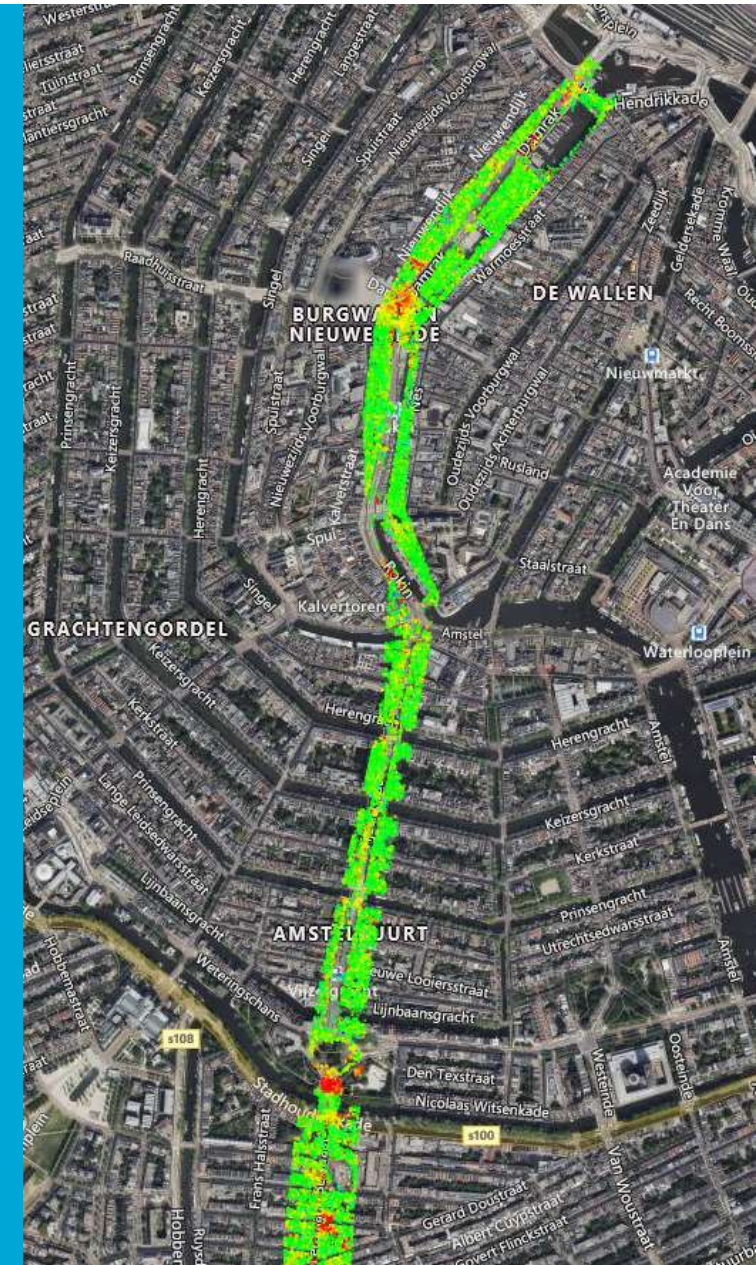


# Anwendung der satellitengestützten Radarinterferometrie (InSAR) in der Geotechnik und im Tunnelbau

Kristina Reinders



k.j.reinders@tudelft.nl  
kristina.reinders@skygeo.com



# Kristina Reinders MSc

## Aktuell:

- SkyGeo
- Dissertation auf der Schnittstelle Satelliten Fernerkundung und Geotechnik
  - Reinders, K.J. et al. Augmented satellite InSAR for assessing short-term and long-term surface deformation due to shield tunnelling, Tunnelling and Underground Space Technology, 2021  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779820306994>
  - Reinders, K.J. et al. Proving compliance of satellite InSAR technology with geotechnical design codes, Transportation Geotechnics, 2022  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221439122200006X>
  - Work in Progress Artikel: Überwachung von Bauten und Infrastruktur in Permafrost mit InSAR
- Studienberatung und Prüfungsleitung Uni Bern

2016 – 2020: Dozentin TU Delft

2004 – 2016: Projektleiterin Geotechnik, Fugro

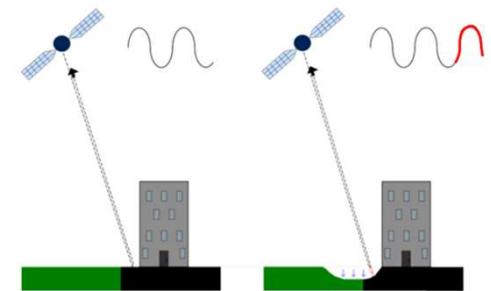
2003: MSc. Delft University of Technology

SkyGeo

 TU Delft

# Was ist InSAR

- Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) = Radarinterferometrie
- Ein RADAR-Satellit umkreist die Erde und nimmt regelmäßig Rohdaten auf
- Wiederkehrzeit: 6, 12, 24 Tage
- Messung desselben Punktes der Erdoberfläche
- Das Radarmessgerät misst die Amplitude und die Phase des von der Erdoberfläche reflektierten Radarsignals
- Für die Feststellung von Verformungen wird hauptsächlich die Phase ausgewertet
- Ein Phasenunterschied am gleichen Punkt zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen bedeutet, dass sich etwas geändert hat
- Dadurch werden Bewegungen der Oberflächen im mm-Bereich bestimmt



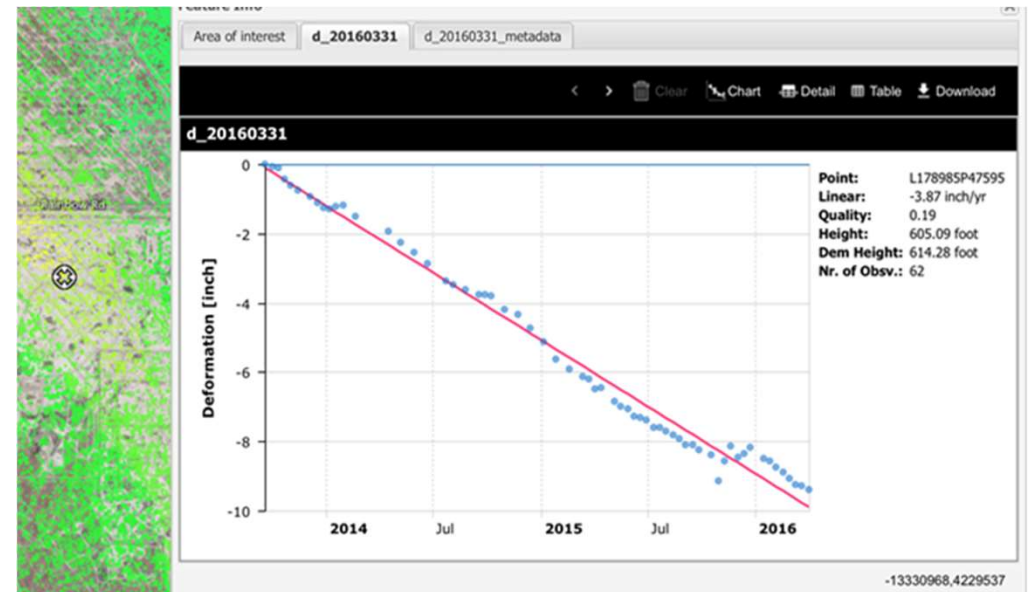
# Was ist InSAR

## RADAR-Messungen aus dem Weltraum

- Millimeter Genauigkeit (relativ)
- Wöchentlich, monatlich
- Durch Wolken hindurch
- Große Flächen
- Natürliche Reflektoren

