

## **“Ingenieurgeodätische Modellbildung zur Überwachung der Rügener Steilküste”**

Prof. Dr.-Ing. Karl Foppe

### **Zusammenfassung**

Nach Erdbeben und Flutkatastrophen führen Hangrutschungen zu den größten Zerstörungen durch Naturereignisse. Auch in jüngster Zeit verdeutlichen schwerste Unglücke verursacht durch Hangrutschungen den Bedarf an sogenannten Monitoringsystemen, mit denen eine zuverlässige Überwachung gefährdeter Objekte möglich wird. Heutzutage darf das Hauptaugenmerk nicht auf der reinen Beobachtung von Bewegungen des Rutschhangs liegen. Ziel muss die Reduktion von Schäden und somit die Vermeidung von Gefahren für Mensch und Umwelt sein. Dazu bedarf es eines Monitoringsystems, das durch Erfassung relevanter Einflussgrößen wie z.B. Wasserstände, Niederschläge etc. eine zuverlässige Angabe besonderer Gefahrenpotentiale oder im Idealfall sogar eine Vorhersage von Rutschungsereignisse ermöglicht. So ein System muss ökonomisch sinnvoll sein, aber auch der Bedeutung des Rutschareals als kulturellem, touristischen oder auch Wirtschaftsgut gerecht werden.

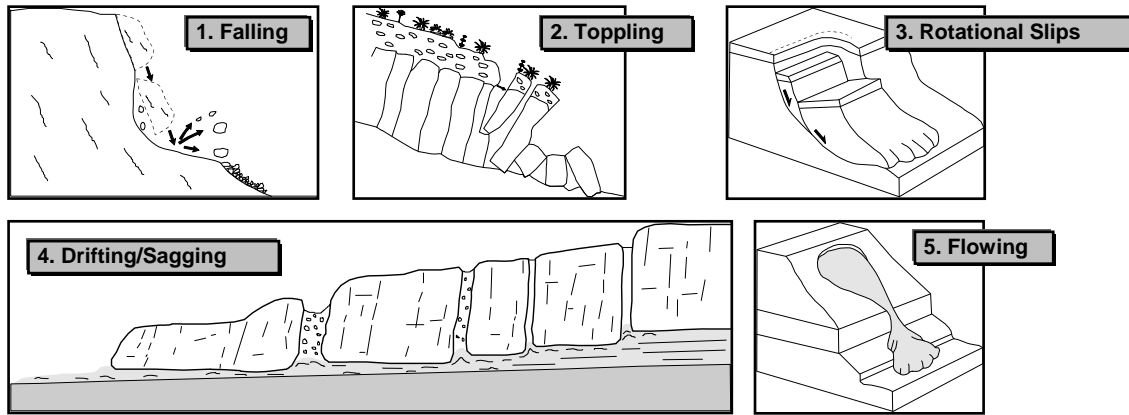
Im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit von Geologie und Geodäsie soll die Erweiterung des Kenntnisstandes bezüglich Rutschungsprozessen und den sie steuernden Faktoren angestrebt werden. Diese Zielsetzung setzt eine umfangreiche Datenerhebung beider Fachdisziplinen voraus, die innerhalb eines gemeinsamen Auswertemodelles zu verarbeiten ist und die Basis eines „geotechnischen Informationssystems“ bilden kann. Dabei dienen die geodätisch registrierten Bewegungen zur Überprüfung und Kalibrierung des ingenieurgeologischen Modelles.

Da sowohl die geodätischen Messungen als auch die Erfassung der Einflussfaktoren, die für die Rutschung verantwortlich sind, erfahrungsgemäß sehr aufwendig und dementsprechend teuer sind, sind neue Techniken zu untersuchen. Beispielsweise könnte die Beurteilung der Materialparameter und des Durchfeuchtungsgrades eines Rutschhanges mit Hilfe der Fernerkundung mittels einer sogenannten Hyperspektralkamera erfolgen, die Bilder des Hanges in verschiedensten, nicht sichtbaren Spektren liefert. Diese Möglichkeiten sind zu untersuchen.

In den zu erstellenden mathematischen Modellen wird das Expertenwissen aus Ingenieurgeologie und Ingenieurgeodäsie kombiniert. Ziel der Modellierung ist es, zu jeder Zeit aus den vorhandenen Daten der Einflussfaktoren das aktuelle Gefahrenpotential des Rutschhangs abzuleiten. Im Idealfall sollten nach erfolgreicher Modellbildung durch Aufnahme der rutschungsauslösenden Einflüsse z.B. mit der Hyperspektralkamera das Gefahrenpotential eines Rutschhanges abgeschätzt und entsprechende Warnungen ausgesprochen werden können. Aus heutiger Sicht ist dies derzeit zwar noch „Zukunftsmusik“, eine Realisierung im Rahmen grundlegender Forschungsarbeiten scheint aber sehr vielversprechend zu sein. Absolute Grundvoraussetzung zur Schaffung eines solchen Systems ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Ingenieurgeodäsie und Ingenieurgeologie.

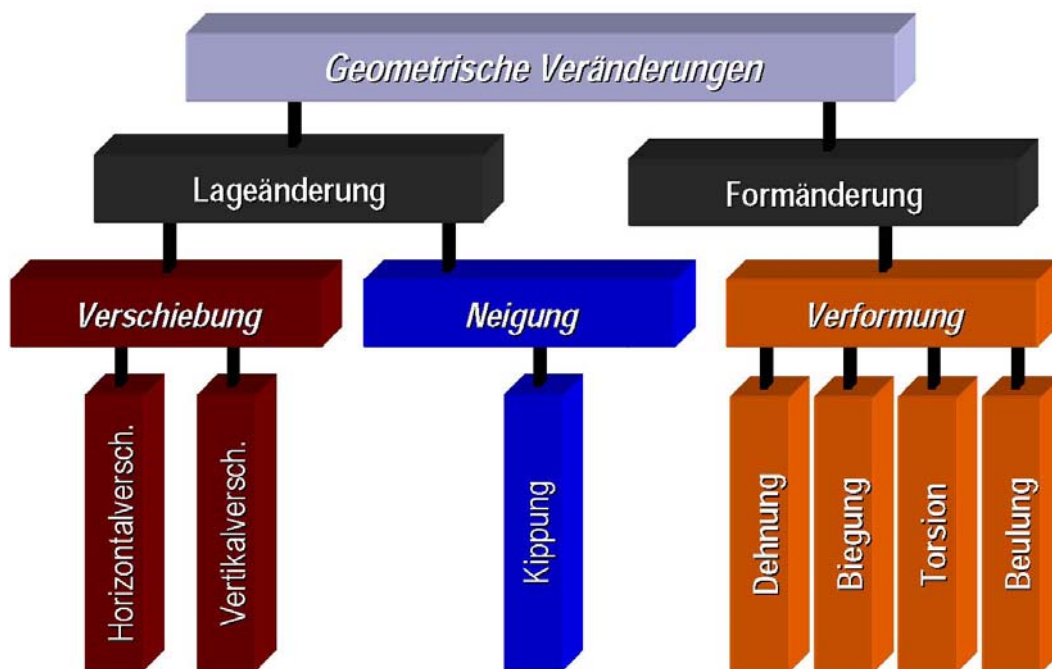
## 1 Einleitung

In der jüngsten Zeit verdeutlichten schwerste Unglücke zu Hangrutschungen den Bedarf an Meßsystemen, mit denen eine zuverlässige Überwachung gefährdeter Objekte mit höchster Genauigkeit möglich wird. Dabei sind die typischen Bewegungsmuster der zu überwachenden Objekte zu ermitteln, wie sie in Abbildung 1 und 2 wiedergegeben werden.



