



## Geodätisches Monitoring – ein fruchtbares Feld für interdisziplinäre Zusammenarbeit

Thomas A. Wunderlich, München

### Kurzfassung

Aufgaben der periodischen oder kontinuierlichen Überwachung von Bauwerken, Massen oder Prozessen können nur interdisziplinär definiert, entworfen und umgesetzt werden. Der Beitrag stellt einige Beispiele aktueller Forschungsprojekte im Bereich Monitoring vor, die in enger Kooperation mit Experten anderer akademischer Disziplinen erfolgen.

### Abstract

Periodical or continuous monitoring of structures, landslide areas or processes can only be defined, designed and realized in an interdisciplinary approach. This paper introduces some examples of recent research projects in the field of monitoring which are executed in close cooperation with experts from other academic fields.

### 1. Der Trend zum Monitoring

Im Zuge der Internationalisierung der Geodäsie wird der englische Ausdruck Monitoring zunehmend für die Bezeichnung geodätischer Überwachungsaufgaben verwendet. Während Überwachungsmessungen und deren immer anspruchsvolleren Auswertemethoden weiterhin der Ingenieurgeodäsie, meist im Sinne von Deformationsmessungen, zugeordnet werden, sind am riesigen Feld des Monitoring heute viele Disziplinen der Geodäsie und Geoinformation beteiligt. Man denke etwa an das Monitoring der Plattenverschiebungen, des Meeresspiegels oder der Erdrotation durch die Höhere Geodäsie, die Geophysik und die Satellitengeodäsie, oder an das Monitoring bestimmter Veränderungen der Topographie oder der Vegetation durch die Photogrammetrie und Fernerkundung und schließlich an das Monitoring von hydrologischen Prozessen im Zusammenhang mit Hochwasserbedrohungen oder der Ausbreitungswege von Seuchen wie der Vogelgrippe mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen. Es ist auch sicher nicht zu weit hergeholt, das Beobachten von Grundstücks- und Immobilienwerten sowie regionaler wie zeitlicher Häufungen von Transaktionen durch das Landmanagement oder die Übertragung von Verkehrsaufkommen und Verkehrsstörungen durch die Telekartographie als weitere Szenarien des Monitorings zu betrachten. Faktisch ist jede geodätische Disziplin heute auch mit Aufgaben des Monitorings befasst. Der Autor ist sich also durchaus bewusst, dass die folgende Abhandlung nur einen Ausschnitt, nämlich jenen der Operativen Geodäsie einschließlich der

Ingenieurvermessung, näher beleuchten kann. Unter Operativer Geodäsie, einer klugen Begriffsbildung des DVW, seien dabei allgemein alle Aufgaben verstanden, welche ein zumindest zeitweiliges Agieren von Vermessungsexperten vor Ort erfordern.

Das Grundmerkmal jeglichen geodätischen Monitorings ist, dass zu geometrischen Größen der jeweilige Messzeitpunkt miterfasst wird, so dass von geometrischen Veränderungen auf Veränderungsdaten und bei genügend häufiger und genauer Beobachtung auf Beschleunigungen bzw. Verzögerungen und im weiteren auf Trends und Perioden geschlossen werden kann. Im Falle räumlicher Meßmethoden liegen 4d-Datensätze samt Qualitätsmaßen vor, die verschiedensten statistischen Analysen unterzogen werden können.

Sowohl Instrumentarium, Messtechnik und Energiequellen als auch Auswertalgorithmen, Datenverarbeitung und Mobilkommunikation lassen heute hochgenaue, kontinuierliche Überwachungsformen zu. Diese können sich satellitengestützter globaler und/oder terrestrischer lokaler Positionierungssysteme mit hohem Automatisierungsgrad bedienen und zusätzlich mit anderen Sensoren zur Generierung ergänzender Information vernetzt werden. Im klassischen Bereich der Deformationsmessung werden Verformungen und Verlagerungen von Objekten erfasst und mit vorgegebenen Toleranz- und Schwellwerten verglichen. Dabei ist insbesondere auf homogenes oder widersprüchliches Verhalten von Messpunkten bzw. Punktgruppen zu achten [1]. Von der Wahl des Meßsystems über die Anlage der

örtlichen Messstrategie und zeitlichen Auflösung bis zur Interpretation der Ergebnisse herrscht in der Regel engste Kooperation zwischen den Fachleuten der beteiligten Disziplinen. Das ist keineswegs immer so gewesen, sondern bedeutet eine neue, kostbare Qualität. Traditionell mussten sich Geodäten mit der Rolle des wohlgeleiteten, jedoch unterprivilegierten Messexperten abfinden, der für nicht immer klar abgestimmte Messaufgaben aussagekräftige Daten abzuliefern hatte und von der weiteren Interpretation ausgeschlossen blieb.

## 2. Interdisziplinarität als oberstes Gesetz

Sowohl die vielfältigen technischen und methodischen Möglichkeiten des Monitorings als auch die unterschiedlichen Aufgabenstellungen selbst sind dermaßen komplex geworden, dass eine erfolgreiche Projektarbeit nur mehr im interdisziplinären Team bewältigbar ist. Die Erfahrungen am Lehrstuhl für Geodäsie der TUM sind hier in den letzten Jahren äußerst ermutigend gewesen. Nicht nur im vertrauten Umfeld von zu überwachenden Bauwerken oder Rutschhängen, sondern auch in Pionierbereichen des Prozeßmonitorings entlang industrieller Produktionswege oder von Bewegungsmustern im Handel versteigen sich ergebnisorientierte, friktionsfreie Expertenkreise. Die Bandbreite der Fachleute reicht dabei von Architekten, Bauingenieuren und Ingenieurgeologen über Archäologen, Kunsthistoriker und Archivare bis zu Maschinenbauern, GIS-Entwicklern und Kaufleuten – teils aus der Wissenschaft, teils aus der Privatwirtschaft oder aus Behörden. Einige Beispiele sollen folgend angerissen werden.

Die wichtigsten Trumpfkarten des Geodäten sind in allen Aufgaben des Monitorings seine Objektivität, seine ebenso zuverlässigen wie pünktlichen Resultate und immer wieder seine exklusiven Methoden der Bestimmung von absoluten Veränderungen bzw. der Einbettung relativer Informationen in einen übergeordneten Koordinatenrahmen, die eine gesamtheitliche Beurteilung erlauben. Dazu kommt dann noch das wachsende Eindenken in ungewohnte, fachfremde Problemstellungen, wie es insbesondere den Ingenieurgeodäten kennzeichnet. Die größte Herausforderung stellt manchmal die Zwangslage dar, noch experimentelle Ansätze mit der extrem hohen Verantwortung für das Überwachungsobjekt in Einklang zu bringen.

## 3. Monitoring von Bauwerken

Die periodische oder kontinuierliche Beobachtung von Bauwerken kann grundsätzlich verschiedenen Zwecken dienen, von welchen die wichtigsten hier aufgelistet werden:

- Routinemäßige Überprüfung des Normverhaltens
- Begleitkontrolle noch unerprobter Konstruktionen
- Vorbeugung bei objekt-nahen Baumaßnahmen
- Gefährdungsminimierte Weiternutzung trotz Schadensankündigung
- Sicherung während Instandsetzungsarbeiten

Im Folgenden sollen einige Schlaglichter auf aktuelle Monitoringaufgaben des Lehrstuhls an zwei verschiedenen Bauwerkstypen, nämlich Kirchen und Brücken, geworfen werden.

