

Überwachungsmessungen dienen der Feststellung von *Bewegungen* und *Verformungen* eines Messobjektes. Mit Bewegung sind Verschiebungen und Verdrehungen gegenüber der Umgebung und mit Verformungen geometrische Umbildungen eines Messobjektes bezeichnet. Anders als in der Mechanik üblich, wo die Begriffe Verformung und Deformation gleichzusetzen sind, beinhaltet der Begriff Deformation im geodätischen Sprachgebrauch sowohl Bewegung als auch Verformungen. (Quelle: Welsch et al., 2000)

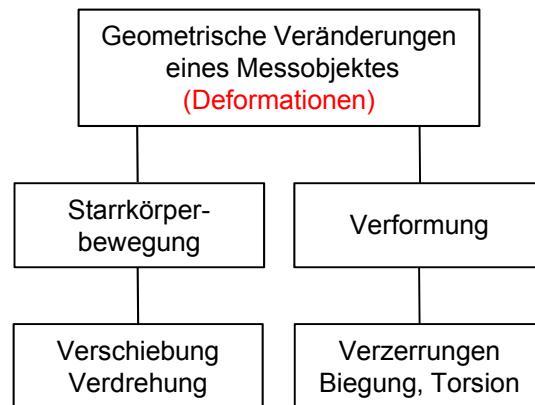


Abb. 1: Begriffe der Bewegung und Verformung.  
(Quelle: Welsch et al., 2000)

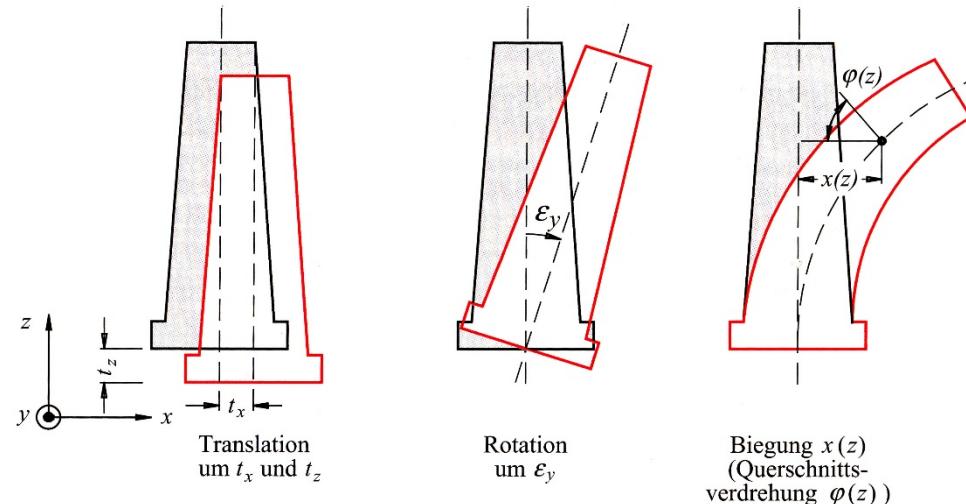


Abb. 2: Starrkörperbewegungen und Verformung (Biegung) eines turmartigen Objektes.  
(Quelle: Welsch et al., 2000)

- Prinzipielle Aufgabe: Nachweis signifikanter geometrischer Veränderungen eines Objektes zwischen zwei Messepochen. Eine der beiden Epochen kann auch aus einer aus dem CAD vorgegebenen Soll-Geometrie bestehen.

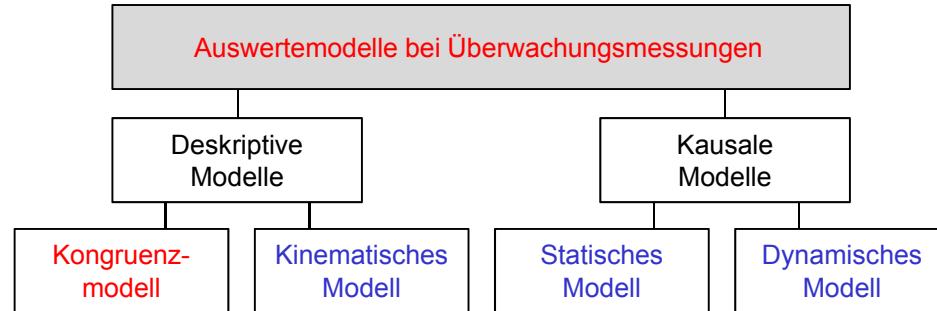


Abb. 3: Klassifizierung der Auswertemodelle.  
(Quelle: Welsch et al., 2000)

- Geometrische Diskretisierung
- Zeitliche Diskretisierung
- **Kongruenzmodell:** Gegenstand der Betrachtung ist der rein geometrische Vergleich des Zustandes eines Objektes (bzw. der Koordinate) mit einem zweiten vorliegenden Zustand des Objektes (bzw. der Koordinate).
  - Zeit: nicht explizit modelliert
  - Belastung: nicht modelliert
  - Zustand des Messobjektes: hinreichend in Ruhe

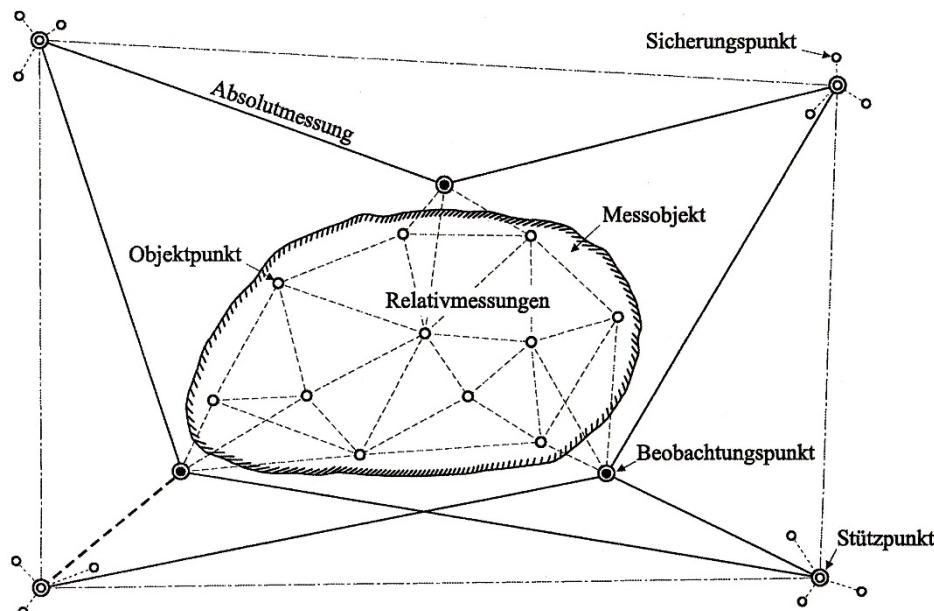


Abb. 4: Überwachungsnetz mit Stütz- und Objektpunkten.  
(Quelle: Welsch et al., 2000)

### Klassische Kongruenzanalyse von Punktfeldern

- Kontrolle identischer Näherungskoordinaten und freier Ausgleichung beider Epochen
- Test vergleichbarer Genauigkeit beider Epochen – wenn wahr: Berechnung gemeinsames  $s_0$
- Vektor der Koordinatendifferenzen und der zugehörigen Kofaktormatrix
- Globaler Kongruenztest – wenn ja: Test auf stabile Stützpunkte, Datumstransformation auf diese
- Zweite Analysestufe: Lokalisierung der verschobenen Objektpunkte
- Ausweis der Deformation

(Quelle: Wieser & Wunderlich, 2017; Wunderlich et al., 2019)

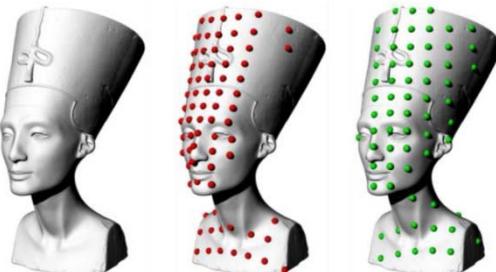
### Wo liegen die größten Herausforderungen im TLS-Monitoring zur flächenhaften Deformationsanalyse?

