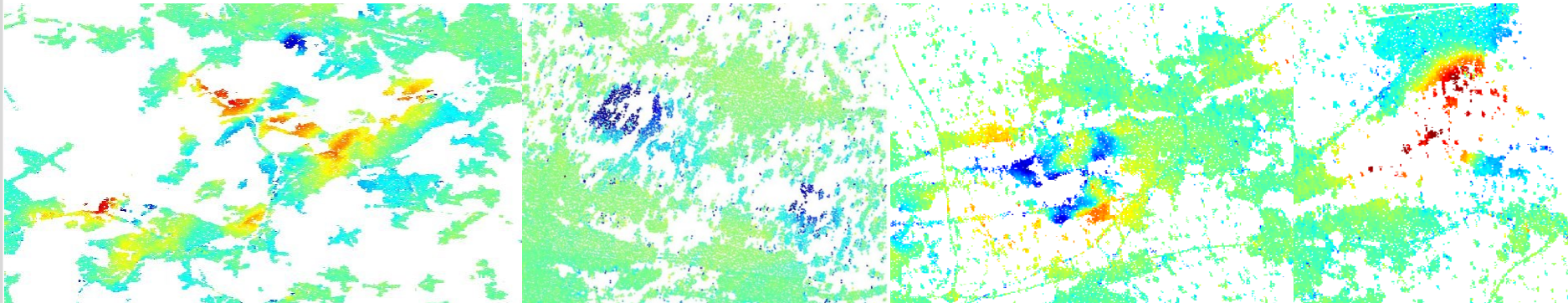


# FloodRisk, Teilprojekt Geodäsie: Bodenbewegungen im östlichen Ruhrgebiet und in Ibbenbüren in der Phase des Nachbergbaus beobachtet mit Radarinterferometrie

**Markus Even, Malte Westerhaus, Hansjörg Kutterer**

GEODÄTISCHES INSTITUT KARLSRUHE

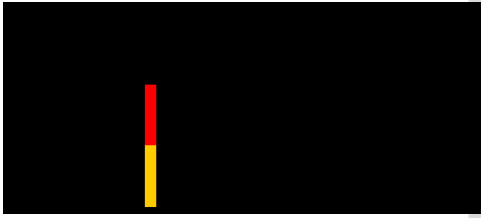


# Hintergrund Nachbergbau

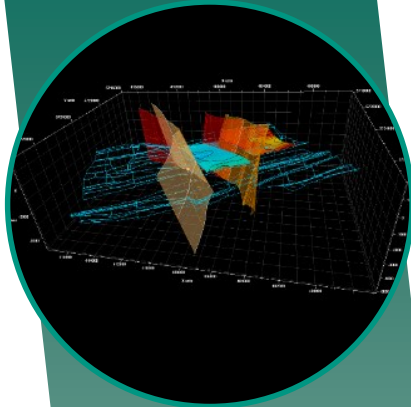


- Die Produktion in allen deutschen Steinkohlerevieren wurde beendet.
- Während des Betriebes muss kontinuierlich Wasser aus den Gruben herausgepumpt werden. Dies verursacht signifikante Kosten, die sich reduzieren lassen, wenn das Wasser aus geringerer Tiefe gehoben wird. Daher werden die stillgelegten Bergwerke in der Regel geflutet.
- Potentiell könnte der Grubenwasseranstieg unerwünschte Konsequenzen haben:
  1. Schäden an Infrastruktur durch heterogene Oberflächenbewegungen
  2. Seismizität durch Änderungen von Spannungen im Gestein durch wachsenden Porendruck und Reaktivierung von Verwerfungen
  3. Kontaminierung des Grundwassers durch Grubenwasser

# FloodRisk: Erdbeben, Hebungen und Ewigkeitsaufgaben – Minimierung von Risiken während der Bergwerksflutung

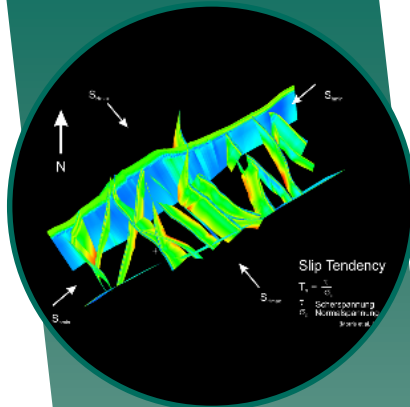


## Geologie



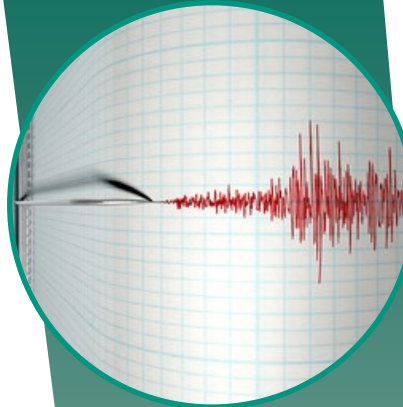
- KIT – Institut für Strukturgeologie und Tektonik
- Geologischer Dienst NRW

## Geomechanik



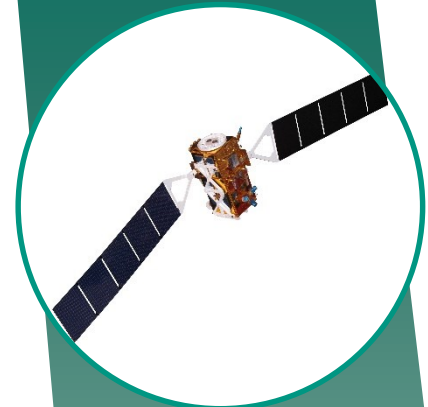
- KIT – Techn. Petrophysik
- Alber Geomechanik
- Piewak und Partner GmbH

## Geophysik



- RUB – AG Seismologie

## Geodäsie



- KIT – Geodät. Institut

- DMT GmbH & Co. KG

## Sensorik

- EIFER – European Institute for Energy Research

# Teilprojekt Geodäsie



1. Experiment mit elektronischen Corner-Reflektoren (Transponder)
2. Installation eines GNSS-Netzwerkes mit 10 Low-Cost-Antennen und zwei Referenzstationen (Daniel Czerwonka-Schröder, DMT) im östlichen Ruhrgebiet
3. Ziele InSAR:
  - 2D-Verschiebungsfelder für räumlich und zeitlich heterogene Bewegungen
  - Verständnis der Verschiebungsfelder (Was passiert wo?)
  - Anpassung der Methodologie
4. InSAR-Analysen für östliches Ruhrgebiet und Ibbenbüren
  - basierend auf Sentinel-1-Daten (aufsteigender Orbit 015, absteigender Orbit 139)
  - Zeitraum Januar 2018- Dezember 2022

# Radarinterferometrie (InSAR)

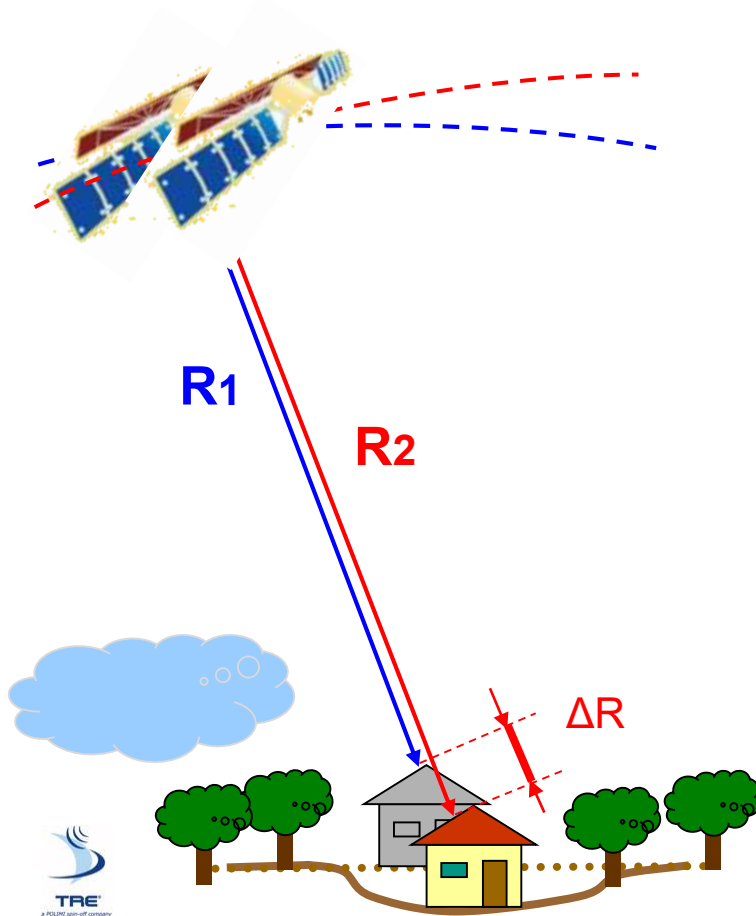


## Synthetische Apertur-Radar (SAR):

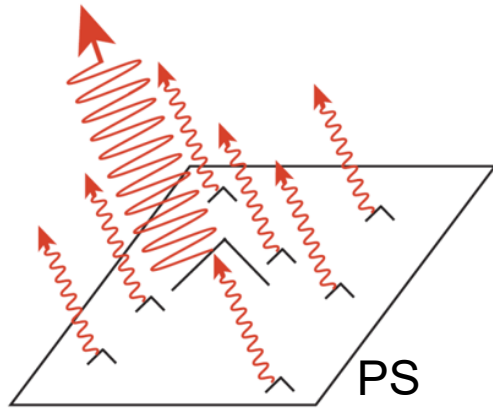
- Aussendung eines Signals in Schrägrichtung
- Aufzeichnung des zurückgestreuten Signals

## Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR):

- Längere Zeitreihen von SAR-Aufnahmen einer Szene, die mit der Gleichen Geometrie aufgenommen werden
- Statistische und andere Methoden werden angewandt, um die verschiedenen Bestandteile der Phase zu bestimmen
- Analyse für phasenstabile Pixel (zunächst PS)
- Nach einer adäquaten Vorprozessierung können Distributed Scatterers (DS) wie PS verwendet werden
- An den Positionen der PS und DS erhält man die Verschiebung in Sichtlinie (LoS) und eine Schätzung der Höhenmodellfehler

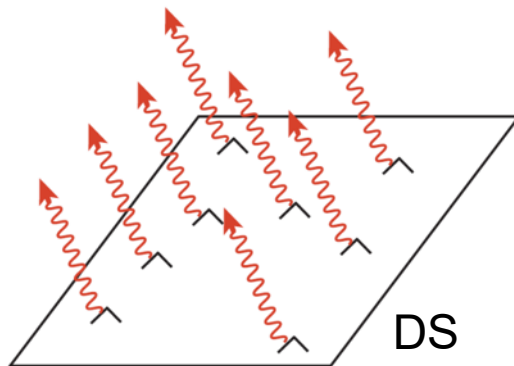


# PS und DS



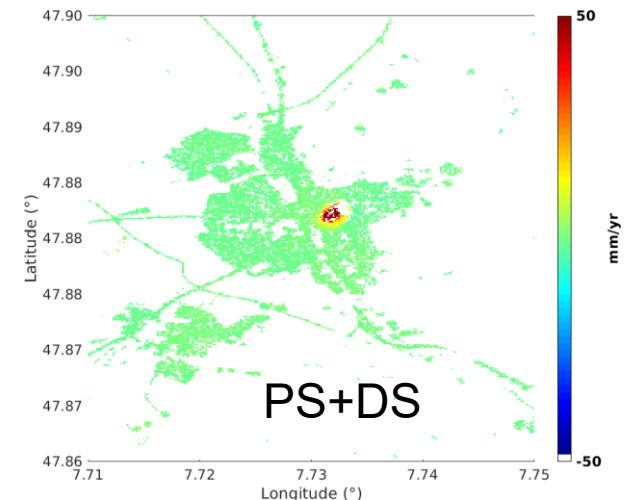
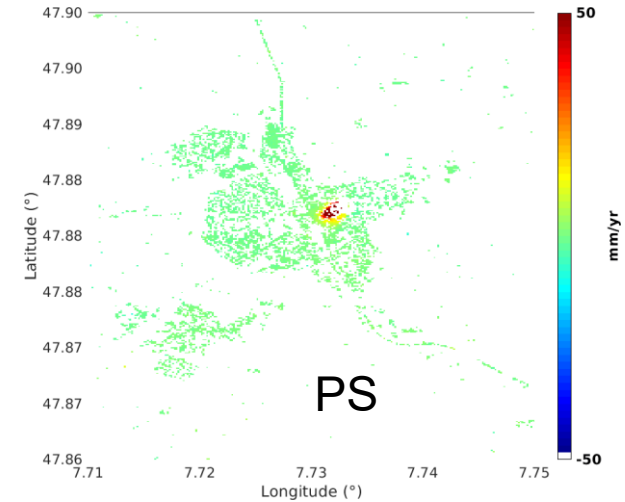
PS = in allen Aufnahmen ein starker Streuer in der Auflösungszelle

- trihedrale Strukturen an Gebäuden
- Pfosten
- Felsen
- ...



