

Untersuchungen zu den globalen Positionierungsdiensten von Fugro OmniSTAR

Teil II: Ergebnisse und Erfahrungen*

Hansbert Heister, Otto Heunecke, Thomas Kerraschk und Andreas Pflugmacher (†)

Zusammenfassung

Fugro OmniSTAR ist einer der weltweit führenden Dienstleister bei satellitengestützten Positionierungen, der mit seinem Portfolio unterschiedliche Nutzergruppen anspricht. Im ersten Teil des Aufsatzes (zfv 134, 3/2009, S. 131–140) wurden die Funktionsprinzipien der einzelnen zur Verfügung stehenden Dienste VBS, HP, XP und HP+ beschrieben. Über die praktischen Erfahrungen im Umgang mit den OmniSTAR-Positionierungsdiensten sowie über Untersuchungen zur Genauigkeit wird im zweiten Teil dieses Beitrags berichtet. OmniSTAR bietet mit seinem HP-Dienst eine Echtzeit-Positionslösung mit Dezimeter-Genauigkeit an. Im Rahmen der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass diese spezifizierte Genauigkeit tatsächlich erreicht wird. Dies gilt allerdings nur, wenn sehr lange Initialisierungszeiten abgewartet werden oder wenn bereits hochgenaue Koordinaten für einen bekannten Punkt (Seed-Point) vorliegen, mit dessen Hilfe eine verkürzte Initialisierung (Kick-Start-Initialisierung) durchgeführt werden kann. Ob der HP-Prozess sein spezifiziertes Genauigkeitsniveau tatsächlich erreicht hat, ist für den Anwender im Felde anhand der Geräteangaben jedoch nicht erkennbar.

Summary

Fugro OmniSTAR is one of the worldwide leading providers for satellite based positioning, who addresses varied user communities with his portfolio. In the first part of this article (zfv 134, 3/2009, p. 131–140) the functional principles of the different available services VBS, HP, XP and HP+ are described. The second part reports on some practical experiences and accuracy investigations regarding the OmniSTAR positioning services. With his HP service OmniSTAR offers a real-time positioning solution with decimetre accuracy. The studies at hand will present that the specified accuracies were achieved indeed. However this is only the case if very long initialization periods were awaited or if precise coordinates of a known starting point (Seed-Point) are available, to perform a shortened initialization (Kick-Start initialization). By means of the receiver information it is not transparent for the user when the HP process has actually reached the specified accuracy level.

1 Überblick über die Studie

Primäres Ziel der Studie war die Untersuchung des OmniSTAR HP Dienstes – insbesondere im Hinblick auf die erzielbare Genauigkeit und Verfügbarkeit. Um repräsentative Aussagen treffen zu können, erfolgten Messungen unter verschiedenen lokal und global variierten Umständen. Unter dem Aspekt der globalen Variation wurde die Verteilung der Messorte so festgelegt, dass diese entlang einer Nord-Süd-Achse exemplarisch verschiedene geographische Breiten abdecken. Es fanden sowohl Messungen in der Nähe des Äquators in Bamako, Mali ($\varphi = 12^\circ \text{N}$) wie auch in hoher geographischer Breite in Norwegen, Tromsø und Nordkap ($\varphi = 71^\circ \text{N}$) statt. Darüber hinaus erfolgten Messungen in Südafrika (Johannesburg – $\varphi = 26^\circ \text{S}$) und Deutschland (Neubiberg, Greding, Euskirchen, Kiel – $\varphi = 48 - 54^\circ \text{N}$). Vereinzelt fanden dabei auch Messungen mit den Diensten OmniSTAR XP und OmniSTAR VBS statt. Nachfolgend sind nur wesentliche Ergebnisse und Erfahrungen bezüglich des OmniSTAR HP Dienstes behandelt.

Zur Durchführung der Messungen wurde eine spezielle Messanlage entwickelt (siehe Kap. 3). Es erfolgten statische sowie kinematische Messungen. Für die kinematischen Messungen wurde die Messanlage in einen PKW integriert und bei Geschwindigkeiten bis zu 120 km/h betrieben. Die Dauer der Messungen lag zwischen 40 Minuten und drei Stunden. Zusätzlich wurden stationäre Langzeitmessungen von 24 Stunden und länger durchgeführt. Neben der Bestimmung der erreichbaren Genauigkeiten war insbesondere die erforderliche Dauer des statischen Initialisierungsvorganges (siehe erster Teil des Aufsatzes) Gegenstand der empirischen Untersuchungen.

* Der vorliegende Aufsatz ist in zwei Teile gegliedert. Teil I ist in der zfv 3/2009 erschienen und gibt einen allgemeinen Überblick über Fugro OmniSTAR. Es werden die wichtigsten Grundlagen erläutert, die der potentielle Nutzer für einen sachgemäßen Umgang mit den OmniSTAR-Positionierungsdiensten wissen muss.

Teil II widmet sich den gewonnenen Ergebnissen einer Studie, mit der das Institut für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München vom Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr und vom Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Geschäftsfeld Navigation, beauftragt wurde.

2 Prüflinge

Die Studie wurde mit zwei OmniSTAR-HP-fähigen GPS-Ausrüstungen durchgeführt. Bei den beiden Prüflingen handelt es sich um die Systeme OmniSTAR 8200 HP (Seriennummer: 108532) sowie 8300 HP (Seriennummer: 777246) des Anbieters OmniSTAR B.V. (siehe Abb. 1). Baugleiche Instrumente hätten auch direkt von den Ori-

ginalherstellern Trimble bzw. Novatel bezogen werden können. Die Empfänger sind zweifrequenzfähig, verfügen über 24 Kanäle und werten sowohl Code- als auch Phasenmessungen aus. Bei den Antennen handelt es sich um L1/L2/L-Band-Antennen, die neben den GPS-Sig-



Abb. 1: OmniSTAR 8200 HP (oben) und 8300 HP (unten) mit Antennen

ginalherstellern Trimble bzw. Novatel bezogen werden können. Die Empfänger sind zweifrequenzfähig, verfügen über 24 Kanäle und werten sowohl Code- als auch Phasenmessungen aus. Bei den Antennen handelt es sich um L1/L2/L-Band-Antennen, die neben den GPS-Sig-

3 Technische Konzeption der Studie

Kern der praktischen Untersuchungen war die Realisierung eines Soll-Ist-Vergleichs. Für die Bestimmung der dazu notwendigen Sollpositionen musste deshalb parallel zu den Prüflingen ein Vergleichssystem betrieben werden. Im Rahmen der Studie wurde eine Messanlage entwickelt, die zum einen die Prüflinge und zum anderen die Geräte eines ebenfalls auf Satellitennavigation basierenden Vergleichssystems umfasst. Der schematische Aufbau dieser Mess-

anlage ist in Abb. 2 zu sehen.