### 3.1. Sakralbauwerke

Bayern besitzt einen reichen Schatz an historisch wertvollen Sakralbauwerken, welcher dementsprechend gehütet wird. Der Lehrstuhl für Geodäsie hat sich darauf spezialisiert, maßgeschneiderte Überwachungskonzepte für deformationsgefährdete oder bereits von Verformungserscheinungen, insbesondere Rissbildungen, betroffene Kirchen zu erstellen. Über die Jahre konnte durch eine Vielzahl von Kooperationen mit dem Planungsbüro für Umbau und Sanierung Dr.-Ing. Bergmann, Pfaffenhofen, hohe Expertise aufgebaut werden. Je nach der augenscheinlichen oder vermuteten Ausdehnung der Deformationsbereiche werden entweder einzelne Messstrecken oder polare Meßsysteme eingerichtet. Die Relativmessungen können mittels Invardrähten oder Handlasermessern vorgenommen und fernübertragen werden. Das Geodätische Prüflabor und die feinmechanische Werkstatt des Lehrstuhls haben für mehrere bayerische Kirchen spezielle Meßsysteme konstruiert und weitgehend automatisiert. Größere Überwachungsgebiete oder ganze Kirchenschiffe erfordern ein polares Meßsystem, also ein programmierbares, selbstzielendes Präzisionstachymeter (Abb.1). Dieses misst dann, von Hubsteigern aus montierte, Reflektoren an, welche mit weiß lackierten Schutzblenden ummantelt sind. Die Blenden dienen zur Verhinderung von Fehlmessungen bei mehreren Reflektoren innerhalb eines Sichtkegels, die weiße Lackierung erreicht ein Höchstmaß an Unauffälligkeit, um das Erscheinungsbild des Innenraumes nicht zu stören. Wo hohes Gefährdungspotential vorliegt und Reflektoren



Abb. 1: Monitoring der Jesuitenkirche in Landshut

nicht angebracht werden können, wird mit geringen Genauigkeitsverlusten auf reflektorlose Entfernungsmessung übergegangen. Für große Klosterkirchen und Dome müssen entweder zwei Tachymeter installiert werden, oder Punkte, die von einem einzelnen Standpunkt nicht einsehbar sind, mittels gebrochenen Strahles über speziell angeordnete Planspiegel angezielt werden [2].

Die Messdaten werden in einer Zentralstation in der Kirche vorläufig ausgewertet und zwischengespeichert und dann mit ergänzenden meteorologischen Messwerten per SMS oder Email zu festen Sendezeitpunkten an die TUM und die beteiligten Projektpartner übermittelt. Am Lehrstuhl findet die Endauswertung und graphische Aufbereitung statt. Bei besonderen Erscheinungen finden sofortige Treffen der Experten statt, ansonsten in regelmäßigem Zyklus. Die Ursachen für Deformationen beruhen häufig auf einseitigen Setzungen oder auf einem Auseinanderdrücken

der Außenwände durch die hohe Dachlast. Im Sinne der Gefährdungsminimierung genügen hier tägliche Messungen zum jeweils gleichen Zeitpunkt. Untersucht wird das Langzeitverhalten mit Augenmerk auf beschleunigtes Fortschreiten und auf saisonale, temperaturbedingte Trends. Zur Begleitung von Sanierungsmaßnahmen ist im Gegensatz dazu kontinuierliches Monitoring [3] vonnöten, um das ausführende Fachpersonal im Ernstfall rechtzeitig alarmieren zu können. Dazwischen liegt die Abtastrate für die vorbeugende Überwachung wegen anstehender, bauwerkstheoretischer Bauführungen, wie z.B. den Aushub tiefer Baugruben oder den Vortrieb unterirdischer Verkehrswege. Hier gilt es, rechtzeitig vor der Baumaßnahme das natürliche, tägliche und saisonale, Verformungsverhalten der Kirche hochgenau zu erfassen, um später während der zusätzlichen baubedingten Belastungen diese Anteile modellgemäß abspalten zu können. Durch sorgfältige Kalibrierung im Messlabor und ausgeklügelte Beobachtungsstrategien liegen die

räumlichen Punktgenauigkeiten durchwegs im Submillimeterbereich; Einbußen müssen dort in Kauf genommen werden, wo Zielstrahlen durch Heizungsluft Refraktionserscheinungen zeigen. Wichtig ist auch das Abwarten der Kompensatorberuhigung nach jeder Anzielung. Nach einer nicht zu kurzen Testphase laufen die Systeme selbsttätig und können auch vom Lehrstuhl aus ferngewartet werden; dies ist besonders zu hohen kirchlichen Feiertagen hilfreich, um die Meßrhythmen auf die Hochämter und Betstunden abzustimmen. Das zwar niedrige, aber doch vernehmbare, Geräusch der Servomotoren soll keines Gläubigen Andacht stören.

Seit 1981 wurden durch den Lehrstuhl für Geodäsie der TUM mehr als ein Dutzend historisch bedeutsamer bayerischer Kirchen überwacht, einige davon über 5 bis 7 Jahre [4]. Das Monitoring mit programmierten Servotachymetern wurde 2002 in der einsturzgefährdeten Kirche von Walderbach während der Sanierungsarbeiten begonnen und arbeitet permanent in der Klosterkirche von Schäftlarn (seit 2003) und der Jesuitenkirche von Landshut (seit 2004). Weitere Projekte sind im Anlaufen. Als Instrumente werden Präzisionstachymeter der Marke LEICA TCRA1101 oder TCA2003 eingesetzt, da diese über sehr hohe Genauigkeit und über eine Schnittstelle zur Programmierung in definierter Umgebung verfügen. Die am Lehrstuhl für Geodäsie und am Geodätischen Prüflabor selbst entwickelte Steuer- und Auswertesoftware MoSTUM wird laufend verfeinert und für weitere Anwendungen adaptiert.

Die interdisziplinäre Projektarbeit wird ganz besonders spannend, wenn ein prominenter Dom überwacht werden soll. Hier ist nicht nur von Architekt und Bauingenieur ein sorgfältiger Befund des Bauwerkszustandes vorzunehmen, sondern es sind auch historische Vorschädigungen und Instandsetzungen durch Kunsthistoriker und Archivare auszuheben. Der Architekt als Experte für die Baukunst der Dombaumeister und der Bauingenieur als Experte für hochstehende FE-Simulationsrechnungen stellen gemeinsame Einschätzungen auf, deren Verifizierung durch die einvernehmliche Abstimmung aussagekräftiger Objektpunkte und eines gleichermaßen effizienten wie wirtschaftlichen Messkonzeptes mit optimalem geodätischem Monitoring erreicht werden soll. In der Überwachungsphase selbst werden signifikante, aber auch scheinbare Bauwerksbewegungen gemeinschaftlich offen disku-

tiert und interpretiert; dabei wird das Wissen aller Beteiligten nutzbringend integriert. Anders als beispielsweise bei Konvergenzmessungen im Tunnelbau [5] oder bei bestimmten Formen des Rutschhangmonitorings [6] kommt hier noch kein Gedanke an Expertensysteme zur Beurteilungsunterstützung auf – vielleicht weil sich Dome allgemeinen Regeln entziehen.

## 3.2. Brückenbauwerke

In den letzten Jahren haben vor allem satellitengestützte Echtzeit-Überwachungssysteme für monumentale Hängebrücken in Asien [7] die Aufmerksamkeit der Fachwelt angezogen. Diesen eher singulären Monitoringaufgaben steht eine enorme Anzahl von terrestrisch auszuliegenden Deformationsmessungen gegenüber, wie sie für die „gewöhnlichen“ Brücken in Europa anstehen. Zumindest in Deutschland ist man sich bewusst, dass derzeit tausende Brücken an ihre Alters- oder Leistungsgrenzen stoßen und nur wenige Neubauten zu finanzieren sind. Das bedeutet, dass die Regel sein wird, Brücken zu ertüchtigen, auszubauen oder die Nutzungsdauer kontrolliert zu verlängern. All diese Fälle verlangen ein Monitoring.