- Verarbeitung sehr großer Punktmengen (Millionen)

- Häufig Ausdünnung zur Linderung der Rechenlast notwendig
  - oder Ableitung repräsentativer Punkte → wieder „Einzelpunkte“

- Keine identischen Punkte von Epoche zu Epoche

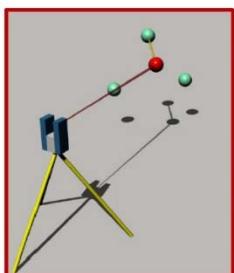
Während bei der klassischen Beobachtung von Einzelpunkten diese vermarkt, signalisiert und wiederholbar anzielbar sind, fallen die Laserpunkte von Epoche zu Epoche nicht auf identische Objektstellen.



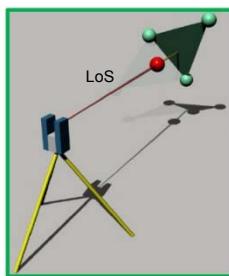
(Quelle: Wujanz, 2018)

- Keine eindeutige Zuordnung der Punkte verschiedener Epochen zueinander

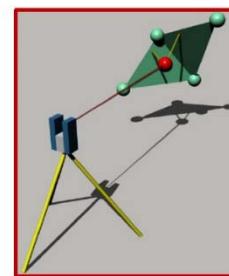
Während zwischen zwei Koordinatenrealisierungen eines Punktes in verschiedenen Epochen die geometrische Zuordnung eindeutig ist, können bei Punktwolken verschiedene Zuordnungsvorschriften getroffen werden. (Quelle: Wieser & Wunderlich, 2017)



a) Punkt-zu-Punkt



b) Punkt-zu-Masche  
(Line-of-Sight)



c) Punkt-zu-Masche  
(Normalenrichtung)

grüne Punkte ... Referenzepoche  
roter Punkt ... Folgeepoch

(Quelle: Wujanz, 2019)

(Quelle: Ohlmann & Schäfer, 2011)

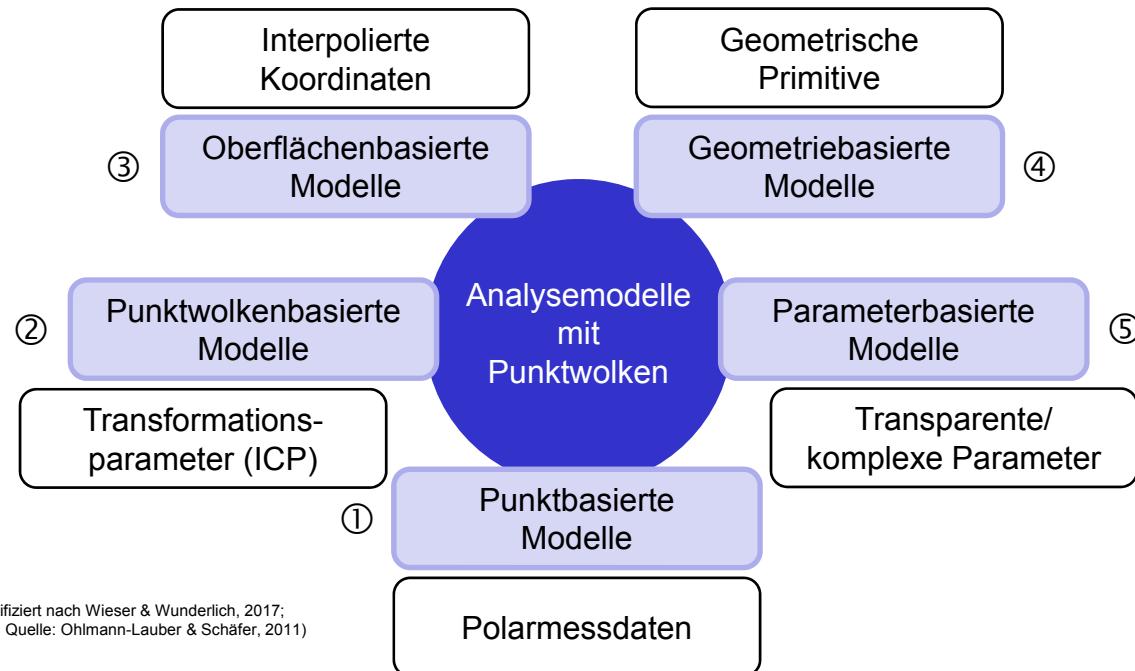


Abb. 2: AnalysemODELLE für TLS-DATEN.

Die Komplexität der geometrisch-mathematischen Analyse nimmt dabei in der Abbildung von ① nach ⑤ zu, wobei die zur Analyse verwendete Datenmenge im Gegenzug abnimmt.

Punktbasierte Modelle stellen die einfachste Modellierungsform in diesem Zusammenhang dar. Dabei werden Koordinaten oder Distanzen wiederholter TLS-Messungen bei **festem Scannerstandpunkt** und **konstantem Horizontal- und Vertikalwinkelraster** direkt miteinander verglichen. Die ableitbaren Deformationsinformationen sind Differenzvektoren parallel zur Messrichtung. Das Ergebnis ist somit ein zum Scannerstandpunkt konzentriertes Vektorfeld, welches in Form eines farbcodierten Differenzbildes visualisiert werden kann. Die Anwendung punktbasierter Modelle eignet sich jedoch prinzipiell nur bei einem günstigen Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Sonderformen sind profil- oder punktartige Messungen mit einem Laserscanner, wobei hier die hohe Messfrequenz für Analysen im Frequenzraum verwendet werden kann. (Quelle: Ohlmann-Lauber & Schäfer, 2011)

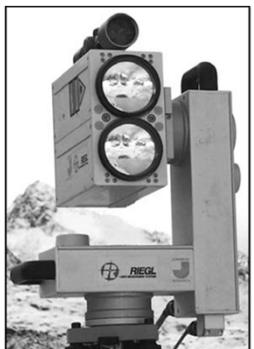


Abb. 1: Laserscanner RIEGL LPM-2K im wetterfesten Gehäuse, Valluga Seilbahnstation am Arlberg, Tirol. (Quelle: Bauer & Paar, 2004)

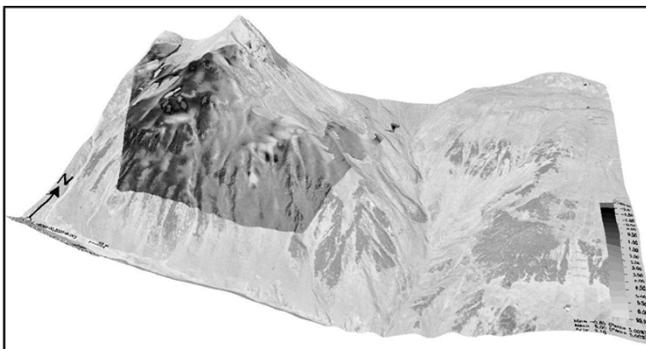


Abb. 2: 3D Darstellung der Schneehöhenveränderung über einen Zeitraum von 2 Wochen. (Quelle: Bauer & Paar, 2004)

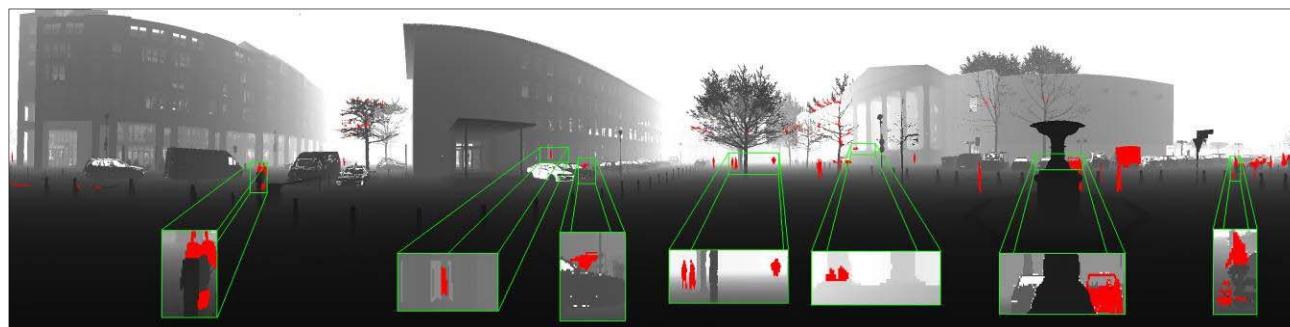


Abb. 3: Detektion von Veränderungen im Analyse-Scan ( $A$ ) im Vergleich zum Referenzscan ( $R$ ). (Quelle: Zeibak & Filin, 2007)

$R_{ij}$  ... reference image  
 $A_{ij}$  ... analyzed image  
 $d_{ij}$  ... difference image

$$d_{i,j} = \begin{cases} \text{change} & R_{i,j} - A_{i,j} > \varepsilon \\ \text{no change} & |R_{i,j} - A_{i,j}| \leq \varepsilon \\ \text{occlusion (no change)} & R_{i,j} - A_{i,j} < -\varepsilon \end{cases}$$

Anwendung: Automatisierte Detektion und Maskierung von sich bewegenden Objekten, wie z.B. Personen oder Fahrzeugen, in statischen Szenen.

