: Höhenänderungen aus Ergebnissen der Leitnivellements. Unter der Annahme einer relativen Höhengenauigkeit von  $\sigma_0 = \pm 1 \text{ mm}$  (Fröhlich und Müller 1986) ergeben sich für die Absenkungsraten aus mehreren Epochen über einen Zeitraum von 10 Jahren Genauigkeiten von  $\sigma_H = 0.1$  bis  $0.2 \text{ mm/Jahr}$  auf lokalen Strecken von 1 km Länge.

Nr.	Geologische Zuordnung	Niv.-Daten: vorhandener Zeitraum	Höhenänderung (berechnet für 1990–2001) mm/Jahr
E1	Erft-Scholle	1983 – 2001	-16.0
E2	Erft-Scholle	1983 – 2001	-14.5
E3	Erft-Scholle	1983 – 2001	-6.3
E4	Erft-Scholle	1981 – 2001	-4.8
E5	Erft-Scholle	1981 – 2003	-5.3
E6	Erft-Scholle	1966 – 2001	-6.2
E7	Kölner Scholle (Ville-Horst)	1989 – 2003	-1.4
E8	Kölner Scholle (Ville-Horst)	1963 – 2003	-0.3
E9	Kölner Scholle (Ville-Horst)	1963 – 2003	0.0

E8 im Liegenden nur eine Senkung von 0 bis 1 mm/Jahr auf. Der gesamte Verlauf von E9 (Referenz für die relativen Höhen) mit 0.0 mm/Jahr bis E2 (-14.5 mm/Jahr) und E1 (-16.0 mm/Jahr) unterstützt das mit GPS erfasste Bewegungsbild in hervorragender Weise.

Zum Vergleich der mit GPS festgestellten Horizontalbewegungen liegen die Ergebnisse der in Abschnitt 3.1 erwähnten, tachymetrisch gemessenen Kontrolllinie für den Zeitraum 1997 bis 2002 vor. Aus den horizontalen Streckenänderungen können die Punktverschiebungen längs des leicht gekrümmten Linienverlaufes ermittelt werden. Sie zeigen eine auf der Seite der Erftscholle abrupt einsetzende Bewegung der Punkte von der Störungslinie weg, wobei der Betrag im Bereich der ersten 20 Meter von 3 mm/Jahr auf den im weiteren Verlauf praktisch unveränderten Wert von 4.5 mm/Jahr anwächst. Die Genauigkeiten der terrestrischen Messungen können für die Lage mit  $\sigma_L = 1 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$  und für die Höhe mit  $\sigma_H = 0.3 \text{ mm}$  angegeben werden. Hierzu passen widerspruchsfrei die Bewegungen von 4 bis 5 mm/Jahr auf den drei GPS-Punkten 78, 53 und 140, die alle etwa 200 bis 300 m von der Sprunglinie entfernt auf der Erftscholle liegen.

In Abb. 6 sind die Messergebnisse der verschiedenen Verfahren für die vertikalen und horizontalen Bewegungen in einer senkrecht zur Verwerfungslinie ausgerichteten Grafik, in der drei Entfernungsbereiche unterschieden werden, zusammengefasst, um die hohe Güte zu verdeutlichen, mit der sich die verschiedenen Einzelergebnisse in ein Gesamtbild einfügen lassen. Ein direkter Vergleich ist im lokalen Bereich ohne jegliche Transformation möglich, da nur die datumsinvarianten Änderungsraten verglichen werden.

