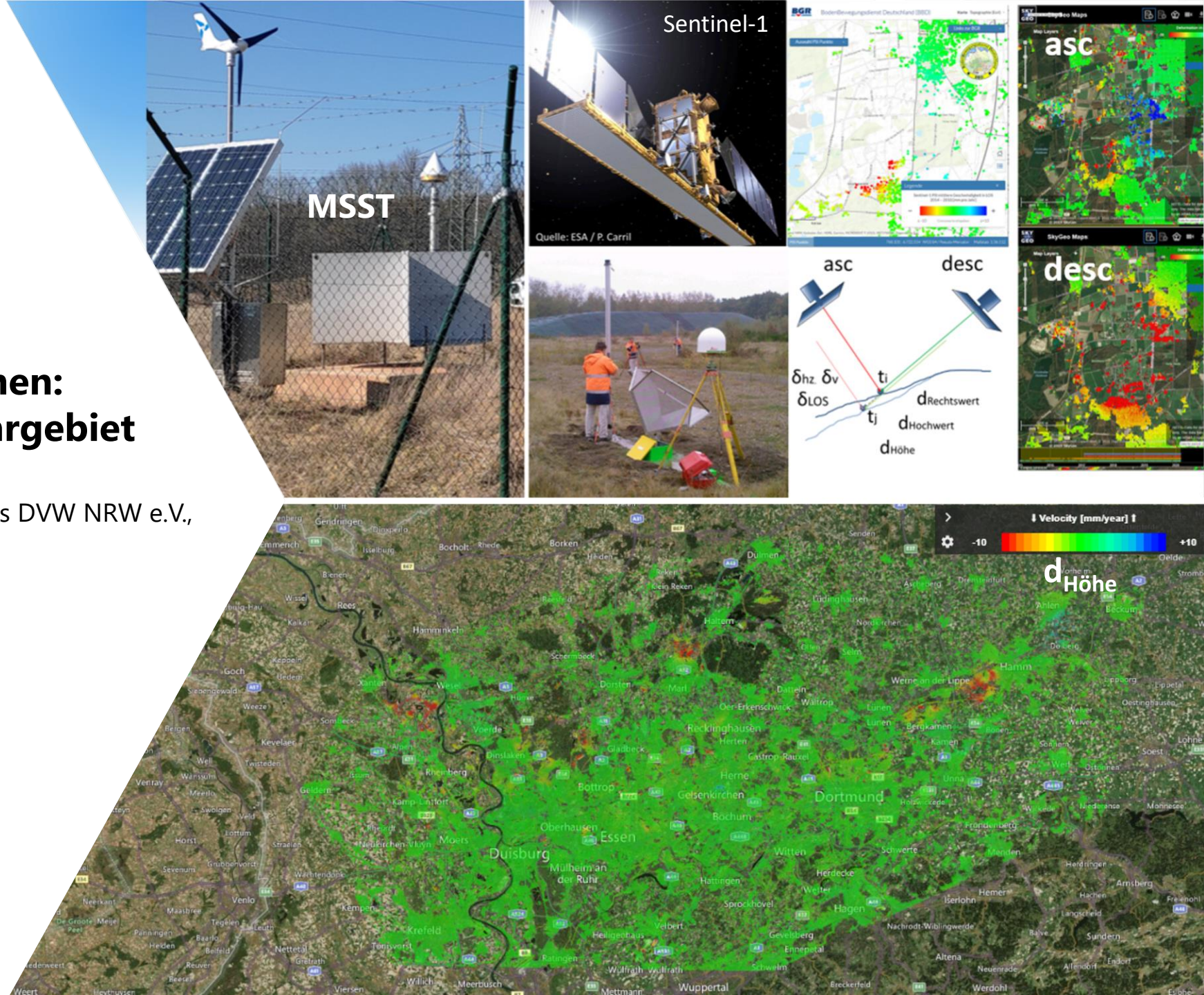


Im Tagesgeschäft angekommen: Radarinterferometrie im Ruhrgebiet

Herbstveranstaltung „Vermessung Aktuell“ des DVW NRW e.V.,
Haus der Technik, Essen, 28.11.2024

Volker Spreckels
RAG Aktiengesellschaft
K-BI-AG Geomonitoring
Essen

K-BI-AG-Geomonitoring: Volker Spreckels



Radarinterferometrie (InSAR):

-Was gibt es schon?

**Dienste: BBD, EGMS, SaarBoBeKa, BBK NRW: Integrales Monitoring, ABP;
Grundsätze DMV; SAPOS-MSST; Richtlinie Rili-RB-AdV (Kap. 6)**

-Wie geht das, was messe ich?

Satelliten, Sensoren, Technik, Radar-“Mess-/Passpunkte”

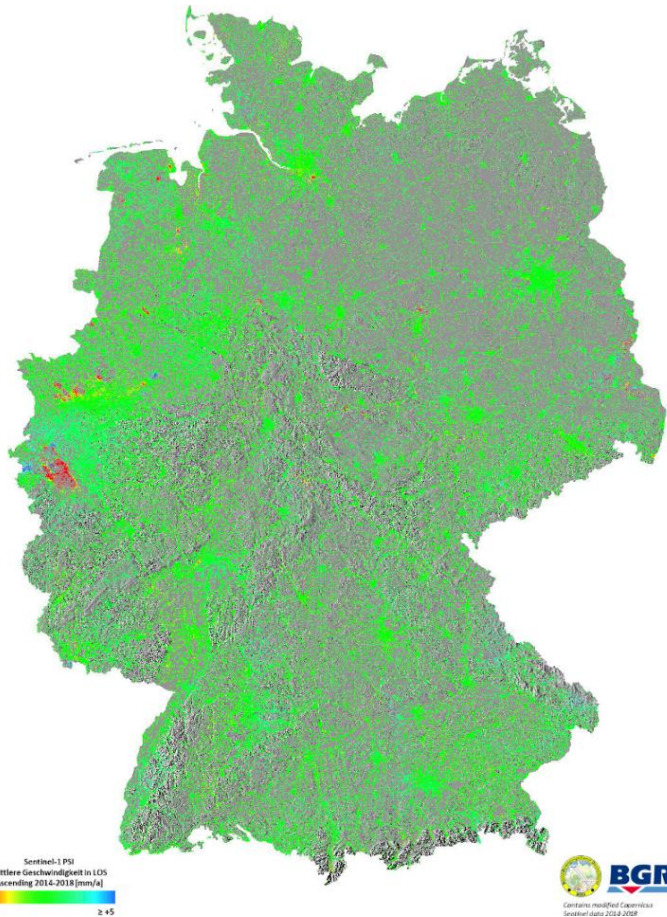
-Wie verlässlich, reproduzierbar ist das, welche Akzeptanz hat es?

Skalierung, Kalibrierung, Validierung der InSAR-Auswertungen

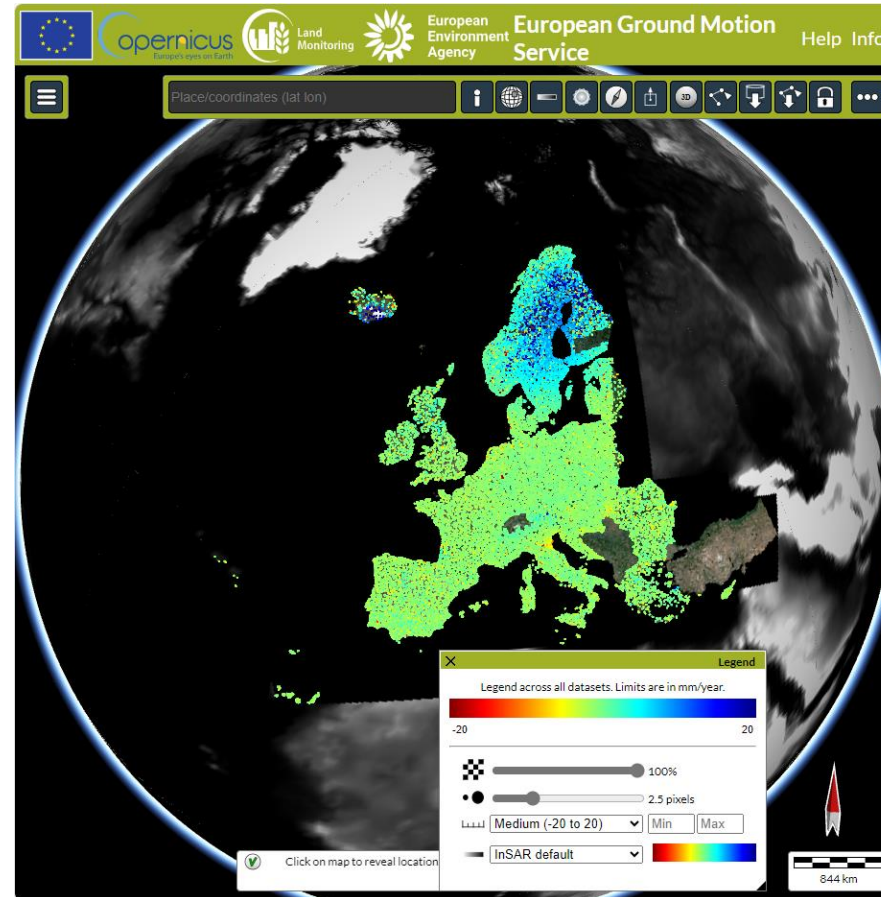
Mit frei verfügbaren Sentinel-1-Daten begann der „Run“

Sentinel-1A: Start 04/2014, Daten ab 12/2014 bis heute
Sentinel-1B: Start 04/2016, Daten von 12/2016 bis 12/2021

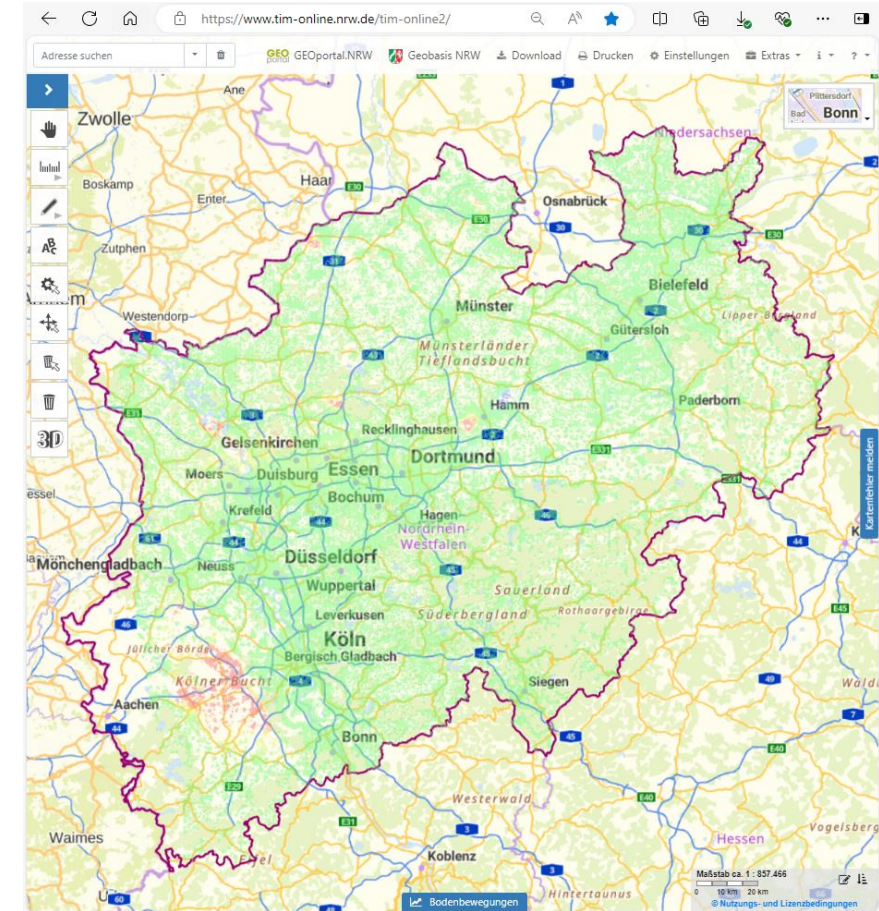
Bodenbewegungsdienste und
Bodenbewegungskataster



**BodenBewegungsdienst
Deutschland (BBD), 2019**

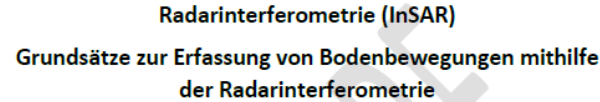


**European Ground Motion Service
(EGMS), 2020**



**Bodenbewegungskataster NRW
(BBK NRW), 2023**

Bodenbewegungsdienste und Bodenbewegungskataster, Grundsätze



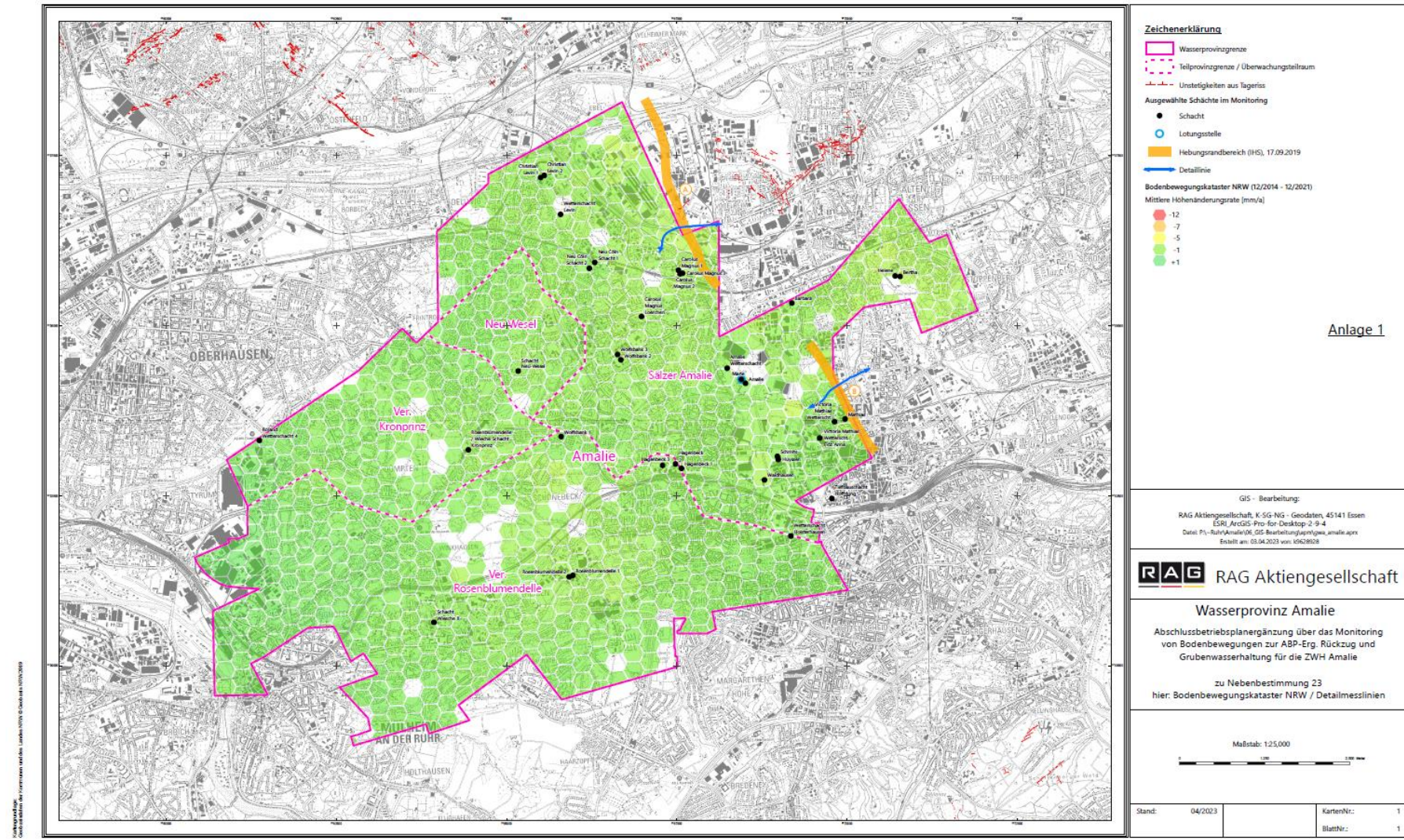
Grundsätze zur Erfassung von Bodenbewegungen mithilfe der Radarinterferometrie

Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen
der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)

**AdV: Rili-RB-AdV,
neues Kapitel RFP in Erarbeitung**

Integrales Monitoring Ruhr, Abschlussbetriebspläne RAG

Sentinel-1 InSAR-Auswertungen des Bodenbewegungskatasters von Geobasis NRW sind Bestandteil des Integralen Monitoring und RAG ABP-Ergänzungen zum Monitoring Grubenwasseranstieg (BR Arnsberg)



Satelliten



Prinzip der Radardatenerfassung

Seitensicht-Radar: polnahe Umlaufbahn, Blickrichtung „in Flugrichtung nach rechts“: Line of Sight (LOS).
InSAR wird genau ab ca. 30 Radar-Szenen.