- **Matching zweier Punktwolken**

(unter der Annahme, dass keine geometrische Veränderung stattgefunden hat)

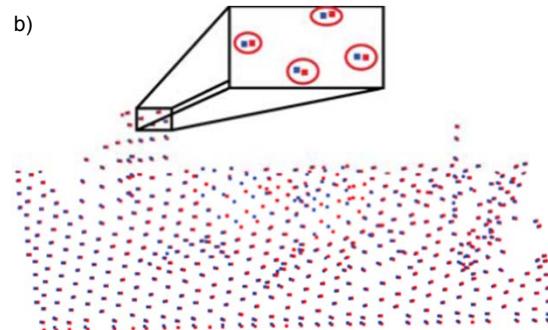
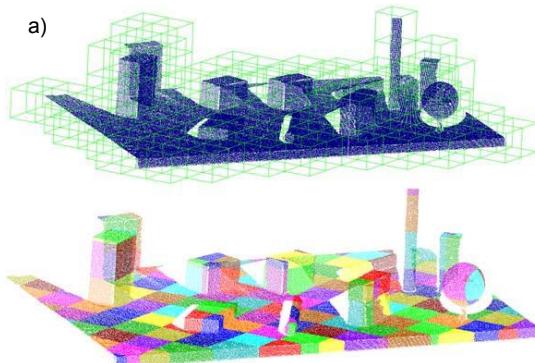
- Hausdorff-Metrik
- ICP-Algorithmus (Besl & McKay, 1992)
- LS3D (Grün & Akca, 2005)
- GH-LS3D (Ge & Wunderlich, 2016)
- etc.

- **Transformation einer Starrkörperbewegung**

(3 Translationen, 3 Rotationen)

- **Segmentierung von stabilen und unstabilen Bereichen**

- Monserrat & Crosetto (2008): Gebietswahl durch Expertenwissen
- Friedli & Wieser (2016):



a) Example of an [octree based point cloud segmentation](#) (top: wireframe with input cloud; bottom: points coloured in correspondence with the cell they belong to).

b) [Centroids of the octree](#) cells of two epochs. Red points belong to the first and blue points to the second acquisition. The difference vectors of the centroids are calculated. Based on this information, a classification into stable and unstable is made.

- Wujanz et al. (2018): Geomorphometric monitoring using ICProx (Wujanz et al., 2016). The analysis is also based on octree cells.

- **Bereichsweise gültige Transformationsparameter**

- Monserrat & Crosetto (2008): Local LS3D → 7 DOF, 6 DOF or 3 DOF (deformation vector only) for each patch.

### What is Hausdorff distance?

Named after Felix Hausdorff (1868-1942)

Hausdorff distance is the maximum distance of a set to the nearest point in the other set.

More formally, Hausdorff distance from set A to set B is a maximum function, defined as

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \left\{ \min_{b \in B} \{d(a, b)\} \right\}$$

where  $a$  and  $b$  are points of sets  $A$  and  $B$  respectively, and  $d(a, b)$  is any metric between these points; for simplicity, we will take  $d(a, b)$  as the Euclidian distance between  $a$  and  $b$ . If for instance  $A$  and  $B$  are two sets of points, a brute force algorithm would be:

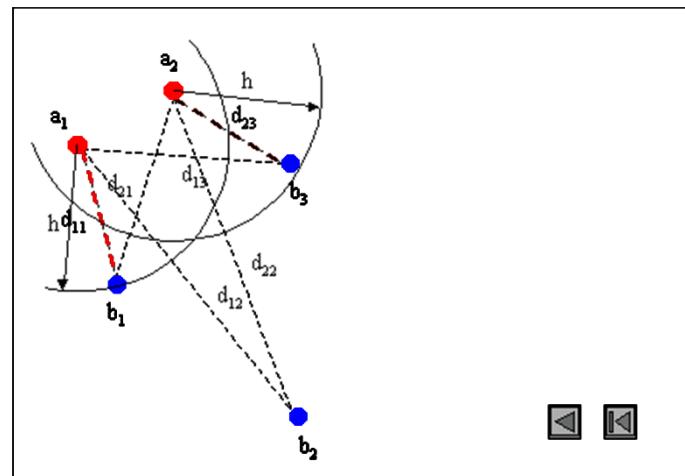
1.  $h=0$
2. for every point  $a_i$  of  $A$ ,
  - 2.1 shortest = Inf;
  - 2.2 for every point  $b_j$  of  $B$ 

$$d_{ij} = d(a_i, b_j)$$

$$\text{if } d_{ij} < \text{shortest} \text{ then}$$

$$\text{shortest} = d_{ij}$$
  - 2.3 if shortest >  $h$  then
 
$$h = \text{shortest}$$

The algorithm runs in  $O(n m)$ , with  $n$  and  $m$  the number of points in each set.



Hausdorff distance on point sets (algorithm animated)



Source: <http://cgm.cs.mcgill.ca/~godfried/teaching/cg-projects/98/normand/main.html>

Application of Hausdorff distance computation in geomorphological change detection: Girardeau-Montaut et al. (2005)

(Quellen: Ohlmann & Schäfer, 2011; Kuhlmann & Holst, 2017; Wieser & Wunderlich, 2017)

Die Oberfläche wird explizit modelliert, es findet jedoch keine auf Parameterbasis geometrisch interpretierbare Modellierung statt.

- **Interpolationsansatz zur Berechnung eines reproduzierbaren Stützstellengitters**  
(meist Dreiecksvermaschung mit linearer Interpolation; sonst auch Freiformflächen [NURBS, Beziér-Flächen, etc.] )
- **Interpolierte Koordinaten (1D-Deformation)**  
(z.B. eine z-Koordinate)
- **Filterung innerhalb der Interpolationsebene zur Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit**



Abb. 1: Deformationsbestimmung einer NÖT-Ortsbrust.  
(entnommen aus Wunderlich, 2009)

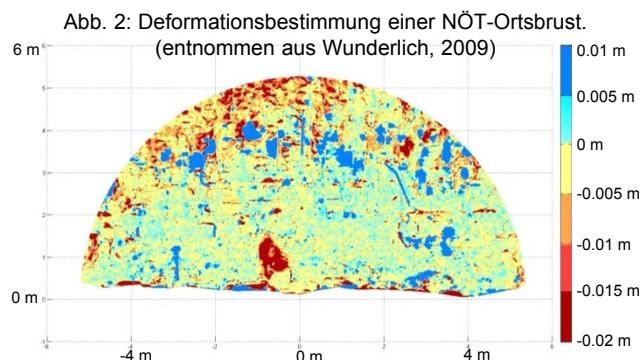


Abb. 2: Deformationsbestimmung einer NÖT-Ortsbrust.  
(entnommen aus Wunderlich, 2009)

