



## Herausforderungen an die Vermessung beim Bau des Gotthard-Basistunnels

---

Adrian Ryf

Ehemals Leiter Geomatik bei der AlpTransit Gotthard AG

25.04.2026 – Jost Bürgi-Symposium in Lichtensteig

## Inhaltsübersicht – Referent



### Inhalt

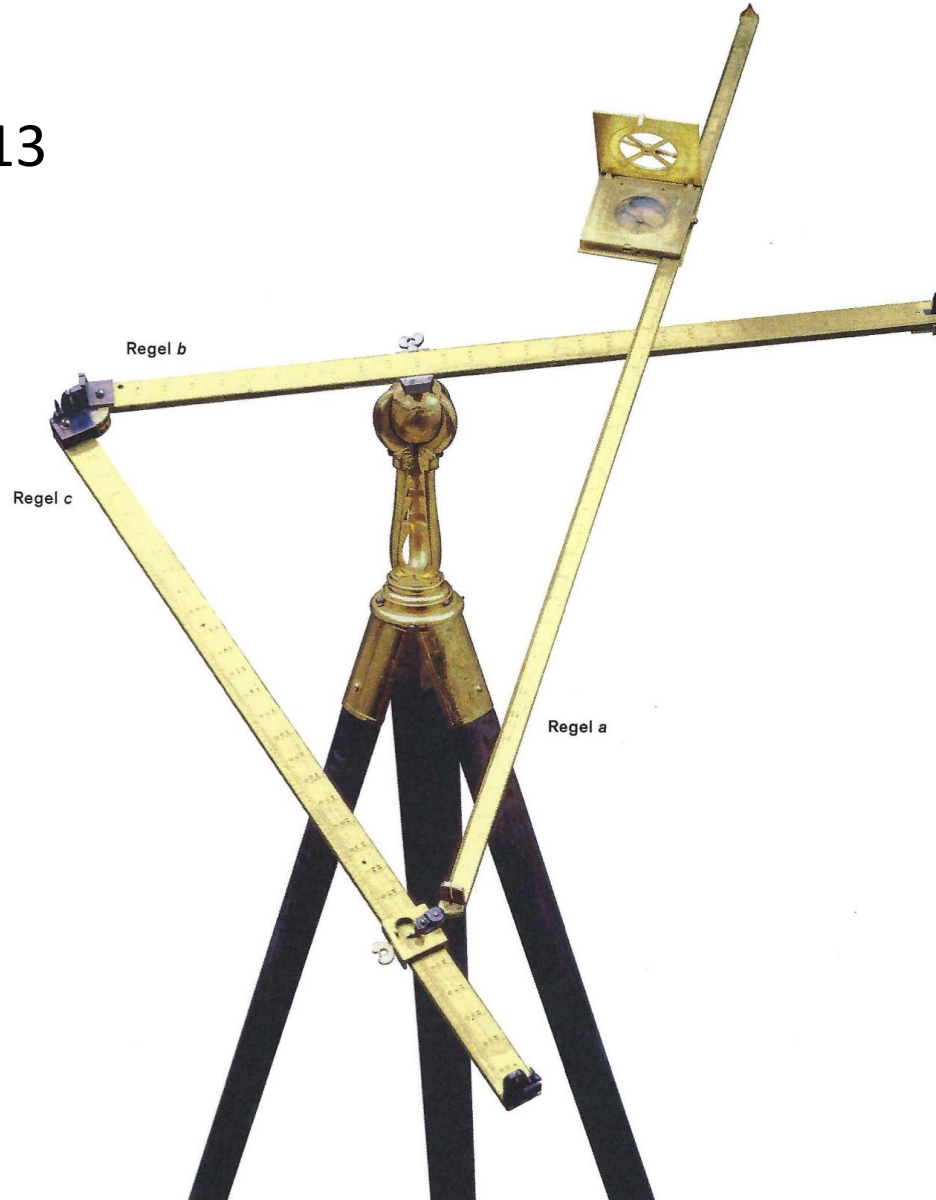
- Projekt AlpTransit Gotthard
- Herausforderungen
- Grundlagenvermessung
- Vortriebsvermessung
- Schächte Sedrun
- Durchschläge
- Gleislagekontrolle
- Talsperrenüberwachung

### Adrian Ryf

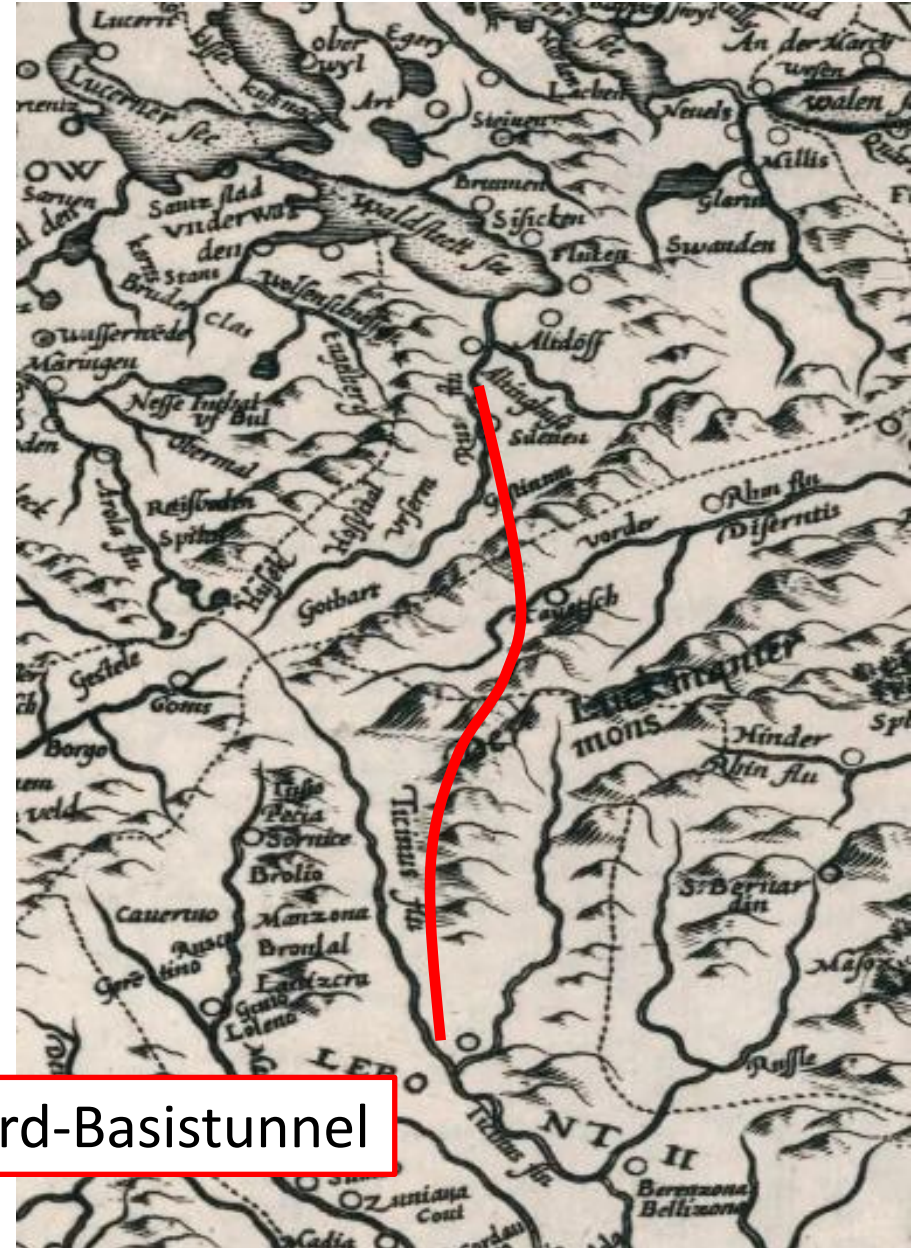
- 1986 Diplom ETH Zürich
- bis 1989 wissenschaftlicher Mitarbeiter ETH Zürich
- bis 1996 Ingenieurbüro Meier, Minusio
- bis 2007 Oberassistent / Lehrbeauftragter ETH Zürich
- bis 2021 Leiter Geomatik bei der AlpTransit Gotthard AG

