

GNSS/LPS/LS based Control and Alarmsystem (GOCA)

-Ein geodätischer Beitrag zum Geo-/Anlagen-/Gebäude-Monitoring,
zur Deformationsanalyse und Vorhersage und zum Katastrophenschutz -

Prof. Dr.-Ing. Reiner Jäger

Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft (HSKA)
- University of Applied Sciences -



Studiengang Vermessung & Geomatik
Studiengang Geoinformationsmanagement
Internationaler Studiengang Geomatics (MSc)
Institut für Angewandte Forschung (IAF)



D-76133 Karlsruhe, Moltkestrasse 30
Email: reiner.jaeger@goca.info
URL: www.goca.info

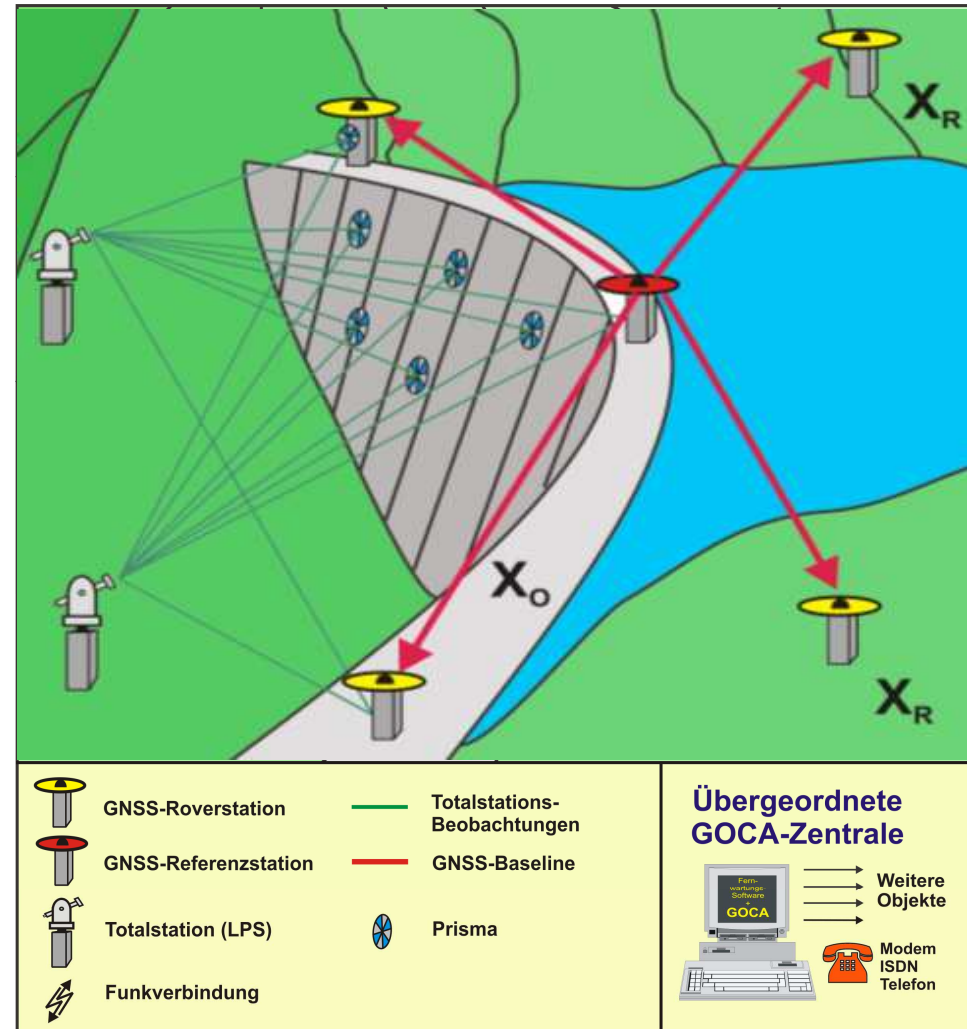


GOCA – System und – Software (Hska)

GOCA = GNSS/LPS based Online Control and Alarm System

Ziele des GOCA_Systems

- Online 3D- Monitoring mittels GNSS/GPS/LPS (Totalstationen, Nivelliere etc.) und zusätzlich LS.
- Online 3D-Georeferenzierung der Objektpunkte im Datum der Referenz- oder Stabilpunkte im Sinne einer Klassischen Deformationsnetzes (GNSS/LPS).
- Online Deformationsanalyse (Verschiebungsschätzungen, Kalmanfilterung bzgl. Koordinaten/Verschiebungen und LS-Zustandsgrößen $z(t)$. Statistische Tests.
- Automatische Alarmierung.



GOCA Anwendungsgebiete Teil 1 - Naturkatastrophenschutz

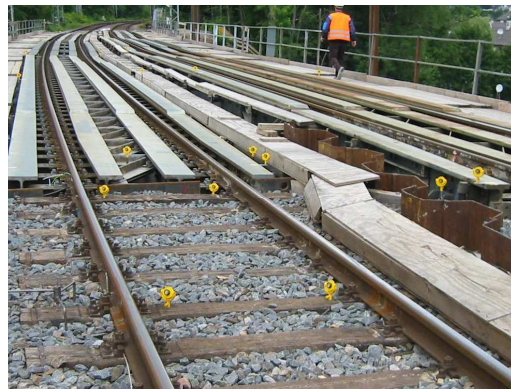


GOCA Anwendungsgebiete – Teil 2

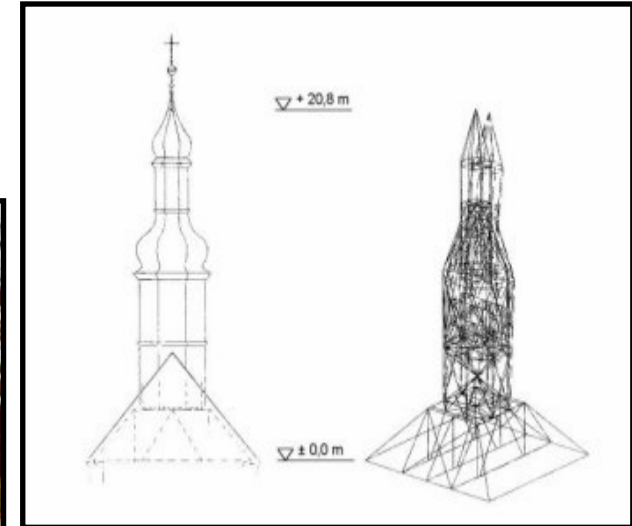
Bauwerks-Monitoring und Deformationsanalyse Statisch & Kinematisch



Monitoring und
Deformationsanalyse
von Bauwerken
bspw. im
Bergbaubereich



Baustellen
Monitoring



Bauwerksschwingungen



Geodätische beobachtungsbezogene Deformationsanalyse - Standards

$y = (x_R; x_{0,1}; x_{0,2})$ – Koordinaten $x(t)$

$$(l_1 - l_1(y^0)) + v_1 = A_{R,1} \cdot dx_R + A_{O,1} \cdot dx_{O,1} + 0 \cdot dx_{O,2}$$

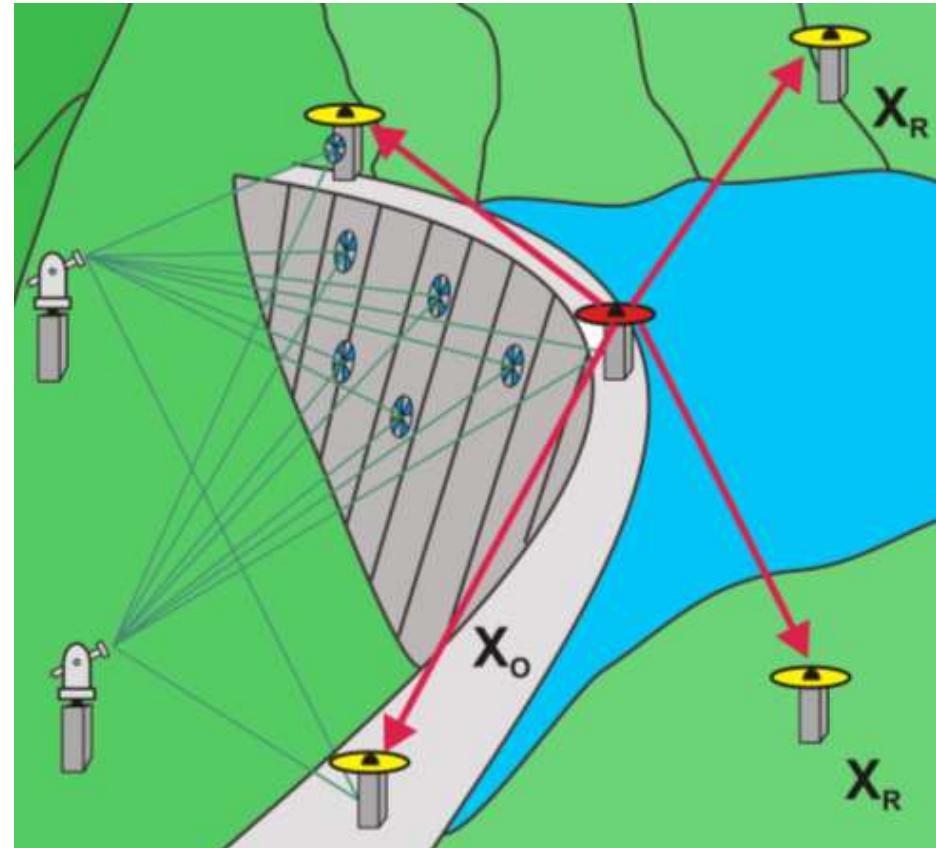
$$(l_2 - l_2(y^0)) + v_2 = A_{R,2} \cdot dx_R + 0 \cdot dx_{O,1} + A_{O,2} \cdot dx_{O,2}$$

Kleinste-Quadrate-Ausgleichung

$$d\hat{y} = (A^T C_l^{-1} A)^{-1} A^T C_l^{-1} \cdot (l - l(y^0))$$

$$\hat{y}(t_1, t_2) = y^0 + d\hat{y} = \begin{bmatrix} x_R^0 + dx_R \\ x_{O1}^0 + dx_{O1} \\ x_{O2}^0 + dx_{O2} \end{bmatrix}$$

$$C_y = \left[\begin{array}{c|cc} A_R^T C_l^{-1} A_R & A_R^T C_l^{-1} A_{O1} & A_R^T C_l^{-1} A_{O2} \\ \hline A_{O1}^T C_l^{-1} A_R & A_{O1}^T C_l^{-1} A_{O1} & 0 \\ A_{O2}^T C_l^{-1} A_R & 0 & A_{O2}^T C_l^{-1} A_{O2} \end{array} \right]$$



Diskrete Zustandsparameter y

$x_o(t)$ - Objektpunktkoordinaten

$u_o(t, x_i)$ - Objektpunktverschiebungen

Geodätische Deformationsanalyse – Netzagl.-basiert

Mathematisches Modell („Beobachtungsbezogene Deformationsanalyse“):

Beziehung zwischen Beobachtungsdaten (l) und Zustandsparametern y .
Stochastische Modelle C_l der Beobachtungsfehler ε zu zwei allgemeinen Zeitpunkten t_1 und t_2

$$l(t_1) - \varepsilon(t_1) = \tilde{l}(y(t_1)) \quad ; \quad C_l(t_1)$$

$$l(t_2) - \varepsilon(t_2) = \tilde{l}(y(t_2)) \quad ; \quad C_l(t_2)$$

Parameterschätzung (nach Linearisierung mit Näherungsparametern y^0)

Ansatz:
$$\sum_{i=1}^n \rho(\bar{v}_i) = \sum_{i=1}^n \rho\left(\left(C_l^{-\frac{1}{2}} \cdot A\right)_i \cdot d\hat{y} - \left(C_l^{-\frac{1}{2}} \cdot (l - l(y^0))\right)_i\right) = \text{Min}_{d\hat{y}}$$

Wahl des Schätzprinzips:
$$\rho(\bar{v}_i) = \frac{1}{2} \bar{v}_i^2 \quad \left(\rho(\bar{v}_i) = \frac{1}{2} |\bar{v}_i| \quad \dots \quad \rho(\bar{v}_i) = \begin{cases} \frac{1}{2} \bar{v}_i^2 & \forall |\bar{v}_i| \leq k \\ |\bar{v}_i| & \forall |\bar{v}_i| > k \end{cases} \right)$$

Ergebnis = Zustandsparameter $y(t)$

$$\hat{y} = y^0 + d\hat{y}$$



Integrierte Deformationsanalyse - Sensorintegration

Absolutes Deformationsnetz $y = (x_R, x_o(t))$
Geodätische Netzausgleichung



Standardsensoren $l=l(x)$
 GPS/GNSS, Totalstationen
 Nivelliere, Schlauchwaagen

**Sensor-
Integration**

Gemeinsame Ausgleichung der $l(x,t)$:
Eindeutiger Satz 3D-Koordinaten pro Objektpunkt und Zeit t

„Lokale LPS Gruppen“



$$\Delta Ho_{ij,GPS}(t) + v = \Delta \hat{H}o_{ij}(t)$$

$$\Delta Re_{ij,GPS}(t) + v = \Delta \hat{R}e_{ij}(t)$$

$$\Delta h_{ij,GPS}(t) + v = \Delta \hat{h}_{ij}(t)$$



$$r_{ij}(t) + v = \arctan\left(\frac{\Delta \hat{R}_{ij}}{\Delta \hat{H}_{ij}}\right)^t - \hat{o}$$

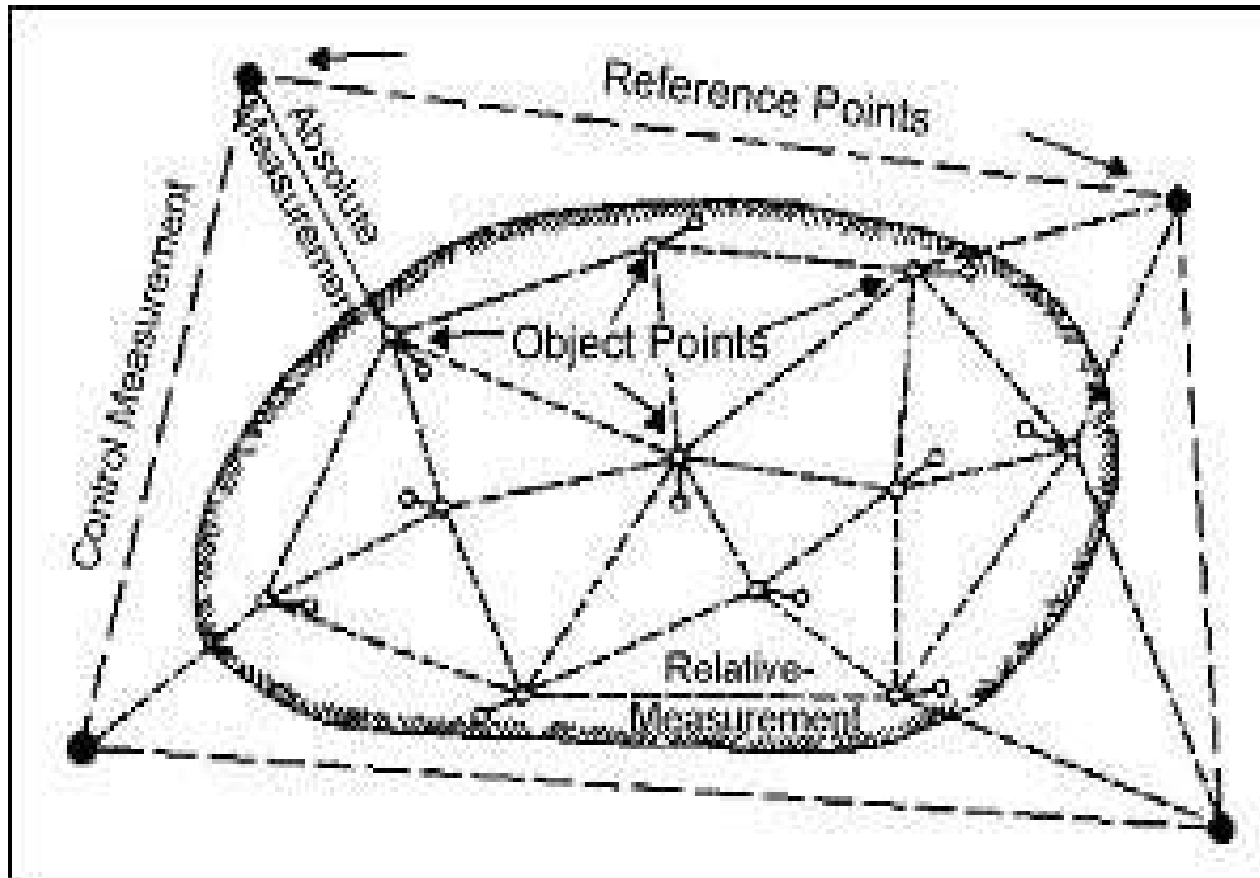
$$s_{ij}(t) + v = (\hat{m} \cdot \sqrt{\Delta \hat{R}_{ij}^2 + \Delta \hat{H}_{ij}^2})^t$$

$$\Delta H_{ij}(t) + v = \Delta \hat{h}_{ij}(t) + \hat{A} \cdot \Delta Re_{init} + \hat{B} \cdot \Delta Ho_{init} + \Delta \hat{m}_h \cdot \Delta h$$



Geodätische Deformationsanalyse - Standards

Primär: Absolutes Deformationsnetz mit Partitionierung des Monitoringbereichs bzw. GOCA-Arrays in einen Stabilbereich x_R und einen Objektbereich x_O



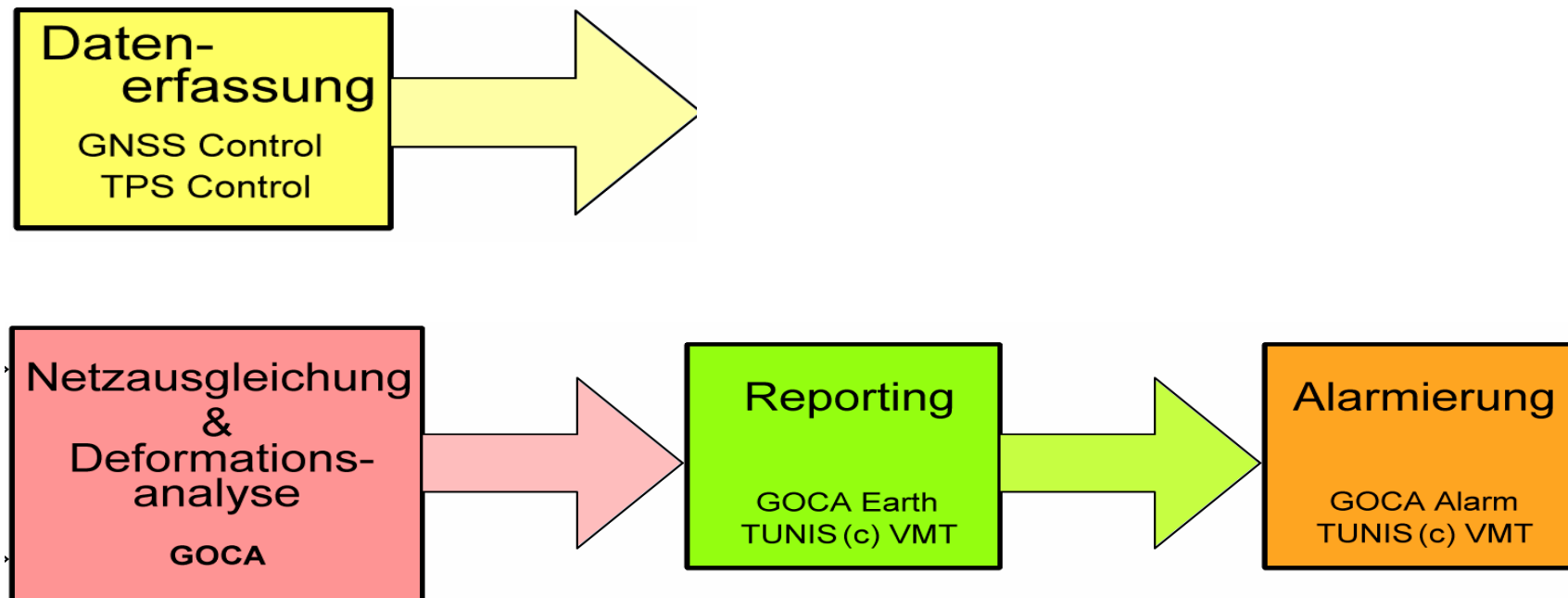
Netzausgleichung
als Konzept
des
geodätischen
Geononitoring
bzw. der
„Deformations-
Analyse“

Pelzer (1971)
DGK, Reihe C

Deformationsanalyse – Netzausgleichung als Basis der math. Modellbildung



Geo-Monitoring Kette – Beispiel GOCA-System



• Modellierung

- Zustandsparametrisierung
mittels Sensordaten:
- Koordinaten
 - Verschiebungen
 - Schadensparameter