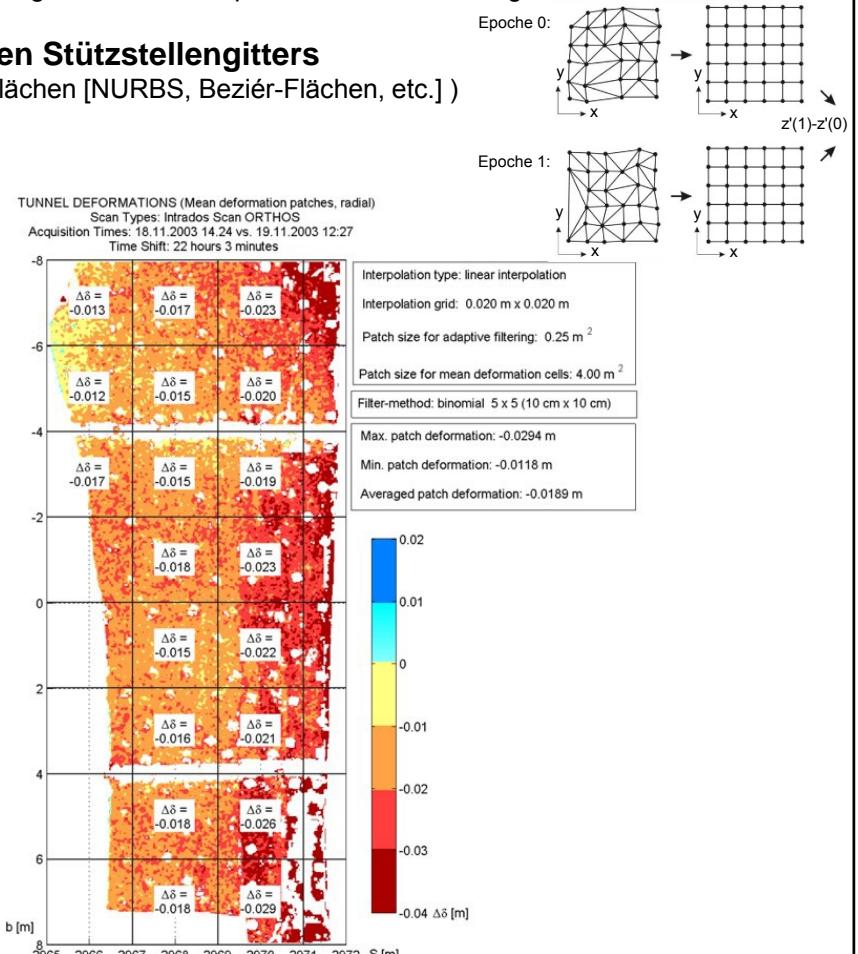


Abb. 3: Auswertung einer TLS-Konvergenzmessung für die NÖT.  
(entnommen aus Wunderlich, 2009)

(Quellen: Ohlmann & Schäfer, 2011; Kuhlmann & Holst, 2017; Wieser & Wunderlich, 2017)

Unter der Annahme, dass Deformationen für Objektregionen als Starrkörperbewegung auftreten, können diese Bereiche mittels geometrischer Formen für eine Deformationsanalyse beschrieben werden. In der Regel lassen sich alle **Ingenieurbauwerke** konstruktionsbedingt durch einfache geometrische Formen (z.B. Ebenen oder Zylinder) oder durch Flächen zweiter Ordnung beschreiben. Mit einem Ausgleichsansatz lässt sich diese bestangepasste Geometrie schätzen, wobei die Verteilung und Standardabweichung der Residuen die Güte der Approximation zeigen. Der Hauptvorteil dieses Ansatzes liegt in der Ausnutzung der **hohen Redundanz** zur Schätzung der geometrischen Flächen. Die Herausforderung besteht jedoch darin, Bereiche der Punktwolken repräsentativ zu Geometrien zuzuordnen (Segmentierung), welche das Deformationsverhalten des Objektes auch richtig charakterisieren.

Objektdeformationen lassen sich schließlich durch die Änderung der Lage und Orientierung der geometrischen Objekte ableiten. Hier können beispielsweise für Ebenen der Normalenvektor oder für Zylinder die Rotationsachse betrachtet werden (Ohlmann & Schäfer, 2011).

### **Detection of surface deformations during tunnel construction by approximation of cylinders**

(vanGosliga et al., 2006)



Fig.1: Left: photograph of the 2e Heinenoordtunnel. Right: laser scan, colored by intensity, from red to blue. Clearly visible is the low reflectivity of the asphalt in contrast to the high reflectivity of the road markers.

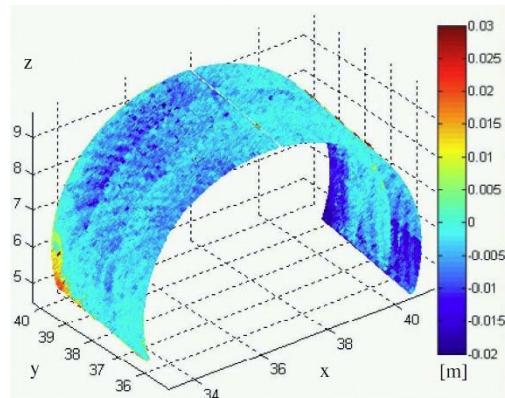


Fig.2: Residuals in m after fitting of a cylindrical model to the tunnel data. In each single segment gripper holes can be detected. Some offset seems to occur in the segments on the bottom right while the segment in the bottom left corner looks damaged.

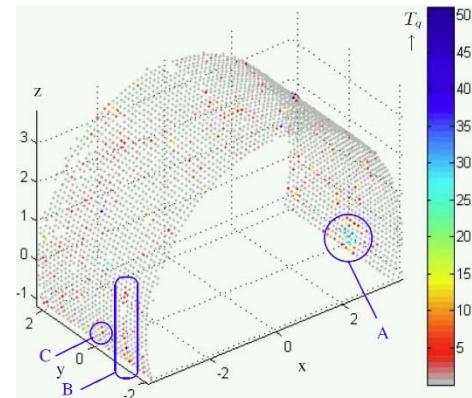


Fig.3: Results of the stability test. Test quantity per grid point. The larger artificial deformations A and B (the foam and wooden planks) were found back by the testing procedure. Moreover, the procedure finds several other 'deformations' near the grip holes, but these are errors caused by registration mismatches.

### Analyse von Kühltürmen über die Approximation von Hyperboloiden (Ioannidis et al., 2006)



Fig.1: Cooling tower.

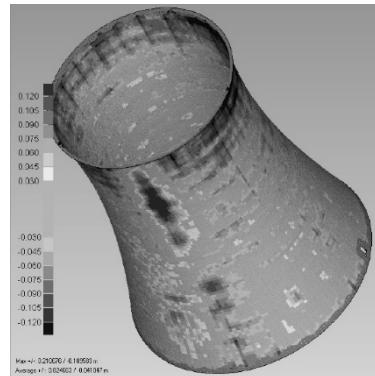


Fig. 2: 3D comparison of the actual tower model and the theoretical (mathematical surface)

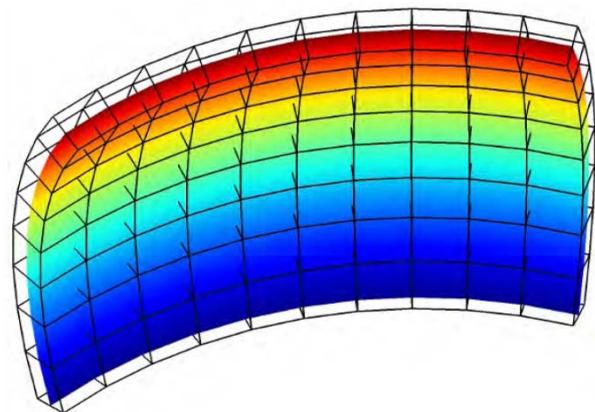


Abb. 2: Beispiel für eine modellierte Fläche mit umschließendem Blockgitter-Rahmen.

Die Arbeit von Eling (2010) beschreibt die Gewinnung von reproduzierbaren und repräsentativen Objektpunkten mittels einer Oberflächenmodellierung durch bestangepasste regionale Geometrien und einem für das Bauwerk im Vorfeld definierten Blockgittermodell, welches das Bauwerk in Regionen gliedert. Vorhandene Stützpunkte und die, aus der Modellierung abgeleiteten, repräsentativen Objektpunkte inklusive deren Varianz-/Kovarianz-Informationen bilden die Grundlage für die Anwendung einer klassischen Deformationsanalyse auf die epochalen TLS-Datensätze (Ohlmann-Lauber & Schäfer, 2011).

22,000,000 points:  
20 scans in the interior,  
from 4 positions, and 7  
scans for the external surface.