Triangularinstrument Jost Bürgi, Karte von Helvetia

1613



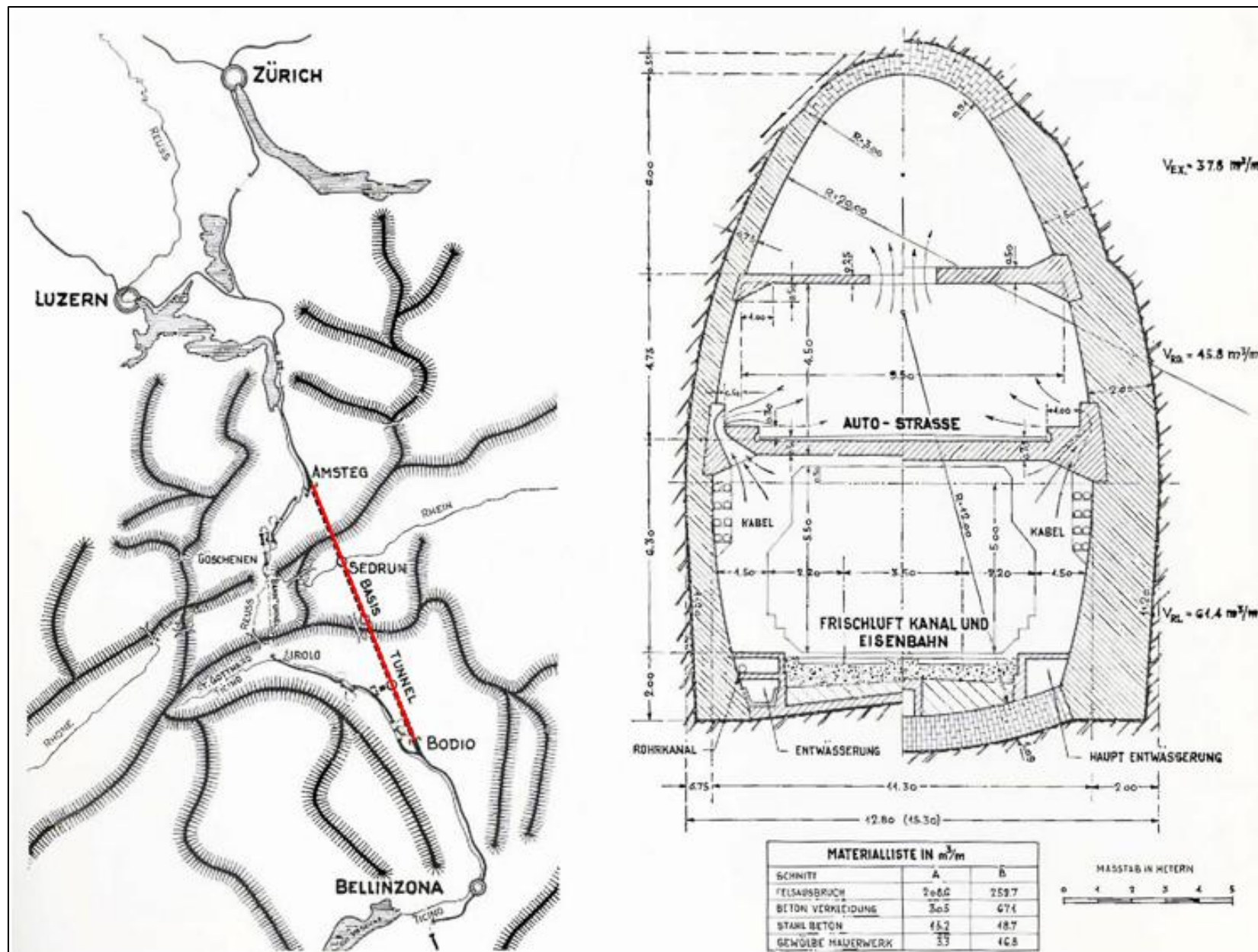
1636



## Visionäre Projektidee von Eduard Gruner 1947

300 Jahre später:

Basistunnel  
Amsteg – Bodio

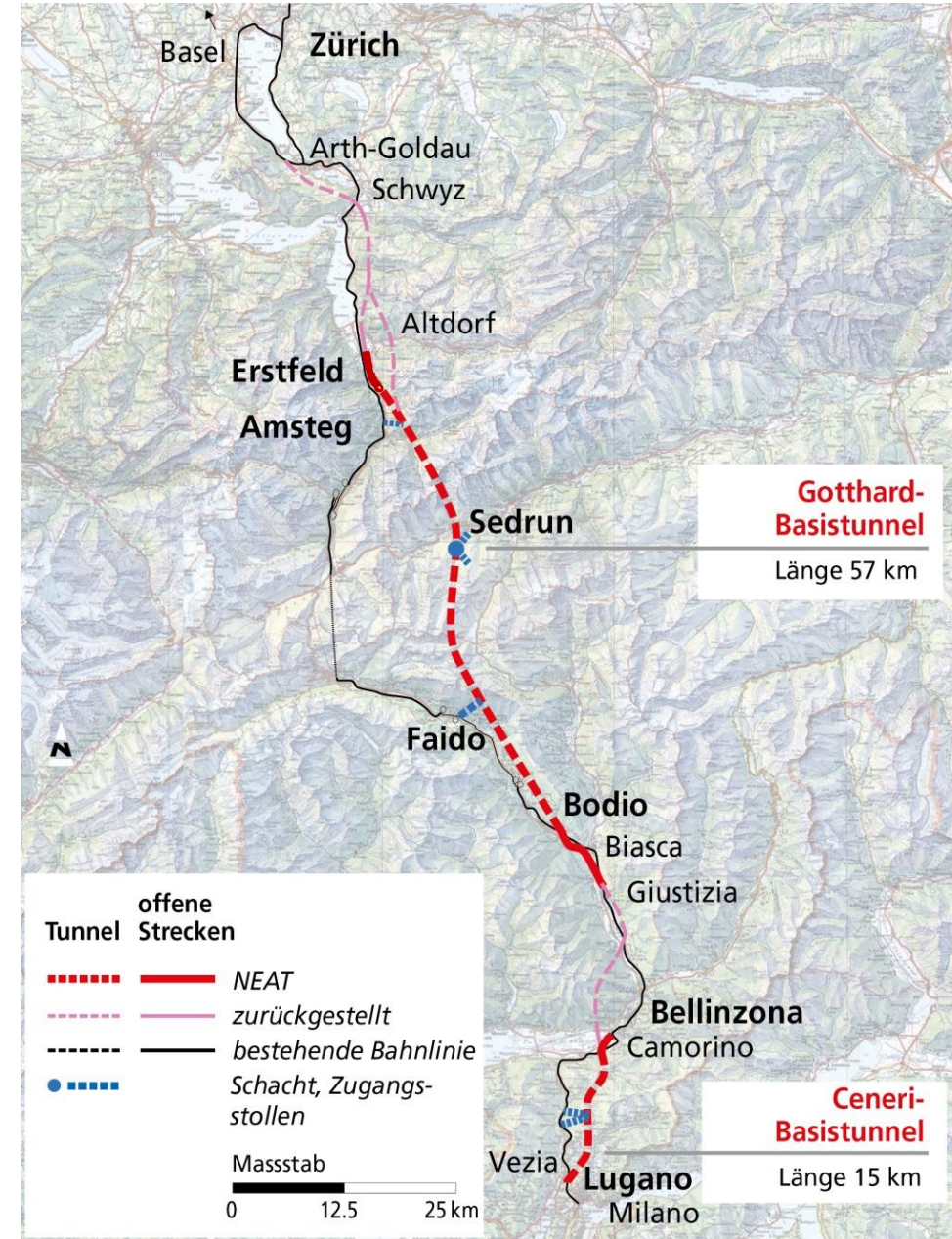


# Projekt AlpTransit Gotthard

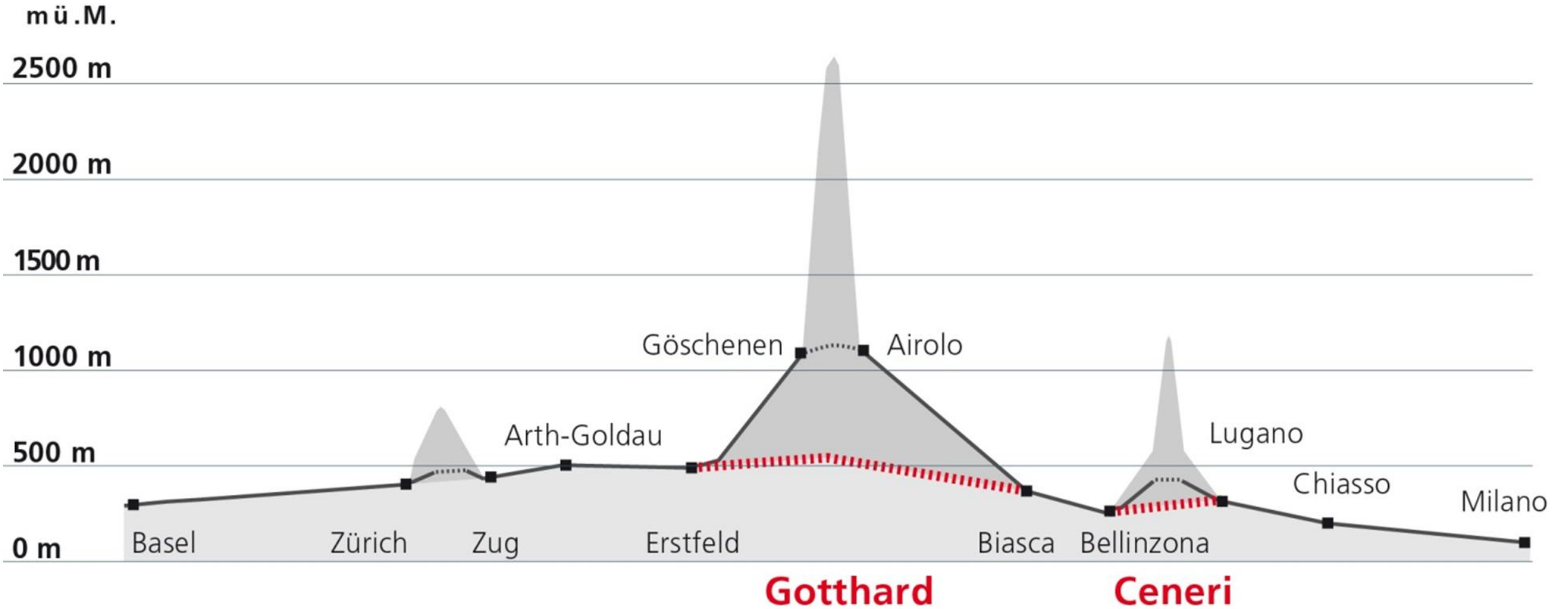
---

## Projekt AlpTransit Gotthard

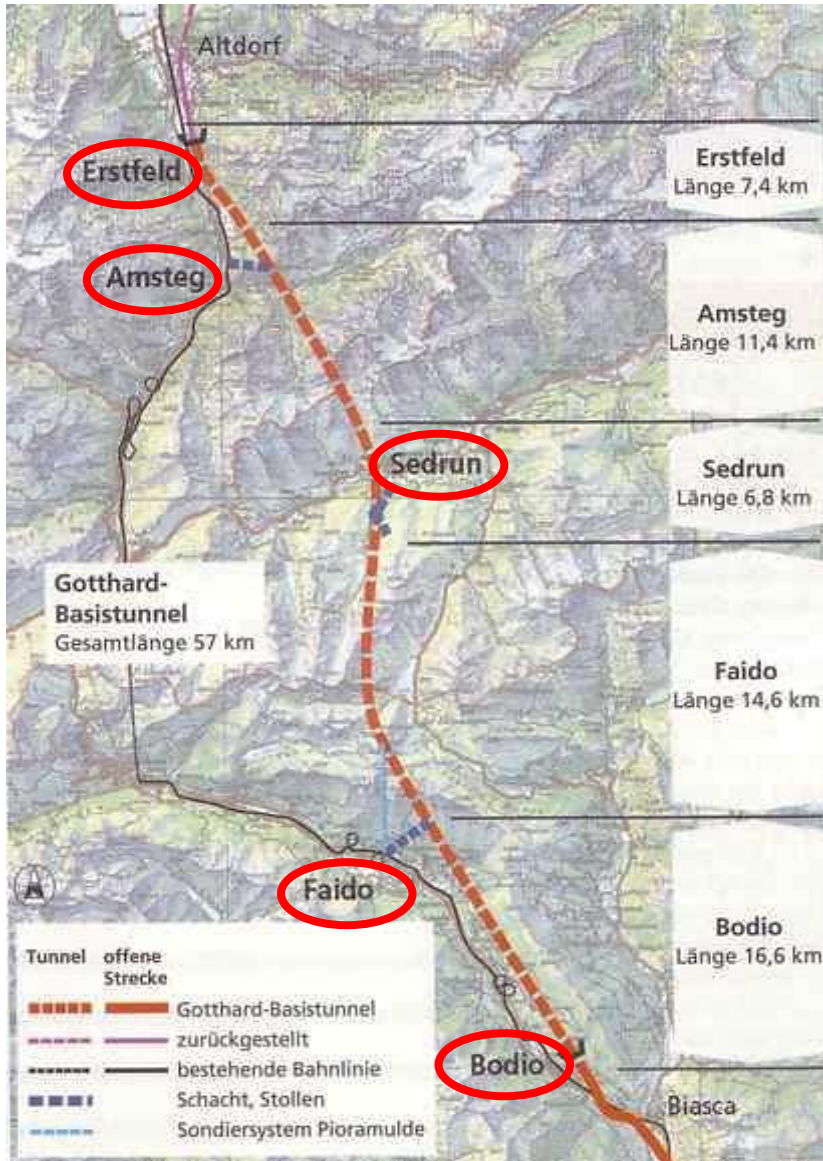
- Teil des Güterverkehrskorridor Rotterdam – Genua
- Realisierte Teile:
  - Gotthard-Basistunnel (57.1 km)
  - Ceneri-Basistunnel (15.4 km)
  - Altdorf – Erstfeld
  - Bodio – Biasca
- Zurückgestellte Teile:
  - Arth-Goldau – Altdorf
  - Biasca – Camorino



## Flachbahn durch die Alpen



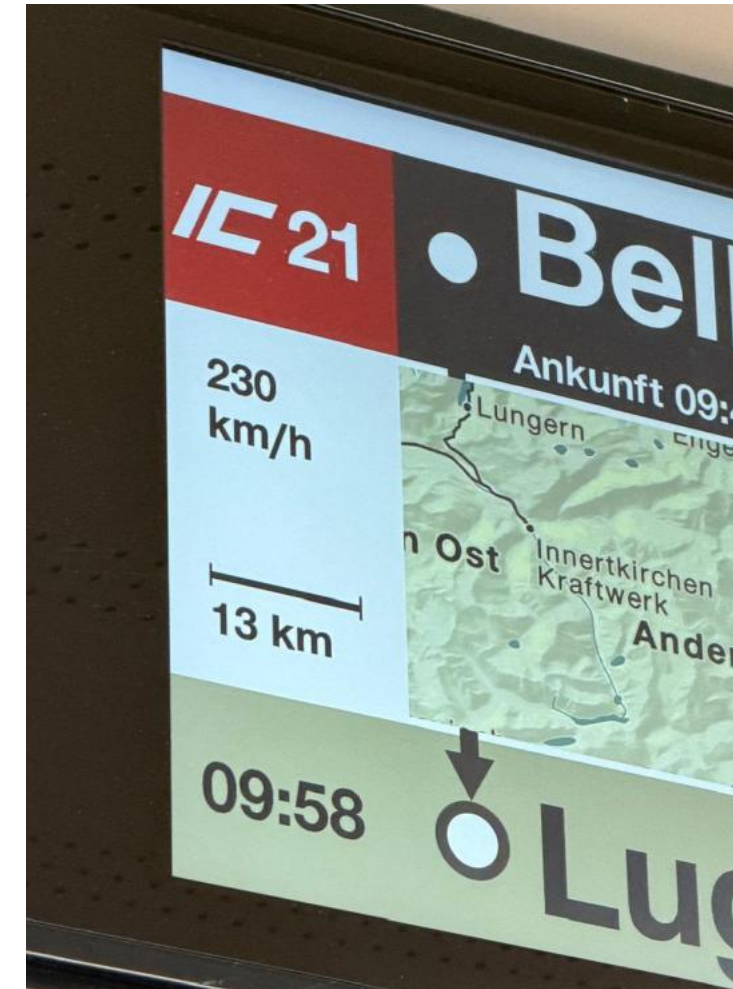
## Gotthard-Basistunnel



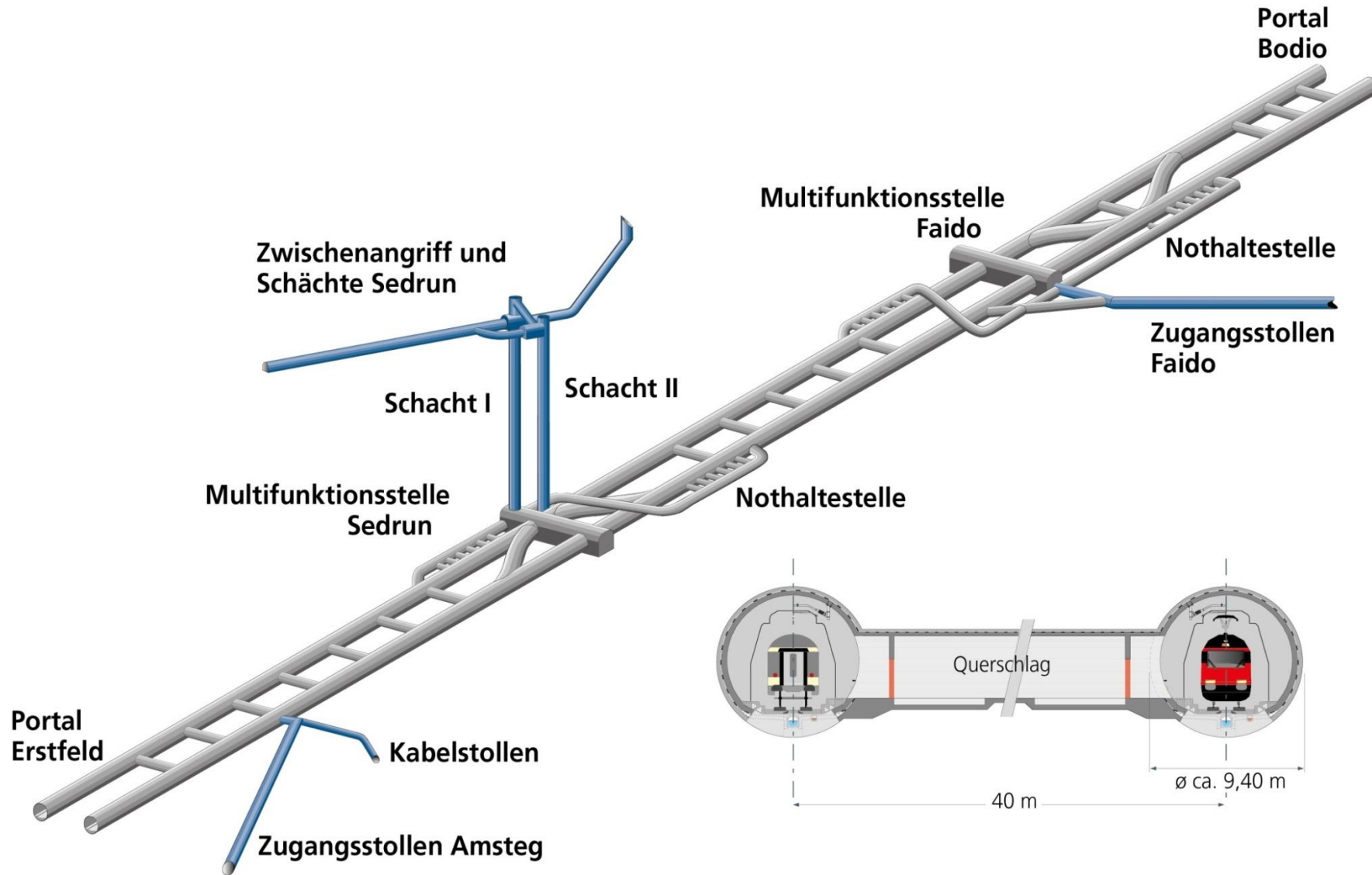
- 5 Baustellen:
  - Nordportal Erstfeld
  - Zwischenangriffe Amsteg, Sedrun und Faido
  - Südportal Bodio
- Linienführung gekurvt:
  - Geologische Gründe
  - Zwischenangriffe in den Tälern
  - Keine Unterquerung von Stauanlagen

