

Positionierungsverfahren für Sohlgrundvermessungen alpiner Flussläufe unter Verwendung von GPS und zielverfolgenden Servotachymetern

Erwin HEINE

Kurzfassung

Die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie und der Schutz vor Hochwasserkatastrophen erfordern auch für Nebenflüsse eine ständige Überwachung der Morphologie von Gewässersohlen. Aufgrund der topografischen Eigenheit derartiger Flussläufe – geringe Breite, steile Uferböschungen und weit in den Flusslauf hineinreichende Überschirmung durch Uferbewuchs - sind hydrografischen Vermessungssysteme, wie sie für die Seegrundvermessung oder auch Vermessung großer Ströme existieren, nicht einsetzbar. Strömungsturbulenzen und Hindernisse im Flusslauf erfordern den Einsatz von kleinen und wendigen Messbooten. Im folgenden Beitrag wird ein kombiniertes RTK/TPS-System zur Bestimmung der hochfrequenten und un stetigen Trajektorie des Messbootes sowie ein Verfahren zur Integritätsprüfung des Systems vorgestellt. Ergebnisse im Hinblick auf erreichbare Genauigkeiten werden diskutiert.

Abstract

For the implementation of the EU-Water Framework Directive and for the realisation of regional flood protection facilities a permanent monitoring of the topographical and the morphological situation of river beds is required – including the monitoring of small rivers. Due to the specific topography of small rivers, conventional hydrographical surveying systems - normally used for bathymetry in bays or large rivers - cannot be applied for the riverbed monitoring. Narrow stream courses and steep embankments on the one hand as well as turbulent flows on the other hand require the use of small and flexible survey vessels. In this paper a combined GPS/TPS-positioning system for the acquisition of the high-frequency and discontinuous trajectory of the vessel is presented. A method for the integrity check of the registered positions is introduced and results regarding the accuracy of the system are discussed.

1. Einleitung und Problemstellung

1.1. Hydraulischen Modellierung und hydrographische Vermessung

Im Jahre 2003 erfolgte die Implementierung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRR) in nationales Recht. Deren Umsetzung in den kommenden Jahren und Jahrzehnten verfolgt unter anderem die Verbesserung des Zustandes aquatischer Ökosysteme sowie die Minderung der Auswirkungen von Überschwemmungen. Voraussetzung für eine erfolgreiche Realisierung ist vor allem die Bereitstellung geeigneter Modelle zur Simulation der Maßnahmen – Wirkung -Beziehung. Die dabei zum Einsatz kommenden mehrdimensionalen Simulationsmodelle (Hydraulische-, Morphologische- und Habitatsmodelle) erfordern sowohl ein quantitativ dichtes als auch qualitativ hochwertiges Netz an Geodaten. Der Erfassung der morphologischen Bedingungen, wie etwa der Variation von Breiten und Tiefen, der Struktur des Flussbettes und der Uferzone, kommt dabei eine besondere Bedeutung zu [Mayr, 2003].

Ein hydrographisches Vermessungssystem besteht im Wesentlichen aus einem Echolot und einem Positionierungssystem, welches die Tiefenmessungen verortet. Heutzutage erfolgt die Verortung meist mit GPS oder zielverfolgenden Servotachymetern („Topographisches Positionierungssystem“ TPS), welche in Echtzeit die Verknüpfung der Trajektorie mit den simultan erfassten Daten des Lotungssystems ermöglichen. Die Qualität der

Sohlgrundaufnahme wird dabei wesentlich durch die Stabilität und Stetigkeit der Messplattformen in Bezug auf Bewegungsgeschwindigkeit und Bewegungsrichtung beeinflusst [Tietze und Schmitz 2000].

1.2. Ortungssysteme von Messschiffen

Die Entwicklungen auf dem Gebiet der kinematischen Trajektorienbestimmung mittels Multisensorsystemen [siehe dazu Grün und Kahmen, 2001] führten dazu, dass seit einigen Jahren bei der kinematischen Vermessung des Sohlgrundes größerer Flüsse (wie etwa des Rheins oder der Donau) zielverfolgende Servotachymeter oder RTKGPS-Messsysteme gestützt durch weitere Sensoren eingesetzt werden [Köhler und Arth, 2003]. Die Integration zusätzlicher Sensoren, wie Richtungssensoren (elektronischer Kompass), Neigungs- und Bewegungssensoren (Gyroskop) und Beschleunigungssensoren (INS), erlaubt auch in Gebieten mit kurzzeitig schlechter GPS-Signalqualität eine auf wenige cm-genaue Bestimmung der Trajektorien.

Solcherart ausgestattete Vermessungsschiffe sind in ihrem Einsatz aufgrund ihrer Größe und ihres Tiefganges jedoch auf Meeresbuchten, Hafenbecken oder entsprechend große Binnenseen und Flüssen beschränkt. Außerdem unterscheidet sich das Beschleunigungs- und Bewegungsverhalten von tonnenschweren Vermessungsschiffen grundlegend von einem sich auf dem Fluß befindlichen Boot mit Außenbordmotorantrieb. Daraus ergibt sich, dass kleinere Fahrzeuge mit schnellen Bewegungen für diese Ortungssysteme weniger geeignet sind [Andree et al., 2000].