### Neigungsdetektion über die Approximation von Ebenen (Neitzel & Johannes, 2009)

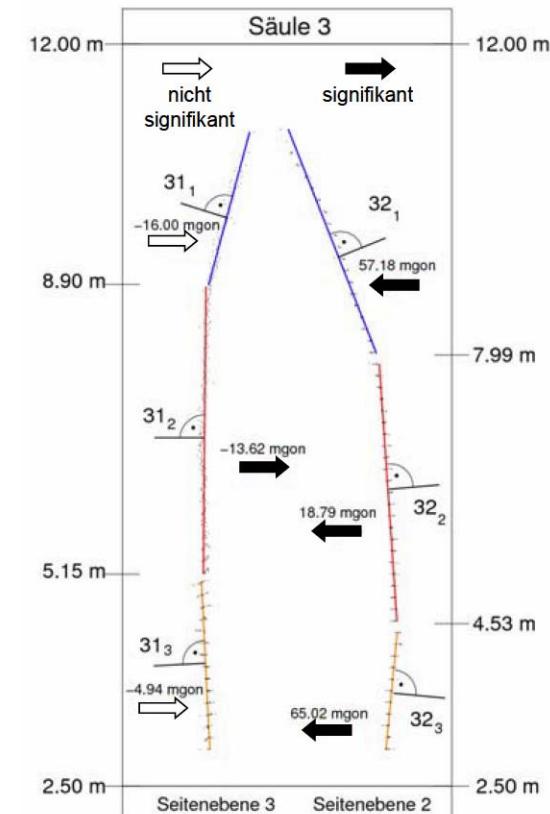


Abb. 1: Neigungsänderung für Seitenebenen einer Säule. Die reflektorlose Entfernungsmessung erfolgte mit einem motorisierten Tachymeter in zwei Epochen. Die Kirchensäulen wurden mittels ausgleichender Ebenen beschrieben. Stufenweiser Ansatz zur Verfeinerung der Modellierung.

(Quellen: Ohlmann & Schäfer, 2011; Kuhlmann & Holst, 2017; Wieser & Wunderlich, 2017)

Parameterbasierte Modelle können als Weiterentwicklung der geometriebasierten Modellierung verstanden werden. Aufbauend auf der Approximation von geometrischen Flächen oder weiterer parameterbasierten Flächenbeschreibungen, lässt sich ein Signifikanztest (t-Test) zur Aufdeckung von Objektdeformationen unmittelbar auf Basis der aus einer Kleinsten-Quadrate-Ausgleichung hoch redundant geschätzten Parameter durchführen (Bureick, et al., 2016; Neuner et al., 2016; Wunderlich et al., 2016).

- Transparente Parameter: geometrisch deutbar, wie z.B. Parameter von Flächen 2. Ordnung.
- Komplexe Parameter: nicht (unmittelbar) deutbar, wie z.B. die Parameter einer Flächenapproximation auf Basis trigonometrischer Funktionen.

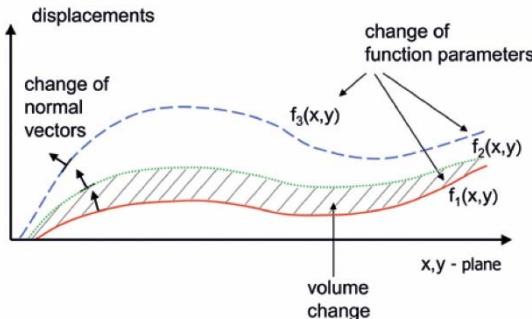


Fig. 1: Sketch of variation of irregular surfaces between epochs.  
(Quelle: Wunderlich et al., 2016)

Vgl. dazu IMKAD – Integrated time-space modelling based on correlated measurements. Engineering Geodesy Group, TU Wien

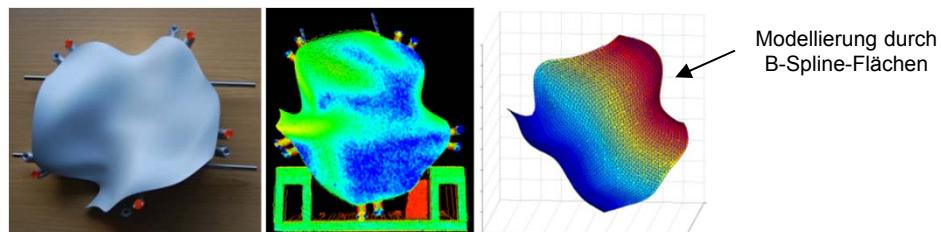


Fig. 3: Modellierung durch Freiformflächen. (Quelle: Harmening & Neuner, 2015)

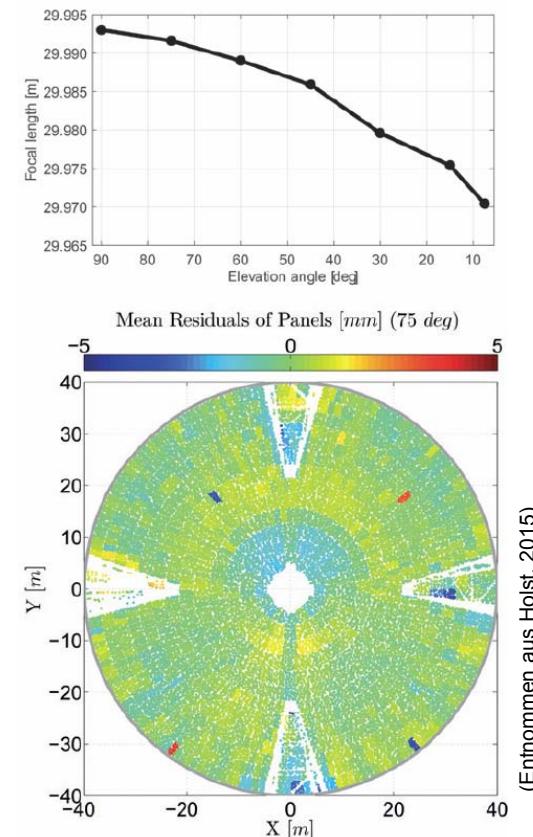


Fig. 2: Up: Estimated focal length of the Effelsberg radio telescope at different elevation angles. Bottom: Mean of the estimated residuals per panel of the main reflector. (Quelle: Wunderlich et al., 2016)  
(Entnommen aus Holst, 2015)

**DEM of difference** is the most common method of point cloud comparison in earth science when the large scale geometry of the scene is planar (i.e. river bed, cliff). The two point clouds are gridded to generate DEMs either directly if the large surface structure is near horizontal (e.g. channel bed) or after rotation (e.g. cliff, river banks). The two DEMs are then differentiated on a pixel-by-pixel basis which amounts at measuring a vertical distance. This technique is very fast and now includes explicit calculation of uncertainties related to point cloud registration, data quality and point cloud roughness. Yet the DOD technique suffers from two major drawbacks:

- It cannot operate properly on complex 3D environments as a DEM cannot cope with overhanging parts (cliffs and bank failures, large blocks) and decreases information density proportionally to surface steepness (i.e. vertical surfaces cannot be described by a DEM)
- Even if surface is 2D at large scale, gridding TLS point cloud data is a difficult task for rough surfaces. Missing data due to occlusion will be interpolated which introduces an uncertainty on the grid elevation. Because point density and roughness can be extremely variable, the choice of a representative elevation in a cell is not simple. Finally, the fixed DEM resolution imposes a limit on the level of detail retained from the raw data which can be a strong limitation on surfaces exhibiting very different characteristic scales (i.e. wide range of grain sizes).

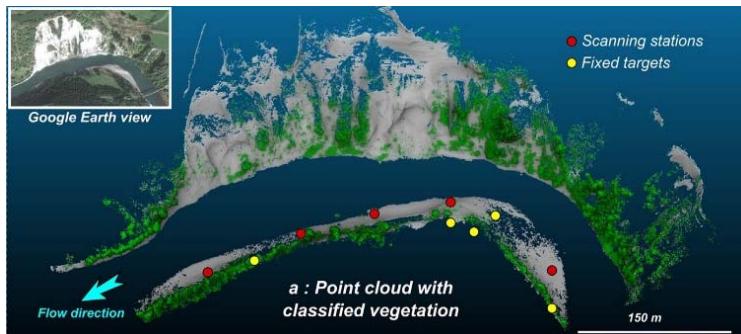


Fig. 1A: Scan data and aerial view of a meander of the Rangitiki River (NZ).