## Kenngrossen der Flachbahn durch die Alpen

- Doppelspurige Neubaustrecke
- Mischbetrieb
- Maximale Geschwindigkeit Personenzüge: 250 km/h (Regelbetrieb 200 km/h)
- Maximale Geschwindigkeit Güterzüge: 160 km/h (Regelbetrieb 100 km/h)
- Maximale Länge Güterzüge: 750 m
- 50 – 80 Personenzüge / Tag
- 220 – 260 Güterzüge / Tag
- LKW-Verlad: Eckhöhe 4.2 m
- Maximale Neigung 12.5 ‰
- Radius  $\geq 5'000$  m
- Nutzungsdauer mindestens 100 Jahre
- Maximale Temperatur: 40° C



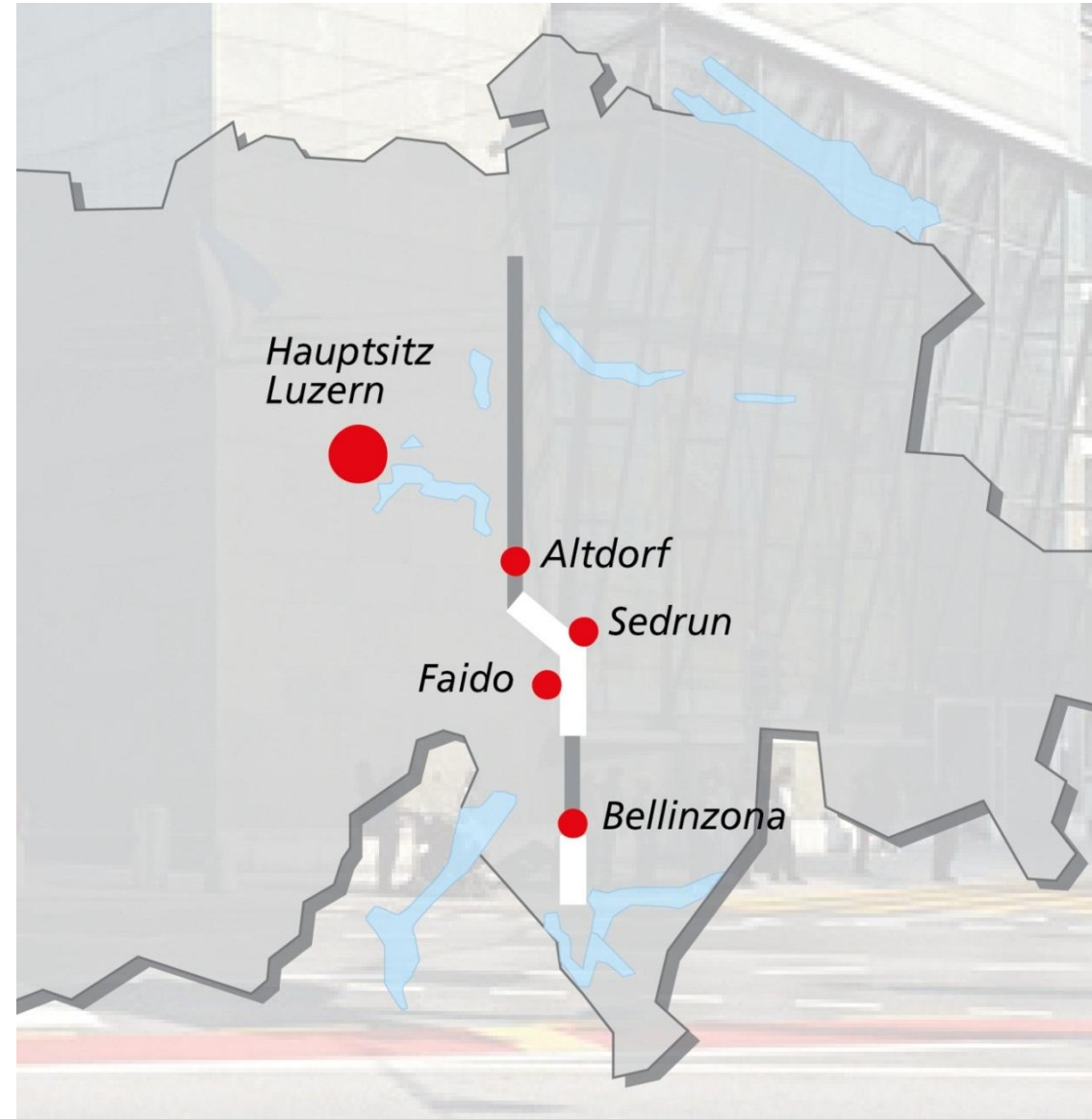
# Tunnelsystem Gotthard-Basistunnel



## Die AlpTransit Gotthard AG

Projektgesellschaft für die Gotthardachse der NEAT

- 100%-Tochtergesellschaft der SBB
- Gründung 1998
- April 2023: Auflösung durch Fusion mit der SBB
- Hauptsitz in Luzern mit vier Filialen



## Organisation der Tunnelvermessung – Modell «Schweiz»

### Bauherrenvermessung

- Grundlagenvermessung übertag
- Hauptabsteckung untertag
- Einsätze unregelmässig, oft über die Feiertage
- Grossräumige Deformationsmessungen
- Bauausführungskontrollen

### Unternehmervermessung

- Steuerung des Vortriebes (z.B. Tunnelbohrmaschine)
- Detailabsteckung untertag
- Tägliche Einsätze
- Kleinräumige Deformationsmessungen

### Verantwortung

- Hauptverantwortung bei der Bauherrenvermessung
- Verantwortung der Unternehmervermessung für den vordersten Kilometer hinter der Ortsbrust
- Keine Diskussion über die jeweils massgebenden Koordinaten.



## Anforderungen an die Bauherrenvermessung

- Grosse Erfahrung in Tunnelvermessungsprojekten
- Kompetente Schlüsselpersonen
- Kontinuität beim Schlüsselpersonal, möglichst über die ganze Bauzeit
  
- Genügend Vermessungsequipen und Instrumentarium
- Hohe Verfügbarkeit → Wochenenden, Feiertage
  
- Gute Vernetzung mit Spezialisten für Spezialaufgaben → Messungen mit Vermessungskreisel
  
- Zuverlässige Arbeitsweise → unabhängige Kontrollen mit unterschiedlichen Messmethoden, unterschiedlichen Instrumenten und unterschiedlichen Messequipen

# Herausforderungen

---

## Herausforderungen

### Generell:

- Projektdimensionen: 57 km langer Tunnel
- Komplexität: Schächte, Schrägstollen, "Zwischenangriffe" → insgesamt über 150 km Stollen
- Projektdauer: 20 Jahre Bauzeit

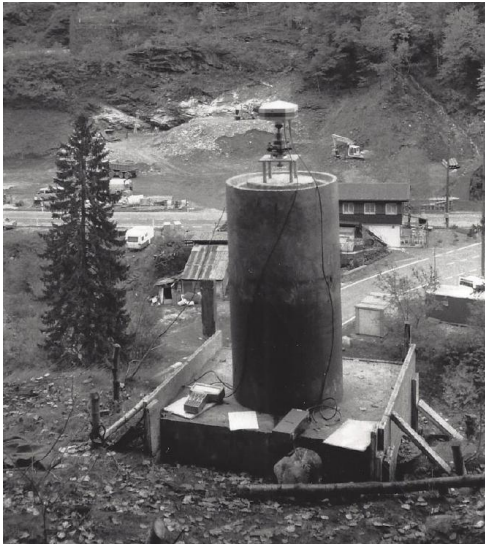
### Vermessung:

- Geoid im Alpenraum
- Refraktion: Krümmung der Visuren durch Brechung an unterschiedlichen meteorologischen Schichten, insbesondere durch Temperaturgradienten von den Tunnelwänden gegen die Tunnelmitte
- Koordinaten-, Höhen- und Richtungsübertragung in den 800 m tiefen Schächten in Sedrun
- Deformationen in Tunneln und Schächten wegen des grossen Bergdruckes
- Deformationen an der Erdoberfläche über dem Tunnel

→ Gefordert waren unabhängige Messmethoden zur Vermeidung systematischer Abweichungen

## Tunnelvermessung

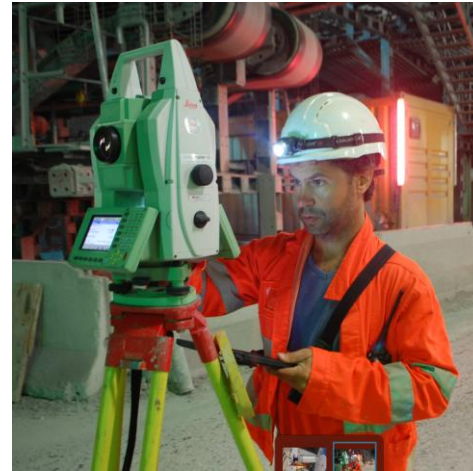
Richtungen (Winkel), Distanzen, Nivellement