Die Prüflinge sind dort durch eine hellblaue, die Komponenten des Vergleichssystems durch eine hellgrüne Farbgebung kenntlich gemacht. Bei den Vergleichsgeräten handelt es sich um Zweifrequenz-GNSS-Empfänger

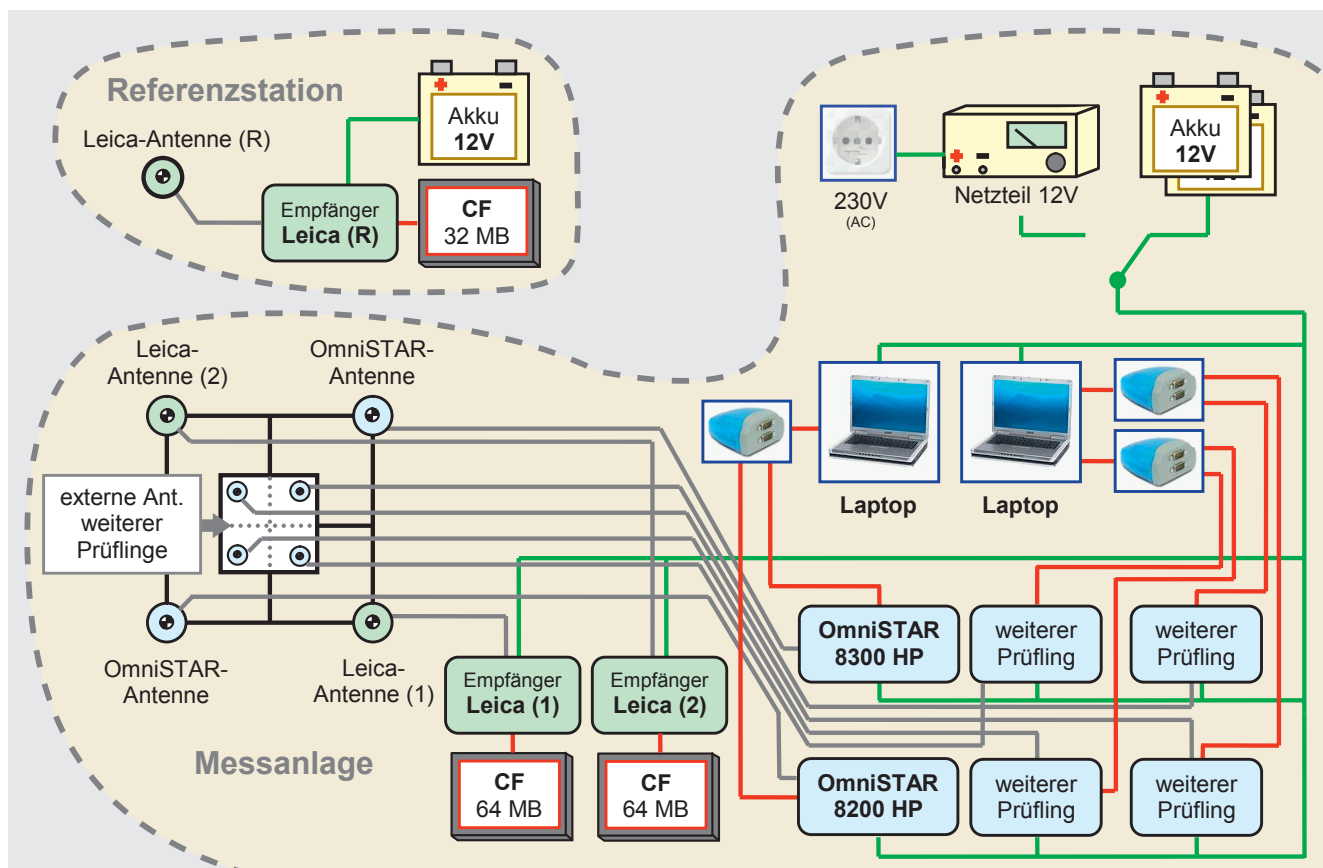


Abb. 2: Schematischer Aufbau der Messanlage

der 1200er-Serie von Leica Geosystems. Die Antennen der Prüflinge sowie zweier Vergleichsgeräte wurden auf einen gemeinsamen Antennenrahmen (Antennenbasis) montiert. Die geometrische Zuordnung der Antennen auf der Antennenbasis wurde mit hoher Genauigkeit in einem lokalen Koordinatensystem (Antennenbasissystem) bestimmt. Mithilfe der Koordinaten im Antennenbasissystem wird der räumliche Bezug zwischen den Prüflingen



Abb. 3: Statischer Betrieb der Messanlage in Mali (links), Messfahrzeug (rechts)

und den Vergleichsgeräten hergestellt. So können anhand der Positionen der beiden Vergleichsgeräte »Sollkoordinaten« für jeden Prüfling ermittelt werden. Zusätzlich zu den beiden OmniSTAR-Systemen wurden vier weitere Prüflinge in die Messanlage integriert, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.

Die Bestimmung der Koordinaten für die beiden Vergleichsgeräte auf der Antennenbasis erfolgte im Postprocessing durch präzise DGPS-Auswertungen (PDGPS) unter Benutzung der Software »Leica Geo Office«. Voraussetzung hierfür war jeweils das Vorliegen der rohen Beobachtungsdaten einer in der Nähe befindlichen Referenzstation, die parallel zu allen Messungen betrieben wurde. Somit mussten bei jeder Messkampagne auch die Koordinaten der lokalen Referenzstation ermittelt werden. Die Bestimmung dieser Koordinaten fand ebenfalls im Rahmen von PDGPS-Auswertungen statt. Der Anschluss erfolgte an die umliegenden Stationen des International GNSS Service (IGS) oder des EUREF Permanent Netzwerks (EPN). Für diese Auswertung fand die wissenschaftliche Auswertesoftware »Bernese« Verwendung. Die Koordinaten der Referenzstation wurden im Bezugsrahmen ITRF2000 des International Terrestrial Reference Systems (ITRS) bestimmt, den während des Zeitraums der Durchführung der Studie auch OmniSTAR nutzte. Aus der beschriebenen Vorgehensweise bei der Auswertung des Vergleichssystems resultieren für die ermittelten Sollpositionen Messunsicherheiten von etwa 2 cm für die Lage und etwa 5 cm für die Höhe bei einem Vertrauensniveau von 95 %.

Während der Messungen wurden die rohen Beobachtungsdaten der Vergleichsgeräte aufgezeichnet. Da für die Prüflinge die Genauigkeit der Echtzeit-Positionierung zu untersuchen war, wurden die in Echtzeit ausgegebenen Positionen im NMEA-Datenformat bzw. in Form proprietärer Datenstrings auf Laptops aufgezeichnet, siehe Abb. 2. Die statischen Messungen erfolgten in der Regel auf einem Stativ mit horizontaler Antennenbasis (siehe Abb. 3 links). Für die kinematischen Messungen wurde die Antennenbasis auf ein Fahrzeugdach montiert (siehe Abb. 3 rechts). Da hier eine Horizontierung nicht möglich war, wurde im Rahmen der Auswertung eine Längsneigung des Fahrzeuges berücksichtigt.

4 Exemplarische Ergebnisse

Anhand vier ausgewählter Messungen wird das typische Verhalten von OmniSTAR HP aufge-

zeigt. Für OmniSTAR HP ist besonders das Konvergenzverhalten charakteristisch. Da auch der XP-Dienst und der kombinierte Dienst HP+ dieses Einlaufverhalten aufweisen, gelten viele Aussagen auch für diese beiden Messmodi.

