

Was bewegt sich wie?

Geodätische Referenzsysteme als Grundlage für die Erdsystemforschung

Dr.-Ing. Mathis Bloßfeld

Technische Universität München

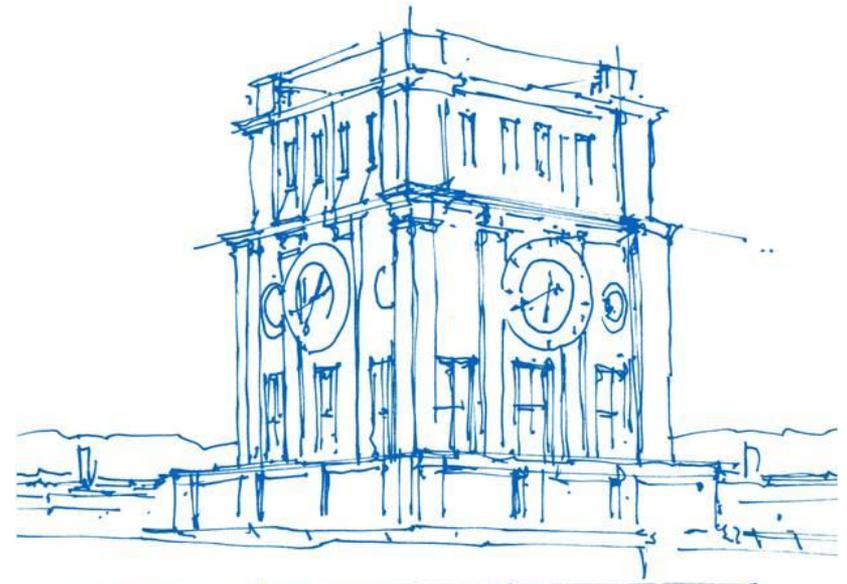
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut

(DGFI-TUM, www.dgfi.tum.de)

Geodätisches Kolloquium

Oldenburg, 17. Januar 2019

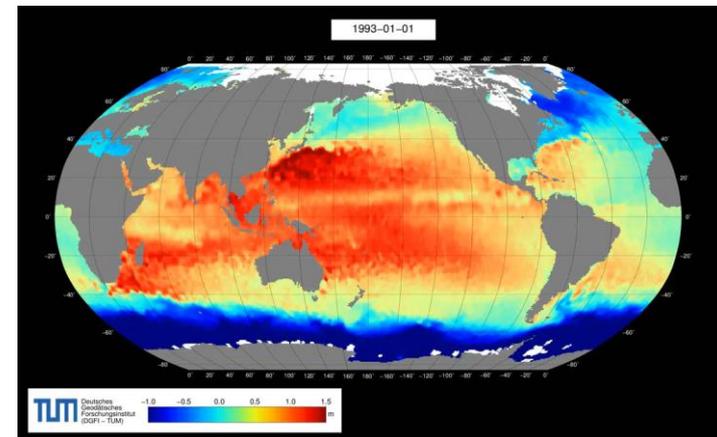
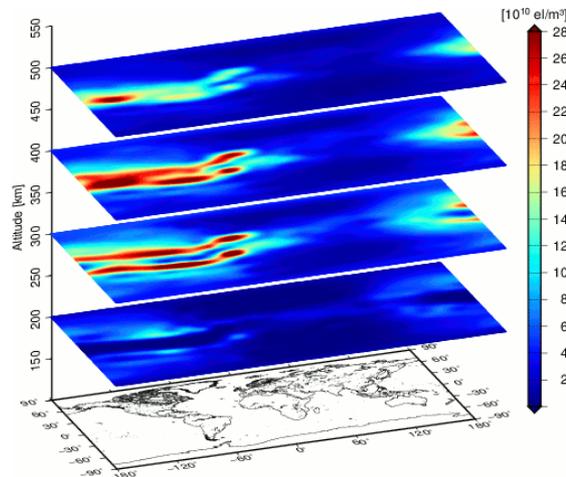
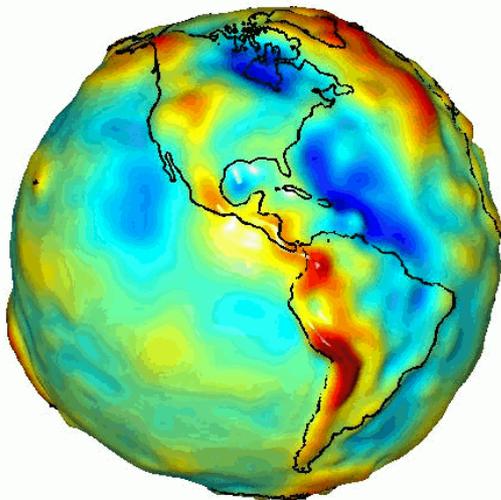


Uhrenturm der TUM

Was bewegt sich wie?

- Diese Frage kann so nicht beantwortet werden!
- *Nach Kovalevsky (1989)*

*“The Earth, its environment and the celestial bodies in the universe are not static: they move, rotate and undergo deformations. ... Motions and positions are not absolute concepts and can be described only **with respect to some reference!**”*



Was bewegt sich wie?

- Diese Frage kann so nicht beantwortet werden!

- *Nach Kovalevsky (1989)*
 - “The Earth, its environment and the celestial bodies in the universe are not static: they move, rotate and undergo deformations. ... Motions and positions are not absolute concepts and can be described only **with respect to some reference!**”*

- Eine Bewegung ist also immer eine Relativbewegung bezüglich einer (möglichst) stabilen Referenz.

- Folgen für die Erdsystemforschung – 2 prinzipielle Schritte nötig!
 1. **Definition** und **Realisierung** eines Referenzsystems
 2. **Beschreibung/Beobachtung** von Prozessen im System Erde relativ zur Referenz

Wie ist das generelle Konzept?

Definition des
Referenzsystems



Realisierung des
Referenzsystems

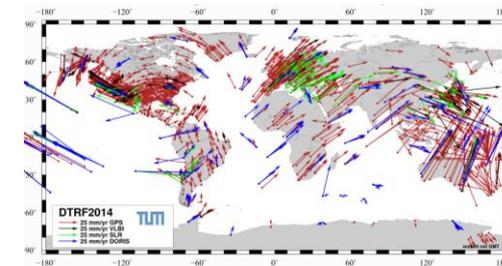
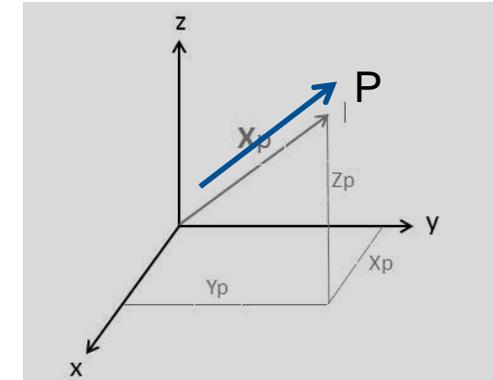


Regionale / nationale
Verdichtungen

- Koordinatensystem (z.B. 3-D kartesisch)
- Konstanten (Gravitationskonstante GM , Lichtgeschwindigkeit c , Maßstab m , ...)
- Geophysikalische Modelle (z.B., Erd- und Ozeangezeiten, ...)

- Referenzpunkte auf der Erde
- Bestimmung von Koordinaten und Geschwindigkeiten der Referenzpunkte mittels geodätischer Methoden

- Regionale (kontinentale) Referenzsysteme (Europa, Asien, Afrika, Nord-/Südamerika)
- Nationale Verdichtungen
- Lokale Referenzsysteme (z.B. für Bauwerksüberwachung)



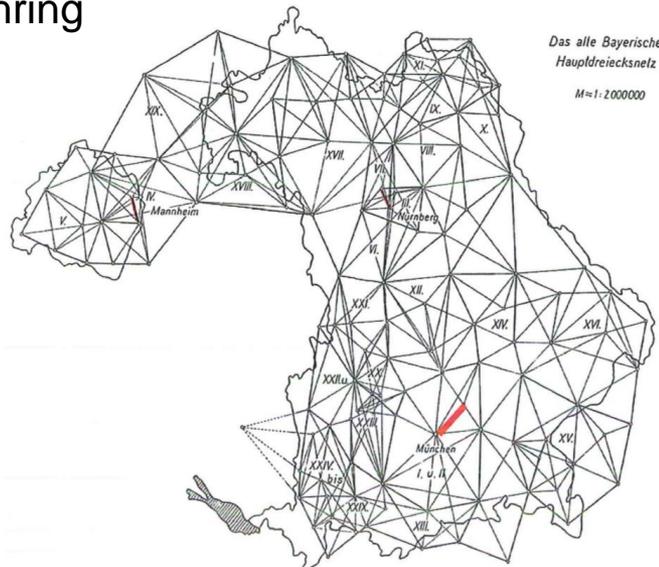
EUREF Permanent Tracking Network
Stations included in the ITRF2014



Definition geodätischer Referenzsysteme

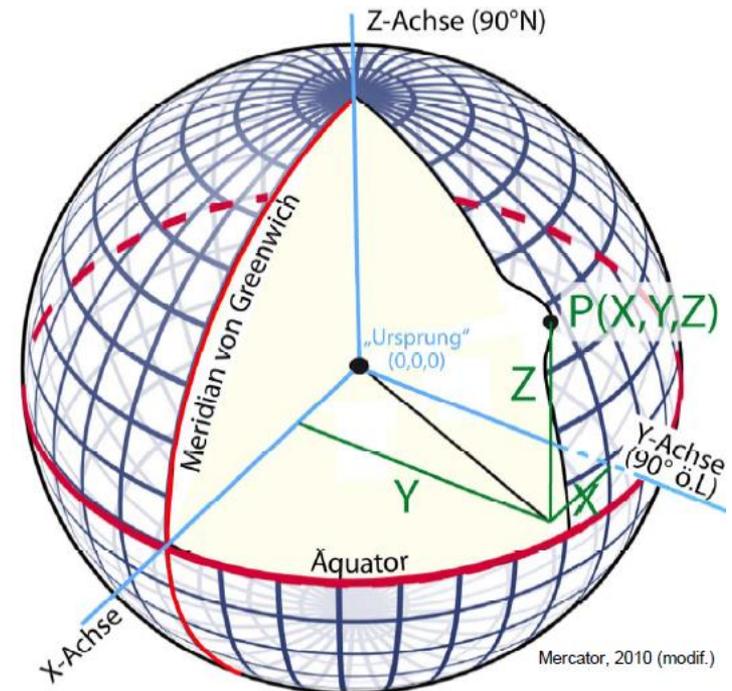
Früher - lokal/regional

- Bsp.: Bayerisches Hauptdreiecksnetz
- Referenzpunkt: Nordturm der Frauenkirche
- Basispyramide Oberföhring



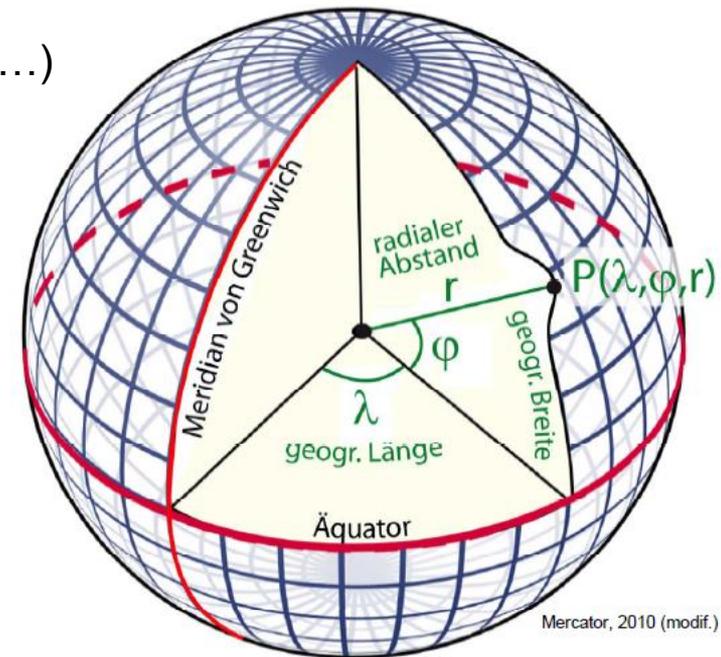
Heute - global

- Bsp.: Globales Referenzsystem
- Bezug zum Massenzentrum der Erde (Geozentrum)
- Referenzsystem soll erdfest (mitdrehend) sein!



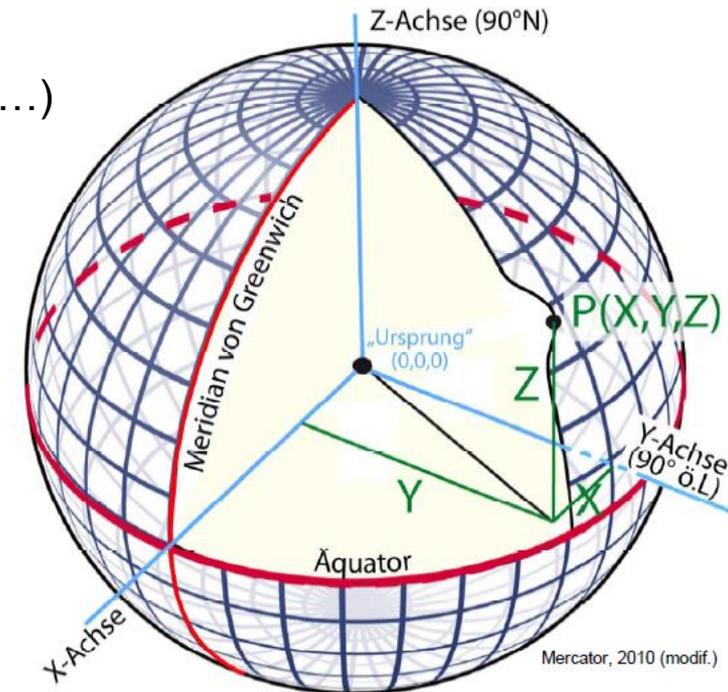
Das internationale Terrestrische Referenzsystem

- Das **ITRS** ist das fundamentale globale **terrestrische Koordinatensystem**
- Definition (= theoretisches Konzept):
 - 3-dimensionales System (geographisch, kartesisch, ...)
 - der Ursprung ist das Massenzentrum der Erde
 - Maßstab (Längeneinheit) ist der Meter
 - z-Achse ist die mittlere Erdrotationsachse
 - x- und y-Achse liegen in der Äquatorebene
 - x-Achse weist in Richtung Greenwich-Meridian



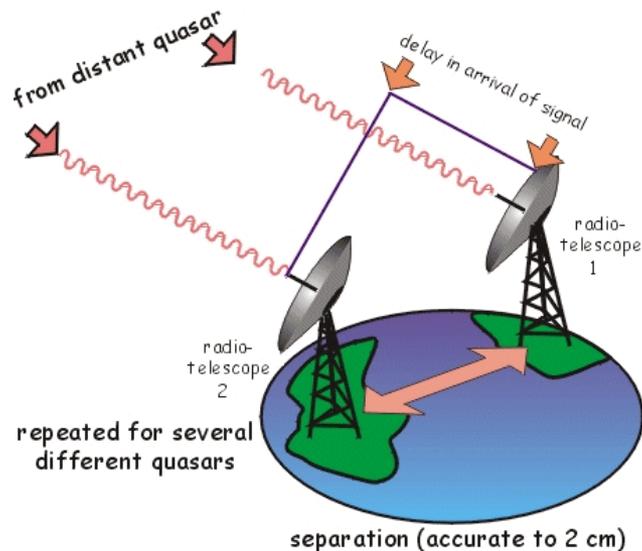
Das internationale Terrestrische Referenzsystem

- Das **ITRS** ist das fundamentale globale **terrestrische Koordinatensystem**
- Definition (= theoretisches Konzept):
 - 3-dimensionales System (geographisch, kartesisch, ...)
 - der Ursprung ist das Massenzentrum der Erde
 - Maßstab (Längeneinheit) ist der Meter
 - z-Achse ist die mittlere Erdrotationsachse
 - x- und y-Achse liegen in der Äquatorebene
 - x-Achse weist in Richtung Greenwich-Meridian
- Weitere Beispiele:
 - Internationales Zälestisches Referenzsystem (**ICRS**)
 - Terrestrisches Schwere-Referenzsystem (**GTRS**)
- Definitionen von Referenzsystemen können abstrakt sein, d.h. nur theoretisch realisierbar!