• Reporting

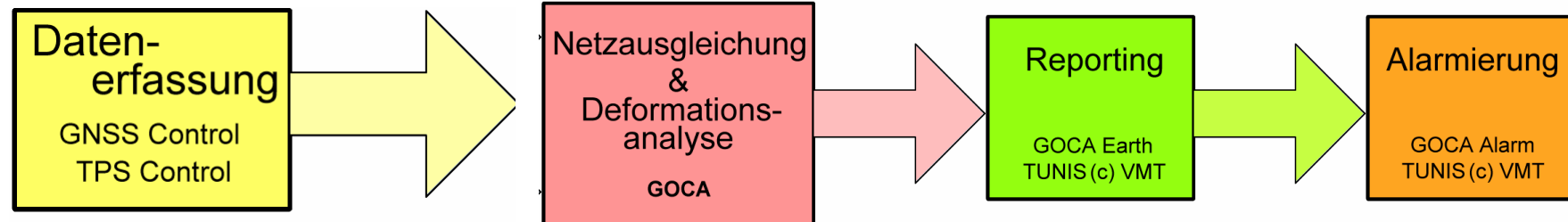
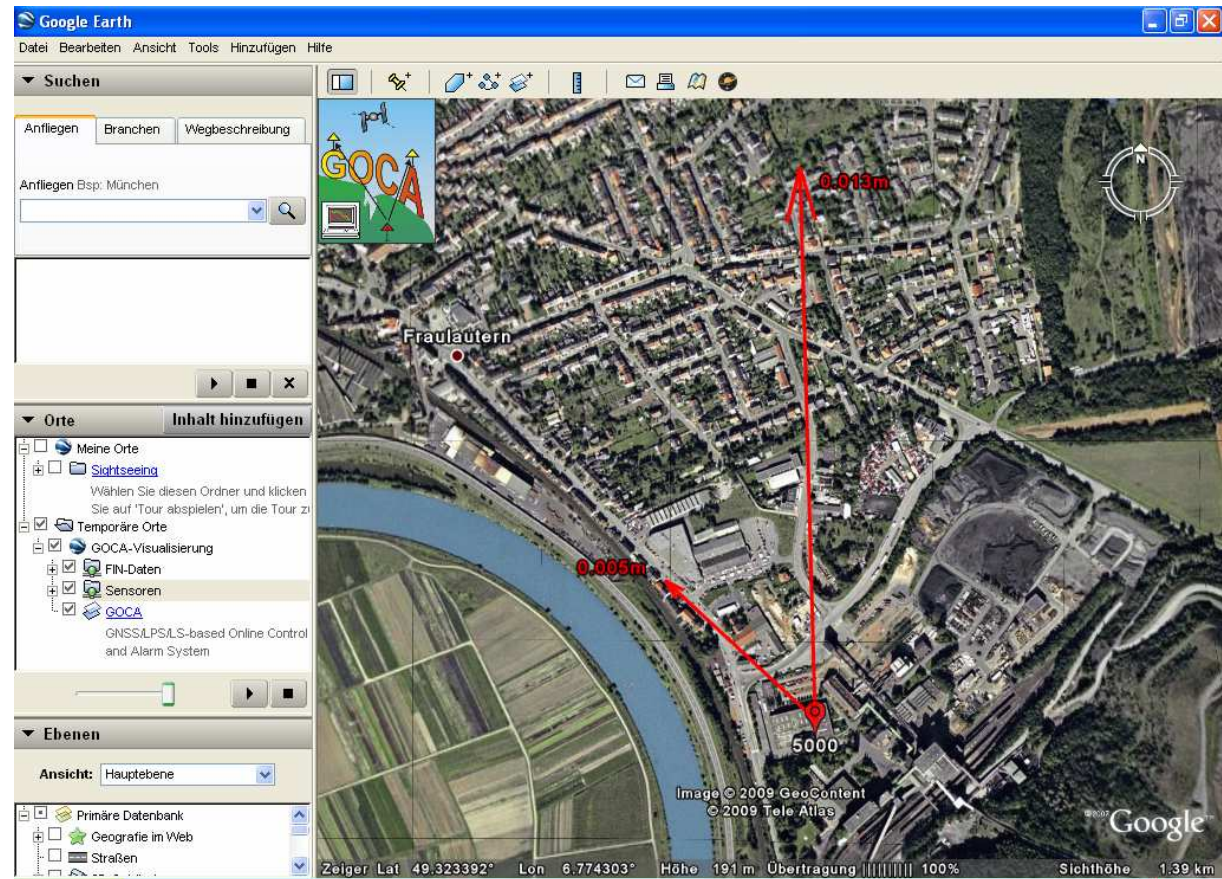
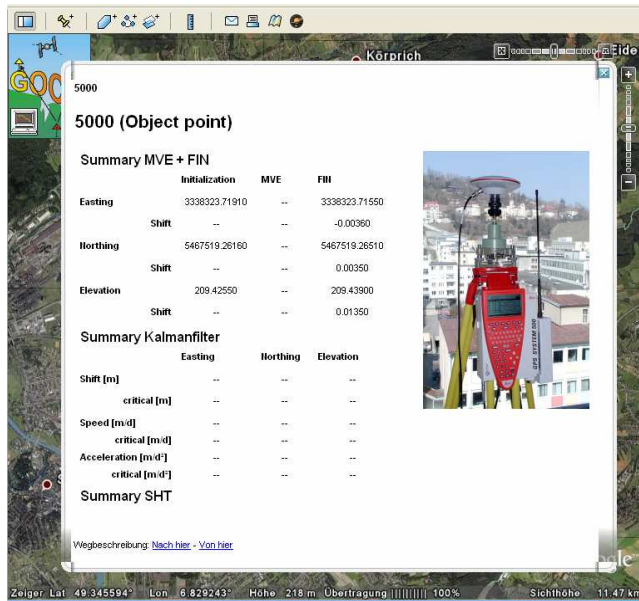
- Numerische Protokolle
Graphiken
Web-GIS

• Reaktion / Alarm- Management

- Kritische Zustände
- Vorhersagen
- Sensoren

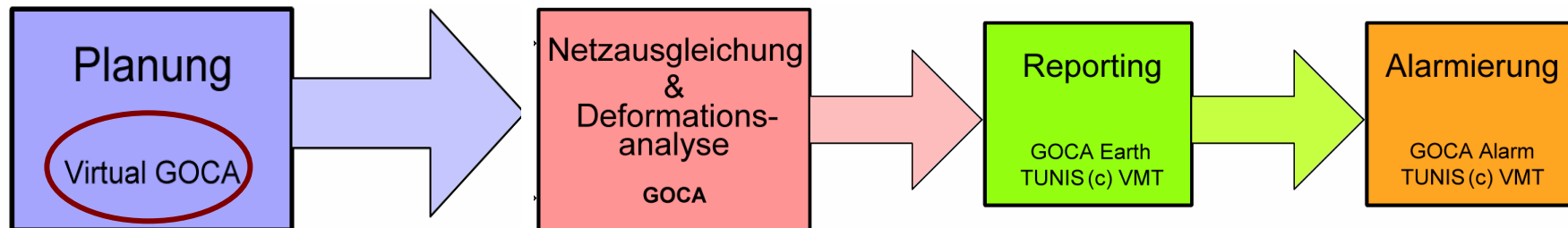
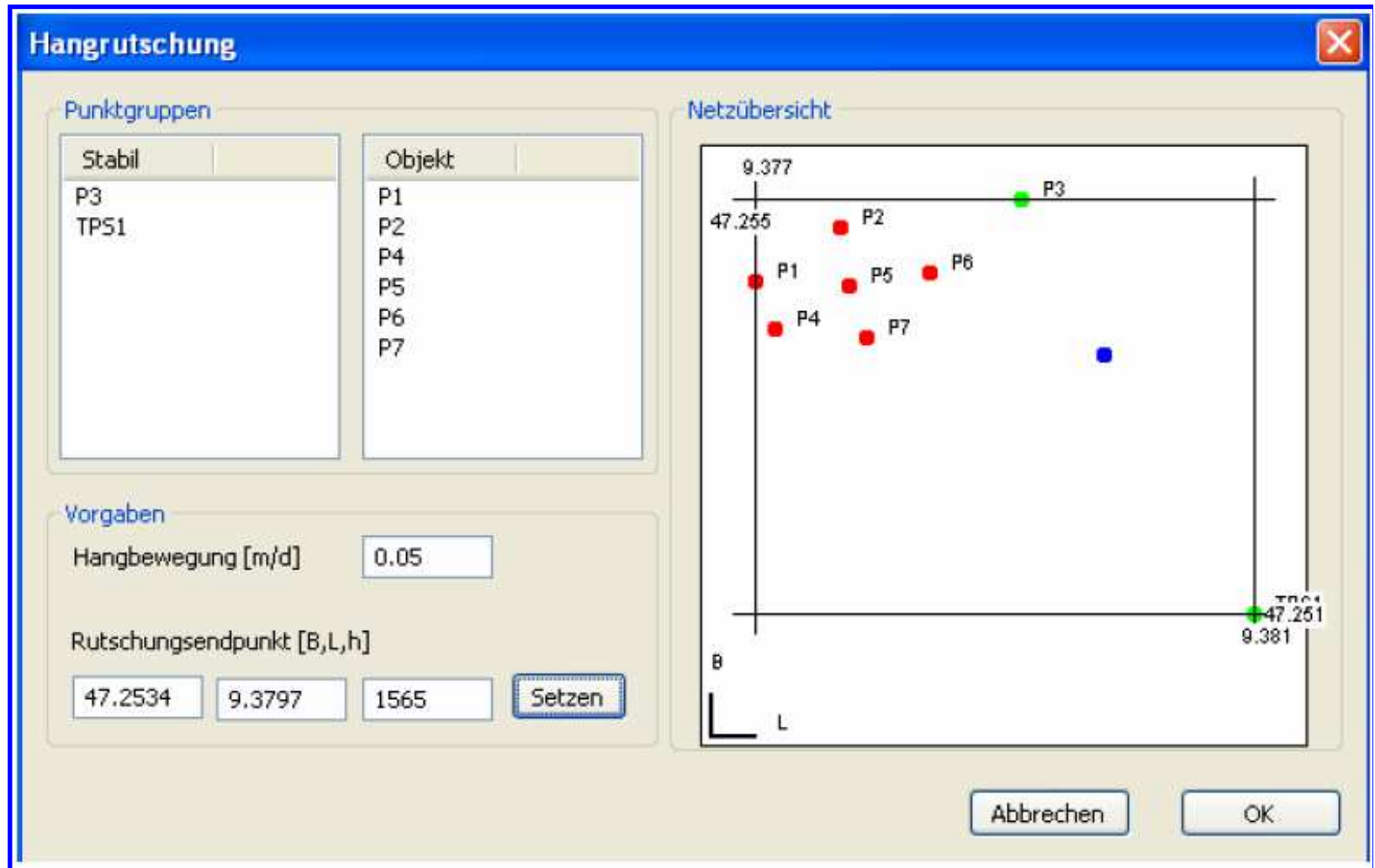


Bisher – Daten physikali- scher Testarrays



Virtual
GOCA

Neu –
Virtuelle
Sensor
Arrays



MONITOR
(C) GeoNav_Trimble

STRUNK & HARMUTH
SYSTEMTECHNIK GMBH

Sensor Control and Communication-Software

Trimble



TOPCON_2_GOCA
(C) GOCA Team Karlsruhe

Sensor Control and Communication-Software



Offene „GKA“ Schnittstelle

GOCA
Monitoring und
Deformationsanalyse
Software

RINEX-Schnittstelle



GeoMoS/Spider_2_GOCA
(C) GOCA Team Karlsruhe

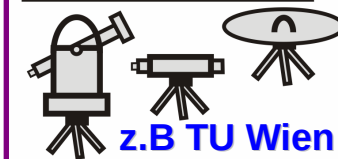
SQL-Server Database

GeoMoS Monitor or Spider (C) Leica Geosystems
as Sensor Control and Communicationsoftware

Leica Geosystems



„User-Made“
Sensor Control and Communication-Software



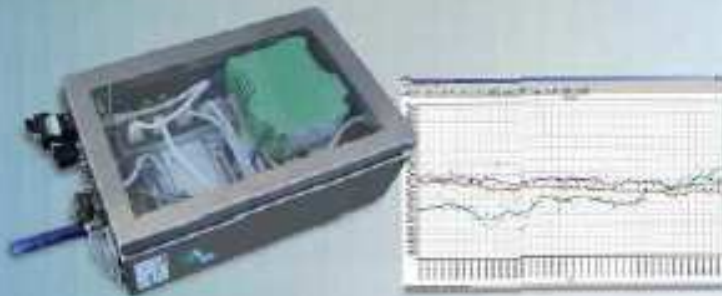
z.B TU Wien

VTM_TPSBox
VMT_GNSSBox



Innovative Geomonitoring- lösungen aus einer Hand

- Konzepterstellung, Installation und Betrieb eines auf Ihre Bedürfnisse ausgerichteten geodätischen Deformationsnetzes
- Implementierung in bestehende Soft- und Hardwarestrukturen (z.B. Tunnelbau)
- Beratungseinstellungen für alle Projektphasen



Unsere Hardware: Central Box Geomonitoring

- Anbindung geodätischer und geodätischer Sensoren
- Vielerlei Logische Sensoren integrieren
- Einbindung von statischen und dynamischen Totalstationen in ein Netzwerk
- Unterstützt Linux und Windows

Unsere Software: TPS Control

- Erstellung der Messwerte und Weiterleitung an Analyse-Software (GOCA)
- Ansteuerung beliebig vieler Totalstationen
- Visualisierung der Ergebnisse in Diagrammen und Protokollen
- Alarmmanagement: Akustische und optische Alarmsignale, Email und SMS

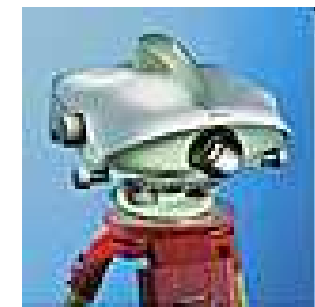
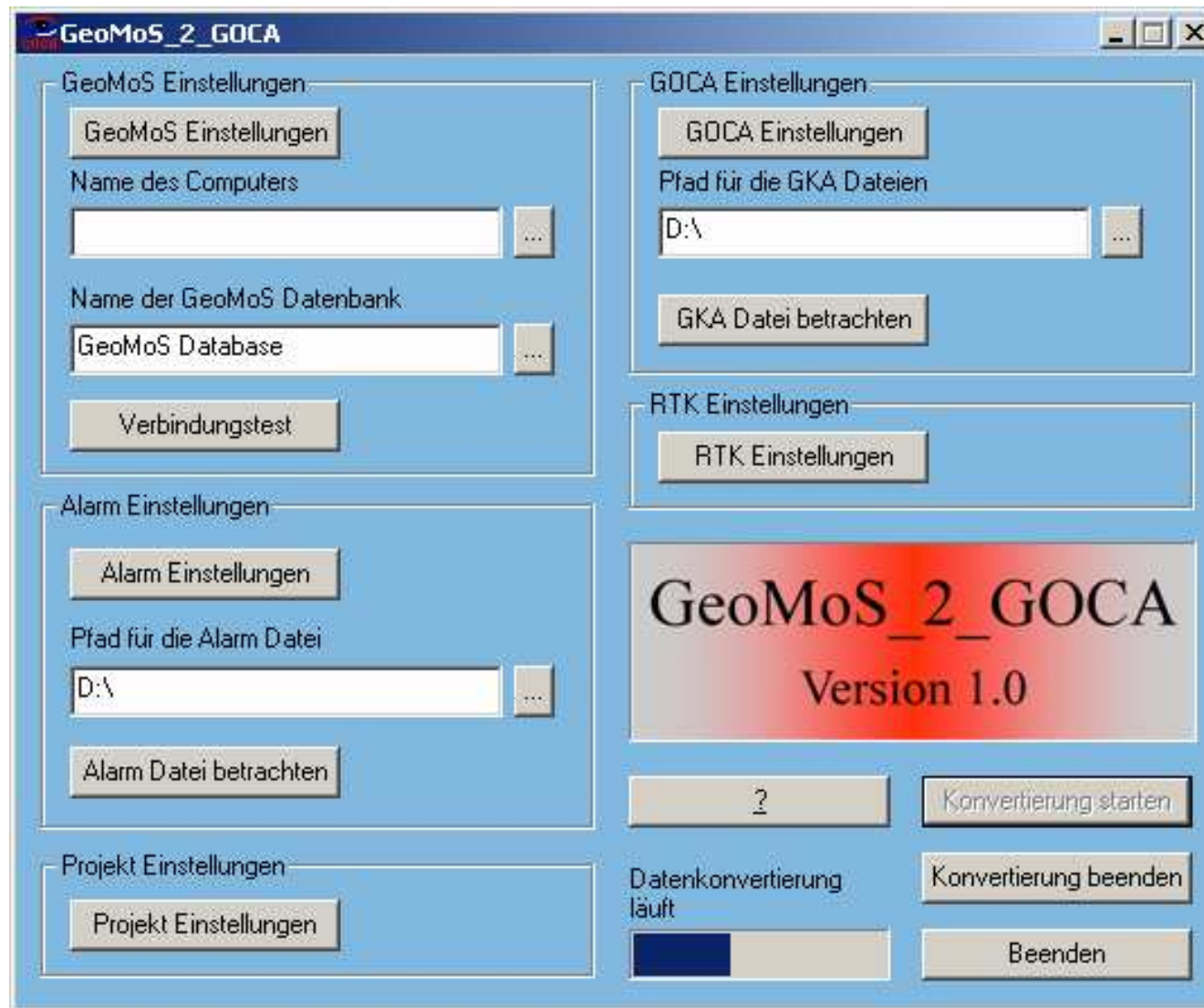


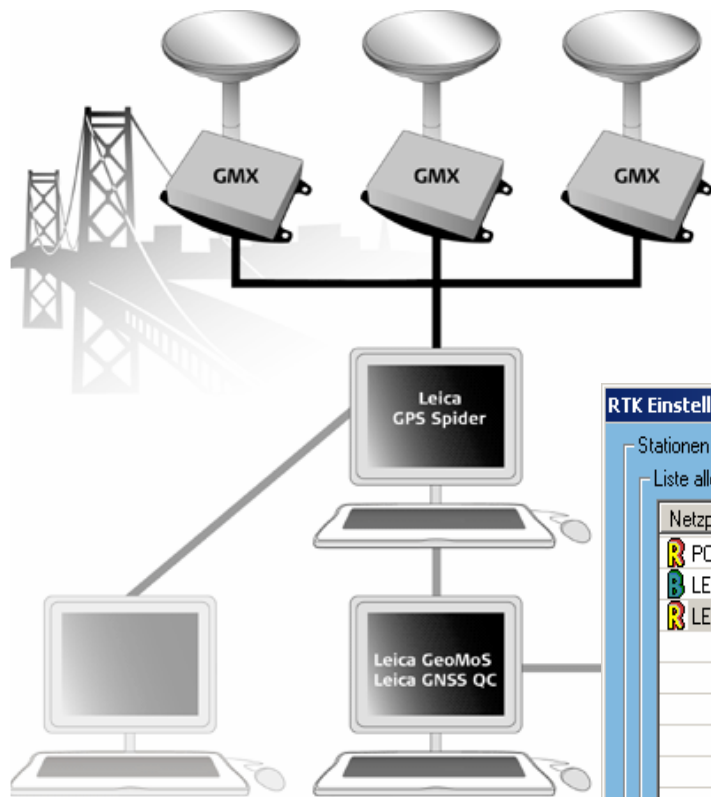
Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft



Software

GOCA TPSControl





GeoMOS/Spider
_2_GOCA
 © GOCA-Projekt
 Karlsruhe

RTK Einstellungen

Stationen
 Liste aller Stationen:

Netzpunktname	Sensortyp	Antennentyp	Antennenhöhe
PC-LEICA		AT502	0.0000
LEI2		AT502	0.0000
LEI3		AT502	0.0000

Hinzufügen
 Bearbeiten
 Löschen
 Alle Löschen
 Als Basis
 Als Rover
 Aus GNSS Spider
 Aus GeoMoS

Basis-Rover-Zuordnung
Basisstationen
 Netzpunktname: LEI2
 Entfernen
 Alle Entfernen

Roverstationen zur gewählten Basis
 Netzpunktname: PC-LEICA, LEI3
 Entfernen
 Alle Entfernen

Hauptpfad der RTL Dateien: D:\RT-Positioning ☒ ...

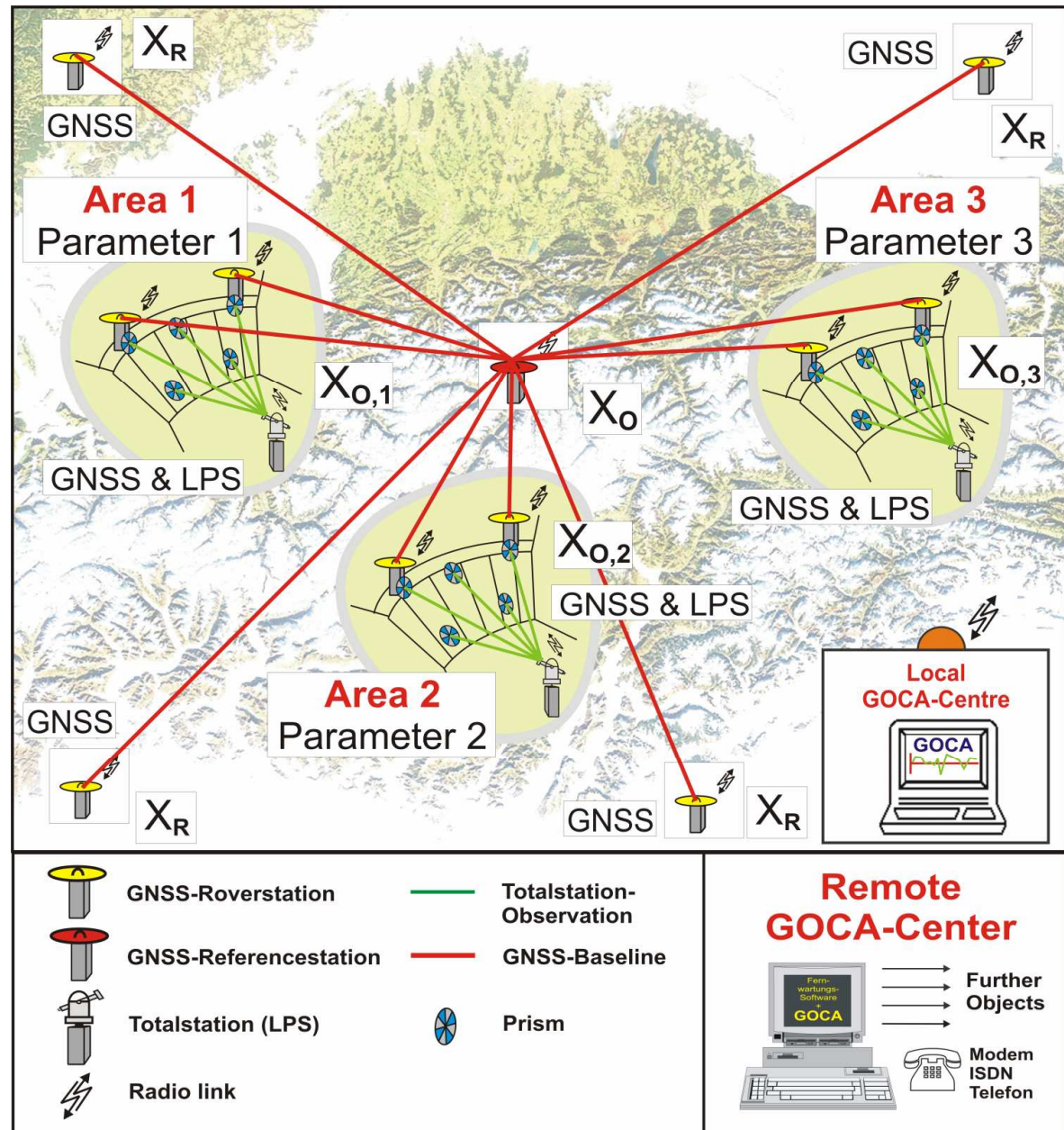
OK Abbrechen



GOCA-Software Version 4.0

-Design und Modell- bildung

- Reines GNSS Array
- Reines LPS Array
- GNSS & LPS Array
 - Mehrere Gebiete
 - GNSS als Referenz-Rahmen X_R
 - Sonderfall: 1 Gebiet



GOCA-Deformationsanalyse-Software

➤ Verwaltung von GOCA-Projekten

- Unterstützung verschiedener Sprachen
- Originäre Receiver- und Totalstationsdaten (GKA-Daten-Schnittstelle)
- Nutzerkoordinatensysteme
- Epochen-Manager, etc.