**Abb. 1:** Klassifikation der Bewegungsverhaltens bei Hangrutschungen der ‚International Geotechnical Societies‘ UNESCO Working Party for World Landslide Inventory (1994)

Das gemäß den Klassifikationen in den Abbildungen 1 und 2 beschriebene Bewegungsverhalten kann als Änderung geometrischer Größen detektiert werden. Um das Bewegungsverhalten jedoch wirklich zu verstehen und eventuell sogar präventive Alarmmeldungen geben zu können, bedarf es einer umfassenden Modellbildung. Dazu ist nicht nur die Erfassung der geometrischen Veränderungen vonnöten sondern auch die Betrachtung der wirkenden Kräfte und Einflussfaktoren, die die Ursache der geometrischen Änderungen darstellen. Dazu kann das zu überwachende Objekt als physikalisches Filter aufgefasst werden, wie in Abbildung 3 dargestellt.



**Abb. 2:** Bewegungsverhalten von Bauwerken nach DIN1076

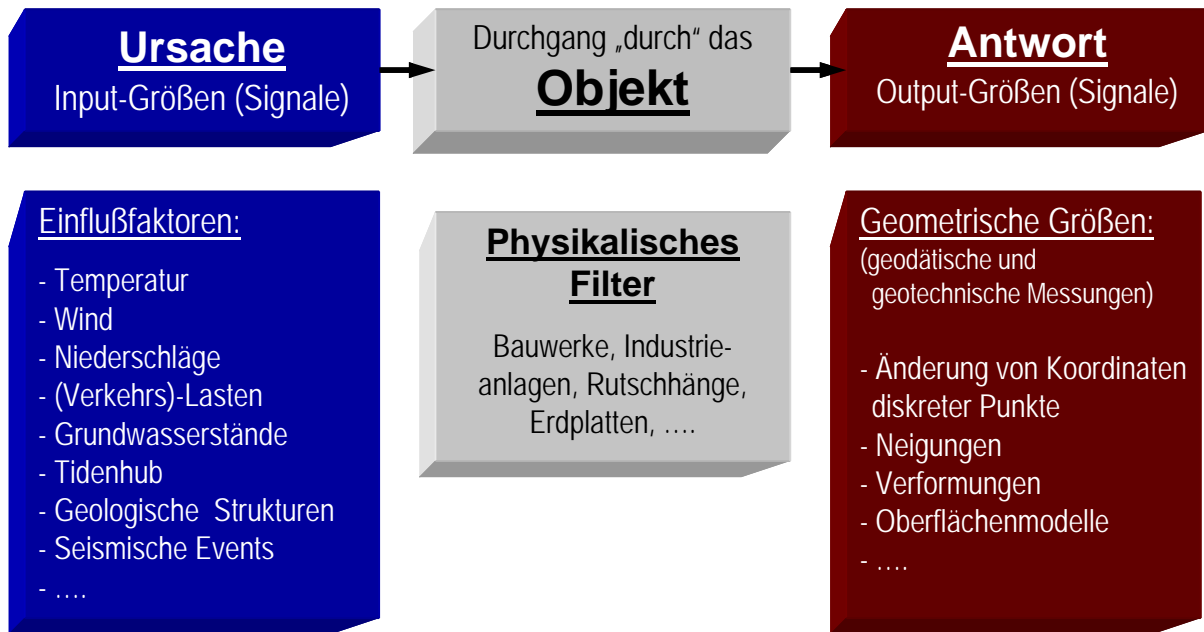


Abb. 3: Modellierung des Überwachungsobjektes als „physikalisches Filter“

Hauptaugenmerk eines hier betrachteten Monitoringsystems muss die Reduktion von Schäden und somit in der Vermeidung von Gefahren für Mensch und Umwelt sein. Dies kann erreicht werden, indem die synchron erfassten Einflussfaktoren und geometrischen Änderungen gemäß Abbildung 4 im kombinierten Auswertemodell einer dynamischen Deformations- und Systemanalyse unterzogen werden.

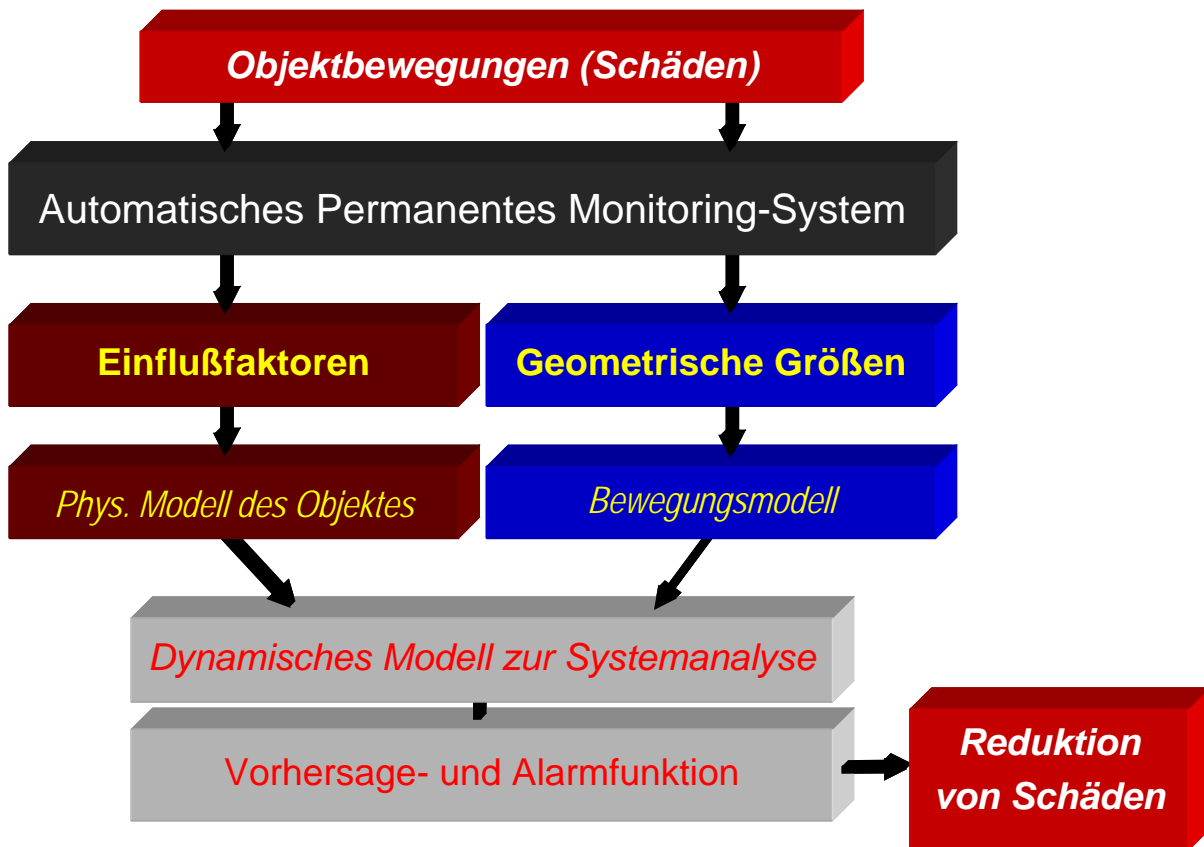


Abb. 4: Modellierung des Überwachungsobjektes als „physikalisches Filter“

Im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit von Geologie und Geodäsie muss die Erweiterung des Kenntnisstandes bezüglich Rutschungsprozessen und den sie steuernden Faktoren angestrebt werden. Diese Zielsetzung setzt eine umfangreiche Datenerhebung beider Fachdisziplinen voraus, die innerhalb eines gemeinsamen Auswertemodelles zu verarbeiten ist und die Basis eines geotechnischen Informationssystems bilden kann.