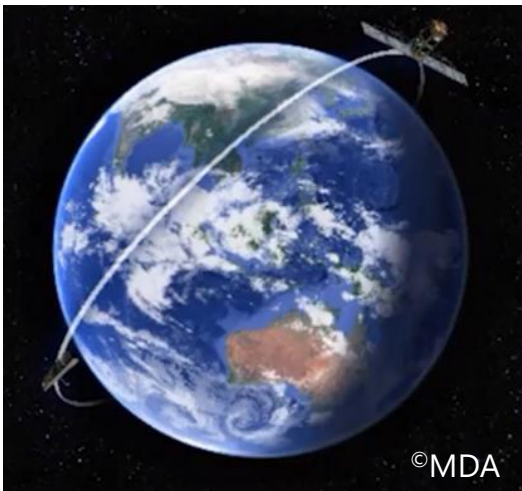


Zurzeit: Polnahe Umlaufbahn:

- Ascending & Descending Blickrichtung
- Alle derzeit operationellen Satelliten, z.B.:
Sentinel-1
Radarsat-2
TerraSAR-X, TanDEM-X, PAZ
- 2D – InSAR möglich

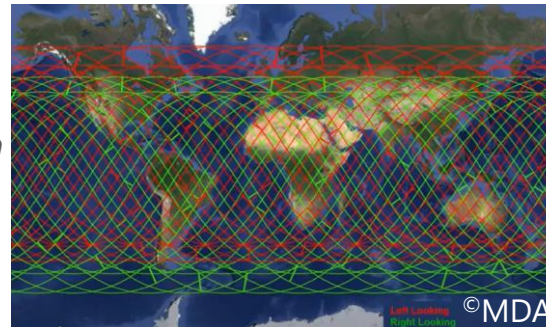
Ascending:
Blickrichtung nach Osten

Descending:
Blickrichtung nach Westen



Bald dazu: Äquaturnahe Umlaufbahn:
(verschränkter Orbit)

- CHORUS-X, CHORUS-C
(MDA, Kanada)
- Blickrichtung aus Süden
- vorauss. ab 2026
- 3D – InSAR möglich



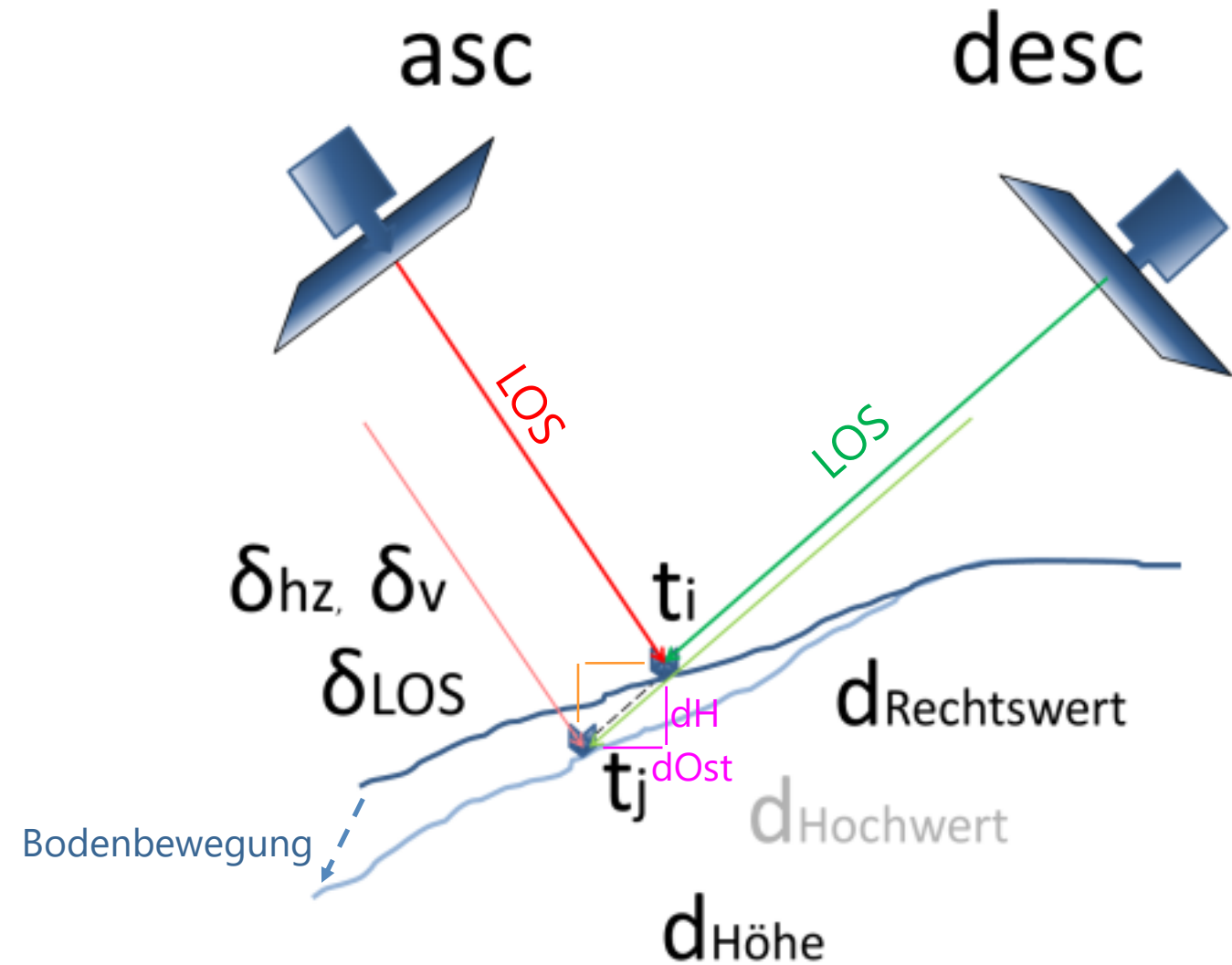
Bodenauflösung:

X-Band ist mit 1 bis 3m „hochauflösend“

C-Band ist mit ~5m „standard“

Prinzip der Radardatenerfassung

Seitensicht-Radar: polnahe Umlaufbahn, Blickrichtung „in Flugrichtung nach rechts“: Line of Sight (LOS).
InSAR wird genau ab ca. 30 Radar-Szenen.



- 1-D: Veränderungen in LOS, **asc** oder **desc**
- 2-D: Veränderungen aus **asc & desc** zu **dH & dOst**



Radarinterferometrie – Satelliten

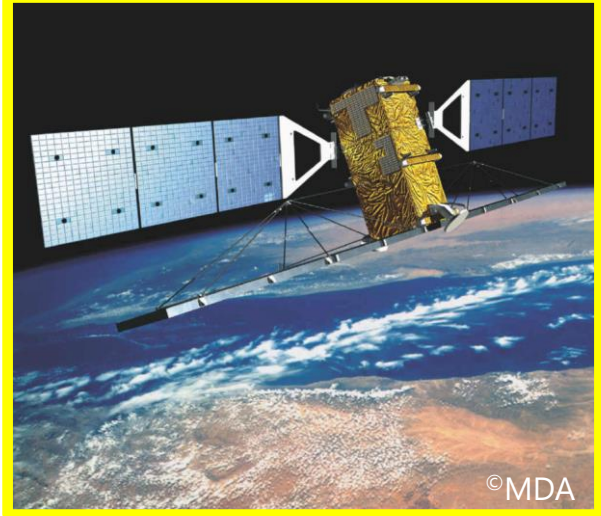
Beginn in FuE Projekten ab dem Jahr 2000, ab 2010 projektbezogenes Tagesgeschäft und Fortführung der FuE Projekte bis zum Jahr 2018, seitdem Innovation im Tagesgeschäft.



ERS-1/-2 (ESA), C-Band
1991-2000 | **1995-2003**



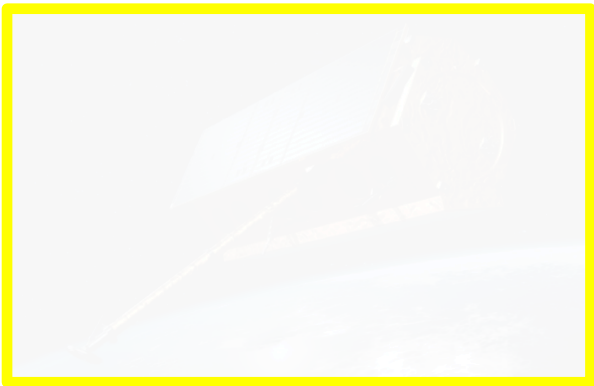
Envisat (ESA), C-Band
2003-2010



Radarsat-2 (MDA), C-Band
seit 2007 (kostenpflichtig)



Sentinel-1A/-B (ESA), C-Band
seit 2014 (*Copernicus-Programm*)



**TerraSAR-X/
TanDEM-X (DLR, Airbus D&S), X-Band**
seit 2007/2010 (kostenpflichtig)



CHORUS-X, CHORUS-C (MDA), X-Band/C-Band - Duo
voraus. 2026 (kostenpflichtig)
„3D-InSAR“ – Möglichkeit mit
Radarsat-2 oder Sentinel-1 sowie
TerraSAR-X, TanDEM-X, PAZ

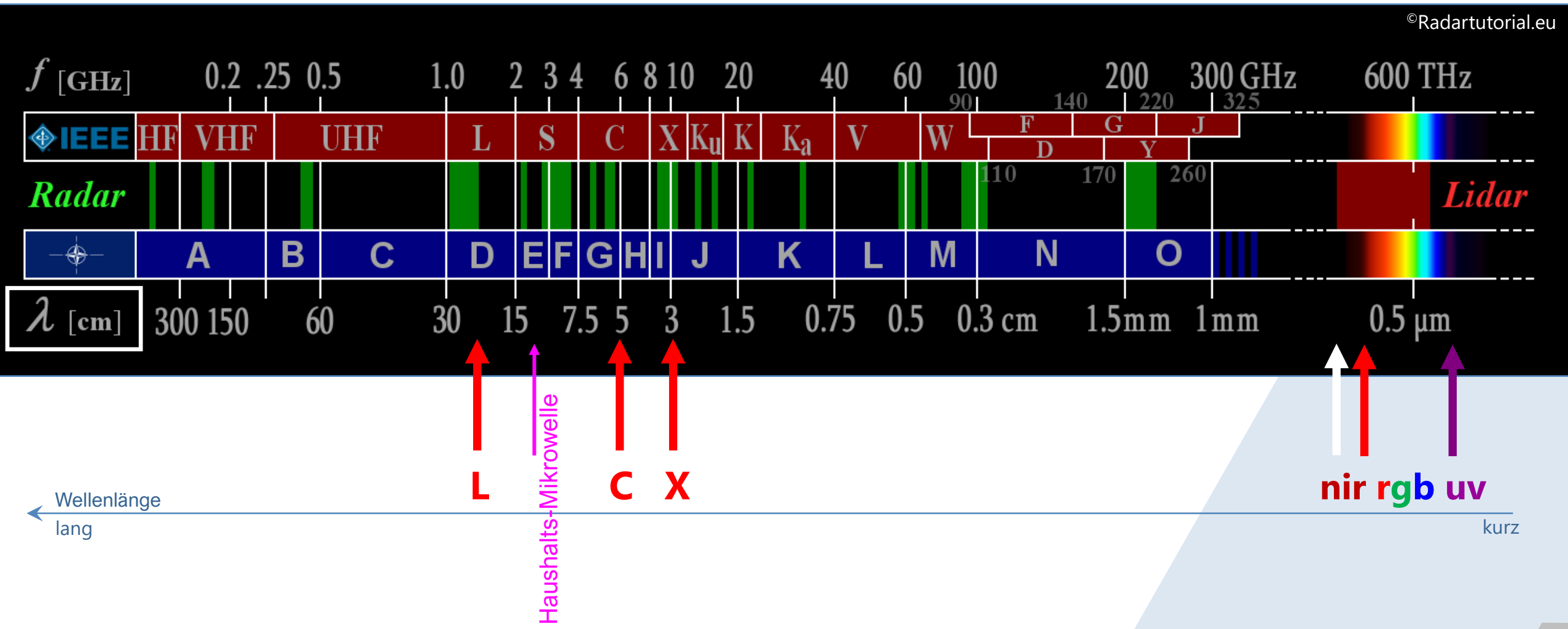
Sensoren



Sensoren: Wellenlängenbereiche: X-Band, C-Band, L-Band

Sentinel-1: C-Band, ca. 5,6 cm
TerraSAR-X: X-Band, ca. 3,1 cm

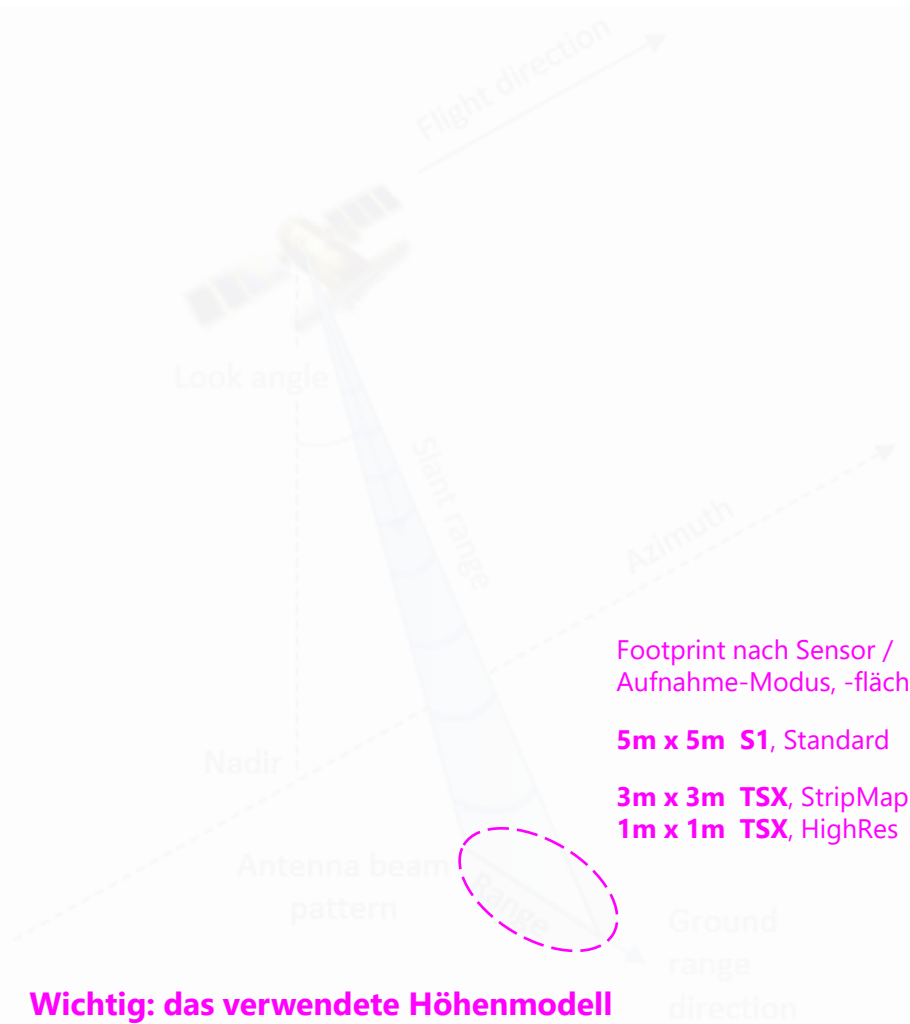
ROSE-L (Sentinel-12): L-Band, ca. 20 bis 30 cm, ab 2028 (?)