➤ Ausgleichung – Stufe 1

Initialisierung = 1. Bestimmung des Referenzpunktrahmens x_R

2. Bestimmung von Zusatz- bzw. Gebietsparametern z für das Deformationsmonitoring in den Stufen 2 und 3

- Zusatzfunktion bzw. Zusatzmodul: Überprüfung der Stabilität der Referenzpunkte über Netzausgleichungs-Statistik

➤ Ausgleichung - Stufe 2

- Kontinuierliche Ausgleichung der Objektpunktpositionen im Referenzpunkt- bzw. Stabilpunkt-Datum.
- Zeitreihen-Visualisierung im Graphikfenster.
- Koordinaten $x(t)$ bzw. Verschiebungen $u(t)$ (FIN-Dateien) als Basis für Schnittstelle zu FEM -Software bzw. Systemanalyse



GOCA-Deformationsanalyse-Software

➤ Ausgleichung - Stufe 3

GOCA -Deformationsanalyse (L1-/L2-/Huber-Schätzer)

Online und parallel zu Stufe 2. Zusatzpaket: GOCA-Alarm

Deformationsfunktionen und Schätzungen:

- **Gleitender Mittelwert** und daraus abgeleitete **Verschiebungen**. Alarmierung.
- **Verschiebungsschätzung** $u(t)=x(t)-x(t_0)$ (= klassische geodätische Deformationsanalyse). **Statistisch gesicherte** Alarmierung.
- **Schätzung von Verschiebung u , Geschwindigkeit und Beschleunigung** basierend auf einem Kalman-Filter. Für Koordinaten (= klassische Deformationsanalyse) und andere Zustandsgrößen (LS) möglich. **Statistisch gesicherte** Alarmierung.

Schnittstelle zu FEM -Software bzw. Systemanalyse



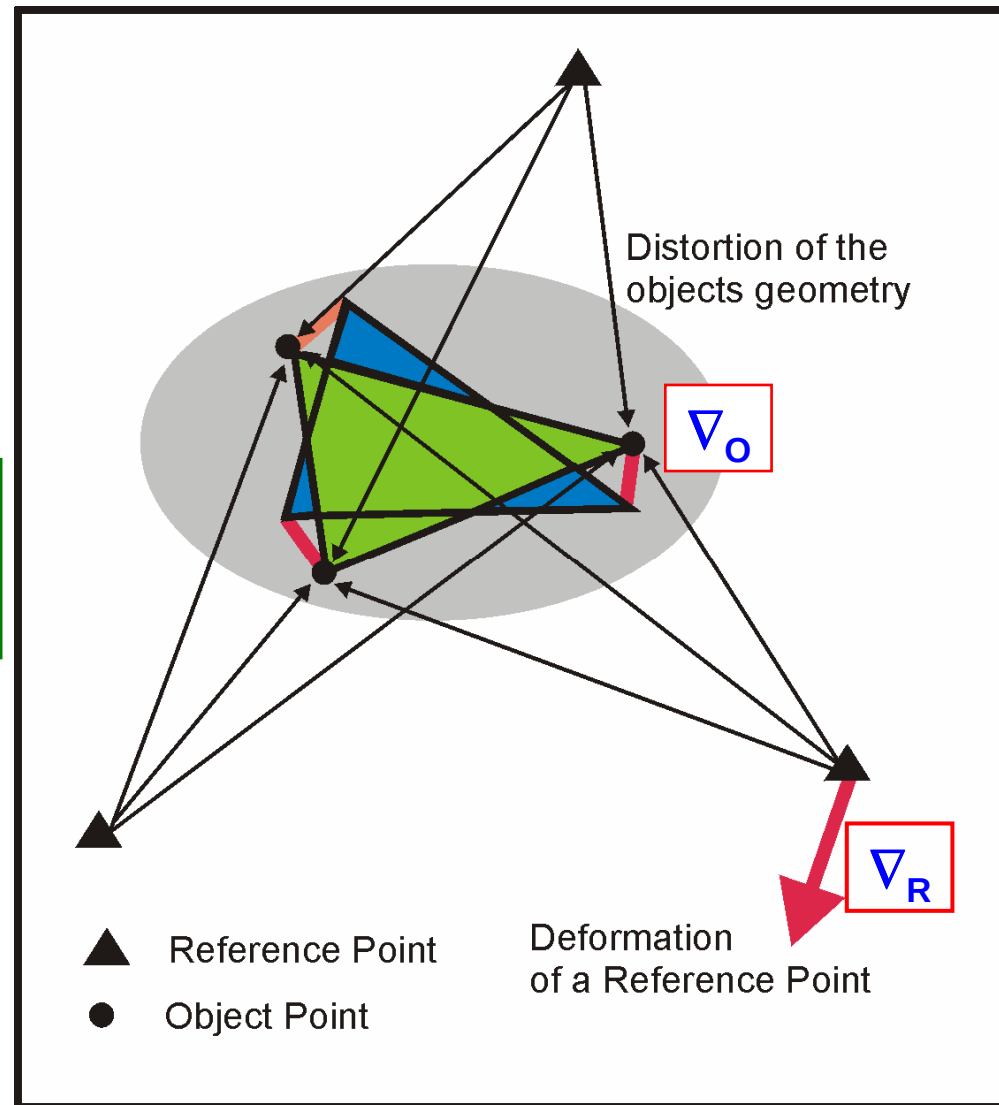
Überprüfung des Referenzpunktfeldes

Test zur Aufdeckung
signifikanter
Deformationen ∇_R
der Referenzpunkte
im beobachtungsbezogenen
Deformationsanalyse-Modell

$$T = \frac{\nabla_{\hat{X}_R}^T \cdot Q_{\nabla_{\hat{X}_R}}^{-1} \cdot \nabla_{\hat{X}_R}}{b \cdot \hat{\sigma}^2} \sim F_{b,r-b}$$

$$Q_{\nabla_{\hat{X}_R}} = (A_R^T P Q_v P A_R)^{-1}$$

Kofaktor - Matrix des
Deformationsvektors



GOCA – Netzdesign-Definition

The screenshot displays the GOCA software interface. The 'Projekteinstellungen' (Project Settings) dialog box is open, showing the 'Netzdesign' (Network Design) tab. It includes sections for 'Sensortypen' (Sensor Types) with radio buttons for 'GPS-Sensoren', 'Terrestrische Sensoren', and 'GPS und terrestrische Sensoren'; 'Netztyp' (Network Type) with radio buttons for 'Lagenetz', 'Höhennetz', and 'Lage- und Höhennetz'; and 'Parametergruppen' (Parameter Groups) with a dropdown for 'aktuelle Gruppe' (current group) set to 'abc', a text field for 'Gruppenname' (group name) set to 'abc', and a dropdown for 'Polynomgrad (Geoid)' (polynomial degree (geoid)) set to 'ohne Parameter' (no parameters). There are also checkboxes for 'Lagemassstab berechnen' (calculate scale) and 'Höhenmassstab berechnen' (calculate scale). At the bottom of the dialog are buttons for 'Neue Gruppe' (new group), 'Übernehmen' (take over), 'löschen' (delete), and 'Alle löschen' (delete all).

The 'GOCA - DSKHalle' main window is visible in the background, showing a menu bar with 'Projekt', 'Deformationsnetz', 'Datenaufzeichnung', 'Alarm', 'Graphik', 'Ausgabe', 'Extras', 'Ansicht', and 'Fenster'. Below the menu is a toolbar with various icons. The main display area shows a graph with three data series (red, green, and blue) plotted over time. The x-axis represents time, with labels for '01.11.99' and '08.11.99'. The y-axis represents displacement, with labels for '0.1059 m' and '-0.1059 m'. The graph shows a significant downward trend in the red and green series, while the blue series remains relatively stable. A small window in the foreground shows the 'Punkt-Nr.' (point number) set to '0010' and 'Info' button, and a 'Shift' section with input fields for 'X: 50 mm', 'Y: -50 mm', and 'H: 0 mm'. There are also checkboxes for 'Koordinatensprung' (coordinate jump) and 'Initialisierungsposition' (initialization position).

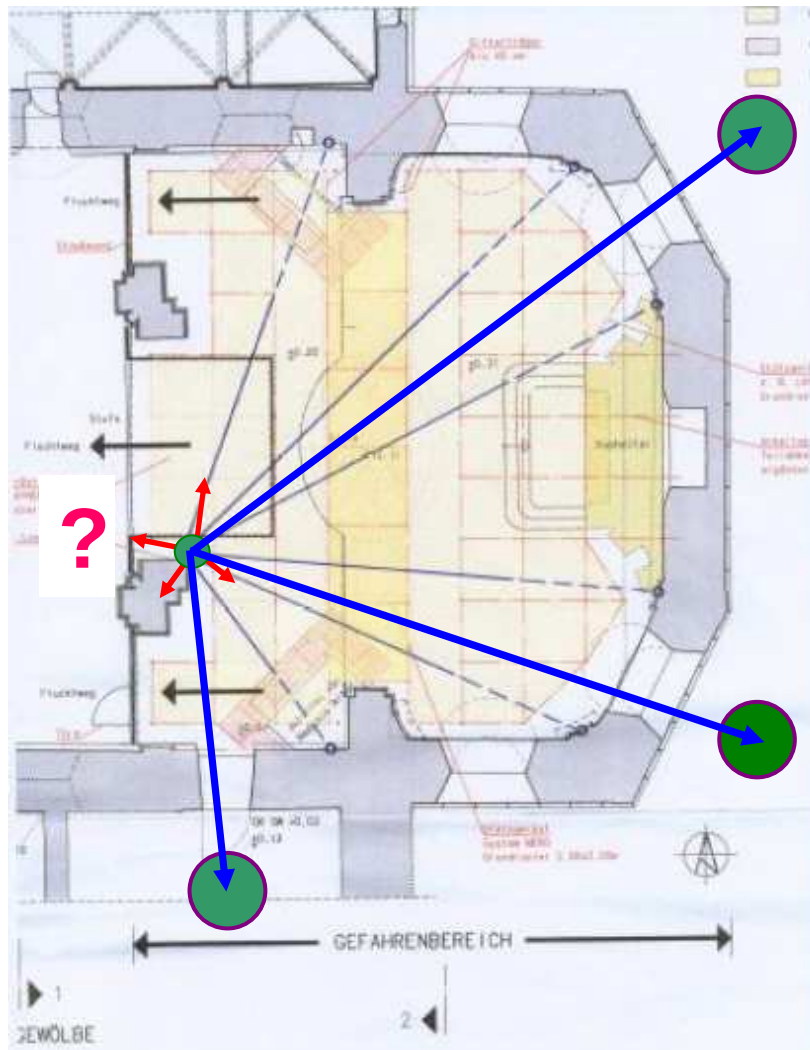


GOCA-Software Version 4.0 - Design and Modellierung

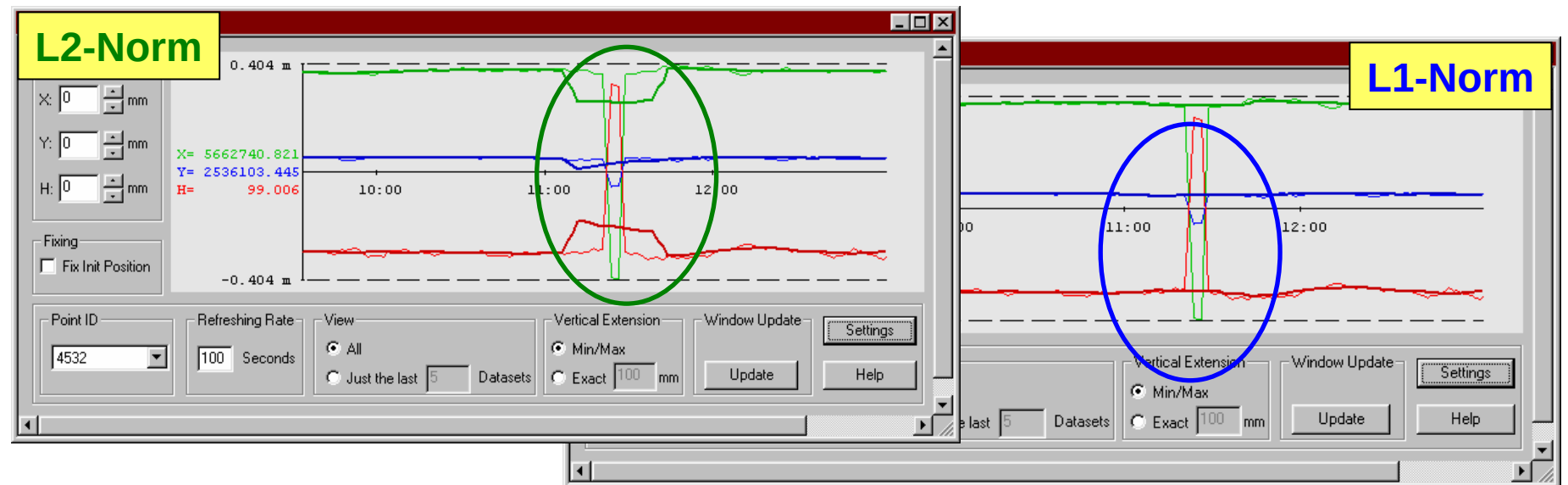
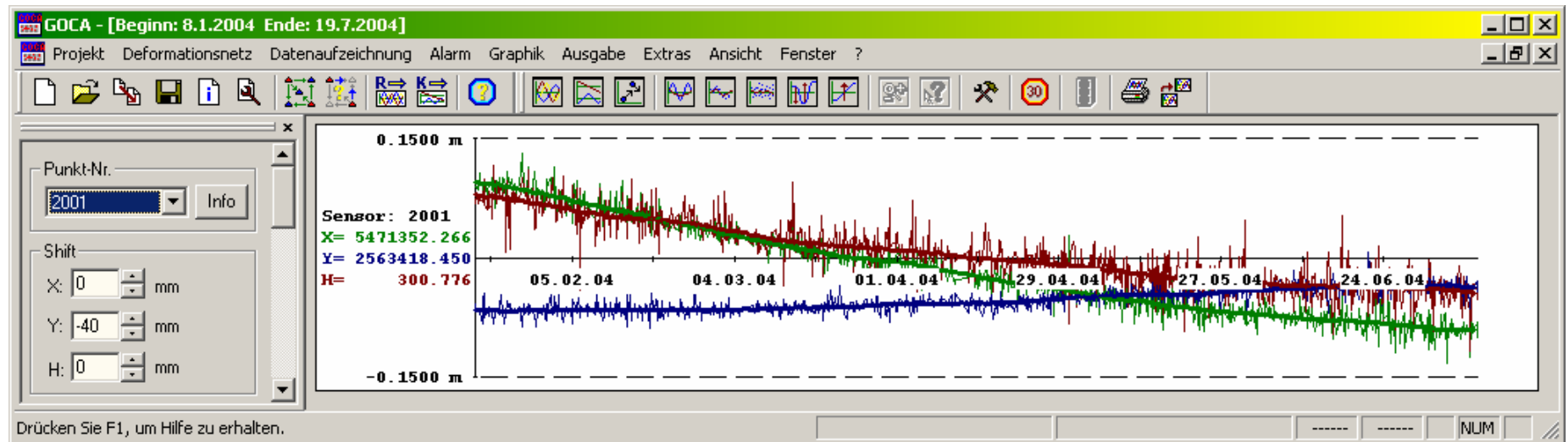
P
U
R
E

L
P
S

A
R
R
A
Y



GOCA Stufe 2 („FIN-Files“) und Moving-Average („MVE-Files“)

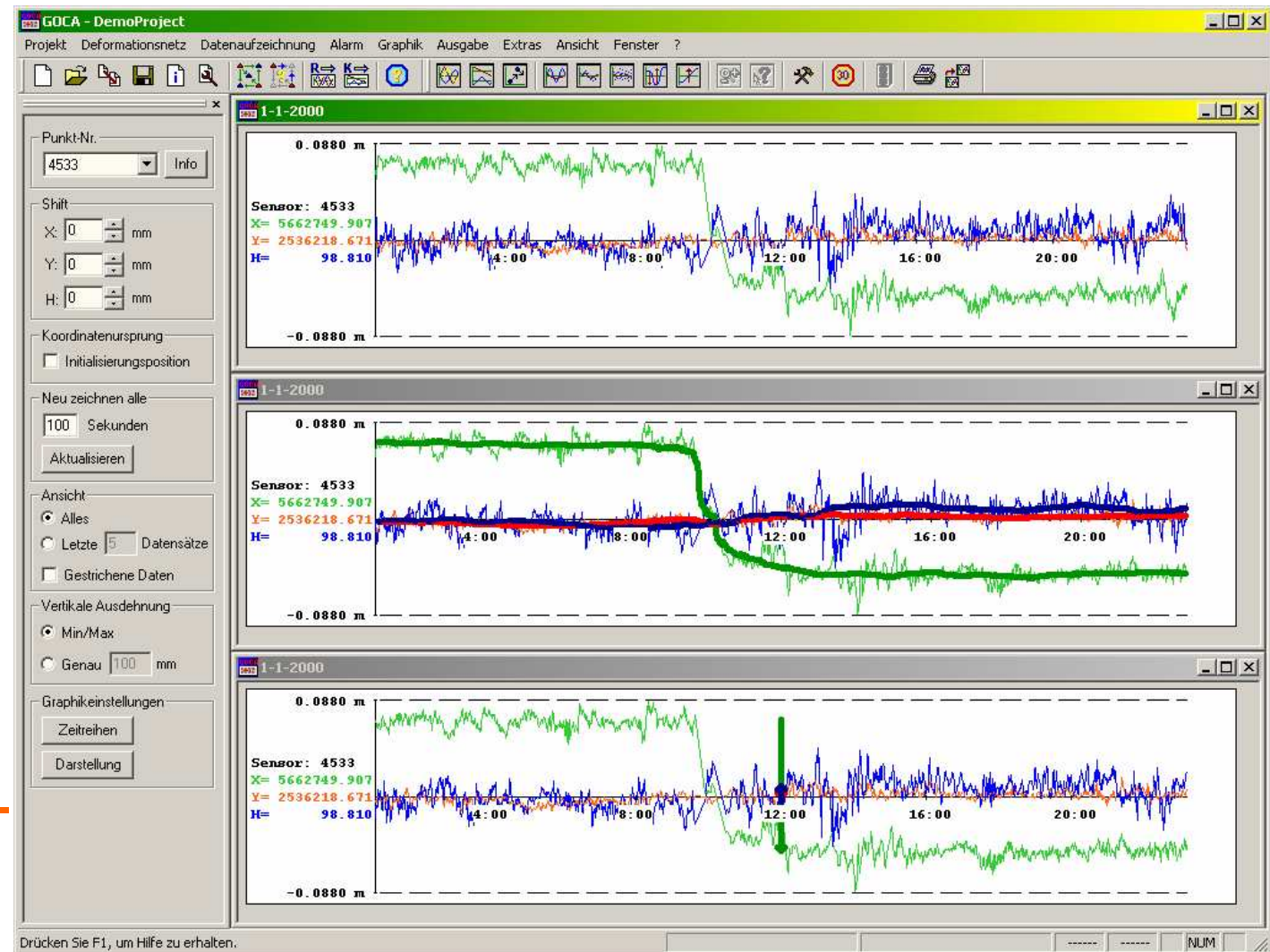


GOCA Stufe 2 und GOCA Stufe 3

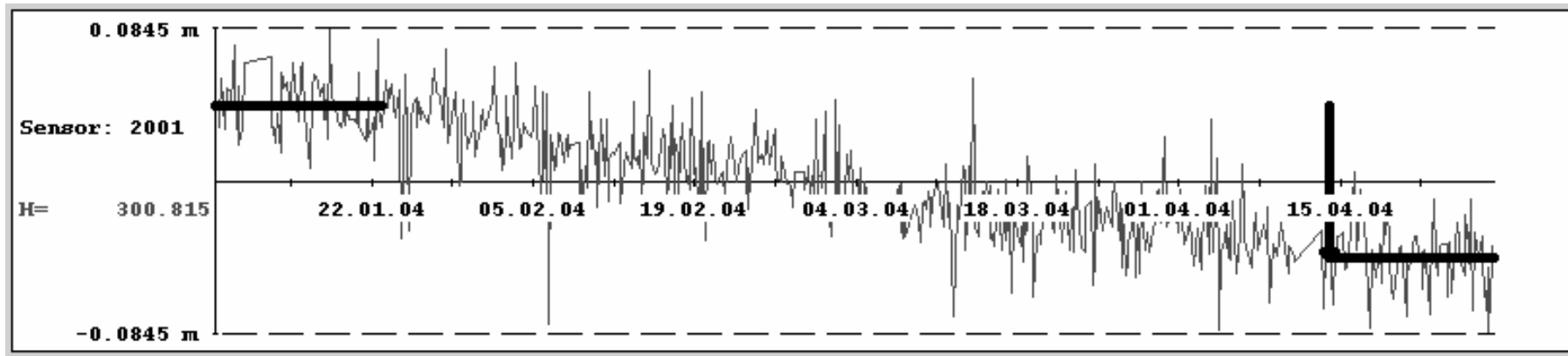
Stufe 2
Objektpunkt-
Zeitreihen

Stufe 3
Online Moving
Average

Stufe 3
Online
Verschiebungs-
Schätzung



GOCA Stufe 3 – Online Verschiebungs-Schätzung



$$\begin{bmatrix} \mathbf{l}_{t_0} \\ \mathbf{l}_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{t_0} \\ \mathbf{v}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{E}_2 & \mathbf{E}_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{u}(t) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y}(t) = (\mathbf{x}_0, \mathbf{u}(t))^T$$

GOCA-Ausgleichsstufe 3

Online-Verschiebungsschätzung

Festlegung, Bearbeitung
zw. Aktivierung
einer

Online
Verschiebungs-
Schätzung,

hier unter der
Bezeichnung „VS1“

Liste kann beliebig lang
sein

The screenshot shows a software window titled 'Einstellungen zur Datenaufzeichnung' with a close button (X) in the top right corner. It contains four tabs: 'Gleitender Mittelwert', 'Verschiebungsschätzung' (which is selected), 'Datenprüfung', and 'Rohdatenfilter'. Below the tabs is a section titled 'Liste der Verschiebungsschätzungsdefinitionen:' containing a table with the following columns: 'Aktiv', 'Bezeichnung', 'Schätzertyp', 'Datum E1', 'Zeit E1', and 'Da'. The first row of the table is filled with the values: a checked checkbox, 'VS1', 'E1 = Dyn', '08.01.04', '00:00', and '09'. To the right of the table are five buttons: 'Neu', 'Bearbeiten', 'Kopie einfügen', 'Löschen', and 'Alle löschen'. At the bottom of the window are 'OK' and 'Abbrechen' buttons.