## Historische Messungen zur Überwachung

- Aufnahmen reichen zurück bis 1995
- Die Schweiz wird kontinuierlich aufgezeichnet
- Sentinel-1 (20m x 5m) ab 2015



# Vor- und Nachteile InSAR

## **Vorteile:**

- Ermittlung Bewegungen aus der Vergangenheit
- Keine physische Präsenz von Personen und Material im Feld notwendig
  - > Abdeckung schwer zugänglicher Gebiete
  - > in städtischem Gebiet keine Sperrungen
- Erfassung grossflächiger Gebiete und langsamer Bewegungen
- Frühzeitige Aufdeckung von zuvor unbekanntem Prozessen
- Auswertung von Daten desselben Gebietes in regelmässigen Abständen
- Wiederkehrintervall von einigen Tagen bis wenigen Wochen (je nach Satellit)

## **Nachteile:**

- Bewachsene Flächen wie Wälder und Wiesen können nur bedingt überwacht werden
- Erfassung von Erdbewegungen vor allem in Ost/West-Richtung

# Anwendungspotential InSAR in der Geotechnik

- Überwachung von Verformungen (z.B. Setzungen und Rutschungen) der Erdoberfläche und von Objekten
- Historisches Archiv mit Aufnahmen -> Detektieren von Verformungen in der Vergangenheit -> ideal für Grundlagenanalyse bei Start des Projektes
- Überwachung von Bewegungen Bauwerk und Umgebung während Bau
- Überwachung von Bewegungen nach Bau, während Lebenszeit Bauwerk -> Planung von Wartungsarbeiten
- Risikoanalyse von Objekten

Project phases	1. Pre-construction phase			2. Construction	3. Operation and maintenance
	1a. Conceptual planning and feasibility study	1b. Preliminary design and engineering	1c. Detailed design and engineering, procurement		
Site investigation phases	1a. Desk study and site reconnaissance	1b. Preliminary investigations	1c. Design investigations	2. Monitoring during construction	3. Monitoring during operation
Use of InSAR	- Ground movement detection - Hazard assessment - Project baseline definition	Use InSAR for more effective planning of site investigation	Complementary to in-situ temporal single point measurements	Monitoring of a large area, complementary to traditional survey	Monitoring after traditional survey has stopped

Reinders et al. 2022

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221439122200006X>

# Anwendungspotential InSAR im Tunnelbau

## **Vor Bau:**

- Erstellen Grundlagenanalyse
- Optimierung Monitoringsplan

## **Während Bau:**

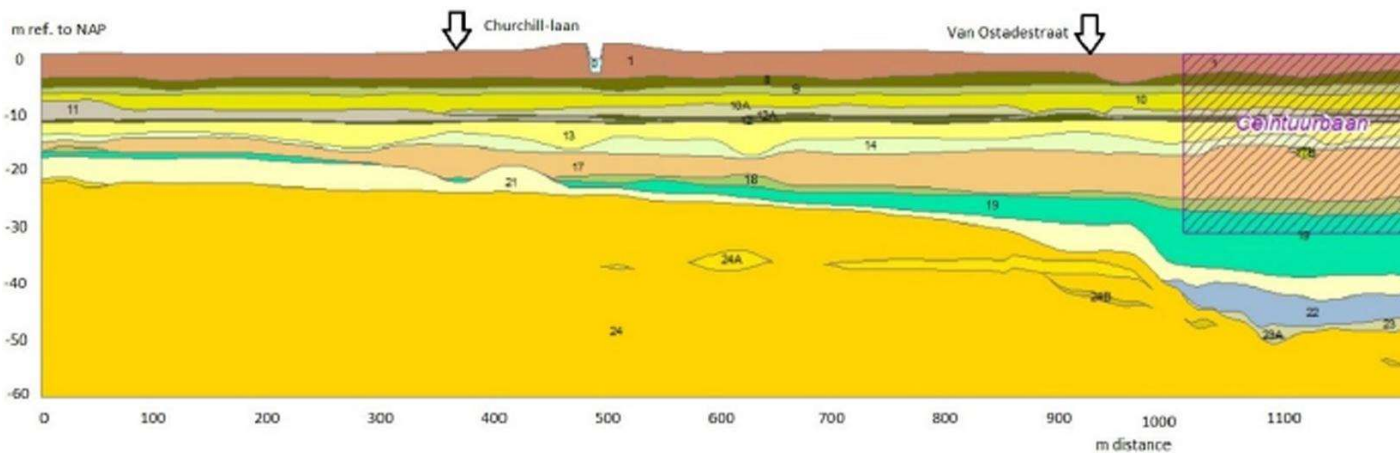
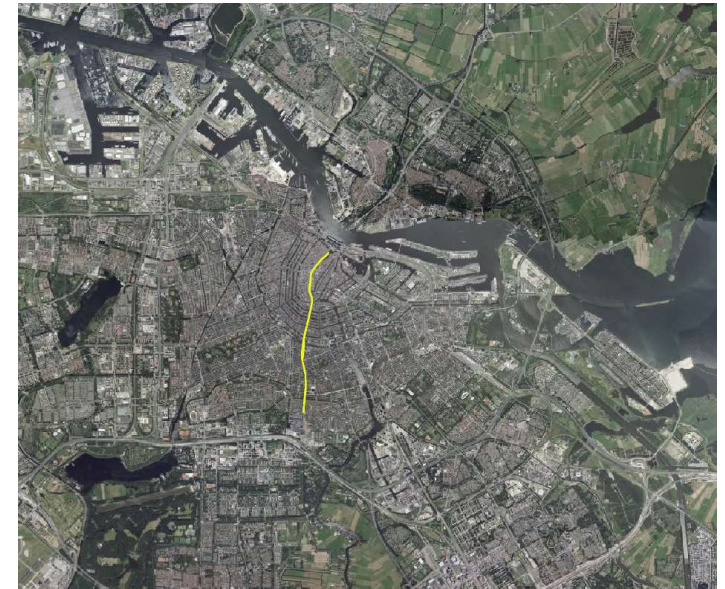
- Ergänzung zum herkömmlichen Monitoring: InSAR liefert Daten außerhalb des Bereichs der terrestrischen Nivellierpunkte
- Erfassung Kippbewegungen von Gebäuden.