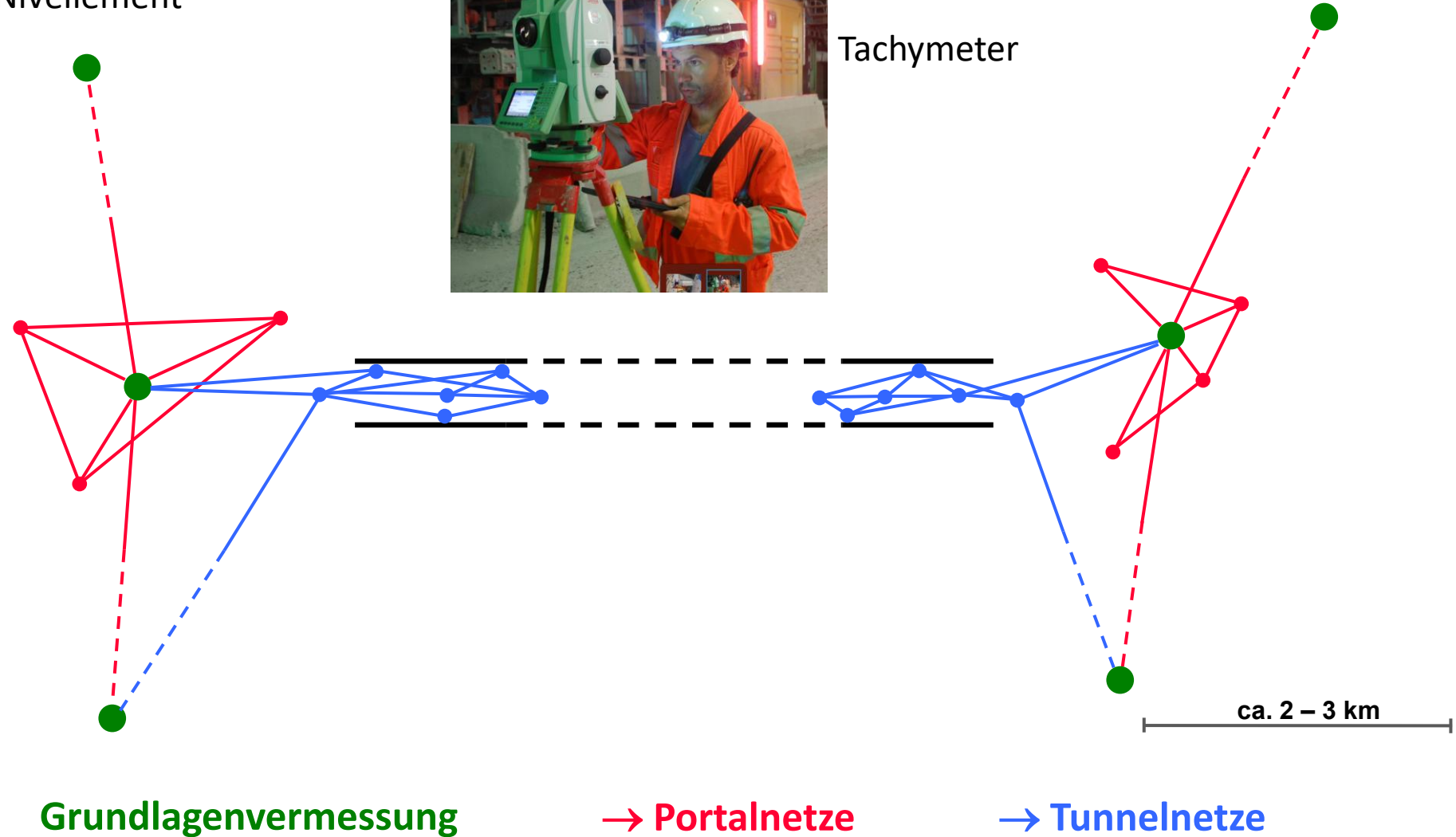
GNSS-Gerät, 1993, Faido



Nivellierausrüstung

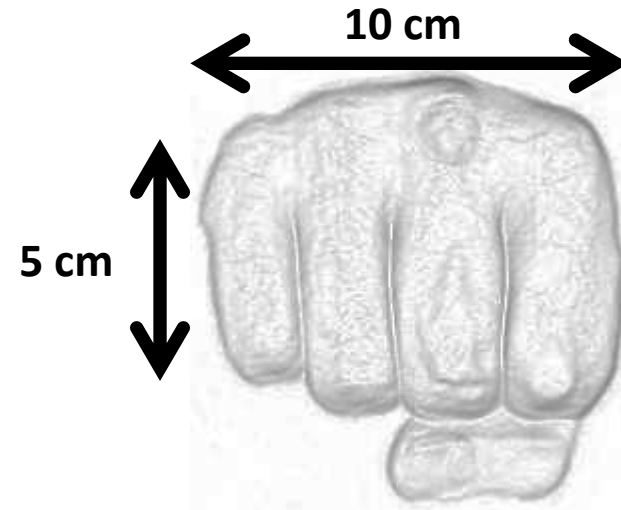


Tachymeter



## Genauigkeitsanforderungen

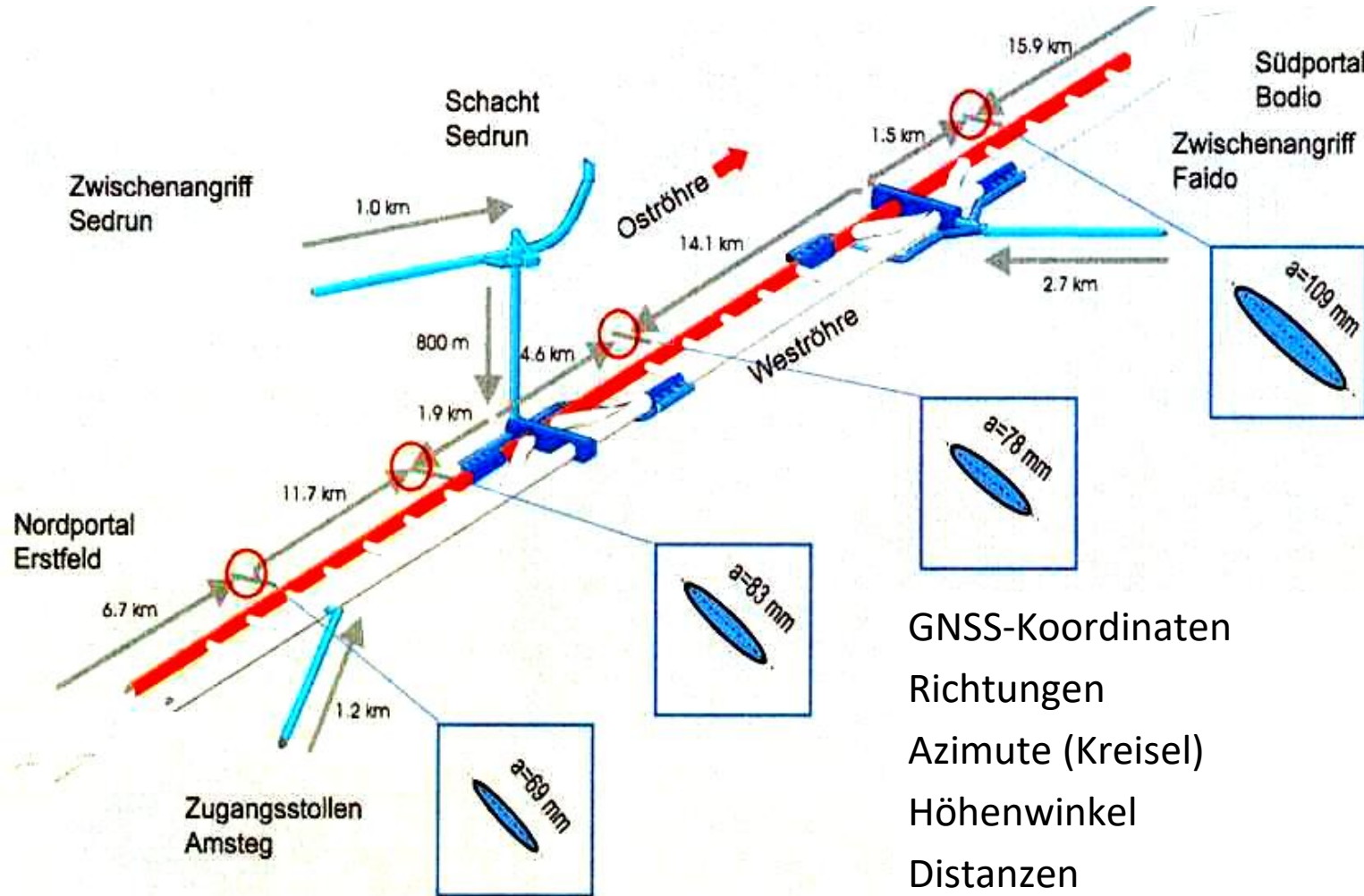
	Vorgabe (Toleranz)	Standardabweichung
Lage (quer / längs)	25 cm	<b>10 cm</b>
Höhe	12.5 cm	<b>5 cm</b>



**Mit der Dimension  
einer Faust durch den  
Gotthard!**

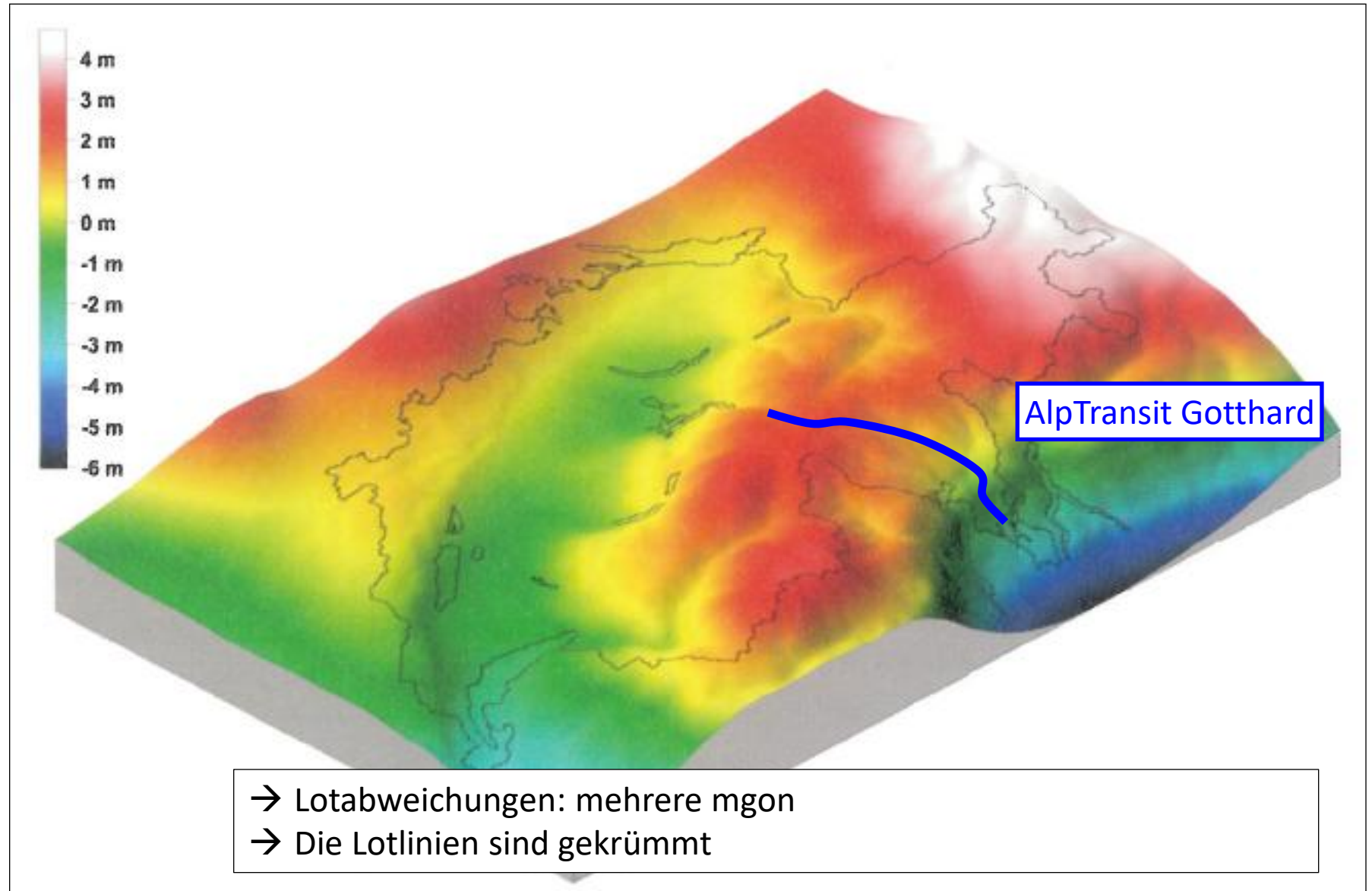
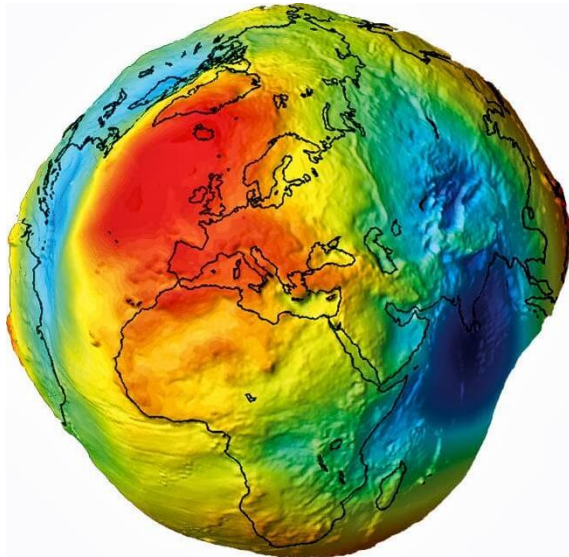


## Präanalyse 1995



GNSS-Koordinaten	2.0 mm
Richtungen	0.3 mgon
Azimute (Kreisel)	1.5 mgon
Höhenwinkel	1.0 mgon
Distanzen	0.5 mm + 1 ppm
Höhendifferenzen (Nivellement)	0.2 – 1.0 mm/km

Geoid in der Schweiz: bei langen Tunneln sind gute Kenntnisse zwingend notwendig



## Höhe: Korrekturen im Vortrieb

### 1. Strenge orthometrische Korrektur

Schweremodell, Schweremessungen:

→ Korrekturen bis zu 12 cm

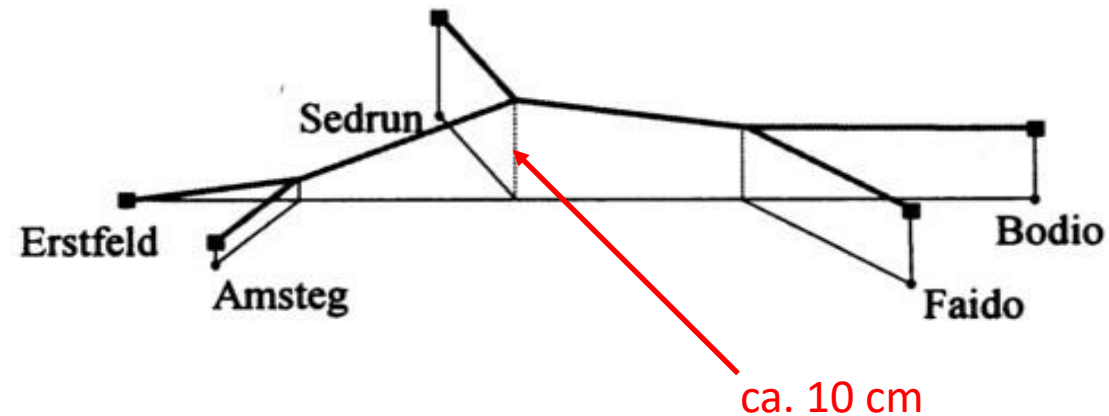
### 2. Geschwindigkeitskorrektur

Alpenhebung:

Erstfeld +0.7 mm/Jahr

Bodio +1.3 mm/Jahr → Differenz: 0.6 mm/Jahr

### 3. Lagerung im Landeshöhenetz



# Grundlagenvermessung

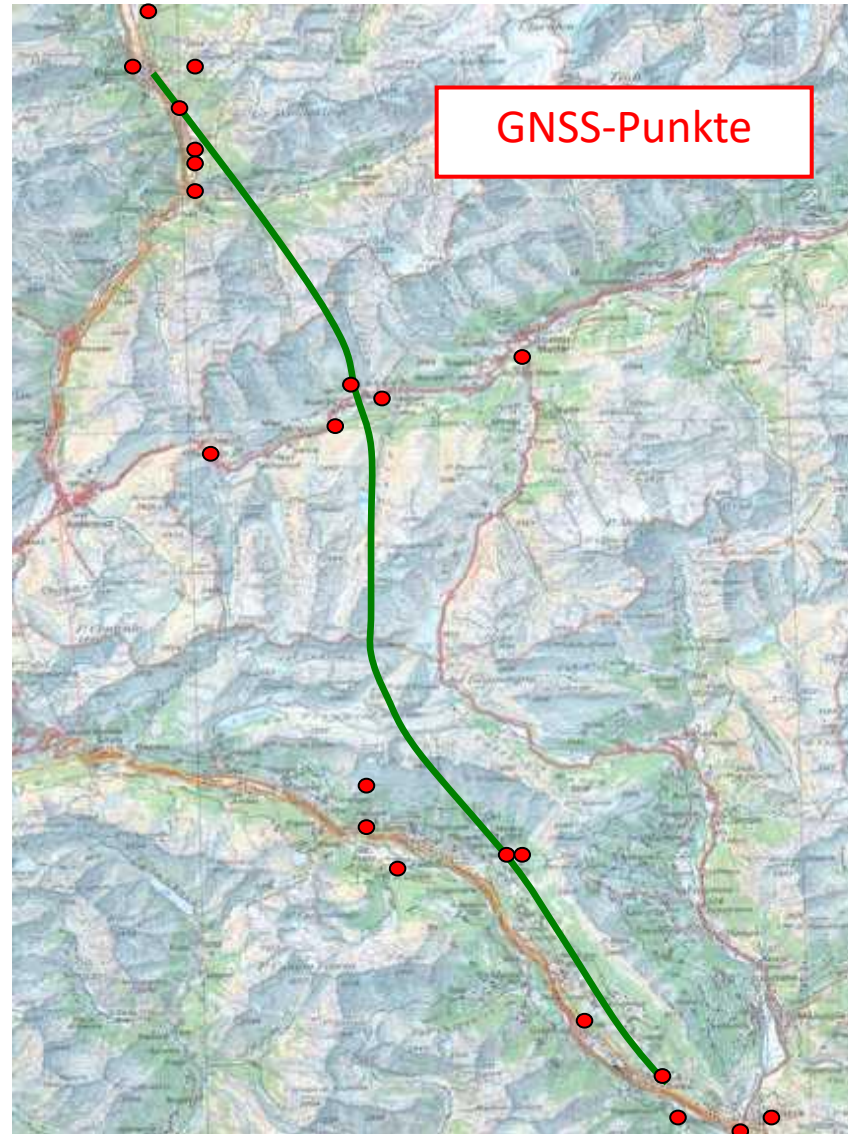
---

## Grundlagenvermessung 1995



Bei jedem Portal und jedem Zwischenangriff:

- ein Portalpfeiler
- drei Fernziele
- Verbindungspunkte zur Landesvermessung
- Mehrere Messsessionen während zwei Tagen



## Portalnetze

1995 Pfeiler beim Südportal in Bodio

→ Bestimmung zusätzlicher Punkte für den Netzmasstab, für lokale Absteckungen und für die Rückversicherung der GNSS-Punkte



## Auswertung

- Post processing der GNSS-Daten
- Transformation der GNSS-Koordinatensets in den schweizerischen Bezugsrahmen
- Bestimmung orthometrischer Höhen unter Verwendung des Geoidmodelles der schweizerischen Landesvermessung
- Freie Ausgleichung der einzelnen GNSS-Koordinatensets
- a posteriori Genauigkeit der Lagekoordinaten:  $< 7$  mm (längere Achse der grössten Konfidenzellipse)
- Zuverlässigkeit: 26 mm
- Die GNSS-Höhen dienten lediglich als Kontrolle.
- Für die Höhe wurden Anschlüsse an das Landesnivellement gemessen.