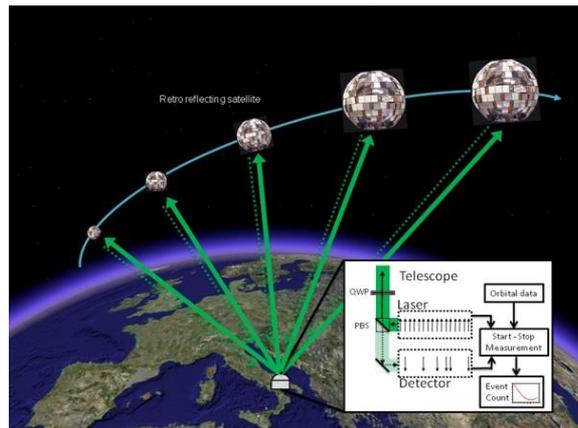
Die Realisierung des ITRS – der ITRF

- Das ITRS wird realisiert durch Koordination und Geschwindigkeiten (Bewegungen) von Referenzpunkten auf der Erdoberfläche → ITRF.
- **ITRF** bedeutet **Internationaler Terrestrischer Referenzrahmen**
- Geodätische Raubeobachtungsverfahren
 - Very Long Baseline Interferometry (**VLBI**)



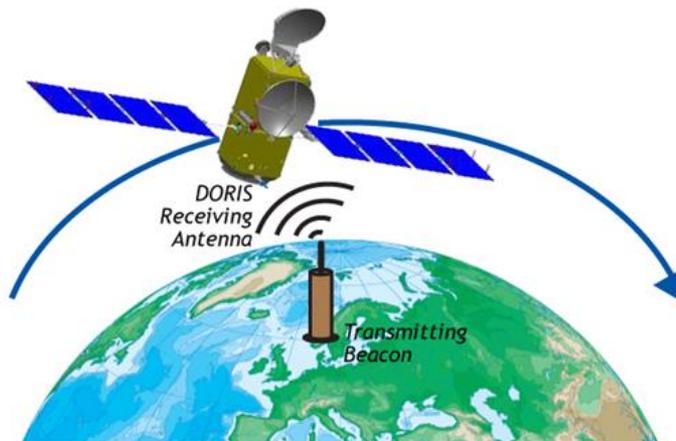
Die Realisierung des ITRS – der ITRF

- Das ITRS wird realisiert durch Koordination und Geschwindigkeiten (Bewegungen) von Referenzpunkten auf der Erdoberfläche → ITRF.
- **ITRF** bedeutet **Internationaler Terrestrischer Referenzrahmen**
- Geodätische Raubeobachtungsverfahren
 - Very Long Baseline Interferometry (**VLBI**)
 - Satellite Laser Ranging (**SLR**)



Die Realisierung des ITRS – der ITRF

- Das ITRS wird realisiert durch Koordination und Geschwindigkeiten (Bewegungen) von Referenzpunkten auf der Erdoberfläche → ITRF.
- **ITRF** bedeutet **Internationaler Terrestrischer Referenzrahmen**
- Geodätische Raubeobachtungsverfahren
 - Very Long Baseline Interferometry (**VLBI**)
 - Satellite Laser Ranging (**SLR**)
 - Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (**DORIS**)

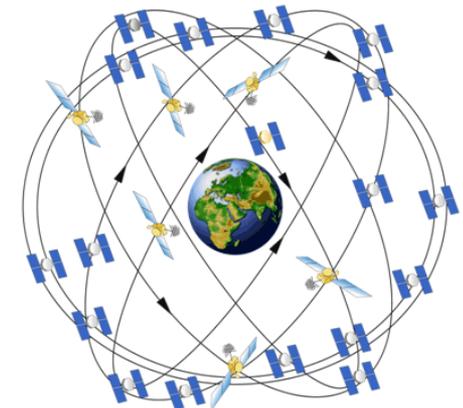
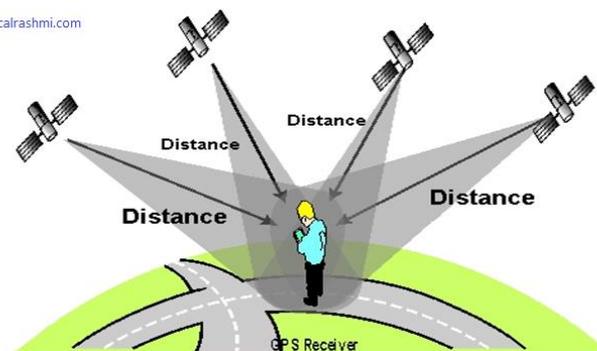


Die Realisierung des ITRS – der ITRF

- Das ITRS wird realisiert durch Koordination und Geschwindigkeiten (Bewegungen) von Referenzpunkten auf der Erdoberfläche → ITRF.
- **ITRF** bedeutet **Internationaler Terrestrischer Referenzrahmen**
- Geodätische Raumberechnungsverfahren
 - Very Long Baseline Interferometry (**VLBI**)
 - Satellite Laser Ranging (**SLR**)
 - Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (**DORIS**)
 - Global Navigation Satellite Systems (**GNSS**, z.B. GALILEO, GPS, GLONASS, ...)

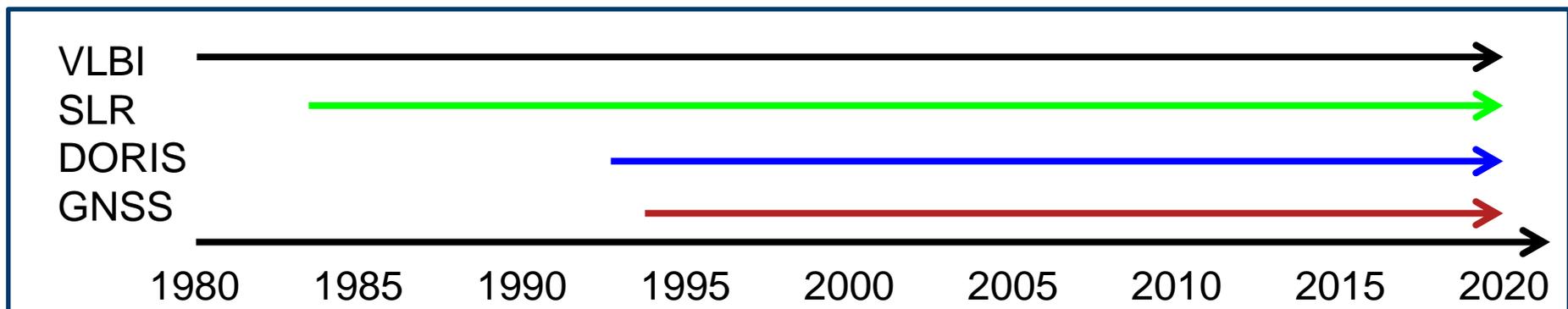


technicalrashmi.com



Die Realisierung des ITRS – der ITRF

- Das ITRS wird realisiert durch Koordination und Geschwindigkeiten (Bewegungen) von Referenzpunkten auf der Erdoberfläche → ITRF.
- **ITRF** bedeutet **Internationaler Terrestrischer Referenzrahmen**
- Geodätische Raubeobachtungsverfahren
 - Very Long Baseline Interferometry (**VLBI**)
 - Satellite Laser Ranging (**SLR**)
 - Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (**DORIS**)
 - Global Navigation Satellite Systems (**GNSS**, z.B. GALILEO, GPS, GLONASS, ...)



40 Jahre Messdaten... wozu?

- Notwendig um die ITRF-Anforderungen zu erfüllen...

Höchste Genauigkeit, Langzeitstabilität, Aktualität

(**1 mm** für Positionen (3-D), **0.1 mm/Jahr** für Geschwindigkeiten)

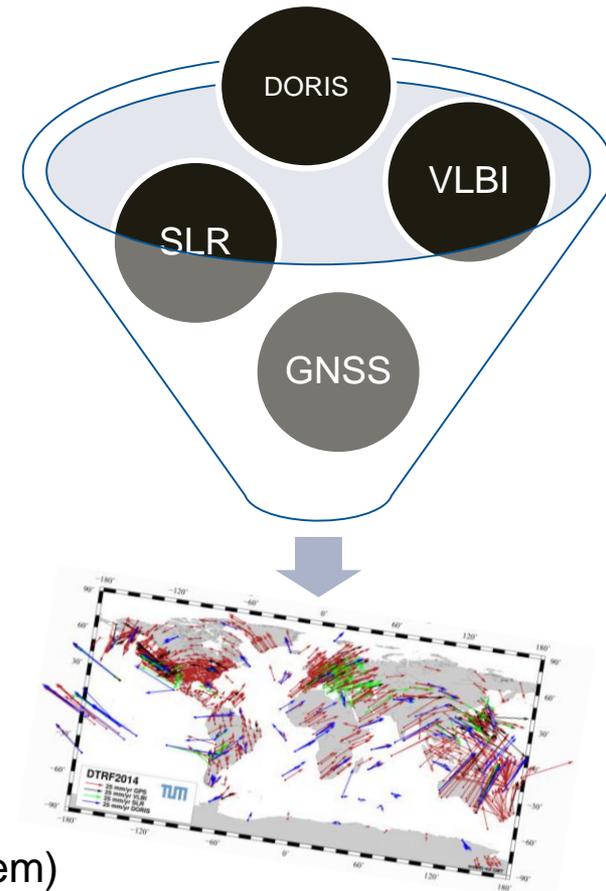
- Stationspositionen und Geschwindigkeiten werden durch die Messdaten in einer **mathematischen Ausgleichung** bestimmt.

ABER:

- Dynamische Prozesse verändern die Erdoberfläche ständig. Daher sind die Koordinaten **zeitabhängig**. Funktionen erlauben die zeitliche Extrapolation von Koordinaten.
- Erdbeben können eine Realisierung in einem großen Gebiet **vollkommen unbrauchbar** machen.
- Das ITRS muss immer wieder neu realisiert werden (alle **5-6 Jahre**). Dabei werden auch neue Stationen integriert und neueste Standards und Modelle implementiert.

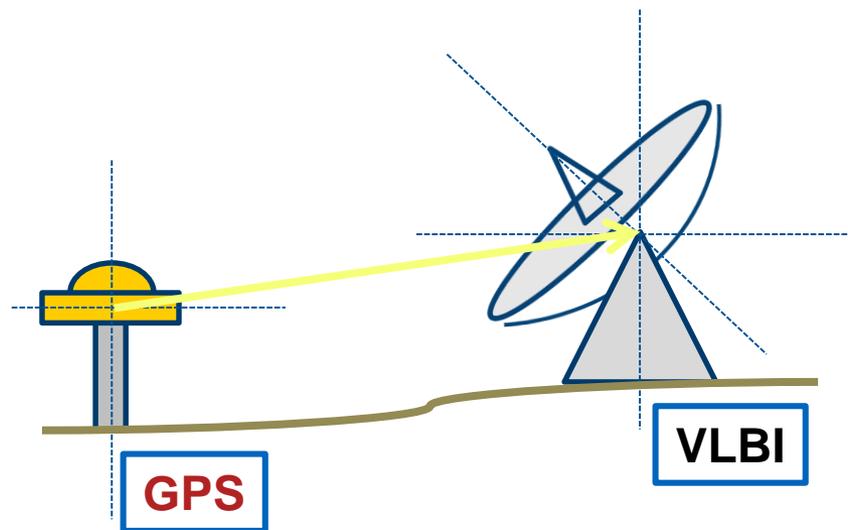
Stärken nutzen durch Kombination

- VLBI (Radiointerferometrie auf langen Basislinien)
 - absolute **Orientierung** des ITRF im Weltraum (Bezug zum raumfesten Referenzsystem, Erdrotation)
- SLR (Laserentfernungsmessung zu Satelliten)
 - Bahnbestimmung für niedrig fliegende Satelliten mit hoher Sensitivität für die Lage des Massenzentrums der Erde (**ITRF-Ursprung**)
- GNSS (Globale Satelliten-Navigationssysteme)
 - Kostengünstige Instrumente, einfache Handhabung, hohe Genauigkeit, **Verdichtung des Stationsnetzes**
- DORIS (Doppler-Positionierungs- und Bahnbestimmungssystem)
 - Datentransfer via Satellit, keine Internetverbindung nötig, geeignet für **entlegene Standorte** (z.B. Inseln), sehr homogene globale Abdeckung