## 7 Beobachtetes Bewegungsbild und mögliche Interpretationen

Das beobachtete Bewegungsbild steht unzweifelhaft in Zusammenhang mit dem fortdauernden Grundwasserentzug des Braunkohletagebaus, der in diesem Bereich auch gegenwärtig noch bei einer Absenkung von etwa 0.5 bis 3 m/Jahr liegt (Wallbraun 1992, Keysers 2001), so dass eventuell vorliegende tektonische Bewegungen vollständig überdeckt werden. Dabei kommt es in den wasserführenden Ton-, Sand- und Kiesschichten bei Wasserentzug zu einer Kompaktion des Korngefüges und durch den wegfallenden Auftrieb zu einem erhöhten Auflagedruck (Rathsmann 1986). Die Folge ist eine Bodenabsenkung, die an der Oberfläche als Summe der Absenkungseffekte in den einzelnen Grundwasserstockwerken in Erscheinung tritt. Für die Relation zwischen Grundwasserabsenkung und Bodensenkung werden bei Prinz (1991, 153–155) empirische Werte von 1–3 mm pro 1 m Grundwasserabsenkung angegeben. Legt man im südlichen Bereich der Erftscholle eine jährliche Grundwasserabsenkung von 3 m zugrunde (Keysers 2001, Abb. 5.5), ergibt sich ein Bodensenkungsbetrag von 3–10 mm/Jahr pro betroffenem Grundwasserstockwerk. Die im Bereich der südlichen Erftscholle mit Nivellements und GPS bestimmten Absenkungsraten betragen etwa 20 mm/Jahr, was für eine Situation mit drei oder mehr Stockwerken typisch wäre. Aufgrund der komplexen lokalen Situation kann diese Betrachtung aber nur als überschlägig gelten.

Bei schräg einfallenden Störungsfächen, wie am Erft- bzw. Donatussprung (Bsp. s. Ahorner 1962, S. 54), ist neben der Vertikalbewegung auch eine mit dem Abstand von der Verwerfungslinie abnehmende Horizontalverschiebung zu erwarten. Eine häufig anzutreffende Darstellung der Vorgänge an einer Verwerfungslinie ist die so genannte Abschiebung (vgl. z.B. Schaefer 2004), an der sich ein vom Einfallswinkel abhängiges Verhältnis zwischen horizontaler und vertikaler Verschiebung ergibt (Abb. 7).

Einen anderen Ansatz zur dreidimensionalen Interpretation des Bewegungsbildes bietet das Deformationsmodell des Senkungstroges (Abb. 8), der im untertägigen Steinkohlebergbau durch Einsturz eines begrenzten Be-

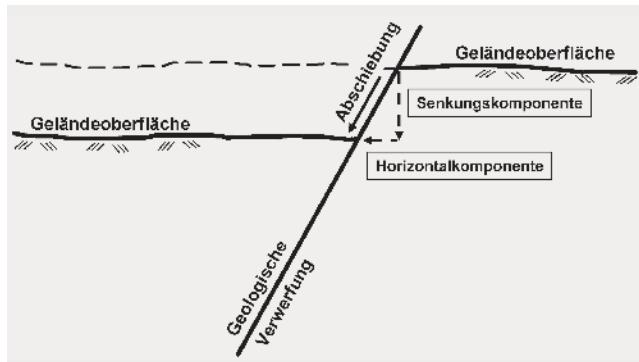


Abb. 7: Generalisierter Bewegungsablauf an einer Verwerfung als »Abschiebung« (nach Schaefer 2004)