Sensoren: Rückstreu-Eigenschaften: X-, C-, L-Band

Sentinel-1: C-Band, ca. 5,6 cm
TerraSAR-X: X-Band, ca. 3,1 cm

ROSE-L (Sentinel-12): L-Band, ca. 20 bis 30 cm, ab 2028 (?)

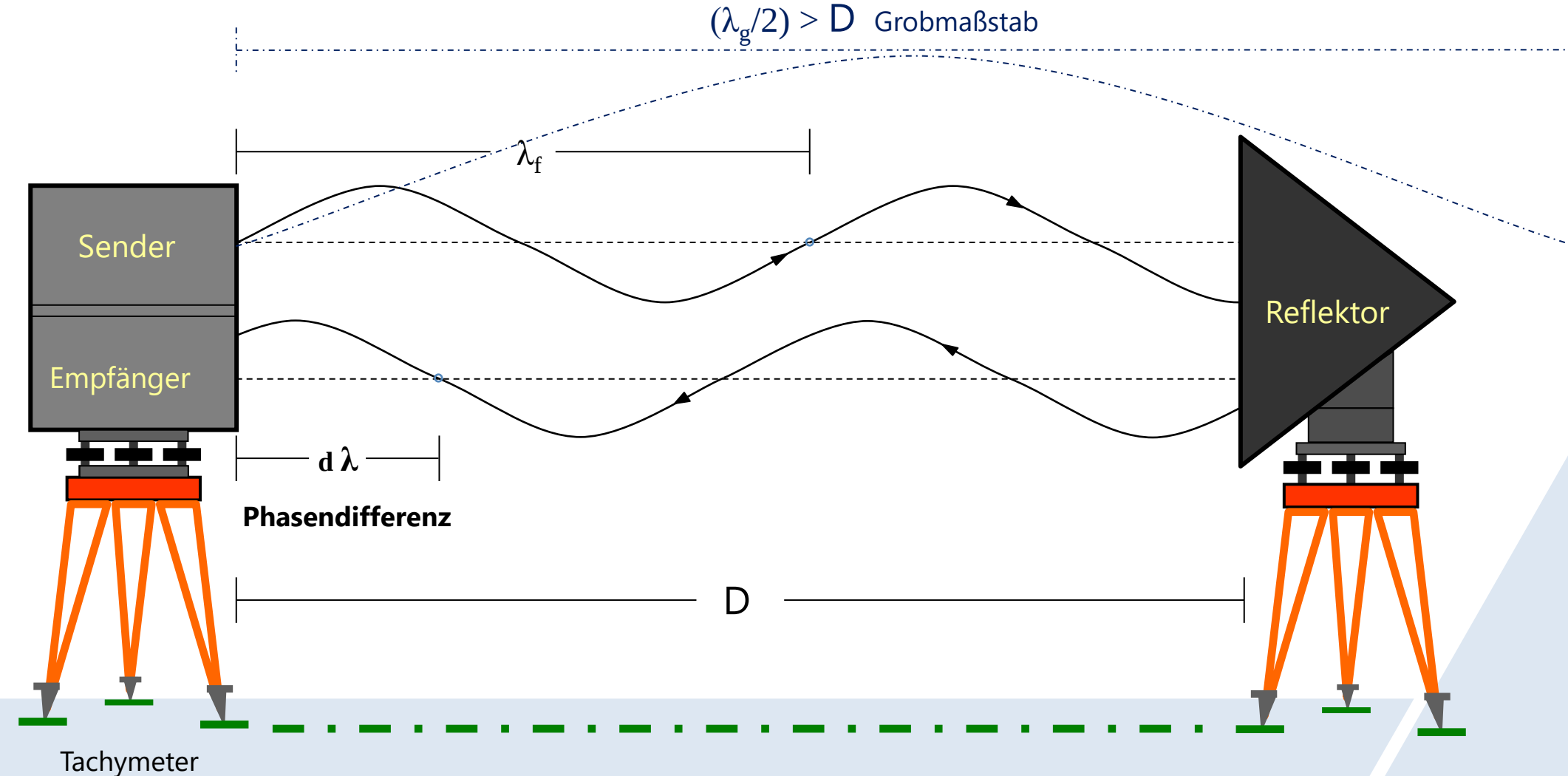


Technik



Radarinterferometrie – Technik – Funktionsprinzip

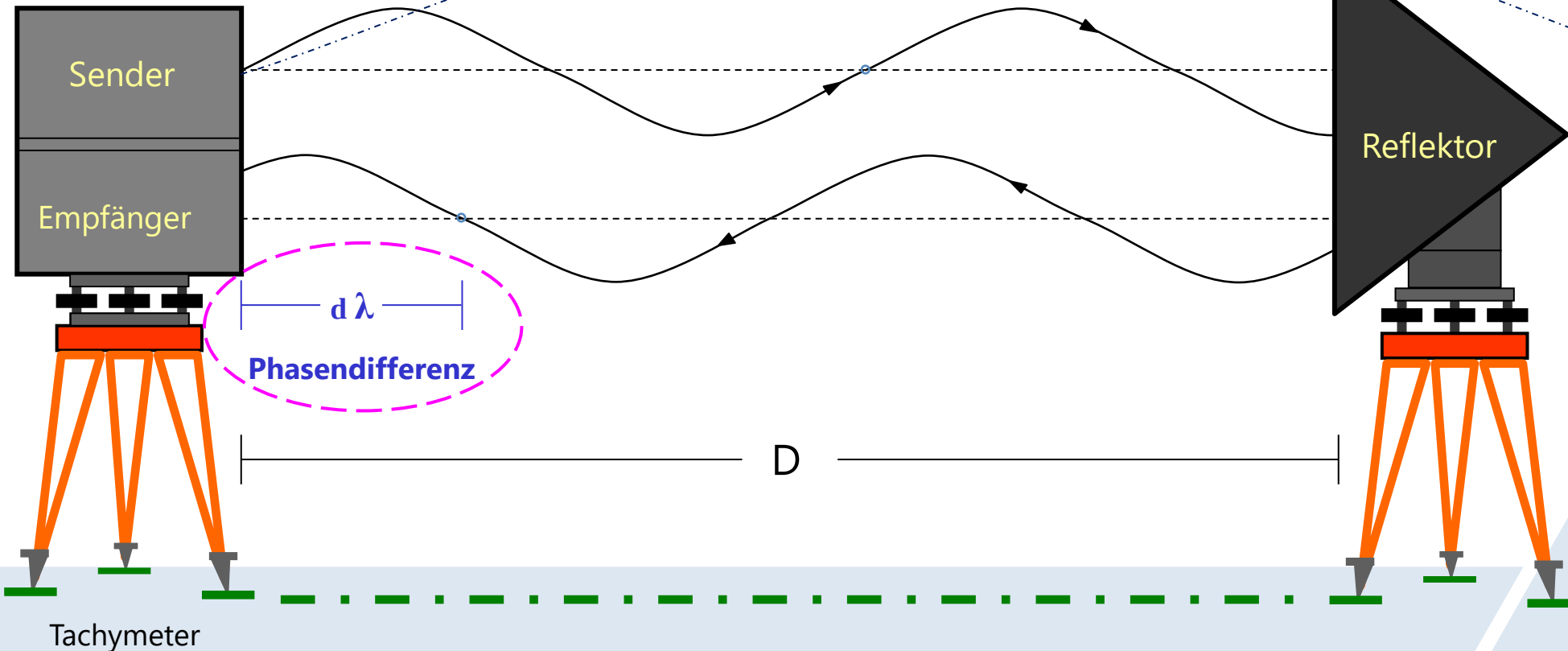
Elektro-optische Distanzmessung – Tachymeter – Phasenvergleichsverfahren über Phasendifferenz $d\lambda$



Radarinterferometrie – Technik – Funktionsprinzip

Elektro-optische Distanzmessung – Tachymeter – Phasenvergleichsverfahren über Phasendifferenz $d\lambda$

*Bei Radarsatelliten
gibt es keinen Grobmaßstab!*



Radarinterferometrie – Technik – Streckenmessung

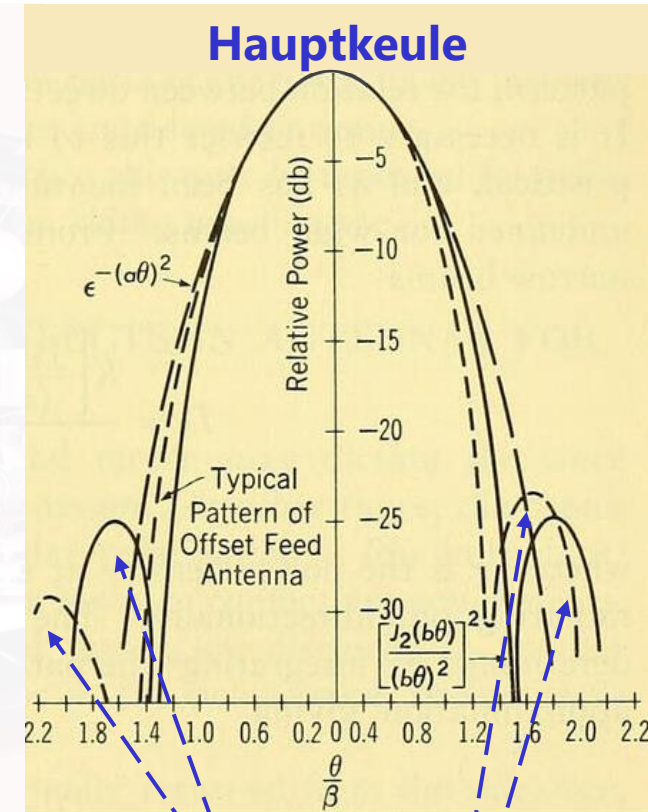
Langstreckenmessungen mit Mikrowellen-Messgeräten (Tellurometer, 1957), SIAL MD-60 (~1970),
Messweite 25 bis 50+ km

Sendeantenne

Empfangsantenne

Signalausbreitung

SIAL



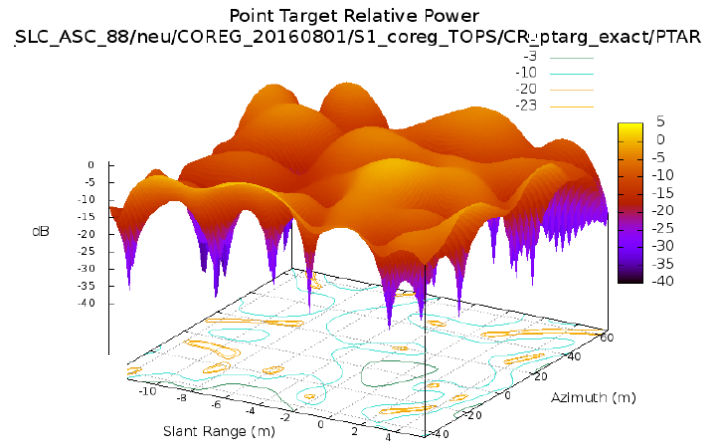
Tellurometer M/RA-1 von Dr. T. L. Wadley

Radarinterferometrie – Technik – Rückstreu-Signal mit CR

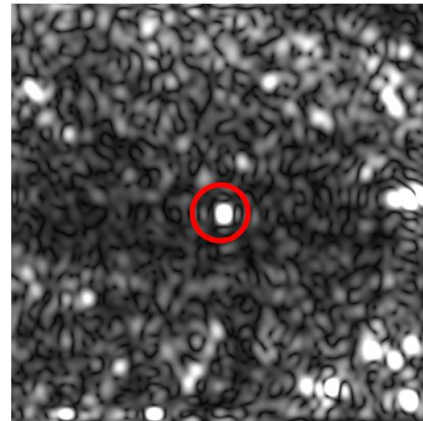
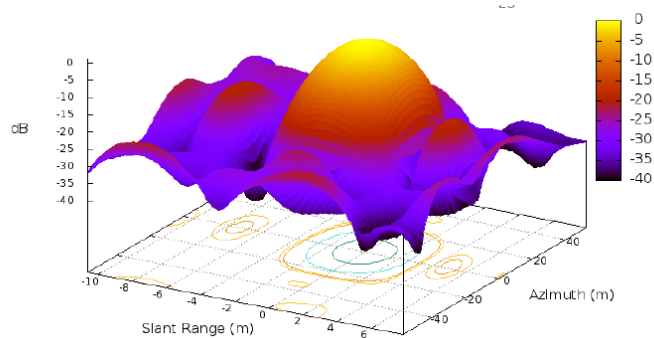
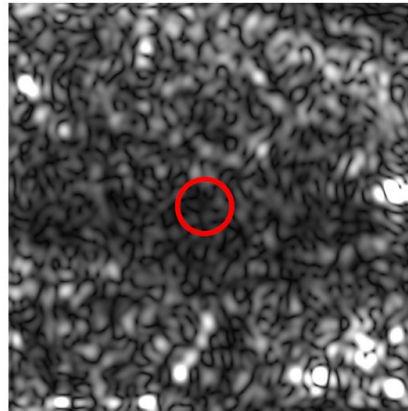
Der Footprint des Radarpulses enthält das Sammelsignal vieler Rückstreuer. Wenn einer davon ein Hauptstreuer ist, kann er unter Umständen lokalisiert werden. Oder er ist ein bekannter Reflektor!

Ascending Orbit

Rückstreuung (dB)

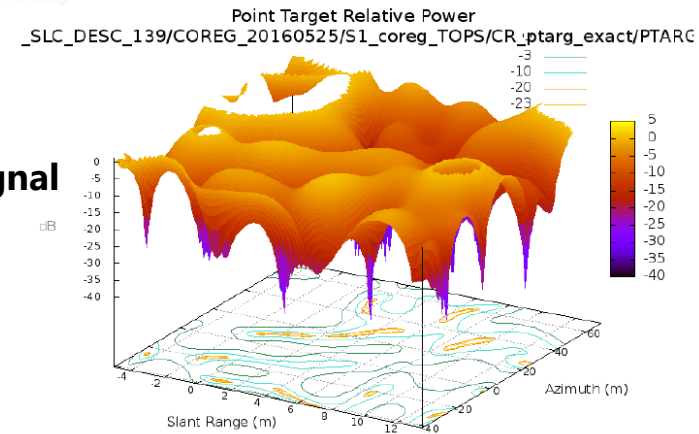


Intensitätenbild

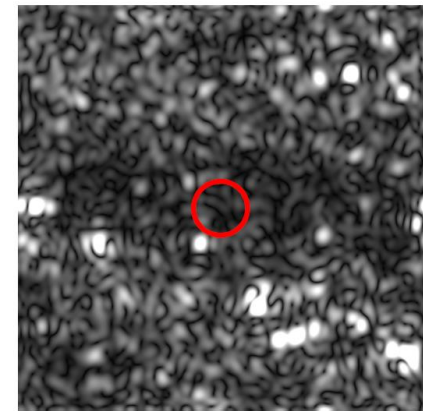


Descending Orbit

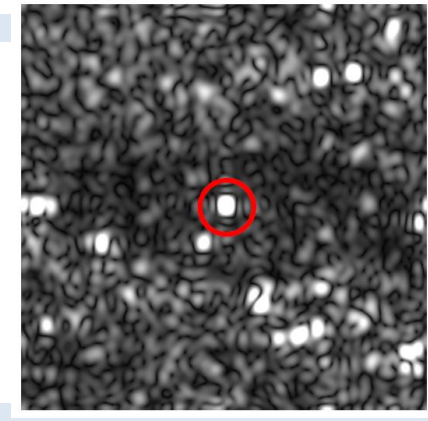
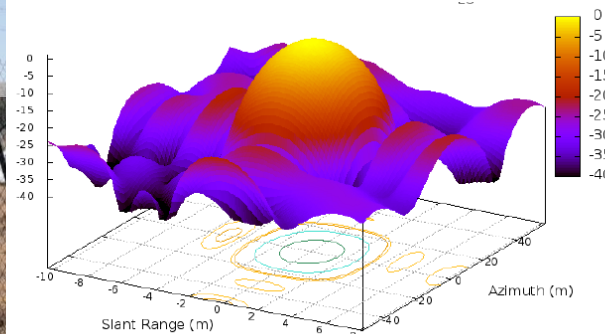
Rückstreuung (dB)



Intensitätenbild



Bodensignal



Radar-“Mess-/Passpunkte”



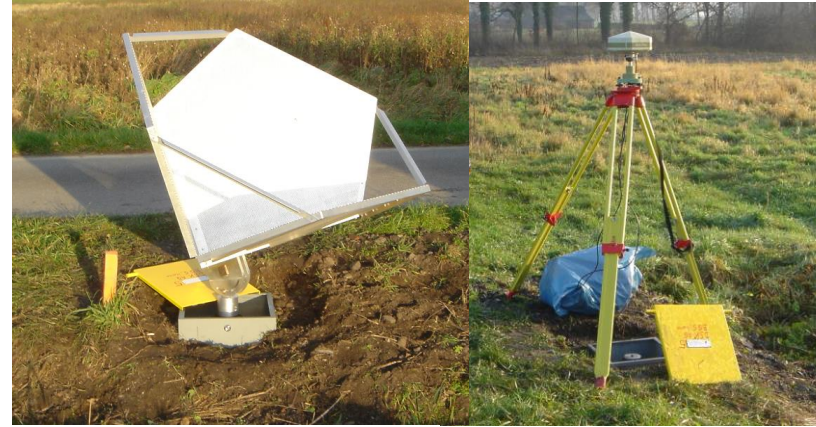
Radarinterferometrie – Georeferenzierung - Cornerreflektoren

Mikrowellen im Zentimeterbereich werden von metallischen Oberflächen reflektiert.