DS = Vielzahl etwa gleichstarker Streuer in der Auflösungszelle

- aride Gebiete
- Asphalt
- Bahnstrecken
- unbewachsene Bergehalden
- ...

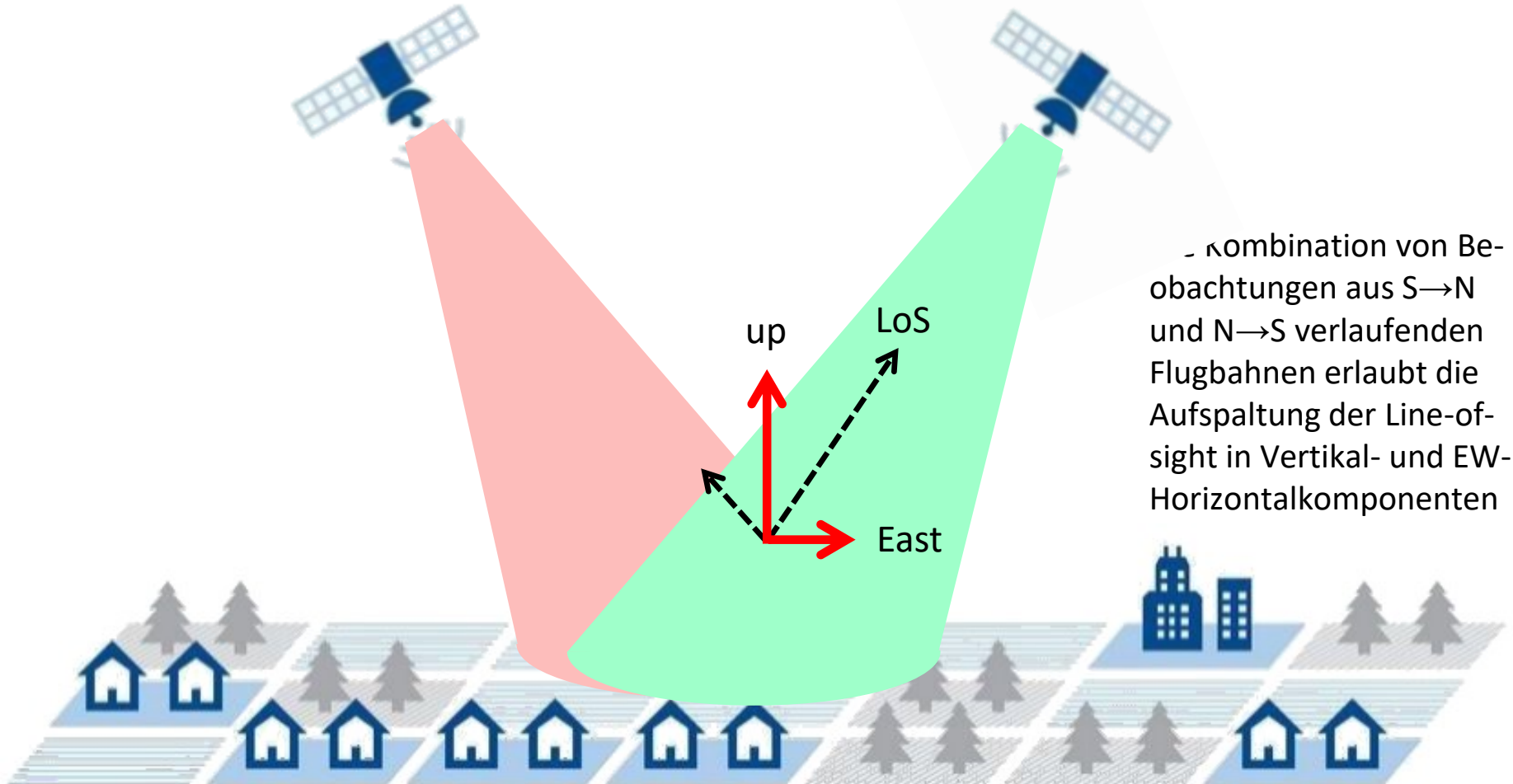


# Orbitkombination



Aufsteigender Orbit

Absteigender Orbit





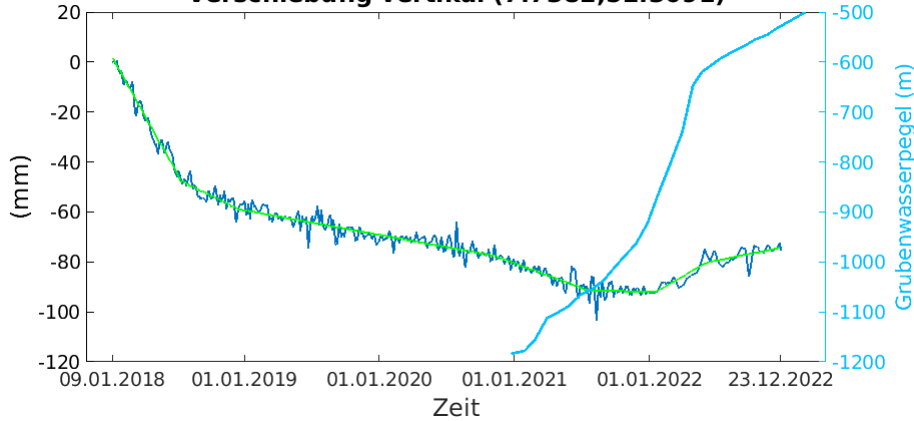
# Ibbenbüren



# Was kann man erwarten?



Verschiebung vertikal (7.7382,52.3091)

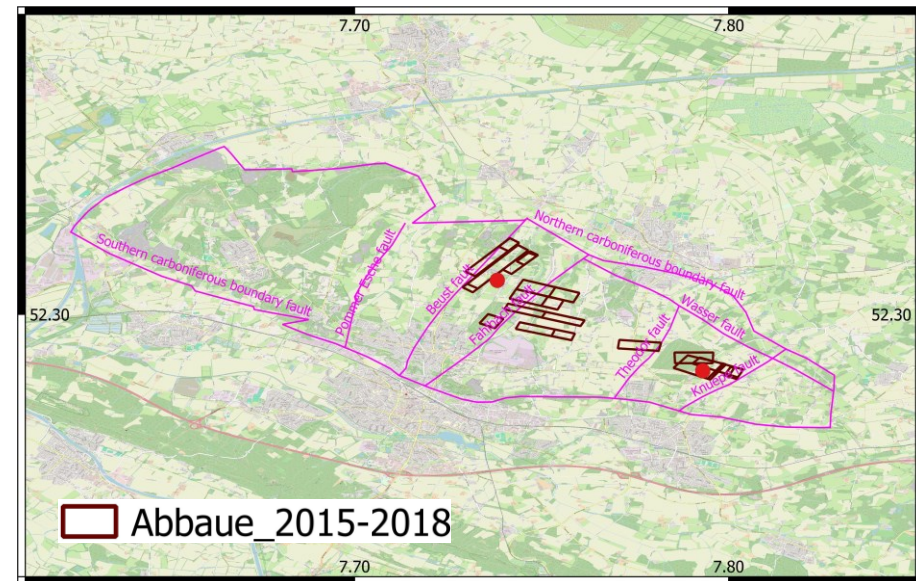
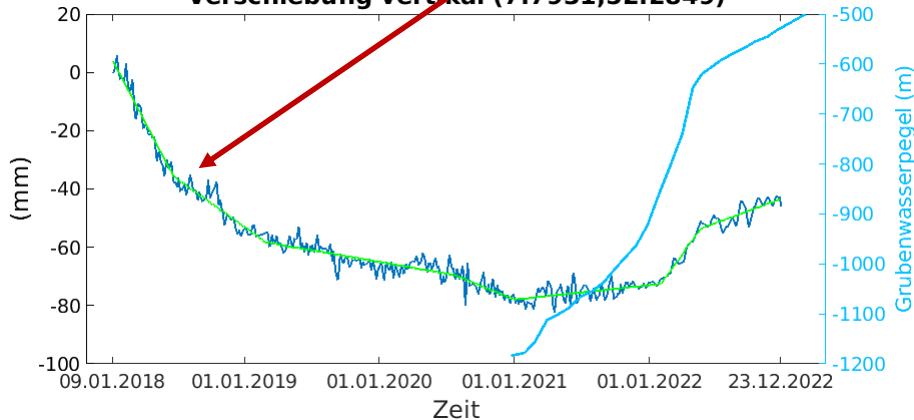


Beobachtungen zeigen, dass die Auswirkung steigender Grubenwasserpegel von den geomechanischen Verhältnissen bestimmt werden. Folgende Phasen können beobachtet werden:

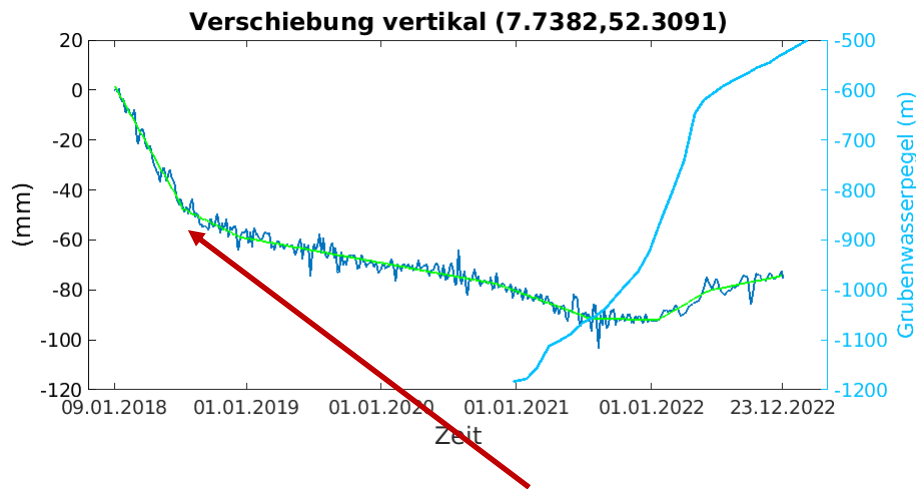
- schnelle Absenkungen während des aktiven Bergbaus

Östlich der Theodor-Verwerfung endete die Produktion am 07.06.2018

Verschiebung vertikal (7.7931,52.2849)



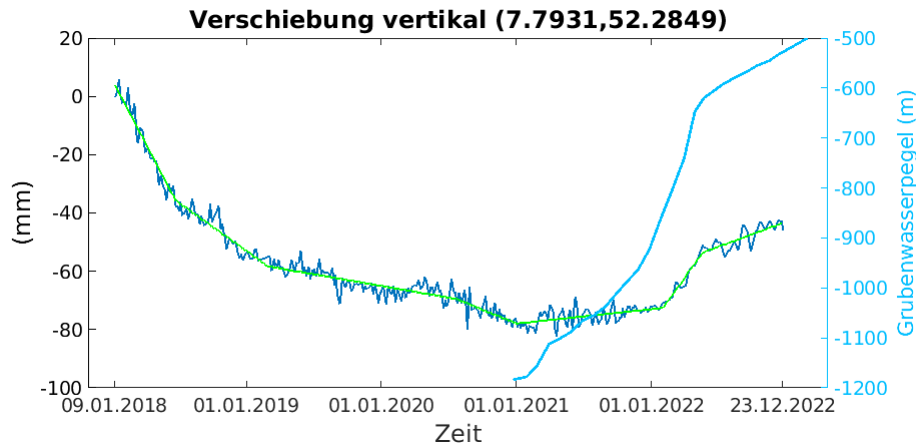
# Was kann man erwarten?