Die äußerst präzisen geodätischen Messergebnisse müssen in ihrem Ausmaß durch die zu bildenden Struktur- und Bewegungsmodelle hinlänglich erklärt und durch geeignete mathematische Funktionen beschrieben werden. Die geodätisch registrierten Bewegungen dienen zur Überprüfung und Kalibrierung des ingenieurgeologischen Modelles.

Ein erstes Ziel eines so gestalteten Geotechnischen Informationssystems ist dann erreicht, wenn für ein bestimmtes Rutschgebiet jederzeit der aktuelle Bewegungsstatus angegeben werden kann. Ein erster Arbeitsschritt umfasst eine *kinematische Analyse* der gemessenen Punktverschiebungen, bei der die detektierten Bewegungen in Relation zur Zeit gesetzt werden, um Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Prozesse zu modellieren. Der zweite und wesentliche Schritt ist die Einbeziehung der für die jeweiligen Bewegungen maßgeblichen Kräfte (dynamisches Modell) gemäß Abbildung 3 für die Klärung des Deformationsverhaltens eines Hanges. Sind die ursächlichen Zusammenhänge zwischen Rutschungsprozessen und den sie steuernden Faktoren erkannt und in befriedigender Weise formuliert, bietet sich dann die Möglichkeit, eine fundierte Prognose über das zukünftige Bewegungsverhalten abzugeben (Abb. 4). Mit der Vorhersage eines Rutschereignisses für das jeweilige Untersuchungsgebiet ist das Hauptziel der beschriebenen Modellierung erreicht, da hierdurch das Gefährdungspotential maßgeblich herabgesetzt werden kann. Entsprechende Vorgehensweisen zur Einleitung von Stabilisierungs- und Sicherungsmaßnahmen könnten so effizient geplant und in die Praxis umgesetzt werden. Eine vollständige Realisierung dieses Systems in Hinblick auf die Verarbeitung heterogener Daten (z.B. geodätisch ermittelte Punktverschiebungen mit den korrespondierenden bodenmechanischen Kenngrößen sowie den vorherrschenden Wasserständen) in einer Datenbank muss das Ziel dieser Arbeiten sein, um die Daten jederzeit abrufen und das aktuelle Gefährdungspotential einschätzen zu können.

## **2 Ingenieurgeodätisches Monitoring zur Überwachung von Rutschhängen**

### **2.1 Anforderungen an ein ingenieurgeodätisches Monitoringsystem**

Mit dem Auftreten von Schäden und Gefährdungen durch Bewegungen von potentiellen Rutschhängen wird die Notwendigkeit ersichtlich, Größen und Richtungen dieser Bewegungen zu detektieren und über einen längeren Zeitraum permanent zu überwachen. Im Idealfall werden Überwachungsmessungen bereits vor Eintritt eines Schadensereignisses durchgeführt, um das „normale“ Bewegungsverhalten ohne Schädigung kennen zu lernen und diese „normalen“ Bewegungen gemäß des Modells in Abbildung 4 von denen im geschädigten Zustand trennen zu können.

Konkret lässt sich folgendes Anforderungsprofil an ein modernes Monitoringsystem erstellen:

- Permanente Überwachung zur Bestimmung des Rutschhangsverhaltens über einen kompletten Jahresgang, evtl. auch für Tagesgänge (z.B. Ermittlung von Verschiebungen/Verformungen durch 24h-Messung im Dreistundentakt)

- Permanente Erfassung der relevanten Einflussgrößen (Grundwasser, Oberflächenwasser, oberflächennahes Wasser als Haupteinflussgrößen, zusätzlich meteorologische Größen o.ä. nach ingenieurgeologischem Modell)
- Genauigkeiten (Wahl des Messverfahrens in Abhängigkeit zu erwartenden Bewegungen, z.B. Messung von dreidimensionalen Punktbewegungen mit maximalen Standardabweichungen von  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 1 \text{ mm}$  je Koordinatenkomponente.)
- Wünschenswert ist ein flexibles Meßsystem, das es erlaubt, das Messkonzept im späteren Bedarfsfalle um zusätzliche Punkte bei minimalen Kosten zu erweitern.
- Onlinesystem (Datenübertragung und Wartung)
- Dynamisches modernes Datenbankkonzept (Synchronisation, Messraten, ständige Verfügbarkeit an beliebigen Orten, Sicherheit)
- Statistische Auswerteverfahren (vollautomatische, strenge kinematische / dynamische Modellierung und Zeitreihenanalyse mit Alarmoption)
- *Das System muss ökonomisch sinnvoll sein, aber auch der Bedeutung des Objektes als kulturellem, touristischen oder auch Wirtschaftsgut gerecht werden*

## 2.2 Messkonzepte und -verfahren

Der Ingenieurgeodäsie stehen modernste Messverfahren zur Verfügung. Jedes moderne Instrument ist heutzutage durch vollautomatische Zieleinrichtungen und Ablesesysteme sowie moderne Speichermedien für Permanentmessungen geeignet. Neben den rein geodätischen Sensoren wie GPS-Empfänger, Tachymeter, Nivellier, Photogrammetrische Kamera und Laser-Scanner lassen sich aber auch alle Arten geotechnischer Sensoren gemäß Abbildung 5 in das Meßsystem einbinden.

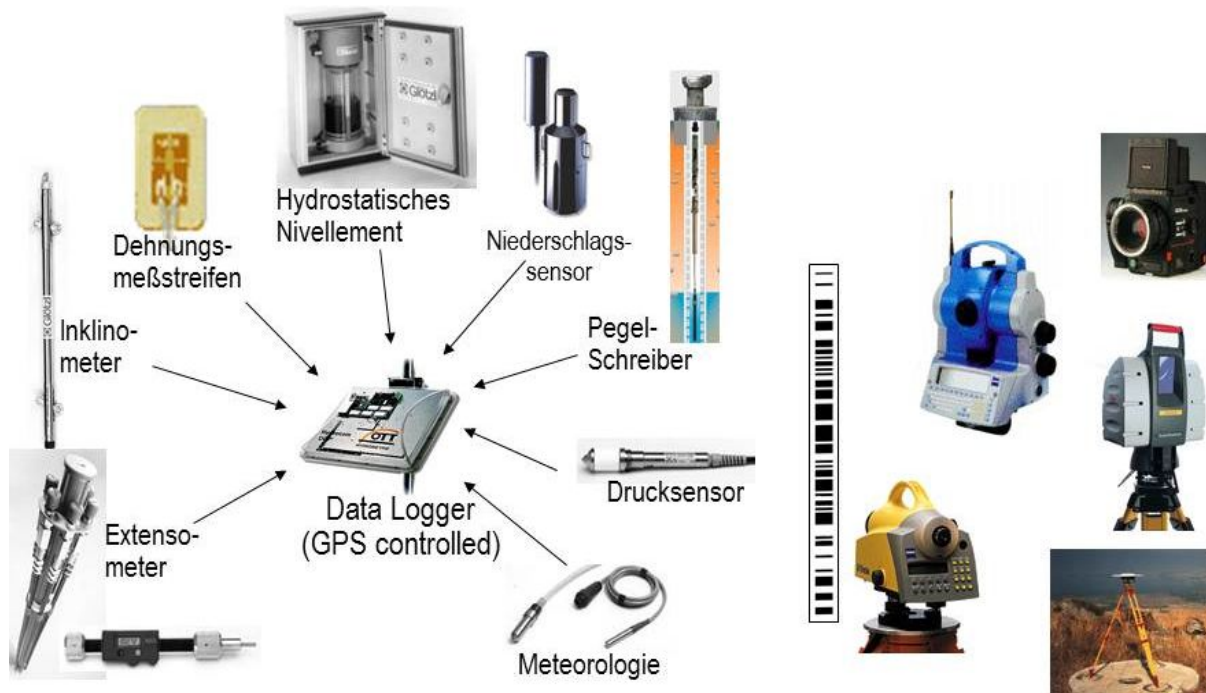


Abb. 5: Auswahl moderner Sensoren für ein modernes Monitoringsystem für Hangrutschungen