Stichworte: „elektrische Leitfähigkeit“, „Dielektrizitätskonstante“.



Prinzip/Reflektor-Form



X-/C-Band CR, Bauart TU Clausthal, ab 2006



X-/C-/L-Band GNSS Doppel-CR (DCR), RAG, 2020



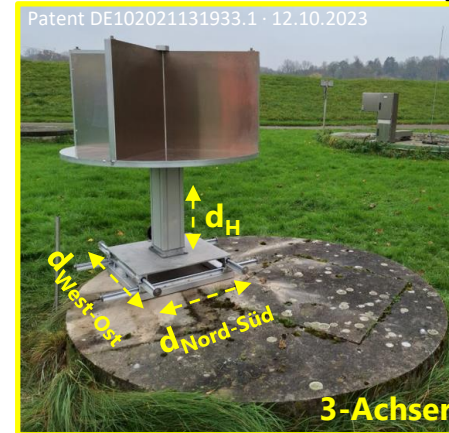
X-/C-Band GNSS-DCR, RAG & ALLSAT 2022



X-/C-Band GNSS-TriCR
RAG & ALLSAT, 2024



X-/C-Band Validierungs-GNSS-DCR
RAG, ALLSAT, Stadt Essen, 2022



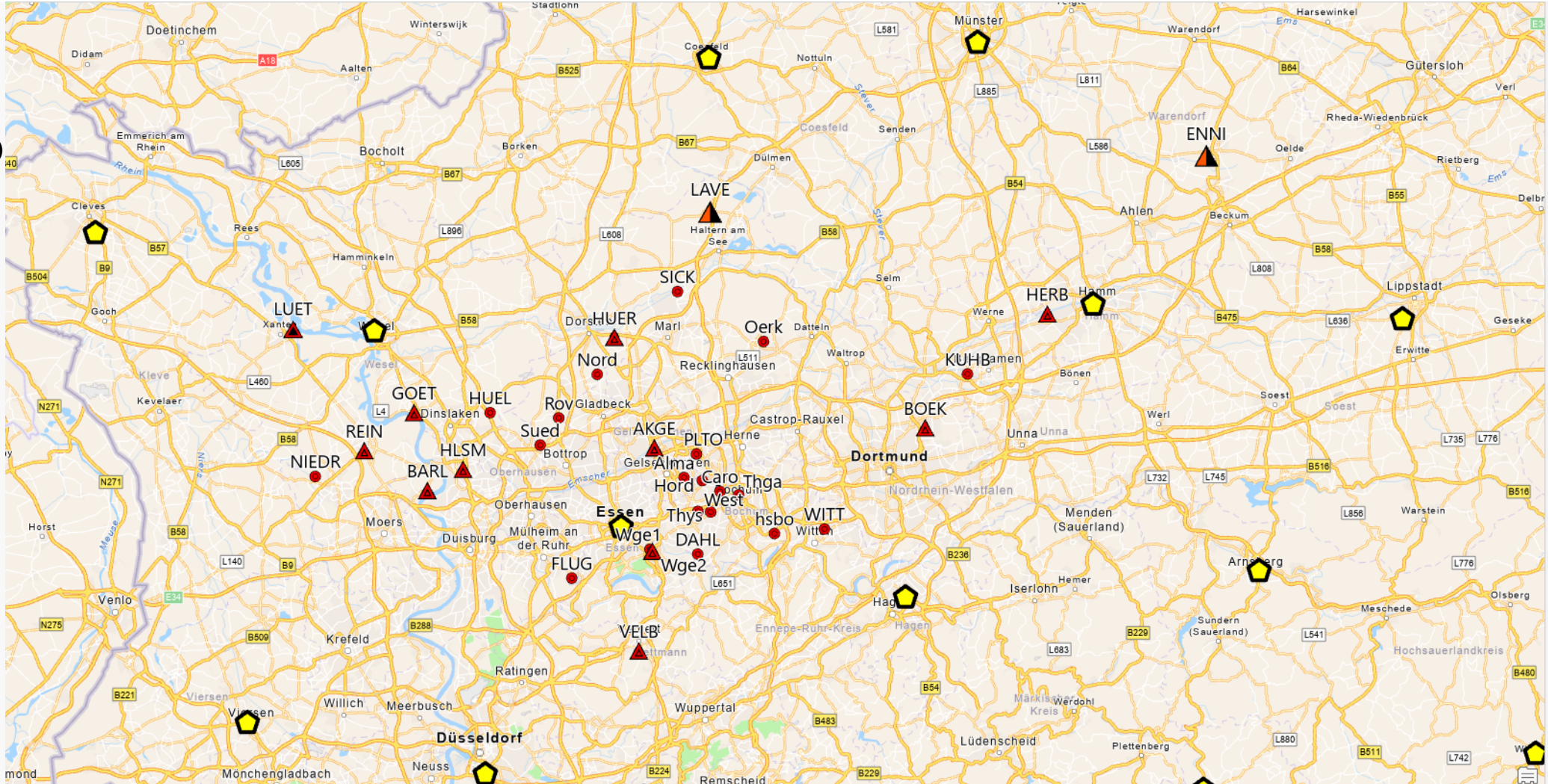
X-/C-Band Validierungs-GNSS-TriCR
RAG & ALLSAT, Stadt Essen, 2024

Der Reflektor muss um ein Vielfaches größer als die Wellenlänge sein, $\geq$ Faktor 10.

Radarinterferometrie – RAG Monitoring Konzept Ruhr

Projektbezogen seit 2006 Aufbau von CR, seit 2014 permanente GNSS-Stationen. Ab 2020 so genannte Multisensor-Referenzstationen (MSST): GNSS, Doppel-/TriCR, Niv-/Tachymeter Punkte & Meteo-Sensor.

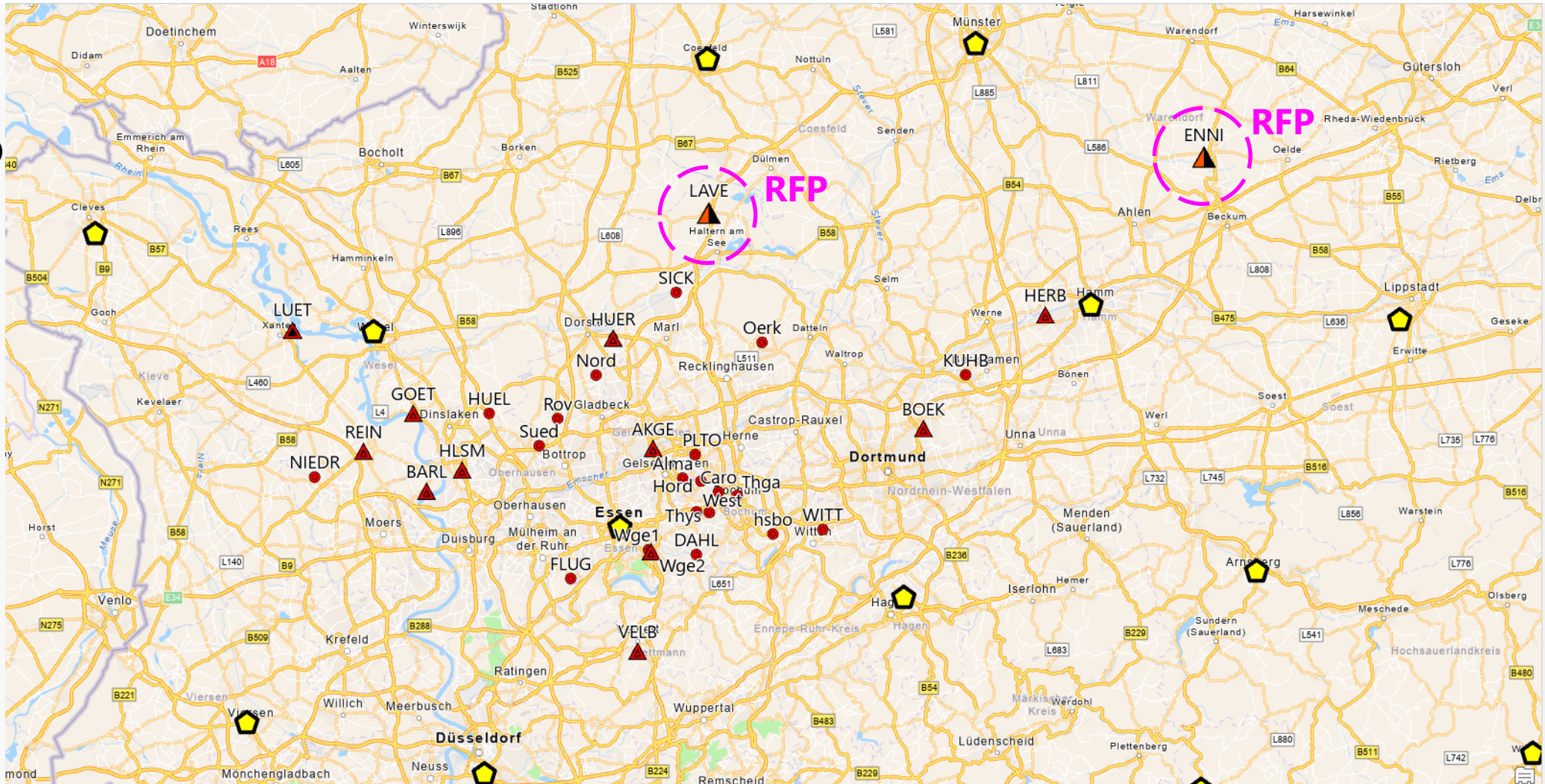
-  SAPOS-Station
-  SAPOS-MSST (2025)
-  RAG-MSST
-  RAG GNSS-Station



Radarinterferometrie – RAG Monitoring Konzept Ruhr

Projektbezogen seit 2006 Aufbau von CR, seit 2014 permanente GNSS-Stationen. Ab 2020 so genannte Multisensor-Referenzstationen (MSST): GNSS, Doppel-/TriCR, Niv-/Tachymeter Punkte & Meteo-Sensor.

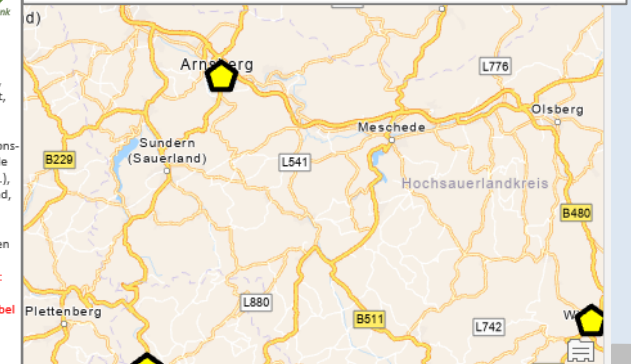
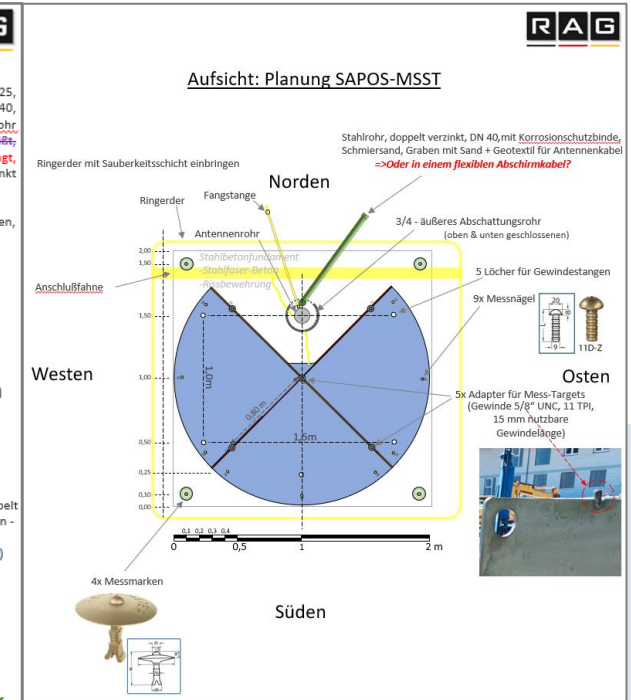
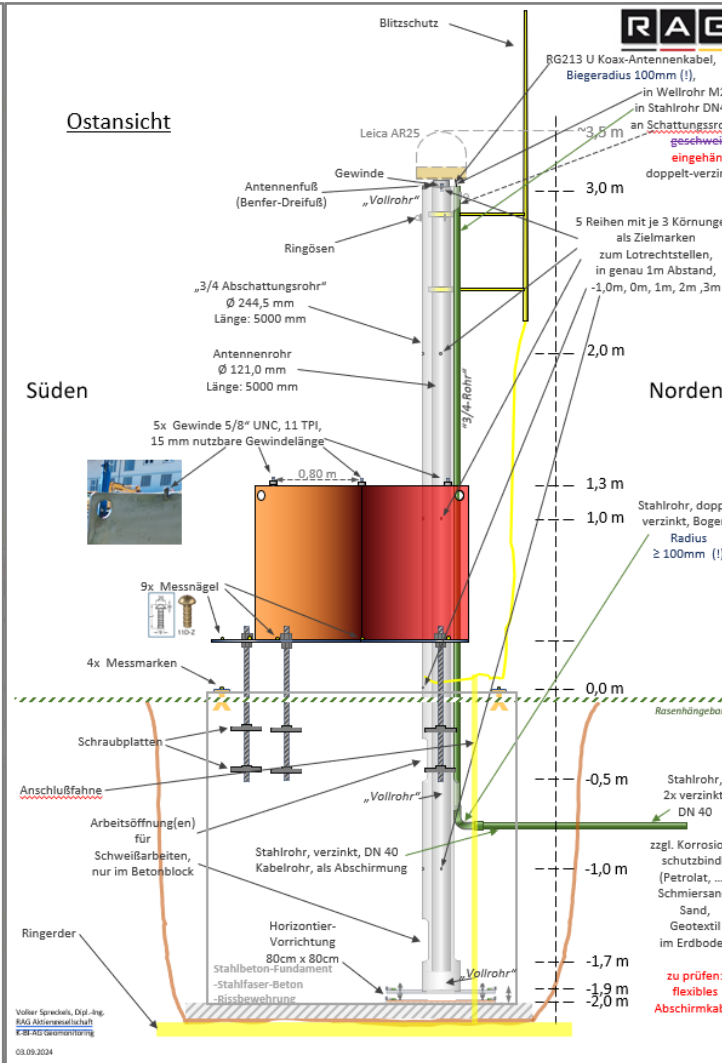
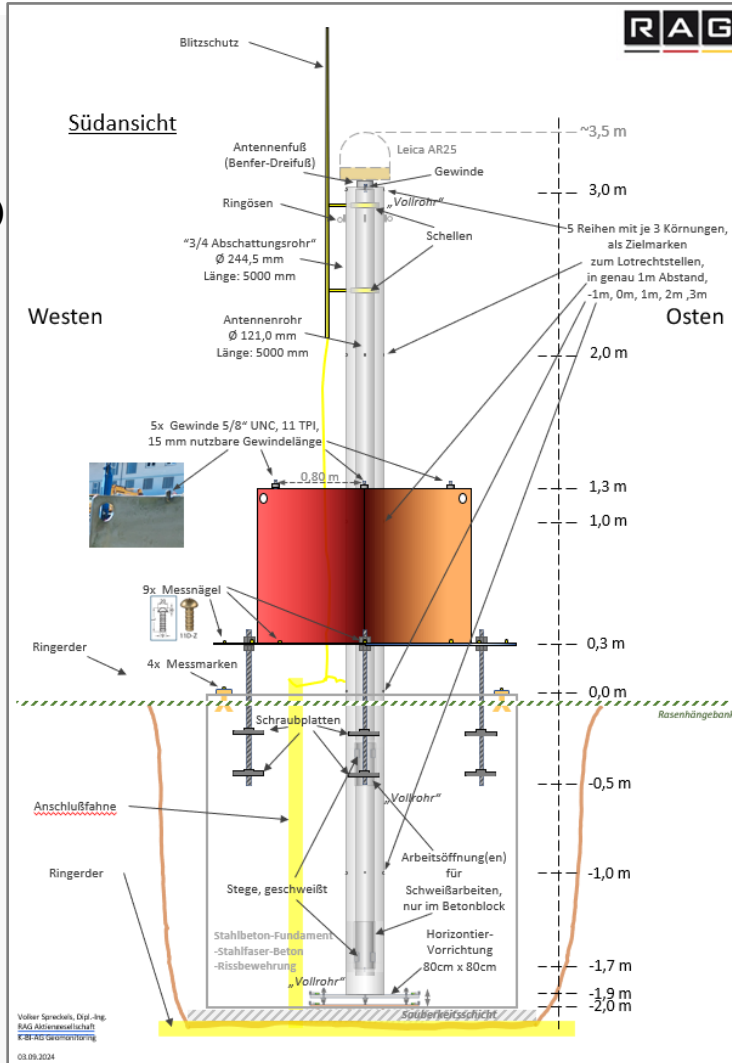
-  SAPOS-Station
-  SAPOS-MSST (2025)
-  RAG-MSST
-  RAG GNSS-Station