Beobachtungen zeigen, dass die Auswirkung steigender Grubenwasserpegel von den geomechanischen Verhältnissen bestimmt werden. Folgende Phasen können beobachtet werden:

- schnelle Absenkungen während des aktiven Bergbaus

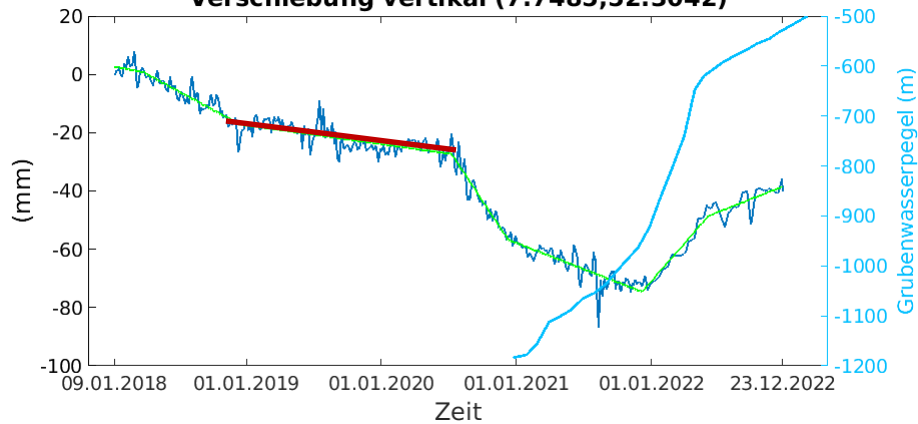
Zwischen der Beust- und der Fahlbach-Verwerfung endete die Produktion am 17.08.2018



# Was kann man erwarten?



Verschiebung vertikal (7.7485,52.3042)

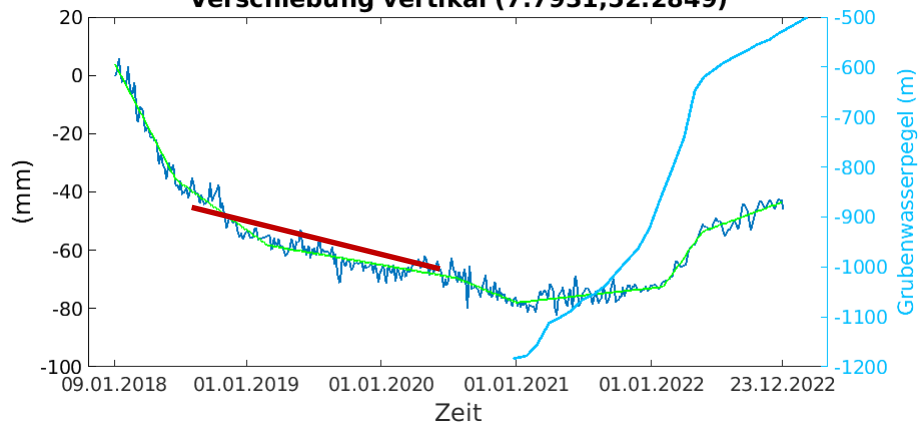


Beobachtungen zeigen, dass die Auswirkung steigender Grubenwasserpegel von den geomechanischen Verhältnissen bestimmt werden. Folgende Phasen können beobachtet werden:

- schnelle Absenkungen während des aktiven Bergbaus
- bis zu Jahre andauernde, langsamere Nachsenkungen nach Ende des Abbaus

## Nachsenkungen nach Einstellung der Wasserhaltung

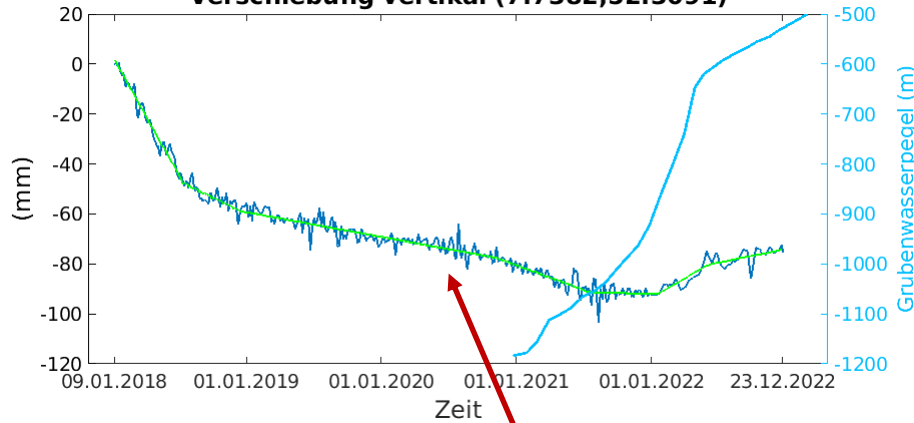
Verschiebung vertikal (7.7931,52.2849)



# Was kann man erwarten?

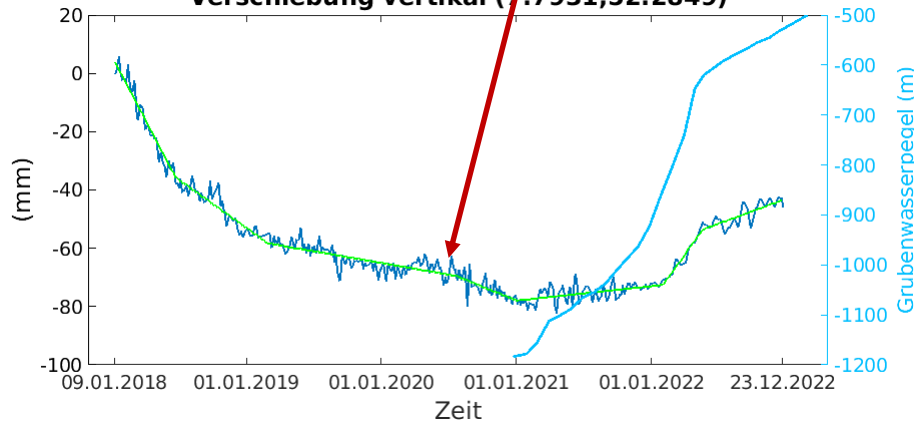


Verschiebung vertikal (7.7382,52.3091)



Einstellung der Wasserhaltung am Schacht Nord wurde 06.06.2020

Verschiebung vertikal (7.7931,52.2849)



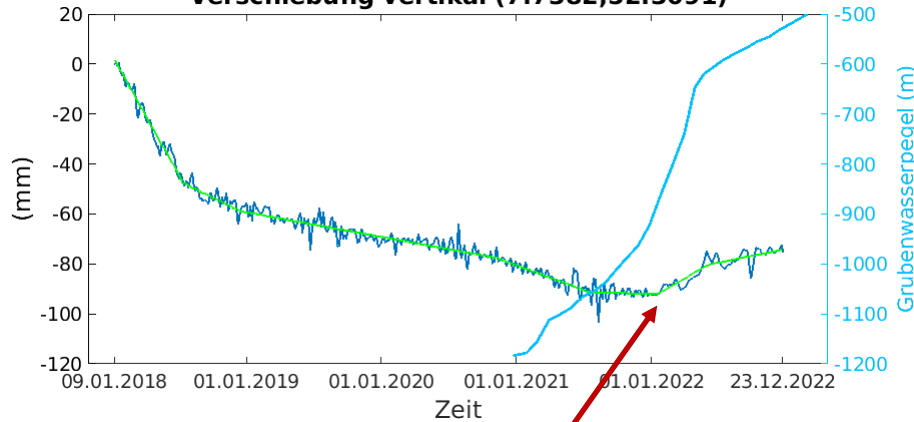
Beobachtungen zeigen, dass die Auswirkung steigender Grubenwasserpegel von den geomechanischen Verhältnissen bestimmt werden. Folgende Phasen können beobachtet werden:

- schnelle Absenkungen während des aktiven Bergbaus
- bis zu Jahre andauernde, langsamere Nachsenkungen nach Ende des Abbaus
- in der Anfangsphase des Grubenwasseranstiegs kann es zu einer Beschleunigung der Absenkungen kommen

# Was kann man erwarten?

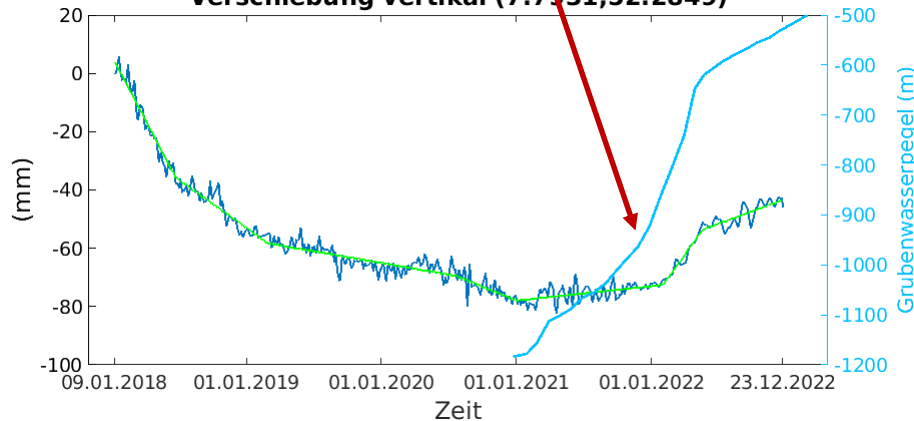


Verschiebung vertikal (7.7382,52.3091)



Beginn von Hebungen Ende 2021

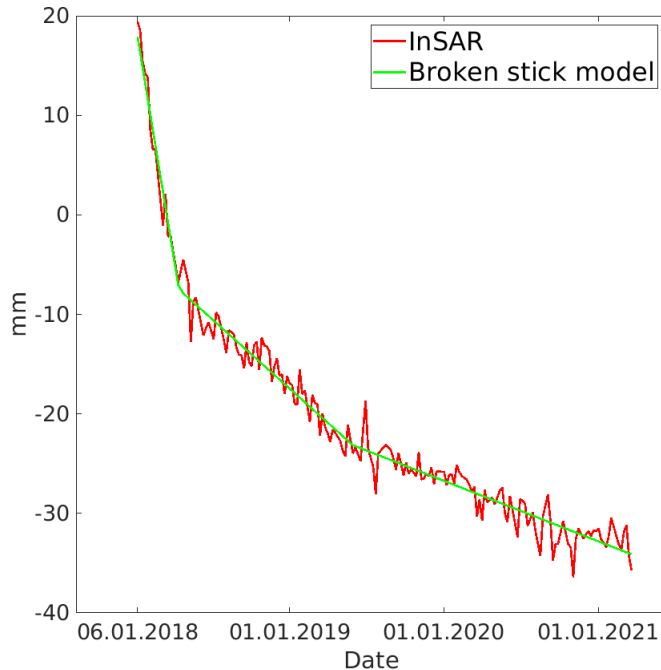
Verschiebung vertikal (7.7931,52.2849)



Beobachtungen zeigen, dass die Auswirkung steigender Grubenwasserpegel von den geomechanischen Verhältnissen bestimmt werden. Folgende Phasen können beobachtet werden:

- schnelle Absenkungen während des aktiven Bergbaus
- bis zu Jahre andauernde, langsamere Nachsenkungen nach Ende des Abbaus
- in der Anfangsphase des Grubenwasseranstiegs kann es zu einer Beschleunigung der Absenkungen kommen
- nachdem sich ein ausreichender Druck aufgebaut hat hebt sich die Erdoberfläche proportional zum weiteren Anstieg des Grubenwasserpegels