## 2.2.1 Einsatz des Terrestrischen Laserscannings

Mit einem sogenannten Laserscanner können in kurzer Zeit ganze Rutschhänge in einem vorzugebenden Raster mittels Lasertechnologie berührungslos abgescannt werden. Voraussetzung ist eine direkte Sichtverbindung zu dem aufzunehmenden Bereich. Es entsteht eine Wolke aus Millionen von Punkten als Momentaufnahme. Erste Untersuchungen an der Steilküste in Rügen erfolgten durch die Hochschule Neubrandenburg im Rahmen von Diplomarbeiten bereits 1996 (siehe Abb.6).

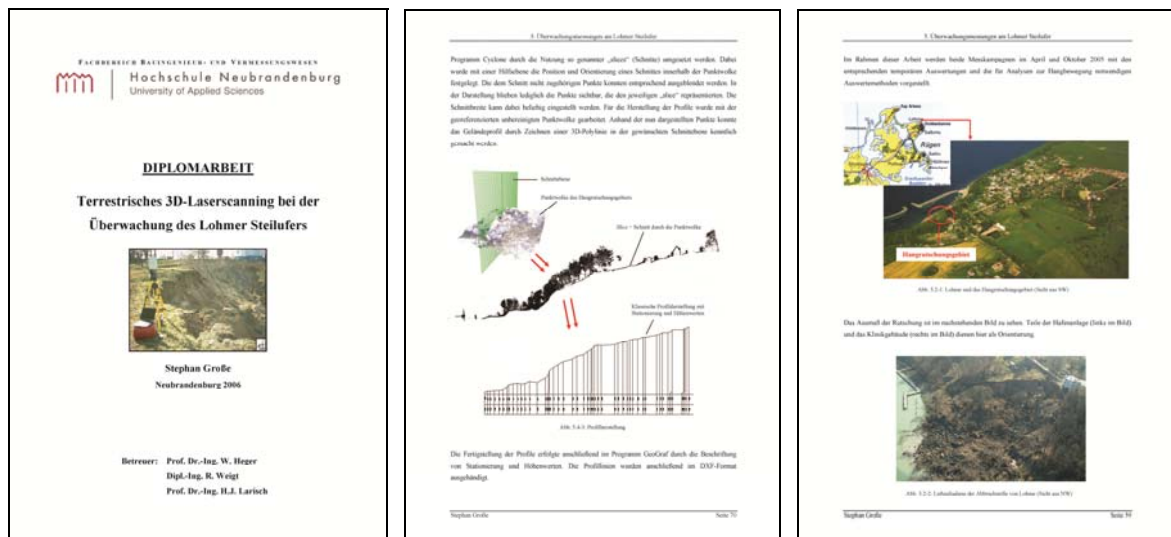


Abb. 6: Diplomarbeit 1996 „Terrestrisches 3D-Laserscanning bei der Überwachung des Lohmer Steilufers“

Eine Aufnahme zur einfachen Modellierung ist mittels solcher Verfahren leicht möglich. Kritisch zu betrachten ist jedoch die unzureichende Genauigkeit. Die Streckenmessgenauigkeit liegt unter optimalen Bedingungen bei 5 bis 10 mm, verschlechtert sich sogar noch stark in Abhängigkeit des Reflexionsgrads des Materials und des Auftreffwinkels.

Für eine Deformationsanalyse ist das Fehlen „identischer Punkte“ zwischen zwei Scanaufnahmen das größte Problem. Bei der Auswertung geht man daher meist so vor, dass aus der Punktwolke Flächen und Ebenen extrahiert werden und die „Aufnahmen“ nachher miteinander verglichen werden (siehe Abbildung 7). Dort ist die mangelnde Genauigkeit das entscheidende Kriterium, da sich nach derzeitigem Stand der Technik an Rutschhängen nur Bewegungen im Zentimeterbereich signifikant nachweisen lassen.

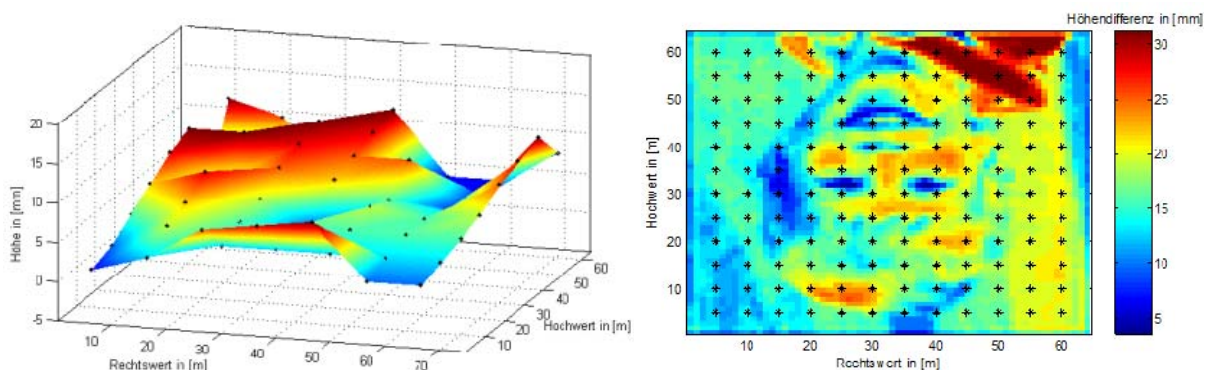


Abb. 7: Deformationsanalyse zum terrestrischen 3D-Laserscanning an idealen Ebenen

## 2.2.2 Automatische Messungen mittels Robot-Tachymetern

Für die Überwachungsmessungen an Rutschhängen ist der Einsatz von Robot-Tachymetern besonders empfehlenswert (z.B. Abb. 8a bis 8d). Diese motorisierten Robot-Tachymeter sind in der Lage, mit geeigneten Reflektoren (z.B. Abb. 9a bis 9d) bestückte Punkte vollautomatisch anzuzielen und deren dreidimensionale Koordinaten mit Standardabweichungen von  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z < 1 \text{ mm}$  zu liefern. Diese Koordinaten werden fortlaufend beobachtet und bilden sogenannte Zeitreihen, die der Auswertung zugeführt werden. Darüber hinaus bestünde aber auch die Möglichkeit, ganze Flächen in einem vorgegeben Raster mit dem Tachymeter reflektorlos abzuscannen. Hierbei ist die Geschwindigkeit zwar viel geringer, jedoch lassen sich – in Abhängigkeit vom Reflexionsgrad der Oberfläche – sogar höhere Genauigkeiten als beim Terrestrischen Laserscanning erzielen. Der größte Vorteil gegenüber dem Terrestrischen Laserscanning besteht darin, dass sich die gescannten Flächen zweier Meßepochen über die identischen Prismenpunkte exakt in Relation setzen lassen.