Radarinterferometrie – SAPOS-MSST

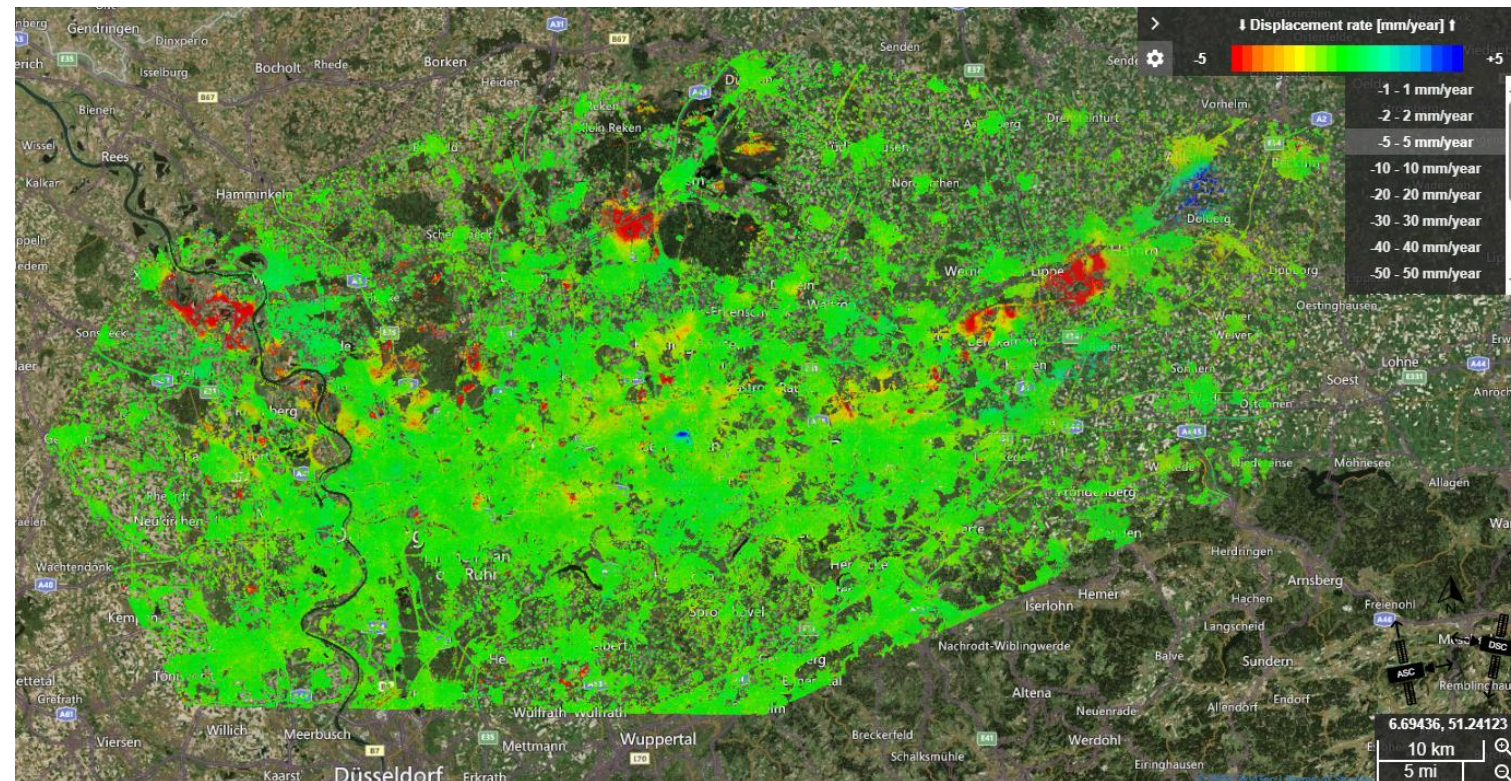
Durchmesser 2 m, 1 m Kantenlänge, Edelstahl – Triple-Corner Reflektor, permanente GNSS-Station, Messpunkte für den Anschluss an Leitnivellement, Tachymeter-Messpunkte.

SAPOS-MSST (2025)



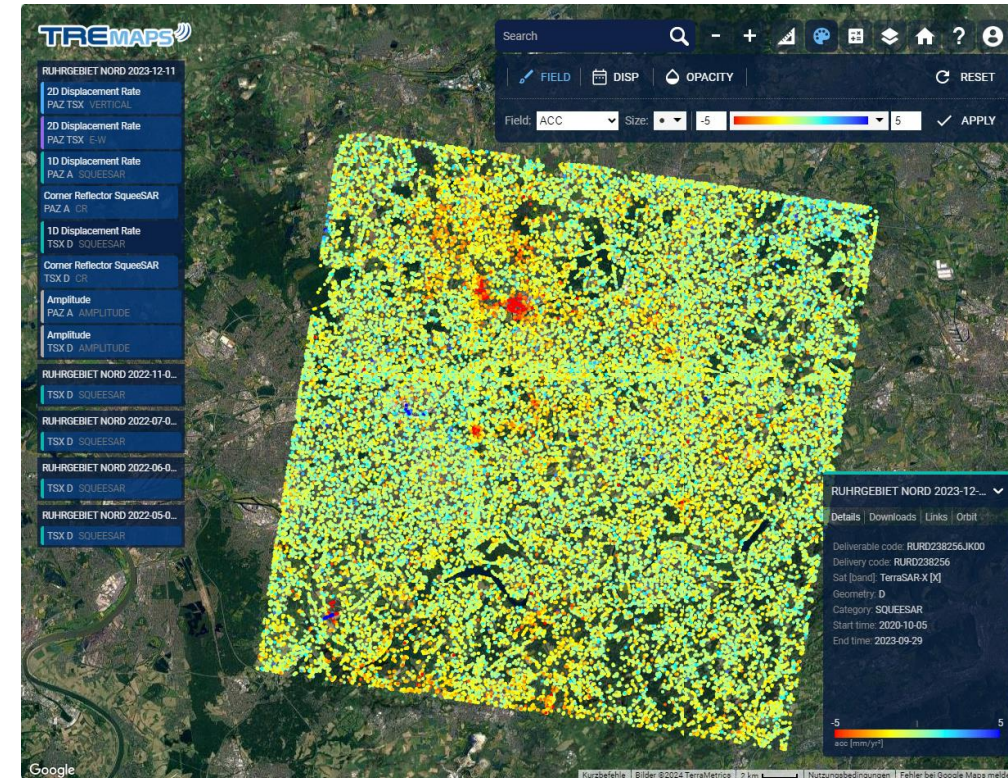
Radarinterferometrie: aktuelle Projekte im Ruhrgebiet

Der Grubenwasseranstieg führt zu großflächigen stetigen Hebungen. Diese wurden bisher mit Flächen Nivellements erfasst. Diese amtlichen Leitnivellementzyklen werden ab 2025 auf fünf Jahre ausgedehnt. Es ist nun an der Zeit, mit dem Althergebrachten auf neue fernerkundliche Verfahren zu wechseln.



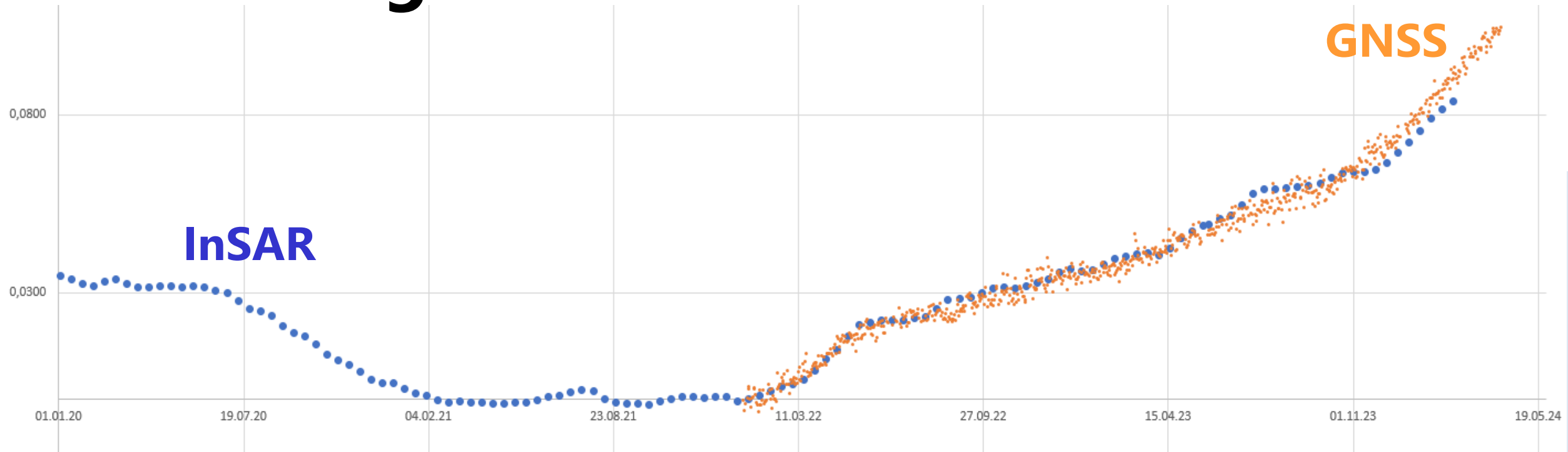
RAG: Sentinel-1 C-Band „Wide-Area“-Auswertungen

Ablösung Leitnivellement ist möglich!



RAG & Stadt Essen: TerraSAR-X X-Band Auswertungen

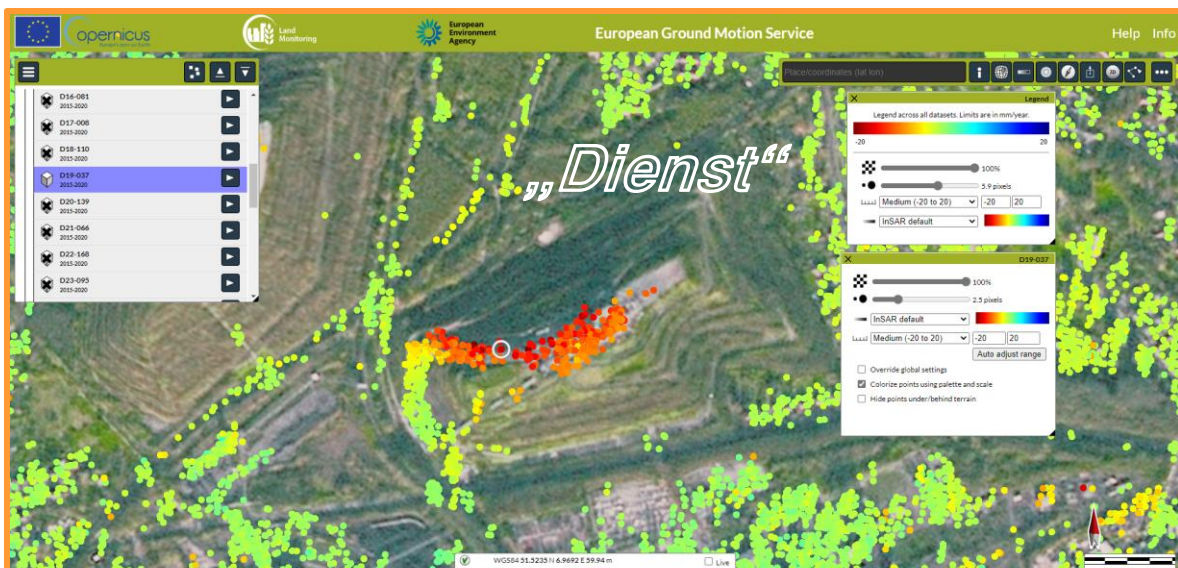
Skalierung



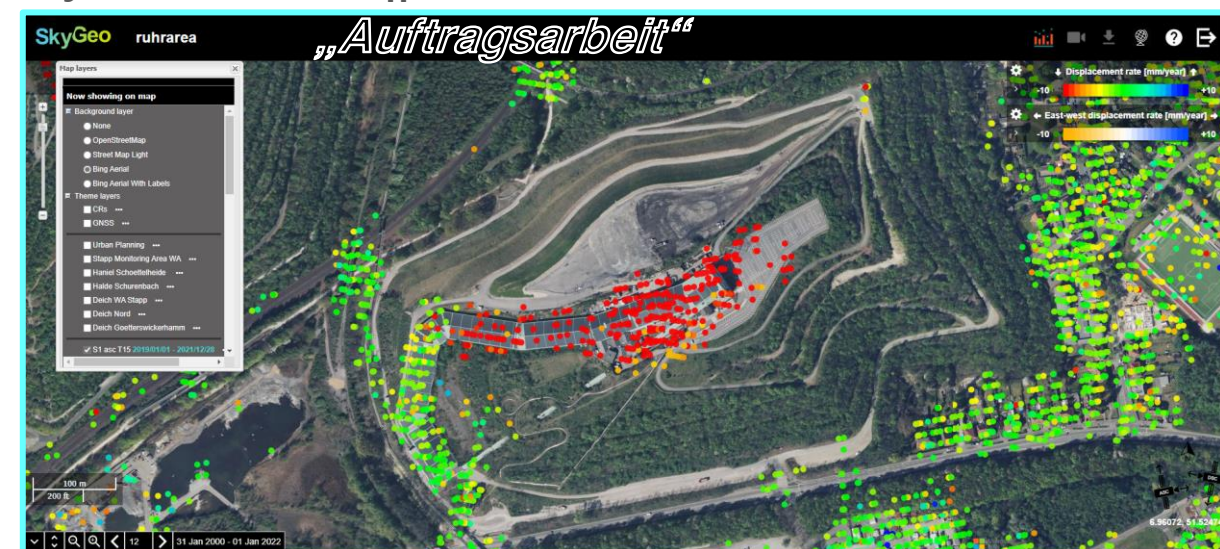
RAG: InSAR-Auswertungen Alpincenter Bottrop



EGMS und BBD: C-Band, Sentinel-1, LOS, desc.