4.1 Beispiel einer Langzeitmessung

Das Beispiel in Abb. 4 zeigt eine 24-Stunden-Messung des Prüflings OmniSTAR 8300 HP, die in Greding (Bayern) durchgeführt wurde. Die Messung erfolgte unter nahezu idealen, insbesondere abschattungsfreien Bedingungen. Die Zeitreihen zeigen die resultierenden Abweichungen gegenüber dem Soll in der Nord-Süd- und Ost-West-Komponente sowie in der Höhe. Der untere Graph gibt die Anzahl der verwendeten Satelliten (blau) und den jeweiligen Positionsstatus (grün) wieder. Im Falle des Prüflings 8300 HP wurde ein Datenstring ausgewertet, der nur HP- oder XP-Positionen angibt, sofern diese vorhanden sind. Es ist zu sehen, dass fast durchgehend HP-Positionen verfügbar waren (Status 2). Nur während vereinzelter Epochen hat der Prüfling auf die Ausgabe von XP-Positionen umgeschaltet (Status 1). Datenlücken lagen während dieser Messung nicht vor. Der untere Graph enthält zudem die für alle vier Graphen gültige Zeitskala. Diese gibt die fortlaufende Epochenummer sowie die Zeit seit dem Einschalten des Empfängers an. Zudem ist der Anfangs- und Endzeitpunkt (UTC) eingetragen.

Die HP-Messungen können erst dann genutzt werden, wenn die Initialisierung des HP-Prozesses hinreichend abgeschlossen bzw. wenn der Prozess hinreichend konvergiert ist. Um diesen Zeitpunkt zu ermitteln, stehen

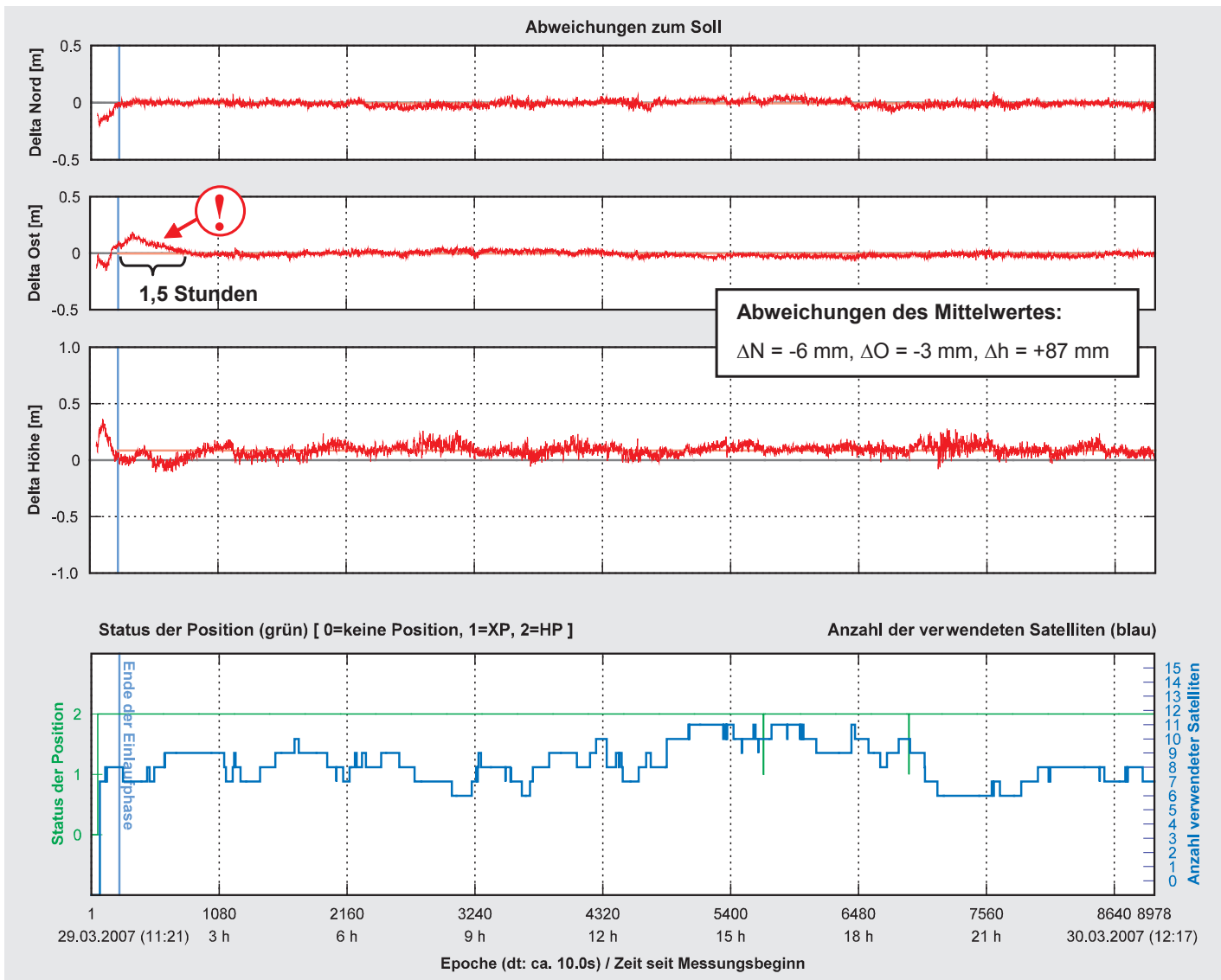


Abb. 4: Statische 24-Stunden-Messung in Greding (Bayern) – OmniSTAR 8300 HP

dem Anwender im Felde nur die vom Empfänger ausgegebenen Genauigkeitsmaße zur Verfügung. Im Verlauf dieser Studie erfolgte die Bestimmung des betreffenden Zeitpunktes deshalb ebenfalls anhand der Geräteangaben (näheres hierzu in Abschnitt 4.2). Der so ermittelte Zeitpunkt ist in Abb. 4 durch eine hellblaue Linie und den Hinweis »Ende der Einlaufphase« eingetragen. Es ist deutlich erkennbar, dass die Genauigkeit der geschätzten Positionen vor dem Ende der Konvergenzphase noch relativ schlecht war. Zudem sind besonders an der Zeitreihe der Ostabweichungen auch nach dem mutmaßlichen Ende der Einlaufphase noch deutliche Konvergenzeffekte zu erkennen. Obwohl ideale Bedingungen vorlagen, wurde im Fall dieser Beispielmessung die Konvergenzphase anhand der Geräteangaben mit 40 Minuten um etwa 1,5 Stunden zu kurz geschätzt, wenn man die Sollabweichungen vergleichend hinzunimmt.

Nach dem Abklingen der Konvergenzeffekte lässt diese Beispielmessung vor allem für die Lage eine sehr gute Genauigkeit erkennen. Die Lage-Abweichung des Mittelwertes fiel mit 7 mm bei dieser Messung sehr gering,

die Höhenabweichung des Mittelwertes mit 87 mm relativ hoch aus. Um einen Eindruck von der Genauigkeit der Einzelpositionen zu bekommen, die nach dem geschätzten Ende der Einlaufphase (blaue Markierung in Abb. 4) aufgezeichnet wurden, bieten sich die Histogramme der Beträge der Lage- und Höhenabweichungen an (Abb. 5).

Zusätzlich zu den Histogrammen stellt Abb. 5 auch die Summenhäufigkeitsfunktionen dar, anhand derer Näherungswerte z.B. für die 95-Prozent-Genauigkeiten abgegriffen werden können. Bei einem Vertrauensniveau von ca. 97% betrug die Lagegenauigkeit hier 8 cm, die Höhengenaugkeit 18 cm bei einem Vertrauensniveau von ca. 95%. OmniSTAR spezifiziert bei einem Vertrauensniveau von 95% Genauigkeiten von 10 bzw. 15 cm. Bedenkt man, dass bei dieser Bewertung auch die Sollkoordinaten mit Ungenauigkeiten behaftet sind, lässt sich die Aussage treffen, dass die Genauigkeitsspezifikationen des HP-Dienstes bei dieser Messung bezüglich der Höhe etwa erfüllt, bezüglich der Lage sogar unterschritten wurden.