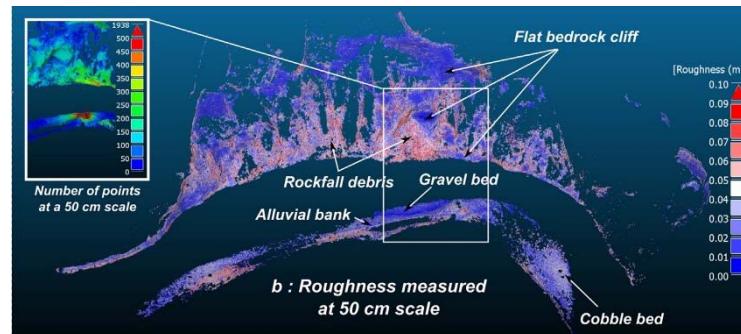


Fig. 1B: Surface roughness without vegetation measured at a scale of 0,5 m.



Fig. 1C: View of 3 of the sample surfaces illustrating the very large variability in surface roughness.

(Source: Lague et al., 2013)

Direct cloud-to-cloud comparison with closest point technique (C2C) is the simplest and fastest direct 3D comparision method of point clouds as it does not require gridding or meshing of the data, nor calculation of surface normal.

(Source: Lague et al., 2013)

For each point of the second point cloud, a closest point can be defined in the first point cloud. In its simplest version, the surface change is estimated as the distance (always positive) between the two points (C2C, Fig. 2A).

### A: Closest point distance $L_{C2C}$

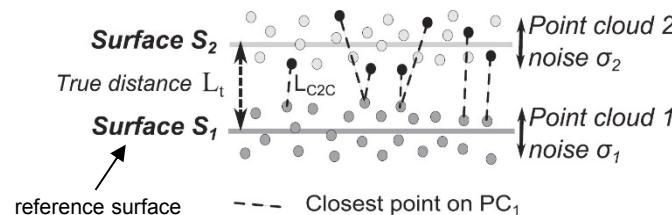
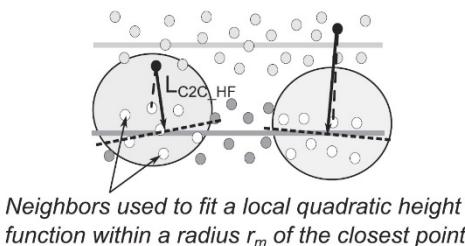


Fig. 2A: Simplest cloud-to-cloud distance  $L_{C2C}$ .

$\sigma_{1,2}$  (roughness) is a combination of instrument related noise and surface roughness.

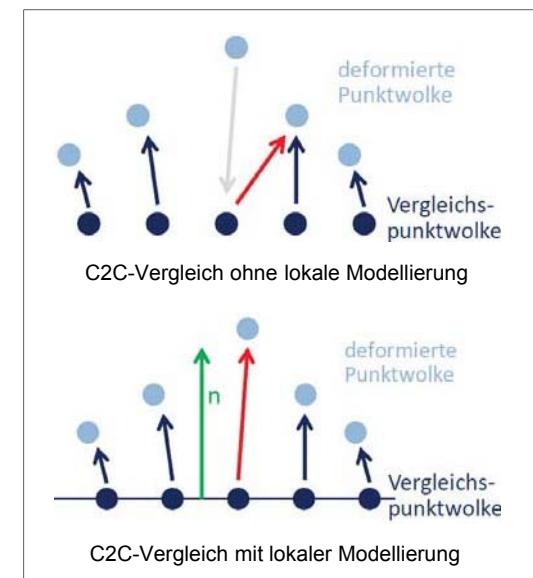
### B: Closest point with local height function $L_{C2C\_HF}$



Neighbors used to fit a local quadratic height function within a radius  $r_m$  of the closest point

Fig. 2B: Closest point distance to local model distance  $L_{C2C\_HF}$ .  
A local height function (e.g. a plane) is computed using the neighbouring points with a radius  $r_m$  of the closest point in  $PC_1$ .

The measured distances  $L_{C2C}$  and  $L_{C2C\_HF}$  are sensitive to the clouds' roughness, outliers and point spacing.



(Quelle: Holst et al., 2016)

The cloud-to-mesh distance or cloud-to-model distance (C2M) is the most common technique in inspection software. Surface change is calculated by the distance between a point cloud and a reference 3D mesh or theoretical model. This approach works well on flat surfaces as a mesh corresponding to the average reference point cloud position can be constructed (Fig. 2C). However, creating a surface mesh is complex for point clouds with significant roughness at all scales or missing data due to occlusion. It generally requires time-consuming manual inspection. As with the DoD technique, interpolation over missing data introduces uncertainties that are difficult to quantify. Mesh construction also smooths out some details that may be important to access local roughness properties.

(Source: Lague et al., 2013)

### C : Point to mesh distance $L_{C2M}$

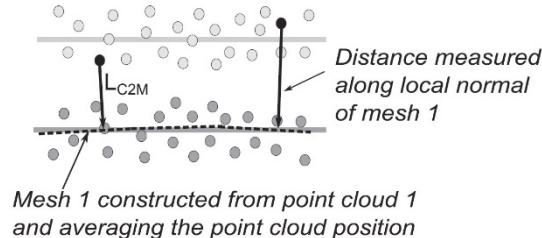


Fig. 2C: Cloud-to-mesh (C2M) distance  $L_{C2M}$ .  $PC_1$  is meshed and the distance between each point of  $PC_2$  and  $S_1$  is computed along the local normal of  $S_1$ .

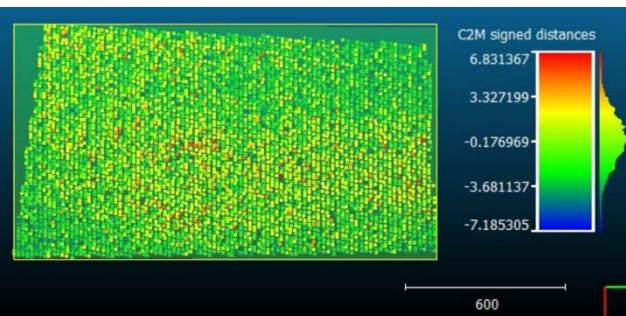


Fig. 2D: Fitted plane (+ distances between the original cloud and the fitted plane.  
(Quelle: <https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/> )

### Sources of uncertainty in point cloud comparison

Three main sources can be identified:

1. Position uncertainty of point clouds (e.g. due to range noise)
2. Registration uncertainty between the point clouds
3. Surface roughness related errors: these are caused by the difficulty of reoccupying exactly the same scanning position between surveys, by the occlusion due to roughness and the positioning uncertainties inherent to TLS.

Dazu werden aus den beiden Punktfolgen Vermaschungen gebildet.

(Source: Holst et al., 2016)

Ähnlich zum C2M-Vergleich werden die kürzesten Abstände zwischen den beiden Oberflächen berechnet.

Dazu werden jeweils die Normalenvektoren der beiden Oberflächen genutzt, um die Richtung des kürzesten Abstands zu definieren. Der M2M-Vergleich ist z.B. mit Geomagic und 3DReshaper möglich. In CloudCompare besteht zwar auch die Möglichkeit, zwei Vermaschungen einzuladen und zu vergleichen. Allerdings werden dabei nur die Knoten der Vergleichsvermaschung in den Vergleich einbezogen, sodass wieder ein C2M-Vergleich entsteht.