Voraussetzung zum Einsatz von Tachymetern ist natürlich eine Sichtverbindung zwischen Instrument und Reflektor. Eventuell sind die Objektpunkte exzentrisch über Stangen oder indirekt über Planspiegel zu signalisieren. Idealerweise ist ein solcher Robot-Tachymeter möglichst an einem bewegungsfreien Punkt aufzustellen, der für unbefugte Personen nicht zu erreichen ist. Hier bietet sich die Errichtung eines Beobachtungspfeilers seeseitig in einem Container an. Eine Rückversicherung der Tachymeterstandpunkte erfolgt über sogenannte Stützpunkte, die sich im unbewegten Bereich befinden sollten. „Unbewegte Punkte“ könnten landseitig gefunden werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die beispielsweise zwei Stützpunkte mittels GPS auf deren Eigenbewegung zu untersuchen und diese Informationen zur Korrektur der Stützpunkte zu verwenden.

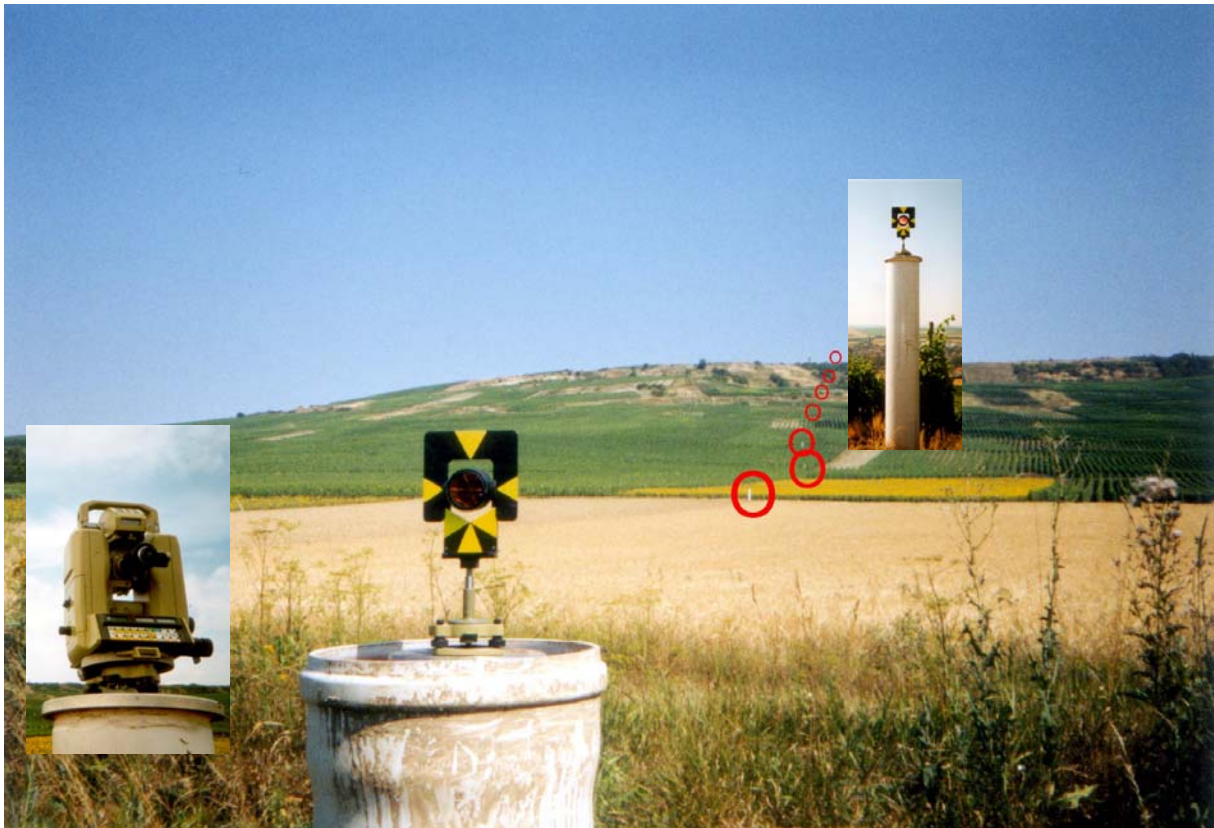
Die Objektpunkte werden an diskreten Punkten des Rutschhanges mit Prismen ausgestattet, die dauerhaft stabil fixiert werden. Die Befestigung kann direkt im Hang oder bei schwächer geneigtem Gelände ebenfalls über Pfeiler erfolgen, wie in Abb. 12 an einem Rutschhang in Rheingau beispielhaft dargestellt.



**Abb. 10a bis 10e:** Robot-Tachymeter *Trimble S6* mit „high precision“-Option bzw. *S8*, *Topcon IS*, *Leica TCA2003* und *Leica TM30*



**Abb. 11a bis 11c:** Prismen *Nedo* mit Halter, *Leica GPH1* mit Halter *GPH1* (Genauigkeitsspezifikation (Hersteller)  $\ll 1 \text{ mm}$ ) und *Leica Spezial-Prisma GPR112* mit Halter *GHT112* (Tunnelbau) (Genauigkeitsspezifikation (Hersteller)  $< 1 \text{ mm}$  (Erfahrungswert ähnlich *GPH1*))



**Abb. 12:** Beispiel eines Monitoringsystems an einem Rutschhang

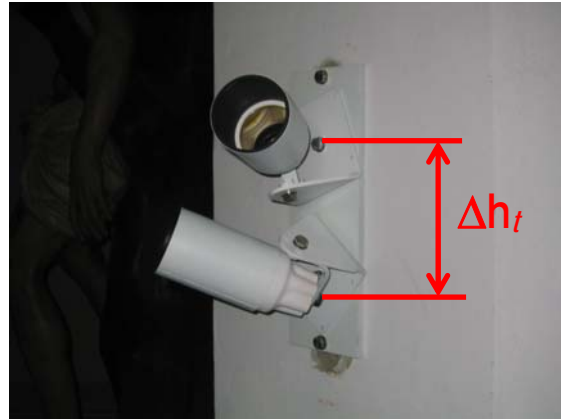
Bei größeren Objekten können evtl. nicht alle Objektpunkte von einem Standpunkt aus direkt angezielt werden. Manchmal ist es möglich, den verdeckten Objektpunkt indirekt über Planspiegel anzuvisieren. Die Koordinaten sind über spezielle Vektorverfahren basierend auf den Start-Koordinaten des Installationszustandes umzurechnen.

Bei sehr komplexen Objekten wird jedoch der Einsatz mehrerer Robot-Tachymeter unumgänglich sein, um wirklich alle Objektpunkte zu erfassen. Jedes Robot-Tachymeter spannt ein einzelnes Koordinatensystem auf. Alle Einzelsysteme sind in ein gemeinsames Objektkoordinatensystem zu transformieren. Als Verknüpfungspunkte können bei gegenseitiger Sicht Prismen vertikal unter dem Instrument angebracht werden. Die Lagekoordinaten des Prismas und des Instrumentes sind identisch. Der vertikale Unterschied  $\Delta h_t$  ist aus Laborkalibrierungen der Konsole bekannt und bleibt konstant, da die dritte Fußschraube des Dreifußes fixiert wurde (Abb. 13a). Zur Schaffung weiterer identischer Punkte zur Transformation werden Objektpunkte als Doppelprismen installiert. Dazu werden zwei Prismen in festem Abstand  $\Delta h_t = 100 \text{ mm}$  auf einer gemeinsamen Grundplatte vertikal übereinander montiert und auf die verschiedenen Tachymeter ausgerichtet. Wieder sind die Lagekoordinaten identisch und mit dem Offset  $\Delta h_t$  kann eine einheitliche Punkthöhe für das Doppelprisma eingeführt werden (Abb. 13b). Die Abbildungen 13 entstammen einem Monitoringsystem aus der Frauenkirche in München und sind beispielhaft zu verstehen, um das Prinzip der Verknüpfung zu demonstrieren.