## **Nach Bau**

- Überwachung der Langzeit-Deformationen.
- Im Nachhinein Detektion von Deformationen, die zu Schäden geführt haben könnten.

# Tunnel Noordzuid Lijn Amsterdam

- 2 Bohrtunnel, mitten durch Amsterdam
- 3.8 km lang
- Durchmesser Tunnel 6,5 m
- Tiefe 15 bis 30 m
- Baugrund: Sand
- Bau Tunnel: 2010 bis 2012
- 3 tiefe Bahnhöfe (Ceintuurbaan, Vijzelgracht und Rokin)







NORD

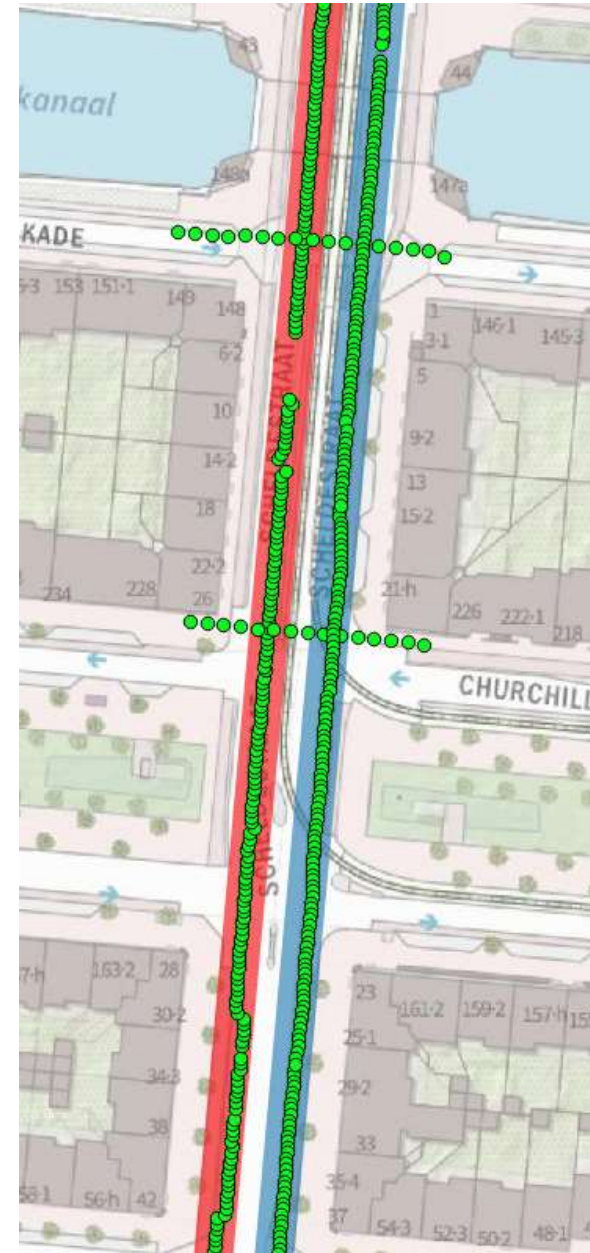
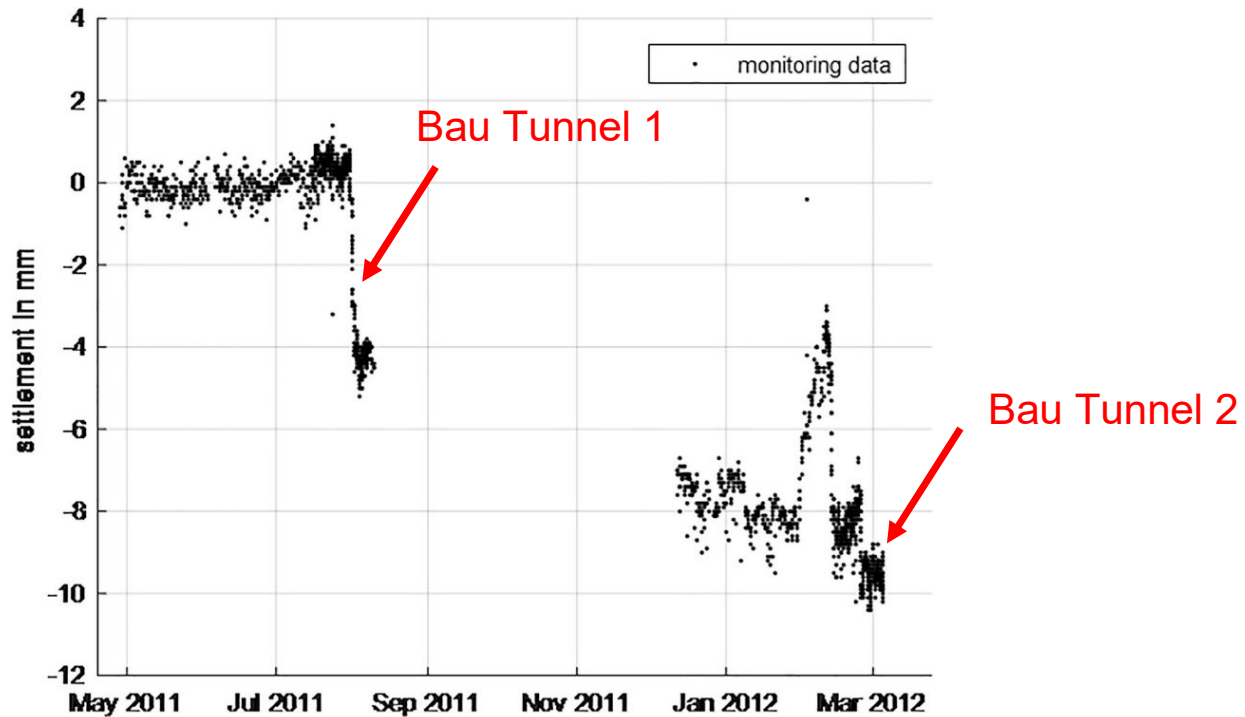
SÜD