# Analyse mit Broken-Stick-Modellen



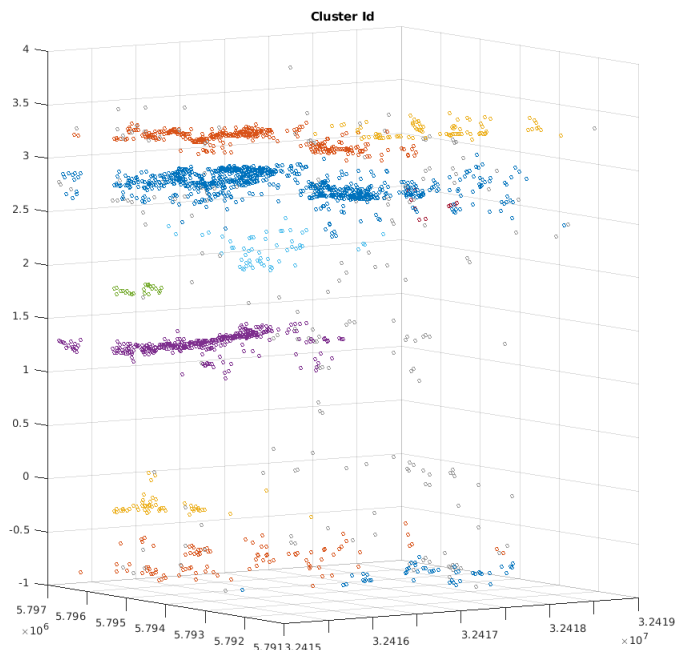
- Die Beispielzeitreihen legen ein Broken Stick-Modell mit mehreren Bruchpunkten nahe. Dieses Modell ist stückweise linear und hat folgende Parameter:
  1. die Lage der Bruchpunkte, d.h. Zeitpunkte, wenn sich die Bewegungsrate ändert
  2. die Rate vor dem ersten Bruchpunkt
  3. die Änderung der Rate nach den Bruchpunkten
  4. eine Konstante

Das Broken-Stick-Modell wird verwendet, um zu erfassen, wann sich wo die Bewegung ändert.

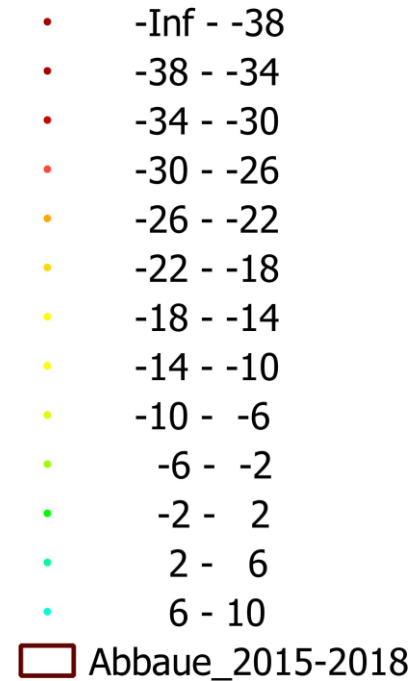
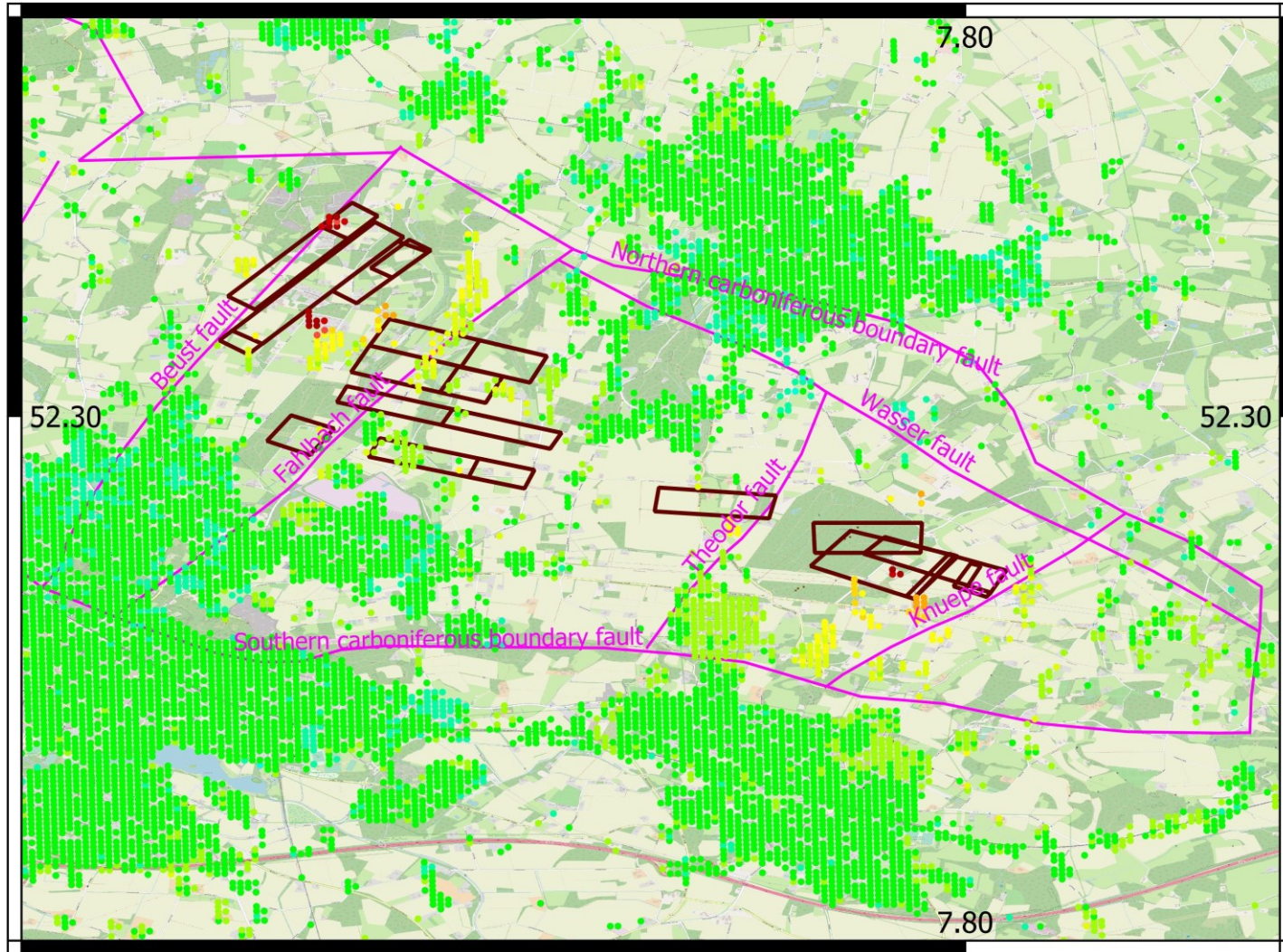
# Analyse der Bewegungsmuster



1. Fitten eines Broken-Stick-Modells an die Zeitreihen
2. Bilden von Clustern der Messungen, für die sich die Bewegungsrate um mehr als 5 mm/y nach dem Bruchpunkt ändert
3. Die mittleren Bruchzeiten jeden Clusters werden zur Einteilung in Zeitabschnitte benutzt, für die jeweils die kumulierte Verschiebung berechnet wird.



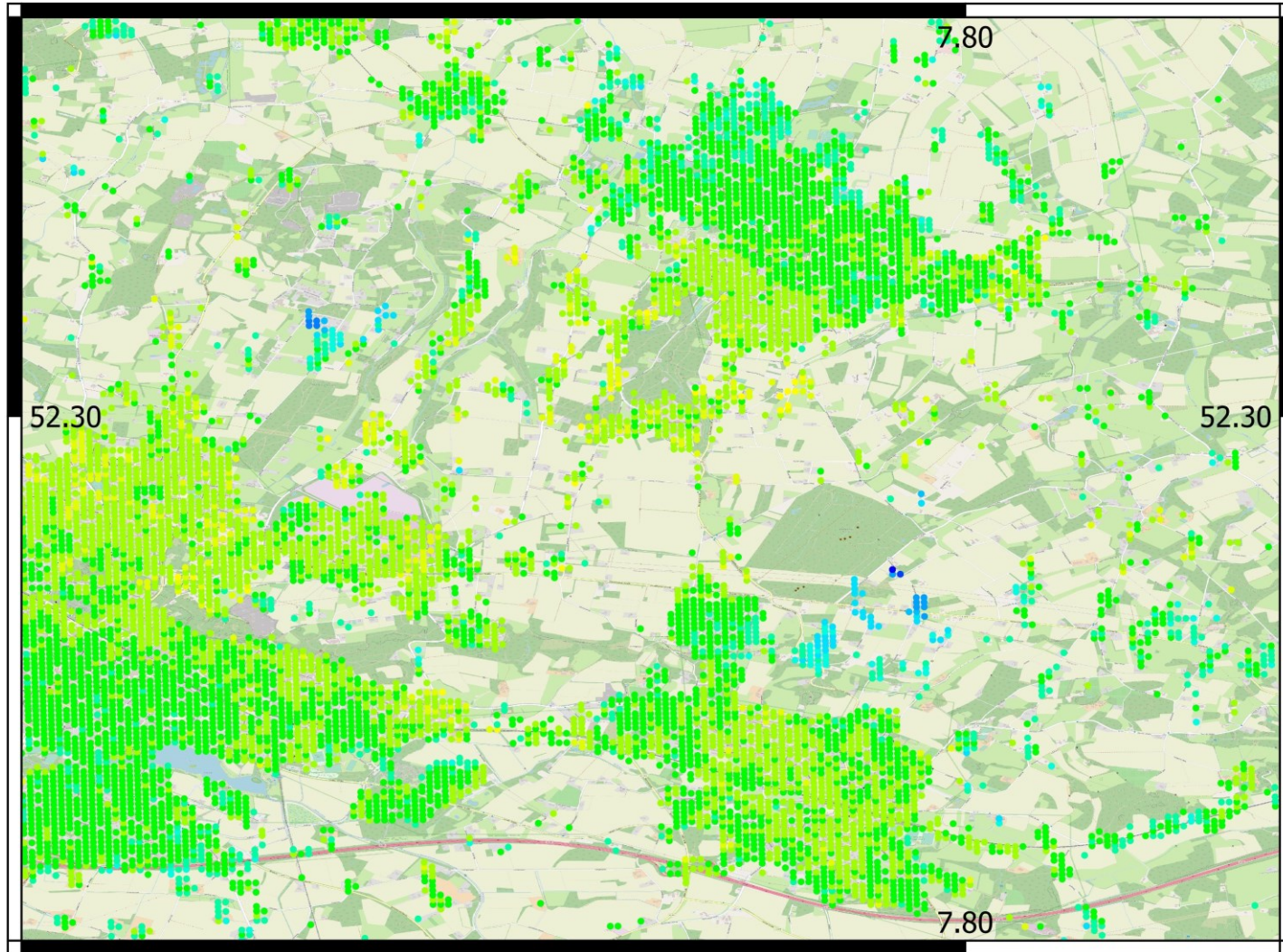
# Kumulierte Verschiebung (mm) 09.01.2018-23.05.2018