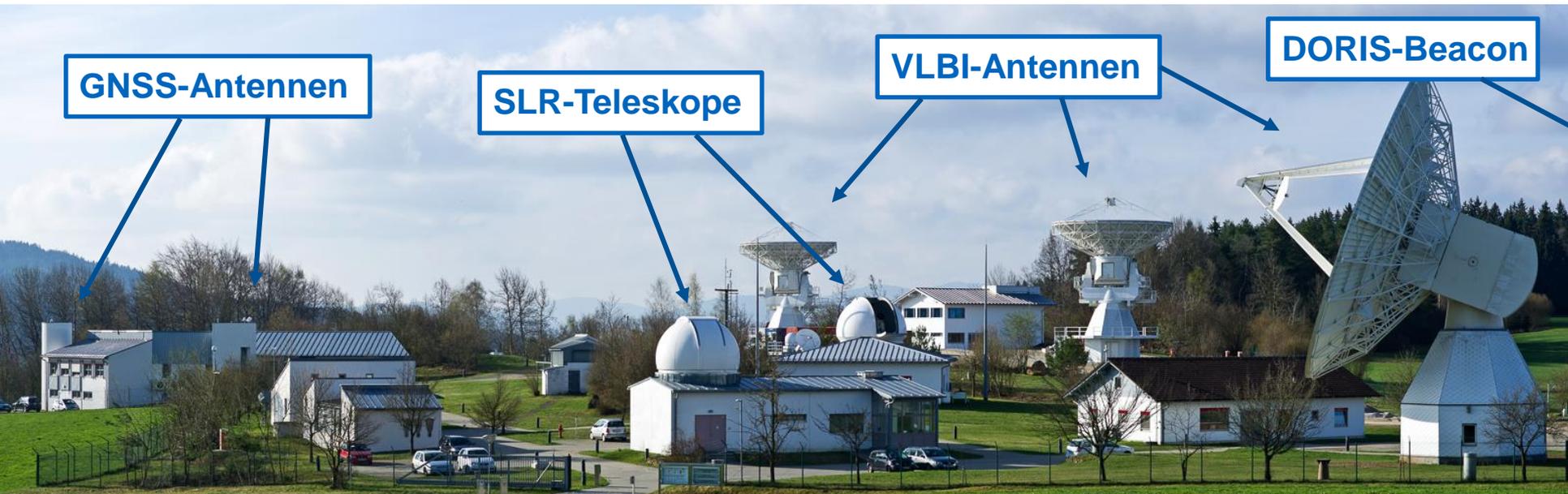
Kombination als ingenieurgeodätische Aufgabe

- Die Beobachtungen der Weltraumtechniken beziehen sich nicht auf identische Referenzpunkte am Boden
- Es sind zusätzliche Messungen am Boden für die Kombination, so genannte “**local ties**” notwendig
- Die “local ties” werden als **zusätzliche Bedingungen** in die mathematische Ausgleichung eingeführt

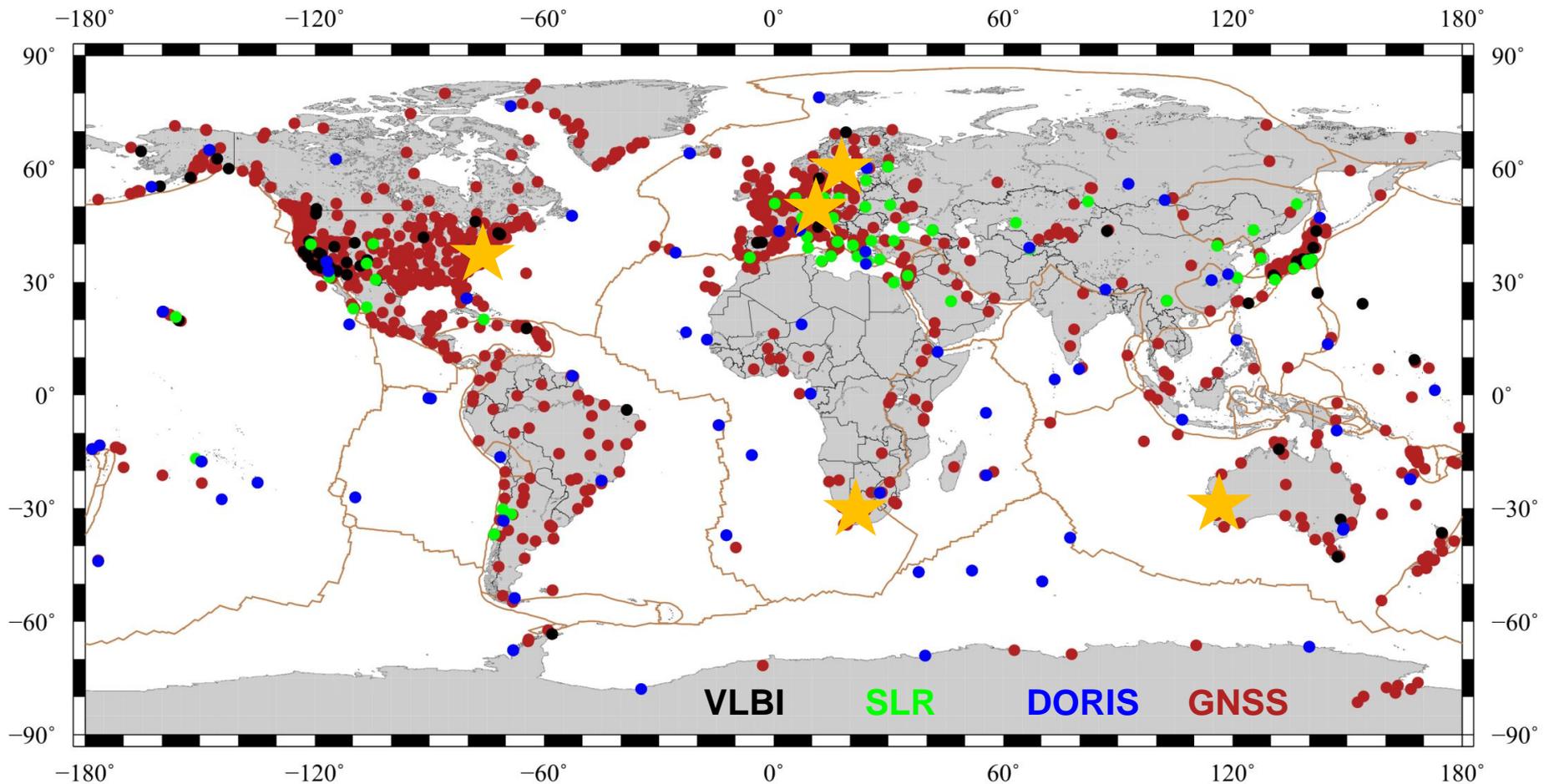


Das Geodätische Observatorium Wettzell

- Das Geodätische Observatorium Wettzell (Bad Kötzing, Bayerischer Wald) wird betrieben von
 - **Bundesamt für Kartographie und Geodäsie** (Frankfurt a. M.)
 - **Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie** (TUM, München)
- Wettzell ist eine so genannte **Fundamentalstation** (alle Techniken an einem Ort)



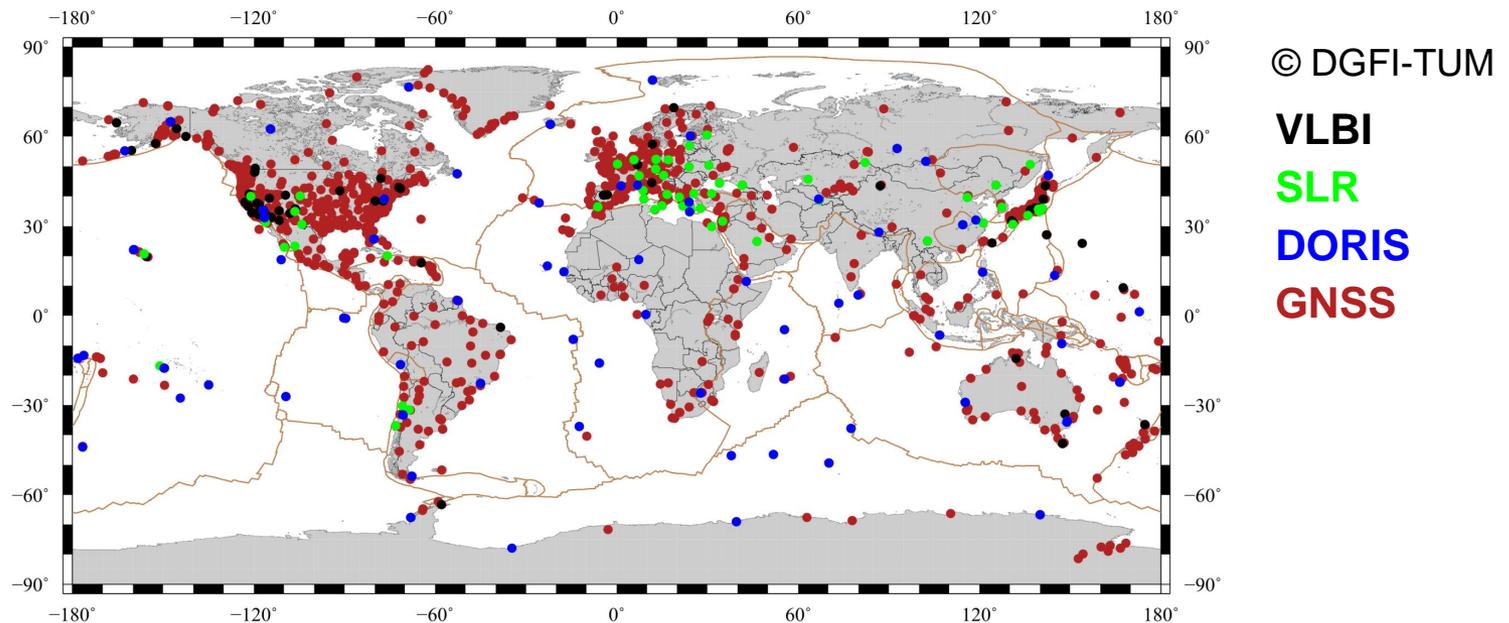
Globale Verteilung von Beobachtungsstationen



Washington, Wetzell, Metsahovi, Hartebeesthoek, Yarragaddee

© DGFI-TUM

Globale Verteilung von Beobachtungsstationen

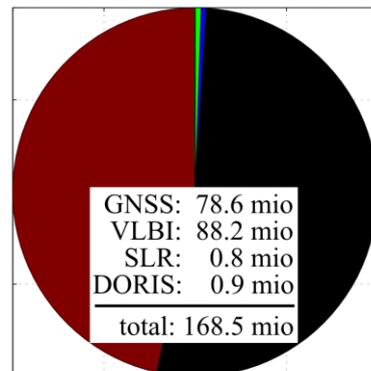


- Die ungleichmäßige Stationsverteilung ist einer der die erreichbare Genauigkeit am **stärksten limitierenden Faktoren!**
 - Genauigkeit aktueller Realisierungen:
 - rund **5 mm** (Position) bzw.
 - **0,5-0,8 mm/Jahr** (Geschwindigkeiten)
- } **Faktor 5 schlechter** als Anforderungen!!

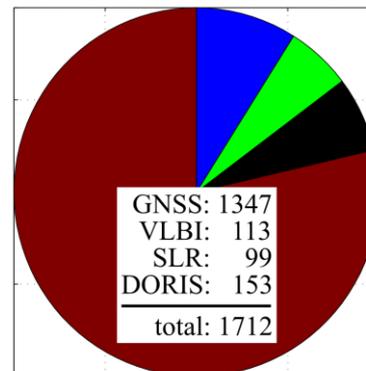
DGFI-TUM Realisierung des ITRS - DTRF2014

- Die Realisierung des ITRS ist eine Aufgabe des Internationalen Erdrotations- und Referenzsystemdienstes (**IERS**)
- Das DGFI-TUM ist eines von **drei Kombinationszentren weltweit** (neben IGN in Paris und JPL in Pasadena), die eine ITRS-Realisierung rechnen
- Die Berechnung von Referenzrahmen auf diesem Genauigkeitsniveau erfordert eine starke **internationale Zusammenarbeit einer Vielzahl von Institutionen**:
 - Betrieb von Beobachtungsstationen und Datenzentren
 - Durchführung der Datenanalyse (Vorprozessierung, Auswertung und Kombination)