1.3. Spezielle Anforderungen kleiner Flussläufe

1.3.1. Hochfrequente Bewegung um die Bootsachsen

Die Sohlgrundvermessung erfolgt auf kleinen Flüssen vornehmlich durch Messung von Querprofilen. Dabei bewegt sich das Boot im Seilfährenstil von einem Ufer zum anderen. Große Strömungsgeschwindigkeiten verbunden mit geringer Wassertiefe und unebener Sohle verursachen Stromschnellen und führen zu starken Bewegungen um die Querachse (Stampfen), die Längsachse (Rollen) und um die Hochachse (Gieren) des Bootes. Auch bei nur geringen Wassertiefen dürfen diese Bewegungen nicht vernachlässigt werden. So verursacht eine Rollbewegung von nur 10° bei einer Wassertiefe von 2.5 m bereits einen Tiefenmessfehler von 5 cm und einen Versatz der kreisförmigen Messfläche am Sohlgrund von 44 cm, d.h. die Tiefenmessung findet schräg und an einer falschen Stelle statt. Befindet sich der Positionsempfänger (GPS-Antenne oder TPS-Prisma) nun 2 m über der Schiffsachse, so ergibt dies zusätzlich noch einen Positionierungsfehler von 35 cm in der Lage. Für genaue Sohlgrundvermessungen ist es also notwendig, die Bewegungen zu registrieren und bei Bedarf zu korrigieren.

1.3.2. Unstetiger Beschleunigungs- und Bewegungsverlauf

Felsblöcke nahe unter der Wasseroberfläche und der zur Ufer- oder Sohlgrundsicherung verwendete Blockwurf (große Felsblöcke) stellen eine Behinderung für die Messfahrt dar (Abb.1). Das Messboot wird zu unstetiger Fahrt gezwungen, da es sich durch unmittelbares Vorwärts- und Rückwärtsfahren aus diesen Bereichen hinausmanövrieren muss. Stößt das Messboot während seiner Fahrt an einen Felsblock oder eine Wellenfront, so führt das zu einer abrupten Änderung der Beschleunigungs- und Bewegungsrichtung der Messplattform und in der Folge zu starken Bewegungen des Positionsempfängers.



Abb.1: Blockwurf im Schwallstreckenbereich der Mur in Graz

1.3.3. Topographie und Vegetation

Die Topographie kleiner und mittlerer Flüsse weist in vielen Fällen steile Flussufer, einen dichten und weit in den Fluss ragenden Uferbewuchs auf.

Bei der GPS-Positionierung führt dies zu Schwierigkeiten in der Positionsbestimmung. Durch die eingeschränkte Sicht zu den Satelliten ergeben sich vielfach schlechte Satellitengeometrien und Signalabschattungen, sodass eine RTKGPS-Positionsbestimmung nicht mehr möglich ist. Es kann dann nur mehr eine DGPS-Positionierung mit Genauigkeiten im Bereich von +/-

0.5 m durchgeführt werden. In manchen Flussabschnitten werden Signale von weniger als vier Satelliten empfangen, sodass eine Positionierung über GPS überhaupt nicht mehr möglich ist. Bei den in den Jahren 2003 bis 2005 auf kleinen und mittleren Fließgewässern durchgeführten Projekten zeigte sich [Heine et al., 2005], dass auf kleinen Flussläufen je nach Topographie zwischen 60 % und 85 % der Messungen mit RTKGPS-Positionierungen erfolgen können. Die Hauptschwierigkeit für den praktischen Einsatz liegt in der Unsicherheit der Vorhersage von zu erwartenden GPS-Messqualitäten in den jeweiligen Messabschnitten. Zielverfolgende Servotachymeter stellen für Gebiete mit eingeschränkter RTKGPS-Verwendbarkeit ein alternatives und brauchbares Ortungssystem dar. Dabei wird vom Ufer aus ein auf dem Boot in der Verlängerung der Echolotachse angebrachter Reflektor mit einer Frequenz von etwa 3 Hz fortlaufend eingemessen und so die Trajektorie bestimmt. Der Einsatz eines derartigen Systems für lange Flussabschnitte ist jedoch sehr kostenintensiv und in vielen Fällen nicht effizient. Dichter Uferbewuchs erfordert unzählige Standpunktwechsel des TPS-Sensors und führt dadurch zu enormen Stehzeiten für das spezialisierte und somit teure Bootspersonal.

1.4. Transdisziplinäre Kooperation

An der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) wird in Kooperation mit dem auf hydrologische Modellierung spezialisierten Ingenieurbüro für Kulturtechnik Mayr&Sattler ein hydrographisches Vermessungssystem entwickelt, das vorrangig für den Einsatz auf kleinen und mittleren Flussläufen konzipiert ist. Für das Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation (BOKU) liegt bei diesem Projekt der Schwerpunkt der Arbeiten derzeit in der Entwicklung eines flexiblen, auf die jeweilige Anwendung optimal abgestimmten Ortungssystems durch Koppelung von RTKGPS-Vermessungskomponenten und Robotic-Totalstationen.