**Abb. 13a)** *Kombinierter Stand- und Objektpunkt*  
(Prisma vertikal unter Instrument kann von weiterem Tachymeter angezielt werden,  $\Delta h_i = \text{const.}$  ist aus Laborkalibrierung bekannt)



**Abb. 13b)** *Kombinierter Objekt-/Verknüpfungspunkt*  
(Doppelprisma vertikal übereinander auf gemeinsamer Grundplatte, kann von mehreren Tachymetern gleichzeitig angezielt werden,  $\Delta h_r = 100 \text{ mm} = \text{const.}$ )

### Vorteile des Verfahrens

- absolute Informationen über die Bewegungen der Objektpunkte in drei Dimensionen. Aus den Koordinaten lassen sich beliebige Streckenkombinationen rechnen.
- automatische Ablesung
- tägliche Auswertung
- Alarmfunktion optional nachrüstbar
- Am Hang werden nur an diskreten Punkten Prismen angebracht.
- Flächige Aufnahme ist mit modernen Tachymetern ebenso möglich wie mit reinen Laserscannern; einzig die Geschwindigkeit der Aufnahme ist viel geringer. Aber in der Regel werden auch nicht die großen Punktmengen benötigt, die ein Scanner erfassen würde.
- Große Flexibilität. Erfahrungsgemäß kristallisieren sich bei Überwachungsmessungen die wirklich interessanten Zonen mit den größten Bewegungen erst nach einer ersten Überwachungsphase heraus, so dass oftmals eine Ausdehnung (zusätzliche Objektpunkte) oder eine Umlegung von Objektpunkten notwendig wird. Die Anschaffungskosten für die Robot-Tachymeter sind zunächst sehr hoch, eine spätere Erweiterung bzw. Änderung des Messsystems erfordert jedoch für jeden zusätzlichen Punkt lediglich ein neues Prisma und für die Umlegung eines Punktes nur eine neue Befestigung, was minimale Kosten bedeutet.

### Nachteile des Verfahrens:

- Anschaffungskosten (pro einsehbarem Hangabschnitt ein Tachymeter)
- notwendiger Diebstahlschutz,

Aus heutiger Sicht der Ingenieurgeodäsie stellen Robot-Tachymeter das Nonplusultra der Messverfahren zur Überwachung von Rutschhängen dar. Erfahrungsgemäß lassen sich mit dieser Technik die Anforderungen an Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit über längere Beobachtungszeiträume garantieren und somit die notwendigen Zeitreihen zur Analyse bereitstellen.

### 2.2.3 Einsatz einer Hyperspektralkamera

Die Erfassung der Einflussfaktoren, die für die Rutschung verantwortlich sind, ist erfahrungsgemäß sehr aufwendig. Viele Sensoren müssen in unwegbarem Gelände installiert, betrieben und gewartet werden. Neue Techniken der Fernerkundung könnten hier Abhilfe schaffen, wie z.B. der Einsatz einer Hyperspektralkamera.

Eine Hyperspektralkamera ist – vereinfacht gesagt – eine Kamera die neben dem sichtbaren Licht und dem bekannten Infrarot auch viele weitere Frequenzbänder aufnimmt – man spricht von der Aufnahme ganzer Spektren. (Siehe auch Abb. 14)

Die Neubrandenburger Hyperspektralkamera ist eine Zeilenkamera, deren Zeilenlänge 1600 Pixel beträgt. Während der Aufnahme wird das Objekt abgescannt. Eine Steilküste oder eine Gebäudefassade wird beispielsweise von einem Stativ mit automatisch geführtem Drehteller aufgenommen. Es ließe sich auch mittels der Fernerkundung aus der Luft die Aufnahme gewinnen. Hier liefert die Bewegung des Flugzeuges die zweite Dimension.

Die Besonderheit einer Hyperspektralkamera ist ihre hohe spektrale Auflösung, die bei der Neubrandenburger Kamera 840 Kanäle zwischen 400 nm und 1000 nm umfasst. Diese hohe Auflösung wird bei der Aufnahme für jedes Bildpixel registriert, so dass für jedes Pixel ein komplettes Spektrum zur Verfügung steht. Ein klassisches Spektrometer liefert dagegen nur ein Spektrum für einen Punkt.

**Hyperspektralkamera zur flächigen Modellierung des physischen Zustands des Überwachungsobjektes**

Möglichkeiten:

- Flächige Temperaturverteilung an Bauwerken (z.B. Sonne/Schattenwürfe)
- Durchfeuchtung von Rutschhängen (einzelne Niederschlagsereignisse sind i.d.R. nicht entscheidend)
- Flächige Ermittlung/Beurteilung von Materialparametern bzw. des Materialverhaltens zur Modellbildung





Hyperspektralkamera SOC700-VS, Surface Optics Corporation, USA

**Abb. 14: Zum Funktionsprinzip einer Hyperspektralkamera**

Die hohe spektrale Auflösung liefert die Information für eine sehr detaillierte Analyse des aufgenommenen Objektes. So können Wassergehalt, Temperaturunterschiede und Materialeigenschaften aus den Bilddaten entnommen werden, also Parameter, die für eine Beurteilung des Gefährdungsgrades der Küste essenziell sind. Dies wurde jedoch noch nie in der Praxis eingesetzt.

## 2.3 Auswertung / Modellbildung

### 2.3.1 Kongruenzmodell oder auch „quasistatische Analyse“

In früheren Zeiten wurde das zu überwachende Objekt für die Dauer einer Aufnahme – man sprach von „Epoche“ oder auch „Messkampagne“ für statisch erklärt. Es wurden dann die einzelnen Epochen mit Hilfe statistischer Methoden miteinander verglichen und auf signifikante Unterschiede untersucht. Ergebnis waren i.d.R. Verschiebungsvektoren wie in Abb. 15.