### 3.2.1. Verbreiterung eines Talübergangs

Ein erstes Beispiel stellt die Talbrücke Rösau bei Schirnding dar, eine auf Pfeilern ruhende, im Grundriß gekrümmte, Straßenbrücke in Massivbauweise an der bayerischen Grenze zu Tschechien. Da die Brücke den seit der Ostöffnung sprunghaft angewachsenen Lastverkehr kaum mehr bewältigen kann, wurde eine Verbreiterung in Form einer einseitigen Auskrugung beschlossen. Eine dabei angewandte neue Bauweise ließ es sinnvoll erscheinen, das Verhalten während des abschließenden Aufbringens der heißen Asphaltsschicht zu überwachen [8]. Dazu wurden in mehreren Profilen je 3 Miniprismen angebracht und von einem Pfeiler am Talgrund aus über 24 Stunden mit einem TCA2003 automatisch polar gemessen (Abb.2). Um den Einfluß wechselnder Refraktionsverhältnisse auszuschalten, kamen nur Differenzen zur Anzeige von relativen Höhenänderungen der Auskrugung gegenüber dem Tragwerk zur Anwendung. Eine zweite Kampagne in größerem zeitlichem Abstand diente zur Aufdeckung etwaiger langfristiger Deformationen. Der Änderungsnachweis erfolgte millimetergenau.



Abb. 2: Monitoring der Talbrücke Rösler

### 3.2.2. Bauwerksdiagnose einer Hochbrücke

Brückenbauwerke stark frequentierter Ausfallstraßen von Großstädten können bei schleichenen Schadenseinwirkungen nicht unmittelbar instandgesetzt oder neu errichtet werden, ohne einen mehrmonatigen Verkehrskollaps auszulösen. Um eine ausreichende Vorlaufzeit zu gewinnen, müssen besonders verantwortungsvolle Monitoringkonzepte zur Verlängerung der Nutzungsdauer erstellt werden. Eine solche Aufgabe hat der Lehrstuhl für Geodäsie für einen ausgedehnten Abschnitt einer Autobahnhochbrücke übernommen. Dazu war es unerlässlich, vorab von Bauingenieurseite eine minutiöse Vorstudie auszuführen. Diese konnte aus der Untersuchung vorhandener Schädigungen und mit Hilfe eines FE-Modells des Bauwerks die zu erwartenden Höchstwerte interessierender Deformationen hochrechnen, welche signifikant aufzudecken waren, um ein Schadensereignis im Inneren der Brücke zu erkennen [9]. Konkret würde sich das korrosionsbedingte Ablösen eines einzelnen Stahlträgers im Inneren durch eine

längliche Deformation an der Unterseite des Betonkastens mit einer Amplitude von maximal 2 Millimetern manifestieren.

Der signifikante Nachweis einer solchen Deformation an einer zusätzlich durch wechselnde Verkehrslast vertikal und durch Temperatureinwirkung horizontal verformten Brücke stellt extrem hohe Ansprüche an ein Monitoringsystem. Ausgedehnte, raue Betonflächen müssen wiederholt nach den Schadensankündigungen abgesehen werden. Gemeinsam mit den projektbehafteten Bauingenieuren wurde ein umfassendes Konzept auf Basis reflektorloser Präzisionstachymetrie entwickelt. Jedes Brückenfeld wird von an den Pfeilern angebrachten Konsolen aus in einem dichten Raster abgescannt, zur Erhöhung der Genauigkeit mehrfach. Die Konsolenstandpunkte selbst sind im Vorlauf durch Netzmessung präzise bestimmt worden und dienen auch zur Orientierung. Die saisonale Dehnung oder Stauchung wird durch die Anmessung von 4 Prismen je Feld erfasst und erlaubt eine Anpassung der Raumrichtungen für die automatische Zielfahrt.

Um kleine Restunsicherheiten bei der möglichst identischen Anzielung jedes Rasterpunktes unwirksam zu machen, nahmen wir den Aufwand in Kauf, in einem einmaligen Probedurchgang jeden der 2800 Messpunkte visuell zu verifizieren und bei Bedarf, z.B. wenn zufällig ein Betonpickel getroffen wurde, zu ändern. Für die tatsächlichen Messepochen musste das Tachymeter nur aufgestellt und orientiert werden; der gesamte Ablauf der Massenzufnahme erfolgte dann programmgesteuert.

Ähnlich der Vorgangsweise bei der Nutzung terrestrischer Laser Scanner für Deformationsmessungen steht auch bei dieser reflektorlosen tachymetrischen Vorgangsweise keine Verarbeitung diskreter Messpunkte sondern anstatt dessen von Punktwolken an [10]. Eine Visualisierung zur schnellen Schadenserkenkung ist am einfachsten durch Generierung eines DHM aus den Höhendifferenzen möglich. Ein Beispiel zeigt Abbildung 3. Die Aussagekraft des resultierenden Höhengichtenplans wird noch durch farbliche

Kodierung gesteigert. Wo tatsächlich Deformationen augenscheinlich werden, muß in einem weiteren Schritt deren Signifikanz statistisch getestet werden. Die Qualität der bisher beobachteten Nullepoche und zweier Folgeepochen hat sich als äußerst hoch erwiesen. Grundlegende Voraussetzung für den Erfolg ist jedoch eine peinlich genaue Kalibrierung der Tachymeter im Prüflabor, um jegliche Restfehlereinflüsse der primären Achsfehler (viele Steilvisuren) und von Nullpunktconstante sowie Maßstab der EDM wirksam beseitigen zu können.

Beide Brückenüberwachungen werden gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Massivbau der TUM (Ordinarius: Univ.Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch) betrieben. Ein zusätzlicher interdisziplinärer Gewinn hat sich bei den Bauingenieuren dadurch ergeben, dass sich bei Kombination mit geeigneten numerischen Modellen aus den Monitoringdaten sogar Auswirkungen des abschnittswisen Bauens auf Koppelfugen nachweisen lassen [11].