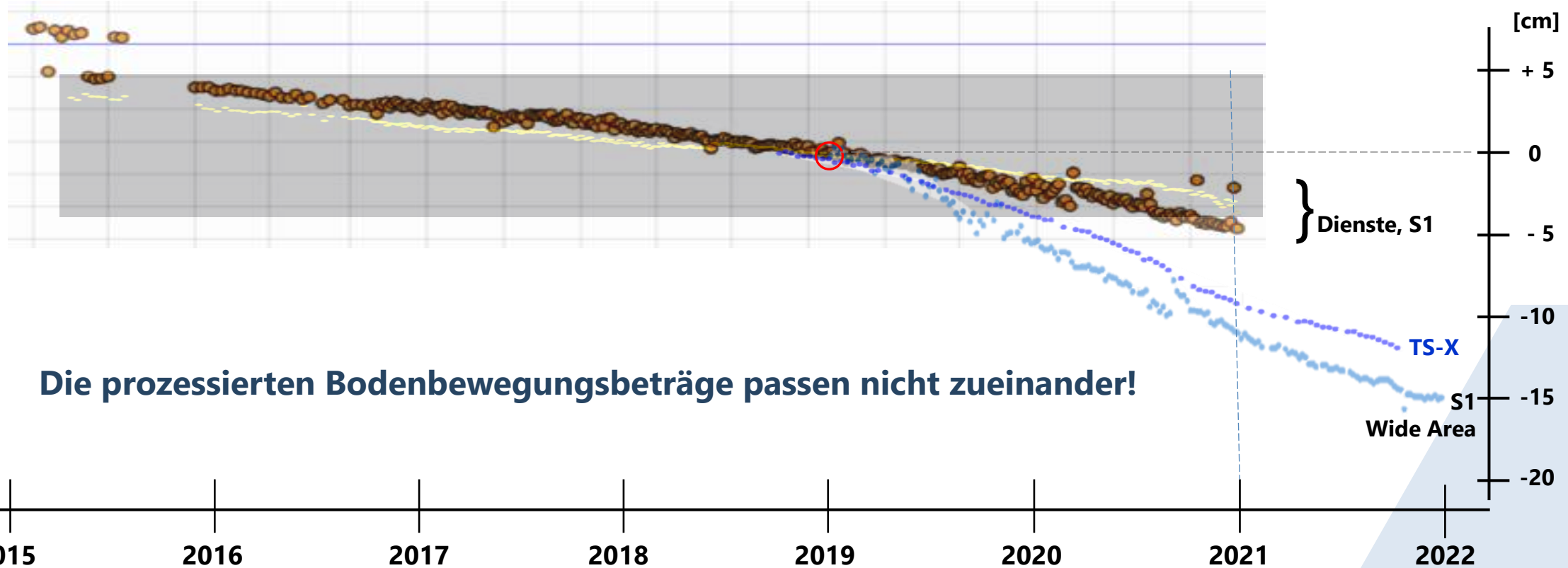


SkyGeo: Sentinel-1 || TRE: X-Band TerraSAR-X. Beide LOS, desc.



Skalierung: RAG – InSAR-Erfahrungen Alpincenter Bottrop

Bewegungszeitreihen der vier InSAR Auswertungen an einer Stelle des Alpincenters, zwei unterschiedliche Satelliten – Wellenlängen: C-Band 5,5 cm, X-Band 3 cm



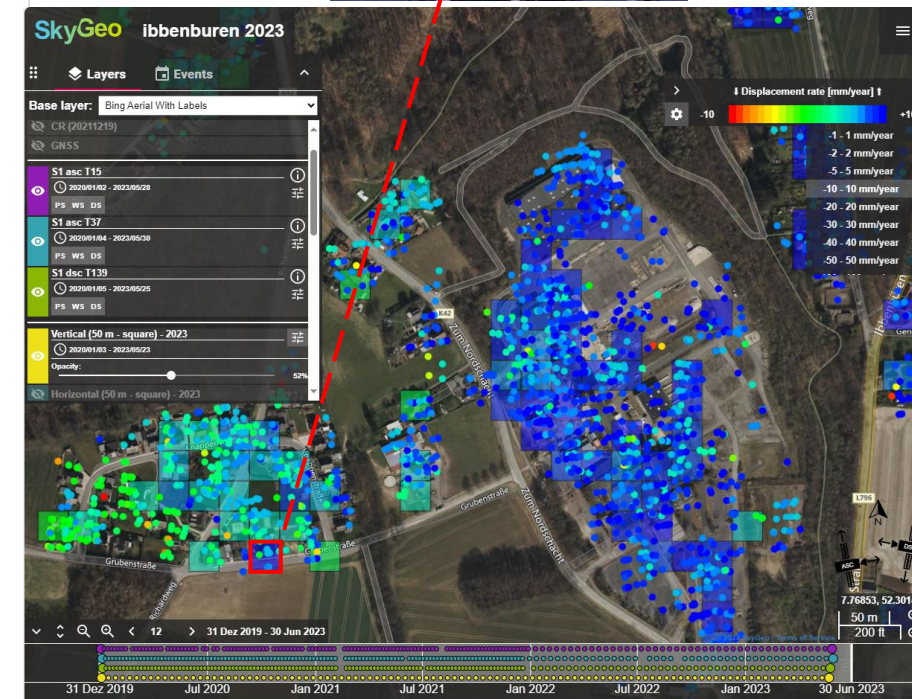
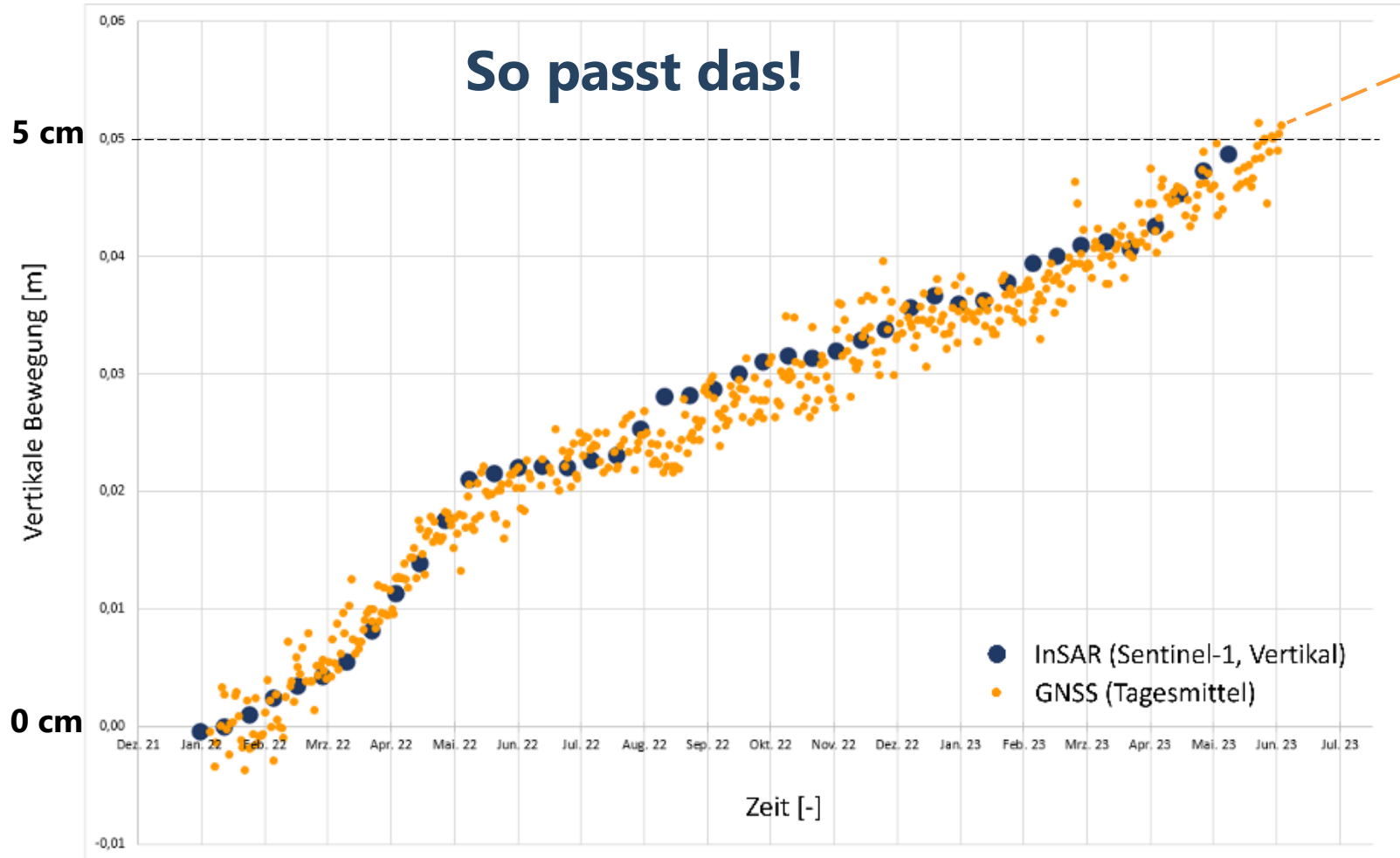
Die prozessierten Bodenbewegungsbeträge passen nicht zueinander!

C-Band, Sentinel-1 (S1): orange: EGMS gelb: BBD hellblau: SkyGeo

X-Band, TerraSAR-X (TS-X): dunkelblau: TRE

RAG: Skalierung von InSAR über GNSS-Doppel-CR

Bewegungszeitreihen für GNSS-gestützte 2D-InSAR Auswertungen (S1) am RAG
GNSS-Doppel-Cornerreflektor „Nordschacht“, Ibbenbüren, 01/2022 – 06/2023

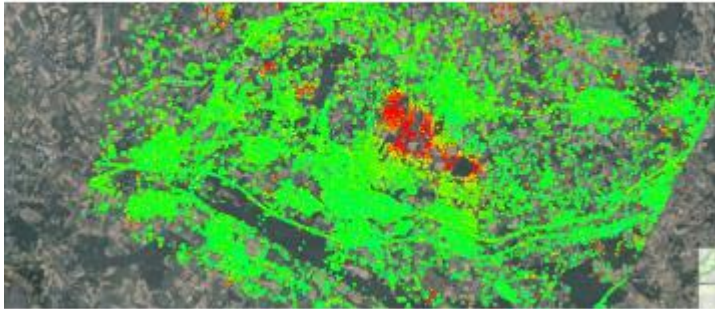


RAG: InSAR – Projekte über GNSS- und GNSS-Doppel-CR

Seitens RAG-beauftragte, GNSS-gestützte, InSAR Auswertungen für Ibbenbüren und Ruhr:

Ibbenbüren 2022

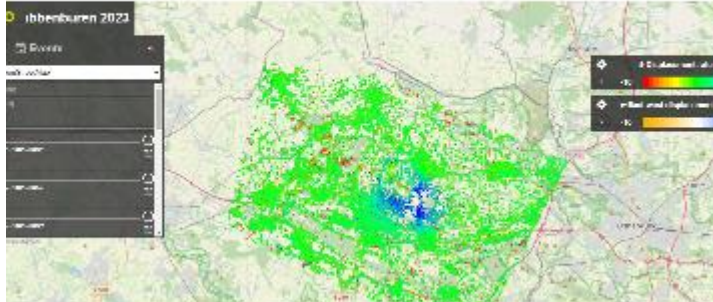
21 Mar 2024 Jan 01, 2019 - Dec 30, 2021



3-Jahres-Zeitscheibe [01/2019 – 12/2021]

Ibbenbüren 2023

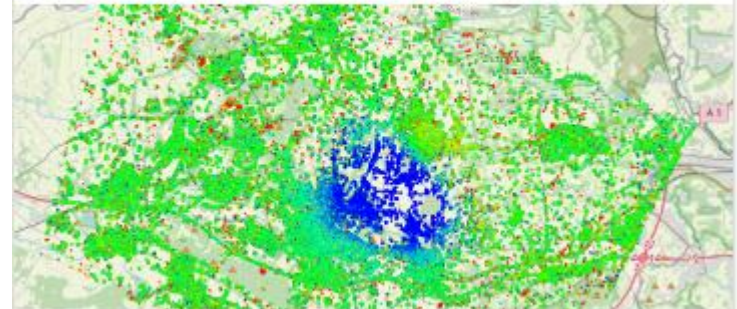
21 Mar 2024 Jan 02, 2020 - May 30, 2023



3-Jahres-Zeitscheibe [01/2020 – 05/2023]

Ibbenbüren 2024

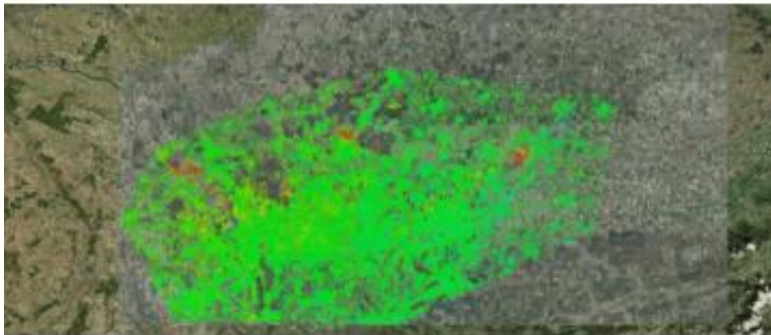
09 Apr 2024 Jan 02, 2021 - Feb 28, 2024



3-Jahres-Zeitscheibe [01/2021 – 02/2024]

Ruhr Area

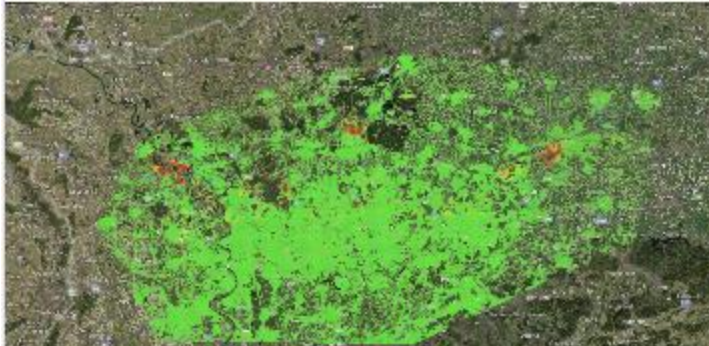
21 Mar 2024 Jan 01, 2019 - Dec 30, 2021



3-Jahres-Zeitscheibe [01/2019 – 12/2021]

ruhrarea_2023

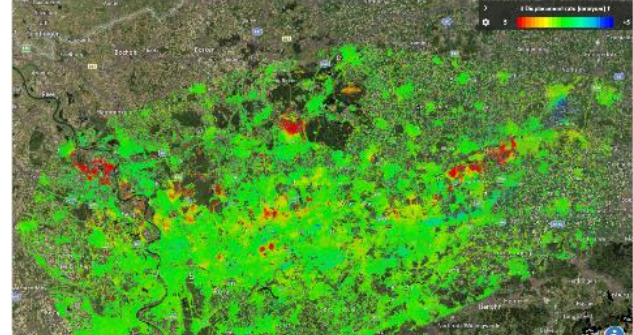
21 Mar 2024 Jan 01, 2020 - Mar 31, 2023



3-Jahres-Zeitscheibe [01/2020 – 03/2023]

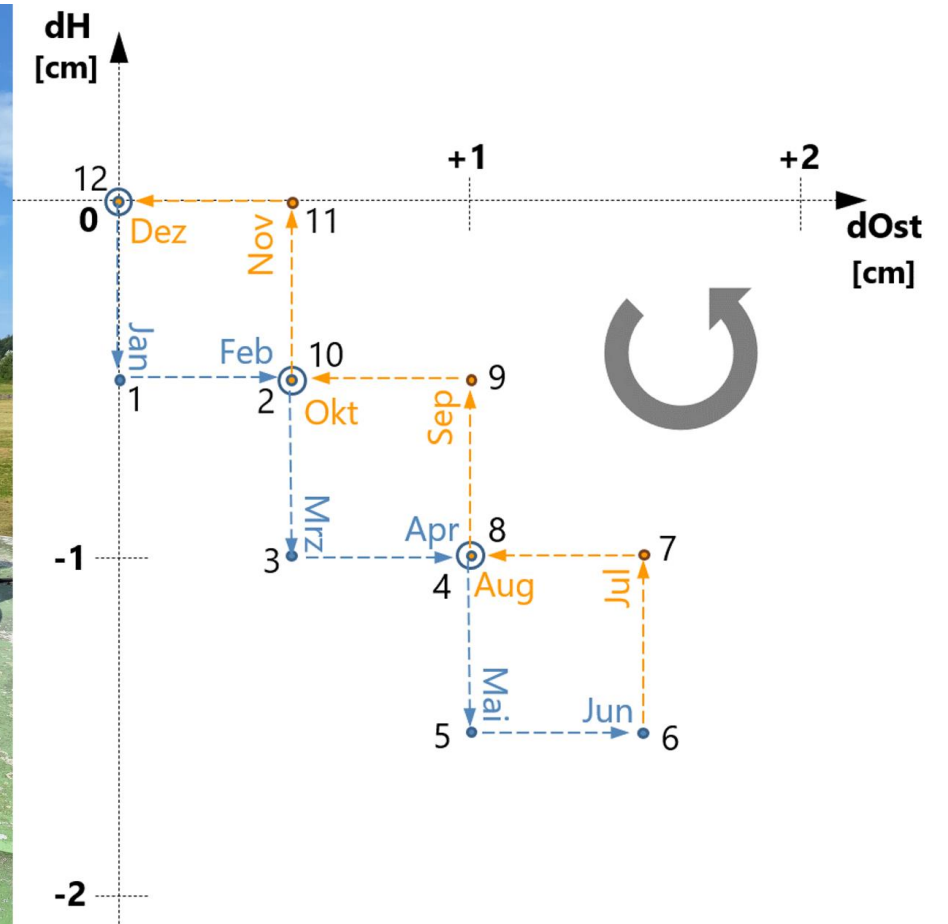
Ruhrarea 2024

12 Sep 2024



3-Jahres-Zeitscheibe [01/2021 – 03/2024]

Kalibrierung, Validierung



NRW: SAPOS-Antennen – Kalibrierung,
diverse EDM-Kalibrierstrecken (Arnsberg, Bochum, Detmold, Düsseldorf, Köln, Münster),
Komparatoren zur Prüfung der im Leitnivellement verwendeten Nivellierlatten.