Step 1: Calculation of surface normals in 3D

Step 2: Distance calculation between the two clouds

- Normal scale selection in relation to roughness
- Change detection using a spatially variable confidence interval

(Source: Lague et al., 2013)

### a Principle of the Multiscale Model to Model Cloud Comparison M3C2

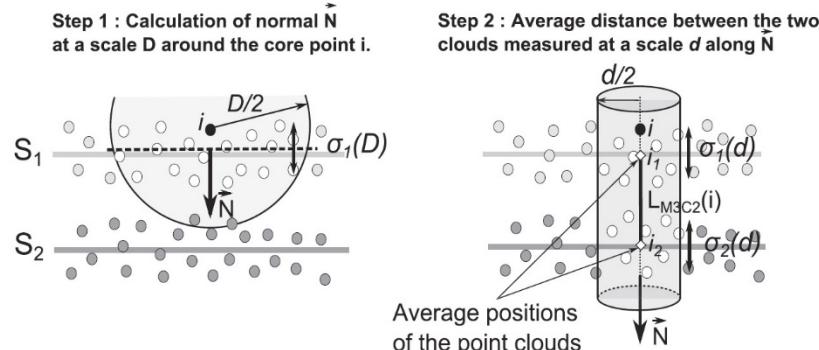


Fig. 3a: In this example the normal is estimated from  $PC_1$ .

$D$  ... normal scale

The algorithm offers the option to compute surface normals on a sub-sampled version of the point clouds to speed-up the calculation while retaining a good accuracy.

The algorithm offers the possibility to use either the normal estimated on the reference cloud, on the compared cloud, or the average of both normal directions.

$d$  ... projection scale

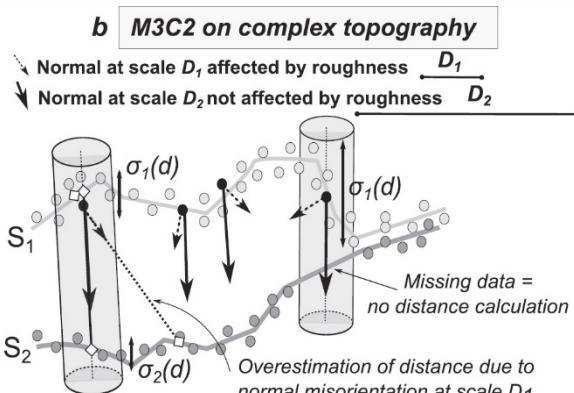
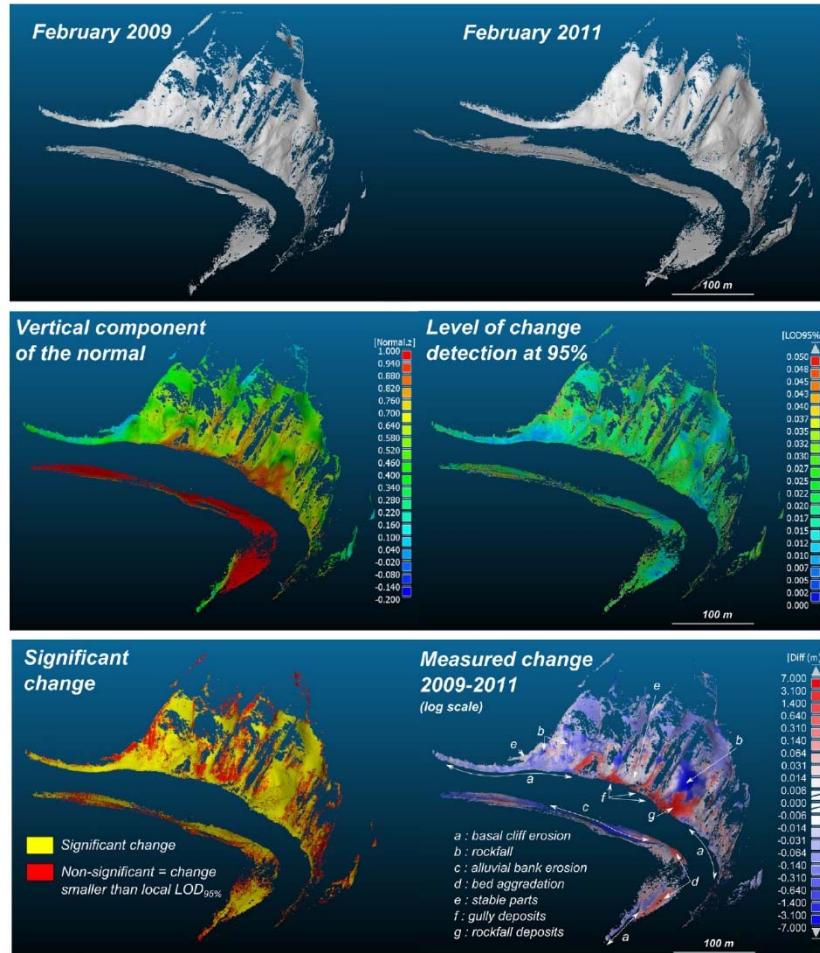


Fig. 3b: Application on a complex topography.

Normal scale selection in relation to roughness: If one is interested in detecting change of the shape of the meter size boulders on the rock fall example (Fig. 1B), a locally small scale  $D$  ( $\sim$ 10-20 cm) would be needed. But in many cases where no corresponding elements can be identified between surveys, we are interested in changes along a normal direction that is not affected by the surface roughness. This would mean choosing  $D > 10$  m.

Choosing the optimum scale  $D_{opt}$ : Principal Component Analysis of the neighbours of point  $i$  within a sphere of radius  $d/2$  and choose the scale  $D_{opt}$  at which the third component is the smallest ( $\Rightarrow$  a plane best fits the 3D surface).

$$LOD_{95\%}(d) = \pm 1.96 \left( \sqrt{\frac{\sigma_1(d)^2}{n_1} + \frac{\sigma_2(d)^2}{n_2}} + reg \right) \dots \text{Level of Detection}$$



(Source: Lague et al., 2013)

$D = 15$  m for the cliff, and 12 m for the inner bank.

The map of surface change shows a very large range of detected absolute changes from 6 mm to 6.96 m.

Fig. 4: Application of the M3C2 algorithm to the Rangitiki River data.

## Vorteile und Nachteile der flächenhaften Deformationsableitung aus TLS-Punkten

### ▪ Vorteile

Sehr vollständig, hochauflösend, ökonomisch vom Beobachtungsaufwand her; Komplett dokumentation ähnlich Messbild, flächenhaft

### ▪ Nachteile

- **Großer Vorbereitungsaufwand** (Kalibrierung, Filterung, Registrierung, Georeferenzierung)
- **Systematische Fehlereinflüsse durch Objekteigenschaften** (Material, Reflektivität, Rauigkeit)
- **Systematische Fehlereinflüsse durch Beobachtungsgeometrie** (Auf treffwinkel, Horizontierung & Instrumentenfehler, ...)
- **Systematische Fehlereinflüsse durch Lasteinwirkungen auf Objekt bei mehreren Aufstellungen über längere Zeit** (Winddruck, Erwärmung durch Sonne)
- **Großer Auswerteaufwand** (Datenbereinigung, Segmentierung, best fit approximation)

## Kritische Betrachtungen

### ▪ u.U. beschränkte Deformationsaussage (vgl. dazu Wunderlich et al., 2019)

- Manchmal nur Starrkörperbewegung ableitbar
- Vielfach Reduktion auf eine Dimension statt 3D Aussage
- Fehlen von Signifikanztests

### ▪ Neue Parameter zur Deformationsbeschreibung noch kaum genutzt

- z.B. Oberflächendifferenzen, Volumendifferenzen, Verschiebungsvektoren (lokales Structure-Matching) ...

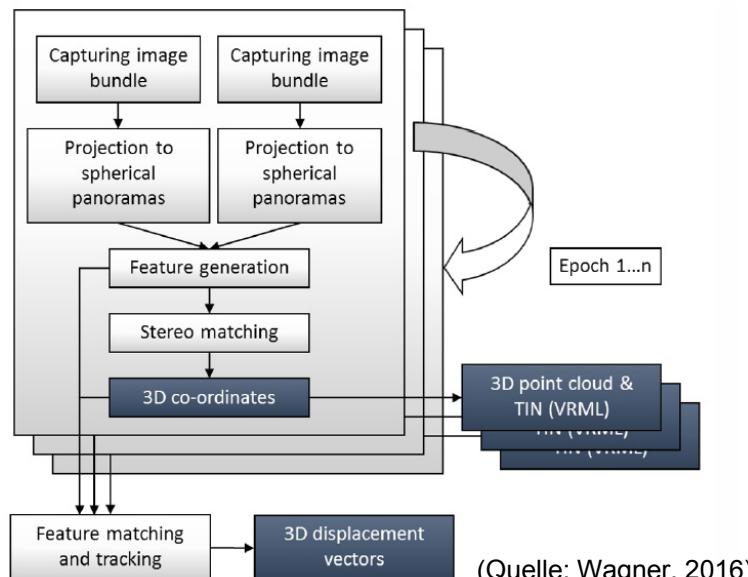
### ▪ Fazit

Wenn aus markanten, signalisierbaren Einzelpunkten charakteristische Deformationen nachweisbar sind, kann dies genügen. Dazu muss eine Grundvorstellung, besser Simulation, der zu erwartenden Deformationen beschaffbar sein.