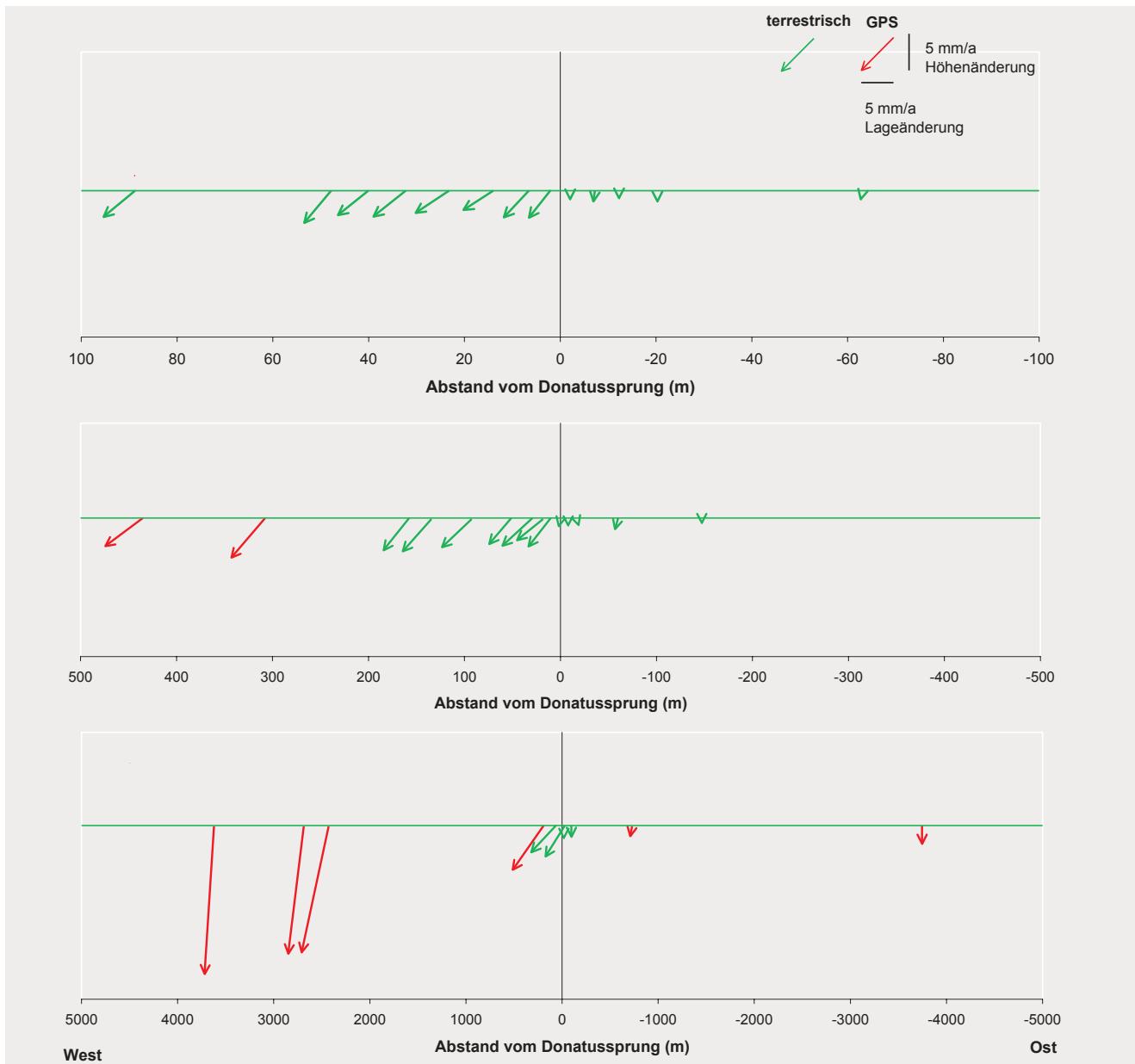


Abb. 6: Bewegungsraten aus GPS und terrestrischen Messungen relativ zum Abstand von der Verwerfung in drei unterschiedlichen Entfernungsbereichen

reiches in der Tiefe entsteht (vgl. z.B. Wittenburg 1998, Knufinke 2001), wobei allerdings die dort nicht enthaltene Auswirkung einer bewegungsaktiven Störung innerhalb des Senkungstrogos einzubeziehen wäre. In ähnlicher

Ausprägung hat sich im Braunkohlebergbau infolge der langjährigen Sumpfungsmaßnahmen eine weiträumige Senkungsmulde herausgebildet.

Die relativ geringen geodätisch gemessenen Senkungsbeträge in der Nähe der Verwerfung scheinen auf das Modell einer Senkungsmulde zu verweisen. Letzteres erlaubt noch nennenswerte Horizontalbewegungen in der Nähe des oberflächennahen Trogrordes, die allerdings unmittelbar am Trogrond gegen Null gehen (Wittenburg 1998, Schaefer 2004) und sich dort nicht mit den am Donatussprung gemessenen horizontalen Bewegungen von bis zu 5.9 mm/Jahr in Einklang bringen lassen. Dieser Randeffekt darf als eine Folge des Vorhandenseins einer Verwerfungsfläche angesehen werden.