# Tunnel Noordzuid Lijn Amsterdam

## Traditionelles Monitoring

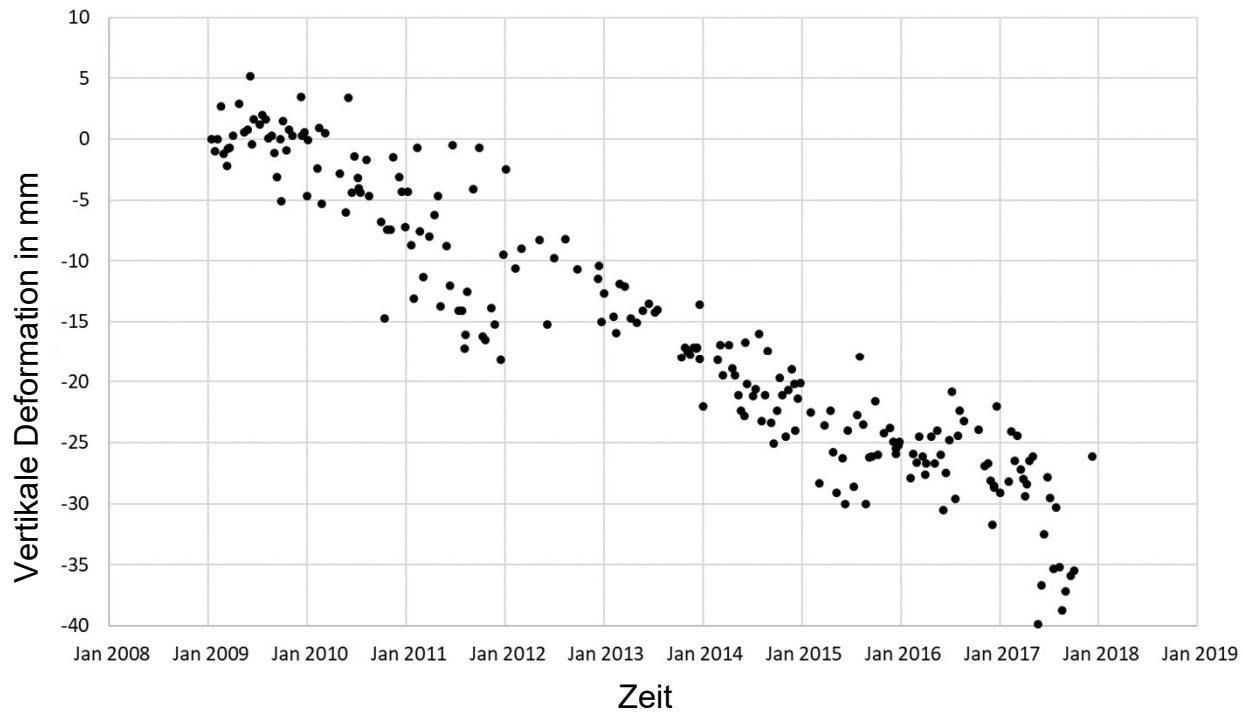
- Ca. jede Stunde
- Start Messung ca. 2 Monate vor Bohraktivitäten bis einige Tage danach
- Auf Tunnelachse und bei Querstrassen



# Tunnel Noordzuid Lijn Amsterdam

## Mit InSAR (TerraSAR-X)

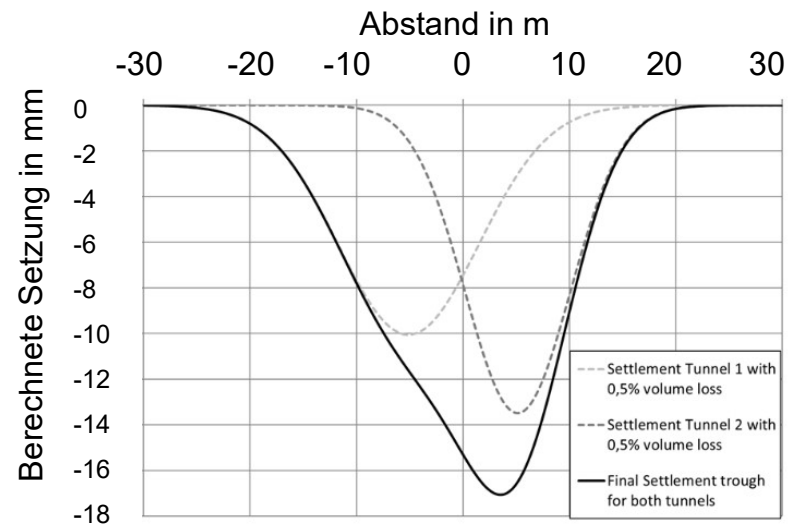
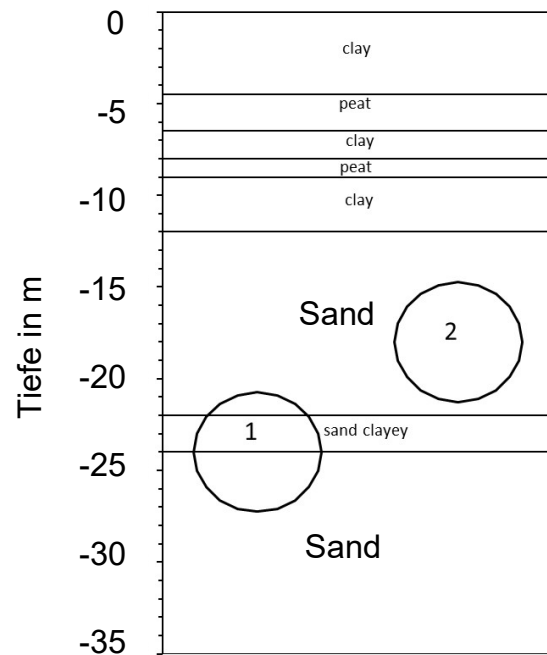
- Alle 12 Tage eine Messung seit Anfang 2009
- Auf Terrain und Gebäuden
- Grossflächig