- „Radar-Dienste“ zeigen an gleichen Stellen unterschiedliche Bodenbewegungsbeträge
- Es gibt keine Kalibrierungen und Validierungen für die radarinterferometrische Bodenbewegungsauswertung
- Ansatz RAG & Stadt Essen 2021:
Einrichtung eines Testfeldes auf dem Gelände der Wassergewinnung Essen durch RAG, Stadt Essen und ALLSAT im Jahr 2021.

RAG: InSAR-Test-/Validierfeld Wassergewinnung Essen

Aufbau und Betrieb eines Kalibrier- und Validiertestfeldes für C-Band und X-Band – InSAR-Auswertungen: Stadt Essen, ALLSAT und RAG



Aufbau auf dem Gelände der Wassergewinnung Essen Überraehr-Hinsel ab 2021.

RAG: InSAR-Test-/Validierfeld Wassergewinnung Essen

Aufbau und Betrieb eines Kalibrier- und Validiertestfeldes für C-Band und X-Band - InSAR-Auswertungen: Stadt Essen, ALLSAT und RAG (siehe auch: AVN 04/2024).



Eine feste GNSS-Station (St.1) mit zwei festen CR (asc + desc) – getrennte Standorte

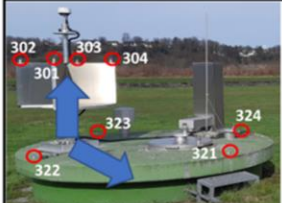
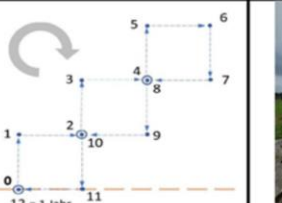
Ein in Höhe und in Ost-West-Richtung verstellbarer GNSS - Doppel-CR, „2-Achser“ (St.3)

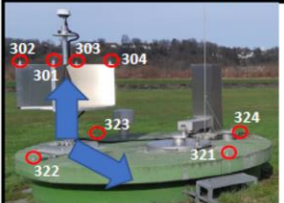
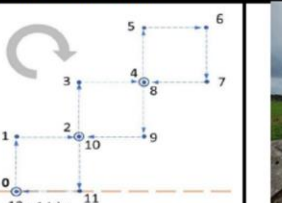
Ein in Höhe, O-W- und N-S-Richtung verstellbarer GNSS-TriCR, „3-Achser“ (St.2)

„CHORUS - 3D-InSAR – Ready“

RAG: InSAR-Test-/Validierfeld Wassergewinnung Essen

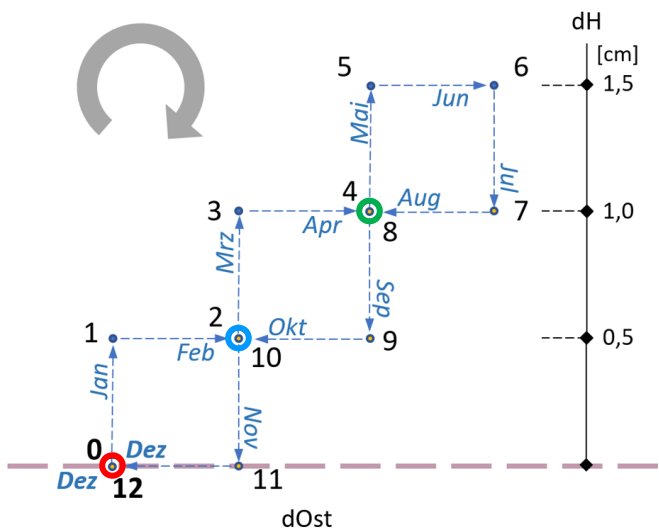
Validier-Verfahren zur Höhenänderungsbestimmung von InSAR Auswertungen über GNSS-Messungen:
CR-Verstellungen in einem „Closed-Loop“: Tachymetrische Kontrollmessungen der Verstellungen.

GB-Nr.: 2023-VE-0032			Gemessene Verstellwerte CR3 2023			CR 2 ab 2023	
			Wassergewinnung Essen-Überruhr				
							
Verstellung (Planung)	Datum	PNr.	32365 East [m]	5699 North [m]	Höhe [m ü. NHN]	Höhe [m ü. NHN]	
0	16.01.2023	301	661,387	673,538	57,673	56,274	
	(Nullmessung)	302	660,638	673,544	57,672		
	20.01.2023	303	660,646	674,348	57,676		
	(2. Nullmessung)	304	661,394	674,343	57,678		

GB-Nr.: 2023-VE-0032			Gemessene Verstellwerte CR3 2023			CR 2 ab 2023	
			Wassergewinnung Essen-Überruhr				
							
Verstellung (Planung)	Datum	PNr.	32365 East [m]	5699 North [m]	Höhe [m ü. NHN]	Höhe [m ü. NHN]	
0	16.01.2023	301	661,387	673,538	57,673	56,274	
	(Nullmessung)	302	660,638	673,544	57,672		
	20.01.2023	303	660,646	674,348	57,676		
	(2. Nullmessung)	304	661,394	674,343	57,678		

Die Änderungen berechnen sich vorzeichenrichtig als Differenz der jeweiligen Messung zur Nullmessung vom 16.01.2023. Graue, kursive Werte sind Sollwerte						
Verstellung (Planung)	Datum	PNr.	D East [mm]	D North [mm]	D Höhe [mm]	DH ges. [mm]
1	20.01.2023	301	1mm	1mm	5mm	5mm
		302	0mm	-1mm	5mm	
		303	0mm	0mm	5mm	
		304	0mm	0mm	5mm	
2	16.02.2023	301	6mm	-1mm	5mm	
		302	6mm	-2mm	4mm	
		303	6mm	-1mm	5mm	
		304	6mm	-1mm	6mm	
3	17.03.2023	301	6mm	-1mm	10mm	5mm
		302	5mm	-2mm	10mm	
		303	6mm	-1mm	10mm	
		304	6mm	-1mm	11mm	
4	21.04.2023	301	10mm	-2mm	10mm	
		302	9mm	-3mm	9mm	
		303	10mm	-2mm	10mm	
		304	9mm	-3mm	11mm	
5	16.05.2023	301	9mm	-5mm	14mm	5mm
		302	9mm	-4mm	13mm	
		303	10mm	-2mm	15mm	
		304	10mm	-4mm	16mm	
6	16.06.2023	301	15mm	-5mm	14mm	
		302	16mm	-5mm	13mm	
		303	15mm	-3mm	16mm	
		304	16mm	-4mm	17mm	

Die Änderungen berechnen sich vorzeichenrichtig als Differenz der jeweiligen Messung zur Nullmessung vom 16.01.2023.						
Verstellung (Planung)	Datum	PNr.	D East [mm]	D North [mm]	D Höhe [mm]	DH ges. [mm]
7	05.07.2023	301	16mm	0mm	10mm	-5mm
		302	17mm	-1mm	10mm	
		303	17mm	1mm	10mm	
		304	17mm	0mm	10mm	
8	07.08.2023	301	10mm	-3mm	9mm	
		302	11mm	-3mm	9mm	
		303	11mm	-1mm	10mm	
		304	10mm	-3mm	11mm	
9	15.09.2023	301	10mm	-3mm	5mm	-5mm
		302	11mm	-4mm	4mm	
		303	10mm	-2mm	5mm	
		304	10mm	-3mm	7mm	
10	13.10.2023	301	6mm	-1mm	5mm	
		302	7mm	-2mm	4mm	
		303	7mm	0mm	5mm	
		304	6mm	-2mm	6mm	
11	17.11.2023	301	5mm	-1mm	0mm	-6mm
		302	7mm	-1mm	-1mm	
		303	7mm	0mm	0mm	
		304	7mm	-2mm	1mm	
12	08.12.2023	301	0mm	-1mm	0mm	
		302	1mm	-1mm	-1mm	
		303	1mm	0mm	-1mm	
		304	1mm	-2mm	1mm	



RAG: InSAR-Test-/Validierfeld Wassergewinnung Essen



Validier-Verfahren zur Höhenänderungsbestimmung von InSAR Auswertungen über GNSS-Messungen:
CR-Verstellungen in einem „Closed-Loop“: Tachymetrische Kontrollmessungen der Verstellungen.

GB-Nr.: 2023-VE-0032
Gemessene Verstellwerte CR3 2023
Wassergewinnung Essen-Überruhr

Verstellung (Planung)	Datum	PNr.	32365 East [m]	5699 North [m]	Höhe [m ü. NHN]
0	16.01.2023	301	661,387	673,538	57,673
	(Nullmessung) 20.01.2023 (2. Nullmessung)	302	660,638	673,544	57,672
		303	660,646	674,348	57,676
		304	661,394	674,343	57,678

Die Änderungen berechnen sich vorzeichenrichtig als Differenz der jeweiligen Messung zur Nullmessung vom 16.01.2023. Graue, kursive Werte sind Sollwerte

Verstellung (Planung)	Datum	PNr.	D East [mm]	D North [mm]	D Höhe [mm]	DH ges. [mm]
5mm		301	1mm	1mm	5mm	

GB-Nr.: 2023-VE-0032
Gemessene Verstellwerte CR3 2023
Wassergewinnung Essen-Überruhr

Verstellung (Planung)	Datum	PNr.	32365 East [m]	5699 North [m]	Höhe [m ü. NHN]
0	16.01.2023	301	661,387	673,538	57,673
	(Nullmessung) 20.01.2023 (2. Nullmessung)	302	660,638	673,544	57,672
		303	660,646	674,348	57,676
		304	661,394	674,343	57,678

Die Änderungen berechnen sich vorzeichenrichtig als Differenz der jeweiligen Messung zur Nullmessung vom 16.01.2023.

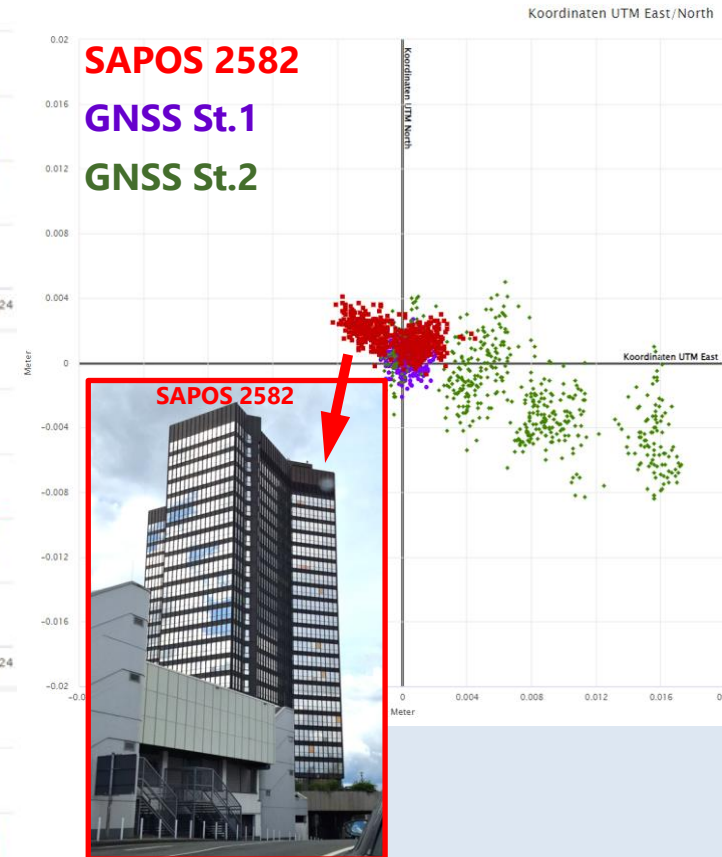
Verstellung (Planung)	Datum	PNr.	D East [mm]	D North [mm]	D Höhe [mm]	DH ges. [mm]
5mm		301	15mm	0mm	10mm	

Koordinaten UTM East



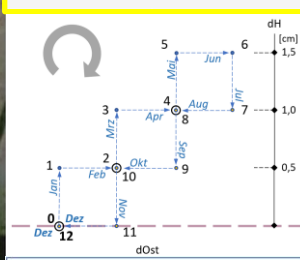
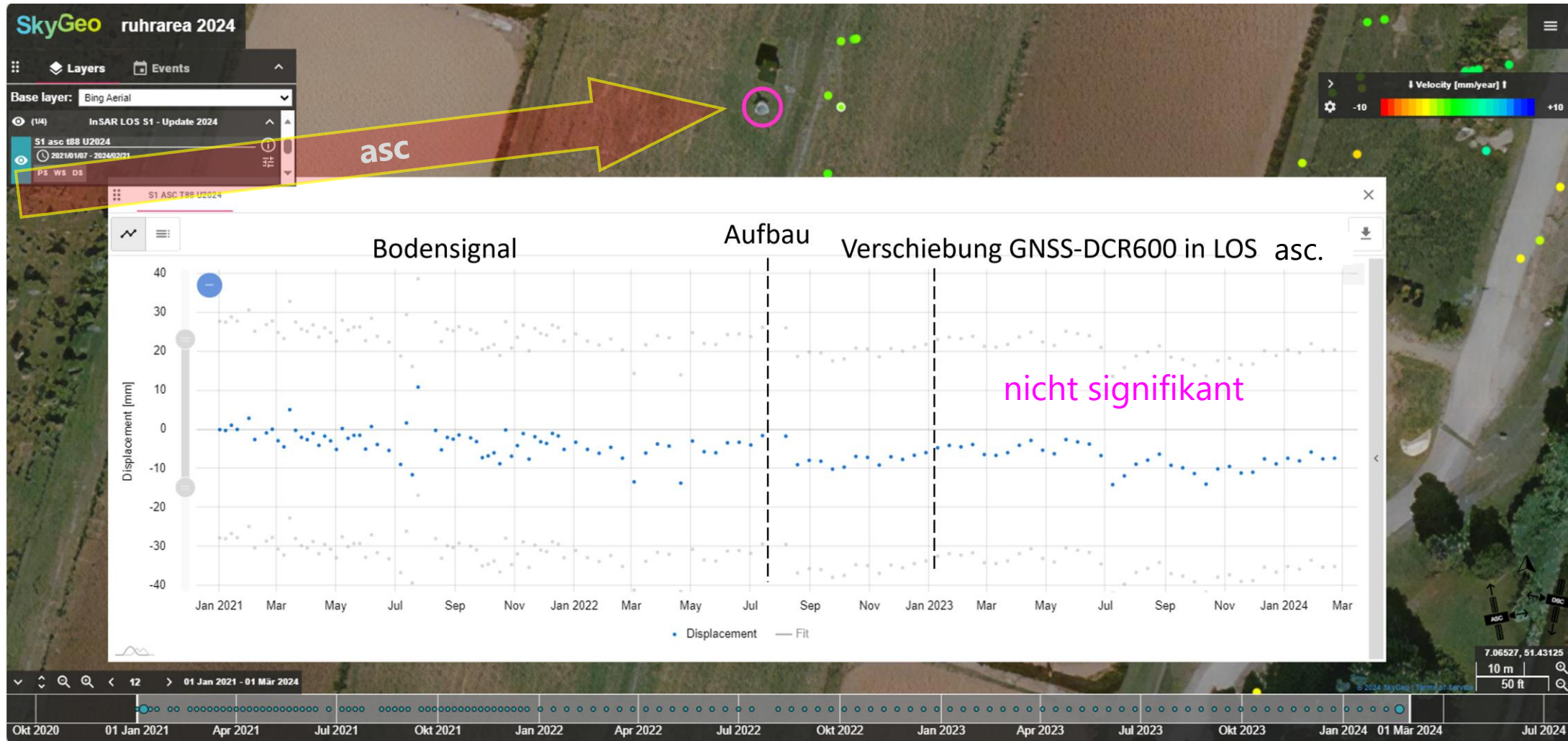
RAG: InSAR-Test-/Validierfeld Wassergewinnung Essen

Validier-Verfahren zur Höhenänderungsbestimmung von InSAR Auswertungen über GNSS-Messungen:
CR-Verstellungen im „Closed-Loop“ und GNSS im Anschluss an SAPOS Station 2582 Essen.