## 2005 Kontrolle der Grundlagenvermessung

### GNSS-Messungen im Sommer 2005

- Geodätischer Projektkurs der ETH Zürich
- 28 Punkte mit 28 GNSS-Instrumenten
- 12 Stunden nachts, gemessen durch Studierende

### Vergleich 1995 – 2005

- Helmert-Transformation → maximale Residuen: 1.5 cm

# Vortriebsvermessung

---

## Vermessungsnetz im Tunnel

- Hauptpunkte alle 420 m im geraden Tunnel → in Tunnelmitte (Refraktion)
- Zusätzliche Punkte an den Tunnelwänden
- Regelmässige Bestimmung der Koordinaten
  - Kleine Kontrollen gestützt auf die letzten drei Hauptpunkte
  - Grosse Kontrollen ausgehend von stabilen Hauptpunkten oder den Portalnetzen
- Bestimmung der Richtung mit dem Vermessungskreisel, ca. all 2 km
- Höhenübertragung mit Nivellement



Vortriebsvermessung im Tunnel



## Vermessungskreisel: für lange Tunnel zwingend notwendig

- Zur Bestimmung der geografischen Nordrichtung
- Eine frei aufgehängte sehr schnell rotierende Masse richtet sich parallel zur Erdrotationsachse aus



## Mit Kreiselazimuten gestützter Polygonzug – Beispiel

Tunnellänge: 4.5 km

- Freie Polygonzüge
- $s = 250$  m
  - $\sigma_s = 2$  mm + 2 ppm
  - $\sigma_r = 0.5$  mgon

Durchschlagsabweichung (95 %):

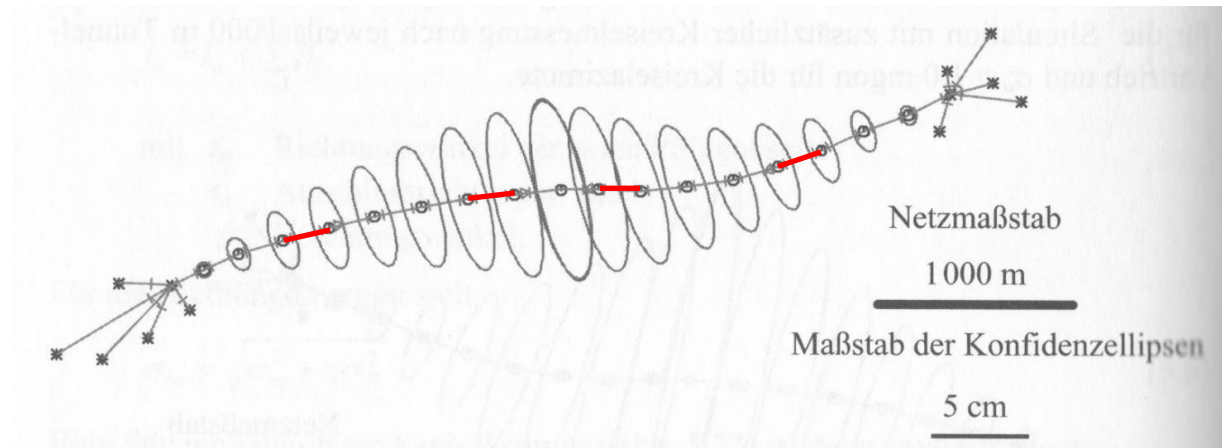
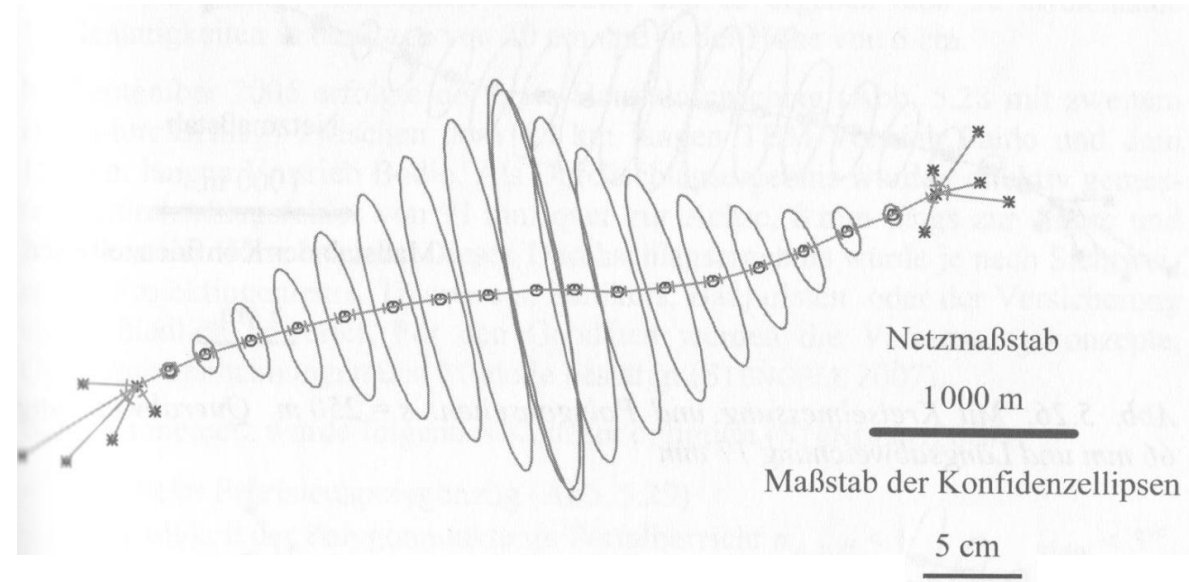
- 150 mm (seitlich)
- 17 mm (längs)

Zusätzliche Kreiselazimute:

- Auf jeder vierten Polygonseite
  - $\sigma_a = 1$  mgon

Durchschlagsabweichung (95 %):

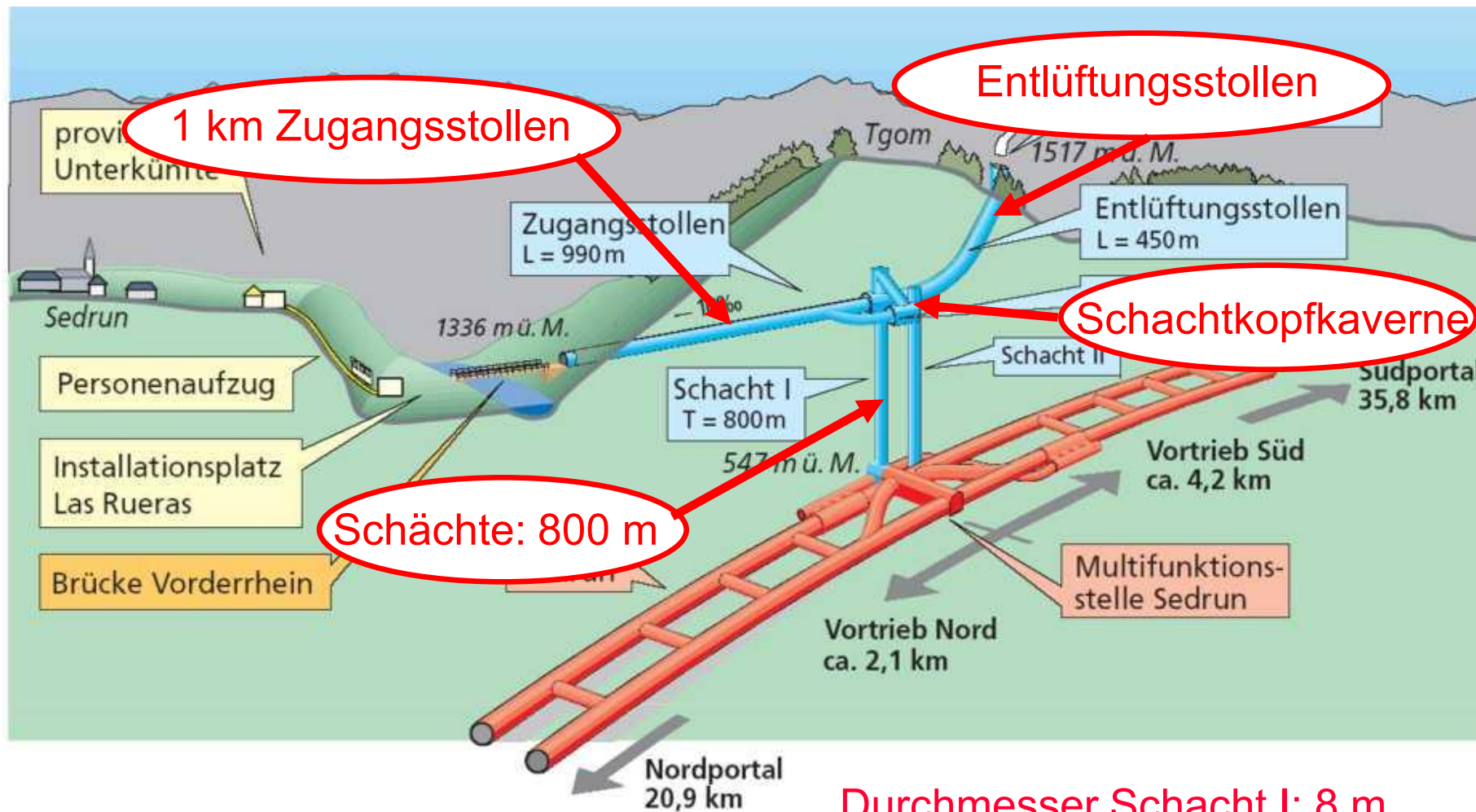
- 66 mm (seitlich)
- 17 mm (längs)



## Schächte Sedrun

---

Zwischenangriff Sedrun



Durchmesser Schacht I: 8 m

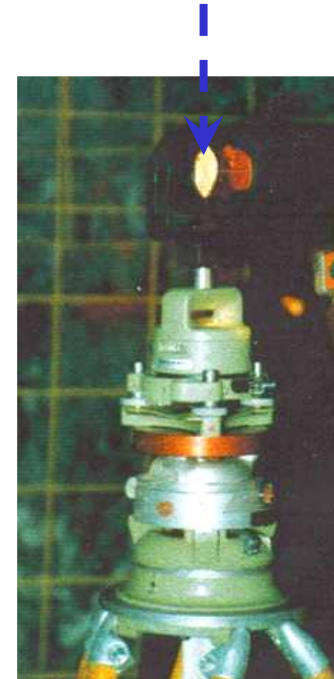
- Übertragung der Lage → optische und mechanische Lotung
- Übertragung der Höhe → vertikale elektronische Distanzmessung
- Übertragung der Richtung → Vermessungskreisel, inertielle Messtechnik
- Angestrebte Genauigkeiten
  - Koordinaten Y, X 7 mm
  - Höhe 3 mm
  - Richtung 1.5 mgon



Schachtkopf: Stative in der Liftkabine



Nadirlotgerät Wild NL



Schachtfuss: Reflektor mit Leuchtdiode auf „Verschiebetisch“ / „Kreuzschlitten“



## Durchgeführte optische Lotungen

Drei Einsätze:

- im Schacht I im März 2002
  - im Schacht II im Januar 2004
  - im Schacht I im Januar 2007
- 
- Bewetterung: von oben nach unten: fallende Luft befreit den Schacht vom Nebel
  
  - Überbestimmte Lotung über drei Stative
    - Nadirlotgerät Wild NL
  
  - Am Schachtfuss:
    - Spezialprismen mit Lichtdioden
    - Zentrierung mit Präzisions-Verschiebetischen (“Kreuzschlitten”)