# Tunnel Noordzuid Lijn Amsterdam

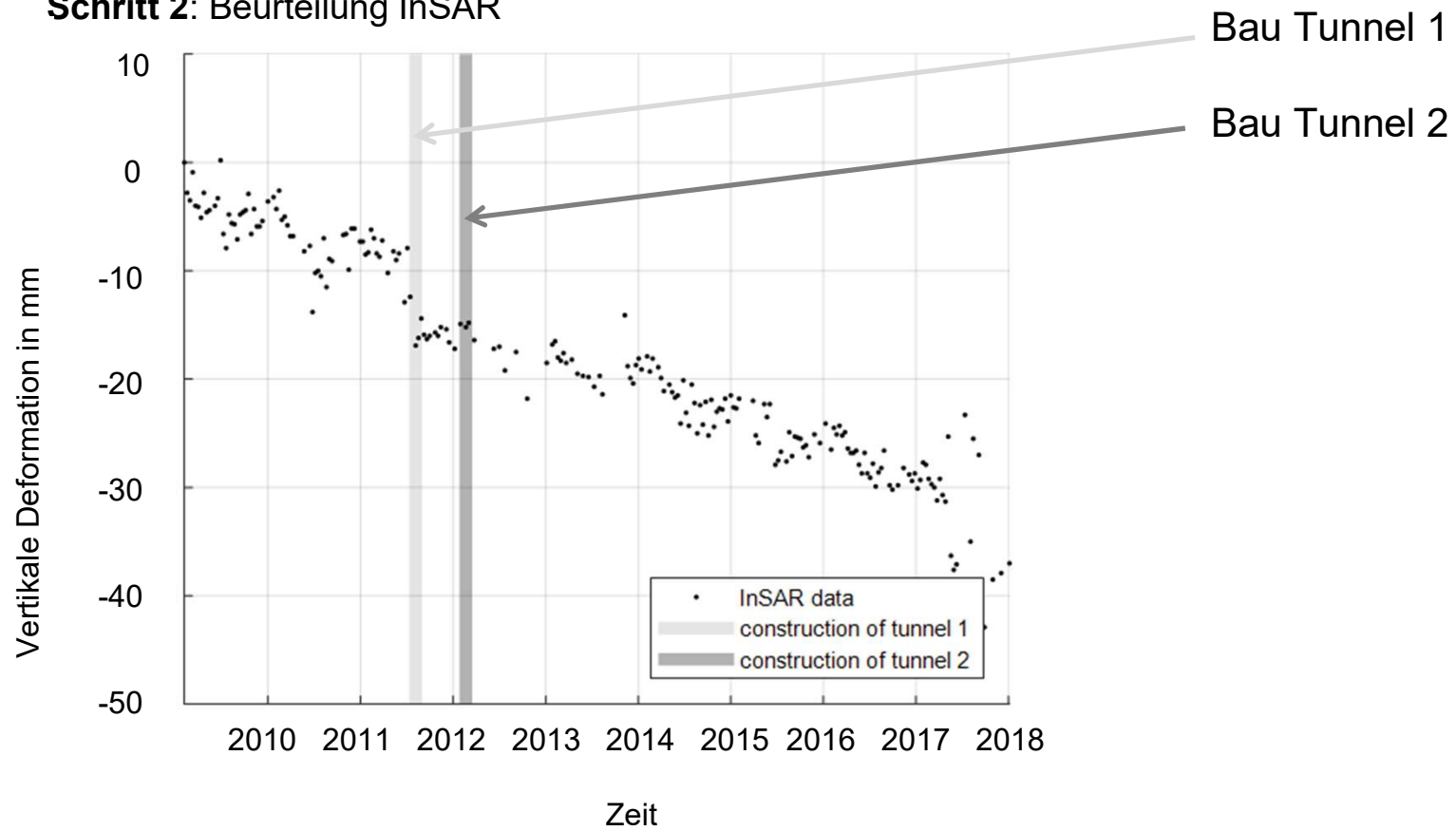
## Schritt 1

- Berechnung erwartete Setzungsmulde: bis zu 10 mm bei Bau Tunnel 1 in 2011



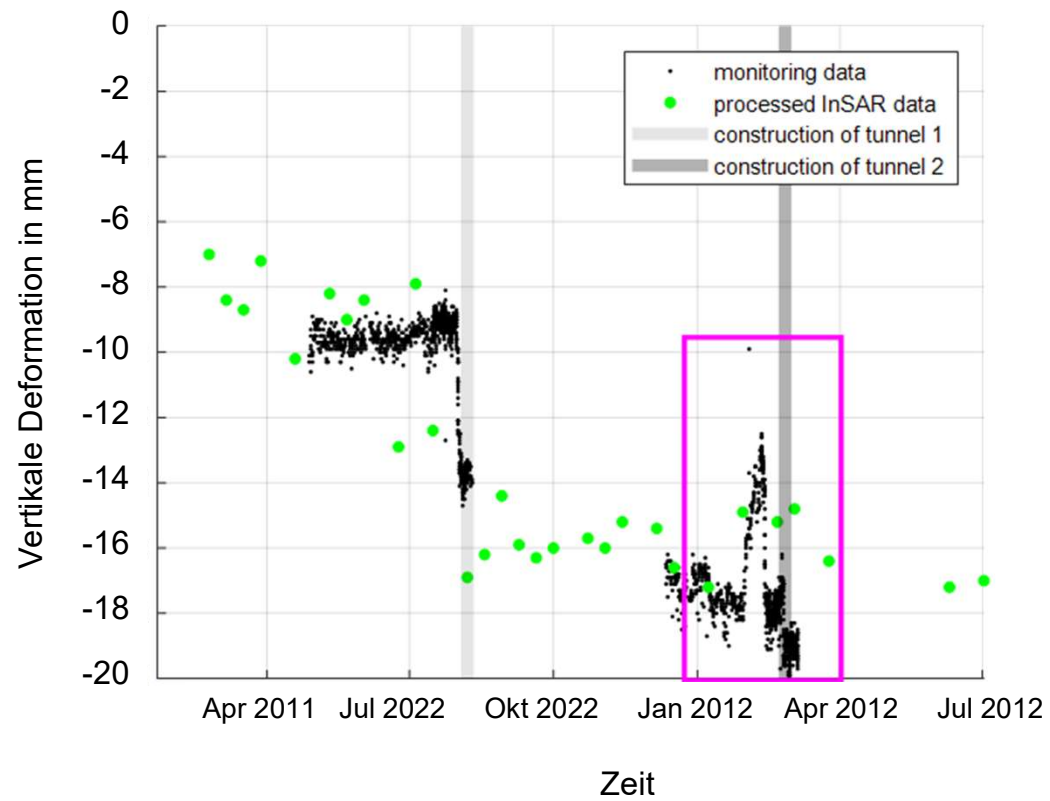
# Tunnel Noordzuid Lijn Amsterdam

## Schritt 2: Beurteilung InSAR



# Tunnel Noordzuid Lijn Amsterdam

## Schritt 3: Vergleich mit Nivellierungsmessungen



# Tunnel Noordzuid Lijn Amsterdam

Aber.....

**Herausforderung: Phasenmehrdeutigkeiten**

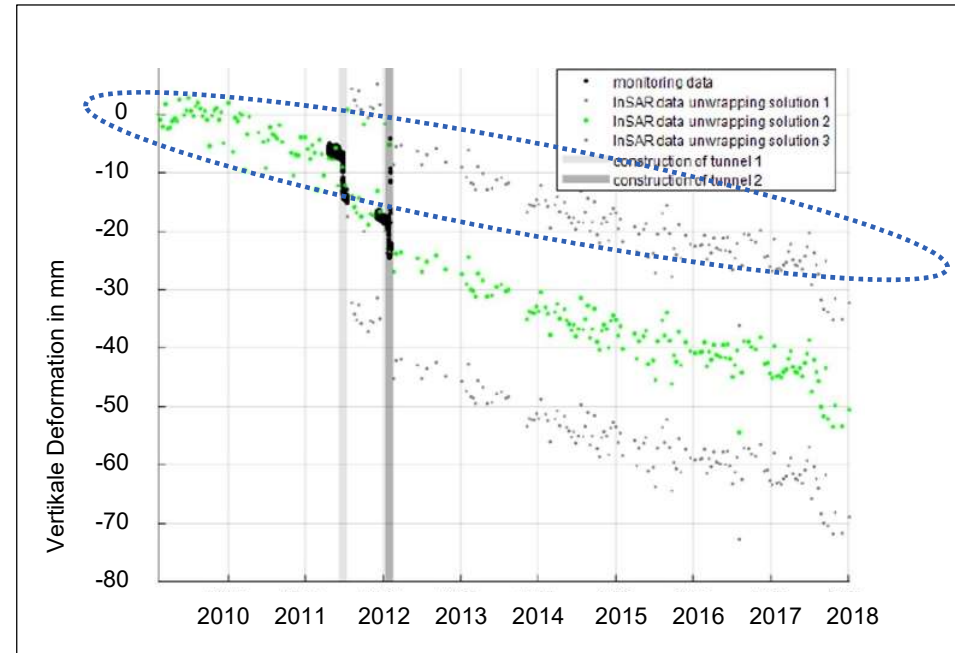
Phase ist definiert zwischen 0 und  $2\pi$