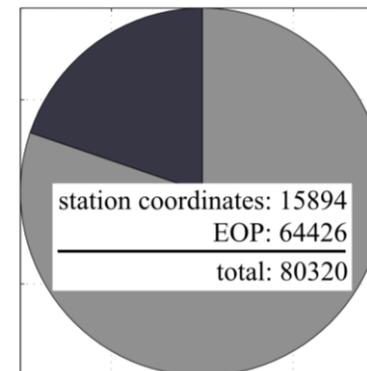
➤ Anzahl der Beobachtungen,



Stationen,

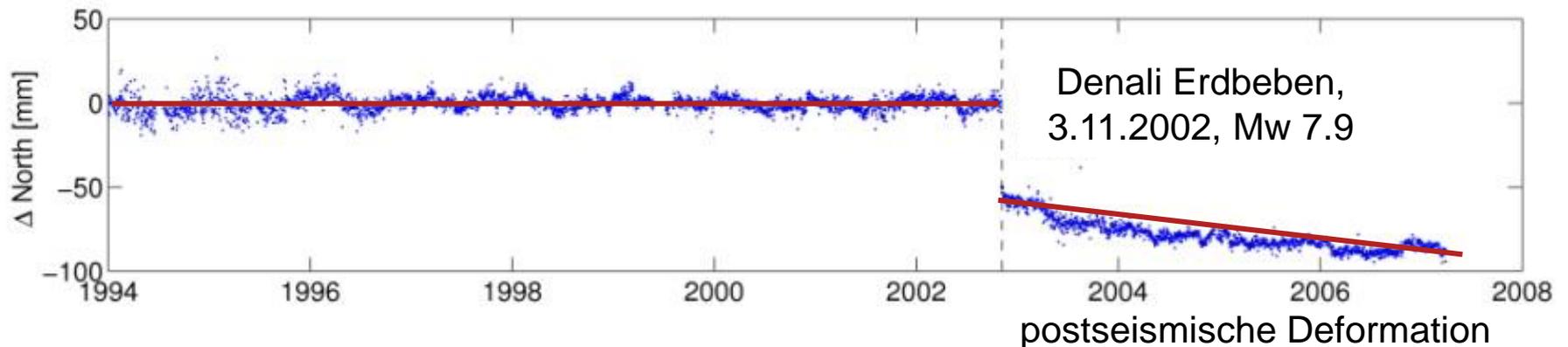


Unbekannten



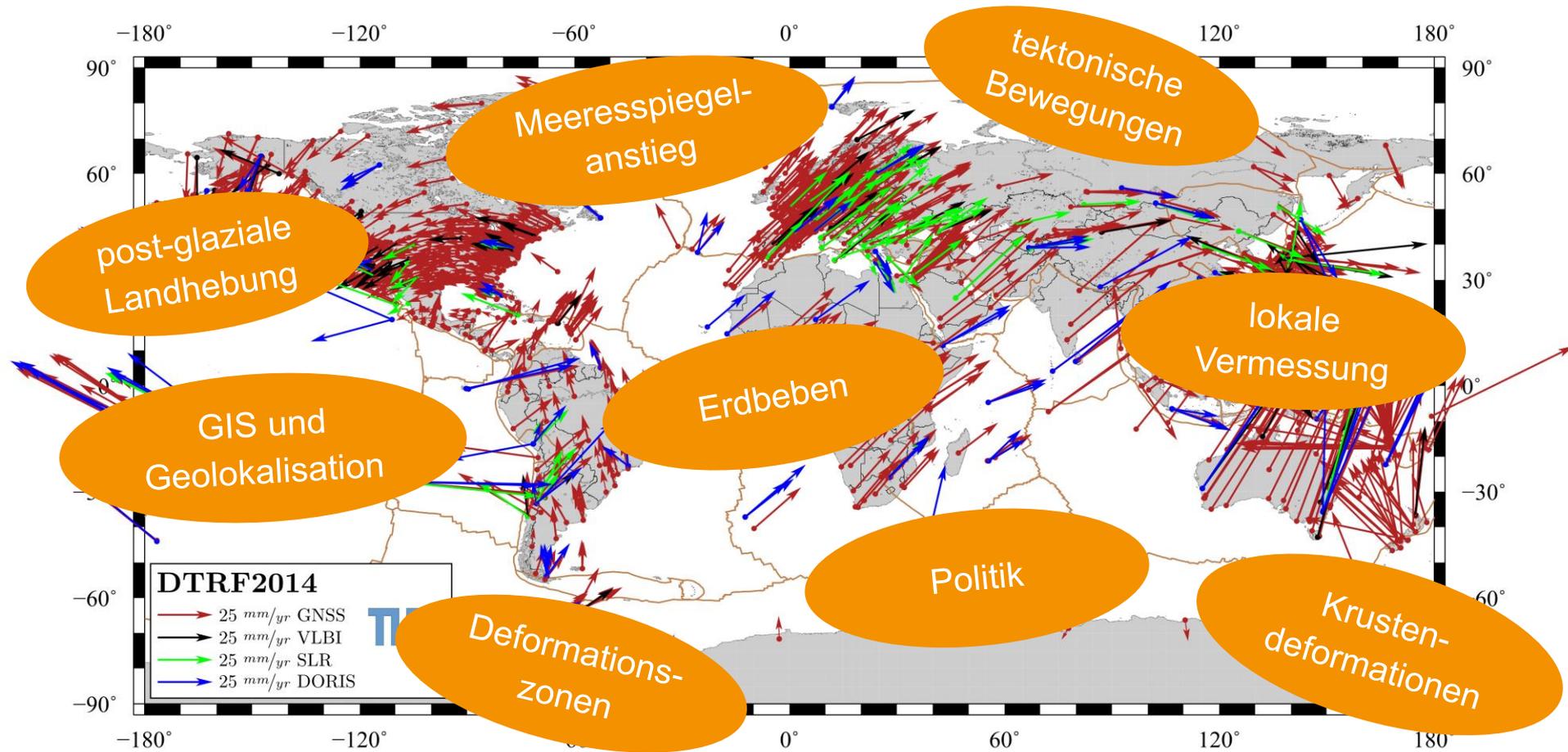
Station ist nicht gleich Station...

- Die Schätzung linearer Geschwindigkeiten setzt voraus, dass die Station keine „**Sprünge**“ vollzieht
- Analyse von Stationskoordinatenzeitreihen (Bsp.: **GNSS-Station** in Alaska)

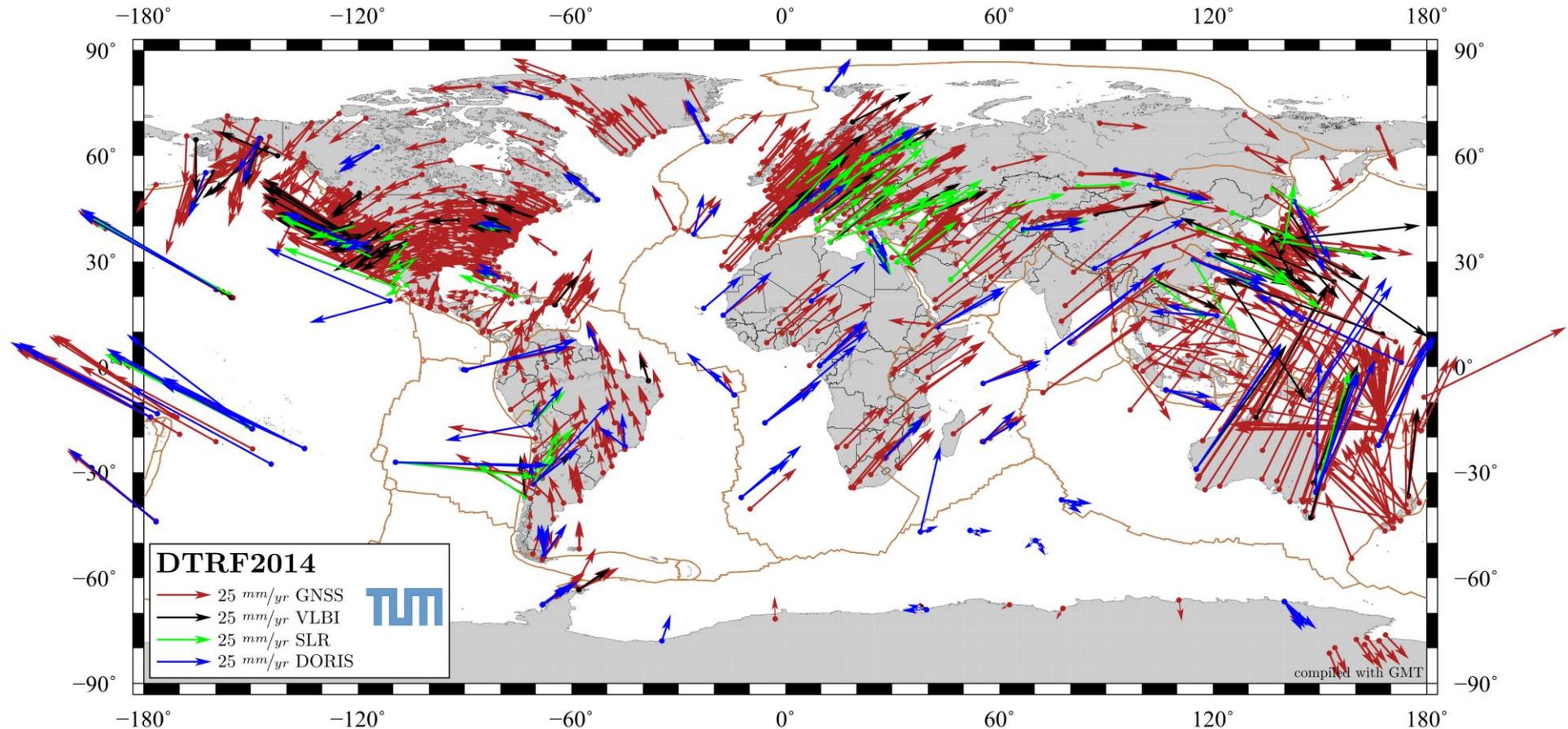


DTRF2014	# Stationen	# Sprünge
VLBI	113	47
SLR	99	35
GNSS	1353	1411
DORIS	153	55

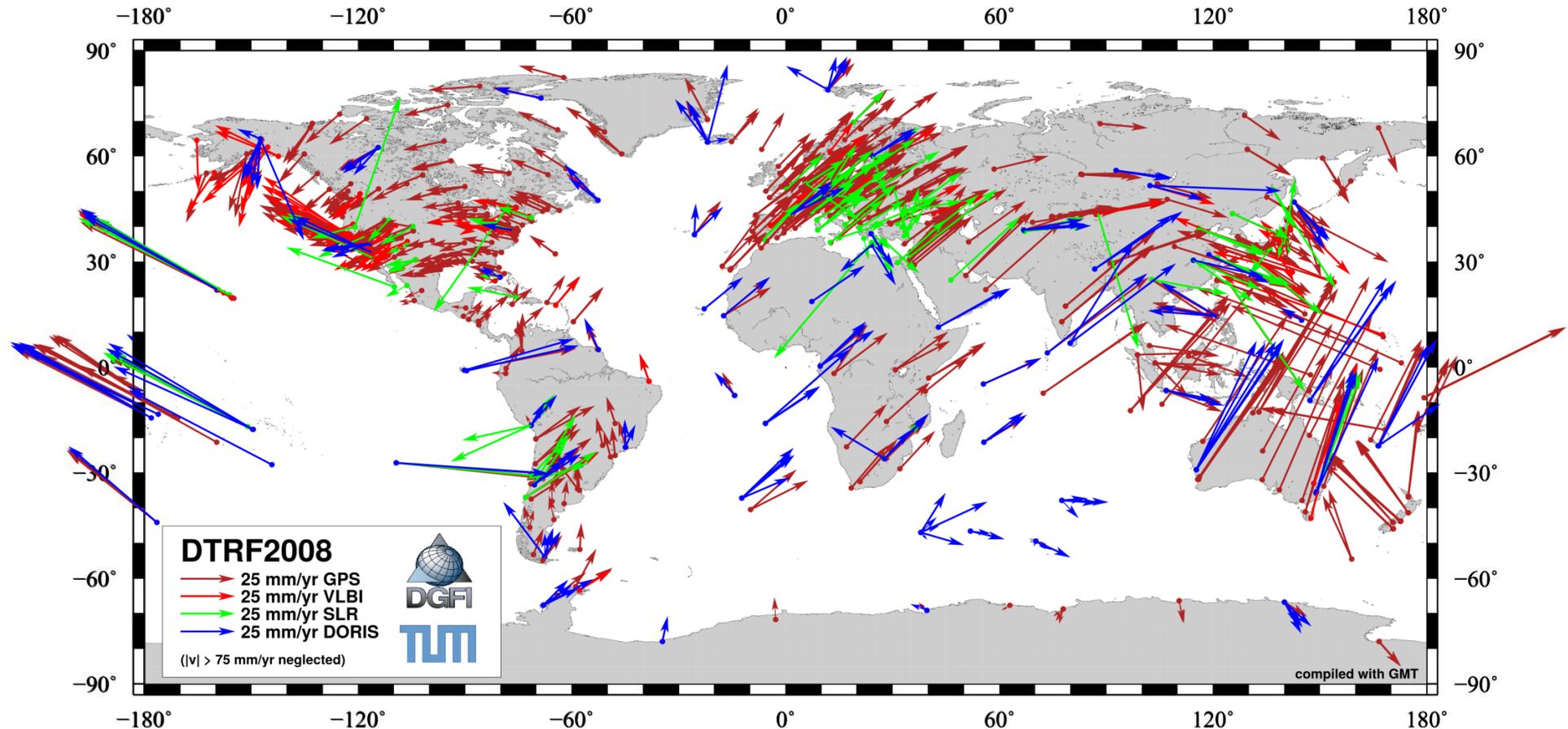
Referenzrahmen in der Erdsystemforschung



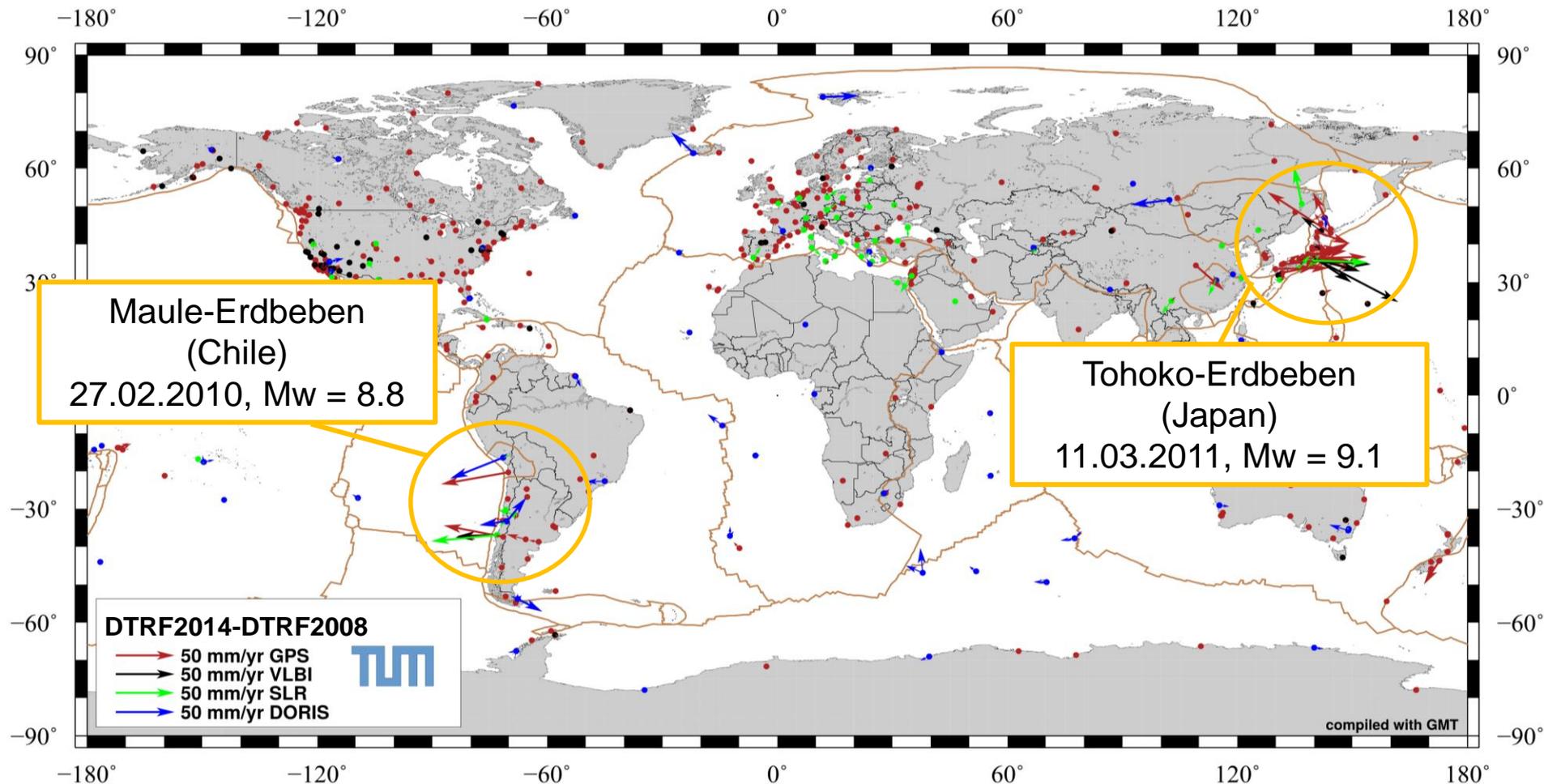
Tektonische Bewegungen – global, horizontal