# Änderung Rate (mm/y) nach dem 23.05.2018

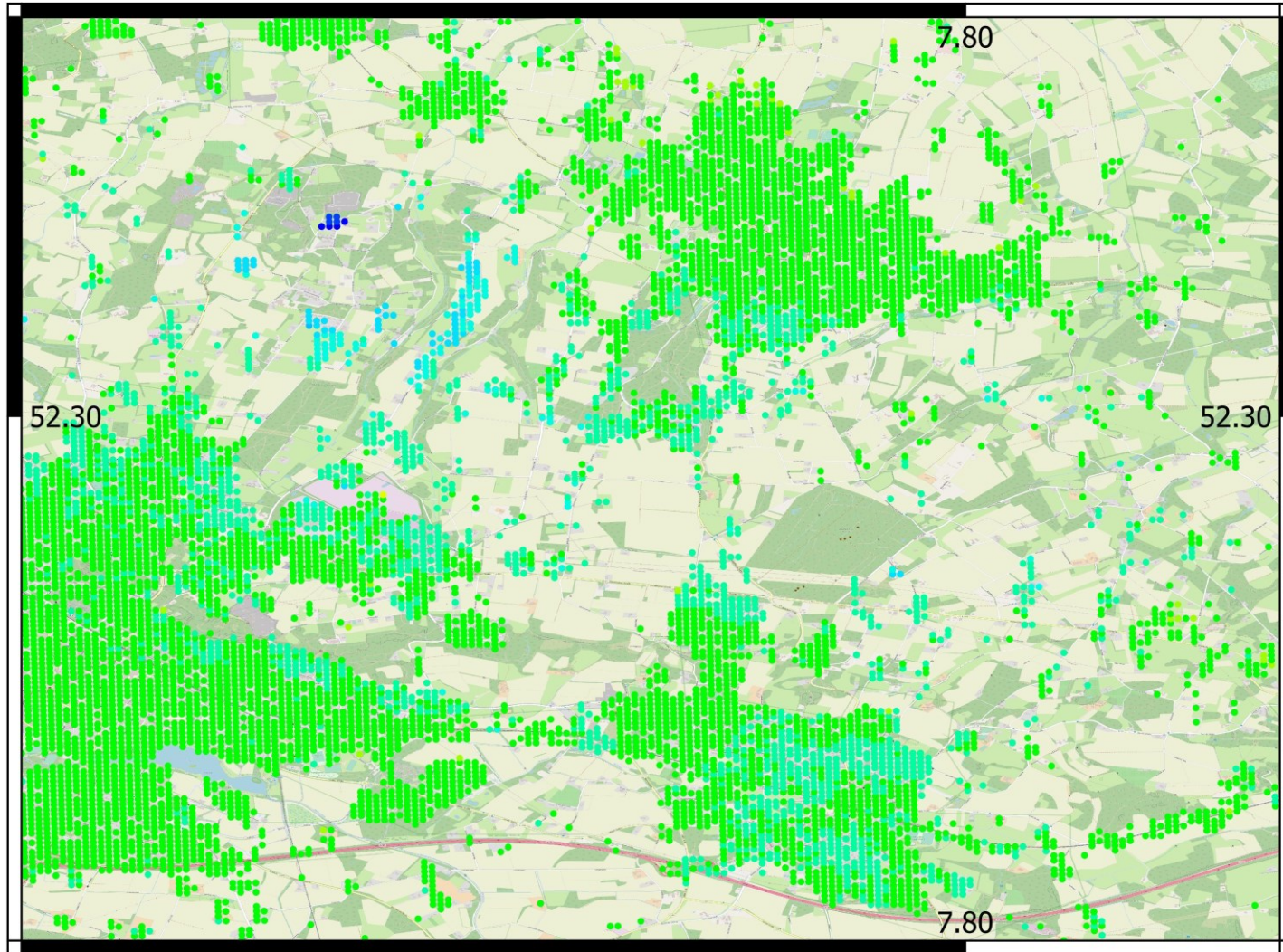
## Verlangsamung nach Ende des Abbaus



- -36 - -28
- -28 - -20
- -20 - -12
- -12 - -4
- -4 - 4
- 4 - 12
- 12 - 20
- 20 - 28
- 28 - 36
- 36 - 44
- 44 - 52
- 52 - 60
- 60 - 68
- 76 - Inf

# Änderung Rate (mm/y) nach dem 11.12.2018

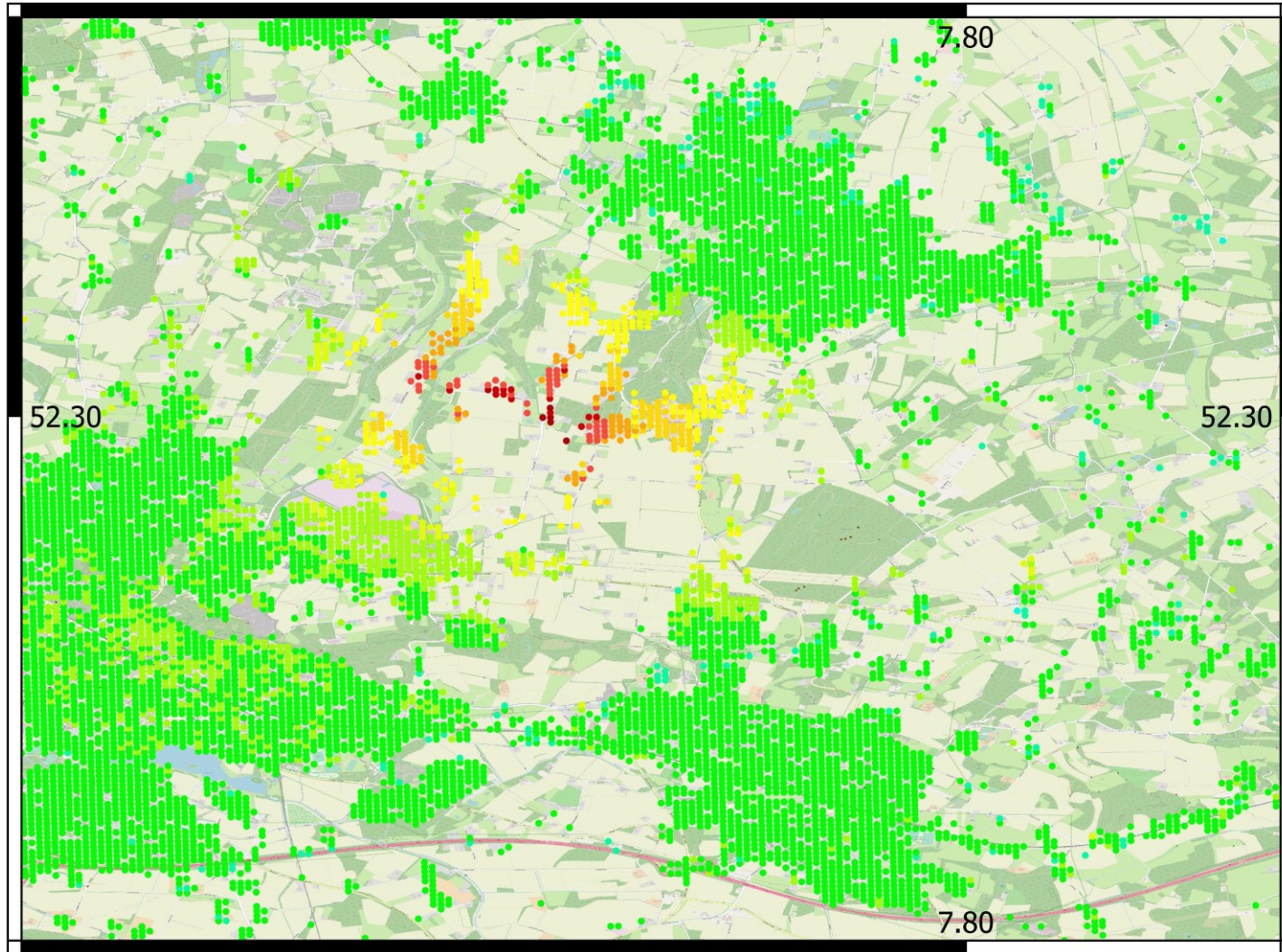
## Verlangsamung nach Ende des Abbaus



- -22.5 - -13.5
- -13.5 - -4.5
- -4.5 - 4.5
- 4.5 - 13.5
- 13.5 - 22.5
- 22.5 - 31.5
- 31.5 - 40.5
- 40.5 - 49.5
- 67.5 - 76.5
- 76.5 - 85.5
- 85.5 - Inf

# Änderung Rate (mm/y) nach dem 27.06.2020

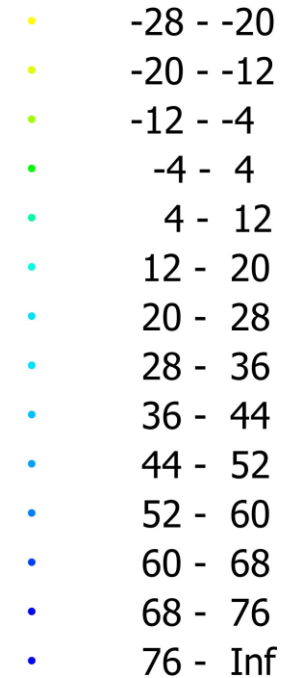
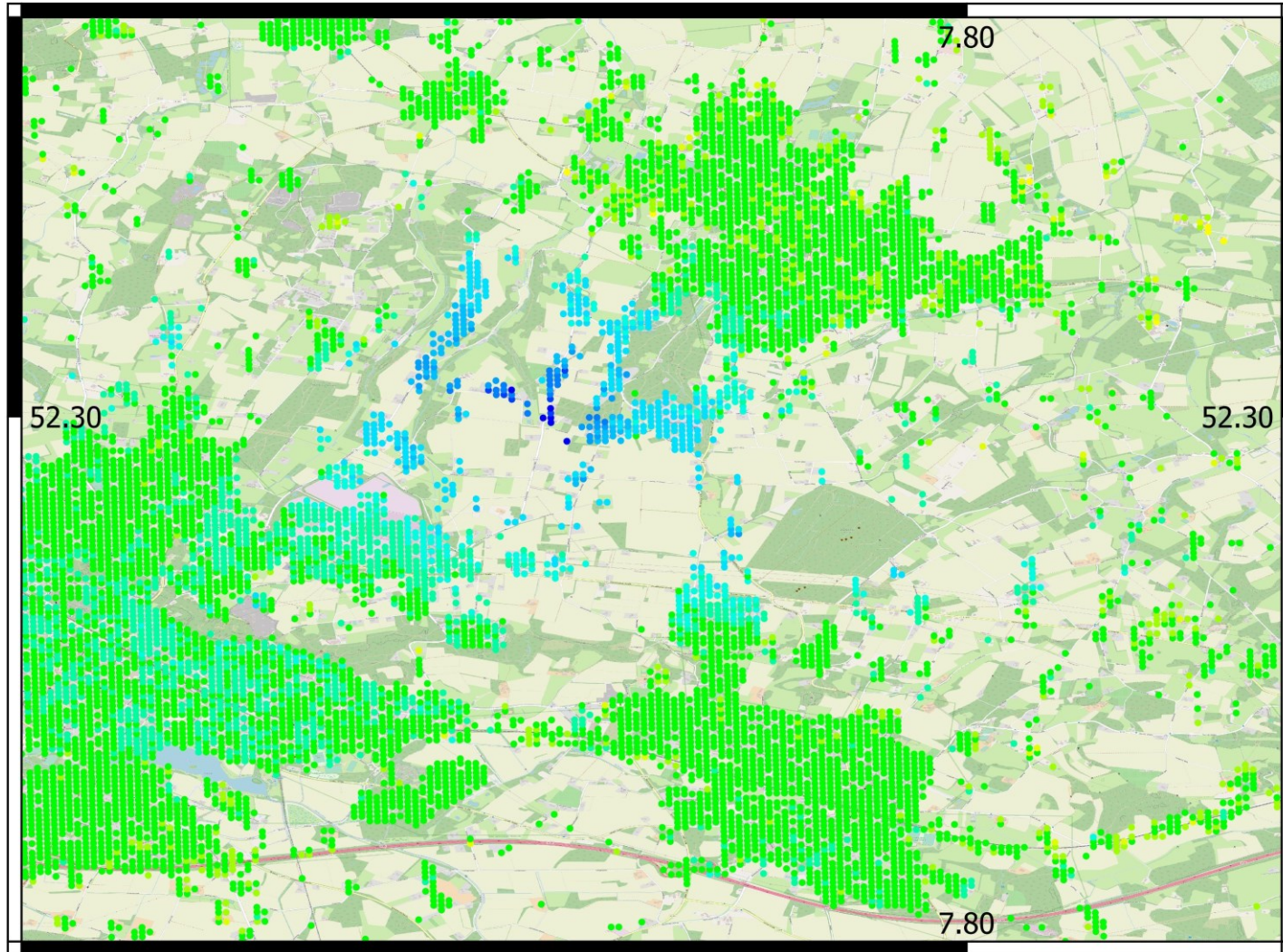
## Beschleunigte Absenkung nach beginnendem Anstieg des Grubenwassers