Eine Sonderstellung im Bewegungsbild nimmt offenbar der Punkt 1 (Gymnich) ein, dessen Absenkung zwar konform mit den übrigen Punkten im Netz Donatus-

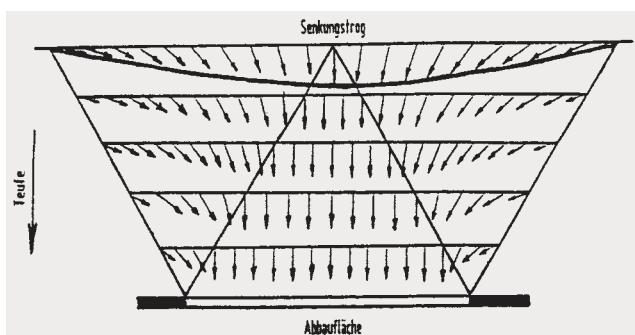


Abb. 8: Deformationsmodell »Senkungstrog« nach den Aachener Formeln von Spettmann (aus Wittenburg 1998)

sprung auf der Erftscholle vonstatten geht, dessen geringe Horizontalbewegung jedoch eher zu dem erwarteten Bild der weiter in der Mitte des Senkungsgebietes liegenden Punkte gehört. Hier ist jedoch aus dem Leitnivellelement ein nordöstlich des Punktes gelegener lokaler Senkungstrichter bekannt, der diese Bewegung schlüssig erklärt.

Bevor eine umfassendere und fundierte Aussage über die Art der beobachteten Bewegungsvorgänge im Bereich des Donatussprungs getroffen werden kann, sind in jedem Fall intensivere Untersuchungen in der Örtlichkeit und die Einbeziehung weiterer in diesem Gebiet vorliegender Messdaten (Bergbaubetreiber, Vermessungsbehörden) sowie vorhandener Strukturdaten erforderlich.

## 8 Resümee

Anfang der 90er Jahre führte ein erster amtlicher Vergleich zwischen terrestrischen Messungen in der Nähe des Donatussprungs in der Rheinischen Bucht und den ersten GPS-Messungen zu der Erkenntnis, dass neben der durch die Grundwasserabsenkung im Tagebau verursachten Höhenänderung der Erdoberfläche die auf der Erftscholle gelegenen Messpunkte auch erhebliche Lageverschiebungen relativ zu den auf dem Ville-Horst liegenden Punkten erfahren. Darüber hinaus können aus diesen Beobachtungen die Geschwindigkeitsvektoren der Lageverschiebung erstmalig quantifiziert werden und zwar auf bis zu 5 mm/Jahr. Die Ergebnisse zweier im Abstand von fünf und drei Jahren unter verbesserten Bedingungen und somit höherer Genauigkeit folgenden GPS-Kampagnen bestätigen diese Feststellung dahingehend, dass die Hinzunahme der Ergebnisse der im unmittelbaren Sprungverlauf durchgeführten terrestrischen Kontrollmessungen eine differenziertere dreidimensionale Betrachtung des Bewegungsbildes zulässt. Die mit Abstand von der Verwerfung zunehmende Höhenabsenkung bei gleichzeitiger Abnahme der Lageänderung der westlich des Donatussprungs gelegenen Messpunkte deutet auf das Bewegungsmodell einer langgestreckten Senkungsmulde ähnlich dem Senkungstrog des Steinkohlebergbaus als möglichen Modellierungsansatz hin, in den das Vorhandensein der Verwerfung einzubeziehen wäre. Eine fundierte Modellierung der Bewegungsvorgänge im Bereich des Donatussprungs erfordert jedoch die Einbeziehung weiterer in diesem Gebiet vorliegender Messdaten sowie geologischer Strukturdaten. Eine Fortsetzung und Intensivierung der geodätisch-geologischen Untersuchungen erscheint geboten, um das Muster der Bewegungsvorgänge an den Verwerfungen im Gebiet der Rheinischen Tagebaue eingehender zu analysieren.

## Dank

Wir danken Herrn Spata (LVerma NRW) und den Herren Schaefer und Thalmann (RWE Power) für konstruktive Gespräche.