Aktiv	Bezeichnung	Schätzertyp	Datum E1	Zeit E1	Da
☒	VS1	E1 = Dyn	08.01.04	00:00	09



GOCA – Stufe 3

Online

Verschiebung- Schätzung

Displacement-Estimation

General Settings
Name:

Object Points
☐ GOCAA18
☐ GOCA12
☐ GOCA13

Epoch Definition
☒ Epoch 1 = Initialisation
☐ Epoch 1 = fix
☐ Epoch 1 = dynamic

Begin of dynamic or fix Epoch 1:
Date: Time:

Begin dynamic Epoch 2:
Date: Time:

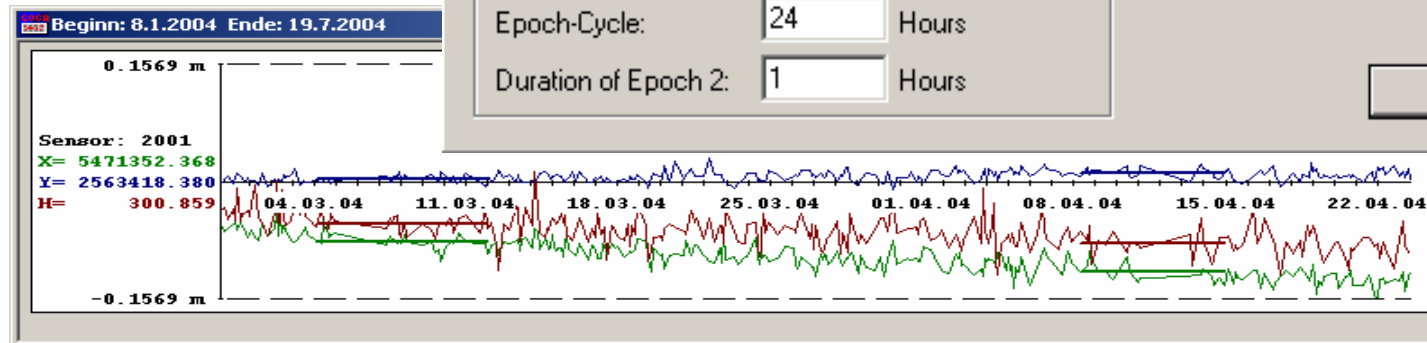
Duration of Epoch 1: Hours
Epoch-Cycle: Hours
Duration of Epoch 2: Hours

Adjustment Settings
Estimation Type:
☒ L1 ☐ L2 ☐ Huber
Convergence Crit. (L1, Huber):

Statistical Settings
Error Probability Plan Pos.: %
Error Probability Height: %
Sensitivity β : %

Settings for Alert
☒ Alert in case of Significance (A)
☒ Alert on exceeding crit. values (B)
Plan: mm Priority:
Height: mm Priority:
☒ Alert only if A and B simultaneously match

OK Cancel



GOCA-Stufe 3 Online-Verschiebungsschätzung

• Numerische Ergebnisse der Verschiebungsschätzung („SHT-Files“)

Ergebnis der Verschiebungsschätzung:

Zeit = 26.06.2003 00:59:00	Rechts	=	-0.0007
	TRechts	=	1.3
	Kritischer Wert	=	3.3
	Genauigkeit	=	0.00055
	Konfidenzbereich	=	0.00183
	Sensitivitätsbereich	=	0.00255
Zeit = 26.06.2003 00:59:00	Hoch	=	-0.0011
	THoch	=	1.3
	Kritischer Wert	=	3.3
	Genauigkeit	=	0.00080
	Konfidenzbereich	=	0.00265
	Sensitivitätsbereich	=	0.00368
Zeit = 26.06.2003 00:59:00	Hoehe	=	-0.0048
	THoehe	=	3.7
	Kritischer Wert	=	3.3
	Genauigkeit	=	0.00130
	Konfidenzbereich	=	0.00433
	Sensitivitätsbereich	=	0.00601

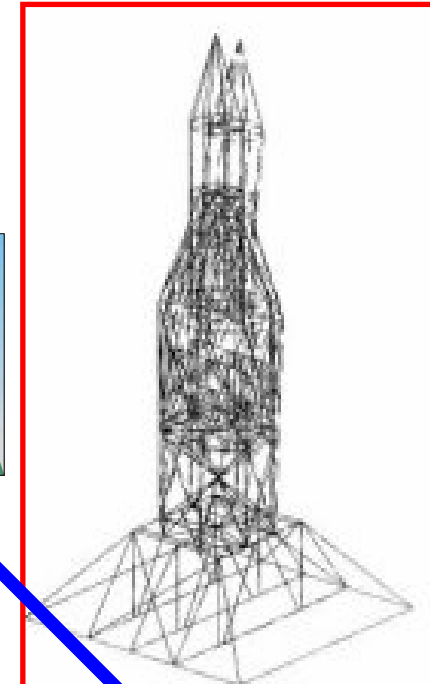
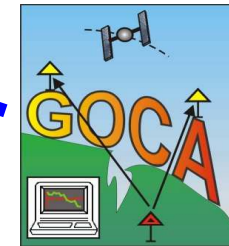
*** signifikant



GOCA Stufe 3 - Kalmanfilterung („KAL-Files“)

Deskriptive Model – Simple Kalman-Filter

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_O(t + \Delta t) \\ \dot{\mathbf{u}}_O(t + \Delta t) \\ \ddot{\mathbf{u}}_O(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & [\Delta t] & \left[\frac{1}{2} \Delta t^2 \right] \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & [\Delta t] \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{u}_O(t) \\ \dot{\mathbf{u}}_O(t) \\ \ddot{\mathbf{u}}_O(t) \end{bmatrix}$$



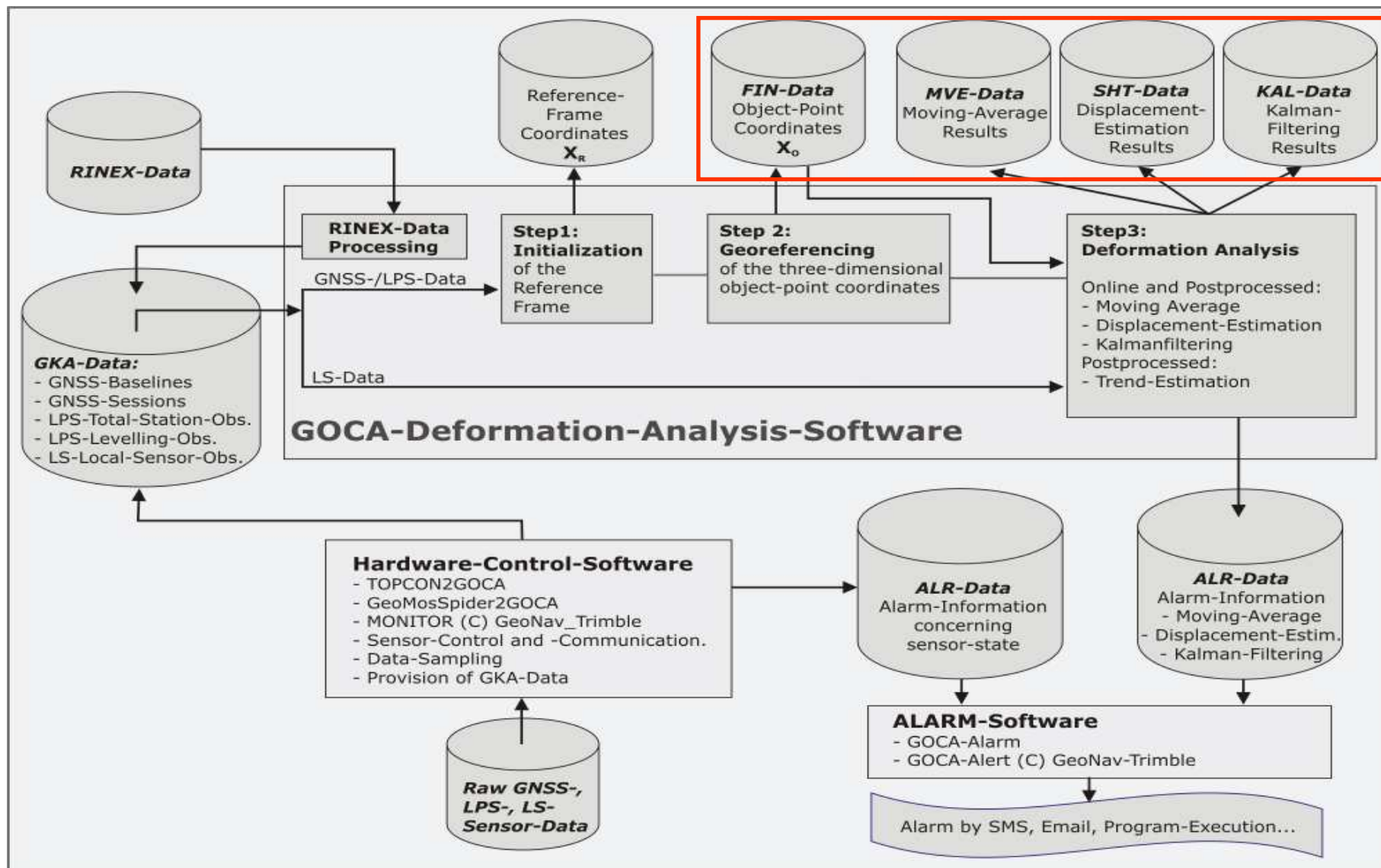
Systemanalyse-Modell – Erweiterter Kalman- Filter

E.g. bei Eigenschwingungen:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_O(t + \Delta t) \\ \dot{\mathbf{u}}_O(t + \Delta t) \\ \ddot{\mathbf{u}}_O(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & [\Delta t] & \left[\frac{1}{2} \Delta t^2 \right] \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & [\Delta t] \\ \mathbf{0} & [-\mathbf{M}(\mathbf{p}_M)^{-1} \cdot \mathbf{K}(\mathbf{p}_K) \cdot \Delta t] & [\mathbf{I} - \mathbf{M}(\mathbf{p}_M)^{-1} \cdot \mathbf{C}(\mathbf{p}_C) \cdot \Delta t] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{u}_O(k) \\ \dot{\mathbf{u}}_O(k) \\ \ddot{\mathbf{u}}_O(k) \end{bmatrix}$$



GOCA-Ablaufschema / Algorithmen und Input/Output-Schnittstellen



Integrierte Systemanalyse-basierte Modellierung - FEM (Statisch)

PhD TU Graz, 2007

System-
Gleichungen

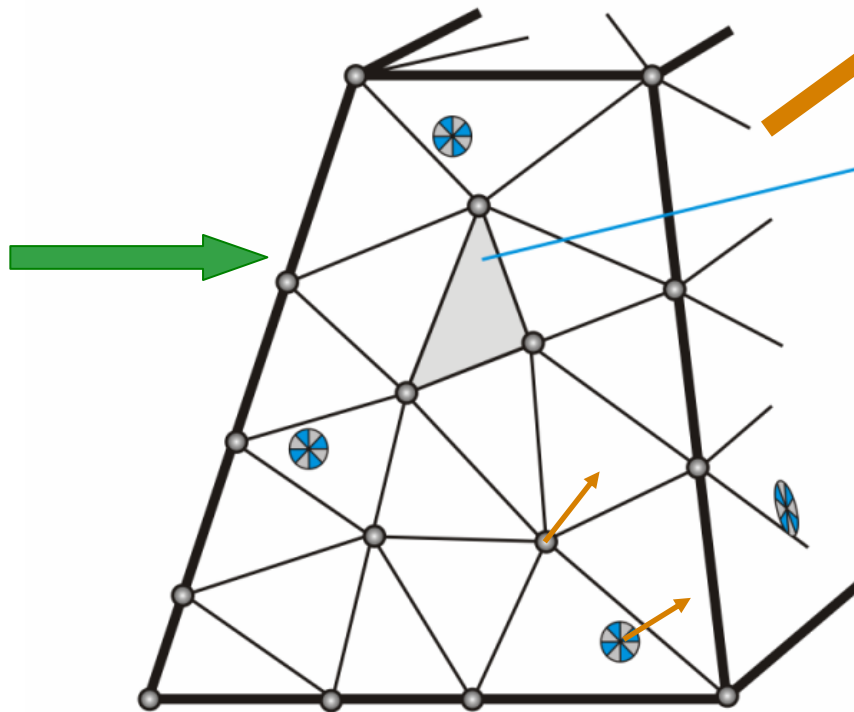
$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{f}$$

$$\mathbf{K}(\mathbf{p}, \Delta \mathbf{p})$$

Steifigkeitsmatrix

$\mathbf{p}$ = Material Parameter

$\Delta \mathbf{p}$ = Änderungen (Schaden, z.B. Risse)



-  Knoten des geodätischen Netzes
-  Knoten des FE-Modells

FEM-Elemente

$$\mathbf{u}_{i,E} = \mathbf{N}_E \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{u}_3 \end{pmatrix} = \mathbf{N}_E \cdot \mathbf{u}_{E\text{-Nodes}}$$

$\mathbf{N}_E$ = Formfunktionen

Geodätische Verschiebungen $\mathbf{u}_{\text{geod}}$

$$\mathbf{u}_{\text{geod}} = \mathbf{N}_E(\mathbf{x}_{\text{geod}}) \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{u}_3 \end{pmatrix} = \mathbf{N}_E(\mathbf{x}_{\text{geod}}) \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{u}$$

$\mathbf{E}$ = (0,1)-Matrix => Geod. Design (FOD)



Integrierte System Analysis basierte Modellierung - FEM (Static)

FEM- / System- Parts (Static) & *Parameter-Integration*

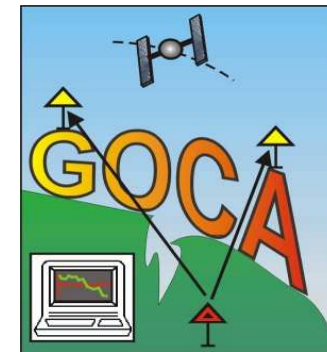
$$\mathbf{0}_{\text{sys}} + \mathbf{v}_{\text{sys}} = \hat{\mathbf{u}} - \mathbf{K}(\hat{\mathbf{p}}_k, \Delta\hat{\mathbf{p}})^{-1} \cdot \hat{\mathbf{f}} \quad \text{and} \quad \mathbf{C}_{\text{sys}} \Rightarrow \mathbf{0}$$

$$\mathbf{p}_k + \mathbf{v}_p = \hat{\mathbf{p}}_k \quad \text{und} \quad \mathbf{C}_{p_k}$$

$$\mathbf{f} + \mathbf{v}_f = \hat{\mathbf{f}} \quad \text{und} \quad \mathbf{C}_f$$

Geod. Monitoring & Network Adjustment

$$\mathbf{u}_{\text{geod}} + \mathbf{v}_{\text{geod}} = \mathbf{N}_E \cdot \mathbf{E}_{\text{geod}} \cdot \hat{\mathbf{u}} \quad \text{and} \quad \mathbf{C}_{u,\text{geod}}$$



PhD TU Graz, 2007

Sensor-Integration

$$\mathbf{l}_{\text{geom}} + \mathbf{v}_{\text{geom}} = \mathbf{l}_{\text{geom}}(\mathbf{N}_E, \mathbf{E}_{\text{geom}}, \hat{\mathbf{u}}) \quad \text{and} \quad \mathbf{C}_{\text{geom}}$$

Local Extensimeters, Strain

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{L} \cdot \mathbf{N}_E \cdot \mathbf{E}_{\text{geom}} \cdot \hat{\mathbf{u}}$$

$$\mathbf{l}_{\text{phys}} + \mathbf{v}_{\text{phys}} = \mathbf{l}_{\text{phys}}(\mathbf{N}_E, \mathbf{E}_{\text{phys}}, \hat{\mathbf{u}}, \hat{\mathbf{p}}_k, \Delta\hat{\mathbf{p}})$$

and $\mathbf{C}_{\text{phys}}$

Local pressure, stress

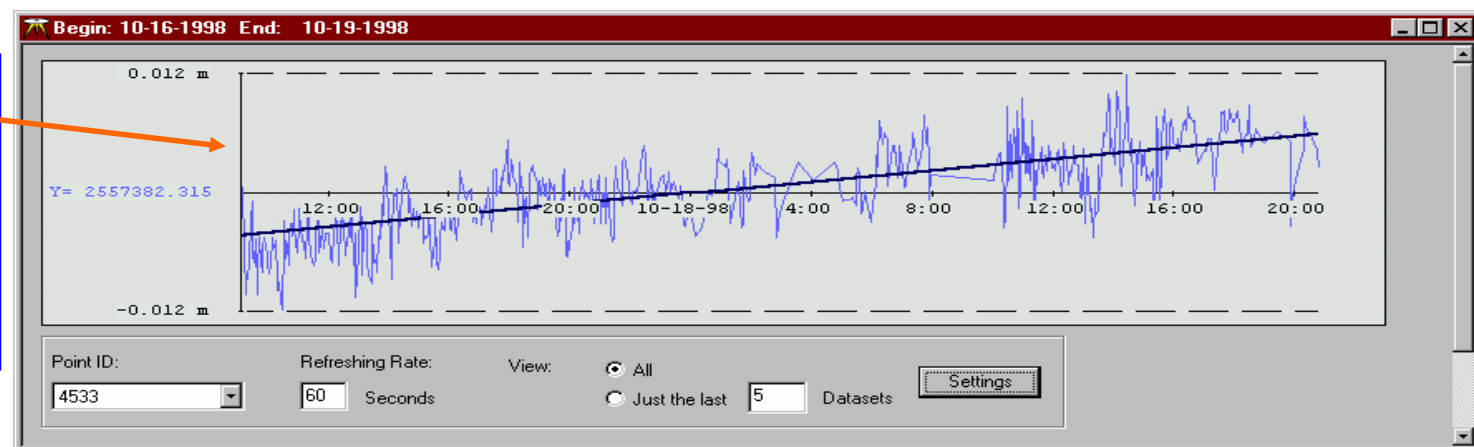
$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}(\mathbf{p}_k) \cdot \mathbf{L} \cdot \mathbf{N}_E \cdot \mathbf{E}_{\text{phys}} \cdot \hat{\mathbf{u}}$$