- -Inf - -76
- -76 - -68
- -68 - -60
- -60 - -52
- -52 - -44
- -44 - -36
- -36 - -28
- -28 - -20
- -20 - -12
- -12 - -4
- -4 - 4
- 4 - 12
- 12 - 20

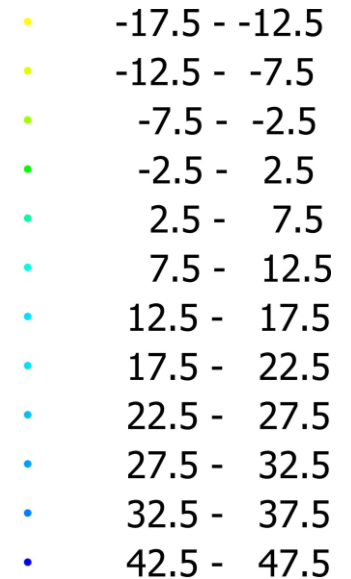
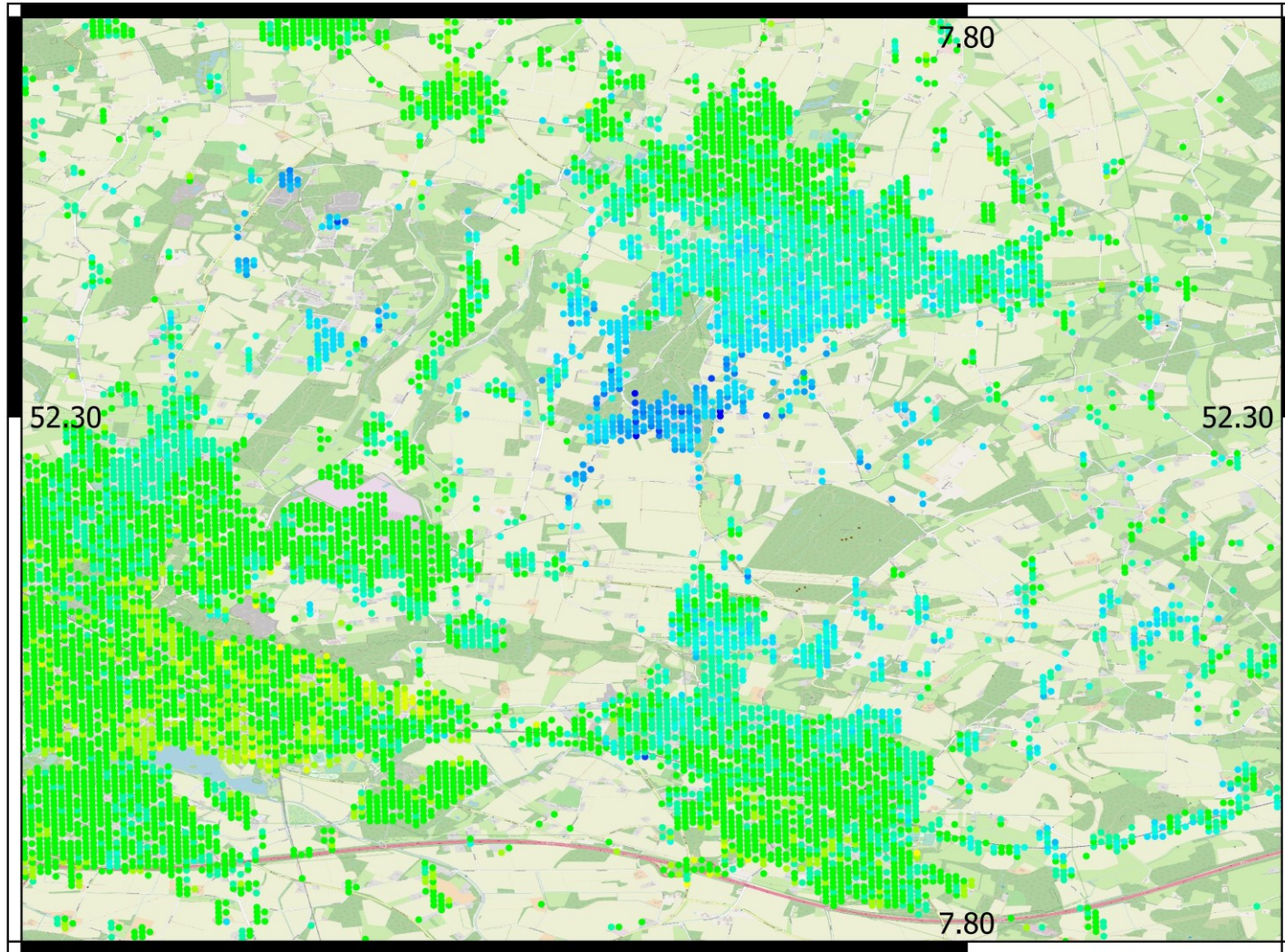
# Änderung Rate (mm/y) nach dem 28.12.2020

## Einsetzen der Hebung



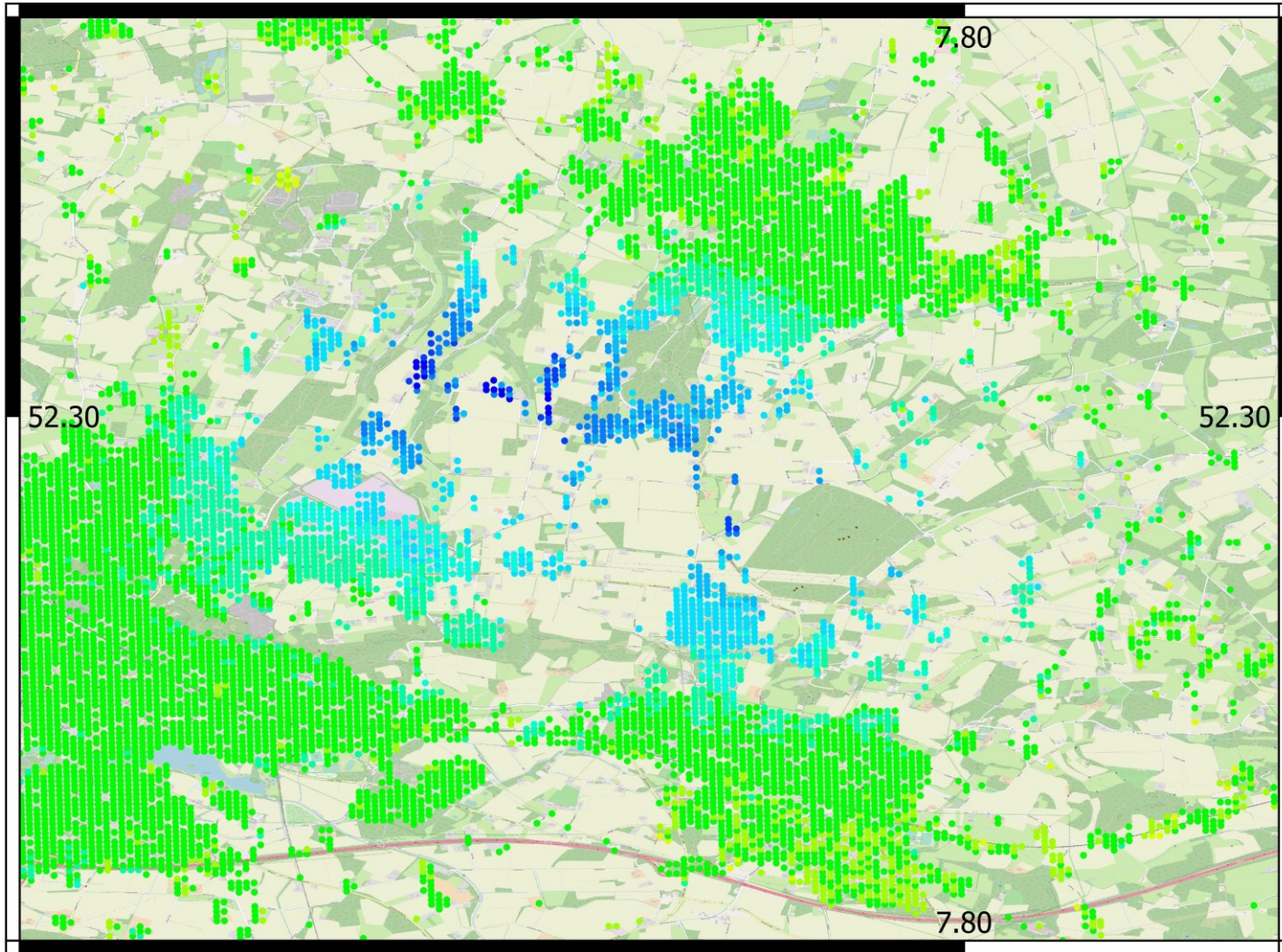
# Änderung Rate (mm/y) nach dem 14.04.2021

## Beschleunigte Hebung



# Änderung Rate (mm/y) nach dem 24.12.2021

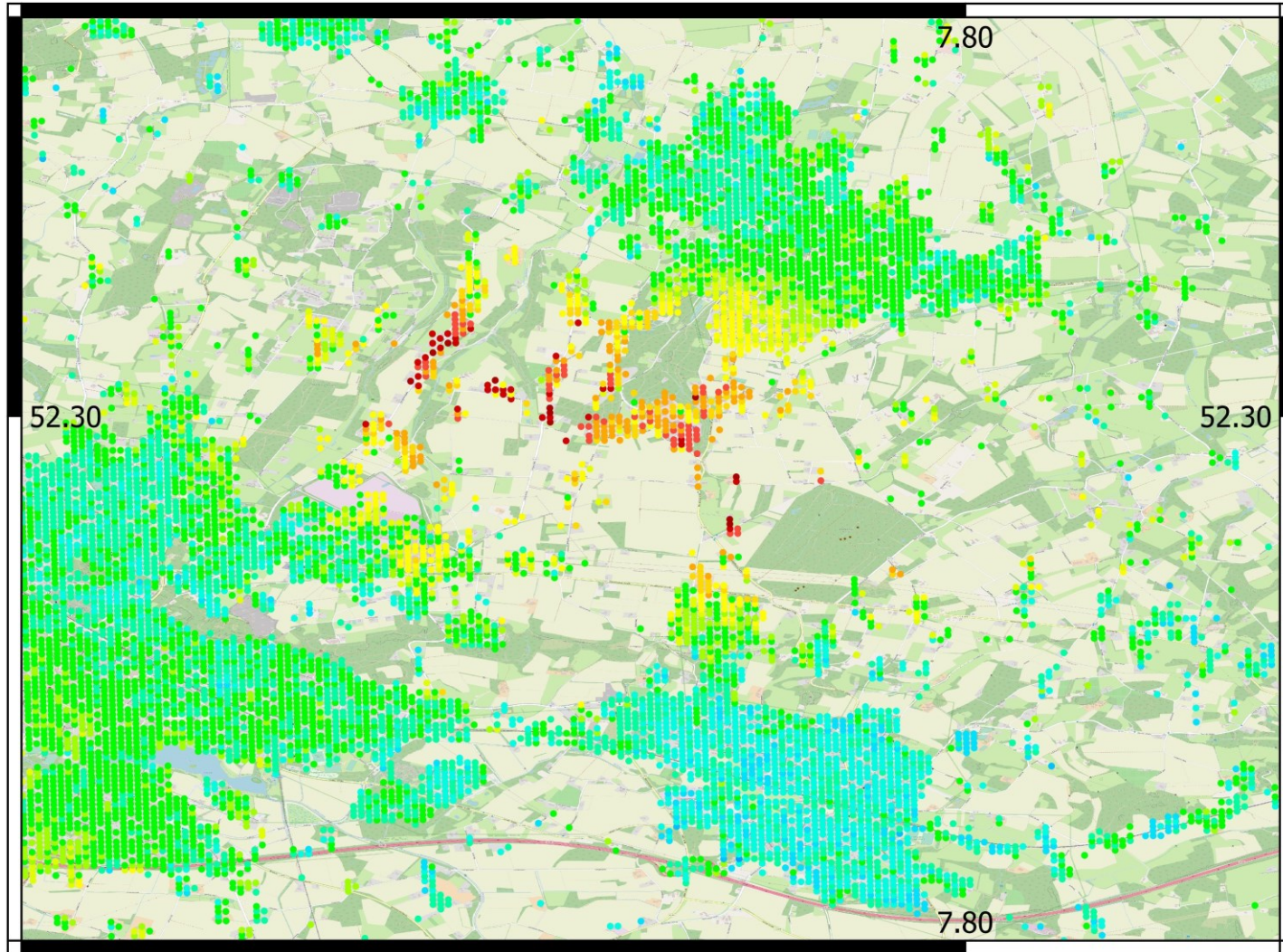
## Beschleunigte Hebung



- -20 - -12
- -12 - -4
- -4 - 4
- 4 - 12
- 12 - 20
- 20 - 28
- 28 - 36
- 36 - 44
- 44 - 52
- 52 - 60
- 60 - 68
- 68 - 76
- 76 - Inf