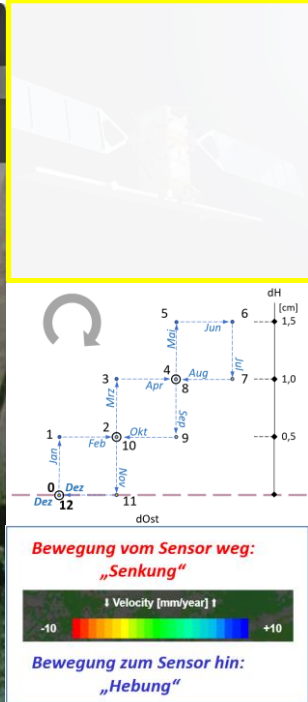
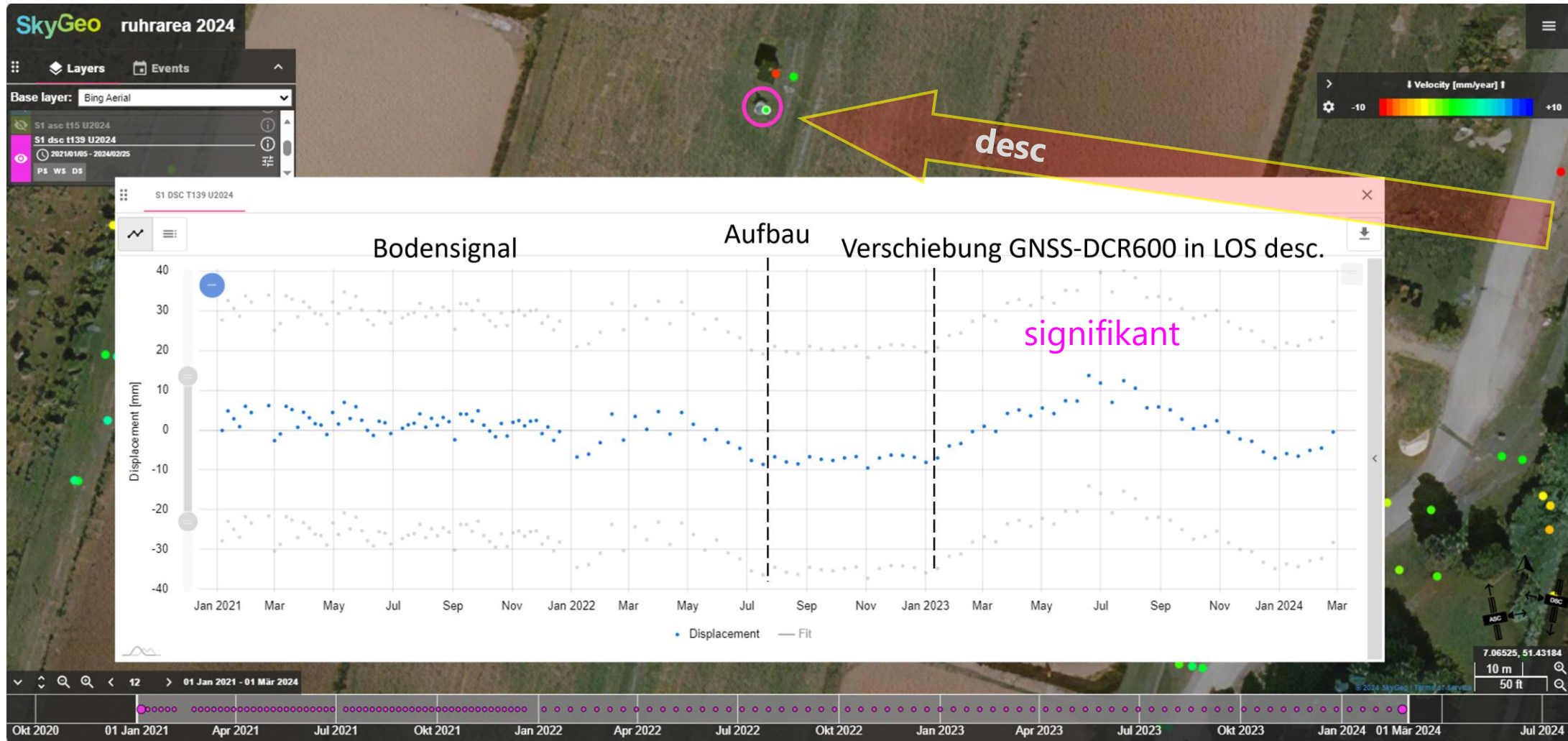
RAG: InSAR-Test-/Validierfeld Wassergewinnung Essen

Validier-Verfahren zur Höhenänderungsbestimmung von InSAR Auswertungen über GNSS-Messungen.
CR-Verstellungen des „Closed-Loop“ in Sentinel-1A – InSAR-Auswertungen (SkyGeo): LOS, ASC-Orbit



RAG: InSAR-Test-/Validierfeld Wassergewinnung Essen

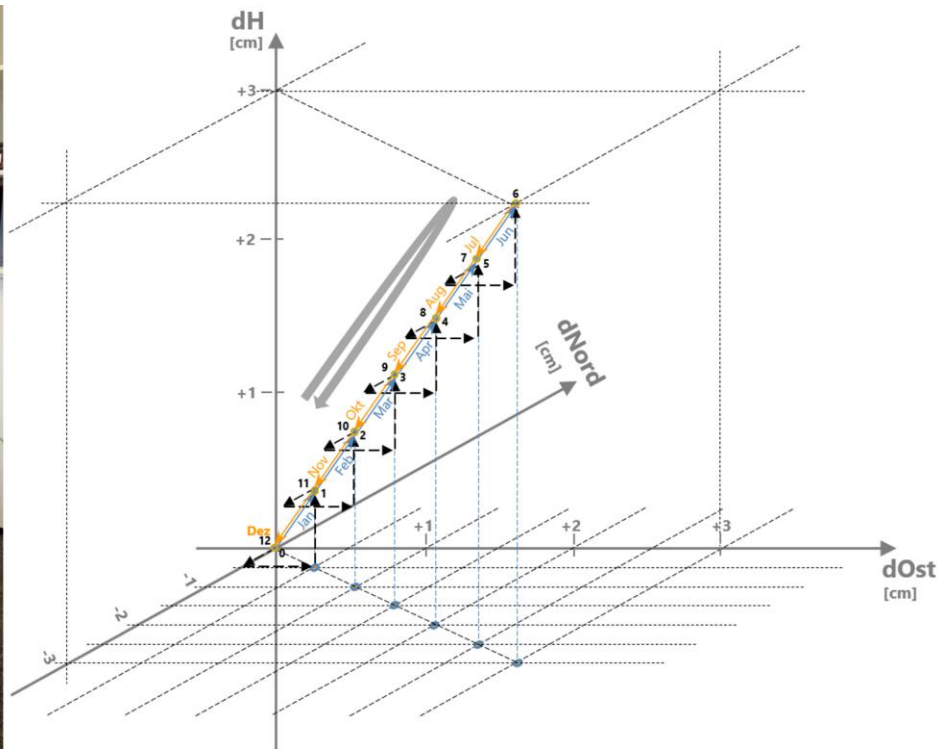
Validier-Verfahren zur Höhenänderungsbestimmung von InSAR Auswertungen über GNSS-Messungen.
CR-Verstellungen des „Closed-Loop“ in Sentinel-1A – InSAR-Auswertungen (SkyGeo): LOS, DESC-Orbit



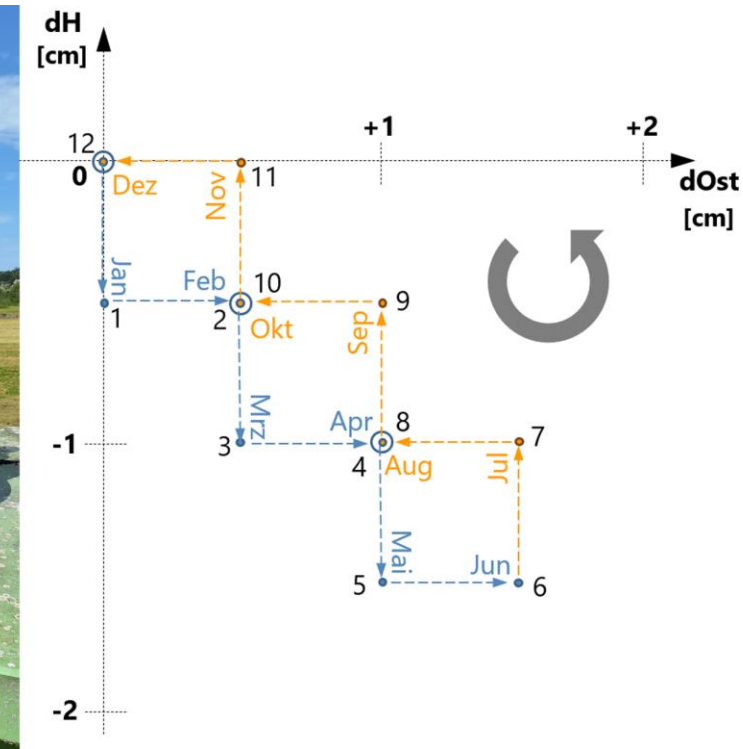
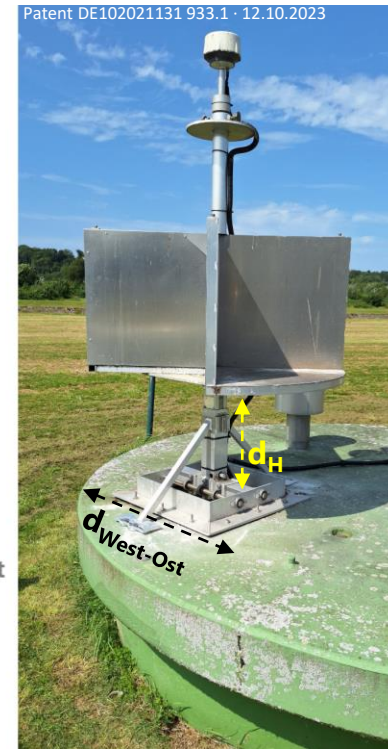
[illegible]

RAG: InSAR-Test-/Validierfeld Wassergewinnung Essen

Validier-Verfahren zur Höhenänderungsbestimmung von InSAR Auswertungen über GNSS-Messungen:
In ASC und DESC signifikante CR-Verstellungen der „Closed-Loops“ ab Januar 2025



„3-Achser“: Signifikanter Loop für asc und desc.



„2-Achser“: Signifikanter Loop für asc.

Validier-Verfahren zur Höhenänderungsbestimmung von InSAR Auswertungen über GNSS-Messungen:
In ASC und DESC signifikante CR-Verstellungen der „Closed-Loops“ ab Januar 2025 - Zusammenfassung

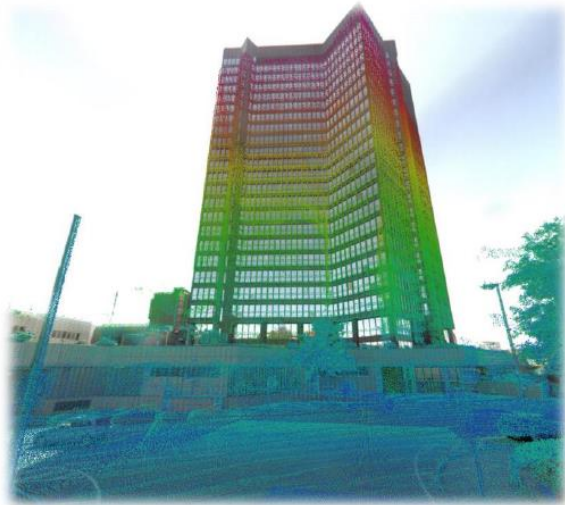
- **Skalierung:** Über terrestrische Kontrollmessungen, GNSS-Referenzmessungen
 - **Kalibrierung:** Über feste GNSS-Stationen und feste Corner-Reflektoren
 - **Validierung:** Über „Closed-Loop“ – Bewegungsverlauf verstellbarer GNSS-DCR/TriCR
- => InSAR-Auswertungen sind geprüft, können behördlich akzeptiert werden
- => SAPOS-MSST (RFP): Qualität und Güte gegeben für öffentlich beglaubigte Messungen

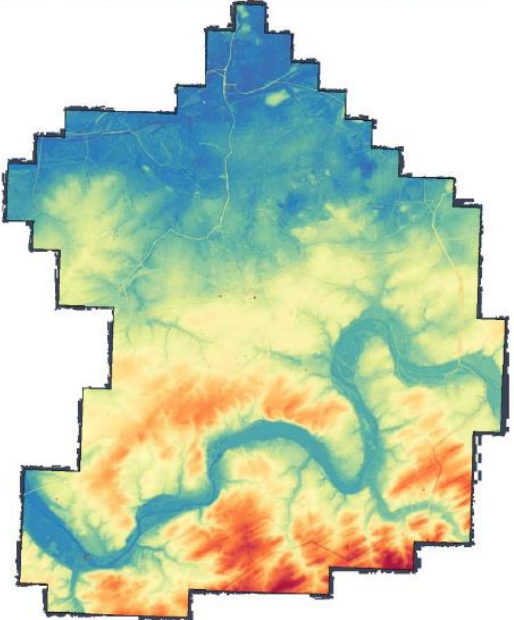
... und weiter geht es nun mit dem Vortrag der Stadt Essen ...

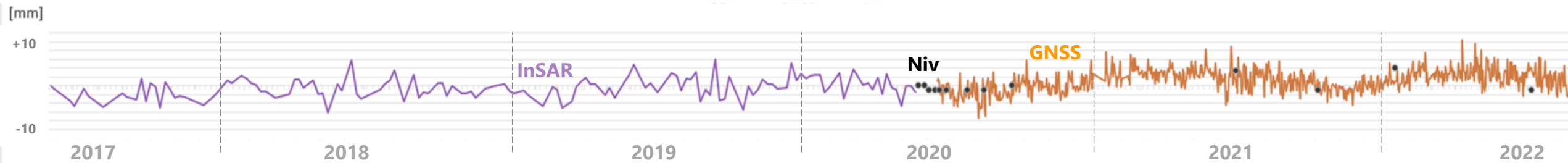
**STADT
ESSEN**

Radarinterferometrie zur Überwachung kommunaler Infrastruktur

Amt für Geoinformation, Vermessung und Kataster







*„Wir sind mit Radar da, wo wir vor 30 Jahren bei GPS waren.
Wir bauen jetzt das <SAPOS für Radar> auf.“*

**In diesem Sinne:
Glückauf!**

Volker Spreckels
RAG Aktiengesellschaft
Im Welterbe 10
45141 Essen

Telefon: +49 (201) 378-7716
Telefax: +49 (201) 378-7563
E-Mail: volker.spreckels@rag.de