2. Gekoppeltes GPS/TPS-Positionierungssystem

2.1. Systemaufbau

Unter Koppelung von GPS- und TPS-Ortungssystemen wird hier die Kombination von RTKGPS mit einem zielverfolgenden Servotachymeter in einer sich komplementierenden Art verstanden:

- Einerseits wird hier in Anlehnung an den Begriff der Koppelnavigation das TPS-System zur Überbrückung der RTKGPS-Positionierungslücken eingesetzt. Dabei ist das System so konfiguriert, dass RTKGPS das primäre Ortungssystem für die Peilung darstellt (Abb.2). Nach Ausfall der RTKGPS-Positionierung (aufgrund von nicht ausreichender Satellitensignalqualität, -anzahl oder -geometrie) wird das fehlende Trajektorienstück über ein TPS-System bestimmt.
- Andererseits erfolgt für Sohlgrundvermessungen mit besonders hohen Genauigkeitsanforderungen eine permanente, gemeinsame Nutzung der beiden Ortungssysteme. Die in diesem Fall notwendige Synchronisation der Ortungssysteme basiert auf der alle Teilsysteme verbindenden GPS-Zeit. Alle Informationen der Messsensoren werden über das RS232-Protokoll auf ein robustes, feldtaugliches Notebook mit fünf Schnittstellen übertragen. Ein eigens entwickeltes Programm kombiniert dabei die auf der GPS-Zeit basierende UTC-Zeit mit der Rechnerzeit der CPU.

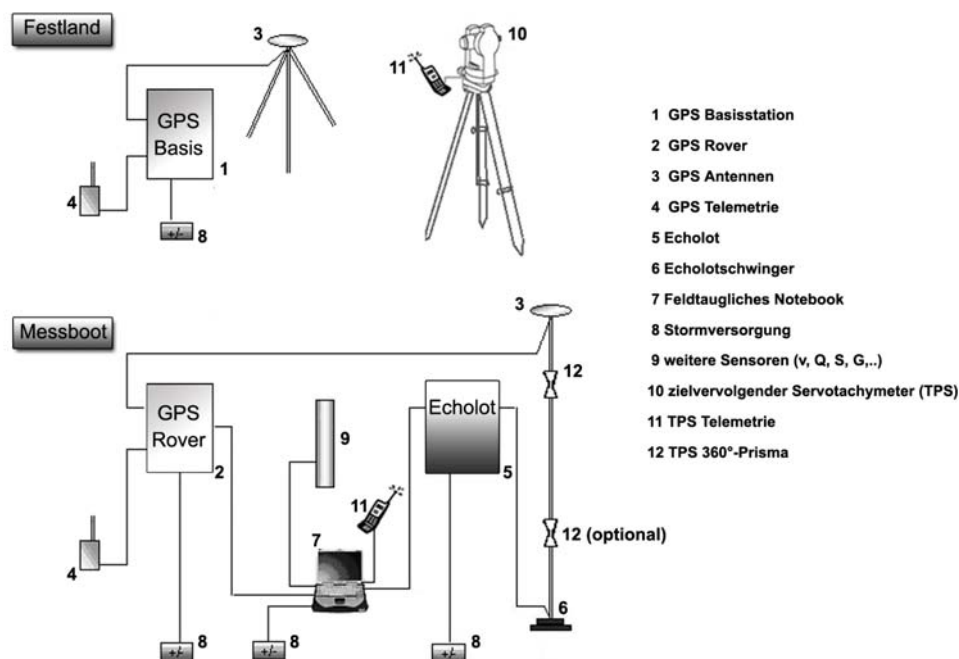


Abb.2: Schematische Darstellung des Peilsystems

2.2. Genauigkeit und Leistung der Positionierungskomponenten unter Normalbedingungen

Mit diesem GPS-gestützten beziehungsweise terrestrischen Positionierungssystem kann die Trajektorie einer beliebigen Messplattform (Boot etc.) automatisch bestimmt werden. Dabei erfolgt die Messung nicht streng kontinuierlich, sondern besteht aus diskreten Einzelmessungen mit derzeit maximalen Taktraten zwischen 5 Hz (TPS) und 20 Hz (GPS). Im Falle einer Bewegungsgeschwindigkeit in der Flußvermessung von 1 m/s bedeutet dies, dass die Position des Messbootes mit dem TPS-System alle 20 cm und mit dem GPS-System sogar alle 5cm neu bestimmt werden könnte.

Die Genauigkeit bei der 3D-Positionierung im kinematischen Messmodus liegt bei Instrumenten der neuesten Generation in Labortestumgebung bei wenigen Zentimetern. Die dabei unter Laborbedingungen bestimmten technische Reaktionszeiten von Teil- und Gesamtsystemen, wie etwa die Latenzzeit des RTKGPS-Systems oder die Synchronisation der Richtungs- und Distanzmessung beim TPS-System, bewegen sich im Bereich einiger weniger Hundertstelsekunden [Stempfhuber, 2004].

3. Eignung des Systems zur Bestimmung von un stetigen und hochfrequenten Trajektorien

3.1. Aufgabenstellung und Rahmenbedingungen

Im Rahmen einer im Juni 2005 stattgefundenen Sohlgrundvermessung der Mur in Graz wurde untersucht, inwieweit RTKGPS- und TPS-Instrumente der aktuellen Generation zur Positionierung eines Messbootes auf einem stark bewegten Flussabschnitt eingesetzt werden können. Da es sich bei diesem Projekt um eine Kontrollmessung der Sohlhöhe im Bereich des Kanaldükers (Unterführung des Abwasserkanals unter die Mur) flussab der Puntigamerbrücke handelte, wurde auf eine gesicherte Höhenbestimmung besonderer Wert gelegt. Für die hydrographische Vermessung war dies insofern eine Herausforderung, als es sich bei dem zu vermessenden Bereich um eine 60 m breite Schwallstrecke mit starker Strömung handelt. Sowohl im Bereich unterhalb des mittleren Brückenpfeilers als auch an beiden Ufern befinden sich Blockwurfsicherungen aus Felsblöcken, welche eine un stetige und hochfrequente Bewegung des Messbootes verursachen. Die zum Teil nur leicht überströmten Blöcke stellen für die Messfahrt zusätzlich noch eine Kollisionsgefahr dar. Das Flussbett weist in diesem Bereich eine Eintiefung gegenüber dem Umland von etwa 6 m auf und ist rechtsufrig (westseitig) mit hohen Bäumen bewachsen. Am oberen Ende des Untersuchungsgebietes befindet sich mit der neunzehn Meter breiten und 7 Meter hohen Puntigamerbrücke eine weitere potentielle Störquelle für eine GPS-Positionierung (Multipath, Abschattung).