GOCA- Installationsbeispiel - Kohlehalde



Zeitreihen
Objektpunkt
Koordinaten
 $y = x_o(t)$ bzw.
 $y = u_o(t)$



GOCA-Installation zur Gebäude-Überwachung

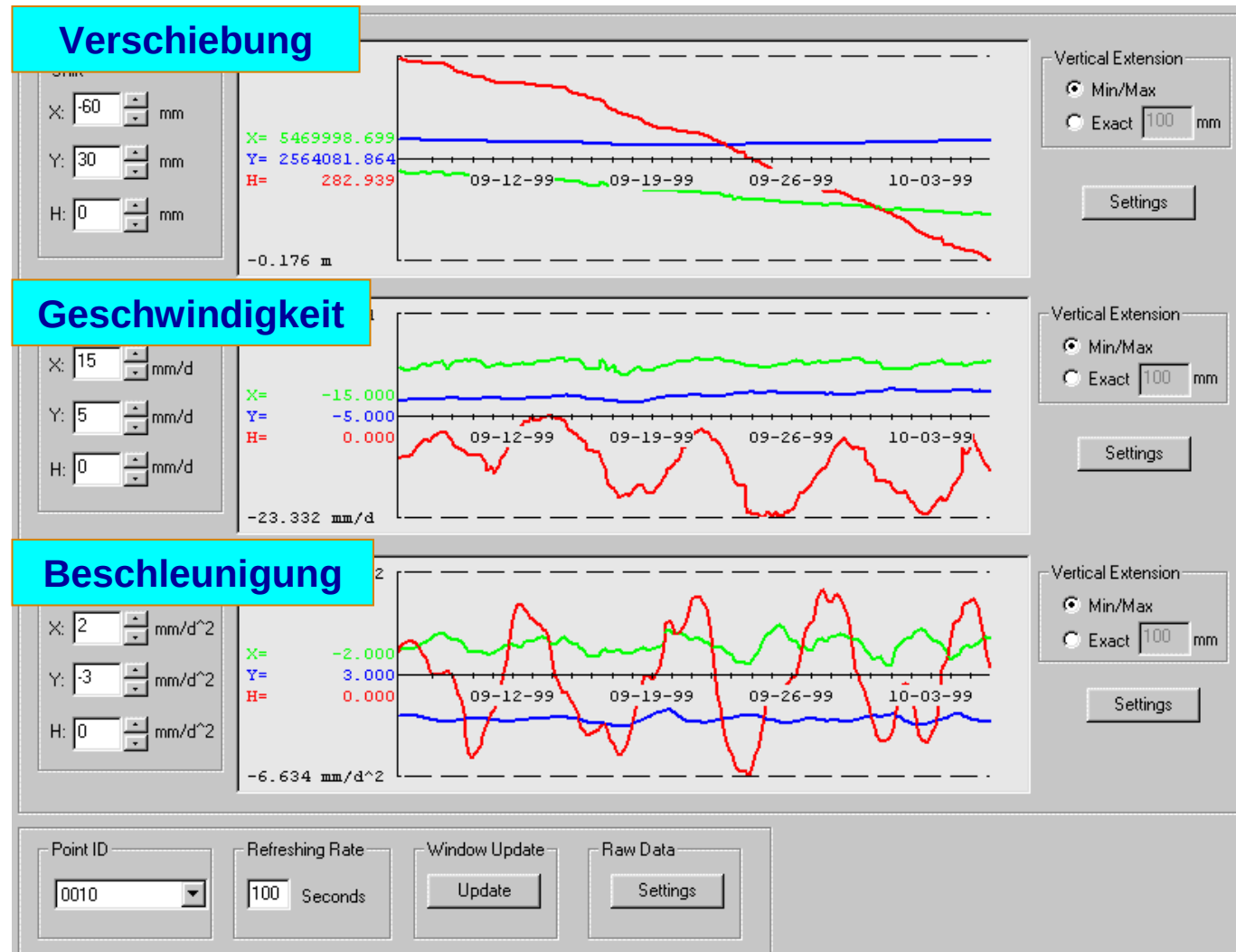


Lohwies-Halle
(Schulgebäude)

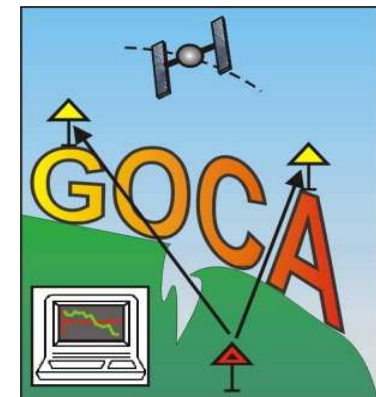
Leica GPS
Sensor auf
dem Dach
der
Lohwies-
Halle



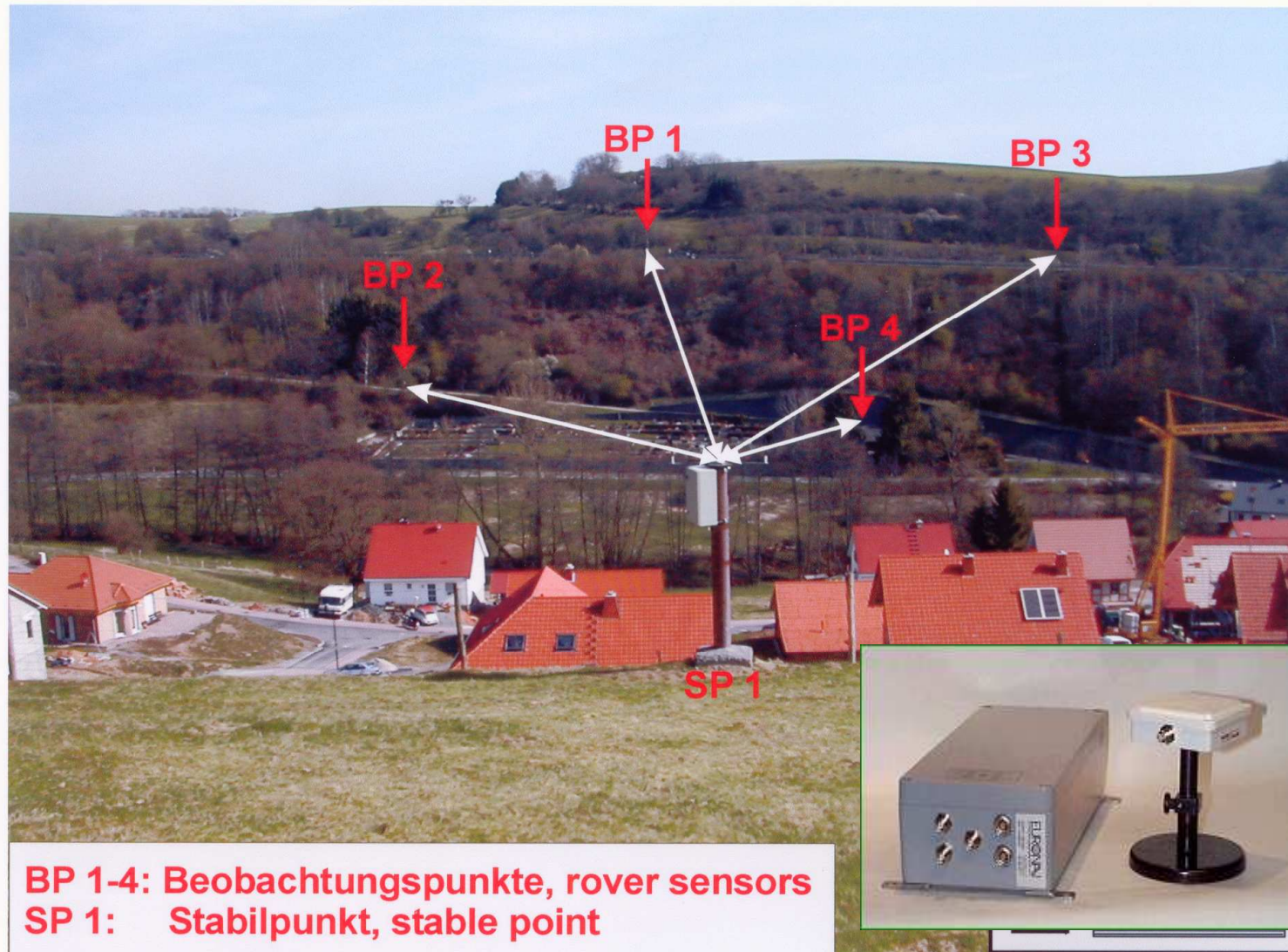
GOCA-Installation zur Gebäude-Überwachung



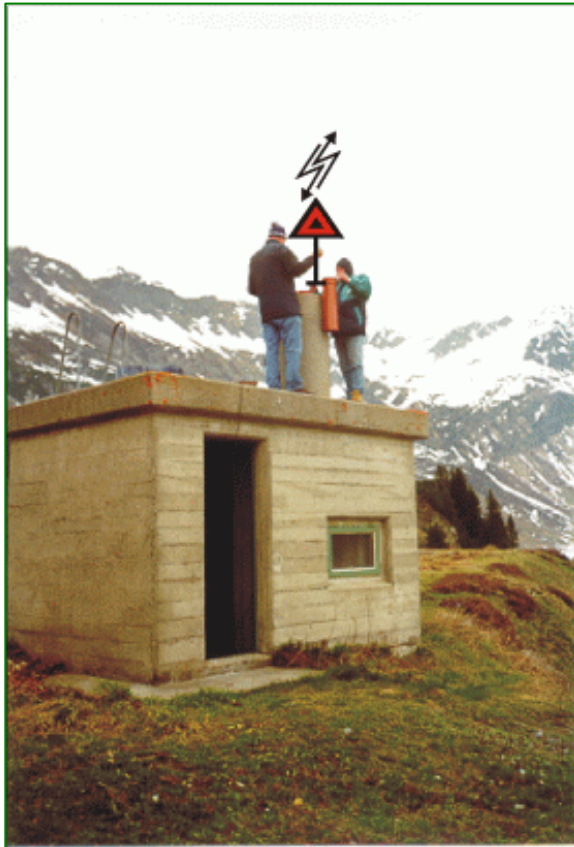
GOCA
Kalmanfilter



GOCA Installationsbeispiel: Autobahn-Rutschung A62



GOCA-Überwachung Kops-Staumauer, Österreich



Installation eines
GPS-Rovers als
stabiler Referenzpunkt



Rot: GPS-Rover als Objektpunkt-1
im Bereich der Mauermitte

Gelb: GPS-Referenzstation als Objektpunkt-2
im künstlichen Widerlager



GOCA-Überwachung Kops-Staumauer, Illwerke, Österreich

*Kops Damm mit GPS-
Beobachtungsdesign*

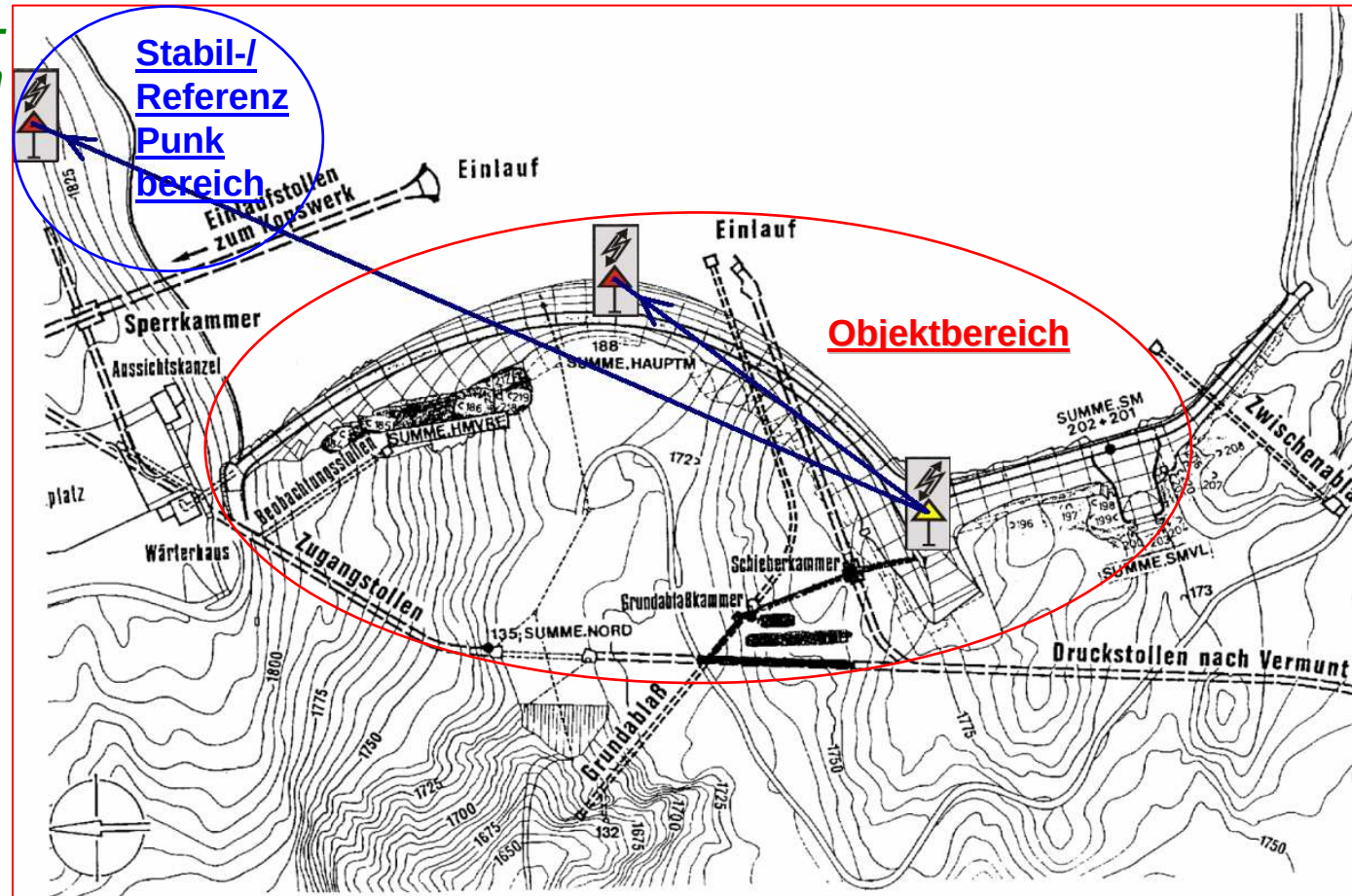
2 Objekt Punkte:

**Dammmitte
(GPS-Rover)**

und

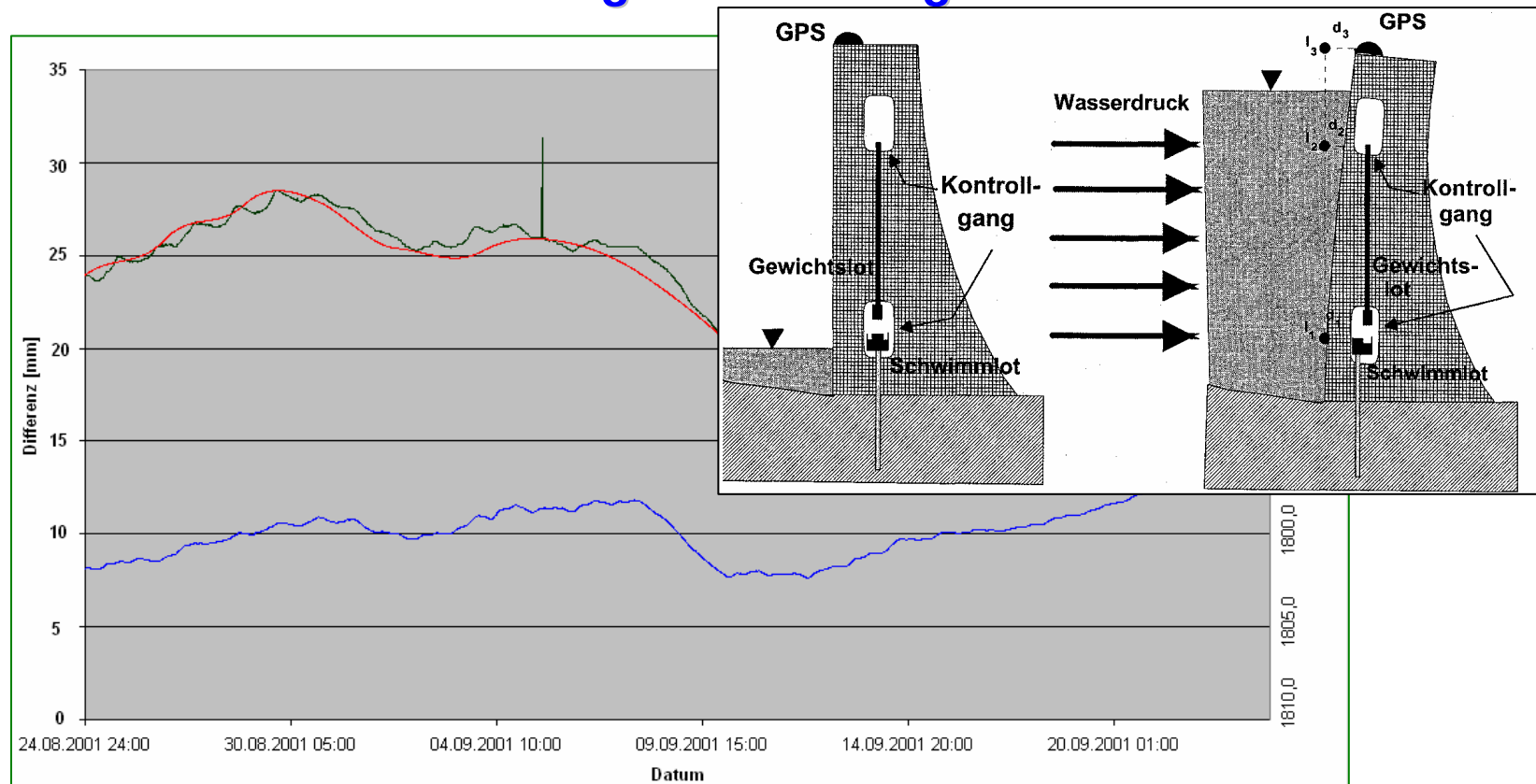
**Künstliches
Widerlager (GPS-
Referenzstation).**

**Stabiler
Referenzpunkt:
(Rover) links auf
einem Bunker.**



GOCA-Überwachung Kops-Staumauer, Illwerke, Österreich

- Auswertung der Messungen -



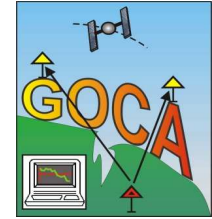
Gegenüberstellung der klassischen Lotungsmessungen und der
GOCA-Auswertung (DGPS-Monitoring). Mauermitte

Übereinstimmung im < 1mm Bereich



Installations-Beispiele - Tagebau

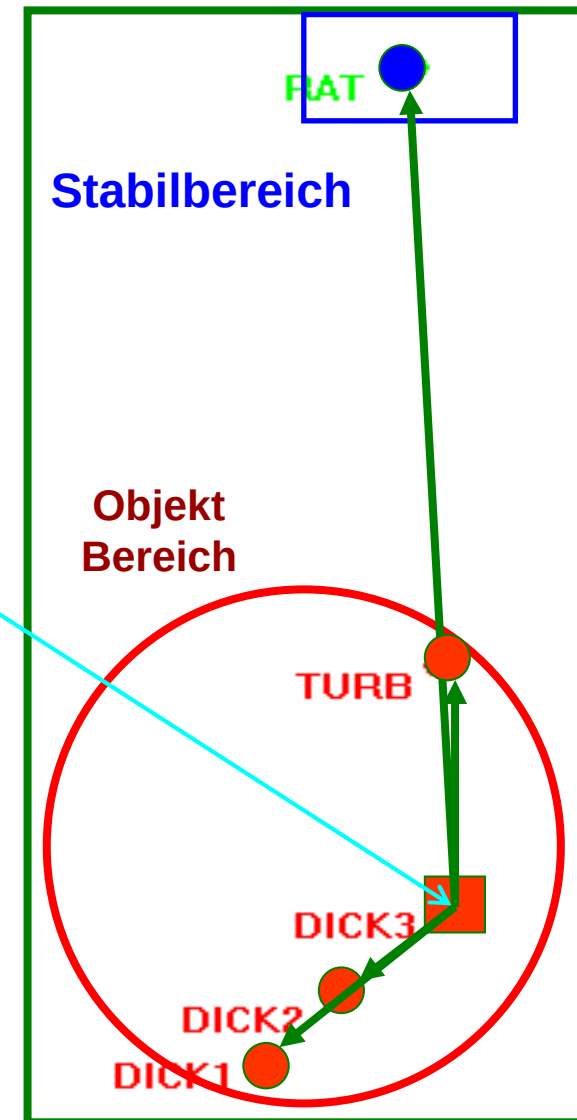
- RWE Rheinbraun (Hambach, Garzweiler, Elsdorf)
- Morila Gold Mines, Mali, Afrika



**Böschungs-Monitoring im
Braunkohle-Tagebau Garzweiler (8 Empfänger)**



GOCA-Installationsbeispiel: Fabrik Elsdorf (RWE)



Installation : Rössing Mines, Namibia, Afrika

1 Rössing Abbaugebiet



2 GOCA-Installation



3



15 GOCA
Receiver



GOCA-Installationsbeispiel - Palabora Kupfer Mine, Süd Afrika (2004)