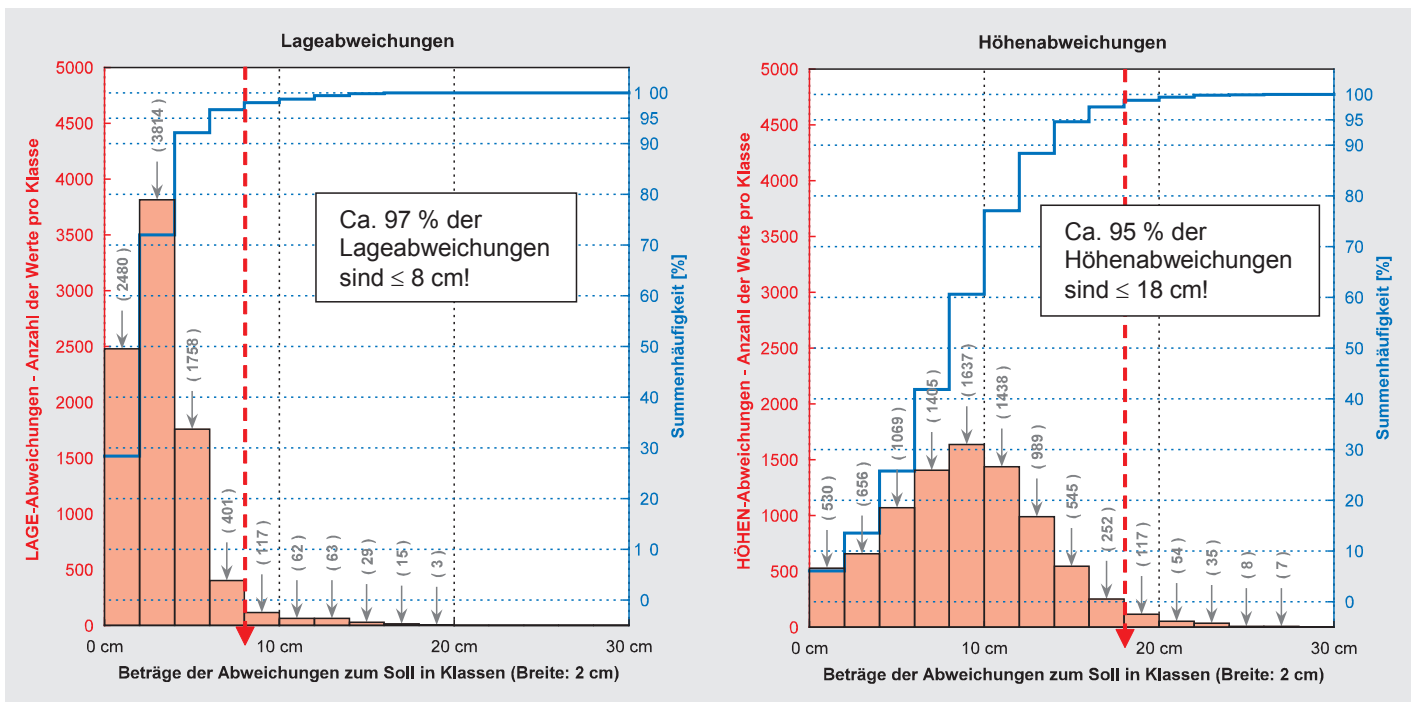


Abb. 5: Histogramme und Summenhäufigkeiten der 24-Stunden-Messung in Greiding

4.2 Beispiel für starke systematische Abweichungen

In diesem Beispiel wird eine statische Messung des Prüflings 8300 HP von etwa 80 Minuten Dauer diskutiert, die ebenfalls unter günstigen Abschattungsbedingungen stattfand. Einige Ergebnisse sind in Abb. 6 zusammengefasst. Der mittlere Block der dargestellten Graphen zeigt die Abweichungen gegenüber dem Soll. Beim oberen Block handelt es sich um Darstellungen der vom Prüfling geschätzten Genauigkeitsangaben für Lage und Höhe. Bei der Betrachtung der Graphen muss beachtet werden, dass für die Darstellung der geschätzten Genauigkeitsangaben und der Sollabweichungen unterschiedliche Maßstäbe gewählt wurden. Die Genauigkeitsangaben sind vor allem unter dem Gesichtspunkt zu betrachten, den Zeitpunkt des Endes der Einlaufphase zu ermitteln. Folgende Genauigkeitsmaße sind abgebildet:

Für die Lage (1. Graph): $DRMS = \sqrt{\sigma_{Nord}^2 + \sigma_{Ost}^2}$
(Distance Root Mean Square)

Für die Höhe (2. Graph): $\sigma_{Höhe}$

Die vom Prüfling gemachten Angaben sind 1-Sigma-Genauigkeiten. OmniSTAR spezifiziert seine Genauigkeiten hingegen mit einem 95% Vertrauensniveau (2-Sigma-Level). Somit entspricht – vereinfacht betrachtet – eine 95-Prozent-Genauigkeit von 10 cm (Lage) bzw. 15 cm (Höhe) auf dem 1-Sigma-Level einer Standardabweichung von 5 cm (Lage) bzw. 7,5 cm (Höhe). Demnach müsste der Nutzer im Felde davon ausgehen können, dass der HP-Prozess hinreichend konvergiert ist, wenn der geschätzte DRMS unterhalb von 5 cm und die geschätzte Standardabweichung der Höhe unter 7,5 cm liegen. Dieser Zeitpunkt war gemäß Geräteangaben bei dieser Messung

nach 40 Minuten erreicht, siehe Markierung »Ende der Einlaufphase« in Abb. 6.

Die Auswertung aller Epochen nach der markierten Einlaufphase ergibt bei einem Vertrauensniveau von 95% für die Lage eine Genauigkeit von 21 cm und für die Höhe von 17 cm. Die Abweichung des Mittelwertes der ausgegebenen Positionen beträgt im Ostwert ca. 16 cm und zeigt eine deutliche systematische Abweichung von der Sollposition.

Zur Interpretation dieses Ergebnisses ist die Langzeitmessung in Abb. 4 vergleichend heranzuziehen. Dort sind noch ca. 1,5 Stunden nach dem vom Prüfling geschätzten Ende der Einlaufphase Konvergenzeffekte zu erkennen. Auch andere aufgezeichnete Messungen haben gezeigt, dass sich teilweise noch nach mehreren Stunden Konvergenzeffekte einstellen. Die in Abb. 6 dargestellten Zeitreihen von etwa 80 Minuten Länge sind daher mit hoher Wahrscheinlichkeit zu kurz, um den gesamten Konvergenzprozess betrachten zu können. Bei dieser kurzen Beobachtungszeit zeigt sich der vermutlich noch vorhandene Konvergenzspielraum als Offset. Dieses vermeintlich konstante Offset verleitet zu der Fehlinterpretation, dass die HP Positionen starke systematische Abweichungen aufweisen, nachdem der Initialisierungsvorgang bereits abgeschlossen wurde. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Genauigkeit des HP-Prozesses bei dieser Messung nach einer längeren Wartezeit weiter verbessert hätte. Dass die Konvergenzphase aufgrund der Geräteangaben zu kurz eingeschätzt wird, ist im Verlauf der vorliegenden Studie häufiger aufgetreten. Für den OmniSTAR-Nutzer ist dieses Problem im Felde nicht erkennbar.