3.2. Versuchsanordnung

Das Messboot wurde mit drei Leica GX1230 GPS-Ausrüstungen und mit zwei TPS-360°-Reflektoren ausgestattet. In der Verlängerung der Vertikalachse des sich am Bug befindlichen Echolotschwingers wurden im Abstand von rund einem Meter die zwei 360°-Prismen und darüber eine GPS-Antenne montiert. Am Heck des Bootes wurde jeweils steuerboardseitig und backboardseitig eine GPS-Antenne mit einem gegenseitigen Abstand von 2 m angebracht (Abb.3).



Abb.3: Messboot mit GPS-, TPS- und Echolotsensoren

Die GPS-Basisstation wurde auf einem freien Feld am ostseitigen Ufer installiert und in das übergeordnete Festpunktfeld des BEV eingerechnet. Die TPS-Prismen wurden von zwei Leica Tachymetern (TCRP1202 sowie TCRA1205) vom linken bzw. rechten Flussufer ausgehend beobachtet. Der am rechten Ufer postierte Tachymeter (TPS1) verfolgte dabei das untere, sich 1.581 m über dem Wasserspiel befindliche Prisma, während der zweite Tachymeter (TPS2) das in 2.466 m Höhe befindliche Prisma verfolgte. Über Funk wurden die TPS-Messdaten

an den zentralen Computer auf dem Boot übertragen, wo sie mit den Echolotdaten verknüpft wurden. Die Synchronisation des Gesamtsystems erfolgte wie schon oben erwähnt über das vom GPS gelieferte Zeitsignal und der Rechnerzeit der CPU.

3.3. Auswertung und Ergebnisse

Testmessungen an der Donau im August 2004 haben gezeigt, dass die Positionierung mit zielverfolgenden Servotachymetern und GPS bei starken Rollbewegungen sehr unterschiedliche Ergebnisse aufweisen. Während die GPS-Positionierung sehr gute Ergebnisse lieferte, wiesen die TPS-Messungen eine Vielzahl von Fehlmessungen und

große Messlücken auf [Heine et al, 2005]. Aus diesem Grund wurde in der gegenständlichen Untersuchung das Hauptgewicht auf die Analyse der TPS-Messungen gelegt.

Für die hier behandelte Genauigkeitsuntersuchung wurden aus dem gesamten Messdatensatz aus Gründen der Übersichtlichkeit und der leichteren Interpretierbarkeit eine repräsentative Querfahrt sowie eine Längsfahrt (flussaufwärts) selektiert. Um eine Aussage über das Verhalten der Positionierungssysteme unter Extrembedingungen treffen zu können, war das Kriterium für die Fahrtenauswahl das Vorhandensein extrem starker Rollbewegungen des Messbootes.

Die GPS-Positionsbestimmung erfolgte im Postprocessing mit der Auswertesoftware Leica GeoOffice, wobei aufgrund eines Verlustes der lokalen GPS-Basisstationsdaten Daten der Station Graz-Lustbühl des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesens als Referenzstationsdaten verwendet wurden. Sämtliche weiterführende Berechnungen und Analysen wurden mit der Software MATLAB 7.1 durchgeführt.

3.3.1. Messfrequenz des TPS

Während der Messfahrten war auf beiden TPS-Instrumenten die Aufzeichnungsrate der Messpunkte auf 5 Hz eingestellt. Die unter diesen hochdynamischen Bedingungen tatsächlich registrierten Messungen – ermittelt aus 600 Einzelmessungen - weisen die in Tabelle 1 angeführte Verteilung auf.

	Messfrequenz (Hz) und registrierte Messungen (in %)				
	4 Hz	3 Hz	2 Hz	1 Hz	< 1 Hz
TPS2 (Prismenhöhe 2m)	60 %	22 %	9 %	8 %	1 %
TPS1 (Prismenhöhe 1m)	80 %	13 %	4 %	2.5 %	0.5 %

Tabelle 1: Zuordnung der registrierten Messdaten (in %) in Bezug auf den Messzeitabstand zur vorhergehenden Messung (= Messfrequenz)

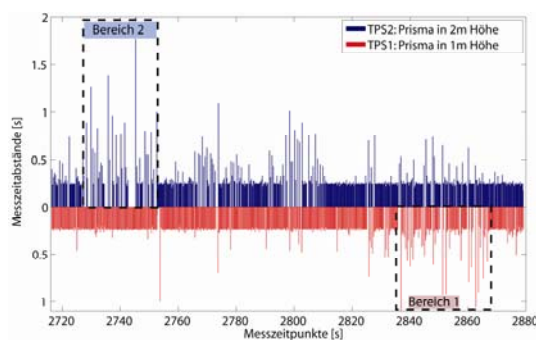


Abb.4: TPS-Messzeitabstände einer Längs- und Querfahrt

Tangentialbeschleunigung erfährt.