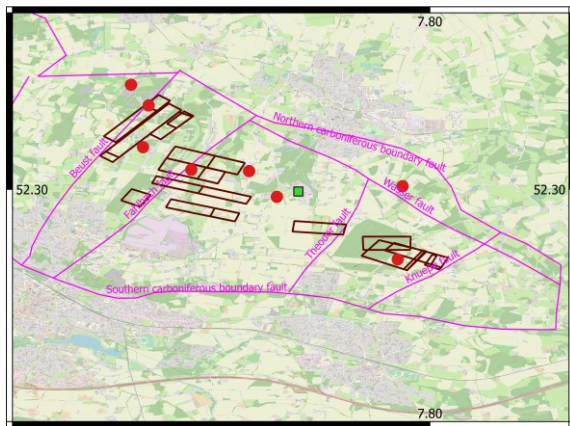
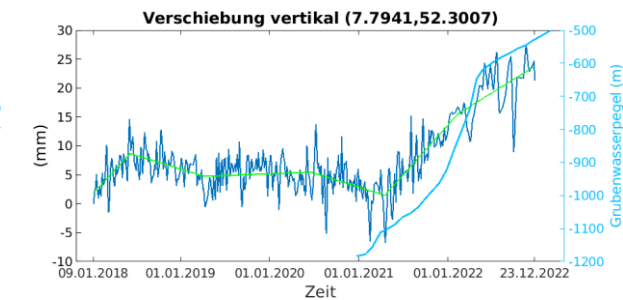
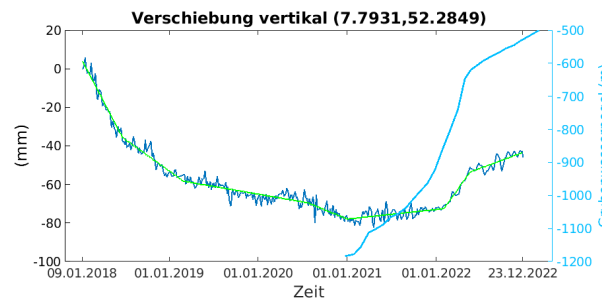
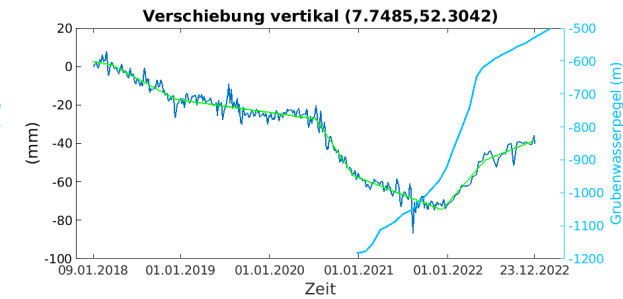
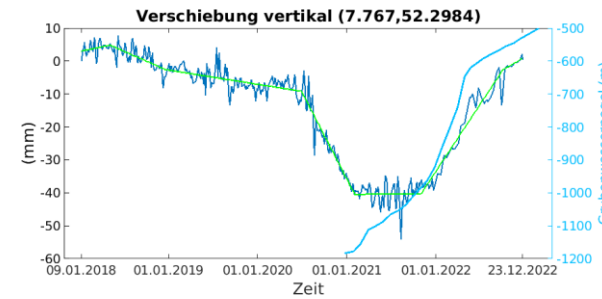
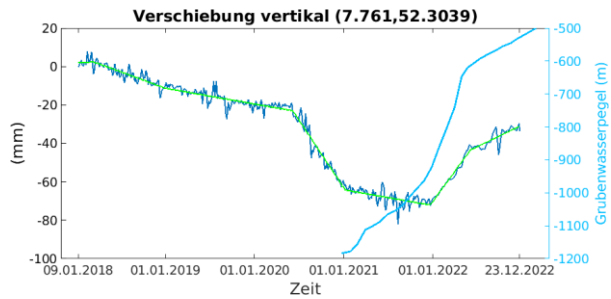
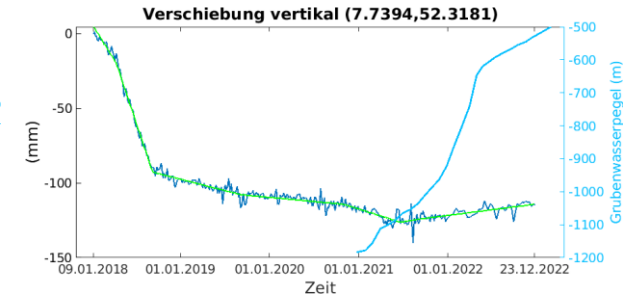
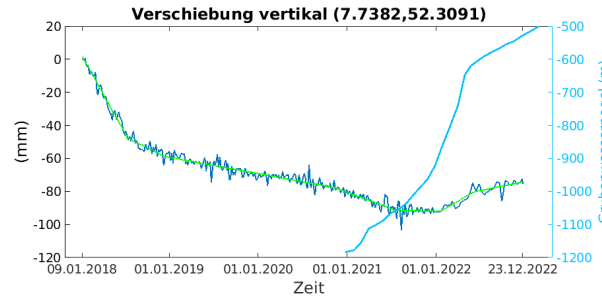
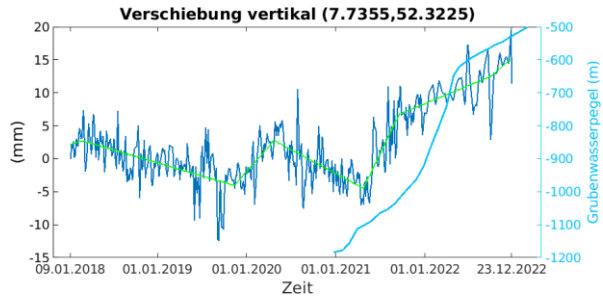
# Änderung Rate (mm/y) nach dem 24.06.2022

## Verlangsamte Hebung mit verlangsamtem Grubenwasseranstieg



- -Inf - -47.5
- -47.5 - -42.5
- -42.5 - -37.5
- -37.5 - -32.5
- -32.5 - -27.5
- -27.5 - -22.5
- -22.5 - -17.5
- -17.5 - -12.5
- -12.5 - -7.5
- -7.5 - -2.5
- -2.5 - 2.5
- 2.5 - 7.5
- 7.5 - 12.5
- 12.5 - 17.5
- 17.5 - 22.5
- 22.5 - 27.5
- 27.5 - 32.5

# Beispielzeitreihen



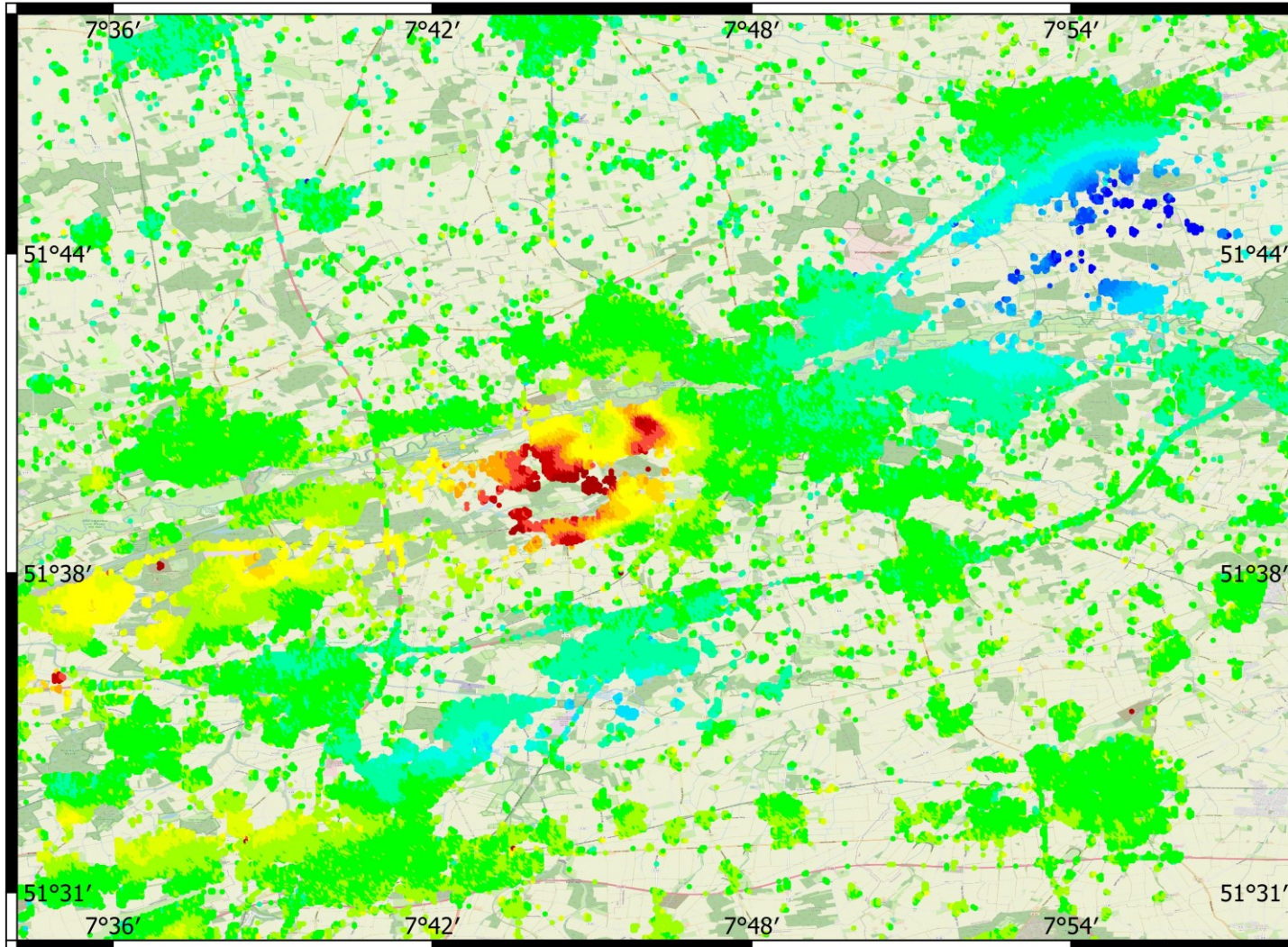
- Beispiel-PS
- Grubenwassermessung
- Abbaue\_2015-2018