Mechanische Lotung: am Schachtkopf



Rolle mit Stahldraht,  $\varnothing$  2mm, 800 m lang



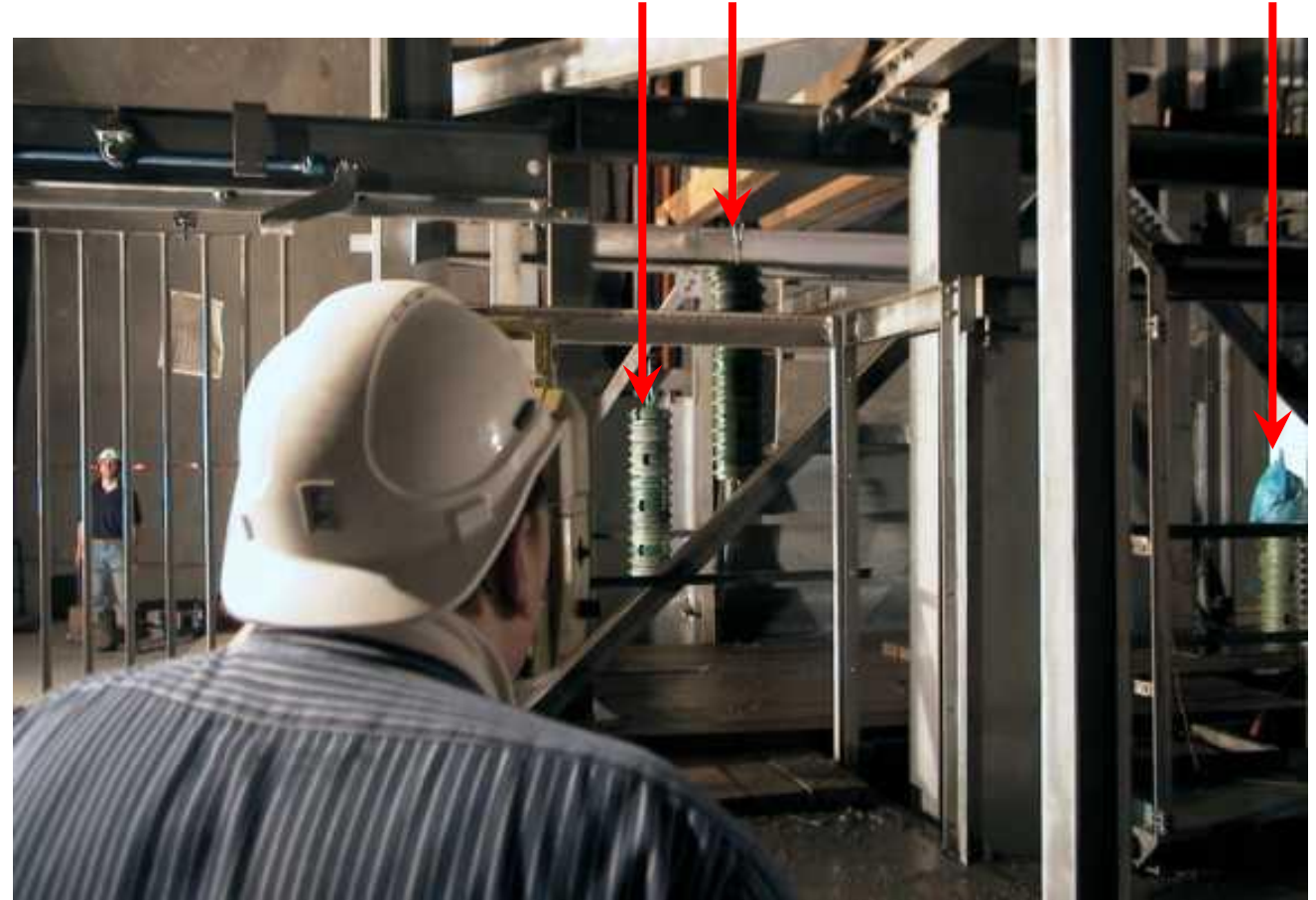
Bestimmung der Aufhängepunkte



Anhängen der Gewichte

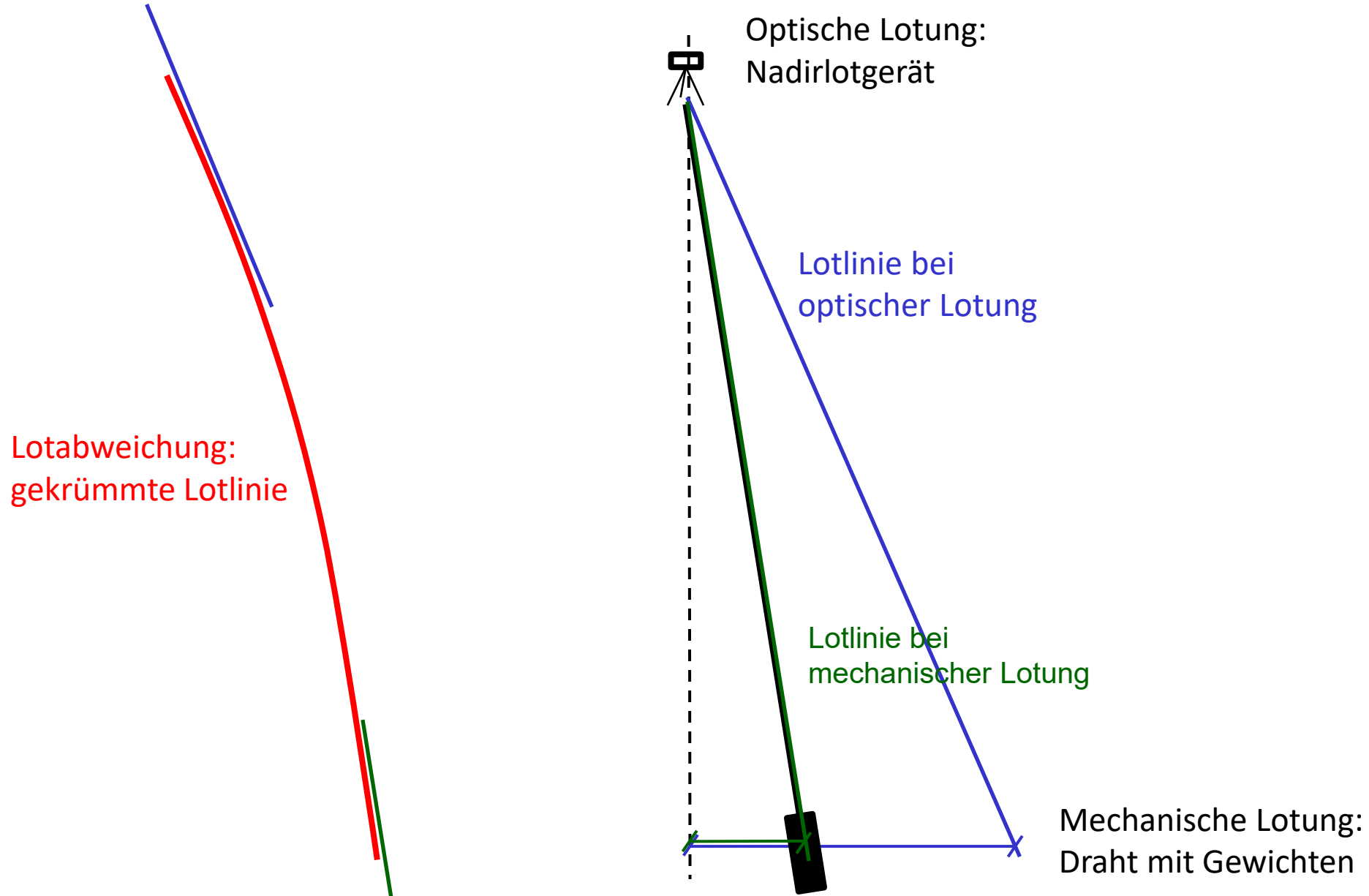


Gewichte: 19 x 25 kg



Bestimmung der Positionen der Drähte mit Theodolit

Lotung: Lotabweichungen



## Resultate der optischen und mechanischen Lotungen

- Vergleich der Dreiecke am Schachtkopf mit denjenigen am Schachtfuss:
  - mechanisch: Genauigkeit  $\approx 5$  mm
  - optisch: Genauigkeit  $\approx 6$  mm
- Netzausgleichung:
  - Tunnelnetz oben und unten
  - Azimute des Vermessungskreisels
  - Lotungsmessungen
- Ausgleichung mit optischer *oder* mechanischer Lotung:
  - Maximale Koordinatendifferenzen: 2 mm

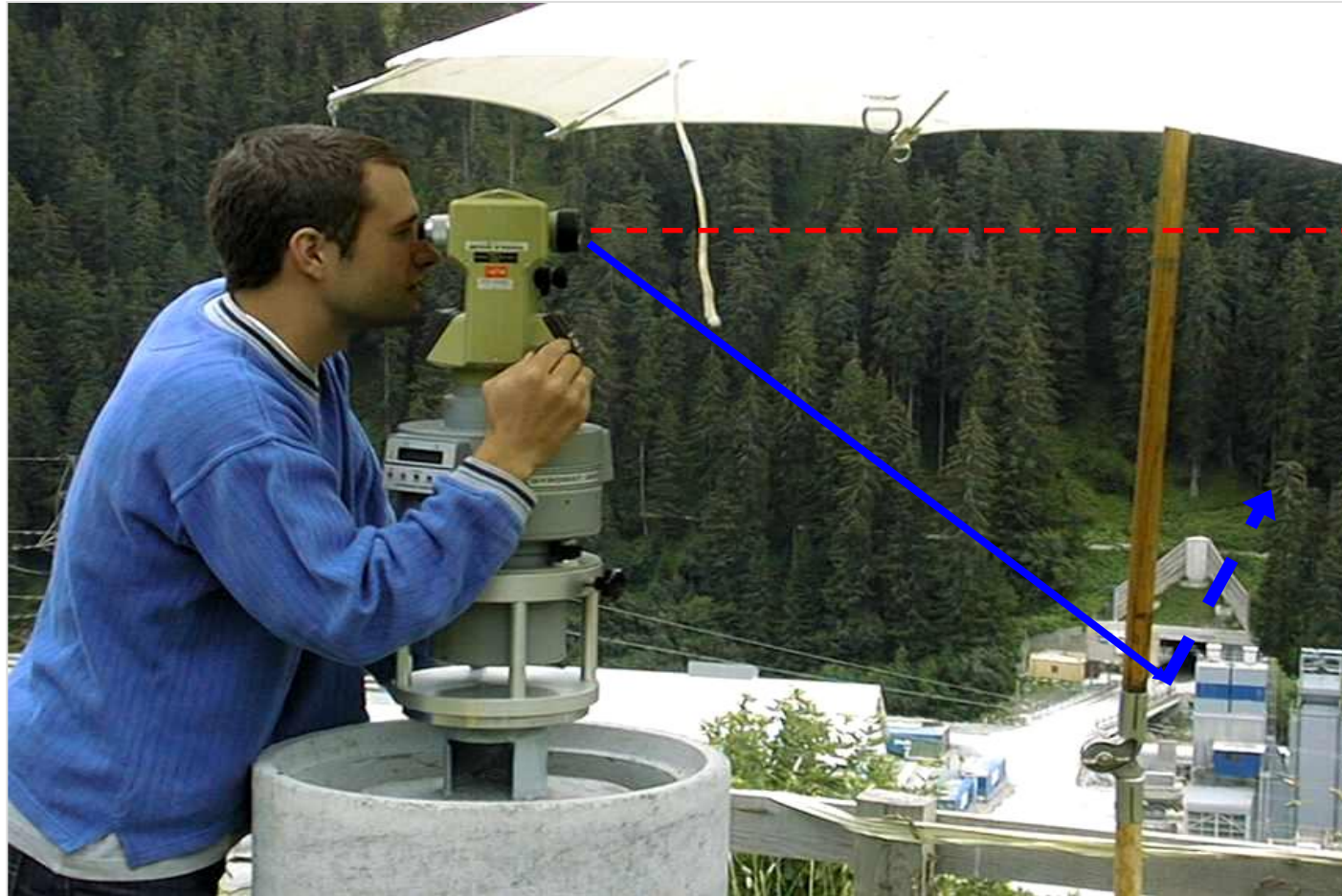
## Höhenübertragung im Schacht Sedrun

- Vertikale elektronische Distanzmessung von unten nach oben mit Leica TCA2003
- Spezialadapter zur Befestigung des Reflektors unter dem Stativ
- Genauigkeit: 2-3 mm



## Richtungsübertragung

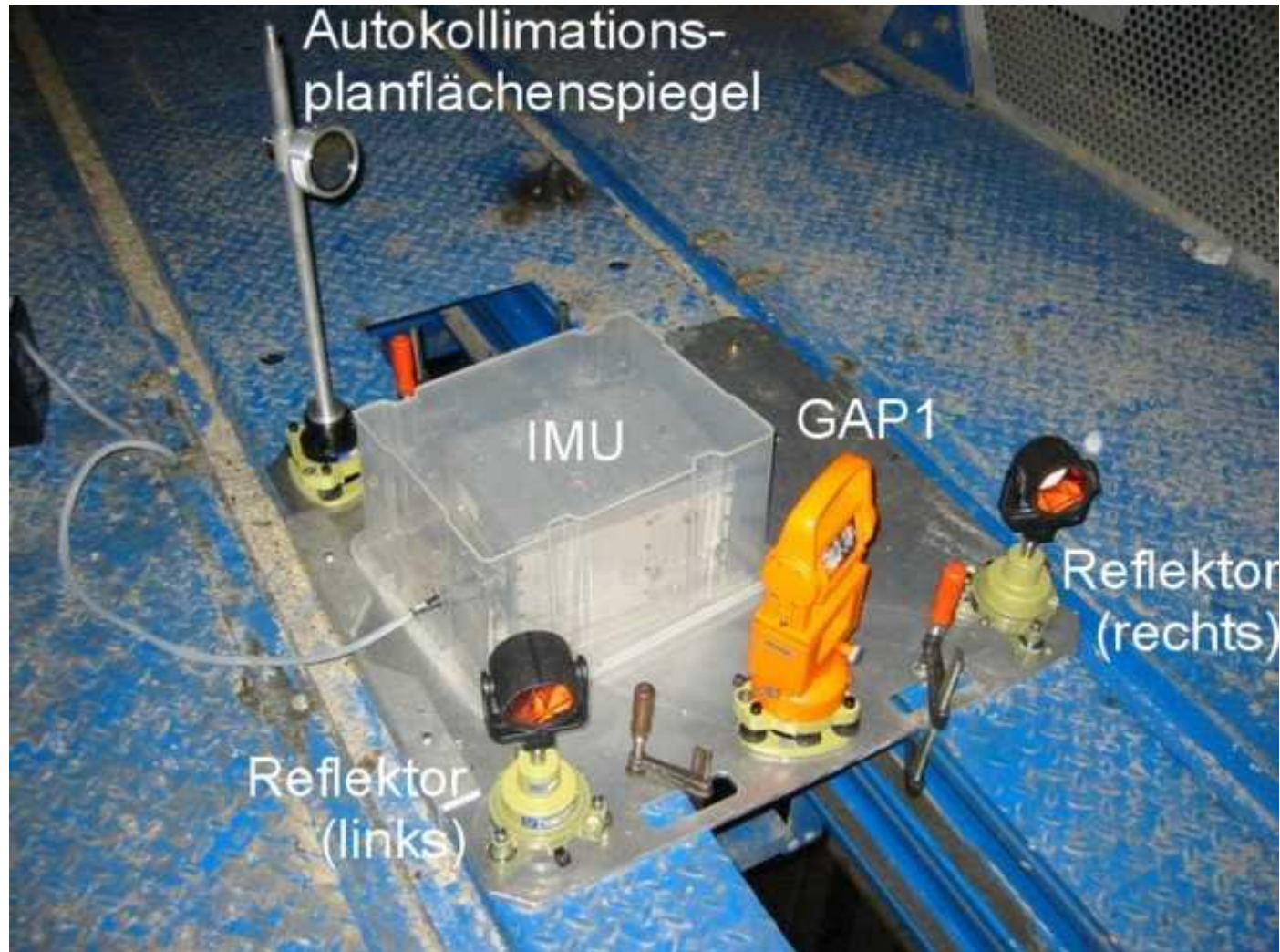
- Primäre Methode: Vermessungskreisel
  - Wiederholte Messungen in verschiedenen Phasen des Tunnelvortriebs
  - Instrument: Gyromat 2000
- Unabhängige Methode: inertielle Messtechnik
  - Weltpremiere
  - 2 Messkampagnen: 2004 and 2005
- Die Richtungsübertragung im Schacht Sedrun und insbesondere deren unabhängige Kontrolle war eine der grössten Herausforderungen für die Vermessung im AlpTransit-Projekt.