Weiters zeigte sich für beide TPS-Instrumente, dass die erzielbare Messfrequenz abnahm, wenn sich das Boot in der Nähe des Tachymeters befand und sich in seine Richtung bewegte. In dieser Situation wirkt sich die Rollbewegung des Boots nahezu als reine Azimutalbewegung für den TPS aus und der geringe Abstand (<10m) führt zu hohen Verfolgungsgeschwindigkeiten. Kommt es in diesen Bereichen zusätzlich zu starken Beschleunigungen oder Verzögerungen des Prismas in Kombination mit un stetigen Bewegungen, so führt dies zu Messausfällen (siehe Abb.4: „Bereich 1“ und „Bereich 2“, sowie Abb.5).

Es zeigte sich, dass die tatsächlich erzielte Messfrequenz des TPS2 im Mittel geringer ist als jene des TPS1. Außerdem weisen die TPS2-Messungen eine größere Frequenzschwankungsbreite auf als die des TPS1 (Abb.4). Eine Ursache dafür könnte darin liegen, dass das vom TPS2 verfolgte Prisma ungefähr doppelt so weit von der Boots längsachse (=Drehpunkt für die Rollbewegung) entfernt ist als das TPS1-Prisma, und somit während der Messfahrt auch die doppelte

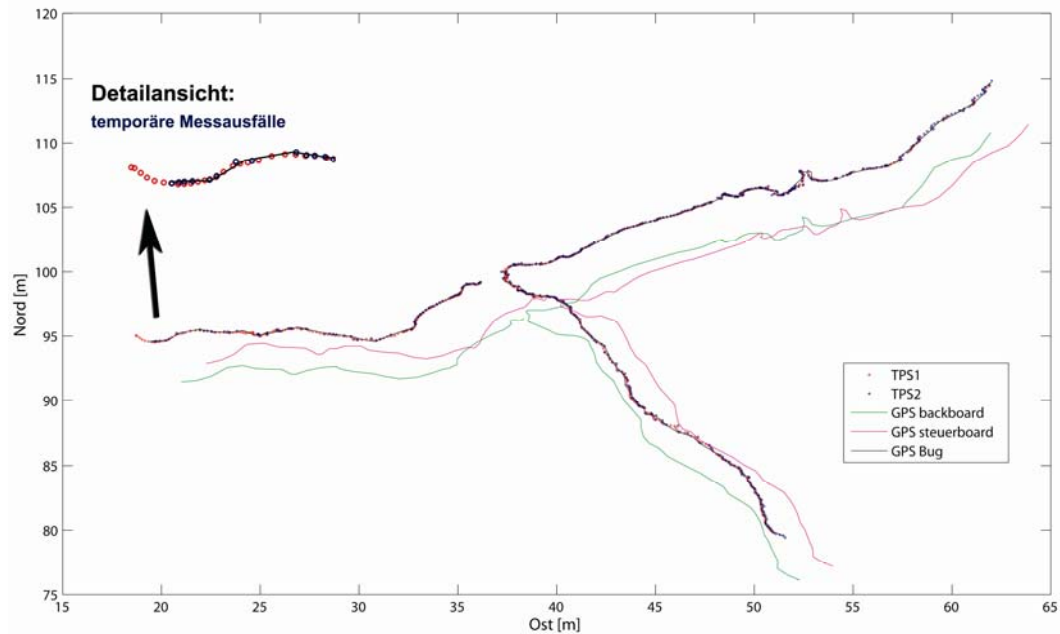


Abb.5: Trajektorien der GPS- und TPS-Sensoren des Messbootes einer Längs- und Querfahrt

Messfrequenzbasierte Filterung:

Unter der Annahme, dass Positionierungsergebnisse mit großen zeitlichen Abständen zur vorhergehenden registrierten Messung (geringe erzielte Messfrequenz) nicht vertrauenswürdig sind, erfolgte eine Filterung der TPS-Daten entsprechend ihrer Messfrequenz. Als Grenzwert wurde 3 Hz gewählt, da diese TPS-Frequenz für eine Verortung der in dieser Anwendung registrierten 2 Hz-Echolottiefendaten vollkommen ausreichend ist. Wie in Tabelle 1 ersichtlich werden damit auch für mehr als 90 % der Messzeit Daten im Messtakt von 3 Hz registriert.

Filterung auf Grund von Sensorsollabständen:

In einem weiteren Schritt wurden die Daten noch nach groben Fehlern untersucht. Dazu wurde aus den 3D-Positionsdaten der GPS/TPS-Messungen der Abstand zwischen den Prismen bzw. der Antenne berechnet und mit den Sollabständen verglichen. Differenzwerte die eine a priori definierbare Grenze überschritten hatten - in diesem Fall waren es 10 cm - wurden ausgeschlossen (siehe auch Tab.3).

3.3.2. Krängung und Bootsachsenlagen

Die Neigung des Schiffes um seine Längsachse (Krängung) lässt sich aufgrund der koaxialen Anordnung der TPS-Prismen aus dem von ihnen aufgespannten Raumvektor ableiten. Aufgrund der Charakteristik des Bootes und des Seilfährverfahrens konnte die Längsneigung des Bootes (Stampfen) vernachlässigt werden. Die Ergebnisse der Krängungsberechnung zeigen deutlich die hochfrequente Rollbewegung des Bootes während der Messfahrt (Abb.6).