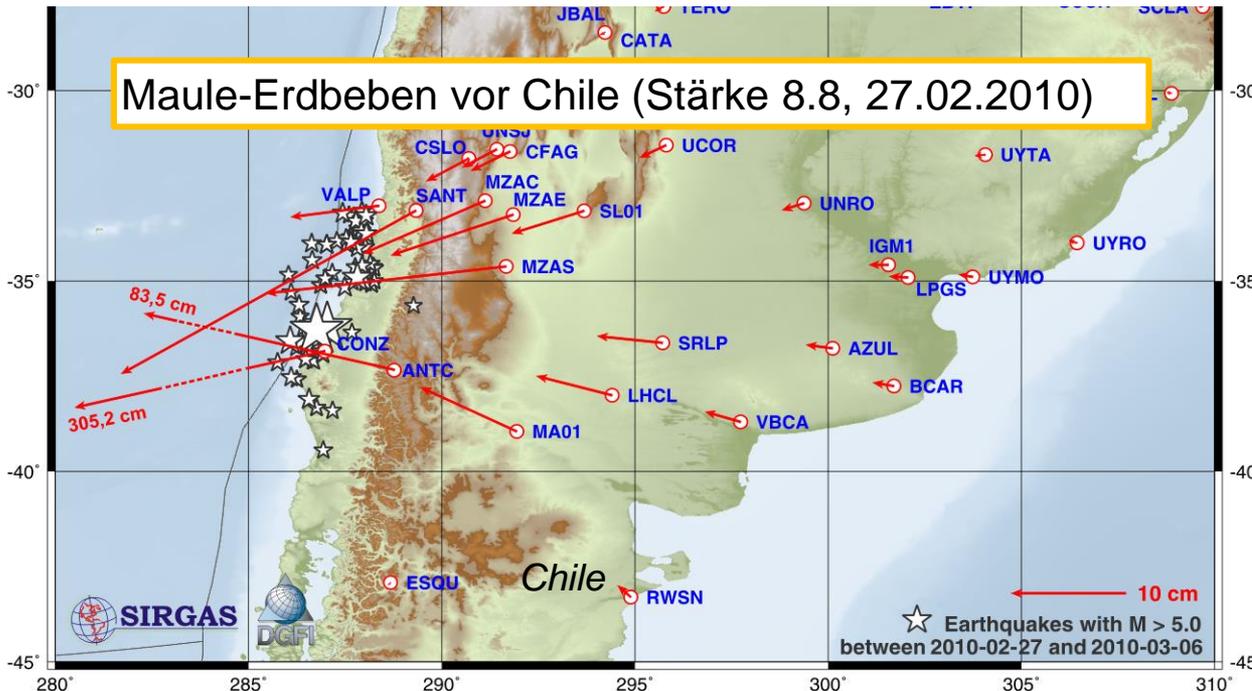
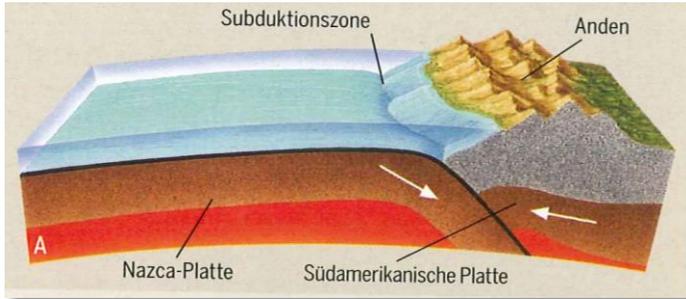
Unterschiede zwischen zwei Realisierungen



Unterschiede zwischen zwei Realisierungen



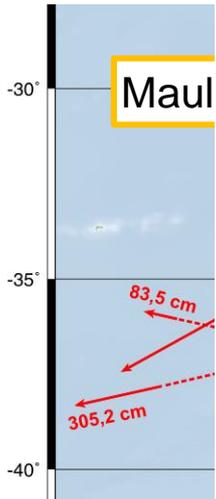
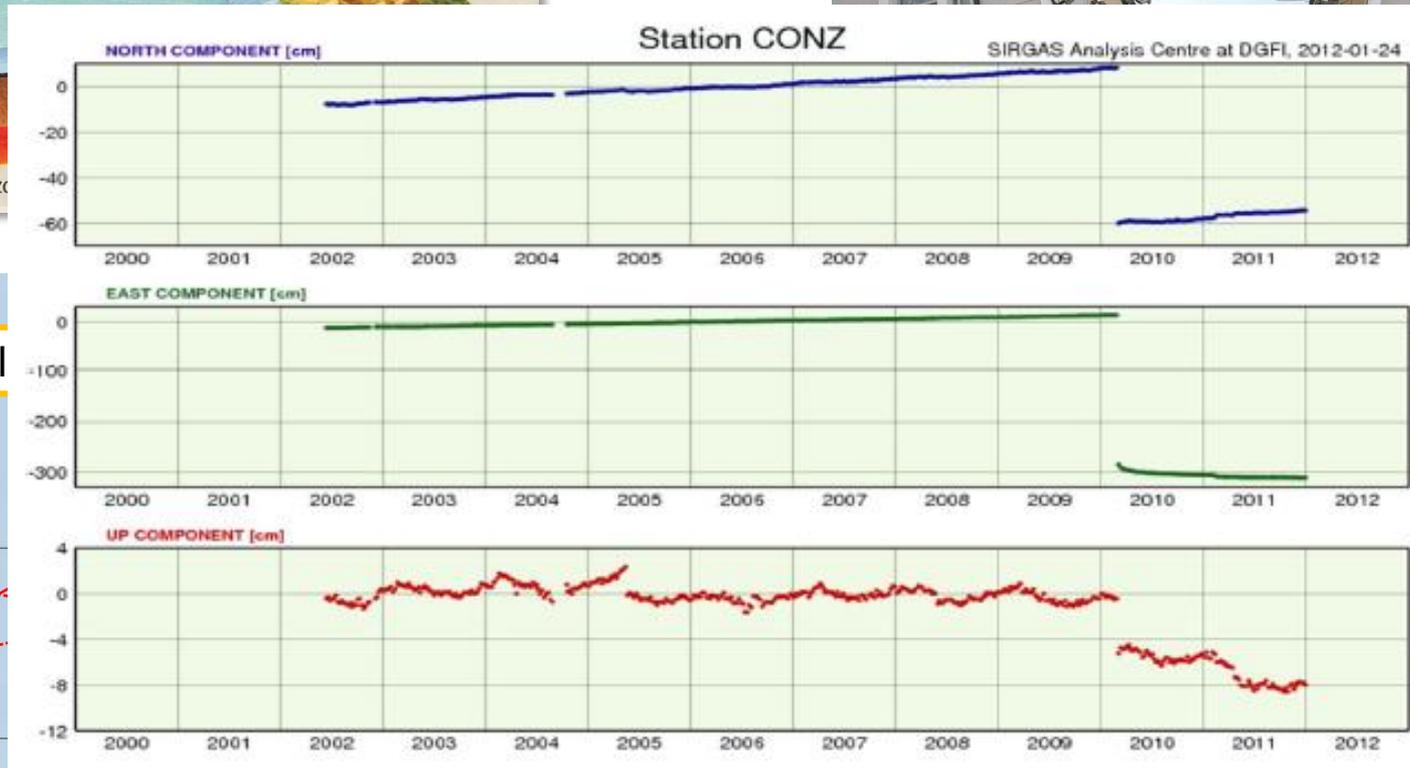
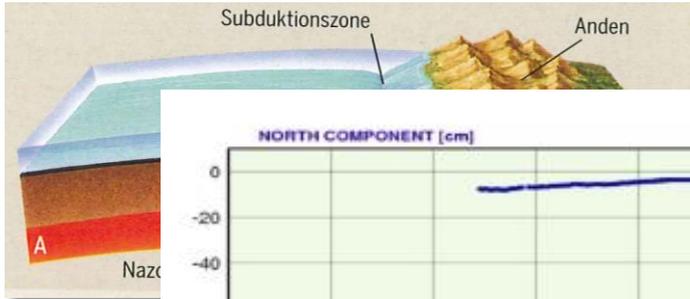
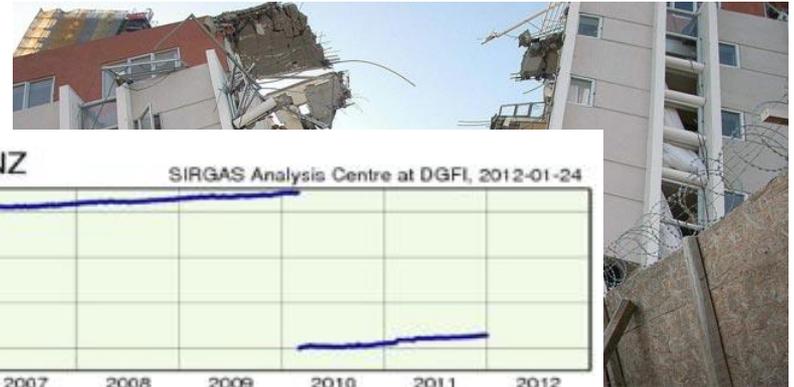
Erdbebenmonitoring