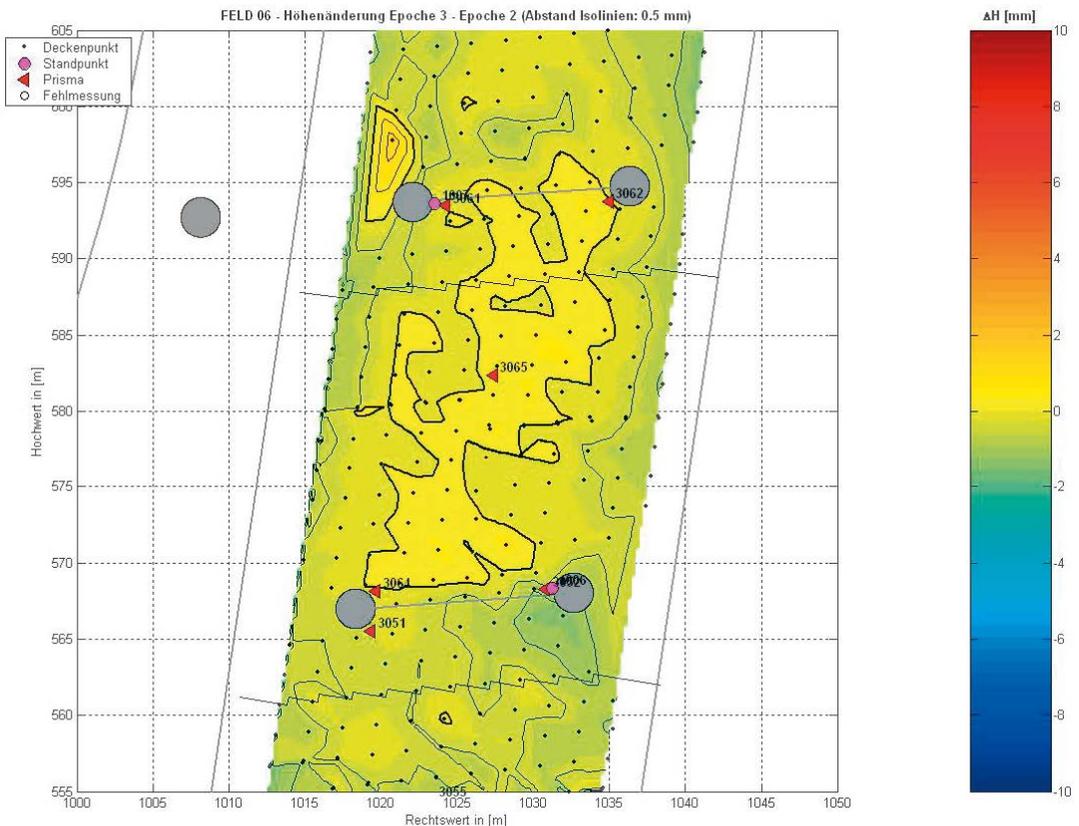


Abb. 3: Deformationsbild aus 2 Monitoringepochen einer Hochbrücke

#### 4. Monitoring von Massenbewegungen

Überwachungsmessungen zur rechtzeitigen Prävention bei drohenden Hangrutschungen und Bergstürzen haben im letzten Jahrzehnt weltweit an Bedeutung gewonnen. Kausal sind hier in der Hauptsache die zunehmende Anzahl und Intensität an extremen Wetterereignissen mit den damit verbundenen Naturkatastrophen und die vermutete langzeitliche Klimaerwärmung, die gerade im Alpenraum zur Entfestigung bislang durch Permafrost stabiler Formationen führt. Zusätzlich kreieren anthropogene Eingriffe im Zuge des Verkehrswegebbaus oder durch monumentale Ingenieurprojekte wie etwa die Aufstauung des Gelben Flusses neue Probleme.

Beginnend mit der 1990 von den Vereinten Nationen ins Leben gerufenen International Decade for Natural Disaster Reduction erfolgten weltweit stark interdisziplinär ausgerichtete Initiativen zur Prävention, Intervention und Bewältigung solcher Katastrophen. Dies hat auch einen deutlichen Schub bei der Entwicklung von Monitoringsystemen erbracht, welcher gleichzeitig durch die neuen Möglichkeiten von Satellitennavigation, Energiequellen und Mobilfunkkommunikation gefördert worden ist. Nationale Programme, wie z. B. CEDIM in Deutschland und alpS in Österreich unterstützen die Verstärkung der Anstrengungen. Auch an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der TUM arbeitet seit 2003 eine Expertengruppe im Rahmen der Initiative InnovIRONMENTRISK am wissensbasierten Umgang mit Naturgefahren. Der Lehrstuhl für Geodäsie hat sich darin auf das Monitoring von Massenbewegungen fokussiert und nimmt an Forschungsprojekten der EU (InterReg IIIB – Climate Change Impact on Alpine Space) und des K-Plus Kompetenzzentrums für Naturgefahren Management alpS teil. Kooperationspartner sind dabei Ingenieurgeologen.

##### 4.1. Kontinuierliche Detektion lokaler Bewegungen mit Multisensorsystemen

Hohes Interesse besteht derzeit an mehrskaligen [6] und integrativen Ansätzen. Unter integrativ sollen hier Systeme verstanden werden, bei denen die Einzelkomponenten einerseits autarke Beiträge leisten, andererseits jedoch auch Stützfunktion für die anderen besitzen. Will man nicht nur Oberflächeninformation erhalten, sondern auch Aufschluß über die Vorgänge im Inneren einer Gleitmasse gewinnen, müssen ohnehin mindestens zwei Sensortypen eingesetzt werden. Häufig sind dies GPS-Empfänger an der Ober-

fläche [12] und geotechnische Sensoren, die in verrohrte Bohrlöcher eingeführt werden, um die Tiefe der Gleitfläche und dortige Bewegungen zu orten. Letztere liefern aber in der Regel nur diskrete Verformungsdaten. Der Einsatz von GPS-Empfängern wiederum führt notgedrungen zu einer Beschränkung auf eine wirtschaftlich verkraftbare Zahl diskreter Beobachtungspunkte. TPS-Systeme könnten hier eine willkommene, rasterförmige Verdichtung erbringen, haben jedoch gegenüber GPS den Nachteil, nicht unabhängig von der Witterung messen zu können.

Im Zuge eines gemeinsamen Forschungsantrages der Lehrstühle für Ingenieurgeologie (Univ.Prof. Dr. Kurosch Thuro) und Geodäsie der TUM und des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München (Univ.Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke) wurde ein Konzept entworfen, in welchem GPS, TPS und TDR (Time-Domain-Reflectometry) beim kontinuierlichen Monitoring eines gefährdeten bayerischen Rutschhanges zusammenwirken. Dabei sollen die Beobachtungsstellen für TDR [13] jeweils mit Low-Cost GPS-Empfängern [14] ausgestattet werden, deren Verschiebungen relativ zu einer lokalen Zentralstation gemessen werden. In der schneefreien Jahreszeit ergänzt ein TPS mit reflektorloser EDM und Videokamera [15, 16, 17] Informationen dazwischen liegender Bereiche, um dann im Winter die laufende Schneebedeckung und das Abschmelzen als möglichen Trigger zu registrieren. Die Energieversorgung der aktiven Stationen wird durch moderne Solar-Wind-Generatoren bewerkstelligt, die Datenverbindungen bis zu Festnetzleitungen per Funk-WLAN (Abb.4).

##### 4.2. Epochenweise Detektion großräumiger Massenbewegungen mit hybrider Analyse

Großräumige Massenbewegungen lassen sich heute sehr effektiv mit Satellitenmethoden aufdecken, entweder punktwise über GPS oder flächig über Fernerkundung (DINSAR), wobei letztere Technik nur über längere Zeiträume, durchaus Jahre, die nötige Auflösung erbringt. Auch die Aufdeckung mit GPS setzt traditionell zwei Messepochen mit genügend großem zeitlichem Abstand voraus, wobei dieser bei kleinen Bewegungsraten auch mehrere Monate betragen kann. Will man sich ein schnelles Bild von den Deformationsvorgängen verschaffen, liegt in Ländern mit hochentwickelter Landesvermessung ein effizienter Weg in der satellitengestützten Übermessung eines vorhandenen amtlichen Festpunktfeldes. Dies ist nach einer Idee des Autors mit großem Erfolg im Tiroler Wipptal erprobt