Die Untersuchungen zur Genauigkeit des über TPS bestimmten Krängungswinkels basieren auf einem Vergleich mit GPS-Messungen. Anhand von 3 am Boot im Dreieck verteilten 2-Frequenz-GPS-Antennen lassen sich unter Idealbedingungen (bei einer Antennenbasis von 3 m) die Neigungswinkel mit einer Genauigkeit von $0,1^\circ$ bestimmen [Andree et al., 2000]. Aufgrund der für GPS-Messungen schwierigen topographischen Situation an der Mur und eines minimalen Antenneabstandes von 2 m wurde für die GPS-basierte Neigungsbestimmung eine Genauigkeit von 1° geschätzt.

Der Vergleich der beiden Datensätze zeigt, dass die aus den GPS-Messungen bestimmten Rollbewegungen deutlich geringer sind, als jene der TPS-Beobachtungen (Abb.7). Die Ursache dafür könnte die Existenz eines systematischen Positionsfehlers der TPS-Instrumente aufgrund der nicht zeitsynchronen Distanz- und Winkelmessung in Kombination mit den hohen Winkelgeschwindigkeiten und der un stetigen Bewegung sein.

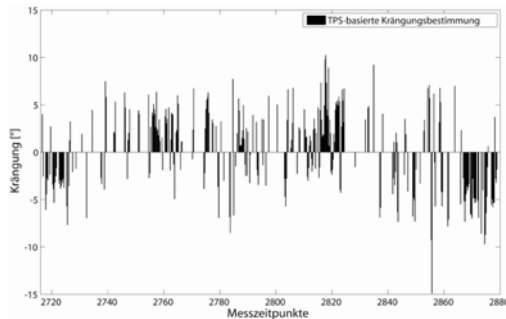


Abb.6: Krängung bestimmt aus TPS-Messungen

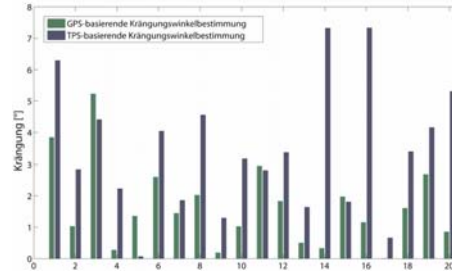


Abb.7: Differenz der Krängungswinkel

Trotz der gegenüber der GPS-Methode ungenaueren Krängungswinkelbestimmung ist das TPS-basierte Verfahren für die hydrographische Vermessung kleinerer Flussläufe einsetzbar. Zum einen wirkt sich eine größere Unsicherheit im Krängungswinkel aufgrund der geringeren Wassertiefen für die Sohlgrundvermessung nicht signifikant aus, und zum anderen funktioniert dieses System auch in Gebieten mit unzureichender GPS-Signalqualität.

3.3.3. Kinematische Höhenbestimmung

Der absoluten Höhenbestimmung kommt in der Hydrometrie eine besondere Bedeutung zu. Diese erfolgt daher - je nach Genauigkeitsanforderung - nivellitisch oder tachymetrisch. Bei turbulenten Strömungsverhältnissen erfolgt normalerweise eine Höhenbestimmung des aktuellen Wasserstandes durch regelmäßiges Einmessen der Wasseranschlagslinie an beiden Ufern jeweils am Anfang und Ende der Querfahrt (Profilmessungen). Die Echolotschwingerhöhen entlang des Profils ergeben sich durch Interpolation aus den Höhen der Wasseranschlagslinie.

Zur Steigerung der absoluten Sohlhöhen Genauigkeit wurde bei den hier durchgeführten Testmessungen die Echolotschwingerhöhe entlang des Profils kinematisch während der Messfahrt ermittelt. Dazu wurden wiederum die Messdaten von drei unabhängig arbeitenden Sensoren verwendet: 2 TPS und 1 GPS.

Vor der Auswertung erfolgte eine Bereinigung der Daten mit den oben genannten Frequenz- und Sollabstandsfiltern. Da die Sensoren koaxial in verschiedenen Höhen angeordnet sind, muss bei der Bestimmung der Echolotschwingerhöhe noch der Einfluss der Krängung bei den einzelnen Sensorhöhen berücksichtigt werden (= Verkürzung des

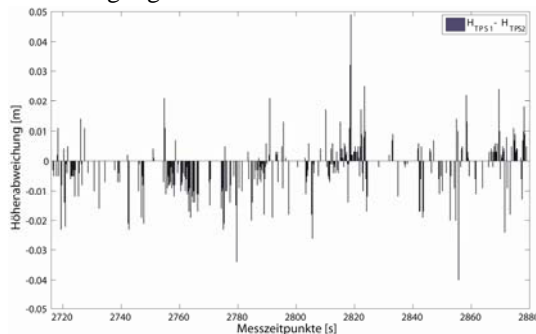


Abb.8: Differenzen der Höhenbestimmung mit zwei Tachymetern

Abstandes zwischen Prisma bzw. Antenne und Echolotschwinger).

Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung der mit den verschiedenen Methoden erhaltenen Höhenwerte (Abb.8). Die erzielte Genauigkeit lässt sich durch Differenzbildung zwischen den GPS-Höhen und den beiden TPS-Höhen abschätzen. Die aus dem gegenseitigen Vergleich berechneten Standardabweichungen liegen bei

± 1 cm mit maximalen Höhenabweichungen zwischen 2 cm und 5 cm (Tab.2).