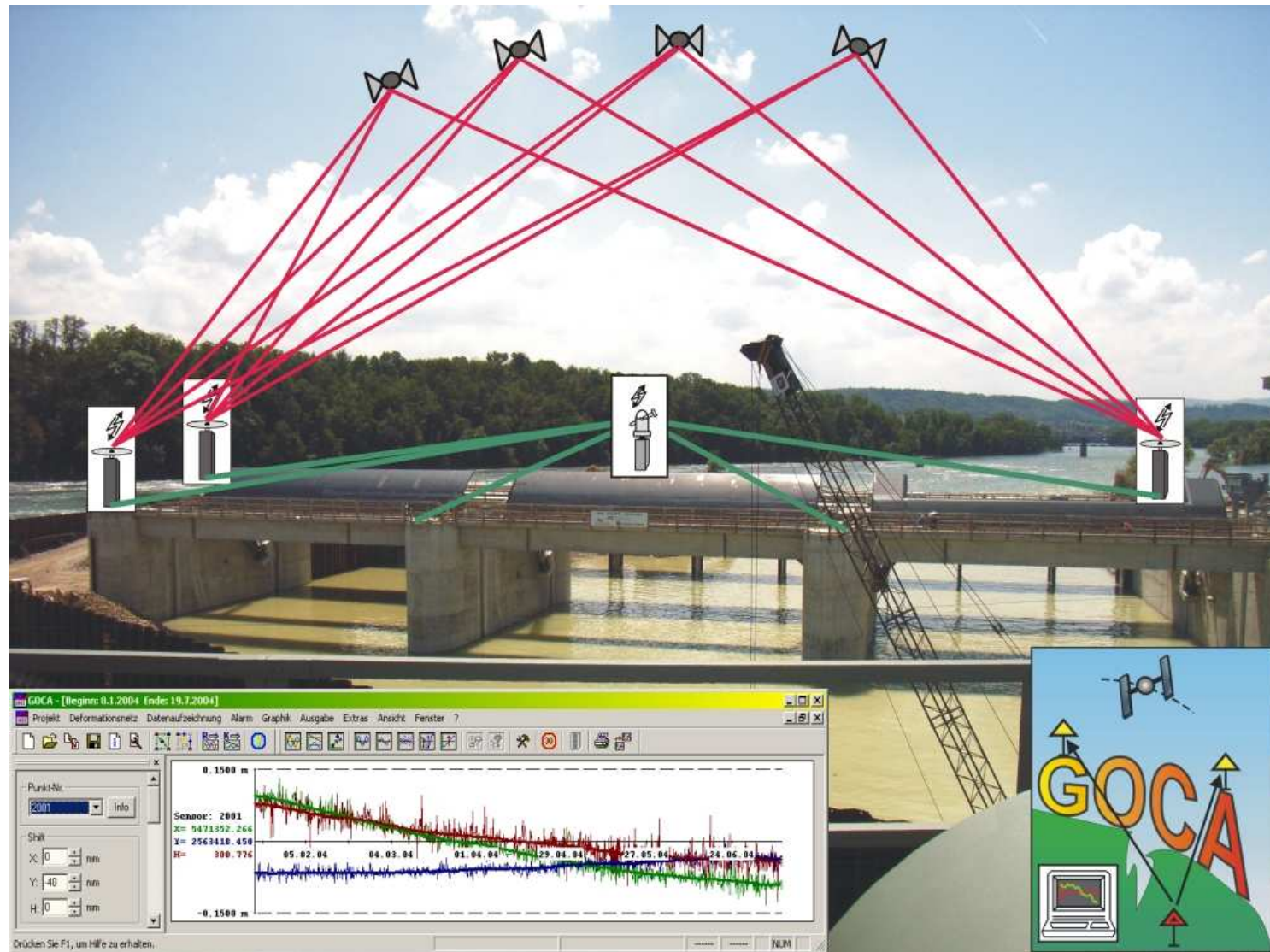


GNSS & LPS

Hybrides
GNSS + LPS

Deformations-
analyse

Wasser
Kraftwerk



Installations - Beispiel: Vattenfall, Europe



Braunkohletagebau
Trimble Receiver (rechts oben)
GOCA-Centre mit GOCA-Software =>



GOCA- Installationsbeispiel apls-EWAS (Early Warning System)

Universität der
Bundeswehr
&
TU München

GOCA-Software
in mehreren
Frühwarnsystemen
Alpen für aktive
Hangrutschungen

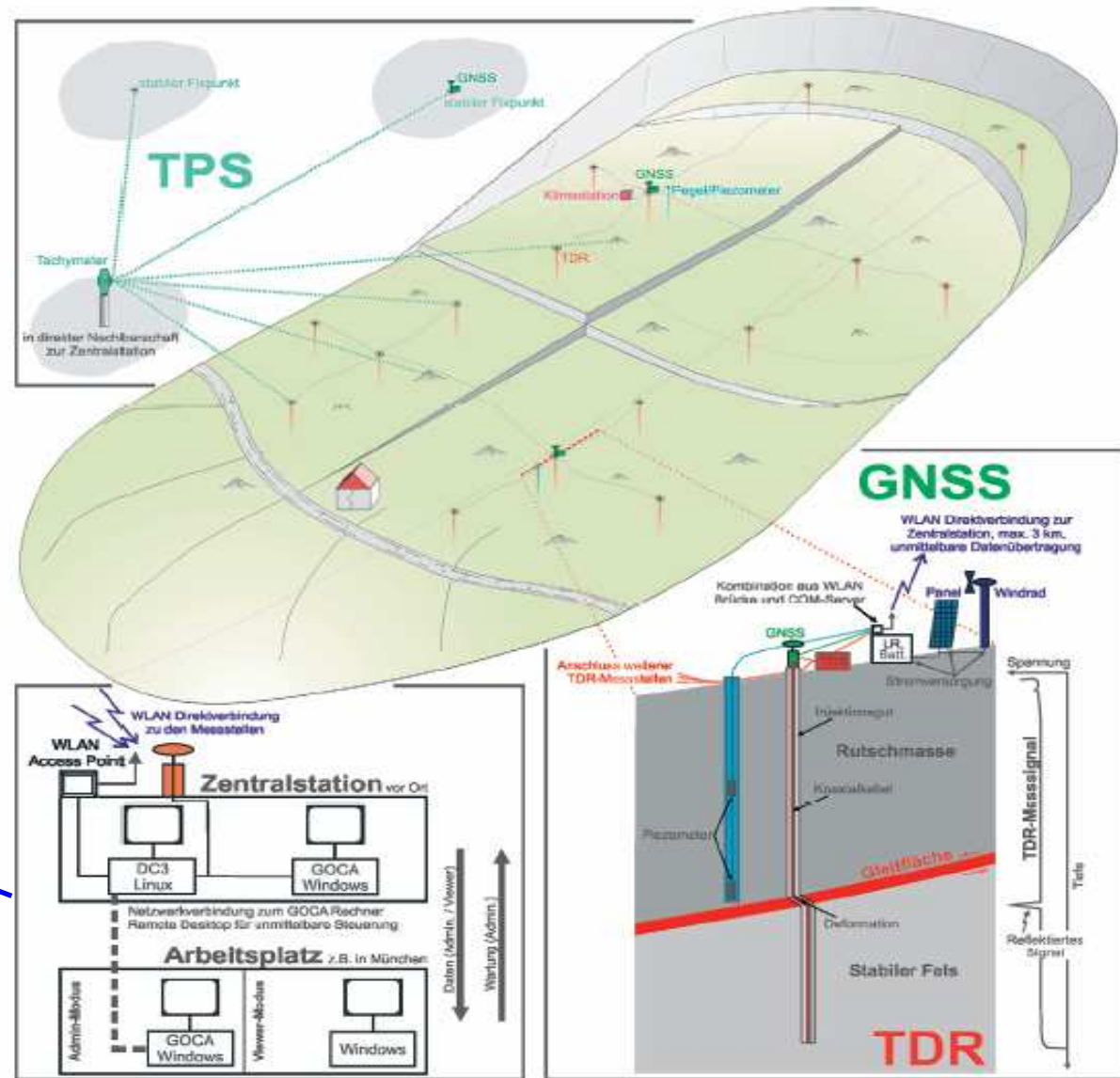
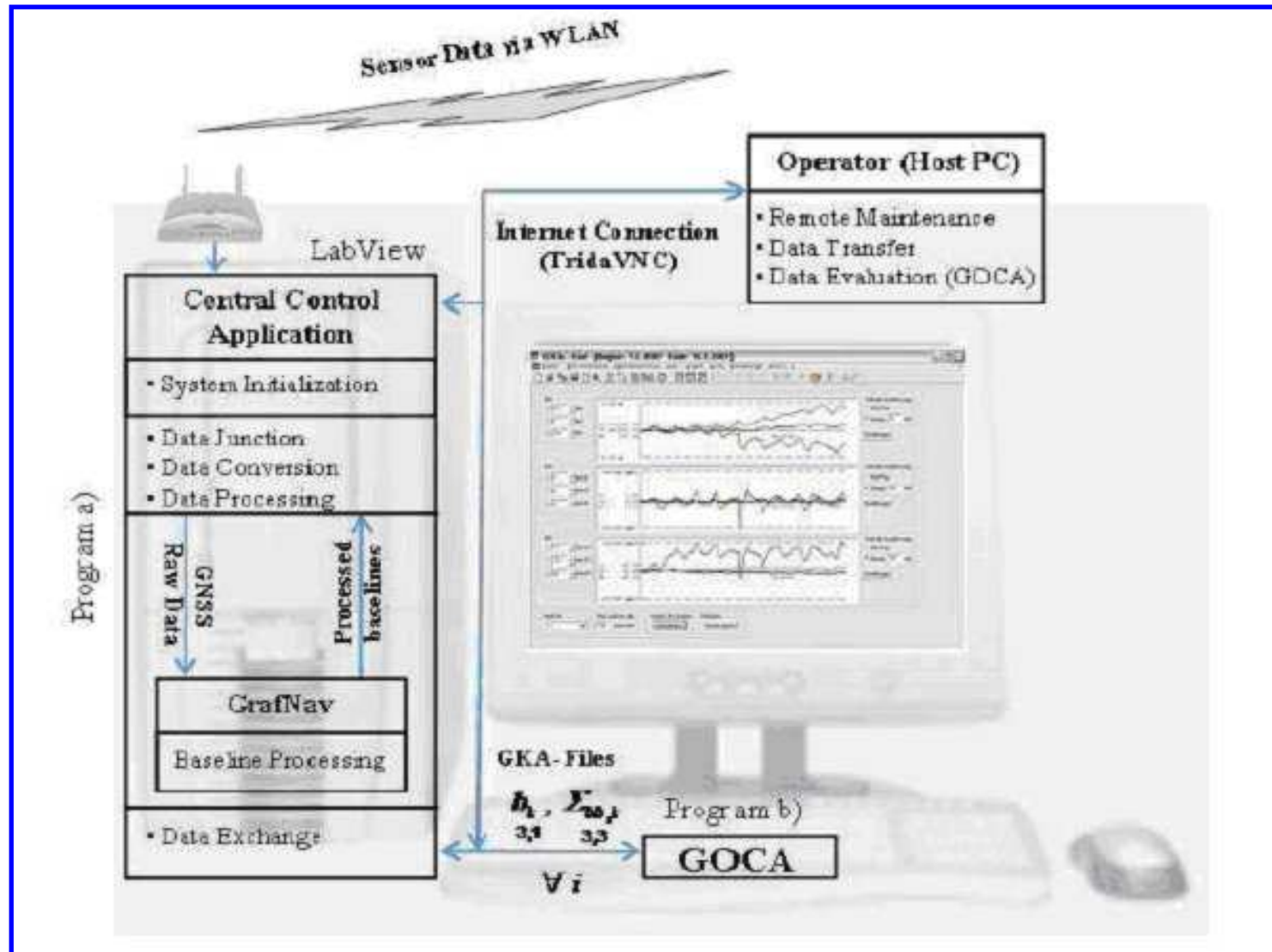


Abb. 4: Integratives Frühwarnsystem (Zeichnung: Singer und Pink)



Aktuelle GOCA-Projekte



Aktuelle GOCA-Projekte



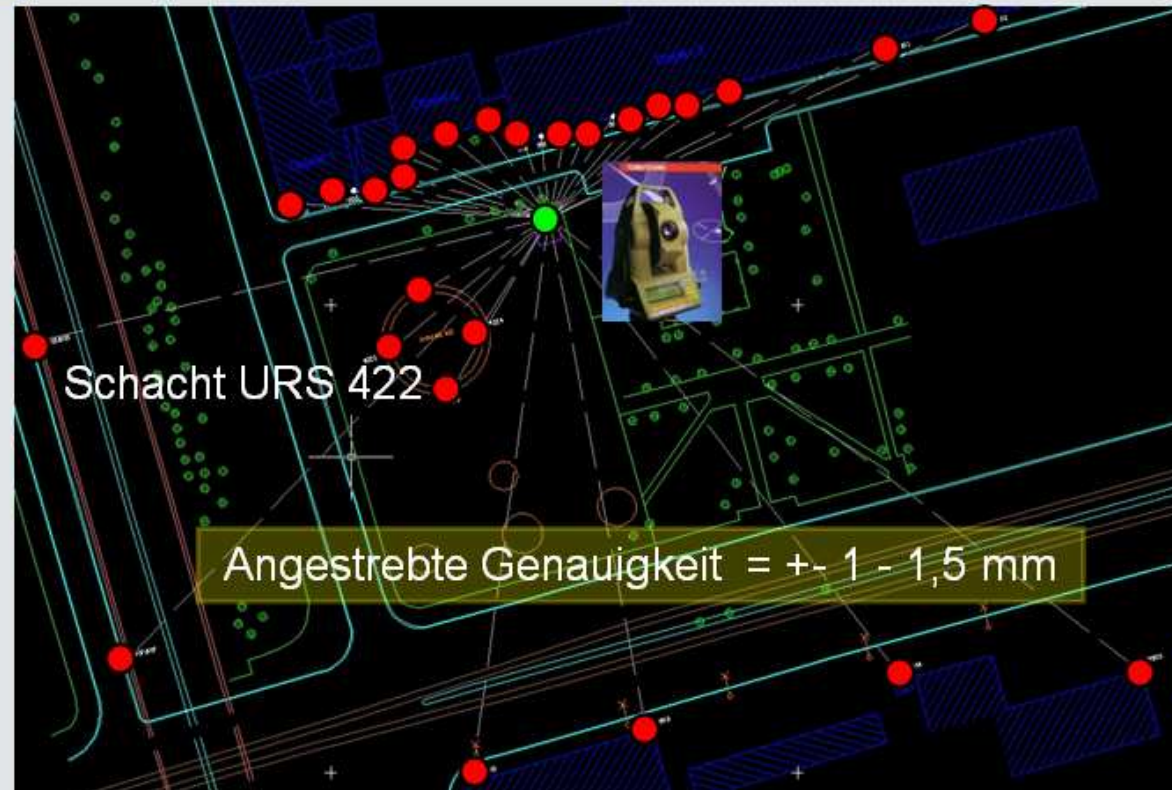
Aktuelle GOCA-Projekte



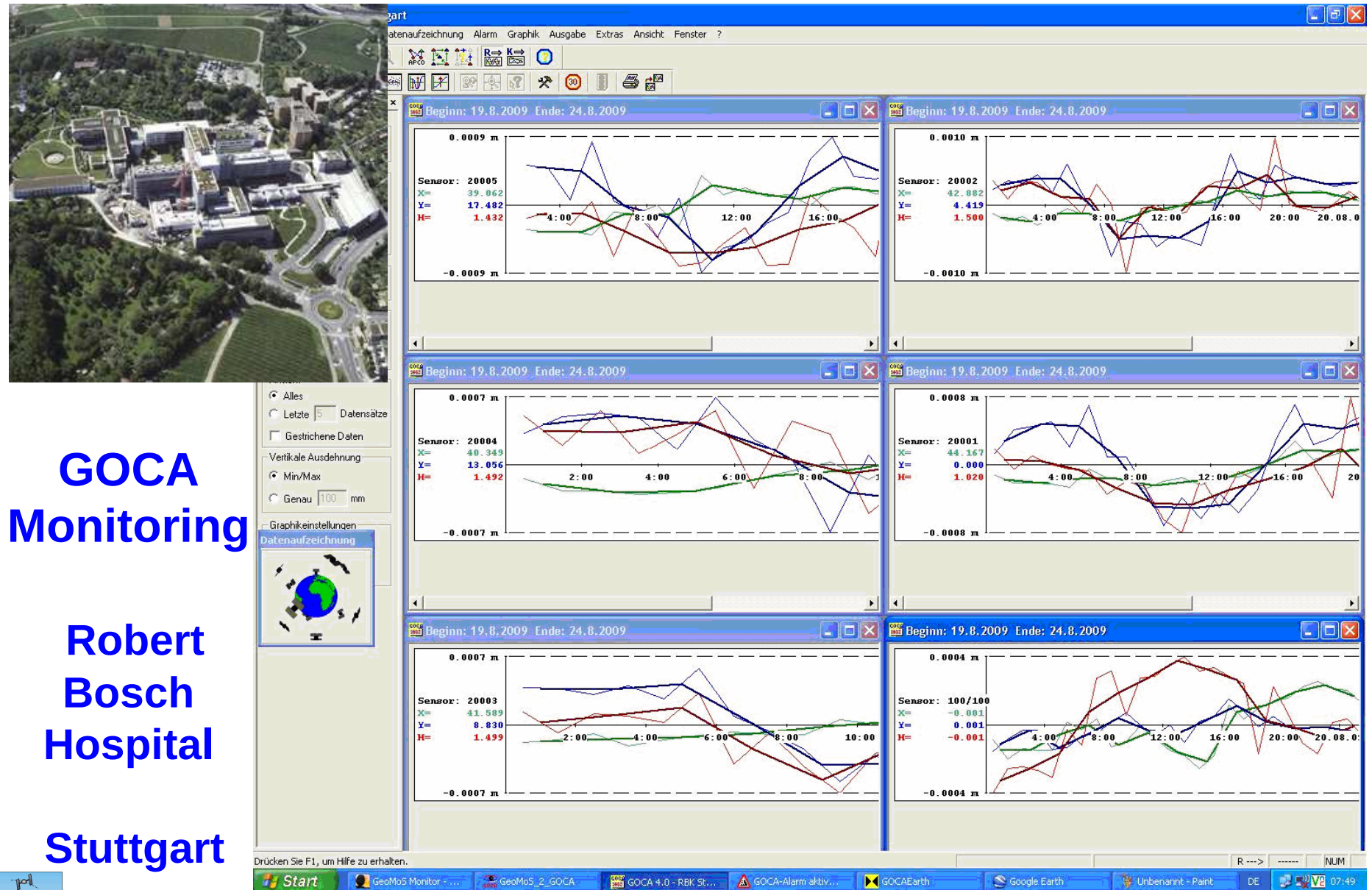
www.vmt-gmbh.de



■ St. Petersburg, Schacht URS 422



Recent GOCA-Projects 2009



**GOCA
Monitoring**

**Robert
Bosch
Hospital**

Stuttgart



VirtualGOCA - Sensordatengenerierung

Auflauf in VirtualGOCA

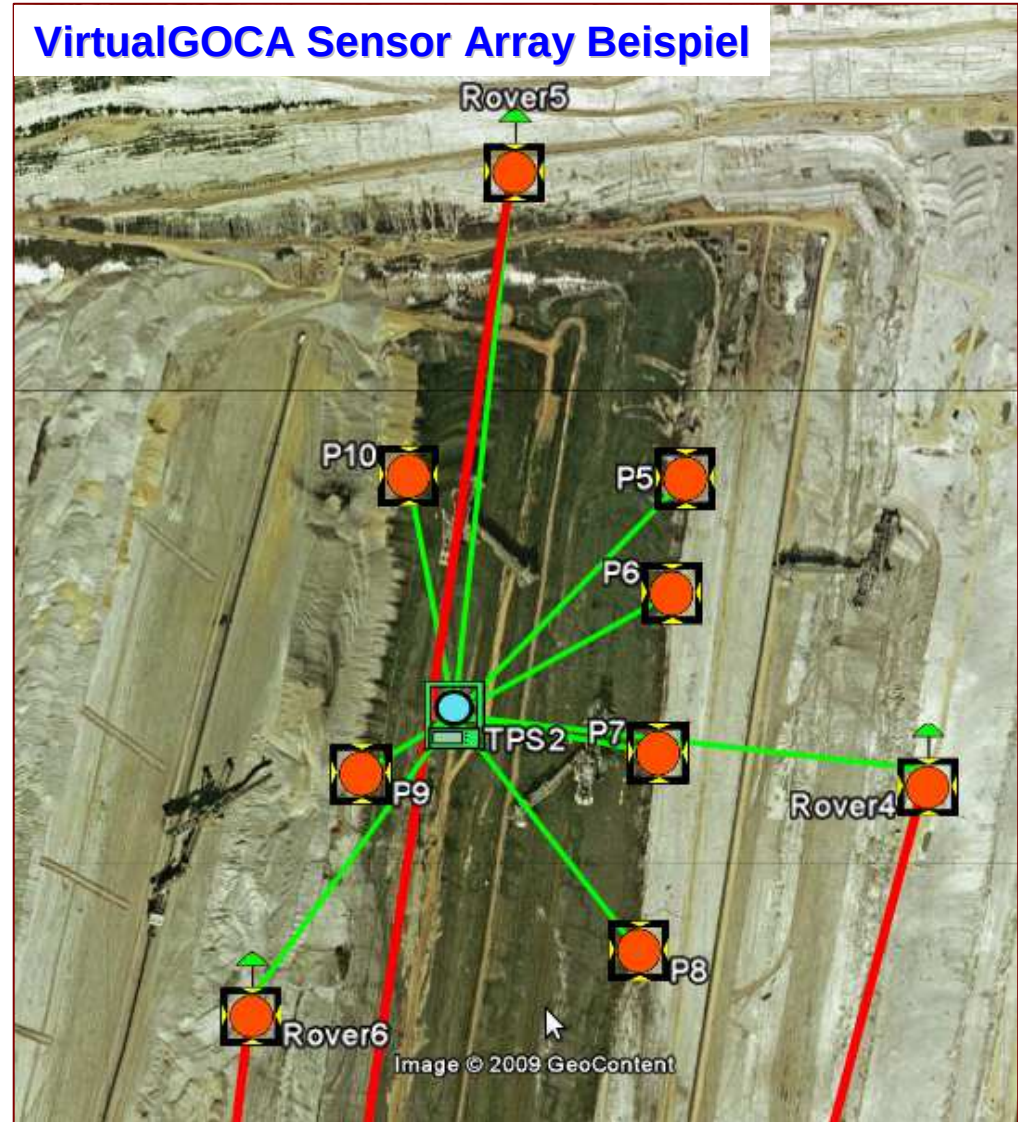
Positionen (B,L) aus
GoogleEarth

Physikalische Höhen H
aus freiem globalen
DGM (ETOPO 5)