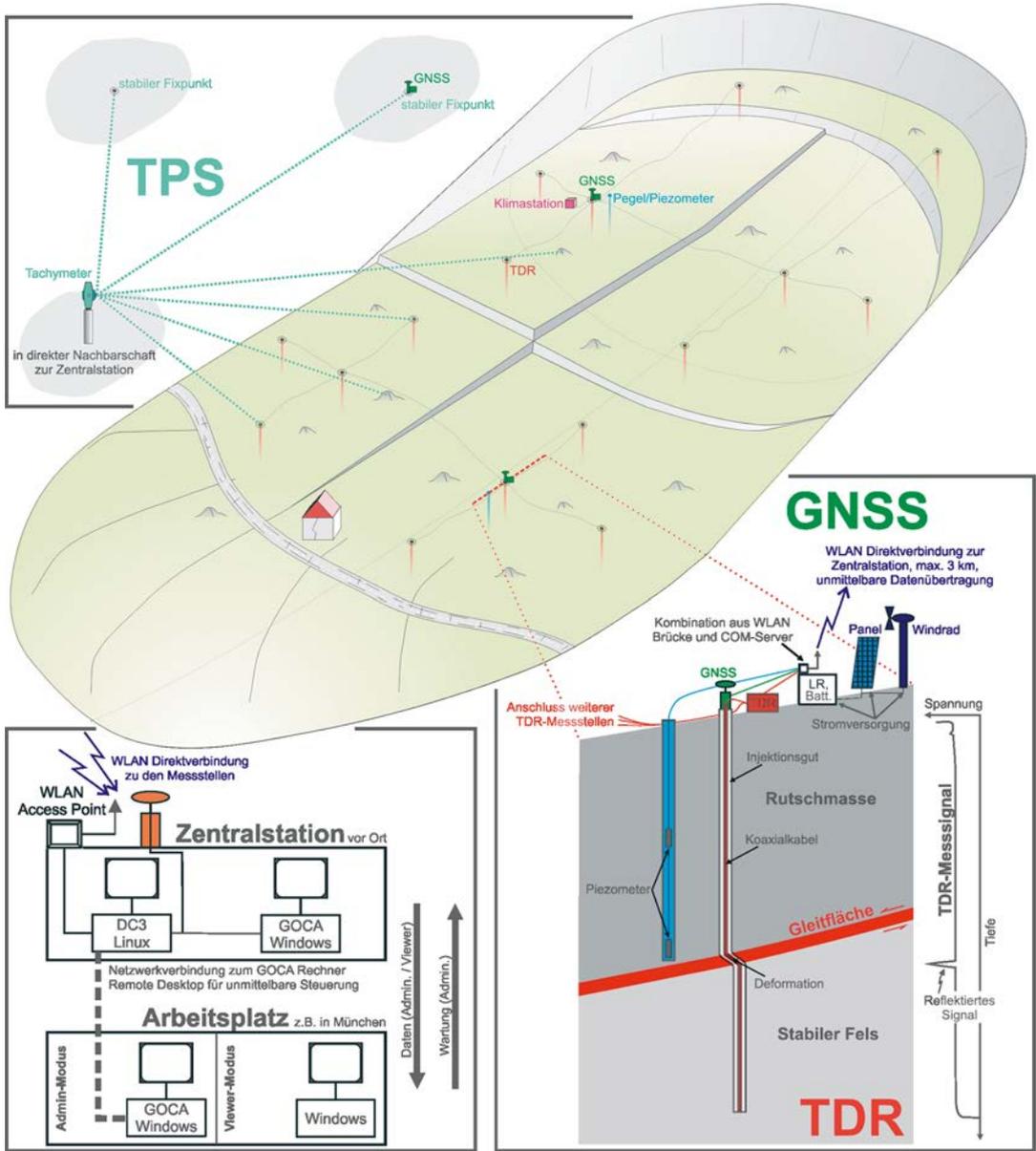


Abb. 4: Integratives Frühwarnsystem (Zeichnung: Singer und Pink)

worden [18], allerdings beschränkt auf den Nachweis lagemäßiger Verschiebungen von Einschaltpunkten. Wenn eine räumliche Analyse aus hybriden Datensätzen – nämlich terrestrischen Beobachtungen einer Nullepoche aus den Archiven des BEV gegenüber GPS-Messungen einer aktuellen Folgepoche – angestrebt wird, wirkt die Datumsproblematik erschwerend.

Anders als bei anderen Vermessungsaufgaben kann bei einer strengen, statistisch gesicherten, Deformationsanalyse nicht auf feste, regionale Transformationsparameter aus den Kampagnen der GPS-Netz GmbH zurückgegriffen werden; höchstens näherungsweise. Grundvoraussetzung ist nämlich die Einführung ausschließlich datumsfreier Information [19], um

keinerlei geometrischen Zwänge beim globalen Kongruenztest der beiden Netzverbände auszuüben. Die Netze beider Epochen müssen ihrerseits jeweils einer freien Ausgleichung entspringen, was für die – entsprechend der hierarchischen Ordnungsgesichtspunkte der Landesvermessung beobachteten – terrestrischen Messungen problematisch ist. Findet man genügend unbewegte „Festpunkte“, so ist die Mitschätzung von Zuschlägen der genäherten Transformationsparameter zwischen dem Datum MGI und jenem von WGS84 unkritisch. Ist aber faktisch „alles in Bewegung“ und nirgends sicherer Halt zu finden, dann ergibt sich eine unerwünschte Wechselwirkung zwischen den eigentlich aufzudeckenden Punktbewegungen und den mitzubestimmenden Transformationsparametern, die sehr schwierig zu dämpfen ist.

Ein diesbezügliches Schulbeispiel lieferte der von uns innerhalb des Projektes A2.3 für alpS unternommene Versuch, die großräumigen Massenbewegungen im unteren Gerlostal nach

oberiger Strategie zu untersuchen [20]. In einer vorbildlichen Zusammenarbeit mit dem gebietsvertrauten Geologen (Dr. Poscher, dem Amt der Tiroler Landesregierung (Dipl.-Ing. Anegg) und dem BEV (Dipl.-Ing. Imrek) wurden 21 Festpunkte ausgewählt und übermessen. Der angestrebte Zeit- und Wirtschaftlichkeitsgewinn im Außendienst ist tatsächlich eingetreten, ging aber durch sehr aufwendige Auswertungen im Innendienst leider zum Teil wieder verloren. Um die schließlich abgeleiteten räumlichen Punktverschiebungen (Abb. 5) weiter abzusichern, musste doch noch eine ergänzende Messkampagne durchgeführt werden, diesmal unter Einschluß zweier sicher unbewegter Hochpunkte, deren Besetzung bei der ersten GPS-Kampagne wegen des hohen Gewichts der Autobatterien für eine 24h-Messung vermieden werden sollte. Bei der Zusammenführung der beiden GPS-Kampagnen muß natürlich auf mögliche kleine Weiterbewegungen der Hangpunkte wegen der Zeitdifferenz Bedacht genommen werden. Über die Endergebnisse wird an anderer Stelle berichtet werden.