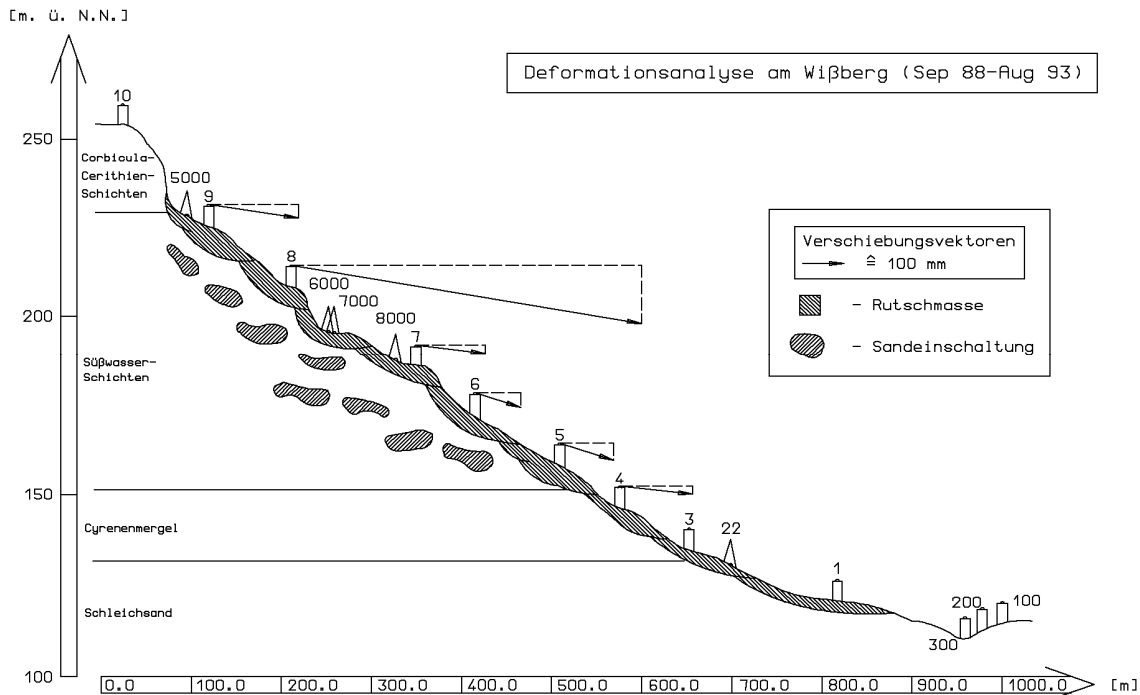


Abb. 15: Ergebnis der „quasi-statischen Modellbildung am Rutschhang von Abb. 12

### 2.3.2 Kinematische Analyse der Zeitreihen

Da alle automatischen Sensoren für permanente Messungen heutzutage kontinuierlich Daten liefern, sind die aufgezeichneten Messwerte aber als sogenannte „Zeitreihen“ aufzufassen. Dementsprechend betrachtet man in der Auswertung nicht mehr „einzelne Epochen“ oder auch Messkampagnen, sondern analysiert kontinuierliche Prozesse.

Im simpelsten Falle der Zeitreihenanalyse werden einzelne Punkte oder auch nur Koordinatenkomponenten in Relation zum zeitlichen Verlauf gesetzt. Wirkende Kräfte oder andere Einflussfaktoren bleiben unberücksichtigt. Hier lässt sich schon mittels einer simplen Regressionsanalyse die Bewegung eines Objektpunktes auf Trends und somit plastische Verformungen hin untersuchen. Konkret können die Geschwindigkeiten der Bewegungen geschätzt werden, wie das Beispiel in Abbildung 16 für ein Gebäude exemplarisch darstellt. Der aufgedeckte Trend erklärt hier die Rissbildung als Funktion der Zeit.

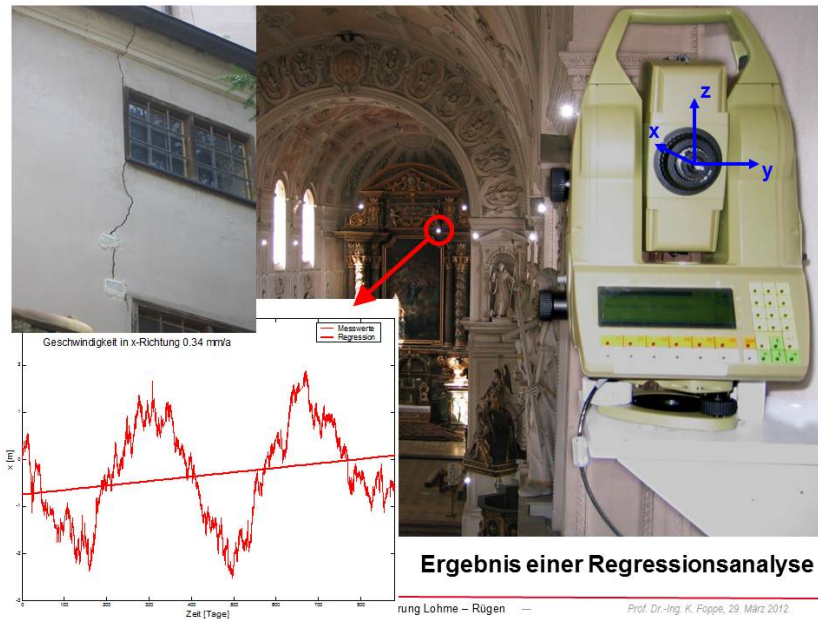


Abb. 16: Ergebnis einer „Regressionsanalyse“ mit deutlichem Trend (Kinematische Modellbildung)

### 2.3.3 Dynamische Modellbildung / Zeitreihenanalyse

Ziel der modernen Modellbildung ist das *Dynamische Modell*, das eine direkte Relation zwischen den Ursachen der Bewegungen (Wasserstände, Niederschläge etc.) und den Geometrischen Bewegungen des Rutschhangs gemäß Abbildung 3 herstellt. Die mathematische Modellbildung erfolgt dann im Zeitbereich – es werden also die Einflüsse und die Bewegungen jeweils über die Zeit miteinander verbunden, wie es in Abbildung 4 zu sehen ist. Wenn das Modell für einen Hang erstellt wurde, dann kann man bei Erreichen gewisser Grenzen der Einflussfaktoren die zu erwartenden Bewegungen des Hanges theoretisch voraussagen. Somit ließen sich Zeiträume größerer Gefährdung prognostizieren und es könnten konkrete Warnungen oder Betretungsverbote ausgegeben werden.