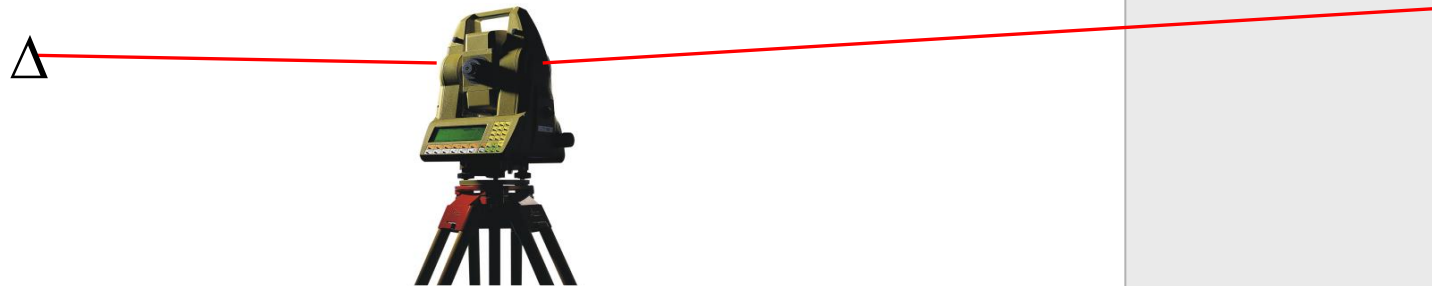
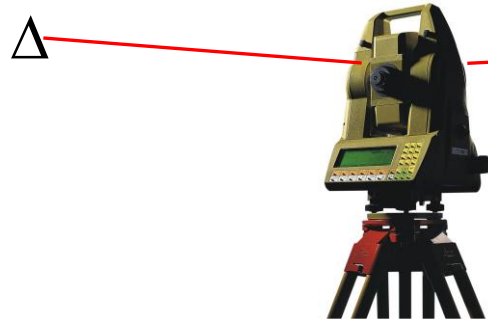
Referenz-  
richtung

Basistunnel

- Zusammenarbeit der ETH Zürich und der TU München
- Inertiale Messeinheit (IMU) in der Schachtförderanlage im Schacht I
- Richtungsübertragung auf die IMU mit Autokollimation (“Messung auf Spiegel”)
- Verbindung zum Tunnelnetz oben und unten am Schacht
- Unabhängige Richtungsübertragung zur Kontrolle der Azimute des Vermessungskreisels
- Weltpremiere! Erstmalige Verwendung dieser Technologie mit so hoher Genauigkeitsanforderung



Zusammenarbeit von ETH Zürich und TU München

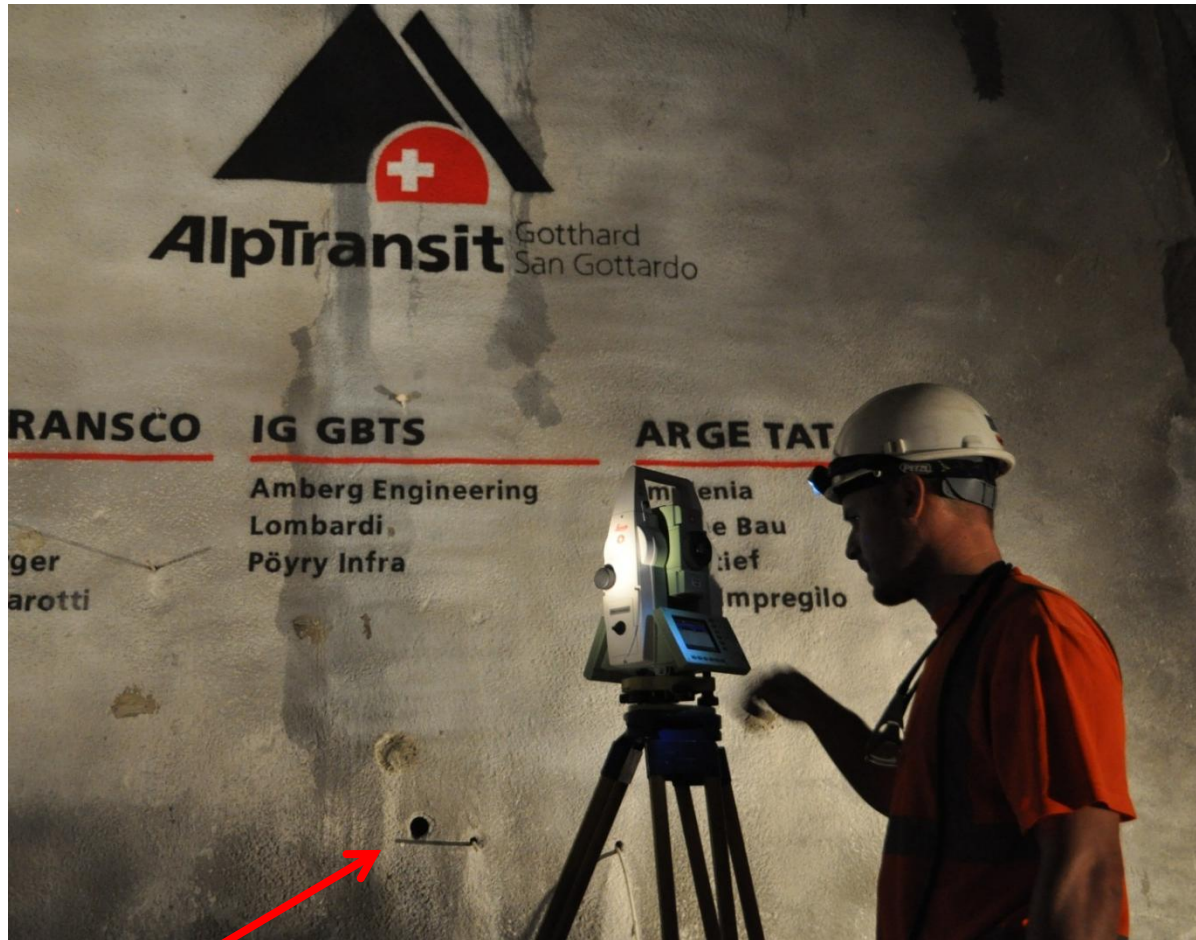


### Resultate der Richtungsübertragung

- Vermessungskreisel: Genauigkeit ca. 1.3 mgon
- Inertiale Messtechnik: Genauigkeit ca. 1.5 mgon
- Differenz zwischen den beiden Methoden in Sedrun: 2.2 mgon
- Eine unabhängige Kontrolle wurde damit erfolgreich realisiert.
- **Die Zuverlässigkeit der Richtungsübertragung war damit signifikant höher.**

**Durchschlag!**

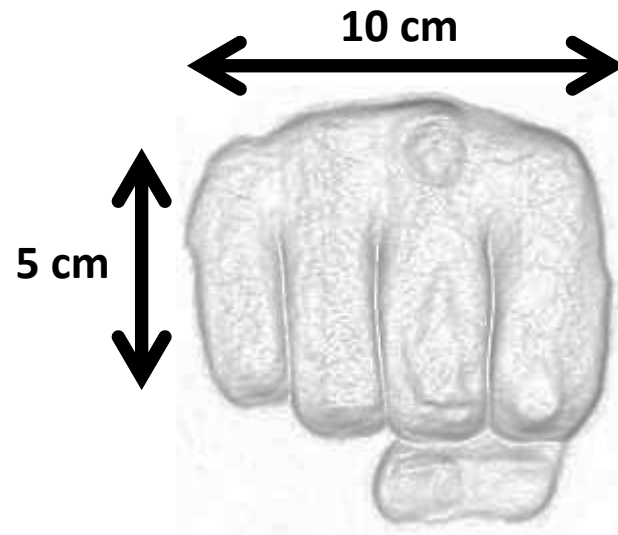
---



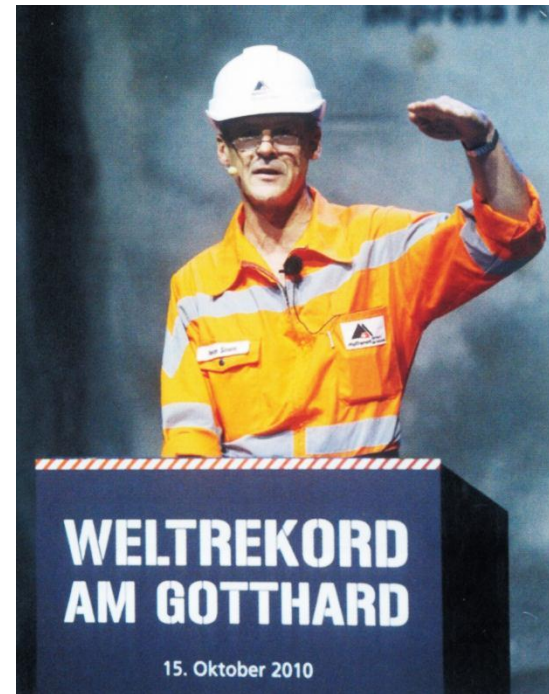
1 cm

8 cm

	Standardabweichung	Toleranz (Zuverlässigkeit)
Lage (Richtung)	10 cm	25 cm
Höhe	5 cm	12.5 cm



Dimensionen einer Faust



Die flache Hand genügt!

Durchschlagsabweichungen

Durchschlag	Datum	quer	Höhe	längs
<b>Bodio – Faido</b>	06.09.2006	92 mm	17 mm	12 mm
<b>Amsteg – Sedrun</b>	17.10.2007	137 mm	3 mm	21 mm
<b>Erstfeld – Amsteg</b>	16.06.2009	14 mm	5 mm	33 mm
<b>Faido – Sedrun</b>	15.10.2010	81 mm	11 mm	136 mm

# Gleislagekontrolle

---



## Multisensorsystem

Tachymeter

→ 3D-Position

Neigungsmesser

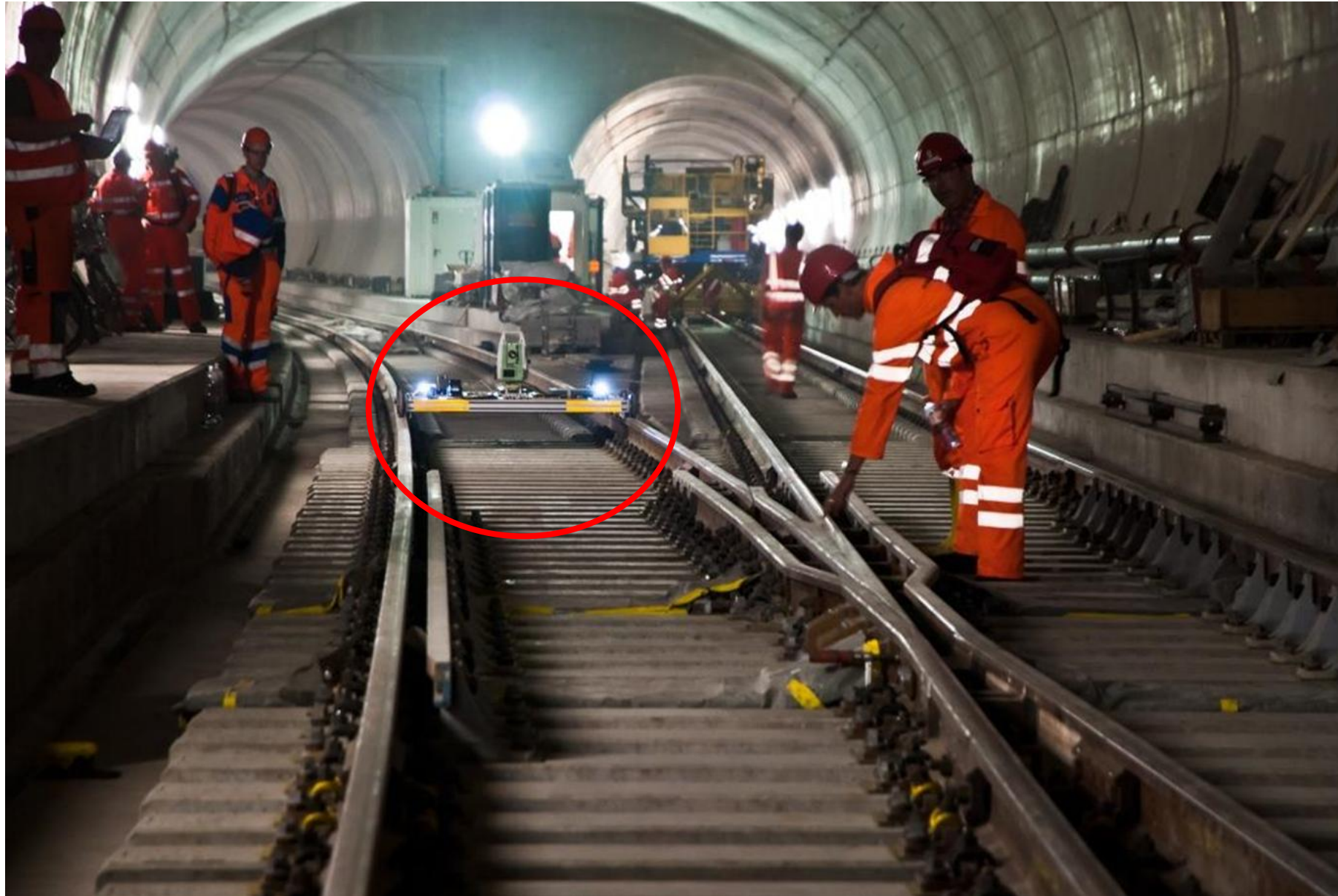
→ Gleisüberhöhung

4 Profillaserscanner

→ Schienenprofil

Meteorologiesensor





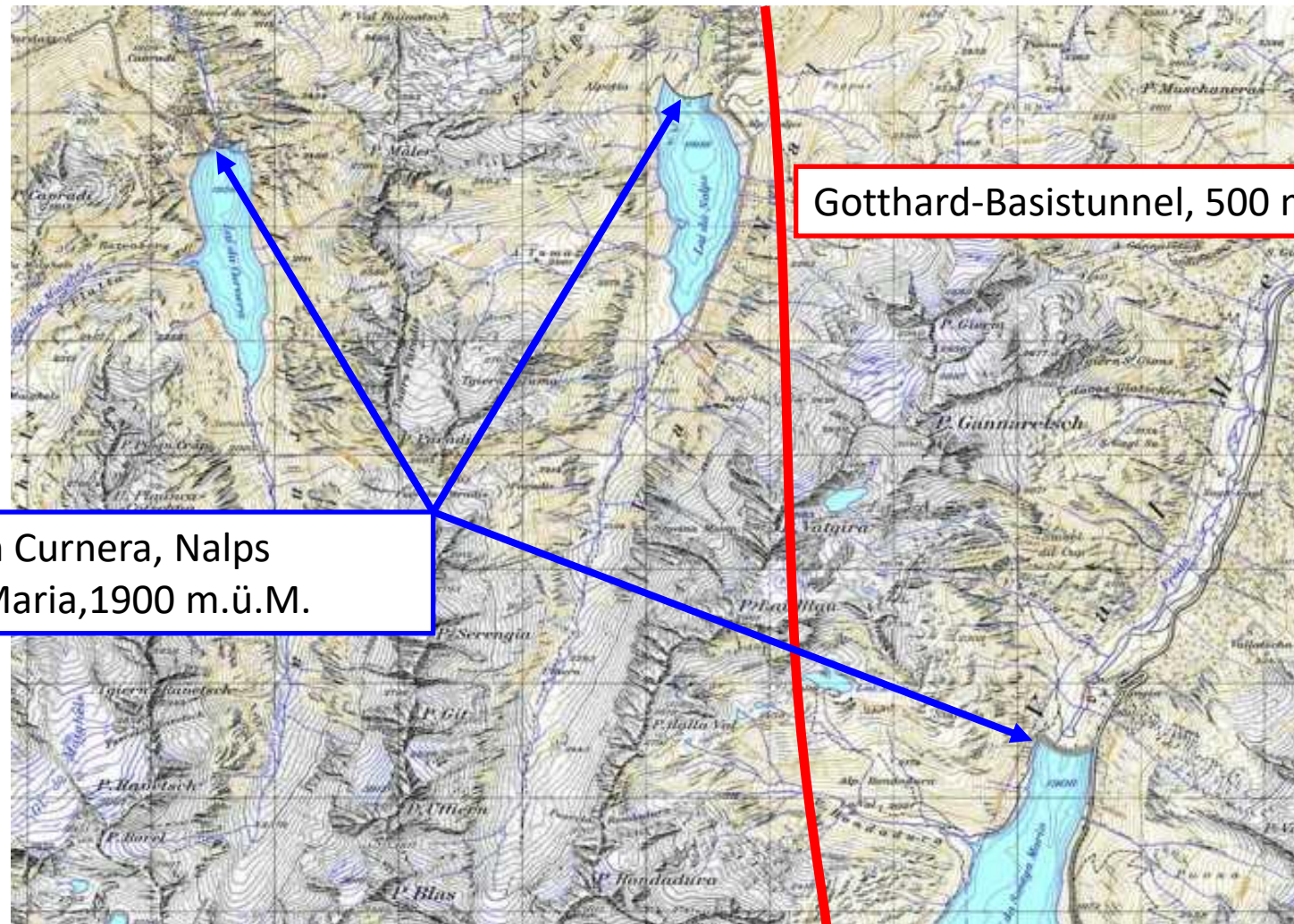
# Talsperrenüberwachung

---

## Staumauern über dem Gotthard-Basistunnel

Hat der Tunnelbau Auswirkungen bis an die Erdoberfläche?!