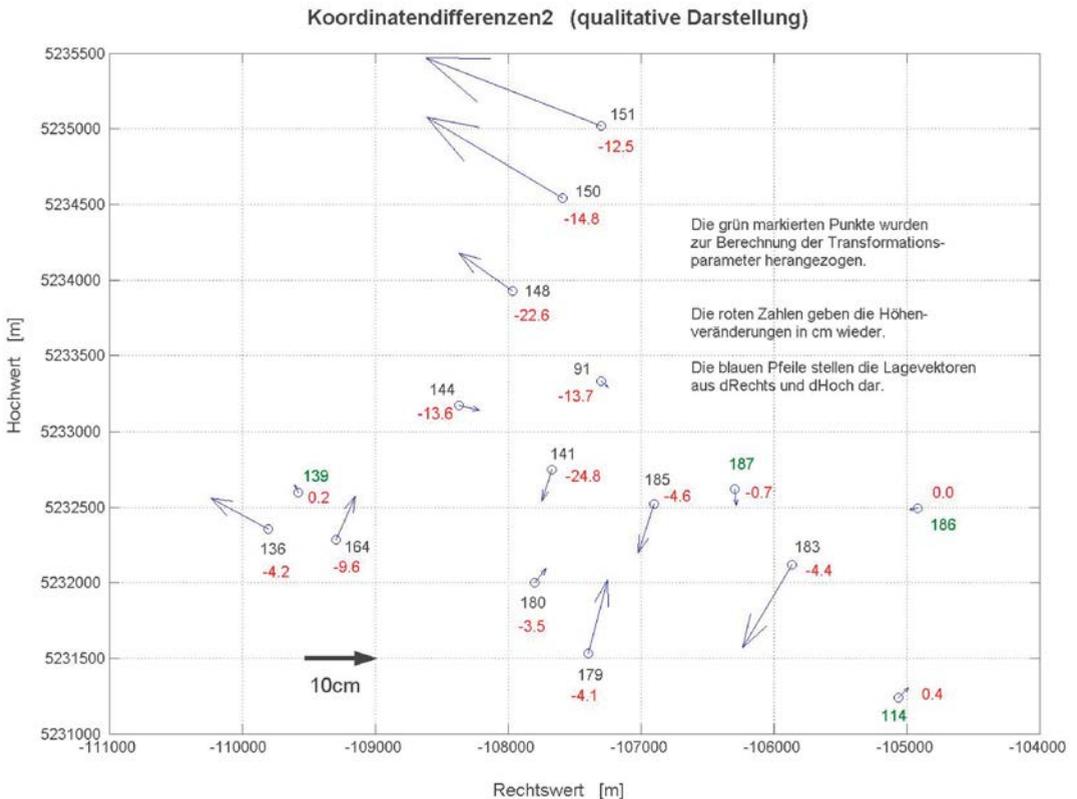


Abb. 5: Massenbewegungen im unteren Gerlostal

Ergänzend darf nicht unerwähnt bleiben, dass es im alpinen Terrain natürlich noch eine dritte Einflußgröße gibt, die bei der beschriebenen Strategie im Wechselspiel von Deformationen und Transformationsparametern wirksam ist: nämlich die Geoidundulation. Ohne das in Österreich vorliegende, hochauflösende Geoidmodell wäre eine hybride Deformationsanalyse nach dem strengen Hannoverschen Modell überhaupt nicht sinnvoll anzuwenden gewesen. Immerhin betragen die lokalen Undulationsdifferenzen bis zu 26 Zentimeter!

## 5. Monitoring von Prozessen

Im letzten Kapitel soll ein Zukunftsfeld des Monitorings angesprochen werden, welches noch zu wenig Beachtung in der geodätischen Gemeinde findet. Es handelt sich um das anonyme Monitoring lokaler Bewegungsprozesse im Kontext des Transports und der persönlichen Navigation. In vielen Wissenschaftsbereichen, insbesondere in der Informatik, der Elektrotechnik und des Maschinenbaus wird fieberhaft an lokalen Positionierungssystemen gearbeitet, um verschiedenste Prozesse zu studieren, zu unterstützen und zu verbessern. Wenn auch die diverse Messtechniken und Signalverarbeitungsformen teilweise für uns fremd sind, so finden wir spätestens auf der Ebene der Geometrie wieder den professionellen Einstieg, der dort eben manchmal den anderen Disziplinen fehlt. So konnten wir z.B. Informatiker davon überzeugen, dass die Lösung eines räumlichen Bogen- oder Pseudostreckenschnitts nicht nur heuristisch möglich ist [21]. Umgekehrt ignoriert die Hauptmacht der Geodäten den Markt der Navigation, der ortsbezogenen Dienste und der virtuellen Produktion beharrlich. Die beiden folgenden Beispiele sollen ermutigen, auch hier den fachübergreifenden Dialog zu suchen und die Besetzung neuer Märkte von geodätischer Seite her mutig anzugehen.

### 5.1. Kollisionsvermeidung entlang industrieller Transportwege

Moderne Produktion erfolgt heute extrem zeitkritisch und kann sich keinerlei Unterbrechung oder auch nur Verzögerung leisten, schon gar nicht, wenn Messaufgaben anstehen. Von geodätischer Seite haben hier für lokale Überwachungsaufgaben sehr leistungsfähige Methoden der Nahbereichsphotogrammetrie und industriellen Bildverarbeitung, aber auch der berührungs-

losen Lasermesstechnik Eingang gefunden. Simulationen von bewegten Vorgängen, wie etwa Bewegungsabläufen von Industrierobotern, haben unter Mitwirkung der Ingenieurgeodäsie die Offline-Programmierung mit hohen Zeitvorteilen möglich gemacht. Aktuell gilt es, bestimmte Probleme entlang langer mechanischer Transportwege in Großbetrieben zu lösen. Für die Fließbandfertigung komplexer Produkte ist die Anlieferung, Zwischenlagerung und Verteilung zu den Montagestationen über fallweise kilometerlange innerbetriebliche Transportwege kollisionsfrei zu lösen. Dies ist für neue Bestandteile, deren endgültige Form manchmal erst einen Tag vor Produktionsbeginn völlig feststeht, schwierig.

Es ist nicht von vornherein auszuschließen, dass an engen Passagen und Manipulationsstellen oder an Haltepunkten Kollisionen entstehen. Solche sind nicht nur wegen möglicher Beschädigungen am Teil oder an einer Anlage, sondern vor allem wegen Staus im Transport unbedingt zu vermeiden. Hier kann die Geodäsie den Maschinenbau gut unterstützen.

Am Lehrstuhl für Geodäsie wurde soeben ein Konzept entwickelt [22], die Kollisionsfreiheit kompliziert geformter Bestandteile entlang des Transportes auf Gehängen einer weitläufigen Einschienenbahn zu sichern. Der messtechnisch einfache, aber logistisch schwierige Teil besteht im Erfassen der Bahnanlage und eines definierten, begleitenden Korridors durch terrestrisches Laser Scanning. Der höchst anspruchsvolle Simulationsalgorithmus zielt anschließend darauf ab, CAD-Modelle oder Punktwolken der Bestandteile nach gezielter Segmentierung (Abb.6) virtuell durch den Korridor fahren zu lassen und kontinuierlich auf etwaige Kollisionen zu überprüfen. Dabei müssen natürlich auch die fliehkraftbedingten Auslenkungen in Kurvenbereichen und die Längsschwingungen bei Beschleunigungs- oder Verzögerungsvorgängen in das Modell einbezogen werden. Trotz Abstandsregelung der Gehänge könnte sonst ein Aufpuffern auf Vorläufer durch Schwingung passieren. Das virtuelle Kollisionsmonitoring ist überaus rechenintensiv und wird deshalb in Stufen durchgeführt, um durch vorzeitige Ausschließung sicher unkritischer Bereiche nur mehr wenige verdächtige Bereiche je Inkrement der Verschiebung entlang der Bahn scharf untersuchen zu müssen. Dazu wurde die spezielle Software KOSIMU geschaffen.