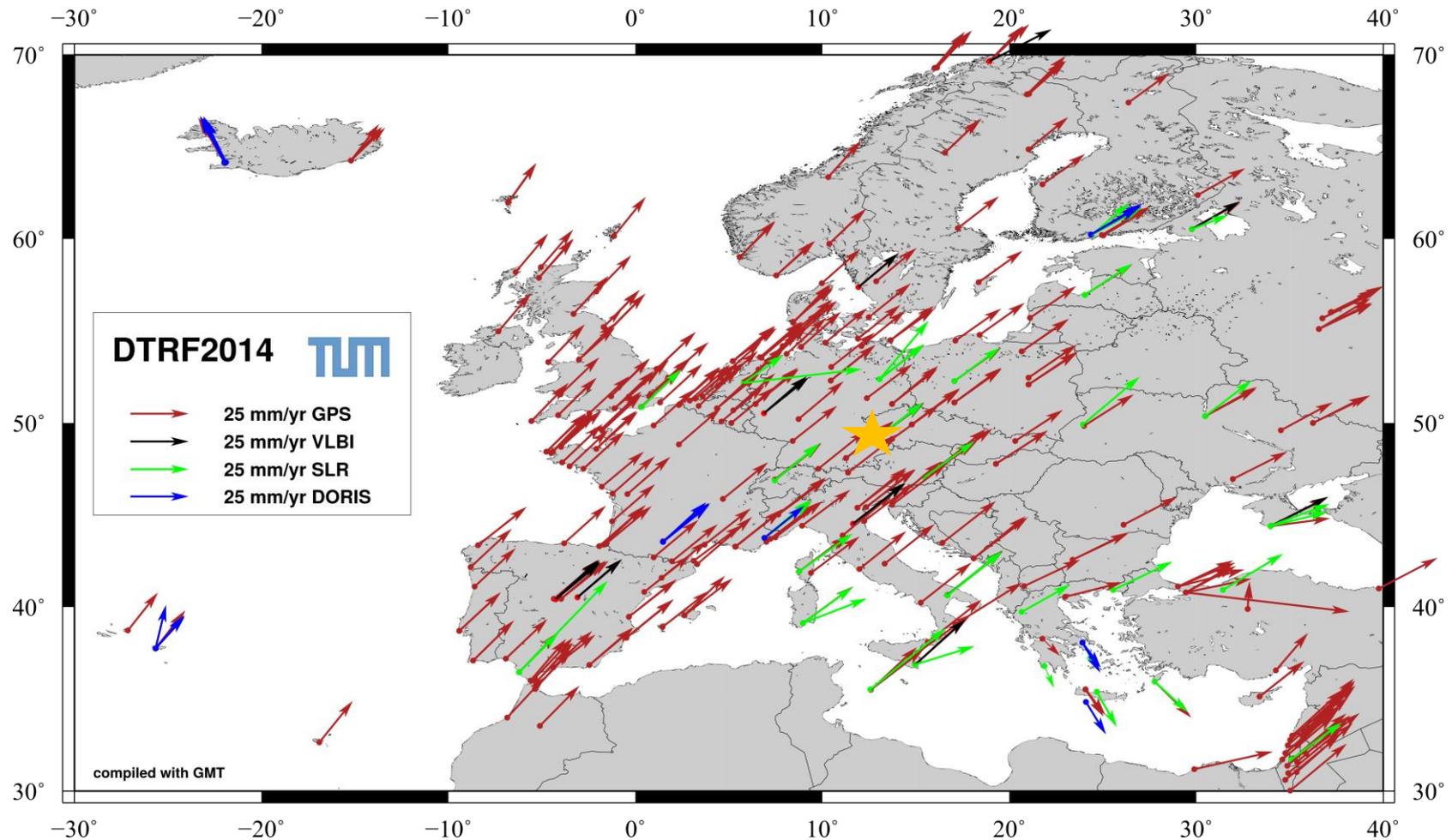
@ t-online.de



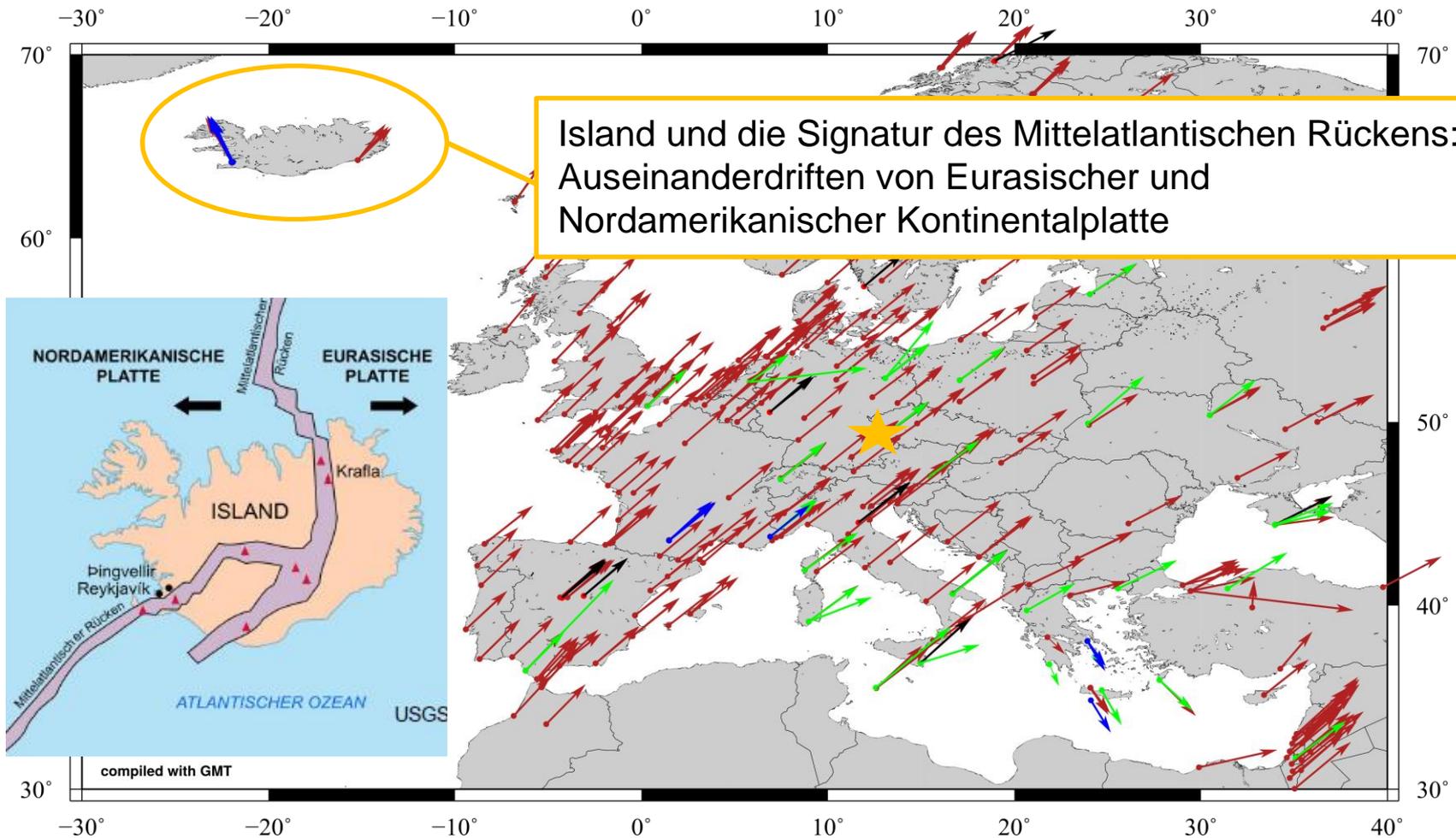
Erdbebenmonitoring



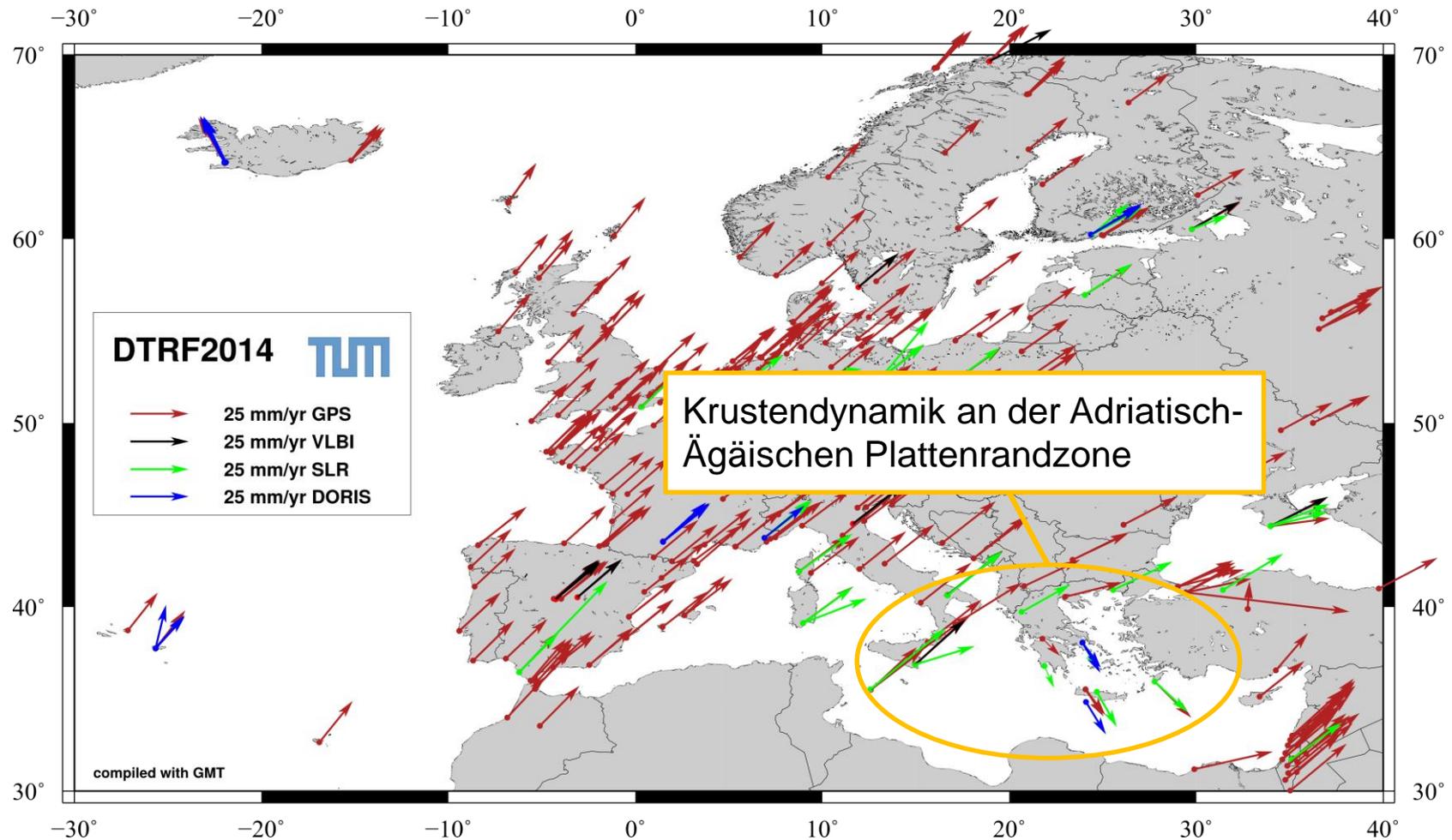
Tektonische Bewegungen – regional, horizontal



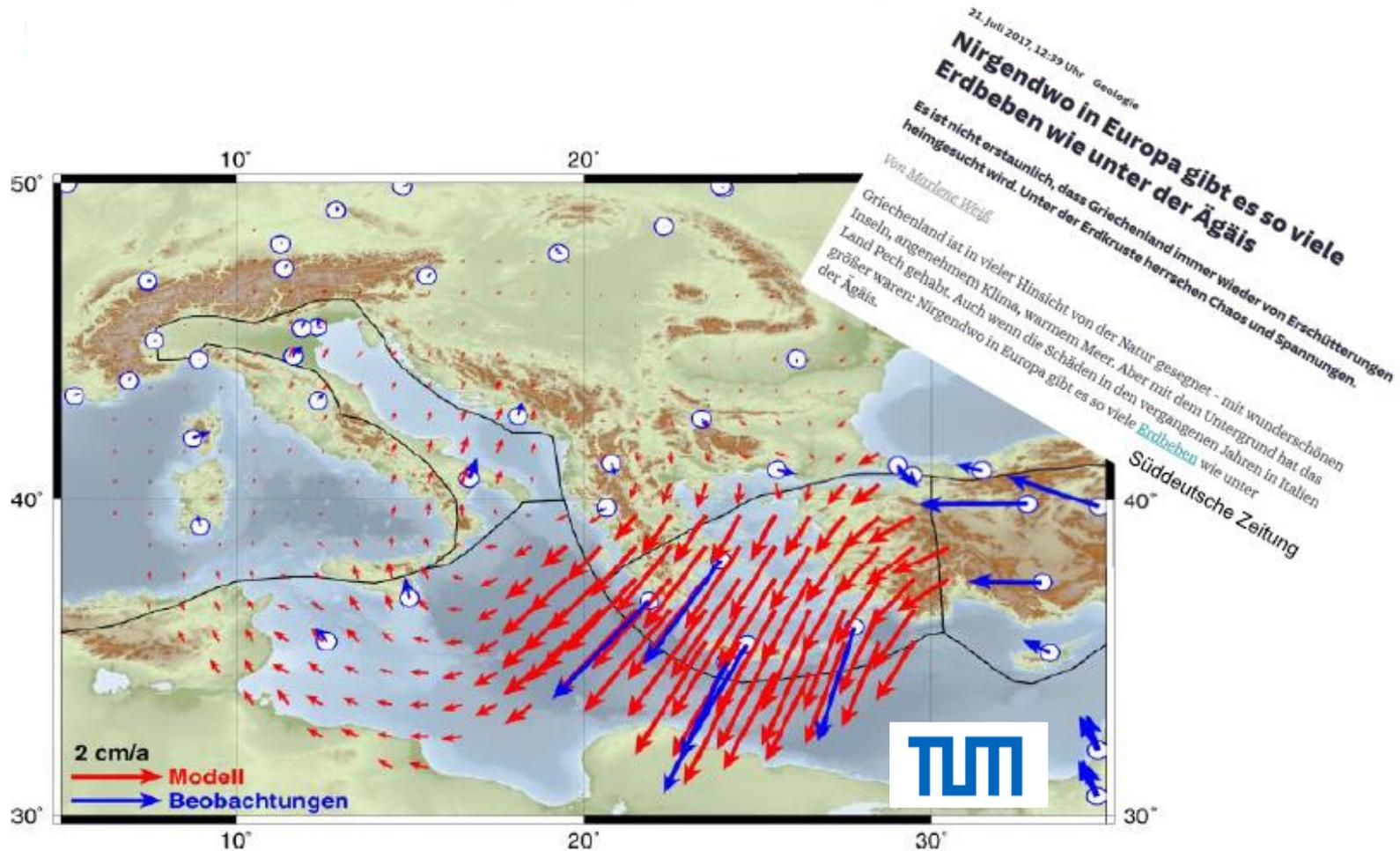
Tektonische Bewegungen – regional, horizontal



Tektonische Bewegungen – regional, horizontal

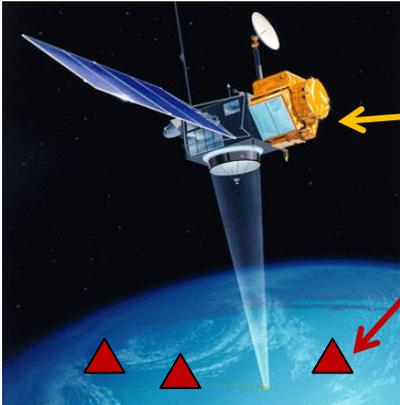


Tektonische Bewegungen – regional, horizontal



Deformationsmodell der Region Alpen-Adria-Ägäis
relativ zur Eurasischen Platte (Grundlage: DTRF)