Höhendifferenzen	GPS-TPS1	GPS-TPS2	TPS1-TPS2
Anzahl der Messungen	42	42	292
Max. Abweichung [m]	0.02	0.04	0.05
Standardabweichung [m]	0.01	0.02	0.01

Tabelle 2: Qualität der kinematischen Höhenbestimmung

3.3.4. Notwendigkeit einer Filterung der Messdaten

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Filtermaßnahmen wurden hier alle Messdaten in einen Höhenbestimmungsvergleich eingebunden. Im Vergleich zu den sehr guten Ergebnissen der gefilterten Daten (Tab.2) erhöhten sich die max. Abweichung und die Standardabweichungen bei Einbeziehung aller Messungen um ein Vielfaches (Tabelle 3). Damit zeigt sich, dass eine direkte Verknüpfung der Positionierungsdaten mit den Echolotdaten ohne entsprechende Filterung zum Verlust der notwendigen Integrität des Ortungssystems insgesamt führt. Beide Methoden, die Messfrequenzfilterung und die Sollabstandfilterung eignen sich aufgrund der Einfachheit und der geringen erforderlichen Rechenleistung auch direkt während der Messfahrt zur Überprüfung der registrierten Messdaten auf Plausibilität und Vollständigkeit.

	GPS – TPS1		TPS1 - TPS2	
	ungefiltert	gefiltert	ungefiltert	gefiltert
Gemeinsame Datensätze	103	42	417	292
Max. Höhenabweichung [m]	0.09	0.02	0.17	0.05
Standardabweichung [m]	0.03	0.01	0.02	0.01

Tabelle 3: Auswirkung der Datenfilterung auf die Höhenqualität

4. Praktische Anwendung des Systems in der hydrographischen Vermessung

Im Rahmen der unter Kap.1.4 genannten Kooperation wurden mit kombinierten GPS/TPS-Ortungssystemen bis dato zahlreiche Projekte mit unterschiedlichsten Anforderungen durchgeführt. Diese sind zum Teil in wissenschaftlichen Publikationen beschrieben [Heine et al., 2005; Mayr, 2003]. Die beiden in der Folge angeführten Projekte belegen die Effizienz des entwickelten Verfahrens im praktischen Einsatz.

4.1. Sohlprofilvermessung Mur-Graz

Aufgrund der Strömungsverhältnisse an der Mur im Bereich des Dükerprofils wurden mehrere Messfahrten im Querprofil durchgeführt. Da der Echolotschwinger nicht ständig unter Wasser geführt werden konnte und eine exakte Fahrt entlang der Profillinie nicht möglich war, wurde aus allen unregelmäßig und mit dem GPs/TPS-System eingemessenen Sohlpunkten im Nahbereich des Dükerprofils ein Geländemodell erstellt (Abb.9). Das dem Verlauf des Dükers entsprechende Profil der Flusssohle wurde dann aus dem digitalen Geländemodell abgeleitet.

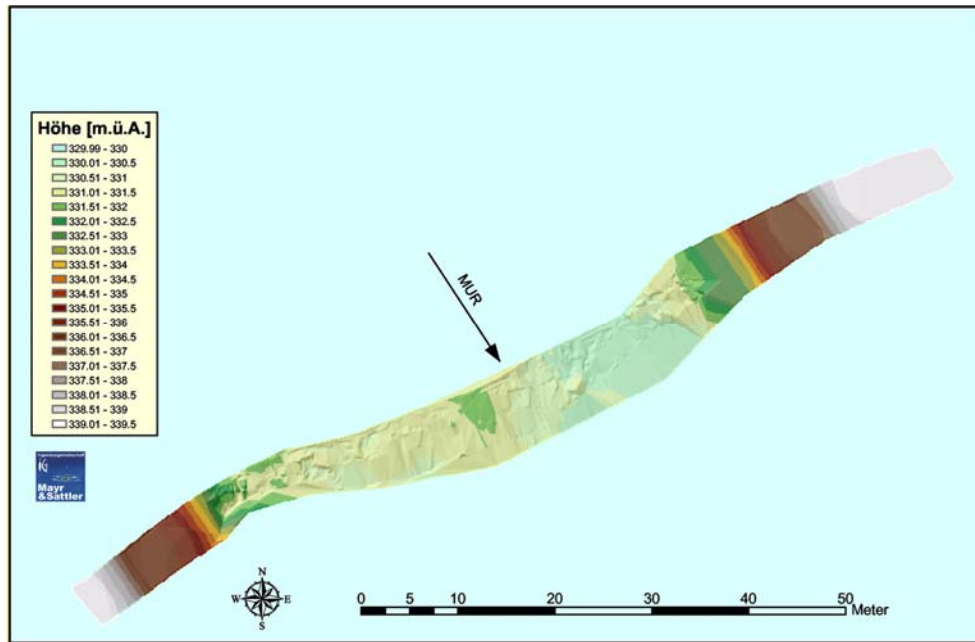


Abb.9: Geländemodell der Mursohle im Dükerbereich südlich der Puntigamer Brücke

4.2. Vermessung Salzach-Sohlstufe in der Stadt Salzburg

Schutzwasserbauliche Bauwerke, wie Sohlstufen und Wehranlagen müssen aufgrund extremer physikalischer Beanspruchungen in regelmäßigen Abständen überprüft werden. Als Beispiel dafür wird die Vermessung der Sohlstufe in der Stadt Salzburg angeführt. Durch das Hochwasser im August 2002 traten bei der Sohlstufe deutlich erkennbare Schäden auf. Es stellte sich daher die Frage, inwieweit auch im anschließenden Bereich des Auffangbeckens strukturelle Schäden existieren und in welchem Umfang Instandhaltungsmaßnahmen zur Sicherung des Bauwerkes durchzuführen sind. Durch die strömungstechnisch äußerst schwierige Situation im Tosbeckenbereich sind herkömmliche Vermessungsmethoden (z.B. Stangenlotung) nicht möglich. Gleichzeitig erfordert eine derartige Fragestellung ein hohes Maß an Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Daten. Die drängende Frage in diesem Fall war, ob und in welchem Umfang Instandhaltungsmaßnahmen zur Sicherung des Bauwerkes durchzuführen sind.