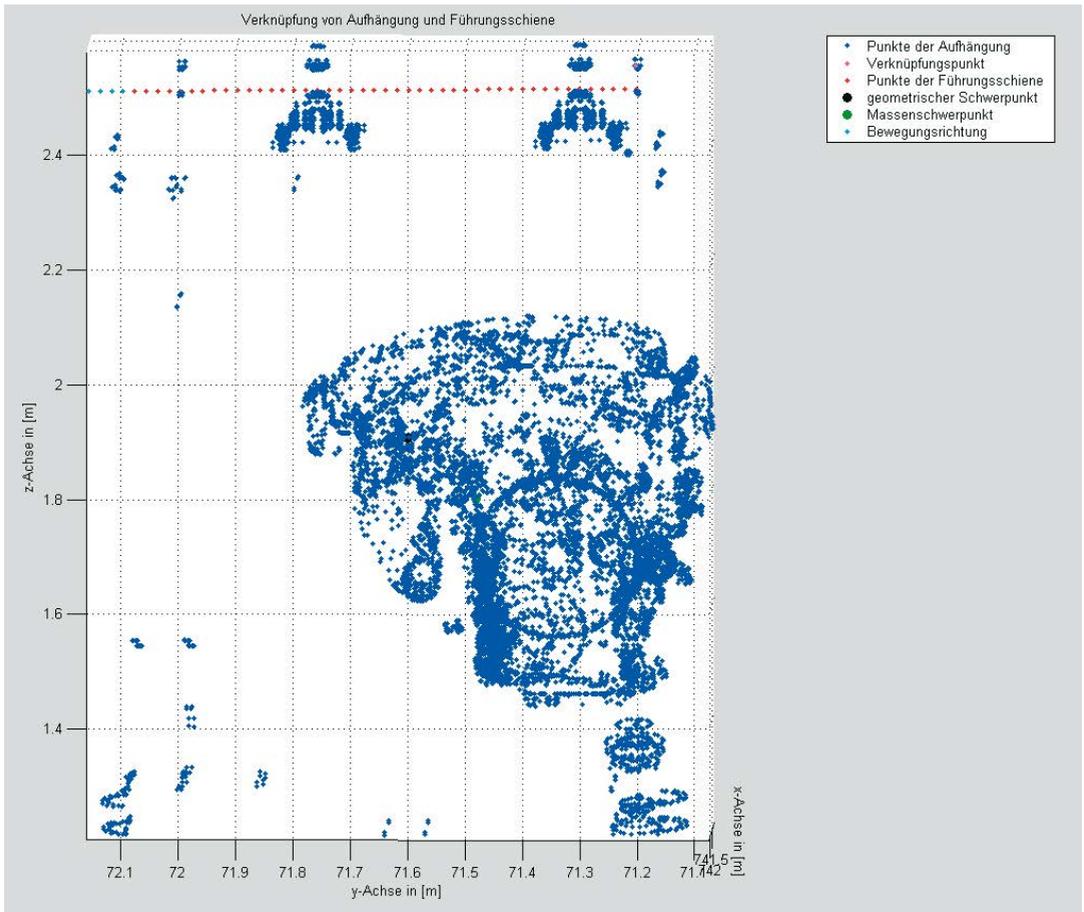


Abb. 6: Kollisionsprüfung entlang einer industriellen Transportlinie

## 5.2. Spurenaufzeichnung motorisierter oder handgeschobener Transportvehikel

Das anonymisierte Monitoring der Bewegungen, Haltepunkte und Verweilzeiten von Trolleys aller Art kann im Sinne des Data Mining wesentliche Aufschlüsse für die Optimierung von Orientierungshilfen, logistischen Abläufen oder Warenplatzierungen erbringen. Dazu bedarf es spezieller lokaler oder extern unterstützter globaler Positionierungssysteme [23, 24]. Das im grenzübergreifenden europäischen Forschungsförderungsprogramm ERA-STAR Regions vorselektierte Gemeinschaftsprojekt „Trollocate“ des GIS-Entwicklers PRISMA-Solutions mit dem Lehr-

stuhl für Geodäsie strebt durch Kombination modernster Technologie des AGPS und HSGPS mit selbst entwickelter Koppelnavigationstechnik eine anwenderspezifische Lösung an, für die bereits großes Interesse in verschiedenen Branchen der Wirtschaft besteht. Aus den solchermaßen aufgezeichneten Spuren der Trolleys kann dann beispielsweise eine Visualisierung bestimmter Hot Spots generiert werden. Die zugehörige Software [25] wurde bereits vorangehend mithilfe einer an der TU Darmstadt prototypisch entwickelten Lösung zur Indoor-Positionierung [26] entwickelt. Das Ergebnis einer Testserie zeigt Abb.7.