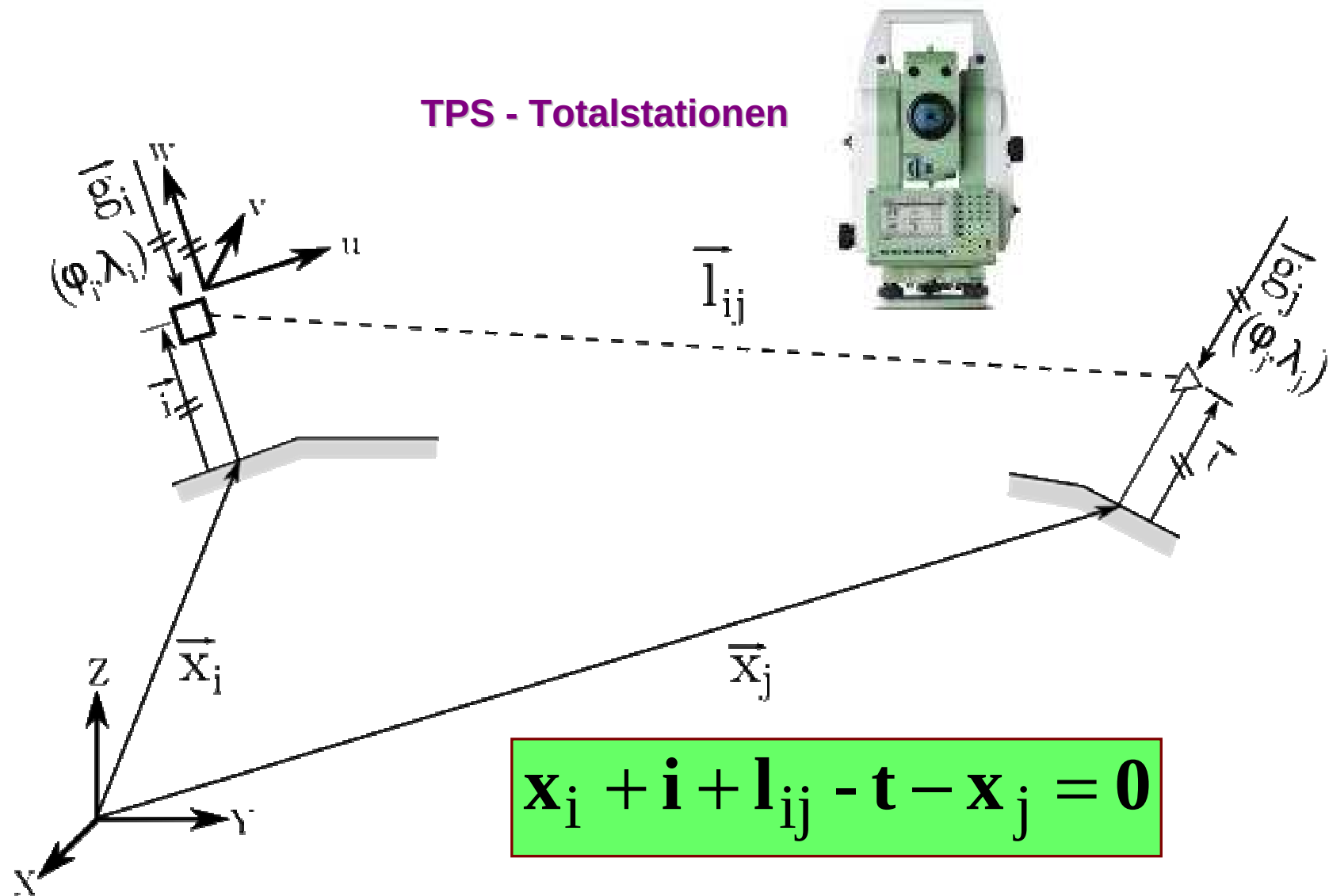
Geoid N aus
freiem Geopotenzialmodell W
(EIGEN05, GfZ Potsdam)

Konsistente Georeferenzierung der
Referenz- und Objektpunkte als
 $(B,L,h=H+N) \longleftrightarrow (X,Y,Z)$

VirtualGOCA Sensor Array Beispiel



VirtualGOCA - Sensordatengenerierung

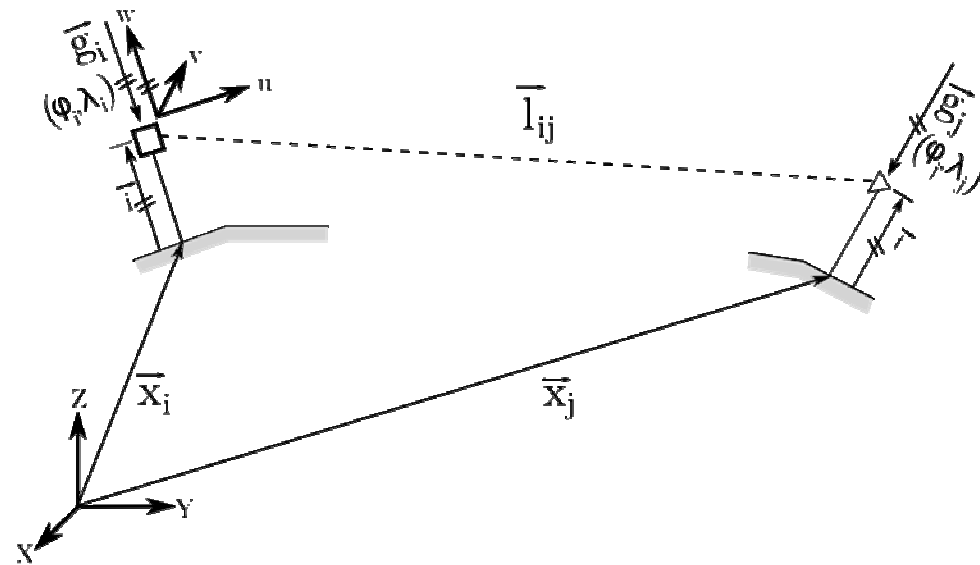


VirtualGOCA - Sensordatengenerierung

TPS - Totalstationen



$$\mathbf{l}_{ij}^{\text{LAV},i} = \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{bmatrix}_{ij}^{\text{LAV},i}$$



$$\mathbf{x}_i + \mathbf{i} + \mathbf{l}_{ij} - \mathbf{t} - \mathbf{x}_j = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{l}_{ij}^{\text{LAV},i} = \mathbf{D}_i(\phi_i, \lambda_i) \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{ij}^{\text{ECEF}} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -i \end{bmatrix}^{\text{LAV},i} + \mathbf{D}_i(\phi_i, \lambda_i) \cdot \mathbf{D}_j(\phi_j, \lambda_j)^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ t \end{bmatrix}^{\text{LAV},j}$$



VirtualGOCA - Sensordatengenerierung

$$\mathbf{l}_{ij}^{\text{LAV},i} = \mathbf{D}_i(\varphi_i, \lambda_i) \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{ij}^{\text{ECEF}} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -i \end{bmatrix}^{\text{LAV},i} + \mathbf{D}_i(\varphi_i, \lambda_i) \cdot \mathbf{D}_j(\varphi_j, \lambda_j)^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ t \end{bmatrix}^{\text{LAV},j}$$

$$\mathbf{l}_{ij}^{\text{LAV},i} = \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{bmatrix}_{ij}^{\text{LAV},i}$$



TPS
Total-
stationen

$$s_{ij} = \sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2 + \Delta w^2}$$

Strecke

$$r_{ij} = \arctan\left(\frac{\Delta v}{\Delta u}\right) - o_i$$

Richtung

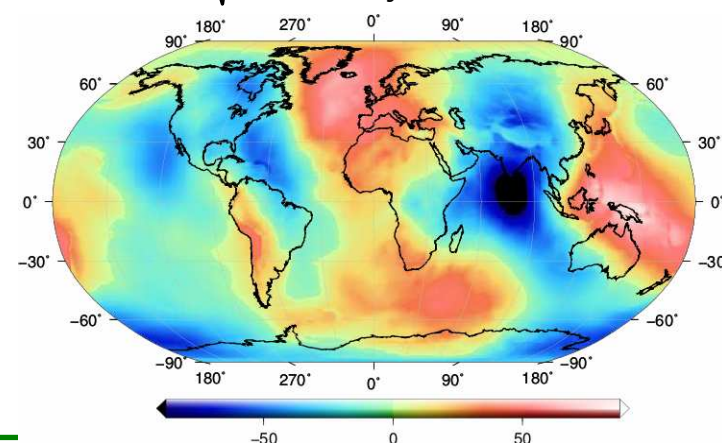
$$z_{ij} = \arctan\left(\frac{\sqrt{\Delta u^2 + \Delta v^2}}{-\Delta w}\right) - \frac{s_{ij}}{2R} \cdot k$$

Zenitdistanz

$$\mathbf{D}_e^{\text{LAV}} = \begin{bmatrix} -\cos \lambda \cdot \sin \varphi & -\sin \lambda \cdot \sin \varphi & \cos \varphi \\ -\sin \lambda & +\cos \lambda & 0 \\ \cos \lambda \cdot \cos \varphi & \sin \lambda \cdot \cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix}$$

Geopotenzial-Modell W (C_{nm}; S_{nm})

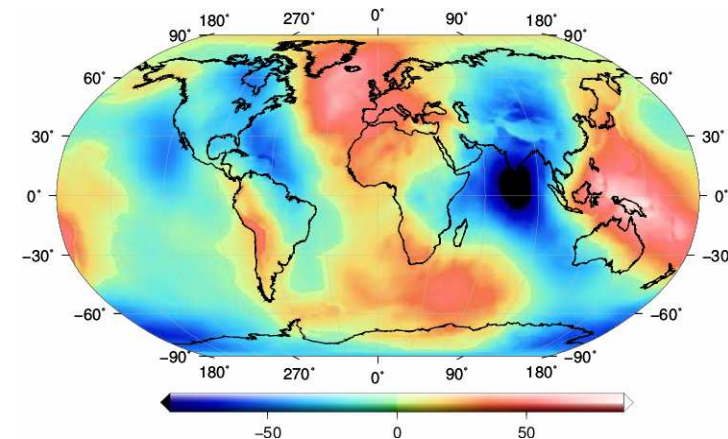
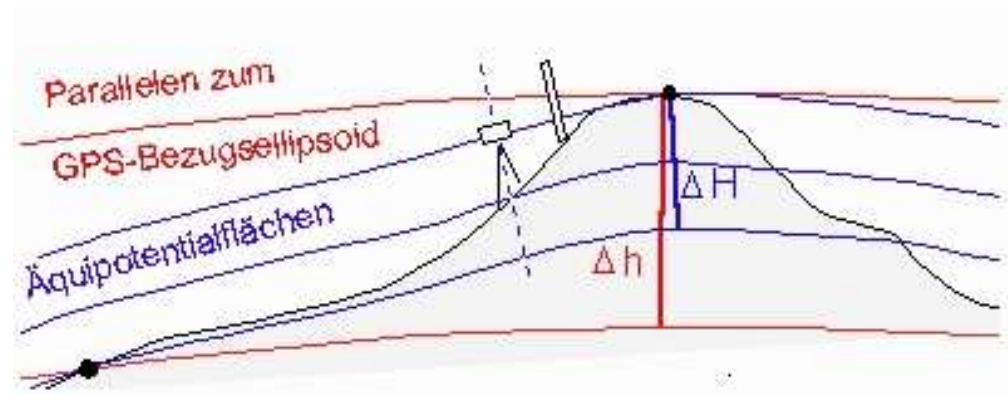
$$\varphi = \arctan \frac{-W_z}{\sqrt{W_x^2 + W_y^2}} \quad \lambda = \arctan\left(\frac{W_y}{W_x}\right)$$



VirtualGOCA - Sensordatengenerierung



Schlauchwaagen
und
Nivelliere



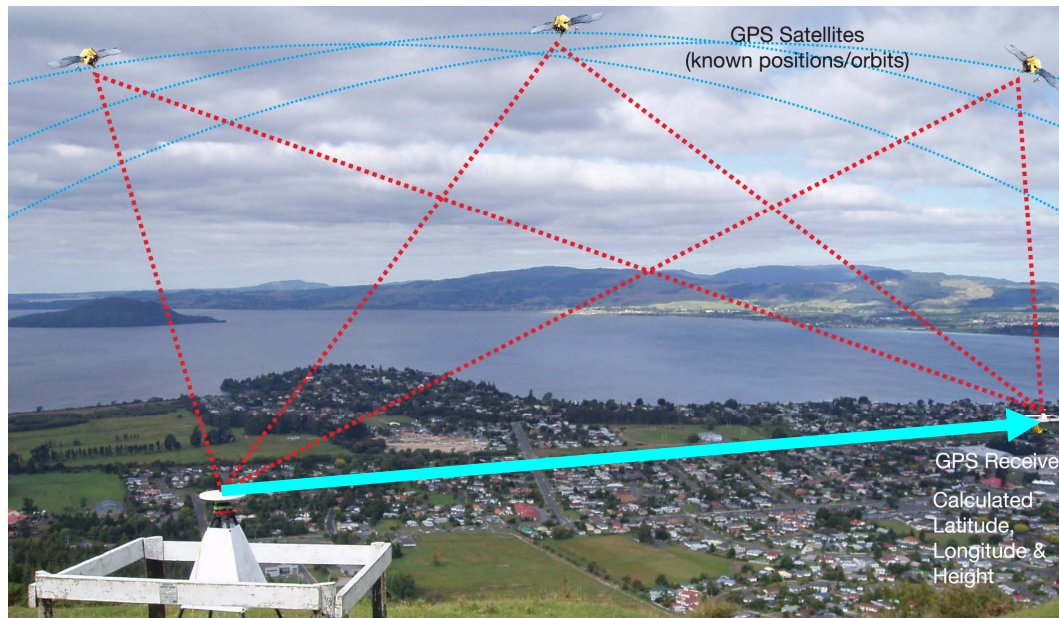
Geopotenzial-Modell W (C_{nm} ; S_{nm})

$$\Delta H_{ij} = H_j - H_i = (h_j - N_j) - (h_i - N_i) = (h_j - \left(\frac{(W - U)_P}{\gamma_Q} \right)_j) - (h_i - \left(\frac{(W - U)_P}{\gamma_Q} \right)_i)$$

Quasigeoid-Theorie von Molodenski



VirtualGOCA - Sensordatengenerierung



GNSS-Baselines

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \mathbf{x}_{Rover} - \mathbf{x}_{Base}$$

**Stochastisches
Modell – Kovarianz-
Matrix der
Baselinevektoren $\mathbf{b}$**

$$\mathbf{C}_b = \mathbf{F} \cdot \begin{pmatrix} (\sigma_N / (M + h))^2 & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_E / ((N + h) \cdot \cos B))^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_h^2 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{F}^T$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} -(M + h) \cdot \sin B \cdot \cos L & -(N + h) \cdot \cos B \cdot \sin L & \cos B \cdot \cos L \\ -(M + h) \cdot \sin B \cdot \sin L & (N + h) \cdot \cos B \cdot \cos L & \cos B \cdot \sin L \\ (M + h) \cdot \cos B & 0 & \sin B \end{bmatrix}$$



VirtualGOCA - Sensordatengenerierung

Virtual GOCA-Software Beispiel

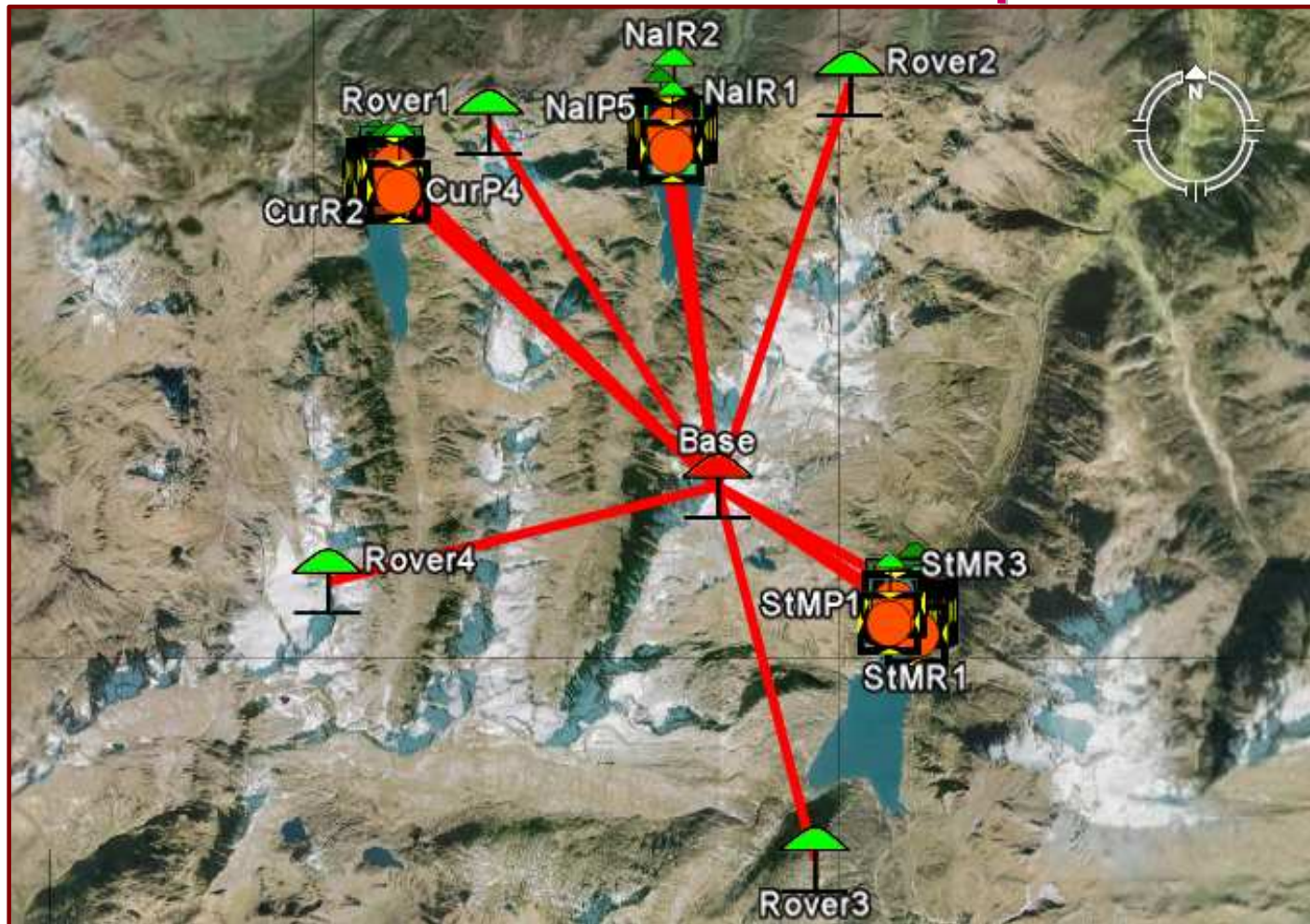
The screenshot displays the VirtualGOCA software window, which is organized into several functional sections:

- Daten (Data):**
 - Neues Projekt (New Project):** Includes a 'Region' dropdown menu set to 'Deutschland', a 'kml laden' button, and a 'Netzknoten erzeugen' button.
 - Bestehendes Projekt (Existing Project):** Features a 'Projekt laden' button and an empty text input field.
 - Netzkonfiguration (Network Configuration):** Contains a 'Konfiguration' button.
 - GKA speichern in... (GKA save in...):** Includes a 'Projektverzeichnis' button.
- Simulation:**
 - Beobachtungsmodus (Observation Mode):** Offers radio buttons for 'Echtzeit' (selected) and 'Zeitspanne'.
 - Messintervall (Measurement Interval):** Offers radio buttons for 'automatisch' (selected) and 'benutzerdefiniert'.
 - Genauigkeiten / Fehler (Precision / Errors):** Includes an 'Einstellungen' button.
 - Modellauswahl (Model Selection):** Features a dropdown menu currently set to 'kein Modell'.
- Status:**
 - Info:** A large empty text area for status information.
 - GMT:** Displays the current date and time as 'Tue Jan 12 15:38:46 2010'.
- System:**
 - Sprache (Language):** A dropdown menu set to 'Deutsch'.
 - Buttons:** 'Beenden' (End) and 'OK' buttons are located at the bottom right.