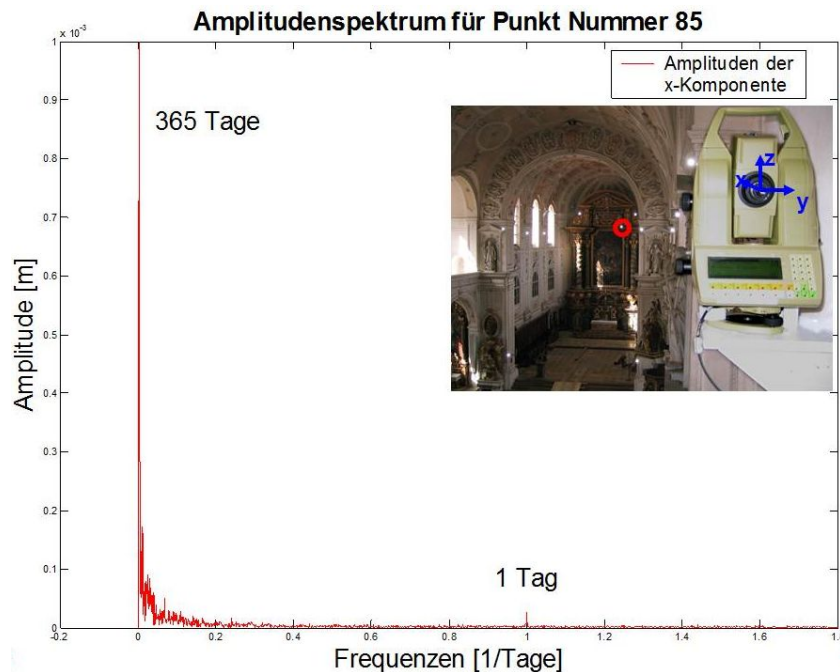
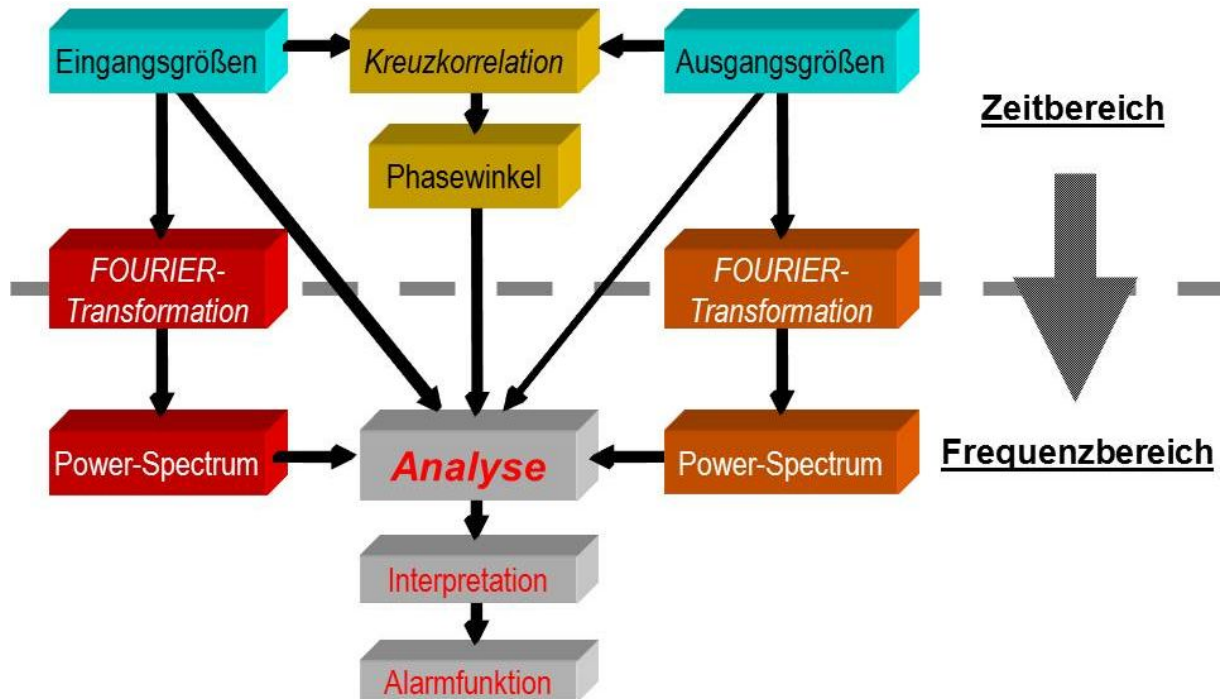


Abb. 17: Ergebnis einer „Frequenzanalyse“ der Zeitreihe aus Abb. 16

Das Modell ließe sich durch Überführung der Daten in den Frequenzbereich weiter optimieren. Transformiert man die Daten in den Frequenzbereich, wie dies in Abbildung 17 beispielhaft für die Zeitreihe aus Abbildung 16 geschehen ist, kann man unmittelbar die vorherrschenden Frequenzen aus den Daten entnehmen. Man sieht sofort, ob die Einflüsse und die Rutschungen gewissen Periodizitäten folgen und kann somit Ursache und Wirkung noch besser miteinander verknüpfen. Darüber hinaus lassen sich auch die Phasenunterschiede ermitteln, das heißt zum Beispiel: „Wie lange muss ein Hang mit welcher Intensität durchfeuchtet sein, bevor er rutscht?“



**Abb. 18:** Schema der kombinierten Auswertung im Zeit- und Frequenzbereich

Das Schema des idealen Auswertemodells ist in Abbildung 18 wiedergegeben, das eigentlich eine Erweiterung der Auswertungen im Zeitbereich gemäß Abbildung 4 darstellt. In beiden Modellen wird das Expertenwissen aus Ingenieurgeologie und Ingenieurgeodäsie kombiniert. Ziel der Modellierung ist, zu jeder Zeit aus den vorhandenen Daten der Einflussfaktoren, das aktuelle Gefahrenpotential des Rutschhangs abzuleiten. Im Idealfall sollten nach erfolgreicher Modellbildung durch Aufnahme der rutschungsauslösenden Einflüsse z.B. mit der Hyperspektralkamera das Gefahrenpotential eines Rutschhanges abgeschätzt und entsprechende Warnungen ausgesprochen werden können. Aus heutiger Sicht ist dies jedoch noch „Zukunftsmusik“ und es besteht hier noch grundlegender Forschungsbedarf. Absolute Grundvoraussetzung zur Schaffung eines solchen Systems ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit.

### 3 Referenzen

- [1] Bergmann, N., Stempfhuber, W., Zinsberger, St.: Online Monitoring historischer Kirchen mit einem Präzisionstachymeter mittels reflektorloser, direkter oder indirekter Winkel- und Streckenmessung, Ingenieurvermessung 2004, Zürich 2004
- [2] Foppe, K.: „Ingenieurgeodätische Überwachungsmessungen in und an historischen Bauwerken“, Vortrag am Tag der Forschung der Fachhochschule Neubrandenburg im Rahmen des Geodätischen Kolloquiums der Fachhochschule Neubrandenburg am 16. Juni 2004
- [3] Foppe, K., Hennecke, M., Penka, E., Schäfer, Wunderlich, Th., Zilch, K.: „Schadenserkenkung durch reflektorlose Deformationsmessungen“, Beitrag zum Münchener Massivbau Seminar "Neue Wege im 21. Jahrhundert", München, April 2005
- [4] Foppe, K.: „Permanent Automatic Monitoring of Historical Ecclesiastical Architecture“, Beiträge zum 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering bzw. 12th FIG Symposium on Deformation Measurements" in Baden bei Wien, 22. bis 24. Mai 2006
- [5] Foppe, K., Barth, W., Preis, S.: „Autonomous Permanent Automatic Monitoring System with Robot-Tacheometers“, Beitrag zum XXIII International FIG Congress in München, 8-13 Oktober 2006
- [6] Foppe, K.: „Modellbildung für aktuelle Monitoringaufgaben“, Antrittsvorlesung an der Hochschule Neubrandenburg am 1. April 2009-12-04
- [7] Foppe, K., Knaack, L., Pawel, B., (Hrsg.): „85. DVW-Seminar: Zeitabhängige Messgrößen, verborgene Schätze in unseren Daten“, Kassel 2009
- [8] Foppe, K.: „Automatische permanente Überwachung historischer Bauwerke“, Beitrag zum 15. Baltischen Geodätengespräch, Dierhagen am 14. November 2009
- [9] Maurer, W., Roßmeier, F., Schnädelbach, K.: Determination of Periodic Displacements of Buildings and Machines with the Aid of a Laser-Interferometer, 5th International FIG Symposium on Deformation Measurements, Fredericton N.B., Canada, 6.-9.6.88.
- [10] Maurer, W., Schnädelbach, K.: Measurement of Displacements in Buildings With Invar Wires, The Earth and the Universe, a Volume Dedicated to Professor Lyssimachos Mavridis on the Occasion of his Completing Forty-Five Years of Academic Activities, Aristotle University of Thessaloniki, 1997.
- [11] Preis, S., Foppe, K., Wunderlich, Th.: „Calibration Issues For Advanced Tacheometry“. Beitrag zur „8th Conference Optical 3D Measurement Techniques“ in Zürich, 9.-12. Juli 2007
- [12] Schnädelbach, K.: Deformationsmessungen mit Invardrähten, Vermessungswesen und Raumordnung 48, p. 313-321, 1986