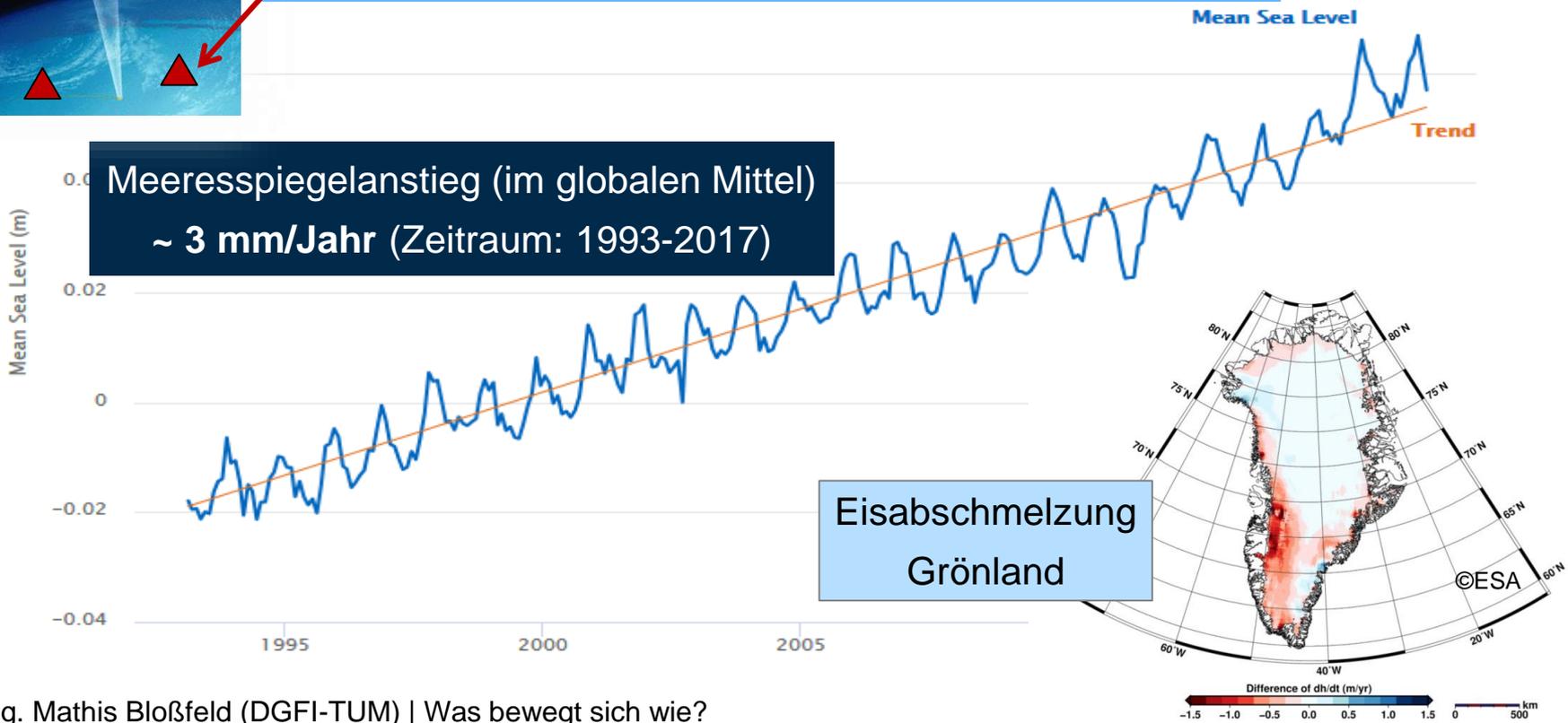
Mittlerer Meeresspiegelanstieg



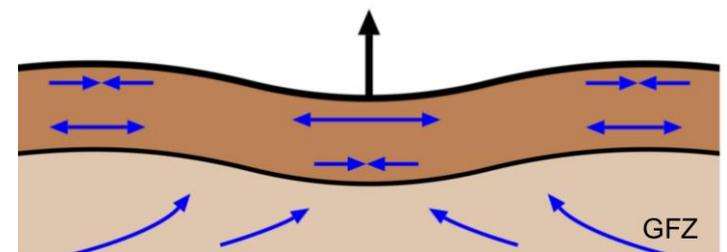
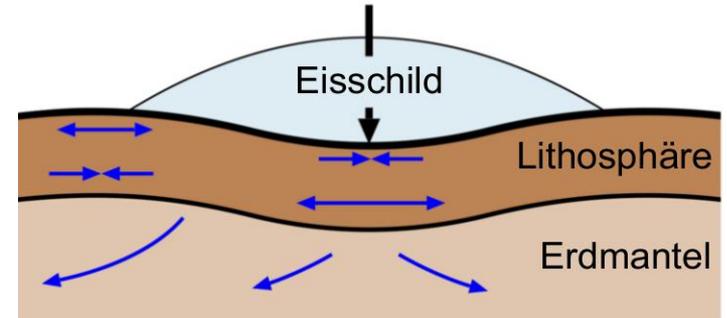
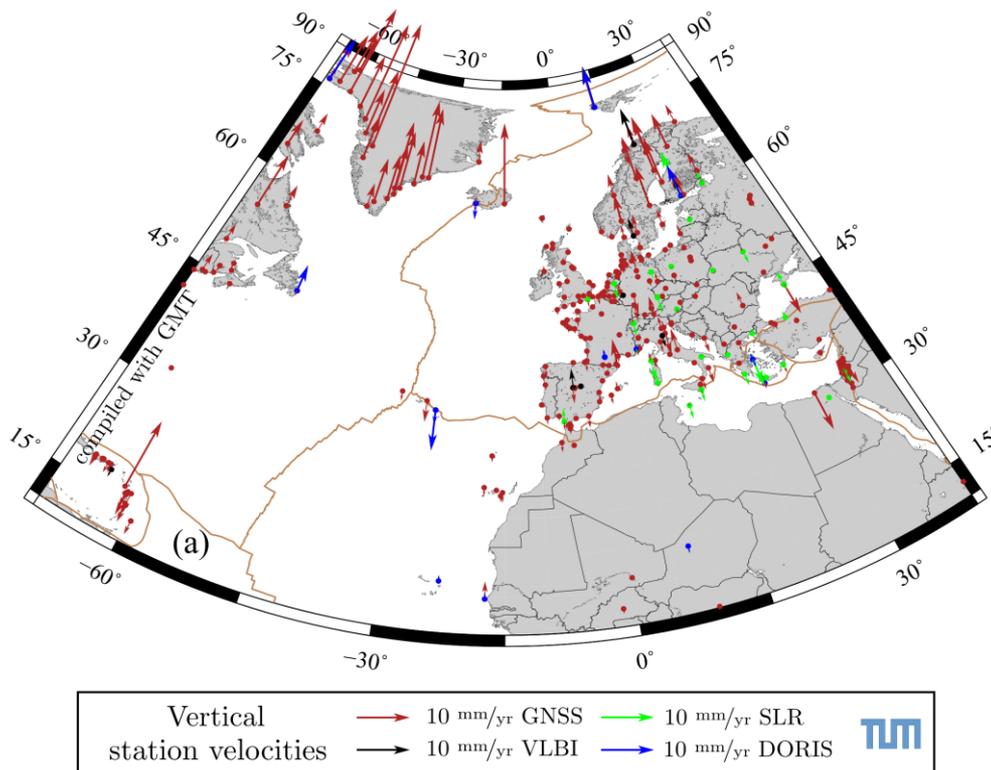
Beobachtungsverfahren: Satellitenaltimetrie

Satellitenbahnbestimmung

Globales Referenzsystem (Langzeitstabilität für die Kombination verschiedener Satellitenmissionen)



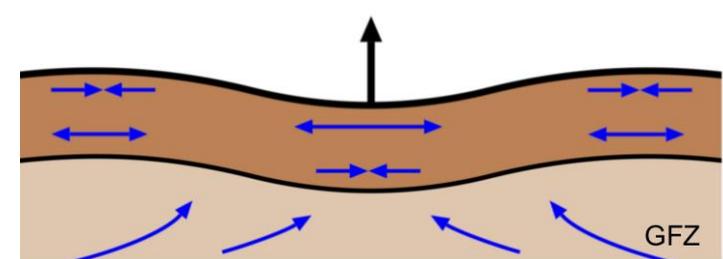
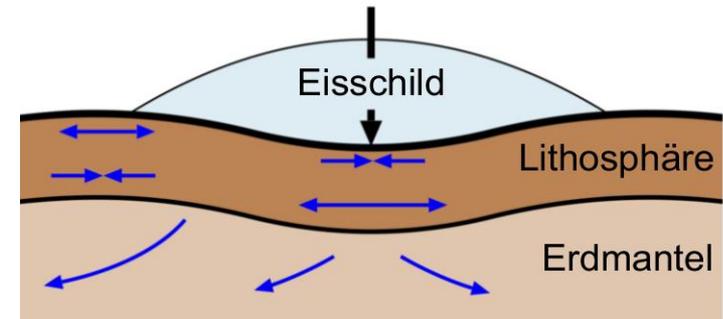
Postglaziale Landhebung



Quelle: Seitz 2018

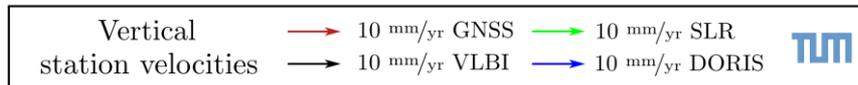
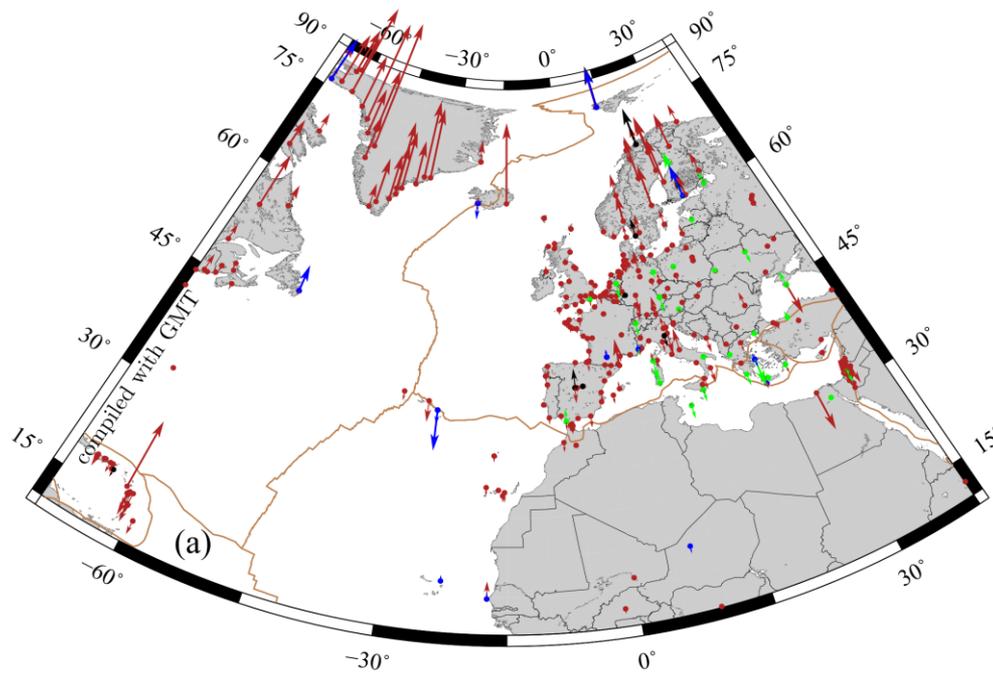
Postglaziale Landhebung

Eisbedeckung während der letzten Eiszeit

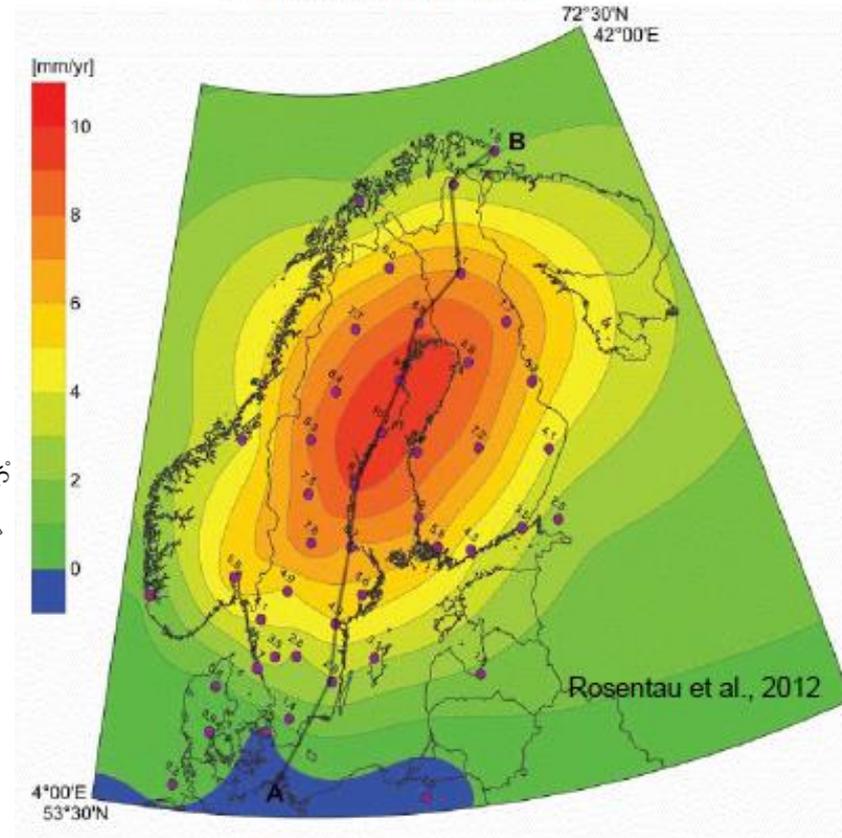


Quelle: Seitz 2018

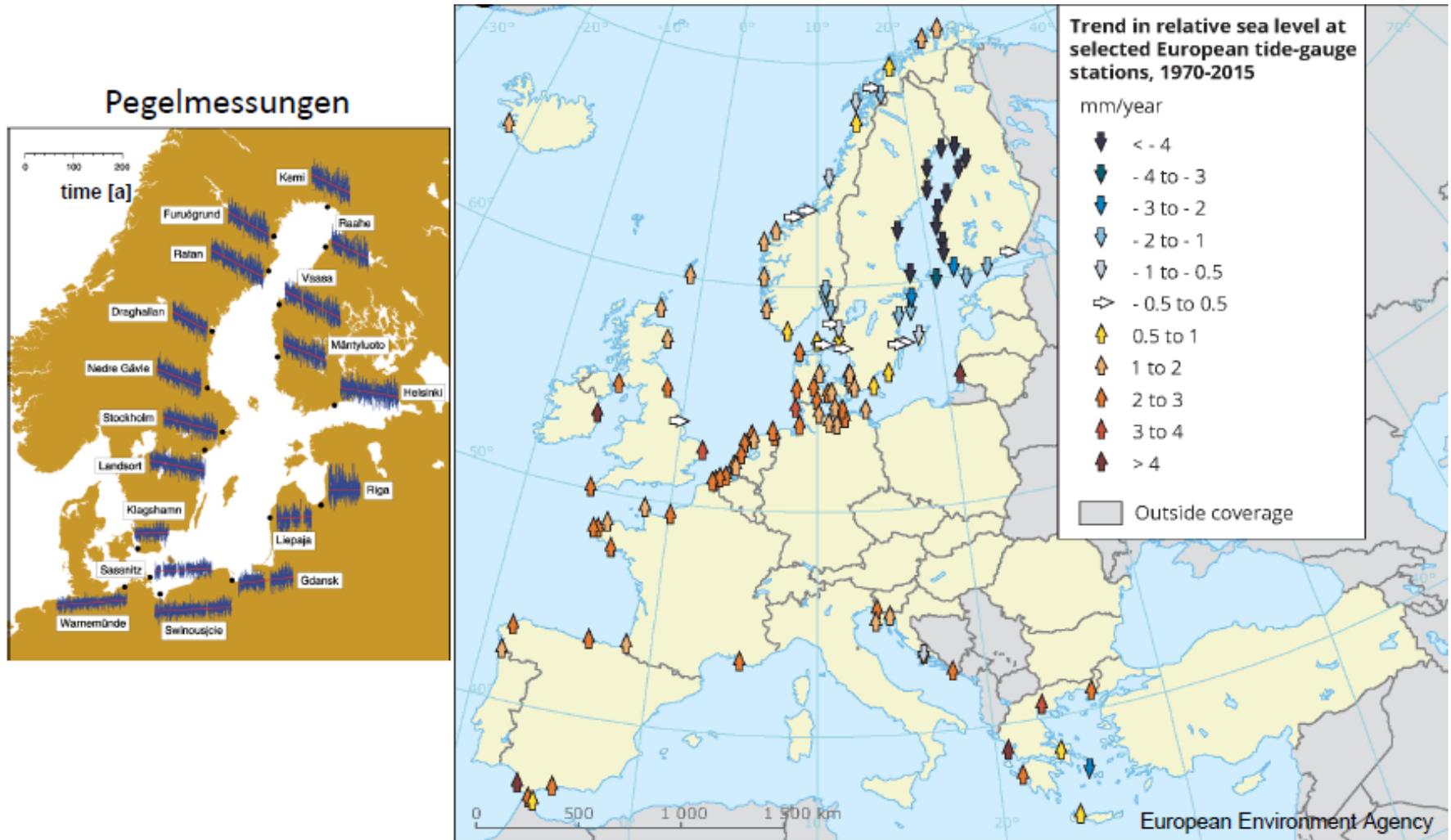
Postglaziale Landhebung



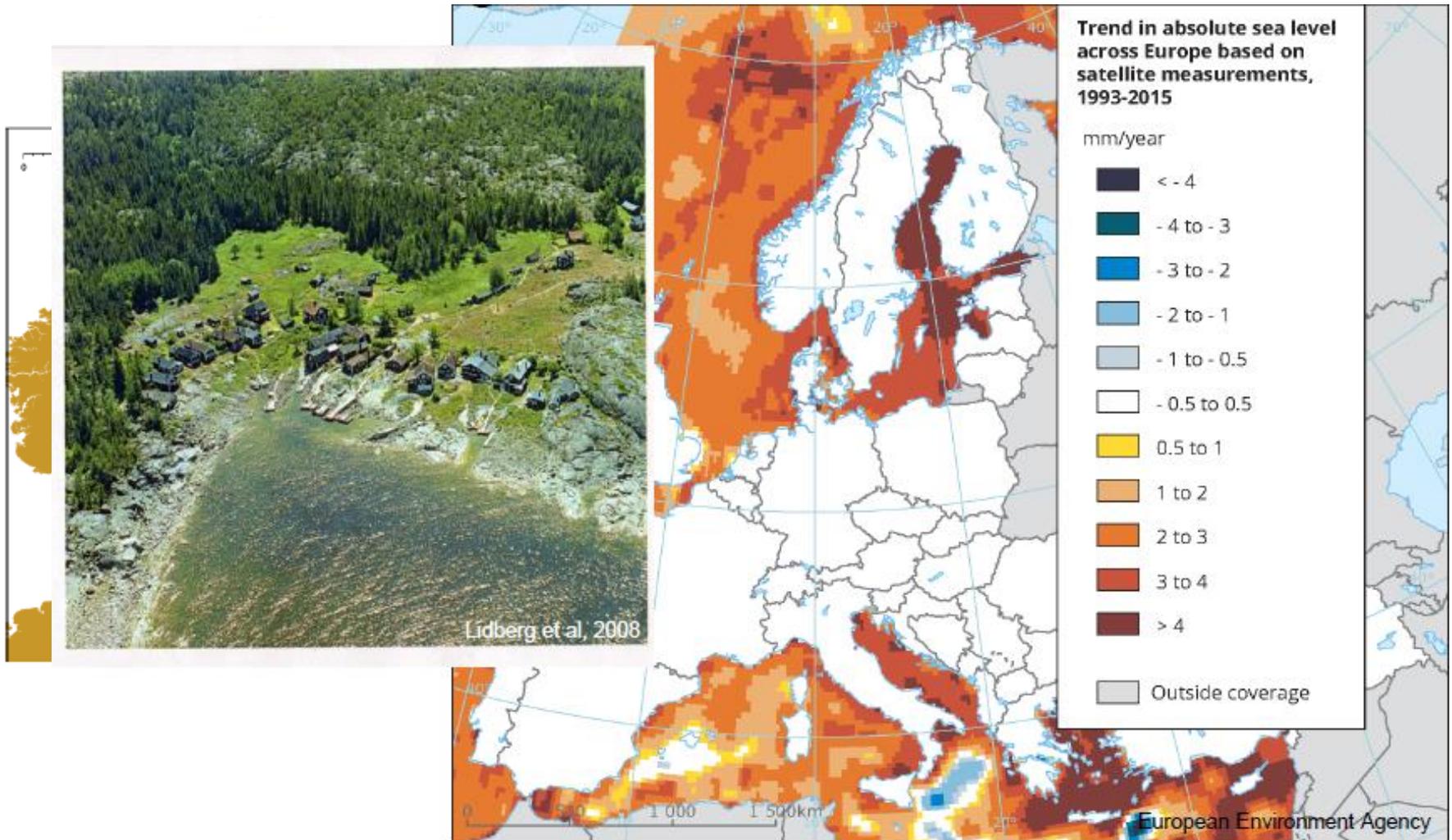
Landhebung (GPS)