VirtualGOCA - Sensordatengenerierung

Virtual GOCA-Software Beispiel



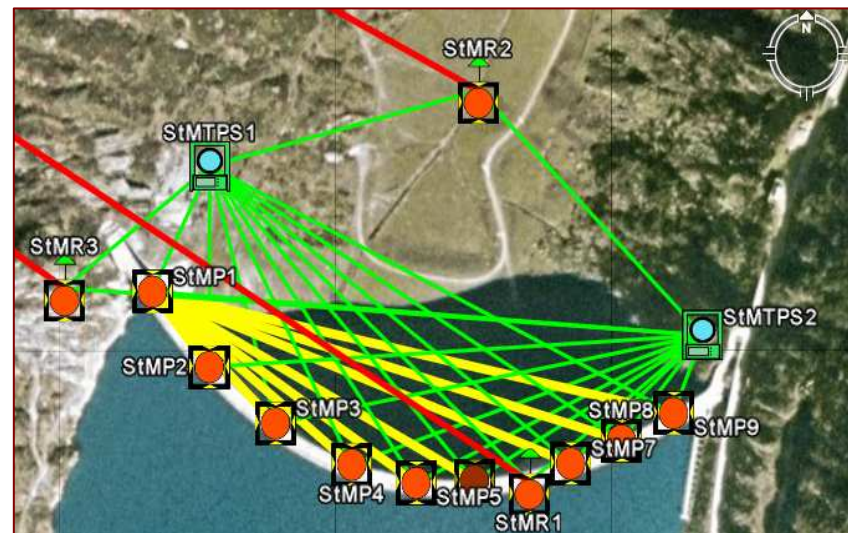
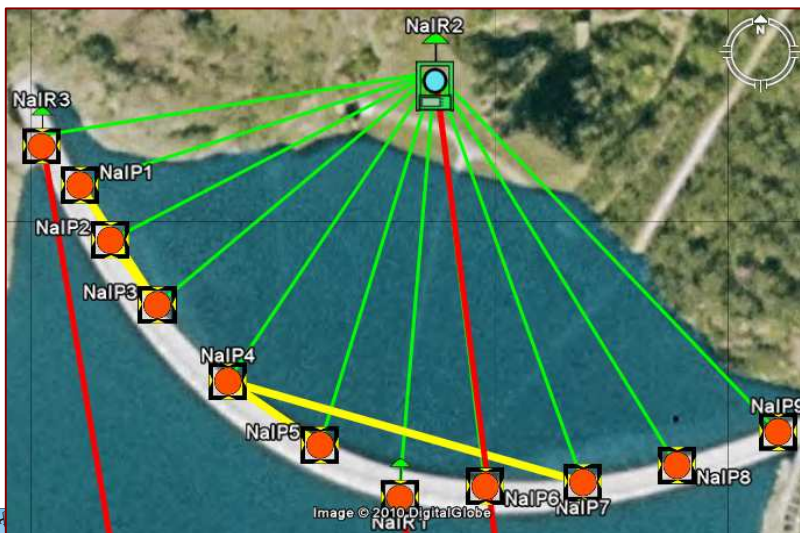
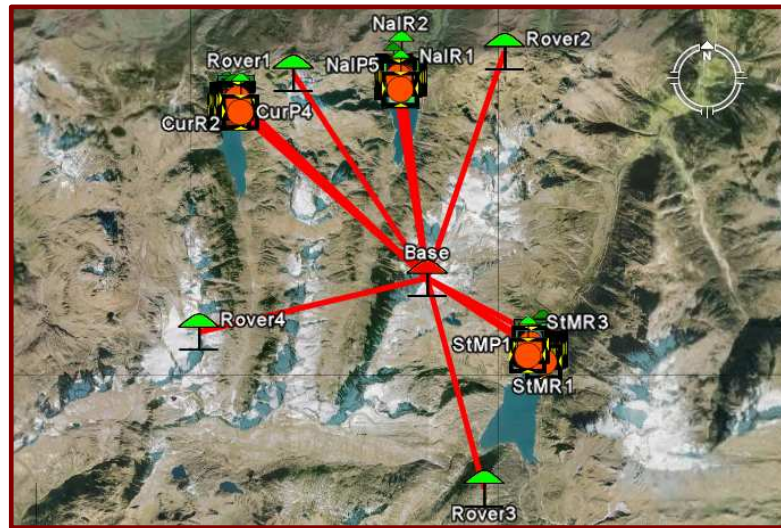
GNSS/LPS Geomonitoringnetz „Gotthard-Massiv“

mit den Stauseen Curnera (links), Nalps (oben) und Santa Maria (rechts)

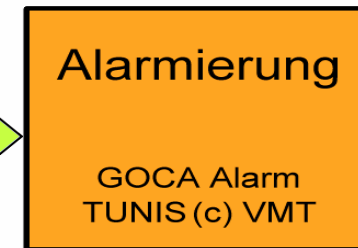
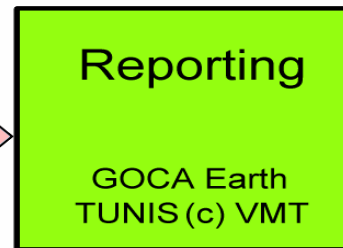
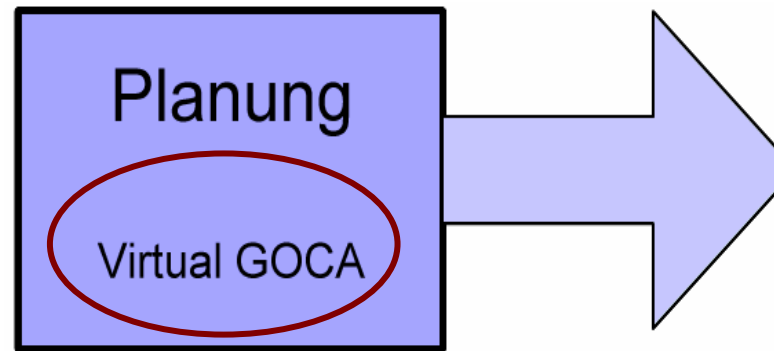
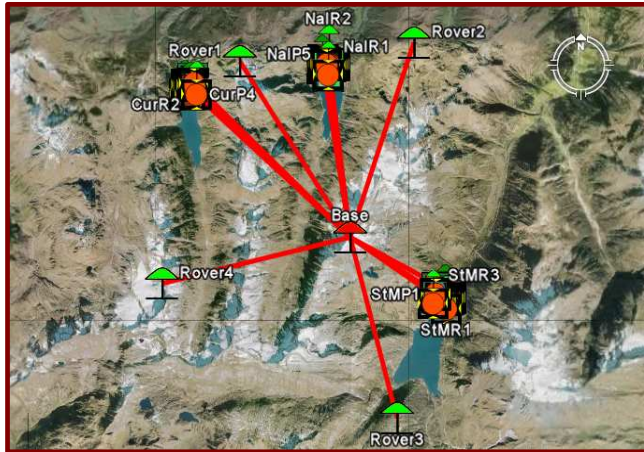


VirtualGOCA - Sensordatengenerierung

Virtual GOCA-Software Beispiel - Sensordesign



Geo-Monitoring Kette



• Modellierung

Zustandsparametrisierung
mittels Sensordaten:
- Koordinaten
- Verschiebungen
- Schadensparameter

• Reporting

Numerische Protokolle
Graphiken
Web-GIS

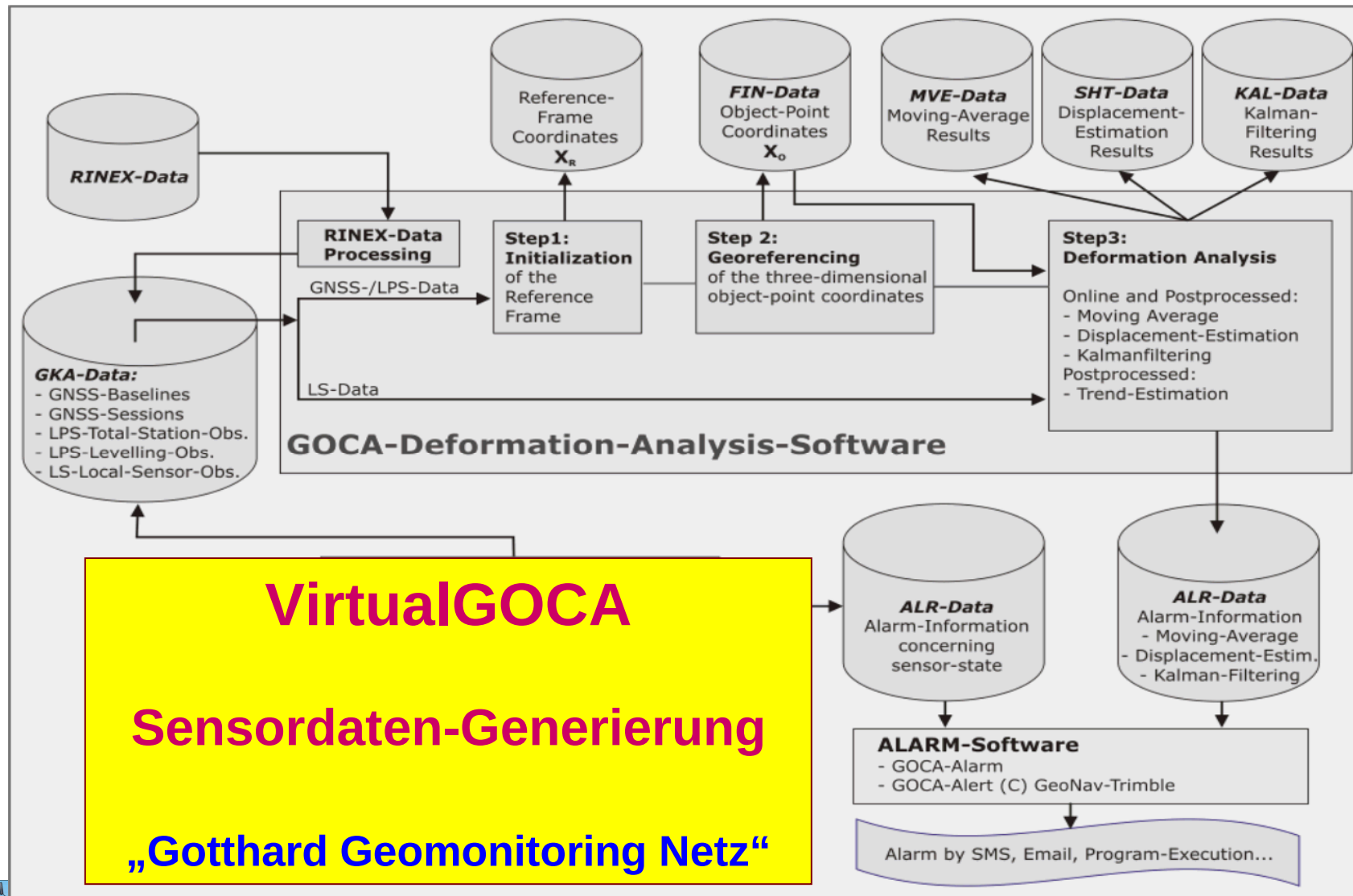
• Reaktion / Alarm- Management

Kritische Zustände
Vorhersagen
Sensoren



VirtualGOCA – Prozesskette

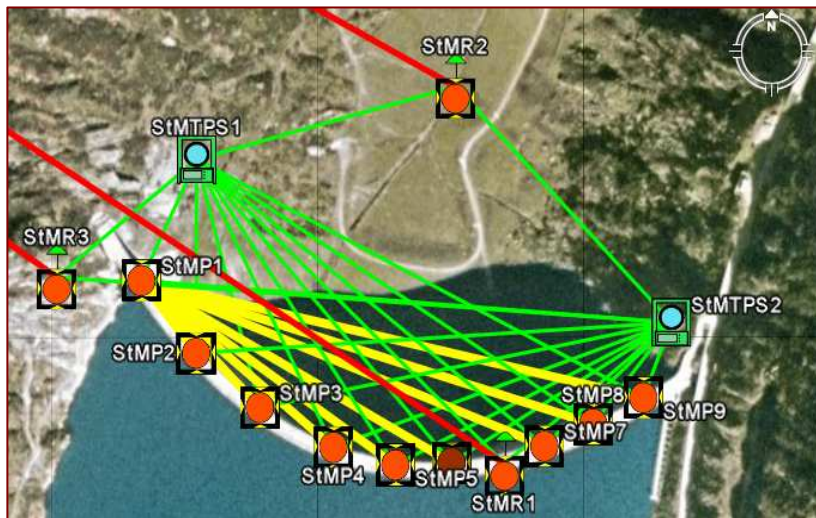
- „Proof of Concept“ für Geomonitoringkonzept „Gotthard Massiv“
- Anwendung der Software GOCA zur Datenmodellierung



VirtualGOCA – Prozesskette

- „Proof of Concept“ für Geomonitoringkonzept – „Gotthard Geomonitoring Netz“

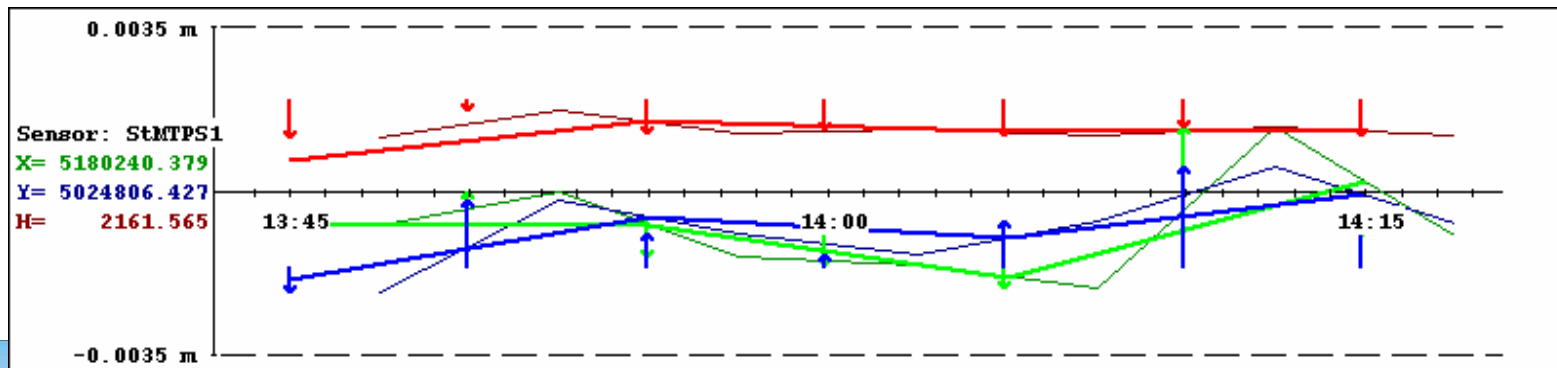
Anwendung der Software GOCA zur Datenmodellierung
(Netzausgleichung → Objektpunktkoordinaten + Deformationsanalyse)



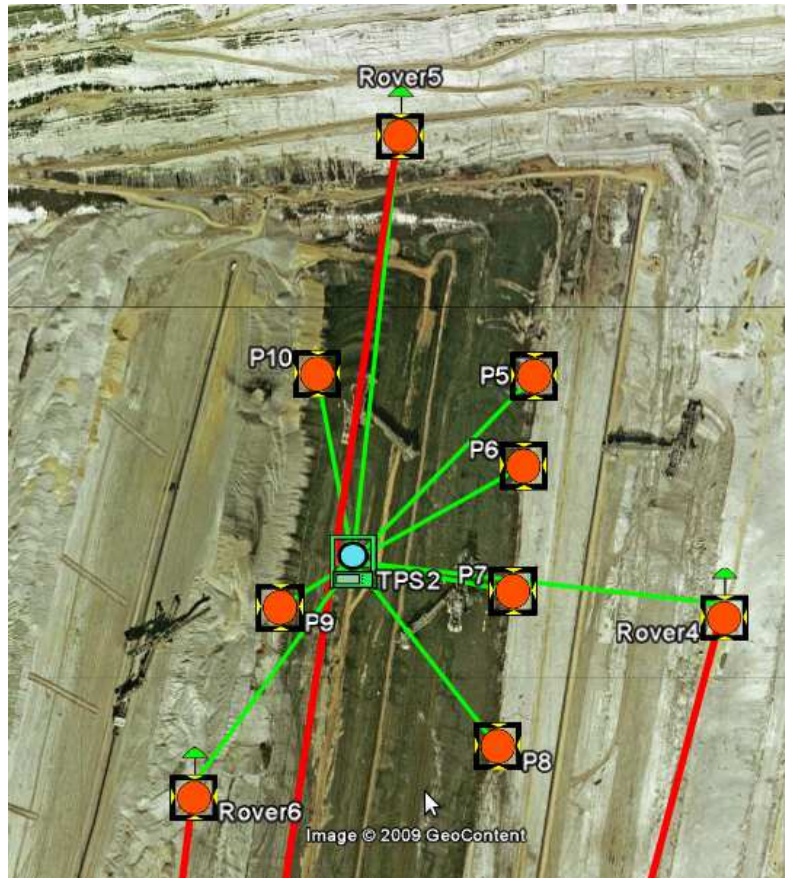
Modellierung (Schritt 2 der Kette)
mit GOCA-Software (www.goca.info)

Fortlaufende Objektpunkt-Zeitreihen
GOCA-Ausgleichungsstufe 2
Netzausgleichungs-basierte
Georeferenzierung der Objektpunkte
im Referenznetz der Stabilpunkte)

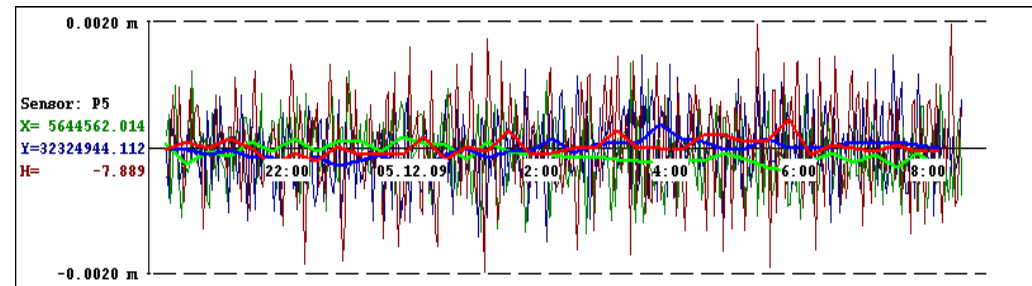
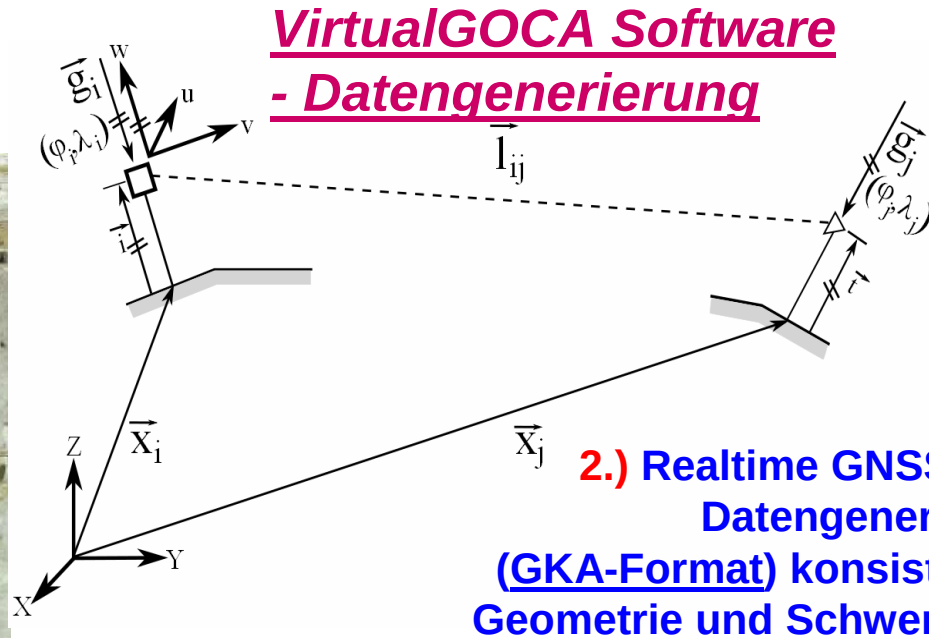
GOCA-Verschiebungsschätzung (Stufe 3)



Zusammenfassung



1.) Virtual Monitoring Array:
Datengenerierung und Visualisierung
in GoogleEarth®



3.) GKA- Datenprozessierung & Analyse (mit
GOCA): - Array Design Planung, Genauigkeits- &
Sensitivitätsanalyse! -A priori Qualitätszusicherung
für GeoMonitoring-Konzepte und Arrays. - „Proof of
Concept“. - Effiziente Entwicklung von Monitoring-
Software & Evaluierung („TÜV“)! - SW Benchmark-
test! - Keine Kosten für Physikalische Array-
Tests....



Zusammenfassung

• GOCA-System

- Voll operables Online- Monitoring-System für GNSS, LPS und lokale Sensoren (LS).
- Großer Nutzerkreis (Hänge, Bergbau, Dämme, Gebäude, Naturkatastrophen, FuE ...).
- Keine Beschränkung in Anzahl und Type der GPS/GNSS-Empfänger, LPS, Nivelliere, etc.
- Keine Einschränkung im Netzdesign, z.B. GNSS-Referenzstation oder Totalstation im Objektbereich

• GOCA-Software

- Klassisches Deformationsnetz GNSS, LPS and LS (lokale Sensoren) mit allen Standards - ONLINE
- Projektbezogenes Datenmanagement (Online, Nearonline, Postprocessing)
- Permanentes Array (Online, NearOnline) oder herkömmliches Epochen-Design (Postprocessing).
- GNSS Nearonline-Processing-DLL (LGO, WaSoft, B. S. etc.) für GOCA und GOCA_MONIKA.
- Strenge Statistische Konzepte bezüglich Netzausgleichung und Deformationsanalyse.
- Fehler-Elimination durch L2- und L1-Norm - ONLINE (... und Postprocessing)
- ONLINE - Gleitender Mittelwert (MVE-Schnittstelle)
- ONLINE – Verschiebungsschätzung (SHT-Schnittstelle)
- ONLINE - Kalmanfilter für Verschiebungen – Geschwindigkeit – Beschleunigung (KAL-Schnittstelle)
- ONLINE - Alarm Funktion („GOCA_Alarm“.ALR-Dateischnittstelle)
- Offene Input GNSS / LPS /LS Datenschnittstelle (GKA)
- Offene Output Datenschnittstelle der 3D Objekt-Punktpositions-Zeitreihen (MWV,FIN,KAL)

• Verwendung der GOCA-Zeitreihen in anderer Software, z.B. FEM System-Analyse-Modelle (Anwendung und Forschung)



Zusammenfassung

- Jüngere GOCA-Fortentwicklungen in Praktika im „Labor für GNSS und Navigation“ sowie in Abschlussarbeiten (Diplomarbeiten, BSc/MSc Thesis)
 - „GOCA_Alarm“: Alarmierungssoftware für Deformationszustandsschätzungen in GOCA Stufe 3 sowie für Hardwareprobleme. Schnittstelle zur GOCA-Alarmdateien (ALR). Alarmierung über SMS, Email etc. sowie über Relaisschaltungen (Sirene, Blinklicht). Praxissemesterarbeit 2008.
 - „GOCA_Kalmanfilter“: Verbesserungen und essentielle Erweiterungen in der Kalmanfilter-Modellbildung sowie in der GOCA-Kalmanfilter-Software.
 - „GOCA_Earth“: Visualisierung der Deformationsanalyseergebnisse und Sensorinformationen aus GOCA-Stufe 3 in Google Earth.
 - „VirtualGOCA“: Simulation von GOCA GNSS und LPS Arrays mit GKA-Schnittstellendaten für Planungszwecke und Sensitivitätsanalyse. Festlegung konfigurierbarer GOCA-Arrays via Google Earth und unter zusätzlicher Nutzung von DGM- und GPM-Daten.
 - „GOCAWeb“: Rechteverwaltung für unterschiedliche Nutzer bei Betrieb der GOCA-Software und GOCA-Tools auf eine gemeinsamen Plattform, z.B. Internet



Zusammenfassung

- Laufende FuE im Projekt GOCA
 - Verbesserungen und Erweiterungen der mathematischen Modelle der GOCA-Software
 - Robustifizierung Stufe 2 (L1-Norm)
 - Lotabweichungsreduktionen
 - Integrierte Deformationsanalyse (Systemanalyse)