Deshalb theoretisch unendlich viele Lösungen

**Methode zur Phasenabwicklung: Es wird die statistisch meist wahrscheinliche Lösung gewählt**

Bei grösseren Deformationen und plötzlichen Setzungen gibt es Probleme bei der sogenannten Phase Unwrapping

Die Verschiebung könnte dann ein vielfaches von  $2\pi$  sein



Siehe Artikel Augmented satellite InSAR for assessing short-term and long-term surface deformation due to shield tunnelling

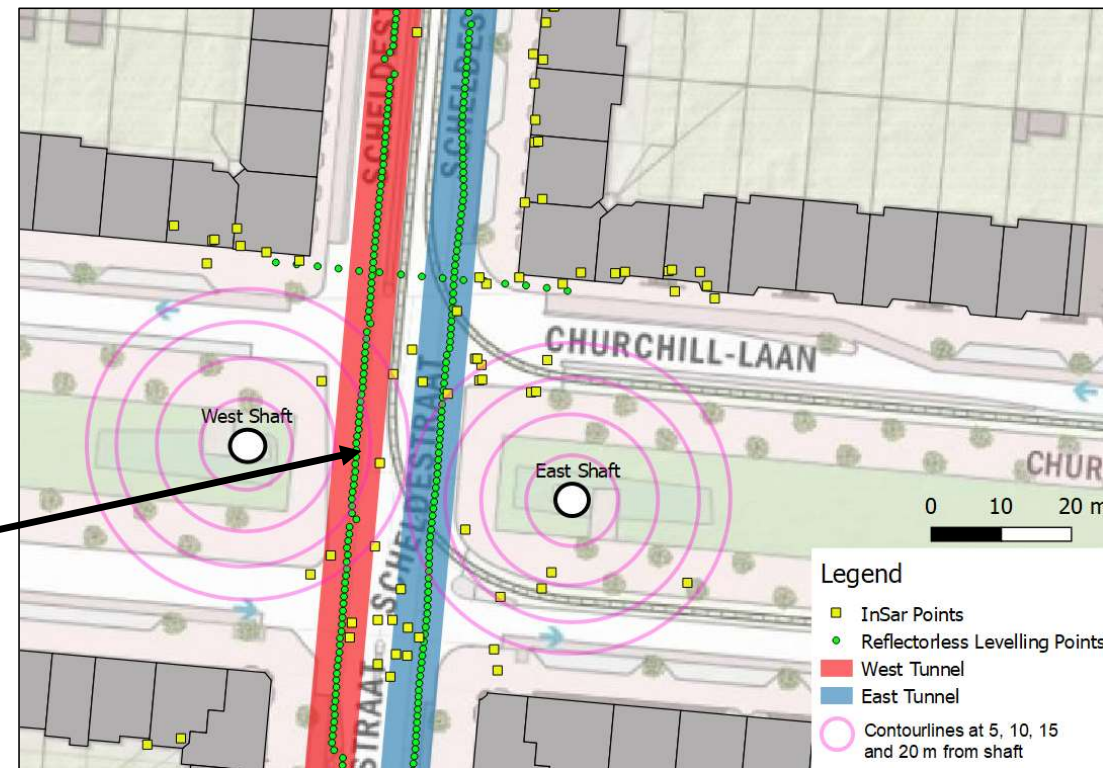
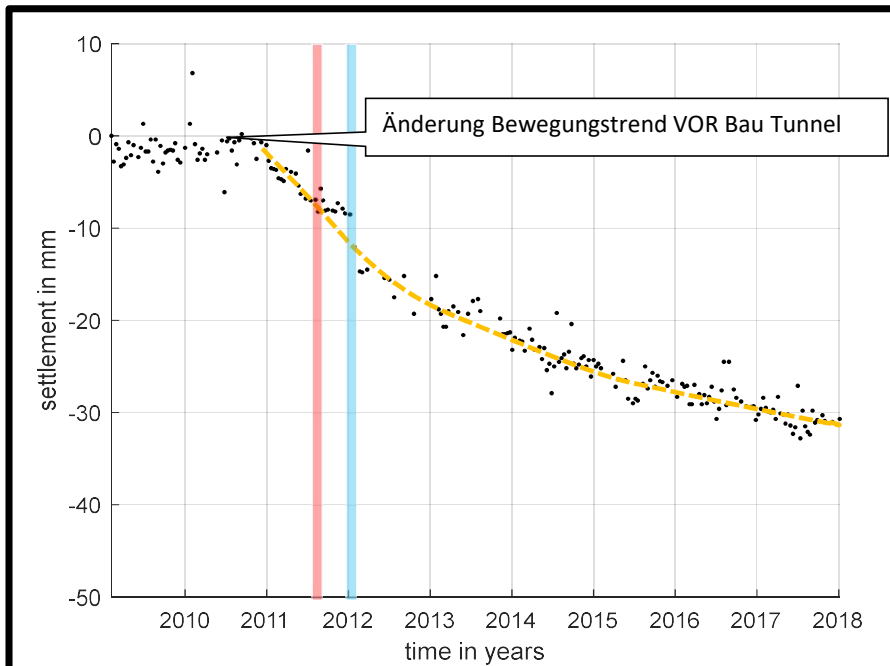
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779820306994>

# Tunnel Noordzuid Lijn Amsterdam

## Erkennung Trends

- Unbekannter Bewegungstrend detektiert, vor Bau des Tunnels
- Was ist hier passiert?