## Literatur

- Ahorner, L.: Untersuchungen zur quartären Bruchtektonik der Niederrheinischen Bucht, Eiszeitalter und Gegenwart. Bd. 13, S. 24–105, 1962.
- Bisdorff, J. und V. Janssen: Untersuchung von Lageverschiebungen im GPS-Netz Donatussprung. Diplomarbeit am Geodätischen Institut der Universität Bonn, 1997.
- Campbell, J., H.-J. Kümpel, M. Fabian, D. Fischer, B. Görres, Ch.J. Keyzers, K. Lehmann: Recent movement pattern of the Lower Rhine Basin from tilt, gravity and GPS data. Netherlands Journal of Geosciences/Geologie en Mijnbouw, Vol. 81 (2), S. 223–230, 2002.
- Deutscher Planungsatlas: Band 1 Nordrhein Westfalen, Lieferung 8: Geologie, Veröffentlichung der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Hermann Schroedel Verlag, Hannover, 1976.
- Fischer, D. und S. Frauenrath: Untersuchung von Punktverschiebungen im GPS-Netz Donatussprung. Diplomarbeit am Geodätischen Institut der Universität Bonn, 2000.
- Fröhlich, H., G. Müller: Leitnivellelemente und regionale Deformationsanalyse in Nordrhein-Westfalen. VR 58, S. 1–19, 1986.
- Görres, B.: Bestimmung von Höhenänderungen in regionalen Netzen mit dem Global Positioning System. DGK Reihe C Nr. 461 (Dissertationen) Verlag des Institutes für Angewandte Geodäsie (heute: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie), Frankfurt am Main, 1996.
- Görres B. und J. Campbell: Bestimmung vertikaler Punktbewegungen mit GPS. ZfV 123, S. 222–230, 1998.
- Haupt, P.: 100 Jahre Leitnivellelement – Die periodischen Wiederholungs-nivellelemente in den Bergbaubieten Nordrhein-Westfalen. NÖV NRW, 32. Jg., S. 184–201, 1999.
- Keyzers, Ch.J.: Erfassung von Schwerkreisänderungen in zwei lokalen Netzen in der Niederrheinischen Bucht von 1998 bis 2000. Shaker-Verlag Aachen, Dissertation Universität Bonn, 2001.
- Knufinke, P.: Über die Entwicklung von Unstetigkeiten an der Oberfläche im linksrheinischen Steinkohlenrevier. Das Markscheidewesen 108, Nr. 1, S. 5–7, 2001.
- Kremers, J.: Deformationsanalyse der Erdoberfläche beim Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen. In: NÖV NRW, 23. Jg., 9–31, 1990.
- Prinz, H.: Abriß der Ingenieurgeologie. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1992.
- Quitzow, H. W., O. Vahlensieck: Über pleistozäne Gebirgsbildung und rezenten Krustenbewegung in der Niederrheinischen Bucht. Geol. Rundschau, 43, S. 56–67, Stuttgart, 1955.
- Rathsmaier, W.: Bodenbewegung als Folge von Grundwassersenkung im rheinischen Braunkohlenrevier. Braunkohle 38, S. 82–86, 1986.
- Sager, B.: Erste Deformationsanalyse des Lagenetzes Donatussprung in der Kölner Bucht. VR 57, S. 311–319, 1995.
- Sager, B.: Deformationslinie Donatussprung-Bahnhofstraße. Unveröffentlichte Dokumentation Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, Bonn, 1998.
- Schaefer, W.: Bodenbewegungen infolge Sumpfung des rheinischen Braunkohlebergbaus. In: H. Kratzsch, Bergschadenkunde, Anhang 25, S. 874–880, 4. Auflage, 2004.
- Spata, M., G. Günther, H.-J. Klugmann, B. Sager: Zur Deformationsanalyse der Erdoberfläche mittels GPS-Messungen beim Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen. SPN, 2. Jg., S. 2–9, 1993.
- Wallbraun, A.: Einfluß der Schollenrandstörungen in der Niederrheinischen Bucht auf den Grundwasserabfluß. Dissertation TU Aachen, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften, 1992.
- Wanninger, L.: Die Ionosphäre und ihre Einflüsse auf GPS-Positionierung. In: GPS-Referenzstationsdienste, VDV-Schriftenreihe Bd. 19, S. 47–59, 2001.
- Wittenburg, R.: Zur Beschreibung bergbauinduzierter Kinematik. Das Markscheidewesen 105, Nr. 1, S. 135–140, 1998.

## Anschriften der Autoren

Dr.-Ing. Barbara Görres | Prof. Dr.-Ing. James Campbell  
Geodätisches Institut der Universität Bonn  
Nussallee 17, 53115 Bonn  
Tel: +49 288 73-3034, Fax: -2988  
goerres@uni-bonn.de

Dipl.-Ing. Bernd Sager  
Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen  
Muffendorfer Straße 19–21, 53177 Bonn  
Tel: +49 228 846-1112  
sager@lverma.nrw.de