Abb.10: Salzach Sohlstufe mit Sohlgrund-DGM

Die Sohlgrundmessungen wurden in Kooperation mit der Firma Mayr&Sattler auf einer Länge von rund 450m in Querprofilen mit Abstand ca. 30m durchgeführt und in Nähe der Sohlstufe (Kolkbereich) verdichtet. Durch synchronen Einsatz des gekoppelten RTKGPS/TPS-Systems zur Ortung des Echolotschwingers (210kHz mit Öffnungswinkel von 3° für die Sohlvermessung) konnte der zu untersuchende Abschnitt mit einer Genauigkeit von besser als $\pm 1\text{dm}$ vermessen werden. Die daraus resultierenden Sohlhöhen, bezogen auf die Meereshöhe, sowie in Relation zur Wasserspiegeloberfläche stehen in Form eines feinmaschigen Geländemodells mit einer Rasterweite

von 25cm für weitere Analysen zur Verfügung (Abb.10).

5. Zusammenfassung und Ausblick

Messboote zur Erfassung von hydrografischen Parametern unterliegen auf turbulenten, stark strömenden Flussläufen sehr starken Rollbewegungen und ruckartigen Beschleunigungen. Die daraus resultierenden hochfrequenten, un stetigen Bewegungsabläufe erfordern ein hochdynamisches Positionierungssystem zur Ortung des Echolots, insbesondere bei hochgenauen hydrographischen Vermessungen oder beim Einsatz von Fächer- oder Flächenecholotsystemen. Der Einsatz von RTKGPS-Sensoren zur Trajektorien- und Bewegungsbestimmung stellt sich dabei als sehr stabiles und in der praktischen Anwendung äußerst effizientes System dar. Aufgrund der topografischen Situation alpiner Flüsse versagt in vielen Bereichen jedoch die RTKGPS basierte Ortung. Für diese Bereiche beziehungsweise als Alternative zur GPS-Ortung wurde ein auf zwei zielverfolgenden Servotachymetern basierendes Messsystem entwickelt. Die Position und Raumlage der Messplattform wird dabei durch kontinuierliche Verfolgung zweier koaxial mit dem Echolotsensor angeordneten Prismen bestimmt. Die Qualitätssicherung erfolgt dabei einerseits durch selektive Elimination niederfrequenter Messdaten. Andererseits liefert eine permanente Bestimmung der Prismenabstände eine Plausibilitätsüberprüfung für jeden Messzeitpunkt. Die in diesem Artikel dargestellten Ergebnisse zeigen, dass mit der aktuellen Generation von TPS/GPS-Instrumenten eine hochgenaue Ortung des bewegten Echolotsschwingers auch auf turbulenten Flussabschnitten möglich ist. Voraussetzung dafür ist jedoch eine entsprechende Nachbearbeitung der aufgezeichneten Positionsdaten.

Weiterführende Untersuchungen im Hinblick auf das Verhalten der sowohl asynchron als auch synchron arbeitenden zielverfolgenden Servotachymetern sind notwendig, um Positionen der Umkehrpunkte der Rollbewegung des Messbootes gesichert zu erfassen.

Literatur

- Andree, P., Läger R., Schmitz M. und G. Wübbena (2000): Bestimmung von Schiffsbewegungen und anderen hochfrequenten Bewegungen mittels GPS. DGON Symposium Ortung + Navigation 2000.
- Grün, A. & Kahmen, H. (2001): Optical 3-D Measurement Techniques V, Institute of Geodesy and Geophysics. University of Technology, Vienna.
- Köhler, G. & Arth C. (2003): Von der Sondierstange bis zum Flächenecholot – vom Maßband bis zum GPS. Tagungsbeitrag am 18. Hydrographentag in Wien. Deutsche Hydrographische Gesellschaft.
- Mayr P. (2003): Weiterentwicklung von Messtechnik und Methodiken im Wasserbau. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien.
- Heine E., Mader H., Mayr P. und S. Sattler (2005): Hydrographische Vermessung von Gewässersohlen von kleinen und mittelgroßen Flussläufen unter Einsatz gekoppelter GPS/Tachymat-Ortungsverfahren. In: Chesi G., Weinold T.: Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2005, S.31-41; Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Stempfhuber, W. (2004): Ein integritätswahrendes Messsystem für kinematische Anwendungen. Dissertation. Technische Universität München.
- Tietze, G. und M. Schmitz (2000): Anforderungen an die Ortung bei Sonarmessungen auf Binnengewässern. In: Hydrographische Nachrichten Nr. 56. Deutsche Hydrographische Gesellschaft, Hamburg.

Autor



DI Dr. Erwin Heine
Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation (IVFL)
Universität für Bodenkultur Wien
Peter-Jordan-Strasse 82
A 1190 Wien, Austria
Email: erwin.heine@boku.ac.at