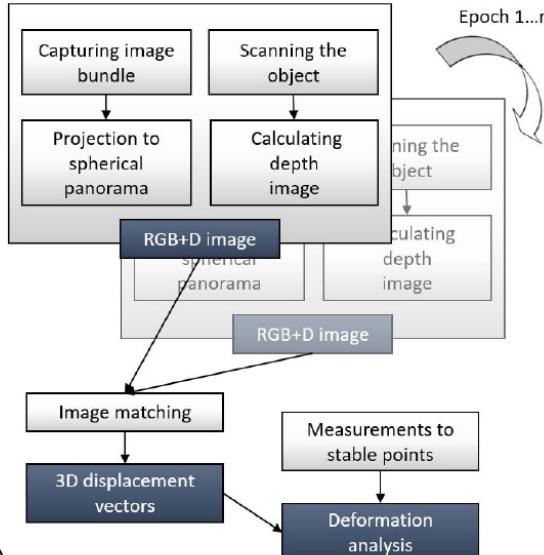
**Wenn Ungewissheit über das Deformationsverhalten besteht, empfiehlt sich hingegen der Aufwand des TLS-Monitoring!**

### IATS ... Image Assisted Total Station

a) Two IATS in a stereo configuration  
(analysis of image data only)



b) Single IATS: Combined analysis of point cloud and image data, based on RGB+D images



(Quelle: Wagner, 2016)

### Verbesserung durch Fusion Scan und Bild mit Multistations

- **Laserscans** sind hervorragend dazu geeignet, Deformationen aus **Distanzänderungen** aufzudecken.
  - **Messbilder** hingegen erlauben es besonders gut, **identische Zielpunkte aufzufinden**.
  - Die Kombination beider Verfahren stellt das Ideal dar. Damit kann **polar flächenhaftes Monitoring** betrieben werden.
- (Quelle: Wieser & Wunderlich, 2017)

Auswahl:

- Bauer, A., Paar, G., 2004: Monitoring von Schneehöhen mittels terrestrischem Laserscanner zur Risikoanalyse von Lawinen. In: Ingeniervermessung 2004, Proceedings 14th International Conference on Engineering Surveying, ETH Zurich, 11 pages.
- Bureick, J., Neuner, H., Harmening, C., Neumann, I., 2016: Curve and surface approximation of 3D point clouds. allgemeine vermessungsnachrichten,avn, 123, Heft 11-12, 315-327.
- Eling, D., 2009: Terrestrisches Laserscanning für die Bauwerksüberwachung. Dissertationen, DGK, Reihe C, Heft Nr. 641.
- Friedli, E., Wieser, A., 2016: Identification of stable surfaces within point clouds for areal deformation monitoring. In: Proceedings 3rd Joint International Symposium Deformation Monitoring (JISDM), March 30 – April 1, Vienna, Austria, 7 p.
- Girardeau-Montaut, D., Roux, M., Marc, R., Thibault, G., 2005: Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. ISPRS Archives, Vol. 36, Part 3/W19, 30-35.
- Harmening, C., Neuner, H., 2015: Continuous modelling of point clouds by means of freeform surfaces. Vermessung & Geoinformation, VGI, Heft 2+3, 121-129.
- Holst., C., Schmitz, B., Kuhlmann, H., 2016: TLS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von Standardsoftware. DVW-Schriftenreihe, Terrestrisches Laserscanning 2016 (TLS 2016), Band 85, Wißner-Verlag, 39-58.
- Ioannidis, C., Valani, A., Georgopoulos, A., Tsiligris, E., 2006: 3D model generation for deformation analysis using laser scanning data of a cooling tower. In: 3rd IAG/12th FIG Symposium, Baden, 10 pages.
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J., 2013: Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 82, 10-26.
- Monserrat, O., Crosetto, M., 2008: Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 63, 142-154.
- Neitzel, F., Johannes, L., 2009: Anwendung des tachymetrischen Laserscannings in der Überwachung eines historischen Bauwerks. In: Photogrammetrie-Laserscanning-Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2009, Wichmann Verlag, 127-136.
- Neuner, H., Holst, C., Kuhlmann, H., 2016: Überblick aktueller Methoden zur Modellierung von Punktwolken für die Deformationsanalyse. allgemeine vermessungsnachrichten,avn, 123, Heft 11-12, 328-339.
- Ohlmann-Lauber, J., Schäfer, T., 2011: Ansätze zur Ableitung von Deformationen aus TLS. In: Terrestrisches Laserscanning – TLS 2011 mit TLS-Challenge, Schriftenreihe des DVW, Band 66, 147- 157.
- Ohlmann-Bartusel, J., Höfle, R., Fillibeck, J., 2009: Ortsbrustdeformationen – Ortsbruststandsicherheit. Forschungsbericht, Blaue Reihe des Lehrstuhls für Geodäsie, Heft 13, Eigenverlag, TU München.
- Schäfer, T., Weber, T., Kyrinović, P., Zámečníková, M., 2004: Deformation measurement using terrestrial laser scanning at the hydropower station of Gabčíkovo. In: Proceedings of INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia, 10 pages.
- vanGosliga, R., Lindenbergh, R., Pfeifer, N., 2006: Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning. ISPRS Archives, Vol. 36, Part 5, 167-172.
- Wagner, A., 2016: New Geodetic Monitoring Approaches using Image Assisted Total Stations. Dissertation, Lehrstuhl für Geodäsie, Technische Universität München, 107 p.

Auswahl:

- Welsch, W., Heunecke, O., Kuhlmann, H., 2000: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Reihe Handbuch Ingenieurgeodäsie, Herbert Wichmann Verlag, 247 S.
- Wieser, A., Wunderlich, T., 2017: Tutorial „Monitoring mit Terrestrischem Laserscanning (TLS)“, Ingenieurvermessungskurs '17, 25.4.2017, TU Graz, schriftliche Unterlagen.
- Wujanz, D., Krueger, D., Neitzel, F., 2016: Identification of stable areas in unreferenced laser scans for deformation measurement. Photogrammetric Record, 31, 261-280.
- Wujanz, D., 2018: Identifizierung von statistisch signifikanten Deformationen in multi-temporalen Laserscans unter Berücksichtigung eines erweiterten Fehlerhaushaltes. In: Luhamnn, T., Schumacher, C. (Hrsg.), Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018, Wichmann Verlag, 248-259.
- Wujanz, D., Avian, M., Krueger, D., Neitzel, F., 2018: Identification of stable areas in unreferenced laser scans for automated geomorphometric monitoring. Earth Surface Dynamics, 6, 303-317.
- Wujanz, D., 2019: Araneo: Bestimmung eines erweiterten Unsicherheitsbudgets für die Deformationsmessung basierend auf terrestrischen Laserscans. allgemeine vermessungsnachrichten (avn), 126, Heft 3, 53-62.
- Wunderlich, T., 2009: Terrestrisches Monitoring natürlicher Zielobjekte. Vermessung & Geoinformation, Heft 3, 325-334.
- Wunderlich, T., Niemeier, W., Wujanz, D., Holst, C., Neitzel, F., Kuhlmann, H., 2016: Areal deformation analysis from TLS point clouds – the challenge. allgemeine vermessungsnachrichten, avn, 123, Heft 11-12, 340-351.
- Wunderlich, T., Raffl, L., Wiedemann, W., 2019: Wiedererkennung – zwei Lösungen für die strenge Deformationsanalyse flächenhafter Beobachtungen der Ingenieurgeodäsie. In: Hanke, K., Weinold, T. (Hrsg.), 20. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2019, Wichmann Verlag, 264-273.
- Zeibak, R., Filin, S., 2007: Change detection via terrestrial laser scanning. ISPRS Archives, Vol. 36, Part 3/W52, 430-435.