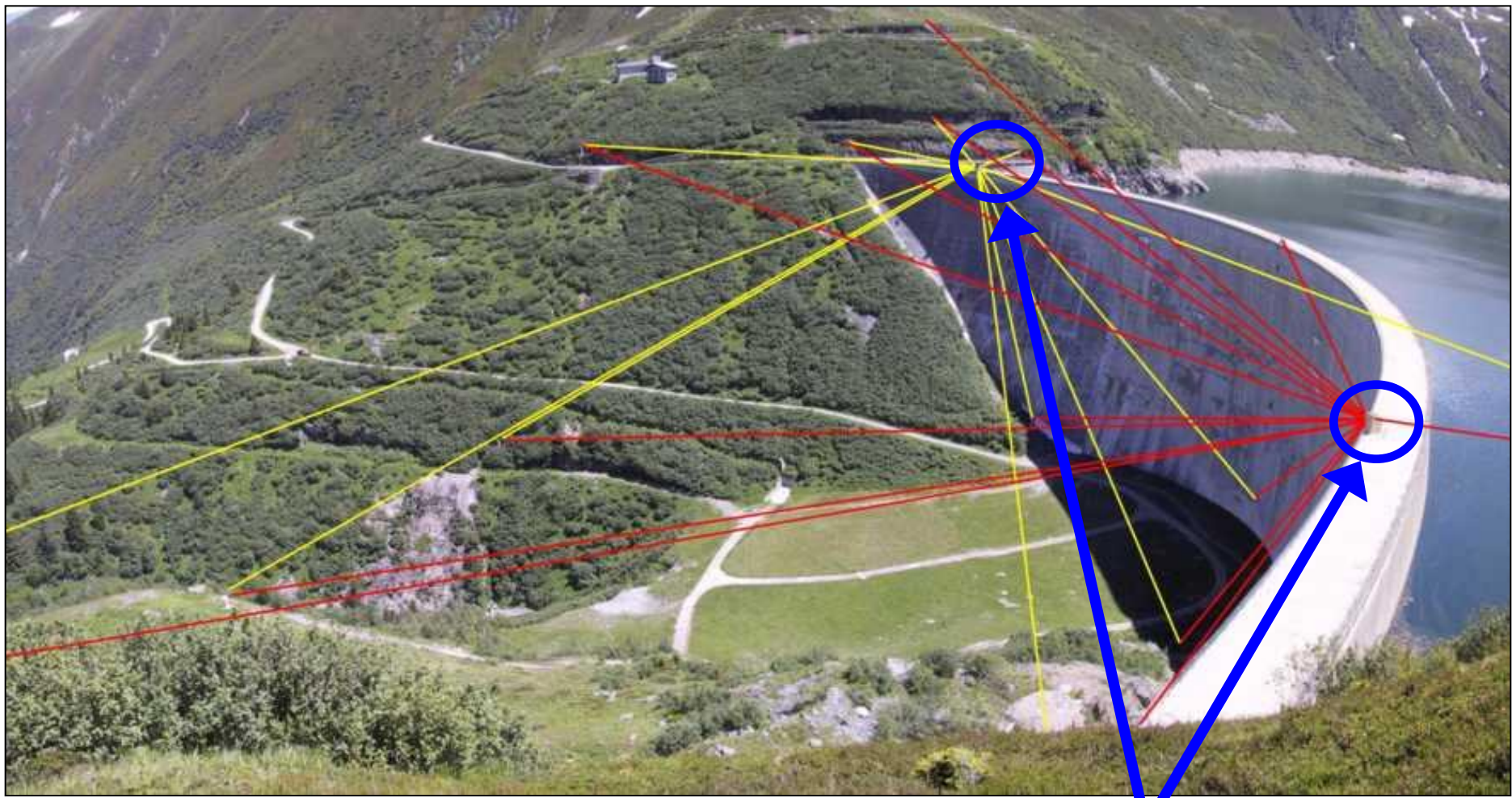
1400 m über dem Tunnel?



Gotthard-Basistunnel, 500 m.ü.M.

Staumauern Curnera, Nalps und Santa Maria, 1900 m.ü.M.





© bsf swissphoto

Tachymeter-Häuschen

## Talsperren über dem GBT

Umgebung der Staumauern Curnera, Nalps und Sta. Maria

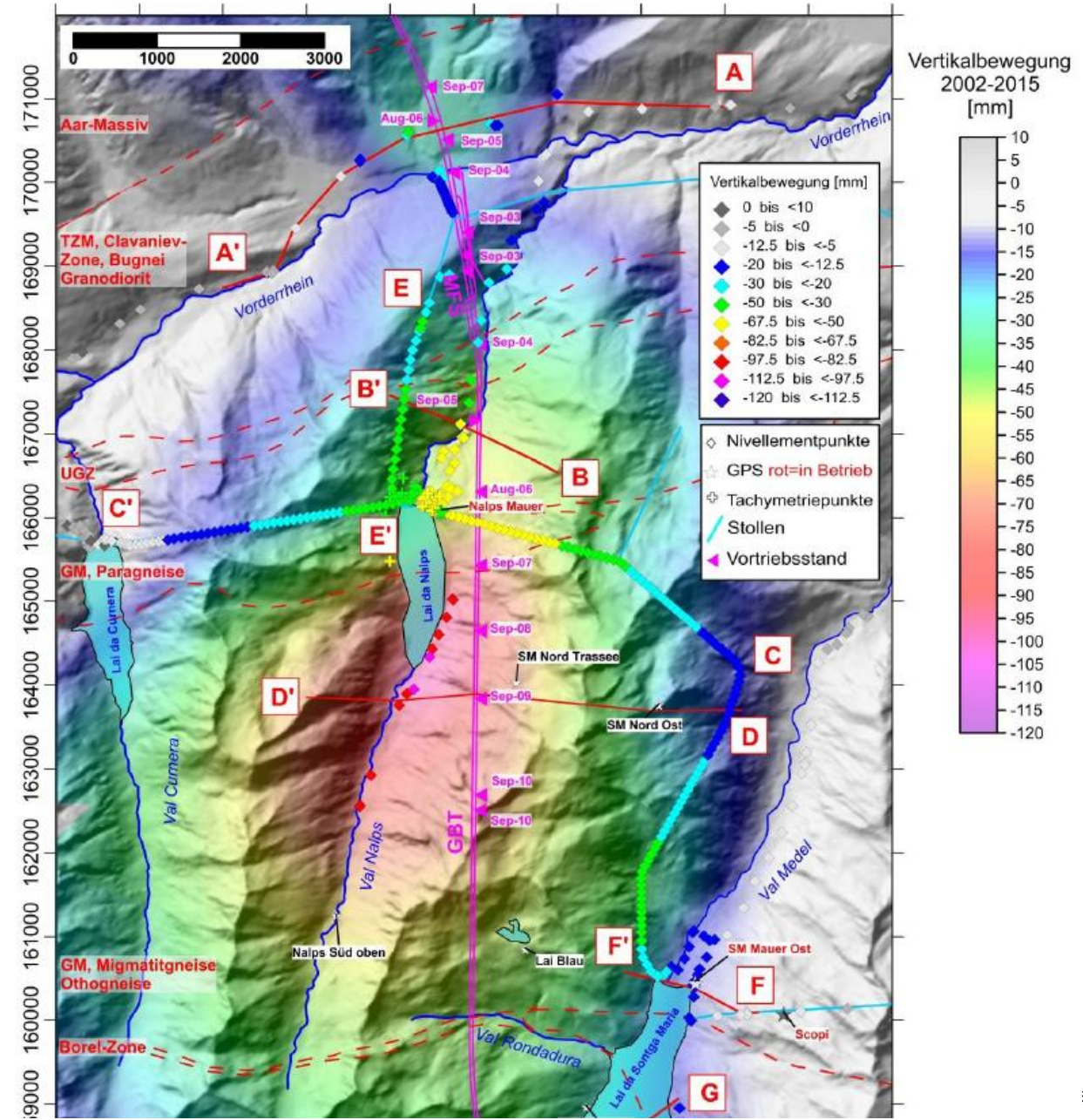
- 6 Talquerschnitte mit 10 automatisierten Tachymeterstationen
- 100 km Präzisionsnivellement jedes Jahr
- 10 permanente GPS-Stationen

Beobachtungsdauer: 14 Jahre

Setzungsmulde mit einer Ausdehnung von ca. 7 x 12 km

Setzungen bis zu 12 cm

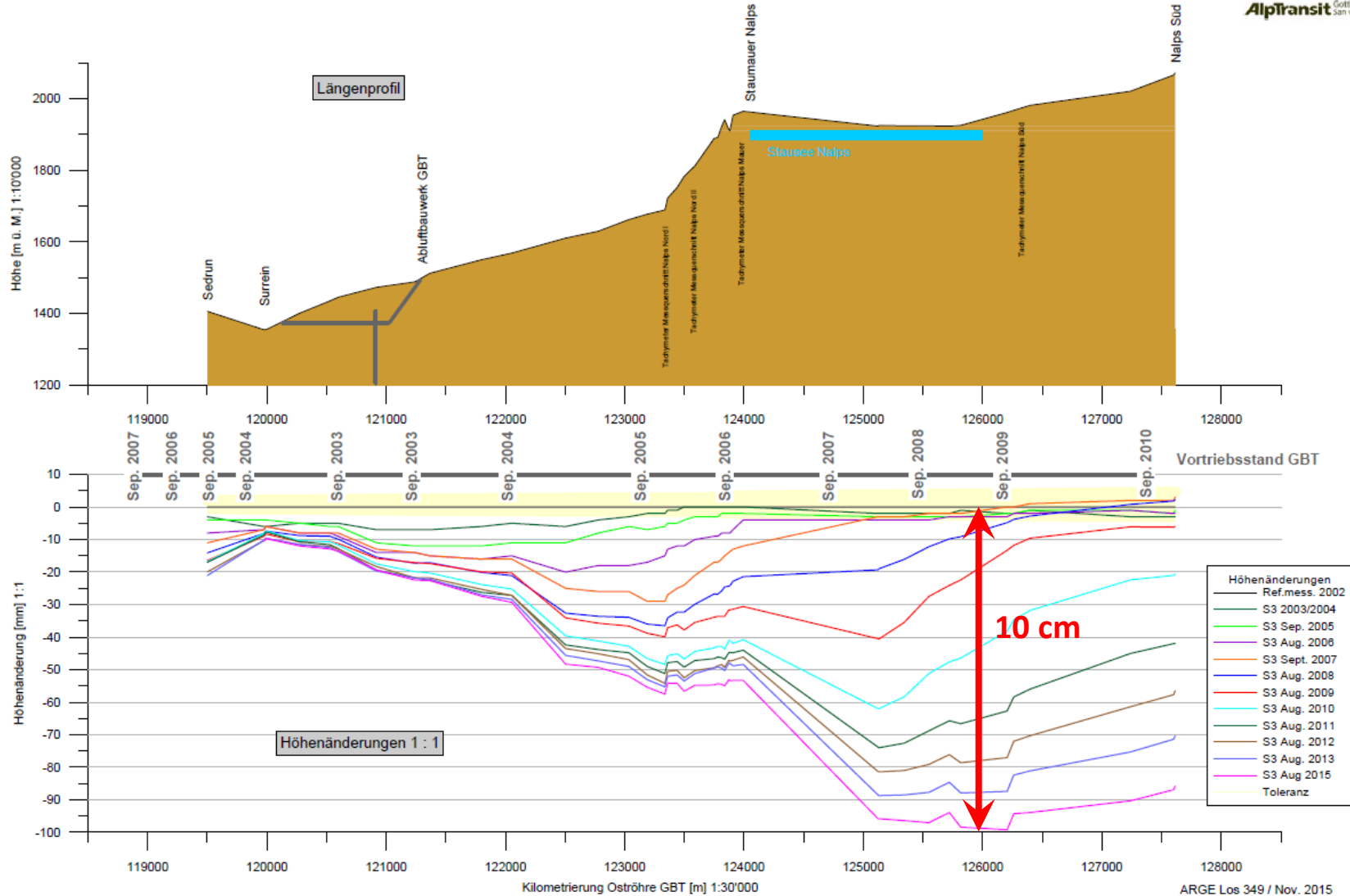
Ursache: Entwässerung des Gebirges durch den Tunnelvortrieb → sich schliessende Klüfte



## Setzungen im Bereich des Stausees Nalps 2002 bis 2015

Längenprofil entlang der Oströhre des GBT

Längenprofil 1/4: Sedrun - Nalps Süd



# Realisierung der AlpTransit Gotthard-Achse

---

Youtube-Empfehlung:  
«20 Jahre AlpTransit Gotthard AG»