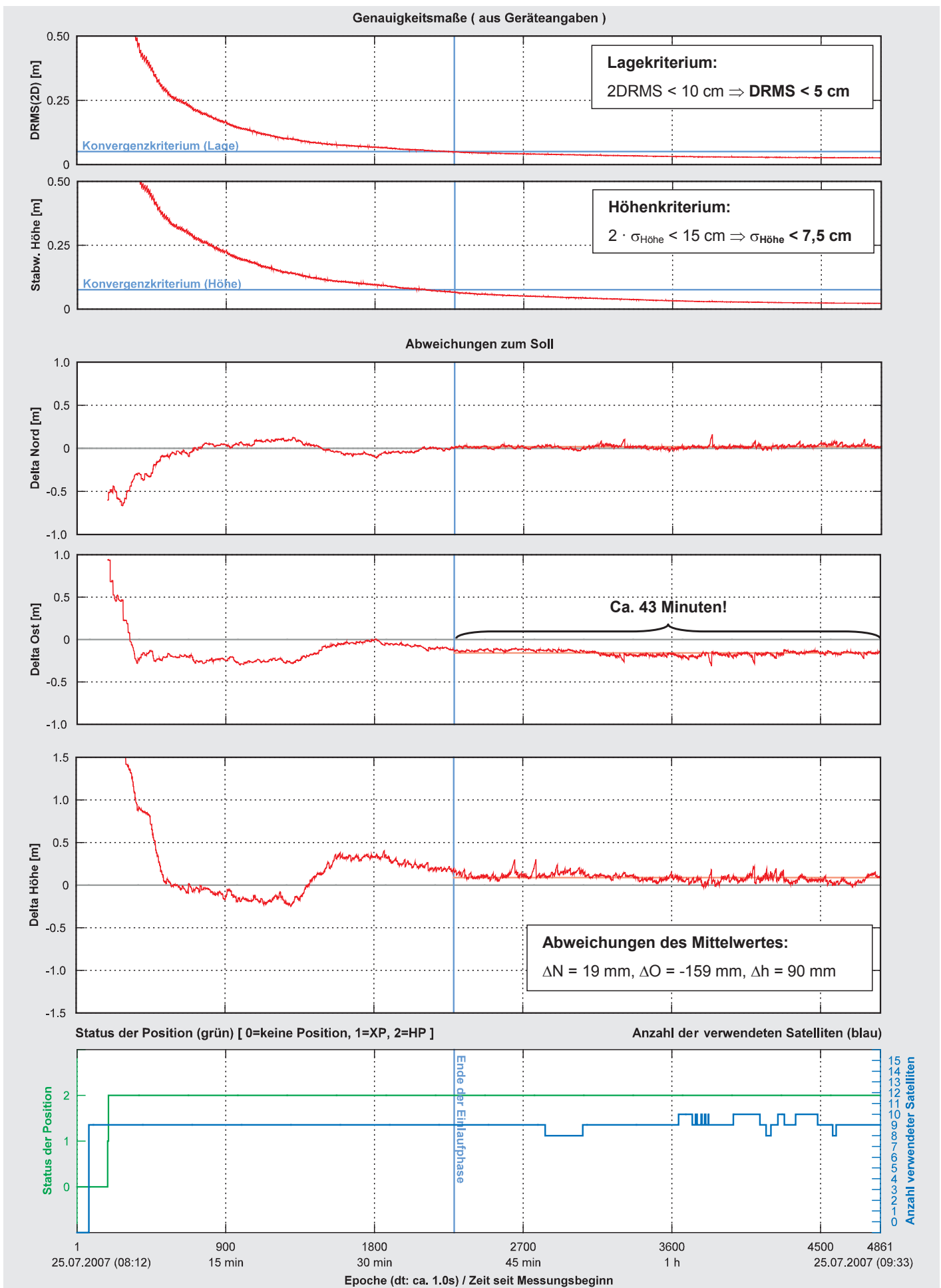


Abb. 6: Statische Messung in Euskirchen (NRW) – OmniSTAR 8300 HP

4.3 Beispiel für Unterbrechungen des Korrekturdatenempfangs

Vorgestellt wird ein Beispiel, bei dem die Auswirkungen von Unterbrechungen des Korrekturdatenempfangs gut beobachtet werden können. Es handelt sich um eine etwa zweistündige statische Messung des Prüflings 8200 HP in Nordnorwegen (Tromsø). Die geographische Breite betrug am Messort ca. 70° N. Unter diesen Bedingungen fiel das Signal des von OmniSTAR genutzten Kommunikationssatelliten unter einem Elevationswinkel von nur 12° ein. Daher war der Empfang der Korrekturdaten instabil.

In Abb. 7 sind die 3D-Abweichungen gegenüber dem Soll, das Alter der verwendeten Korrekturdaten und die vom Prüfling geschätzte Genauigkeit des HP-Prozesses dargestellt. Der untere Graph enthält die Anzahl der verwendeten GPS-Satelliten und den Positionsstatus. Für das Gerät OmniSTAR 8200 HP gibt es bezüglich des Positionsstatus verschiedene Möglichkeiten. Wenn keine Position bestimmt werden kann, wird »fix not available« ausgegeben. Der Positionsstatus »SPS« (Standard Positioning Service) bedeutet, dass eine autonome Positionierung anhand des C/A-Codes durchgeführt wurde. Der Positionsstatus »VBS« bedeutet, dass es sich um Positionen handelt, die mit dem OmniSTAR-VBS-Verfahren bestimmt sind. OmniSTAR VBS ist der von OmniSTAR angebotene Dienst, bei dem eine codebasierte differenzielle Positionsbestimmung erfolgt (Sub-Meter-Dienst). Nur Positionen mit dem Status »HP/XP« sind HP-, XP- oder HP⁺-Positionen. Bei HP-Messungen werden die verschiedenen Stati üblicherweise in der folgenden zeitlichen Reihenfolge ausgegeben: »fix not available«, »SPS«, »VBS«, »HP/XP«. Nach einer kurzen Phase, in der keine Positionen zur Verfügung stehen, ist anfangs nur die Bestimmung von SPS-Positionen möglich. Sobald Korrekturdaten eintreffen, können sofort VBS-Positionen berechnet werden. Nach einer längeren Konvergenzphase – in diesem Beispiel von über einer Stunde – ist die Genauigkeit der HP/XP-Positionen besser als die der VBS-Positionen. Ab diesem Zeitpunkt werden dann HP/XP-Positionen ausgegeben. Der betreffende Zeitpunkt ist in Abb. 7 durch die gestrichelte Linie (1) hervorgehoben. Erst die ab dieser Linie ausgegebenen Abweichungen zum Soll beziehen sich tatsächlich auf HP-Positionen. Der Graph mit den geschätzten Genauigkeitsangaben (MRSE) bezieht sich hingegen während der gesamten Messung auf den HP-Prozess.