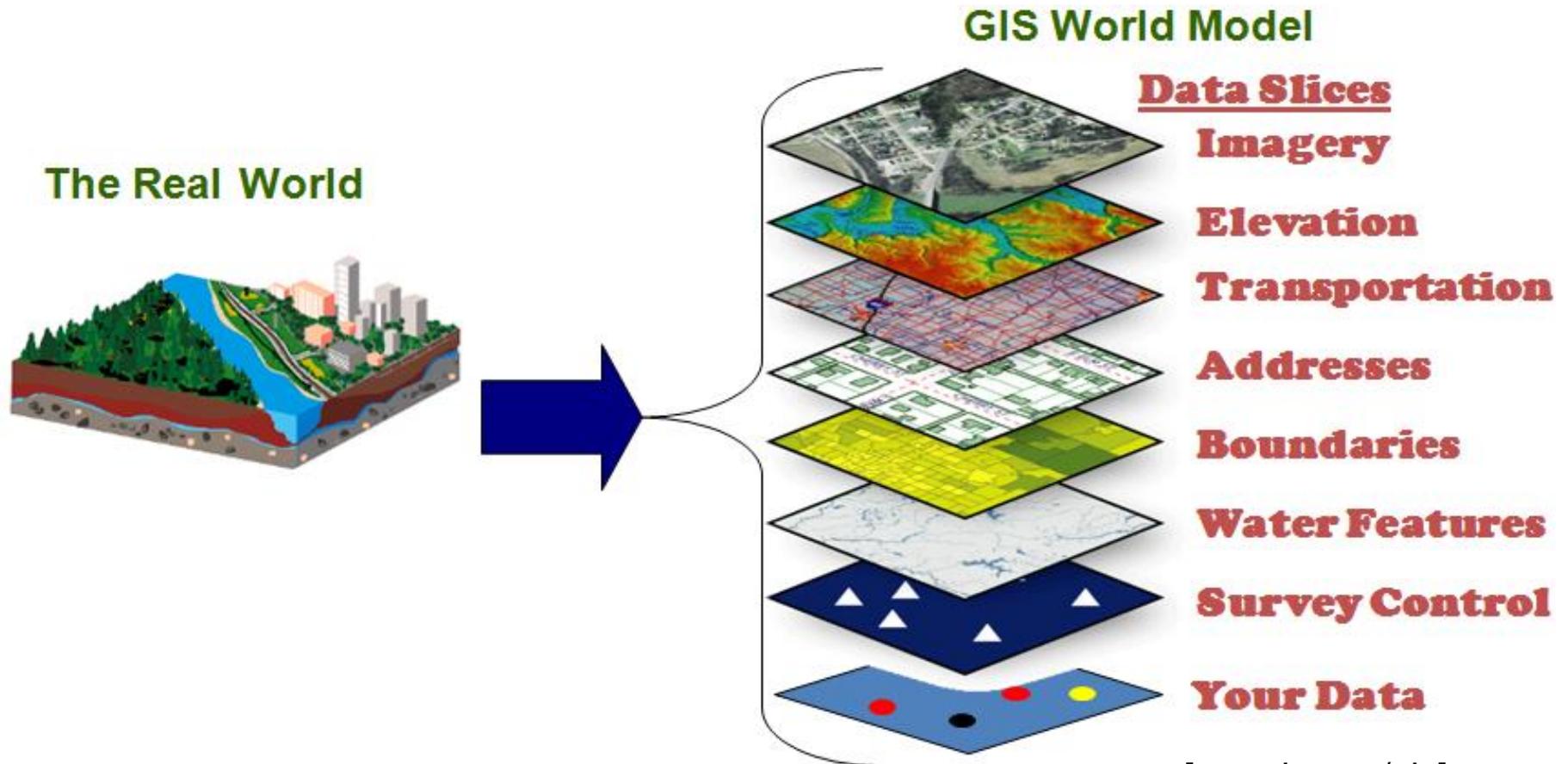
Sinkender Meeresspiegel oder steigende Pegel?



Sinkender Meeresspiegel oder steigende Pegel?



Geoinformationssysteme und Geolokalisation

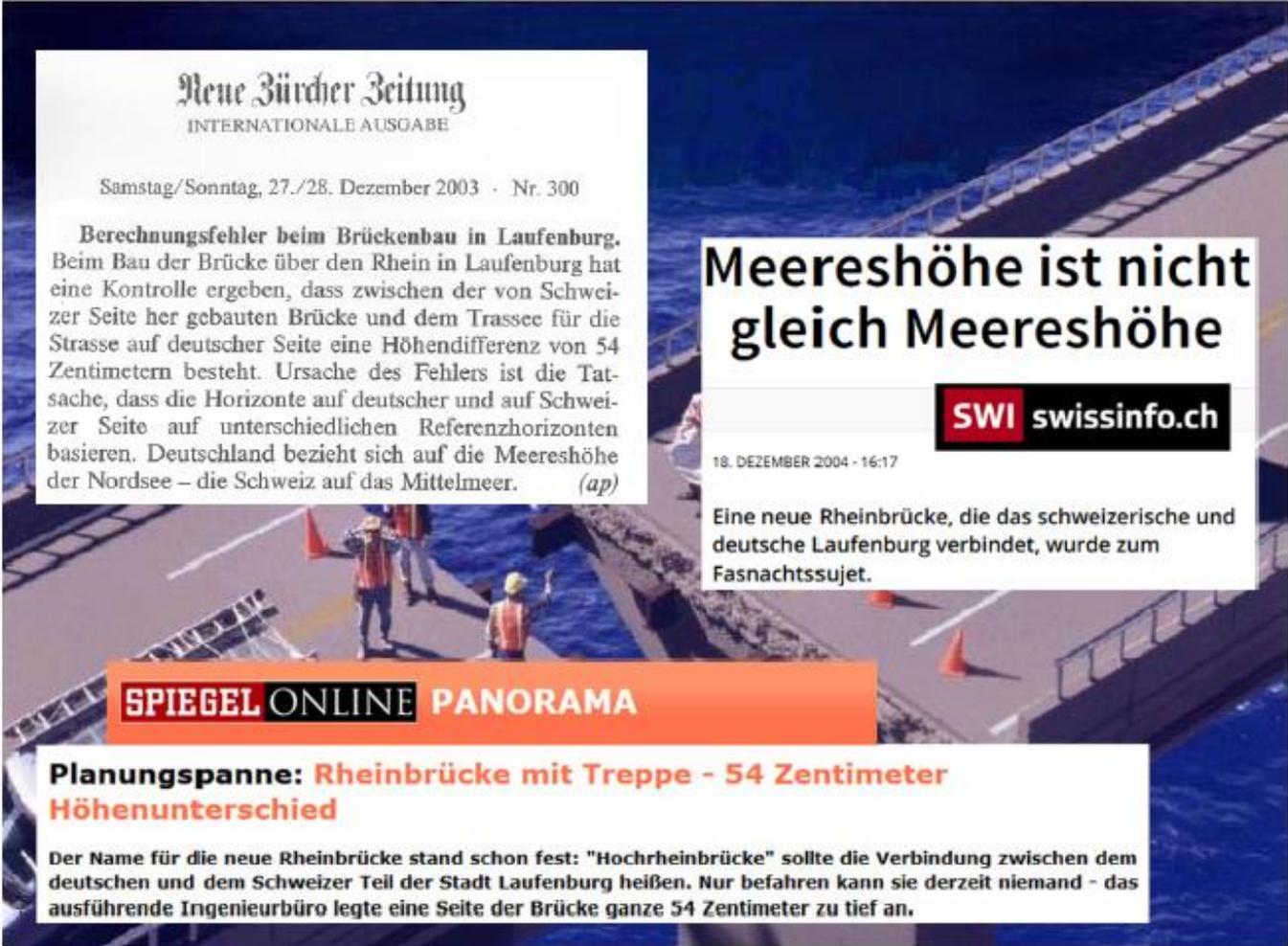


[www.in.gov/gis]

lokale Vermessung



lokale Vermessung



Neue Zürcher Zeitung
INTERNATIONALE AUSGABE

Samstag/Sonntag, 27./28. Dezember 2003 · Nr. 300

Berechnungsfehler beim Brückenbau in Laufenburg.
Beim Bau der Brücke über den Rhein in Laufenburg hat eine Kontrolle ergeben, dass zwischen der von Schweizer Seite her gebauten Brücke und dem Trasse für die Strasse auf deutscher Seite eine Höhendifferenz von 54 Zentimetern besteht. Ursache des Fehlers ist die Tatsache, dass die Horizonte auf deutscher und auf Schweizer Seite auf unterschiedlichen Referenzhorizonten basieren. Deutschland bezieht sich auf die Meereshöhe der Nordsee – die Schweiz auf das Mittelmeer. (ap)

Meereshöhe ist nicht gleich Meereshöhe

SWI swissinfo.ch

18. DEZEMBER 2004 - 16:17

Eine neue Rheinbrücke, die das schweizerische und deutsche Laufenburg verbindet, wurde zum Fasnachtssujet.

SPIEGEL ONLINE PANORAMA

Planungspanne: Rheinbrücke mit Treppe - 54 Zentimeter Höhenunterschied

Der Name für die neue Rheinbrücke stand schon fest: "Hochrheinbrücke" sollte die Verbindung zwischen dem deutschen und dem Schweizer Teil der Stadt Laufenburg heißen. Nur befahren kann sie derzeit niemand - das ausführende Ingenieurbüro legte eine Seite der Brücke ganze 54 Zentimeter zu tief an.

Referenzrahmen in der Politik

- Ein globaler geodätischer Referenzrahmen für nachhaltige Entwicklung
- Resolution wurde von den Vereinten Nationen verabschiedet (United Nations General Assembly, 25.02.2015)



Positionierung

Naturkatastrophen

Klimawandel

Geodaten



Zusammenfassung

- Der ITRF liefert die **Grundlage für Positionsbestimmungen auf der Erde und im Raum**, die Navigation (SAPOS, ...), sowie die Messung von Veränderungen (**globaler Wandel**).
- Die ITRF-Berechnungen basieren auf einer **Kombination** von VLBI, SLR, GNSS und DORIS Daten.
- Das Koordinatensystem muss **alle 5-6 Jahre neu** realisiert werden (tektonische Prozesse, neue Stationen). Jede Realisierung (ITRF) erfordert eine Reprozessierung aller Beobachtungsdaten über die vergangenen 20-35 Jahre.
- Neueste Realisierungen: ITRF2014 (IGN), **DTRF2014** (DGFI-TUM), JTRF2014 (JPL).
- Die Realisierung des Koordinatensystems in mm-Genauigkeit ist eine **gewaltige internationale Anstrengung**. Viele Institutionen weltweit sind mit Datenerhebung und Datenanalyse beschäftigt – und müssen koordiniert werden (**IAG, UN-Resolution**).
- Nicht optimal ist die gegenwärtige räumliche Verteilung guter Ko-lokations-Stationen (**internationale Kooperation nötig**).

Was bewegt sich wie?

Geodätische Referenzsysteme als Grundlage für die Erdsystemforschung

Dr.-Ing. Mathis Bloßfeld

Technische Universität München

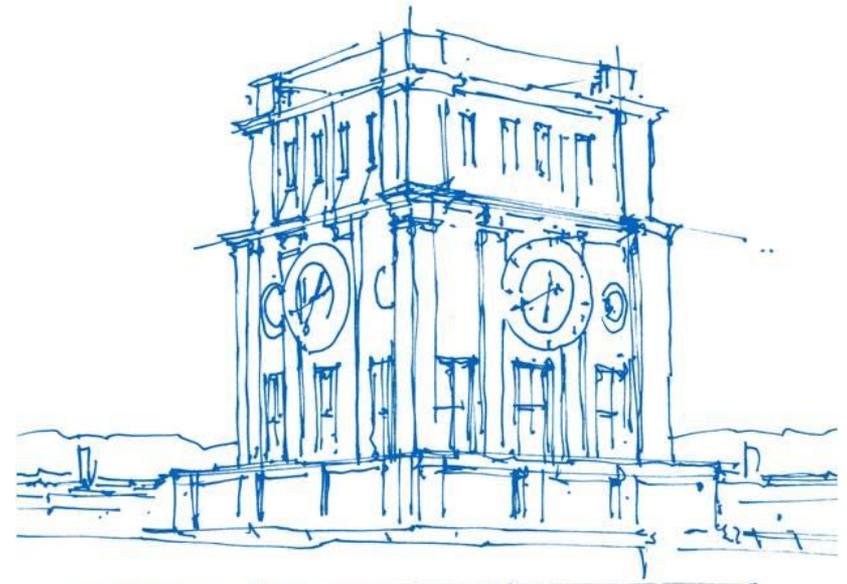
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut

(DGFI-TUM, www.dgfi.tum.de)

Geodätisches Kolloquium

Oldenburg, 17. Januar 2019



Uhrenturm der TUM