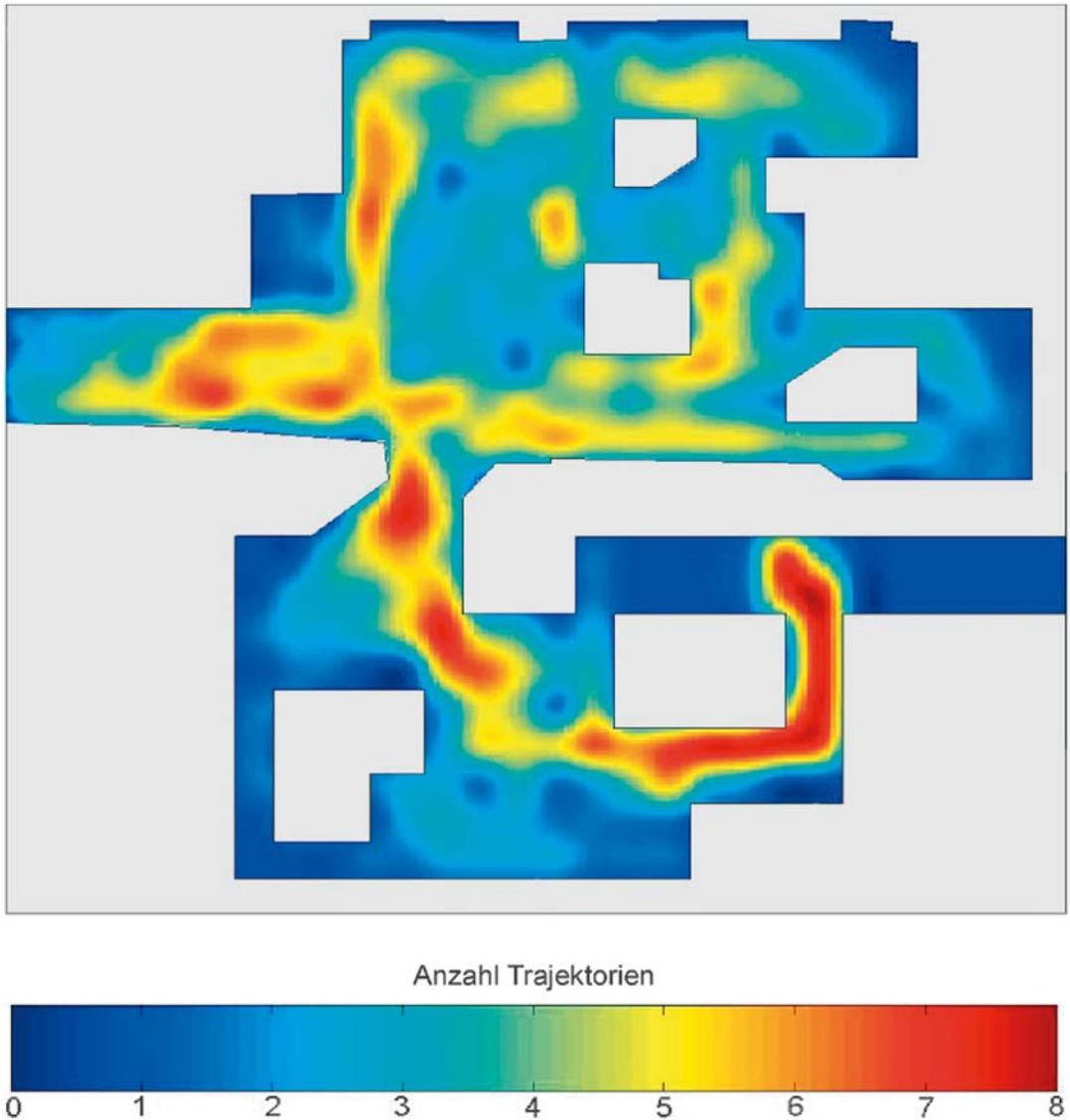


Abb. 7: Hot Spots aus gehäuften Spuren von Trolleys

## 6. Ausblick

Der vorliegende Beitrag hat versucht, einen anschaulichen Bogen des weiten Arbeitsfeldes Monitoring aus Sicht der Operativen Geodäsie aufzuspannen. Möge er von den Kolleginnen und Kollegen der Geodäsie als Anreiz und Ermutigung verstanden werden, das Feld weiter und neu zu bestellen! Die nach Ansicht des Autors wichtigste begleitende Leistung in der universitären Aus-

bildung muß es sein, die so vielfältigen technischen Möglichkeiten mit ihren Anwendungsszenarien nicht nur den Studierenden der Geodäsie und Geoinformation, sondern in geeigneten interdisziplinären Lehrveranstaltungen auch jenen des Bauingenieurwesens, des Maschinenbaus, der Geologie, der Informatik, ja selbst der Wirtschaftswissenschaften näher zu bringen. Denn nur so wird fachübergreifende Entwicklung und Nutzen sprießen können.

## Literaturverzeichnis

- [1] *Haberler, M.*: Einsatz von Fuzzy-Methoden zur Detektion konsistenter Punktbewegung. Dissertation, TU Wien, 2004.
- [2] *Stempfhuber, W.; Zinberger, S.; Bergmann, N.*: Online Monitoring historischer Kirchen mit einem Präzisions-tachymeter mittels reflektorloser, direkter oder indirekter Winkel- und Streckenmessung. In: Ingenieurvermessung 2004, Zürich, 2004.
- [3] *Stempfhuber, W., Maurer, W., Zinsberger, S.* Konvergenzmessungen an der Klosterkirche Walderbach. Technischer Bericht (unveröffentlicht), TU München, 2003.
- [4] *Foppe, K.*: Permanent Automatic Monitoring of historical Ecclesiastical Architecture. In: Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering III, TU Wien, 2006 (im Druck).
- [5] *Chmelina, K.*: Wissensbasierte Analyse von Verschiebungsdaten im Tunnelbau. Dissertation, TU Wien, 2002.
- [6] *Kahmen, H., Niemeier, W.*: OASYS-Integrated Optimization of Landslide Alert Systems. VGI, 91.Jg., Nr.1, Wien, 2003.
- [7] *Wong, K., Man, K., Chan, W.*: Monitoring Hong Kong's Bridges – Real-Time Kinematic Spans the Gap. GPS World, Vol.12, No.7, 2001.
- [8] *Borchert, K.*: Moderne Verstärkungsverfahren für Spannbetonbrücken aufgezeigt am Beispiel der Talbrücke Röslau. Tagungsband zum 8. Münchner Massivbau Seminar, 2004.
- [9] *Wunderlich, Th., Schäfer, Th., Zilch, K., Penka, E., Cettl, V.*: Schadenserkenkung an einer Spannbetonbrücke durch reflektorlose Deformationsmessungen. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr. Radu Bancila, TU Politehnica Timisoara, Rumänien, 2005.
- [10] *Wunderlich, Th.*: Geodetic Monitoring with Prismless Polar Methods. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Engineering Surveying INGEO04 (CD), Bratislava, 2004.
- [11] *Penka, E., Zilch, K., Hennecke, M., Wunderlich Th., Schäfer, Th., Foppe, K.*: Schadenserkenkung durch reflektorlose Deformationsmessungen. Tagungs-CD zum 9. Münchner Massivbau Seminar, Hrsg. K. Zilch, TUM, 2005.
- [12] *Brunner, F.K., Zobl, F., Gassner, G.*: On the Capability of GPS for Landslide Monitoring. Felsbau, 21.Jg., Nr.2, 2003.
- [13] *Singer, J., Thuro, K., Sambeth, U.*: Entwicklung eines kontinuierlichen 3D Überwachungssystems für instabile Hänge mittels Time Domain Reflectometry (TDR). Felsbau, 24.Jg., Nr.3, 2006.
- [14] *Pink, S.*: Entwicklung und Erprobung eines multifunktionellen Geo-Sensornetzwerkes für ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen. Dissertation (in Begutachtung), Univ. d. Bundeswehr München, 2006.
- [15] *Wasmeier, P.*: Potential der Objekterkennung mit dem Servotachymeter TCA2003. Geomatik Schweiz, 102.Jg., Nr.2, 2004.
- [16] *Walser, B.*: Development and Calibration of an Image Assisted Total Station. Mitt. d. Inst. f. Geodäsie und Photogrammetrie Nr. 87, ETH Zürich, 2005
- [17] *Wunderlich, Th.*: Automatisches Zielen mit Tachymetern und Theodoliten. In: Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Univ.Prof. Dr.-Ing. Heribert Kahmen, Geowissenschaftliche Mitteilungen Nr.71, TU Wien, 2005.
- [18] *Jäger, W.*: Aufklärung vermuteter Punktverschiebungen in einem alpinen Tiroler Festpunktfeld. Diplomarbeit (KG Ellbögen/Wipptal), TU Wien, 1994.
- [19] *Niemeier, W.*: Zur Nutzung von GPS-Meßergebnissen in Netzen der Landes- und Ingenieurvermessung. ZfV, 117.Jg., Nr.8/9, 2003.
- [20] *Langguth, F.*: Effiziente geodätische Detektion von Hangbewegungen am Beispiel des unteren Gerlostales. Diplomarbeit, TU München, 2005.
- [21] *Dornbusch, P., Zündt, M.*: Realisierung von Positions-ortungen im WLAN. ITG-Fachtagung „Technologie und Anwendungen für die mobile Informationsgesellschaft“, Dresden, 2002.
- [22] *Auer, S.*: Geodätisches Konzept der Kollisionsvermeidung entlang von Elektrohängebahnen in der Automobilproduktion. Diplomarbeit, TU München, 2005.
- [23] *Wunderlich, Th., Schäfer, Th.*: Neuartige Ortungstechniken – Konzepte und Tatsachen. DVW-Mitteilungen, Bd.45, Wißner Verlag, Augsburg, 2004.
- [24] *Wunderlich, Th., Preis, S., Su, Ch.*: Wireless Assisted GPS – technische Möglichkeiten und notwendige Infrastruktur. DVW-Mitteilungen, Bd.49, Wißner Verlag, Augsburg, 2006.
- [25] *Schäfer, Th.*: Anwendung eines Indoor-LPS zur Bestimmung von Einkaufswagentrajektorien, Diplomarbeit, TU München, 2003.
- [26] *Ziegler, C.*: Entwicklung und Erprobung eines Positionierungssystems für den lokalen Anwendungsbereich. Dissertation, DGK, Reihe C, Nr.446, 1996.

**Anschrift des Autors:**

Univ.Prof. Dr.-Ing.habil. Thomas A. Wunderlich: Lehrstuhl für Geodäsie, Technische Universität München, Arcisstraße 21, D-80290 München. e-mail: th.wunderlich@bv.tum.de 