Im Fall von Unterbrechungen des Korrekturdatenempfangs ist die Dauer von großer Bedeutung. Bei kürzeren Korrekturdatenausfällen bis zu maximal fünf Minuten bleibt die HP-Lösung weiterhin gültig, jedoch verschlechtert sich die Positionsbestimmung kontinuierlich. Wenn eine HP-Lösung nach einer längeren Unterbrechung für ungültig erklärt wurde, muss der HP-Prozess bei Eintreffen neuer Korrekturdaten neu gestartet werden (Visser

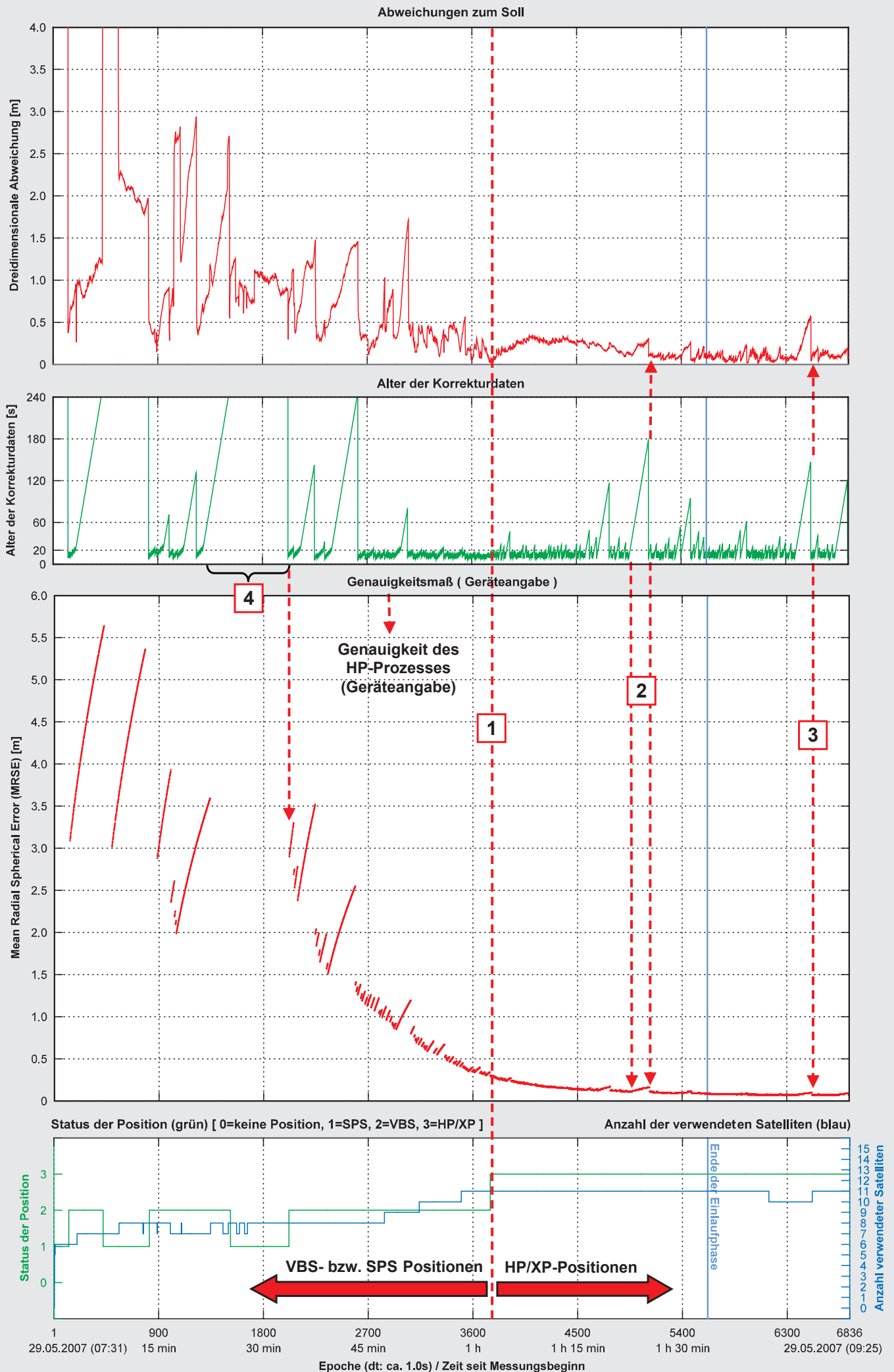
2006). Bei dem in Abb. 7 markierten Bereich 2 handelt es sich um einen dreiminütigen Korrekturdatenausfall, der überbrückt wurde, ohne dass dabei die HP-Lösung verloren ging. Während des betreffenden Zeitraums verschlechterte sich die vom Empfänger geschätzte 3D-Genauigkeit etwa proportional zum Alter der Korrekturdaten. Auch die Abweichungen gegenüber dem Soll zeigen eine zunehmende Verschlechterung.

Die Markierung 3 weist auf einen Bereich hin, in dem für zweieinhalb Minuten keine Korrekturdaten empfangen wurden. Hier ist eine ausgeprägte Diskrepanz zwischen der vom Gerät geschätzten Genauigkeit und den Abweichungen zum Soll erkennbar. Während sich die geschätzte 3D-Genauigkeit (MRSE, ca. 61% Vertrauensniveau) in diesem Zeitintervall unterhalb von 10 cm bewegte, stiegen die Abweichungen gegenüber dem Soll etwa proportional zum Korrekturdatenalter auf über 50 cm an. Dieses Beispiel ist ein weiteres Indiz dafür, dass die realen Verhältnisse von den geschätzten Genauigkeitsangaben der Geräte häufig unzutreffend beschrieben werden. Die Abweichungen gegenüber dem Soll lassen jedoch in beiden Fällen deutlich erkennen, dass das Genauigkeitsniveau vor Beginn des Korrekturdatenausfalls beim erneuten Eintreffen von Korrekturdaten sofort wieder hergestellt war. Der HP-Prozess ist während des Korrekturdatenausfalls weiterhin konvergiert.

Die Markierung (4) zu Beginn der Messung deutet auf eine zwölfminütige Phase hin, innerhalb der keine Korrekturdaten vorlagen. Der Zeitreihe zur geschätzten Genauigkeit des HP-Prozesses ist zu entnehmen, dass die HP-Lösung nach einer Weile für ungültig erklärt und der HP-Prozess abgebrochen wurde. Zum Zeitpunkt des erneuten Eintreffens von Korrekturdaten startete der Prozess erneut. Während der gesamten Unterbrechungsphase wurden nur SPS- und VBS-Positionen ausgegeben, da der HP-Konvergenzprozess noch nicht sehr weit fortgeschritten war.

4.4 Beispiel für eine unzureichende Anzahl an GPS-Beobachtungen

Dieses vierte Beispiel behandelt eine kinematische Messung des Prüflings OmniSTAR 8300 HP, die in Euskirchen (Nordrhein-Westfalen) durchgeführt wurde. Die Route der Messfahrt verlief auf Feldwegen mit nur geringen Abschattungen des Horizonts. Vereinzelt und kurzzeitig waren beide Seiten des Weges durch Vegetation beeinträchtigt. Abb. 8 zeigt Ausschnitte aus den Zeitreihen dieser Messfahrt. Es handelt sich um die 3D-Abweichungen zum Soll (oben), die vom Empfänger geschätzte 3D-Genauigkeit (MRSE), den »Solution Status« des HP-Prozesses und die Anzahl der verwendeten Satelliten. Der untere Graph enthält ebenso wie die Zeitreihen der anderen Beispiele die Stati der ausgegebenen Positionen sowie zusätzlich die Geschwindigkeit des Messfahrzeugs. Die Messungen wurden nach einer längeren statischen Einlaufphase