Wahrscheinlich Einfluss Bau vertikaler Schaft





# Tunnel Noordzuid Lijn Amsterdam

## Überwachung Gebäude

Nicht nur Messungen an Vorderseite und Rückseite sondern mehrere Messungen auf dem Dach

-> Möglichkeit, Krümmung zu beobachten

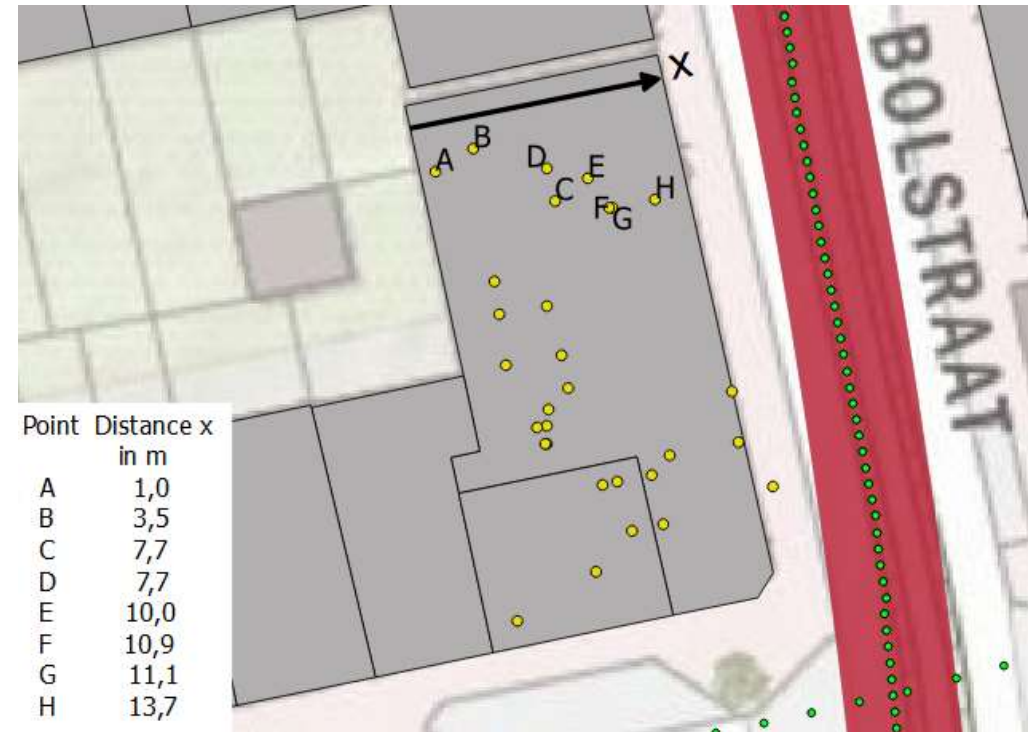
Wurde im Rahmen dieser Forschung nicht gemacht.  
Andere Artikel zu diesem Thema:

Giardina et al. 2018. Evaluation of InSAR monitoring data for post-tunnelling settlement damage assessment

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/stc.2285>

Macchiarulo et al. 2021. Integrated InSAR monitoring and structural assessment of tunnelling-induced building deformations

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/stc.2781>



# Schlussfolgerungen

InSAR:

- ist geeignet, um Grundlagenanalyse zu erstellen, **vor** dem Bau.
- kann die herkömmliche Überwachung nicht ersetzen, aber aufgrund seiner hohen räumlichen Auflösung und der Verfügbarkeit von Zeitreihen von 2009 bis heute ist es eine wertvolle, ergänzende Informationsquelle **während** dem Bau.
- liefert Daten außerhalb des Bereichs der terrestrischen Nivellierpunkte.
- kann Kippbewegungen von Gebäuden erfassen.
- Ist geeignet zur langjährigen Überwachung der Deformationen **nach** dem Bau.

Und:

- Mit apriorischem Wissen kann die richtige InSAR-Lösung erfasst werden

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

## Extra Beispiele

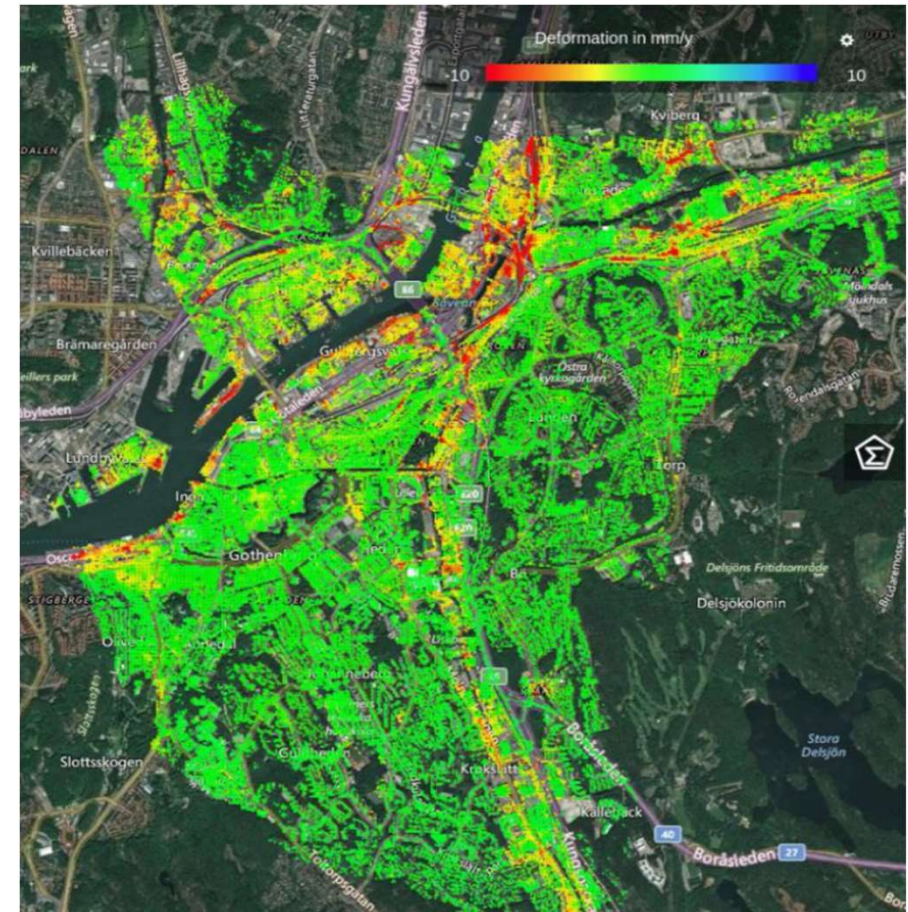
SkyGeo

 TU Delft

# Tunnel Göteborg

## Mittels InSAR, Erfassung der Ausgangslage vor Baustart und Überwachung während Bau

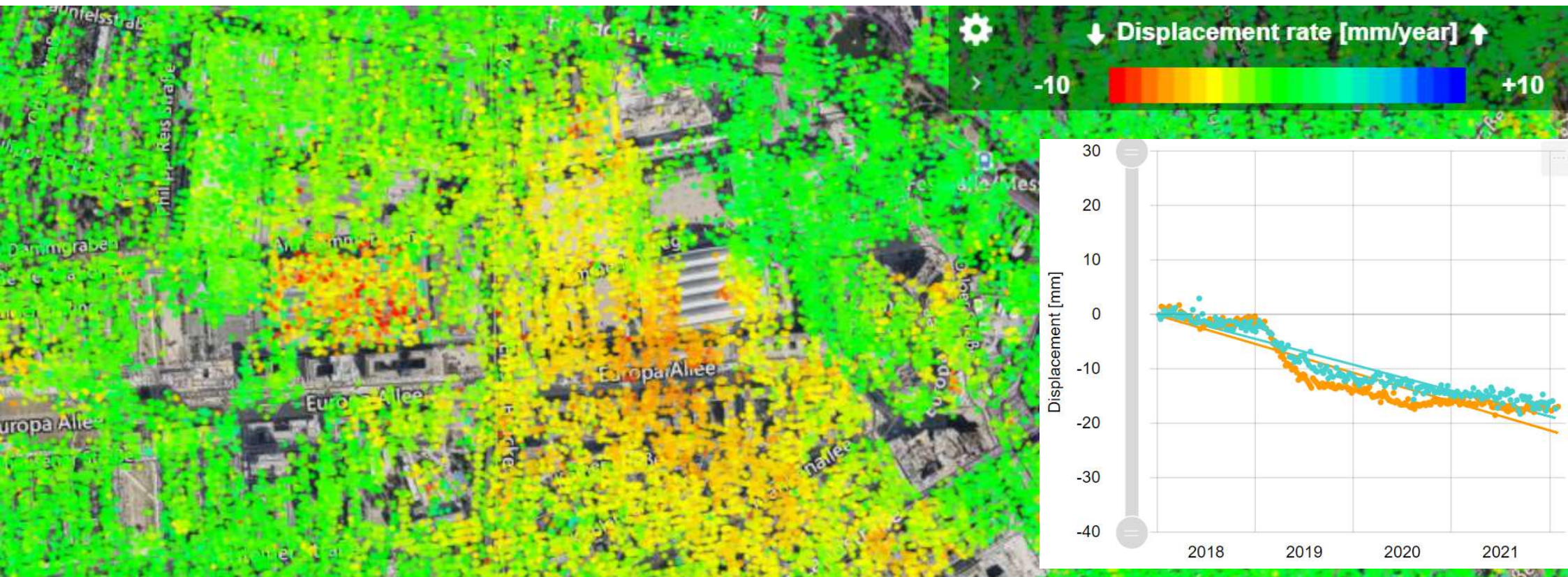
- Erkennung Kippbewegungen von historischen Gebäuden
- Erkennung Bodenbewegungen durch andere Baumassnahmen / Baugruben (unabhängig von Tunnelbau)
- Erkennung Saisonalität in der Bewegung, abhängig von Geologie / Untergrund
- Beweissicherung: Anhand der analysierten Ausgangsbedingungen konnte eine falsche Zuordnung von Bodenverformungen bei den Tunnelbauarbeiten durch die schwedischen Verkehrsbehörde ausgeschlossen und somit die Haftung reduziert werden



# U-Bahn Tunnel Frankfurt

## Internes Pilotprojekt

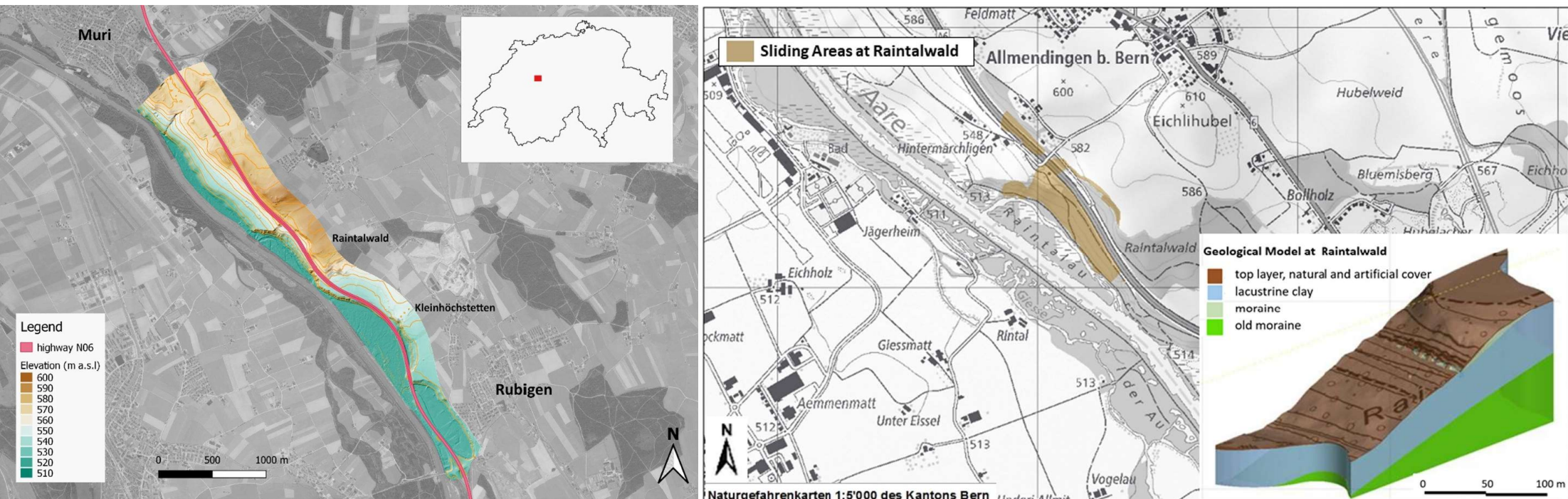
- Auswirkungen Bau U-Bahntunnel an Geländeoberfläche und Gebäuden sichtbar
- Bewegungsauswirkungen an Gebäuden und im Gelände verhalten sich unterschiedlich



# Autobahnabschnitt Muri-Rubigen in Kanton Bern

## Autobahnabschnitt auf Rutschhang

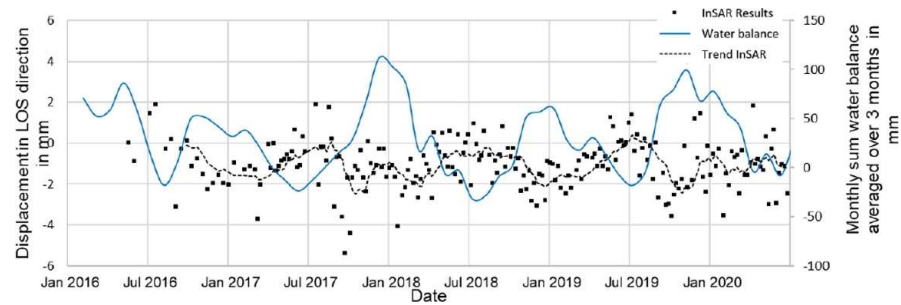
- Baseline Assessment anhand InSAR Daten der vergangenen 5 Jahre
- Einbindung der geo(hydro)logischen und topographischen Daten



# Autobahnabschnitt Muri-Rubigen in Kanton Bern

## Schlussfolgerungen

- Mehrheitlich sehr kleine Verformungen
- Erkennung lokaler Gebiete mit leicht erhöhten Deformationsraten
- Erkennung jahreszeitlicher Schwankungen



-> Anhand InSAR Analyse konnte das Baugrunduntersuchungsprogramm optimiert werden