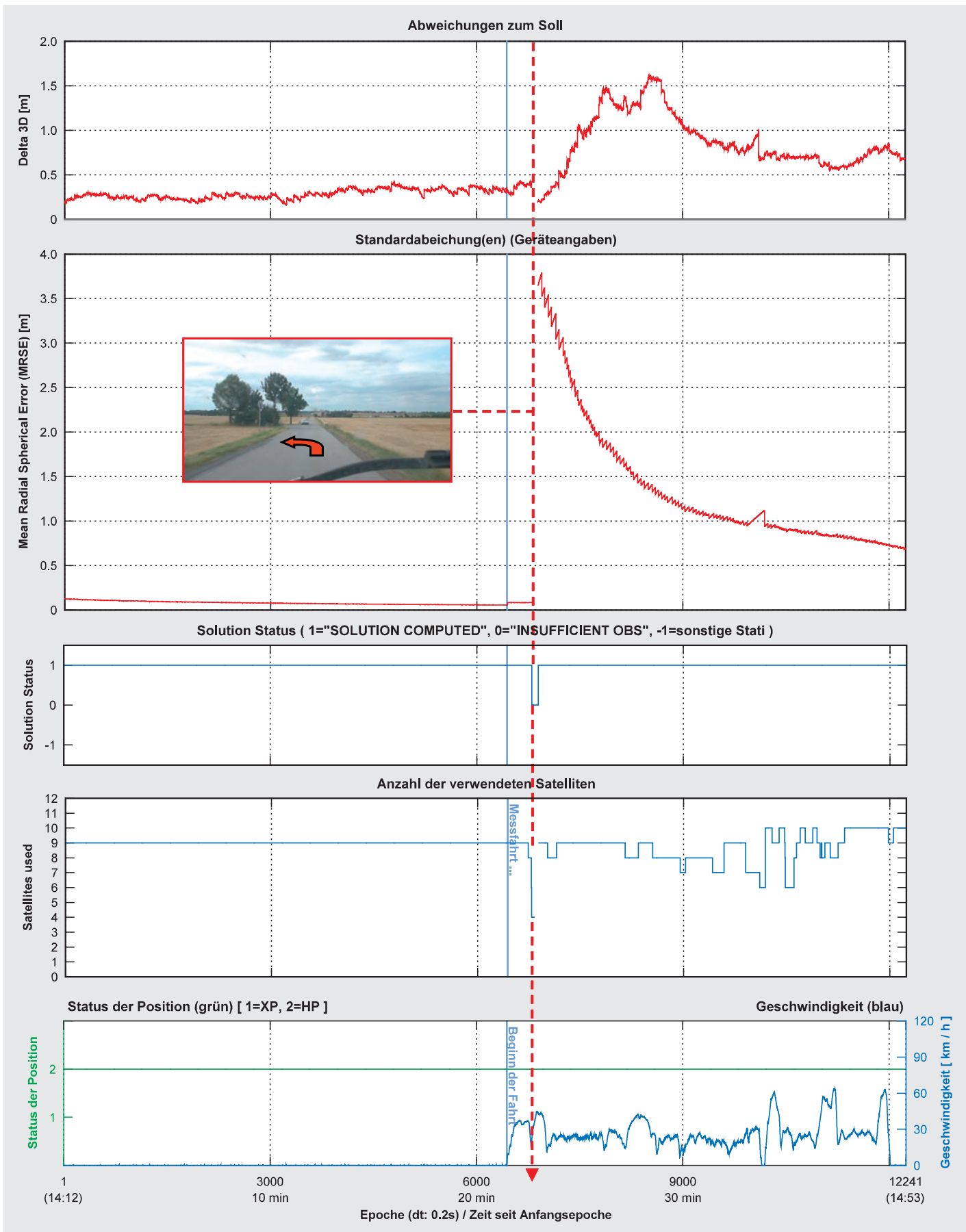


Abb. 8: Kinematische Messung in Euskirchen (NRW) – OmniSTAR 8300 HP

◀ Abb. 7: Statische Messung in Nordnorwegen – OmniSTAR 8200 HP

(ca. 52 Minuten) begonnen, die hier nicht vollständig wiedergegeben ist. Zum Ende der mit »Beginn der Messfahrt« markierten Einlaufphase war das spezifizierte Genauigkeitsniveau des HP-Dienstes laut Geräteangaben erreicht. Auf die statische Einlaufphase folgte dann die ungefähr zwanzigminütige Messfahrt.

Gleich nach Beginn gelangte das Messfahrzeug zu einer T-Kreuzung, an der sich eine kleine Baumgruppe befand (siehe Abb. 8). Hier bog das Messfahrzeug links ab (siehe Pfeil), wobei die Baumgruppe durchquert wurde und somit der Horizont der Antennenbasis für wenige Sekunden abgeschattet war. Die Anzahl der verwendeten Satelliten sank an dieser Stelle kurzzeitig. Aufgrund der kurzen Abschattungsphase konnten für einen Zeitraum von etwa 20 Sekunden keine HP-Positionen bestimmt werden. Die Anzahl der verwendbaren GPS-Satelliten war für die Positionsbestimmung mit OmniSTAR HP offenbar zu gering. Im betreffenden Zeitraum nahm der »Solution Status« den Wert »INSUFFICIENT OBS« an – zu wenige GPS-Beobachtungen für die Positionsbestimmung.

Bemerkenswert ist dabei, dass die HP-Lösung nach dieser kurzen Störung bereits ungültig geworden war. Als wieder genügend GPS-Signale vorlagen, musste der HP-Konvergenzprozess von neuem beginnen – dies ist in der Zeitreihe der vom Empfänger geschätzten Genauigkeit sehr gut zu sehen (2. Graph in Abb. 8). Da der HP-Einlaufprozess zeitaufwendig ist, konnte eine hinreichende Konvergenz während dieser Messfahrt nicht mehr erreicht werden. Deshalb bewegt sich die Genauigkeit aller Positionen, die nach der Störung ausgegeben wurden, im Meterbereich. Um nach Durchqueren der Baumgruppe weiterhin präzise Positionsbestimmungen auf Dezimeter-Level durchführen zu können, hätte eine erneute Initialisierung erfolgen müssen. Da es sich um eine fahrzeuggebundene kinematische Messung handelt, wäre eine verkürzte Kick-Start-Initialisierung, siehe erster Teil des Aufsatzes, nicht durchführbar gewesen.

5 Beurteilung des HP-Dienstes

Um eine repräsentative Aussage über die Genauigkeit des Dienstes OmniSTAR HP machen zu können, wurden statische Langzeitmessungen herangezogen, die in Deutschland, Norwegen und Südafrika stattfanden. Messungen aus Mali wurden hierbei nicht genutzt, da die Entfernung zum Fugro-Referenzstationsnetz größer war als es die Spezifikationen zulassen. Bei allen Messungen war der Grad der Abschattung des Horizontes gering, Multipath-Effekte dürften in den resultierenden Genauigkeitsangaben nur geringfügig enthalten sein. Die Positionsangaben aller Einlaufphasen wurden ausgeschlossen. Es erfolgte die Bestimmung der Schwellwerte, unterhalb derer 95 % der Beträge der Lage- bzw. Höhenabweichungen liegen.

Aus den so ermittelten Genauigkeitsangaben wurden abschließend Mittelwerte gebildet, die in Tab. 1 (linke Spalte) zusammengestellt sind.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse in Tab. 1 muss berücksichtigt werden, dass auch den Sollkoordinaten ge-

Tab. 1: Ermittelte Messunsicherheit des HP-Dienstes

Messunsicherheit (95 %) [cm] ...			
... der Einzelmessung		... eines 24-Stunden-Mittelwertes	
Lage	Höhe	Lage	Höhe
10,7	16,9	4,4	8,6

ringe Unsicherheiten anhaften. Deshalb kann die Aussage getroffen werden, dass die geringen Überschreitungen der spezifizierten Messunsicherheit des HP-Dienstes nicht signifikant sind. Die 95-Prozent-Genauigkeitsspezifikationen des HP-Dienstes von 10 cm in der Lage bzw. 15 cm in der Höhe wurden somit erfüllt. Voraussetzung für das Erreichen dieser Genauigkeit ist jedoch, dass eine hinreichende Initialisierung stattgefunden hat bzw. dass nennenswerte Konvergenzeffekte vor der Durchführung von Messungen bereits abgeklungen sind. Im kinematischen Betrieb ist keine Verschlechterung in der Genauigkeit der Positionsbestimmung aufgefallen. Daher gelten die ermittelten Genauigkeiten ebenso wie die Genauigkeitsspezifikationen des HP-Dienstes sowohl für den statischen als auch für den kinematischen Betrieb – gute Empfangsbedingungen vorausgesetzt. Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse zeigte sich weiterhin, dass sich die lokalen Umgebungsbedingungen, insbesondere Abschattungen, wesentlich stärker auswirken als die globale Variation des Messortes.

Die höchstmögliche Genauigkeit wird durch Bildung eines Langzeitmittels erreicht. Auch für die 24-Stunden-Messungen oder vielfache davon wurden daher die 95-Prozent-Genauigkeitsangaben ermittelt. Sie sind in Tab. 1 (rechte Spalte) angegeben. Durch eine 24-Stunden-Mittelbildung lässt sich die Messunsicherheit der resultierenden Positionen in der Regel etwa halbieren.

Im Zusammenhang mit HP/XP/HP⁺-Messungen ist es von besonderem Interesse, dass die Konvergenzphase hinreichend abgeschlossen wurde, um das spezifizierte Genauigkeitsniveau zu erreichen. Hierfür stehen dem Nutzer ausschließlich die von den Empfängern ausgegebenen Genauigkeitsangaben zur Verfügung. Die folgende Tab. 2 enthält die minimale, maximale sowie die durchschnittliche Dauer der Einlaufphasen, die im Rahmen dieser Studie ermittelt wurden. Das Vorgehen bei der Festlegung der Einlaufzeiten wurde in Abschnitt 4.2 beschrieben. Die Messungen, die für die Erstellung von Tab. 2 herangezogen wurden, fanden unter verschiedensten Abschattungsbedingungen statt. Aus der Tabelle geht hervor, dass die statische Initialisierung des HP-Prozesses laut Empfängerangaben durchschnittlich 46 Minuten be-

nötigt. Im Verlauf der Untersuchungen wurde festgestellt, dass diese Angaben in der Regel zu optimistisch sind. Dementsprechend können die realen Konvergenzphasen erheblich länger dauern (siehe Abschnitt 4.2).

Tab. 2: Dauer der statischen HP-Initialisierung laut Geräteangaben

Dauer der statischen Initialisierung laut Geräteangaben [min]	
Minimum	27
Durchschnitt	46
Maximum	81
Anmerkungen:	
■ Kriterium: Initialisierung beendet, wenn $2DRMS \leq 10 \text{ cm}$ und $2 \cdot \sigma_{\text{Höhe}} \leq 15 \text{ cm}$	
■ Kaltstarts mit OmniSTAR 8300 HP (Löschung gespeicherter Ephemeriden)	

Im ersten Teil dieses Aufsatzes sowie in den hier behandelten Beispielen wurde darauf hingewiesen, dass es im Wesentlichen zwei Ursachen für Störungen des Konvergenzprozesses gibt:

- Unzureichende Anzahl an verfügbaren GPS-Beobachtungen;
- Unterbrechung des Korrekturdatenempfangs.

Einen gravierenden Einschnitt in den Messablauf stellen Störungen durch eine unzureichende Anzahl an Satellitenbeobachtungen dar. Bereits kurze Unterbrechungen können dazu führen, dass das erreichte Konvergenzniveau vollständig verloren geht (siehe Abschnitt 4.4). Unterbrechungen des Korrekturdatenempfangs sind weniger kritisch. Sie betreffen nur den Zeitraum der Unterbrechung. Nach dem Ende der Unterbrechung ist das vor der Störung erreichte Konvergenzniveau unmittelbar wieder hergestellt. Nur längere Unterbrechungen des Korrekturdatenempfangs (ab etwa fünf Minuten) führen ebenfalls zu einem Verlust der HP-Lösung. Es wird nochmals darauf hingewiesen, dass bei Vorliegen eines Punktes mit bekannten Koordinaten (Seed-Point) die Durchführung einer Kick-Start-Initialisierung möglich ist. Dadurch ist zum einen die Verkürzung der zeitaufwendigen Initialisierung vor Beginn der Messtätigkeiten möglich, zum anderen kann mittels der Kick-Start-Initialisierung nach Auftreten einer Störung eine schnelle Reinitialisierung erfolgen.

Für kinematische (fahrzeuggebundene) Anwendungen ist OmniSTAR HP nur bedingt geeignet. Falls das erreichte Konvergenzniveau nach Auftreten einer Störung verloren gegangen ist, besteht hier normalerweise nicht die Möglichkeit einer Kick-Start-Initialisierung. Deshalb sind alle nach einer solchen Störung ausgegebenen Positionen von schlechter Genauigkeit (siehe Abschnitt 4.4). Um das vor

der Störung vorliegende hohe Genauigkeitsniveau wiederzuerlangen, fallen lange Wartezeiten an. Bei kinematischen Anwendungen (z.B. Precision Farming, Mobile Mapping) ist OmniSTAR HP deshalb nur dann zu empfehlen, wenn Empfangsstörungen ausgeschlossen werden können.

Zur abschließenden Beurteilung der Leistungsfähigkeit der OmniSTAR-Dienste ist zu bedenken, dass der Betreiber die Dienste ständig verbessert und erweitert. Seit Anfang 2009 wird die Integration von GLONASS verstärkt ausgeweitet. Verbesserungen der Initialisierungszeiten, Genauigkeiten sowie der Verfügbarkeit sind zu erwarten.

6 Fazit

Positionierungsdienstleister wie beispielsweise Fugro OmniSTAR bieten heute global Echtzeit-Positionslösungen im Dezimeter-Bereich an. Für den OmniSTAR HP-Dienst konnte gezeigt werden, dass solche Genauigkeitsspezifikationen tatsächlich auch erreicht werden, allerdings nur nach entsprechend langer Initialisierungszeit und bei nicht eingeschränkten Empfangsbedingungen. Die korrekte Beurteilung der Zuverlässigkeit einer Positionsschätzung durch den Nutzer anhand der im Empfänger ermittelten Kenngrößen stellt nach wie vor ein ungelöstes Problem dar.

Danksagung

Herr Dipl.-Ing. Andreas Pflugmacher ist am 12. Juni 2009 im Alter von 32 Jahren verstorben. Herr Pflugmacher war Mitarbeiter am Institut für Geodäsie seit September 2006. Für seine hervorragenden Arbeiten im Projekt OmniSTAR gilt ihm unser aufrichtiger Dank.

Literatur

Die Literaturangaben befinden sich im 1. Teil dieses Aufsatzes (zfv 134, 3/2009, S. 131–140)

Anschrift der Autoren

Prof. Dr.-Ing. habil. Hansbert Heister
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke
Dipl.-Ing. (FH) Thomas Kerraschk (Projektmitarbeiter bis 31.8.2008)
Dipl.-Ing. Andreas Pflugmacher (†)
Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

h.heister@unibw.de
otto.heunecke@unibw.de