# östliches Ruhrgebiet

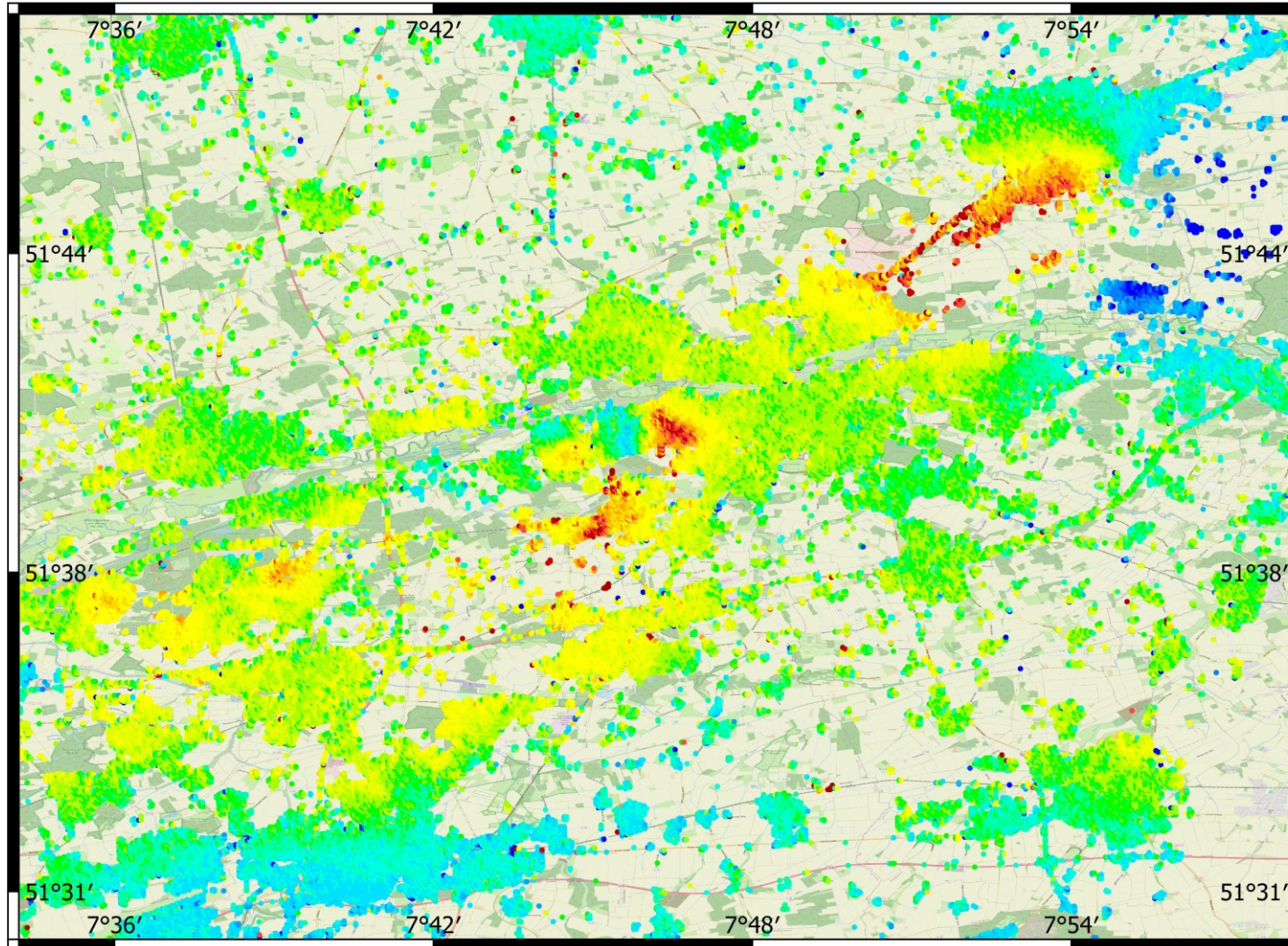
# Kumulierte vertikale Verschiebungen Januar 2018 bis Dezember 2022



- -Inf - -57
- -57 - -51
- -51 - -45
- -45 - -39
- -39 - -33
- -33 - -27
- -27 - -21
- -21 - -15
- -15 - -9
- -9 - -3
- -3 - 3
- 3 - 9
- 9 - 15
- 15 - 21
- 21 - 27
- 27 - 33
- 33 - 39
- 39 - 45
- 45 - 51
- 51 - 57
- 57 - Inf

OpenStreetMap

# Kumulierte Ost-West-Verschiebungen Januar 2018 bis Dezember 2022



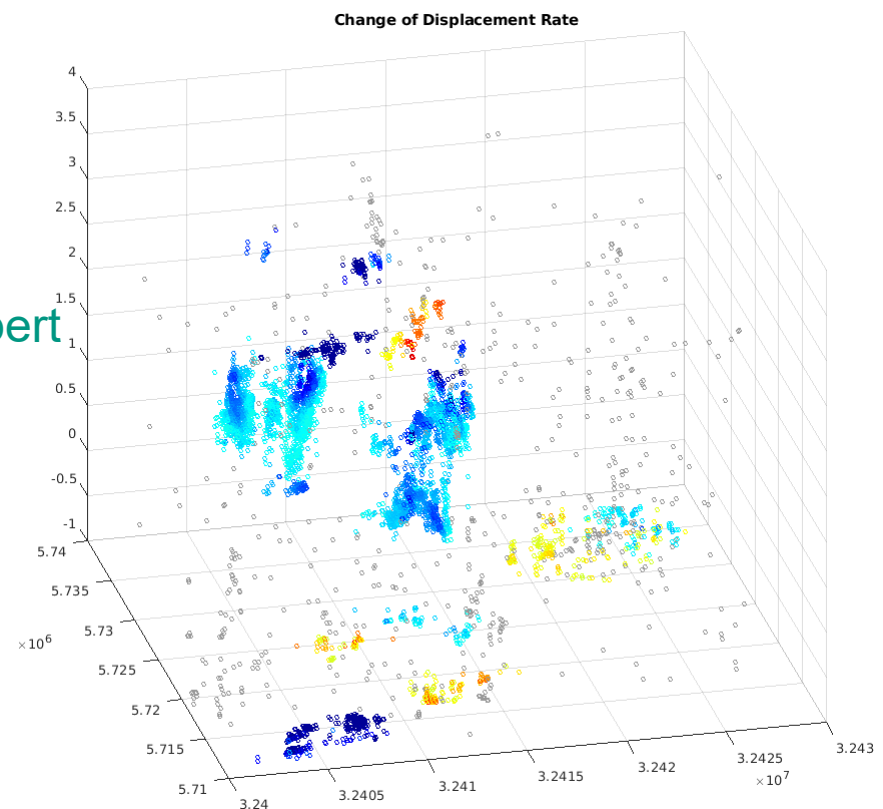
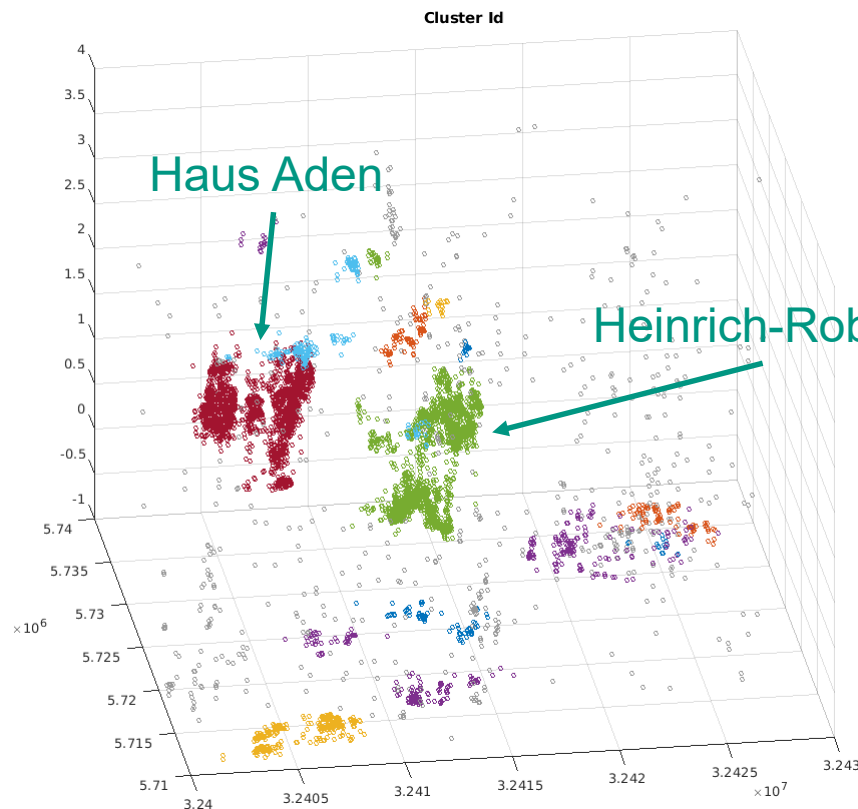
- -Inf - -19
- -19 - -17
- -17 - -15
- -15 - -13
- -13 - -11
- -11 - -9
- -9 - -7
- -7 - -5
- -5 - -3
- -3 - -1
- -1 - 1
- 1 - 3
- 3 - 5
- 5 - 7
- 7 - 9
- 9 - 11
- 11 - 13
- 13 - 15
- 15 - 17
- 17 - 19
- 19 - Inf

OpenStreetMap

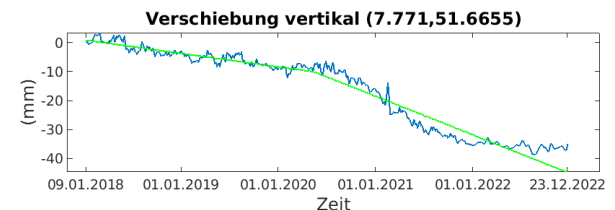
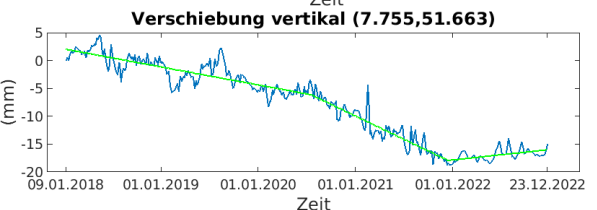
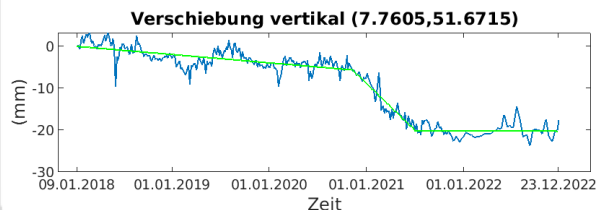
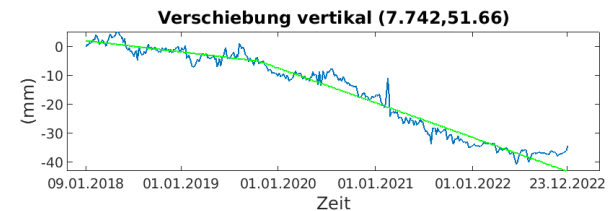
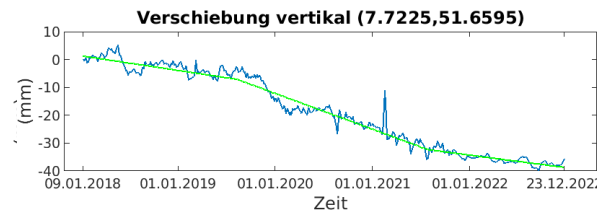
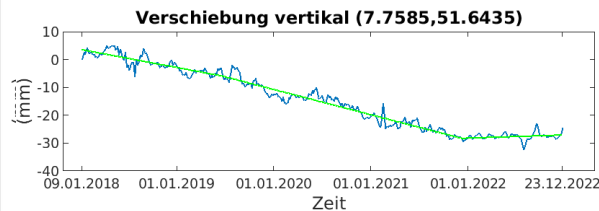
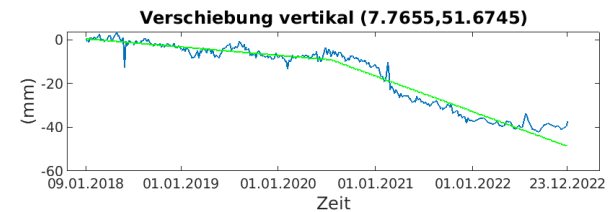
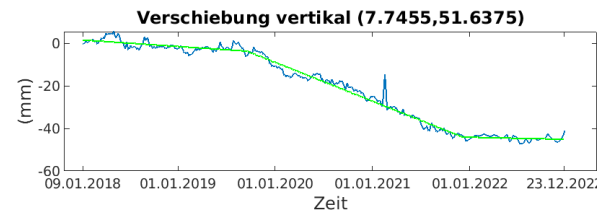
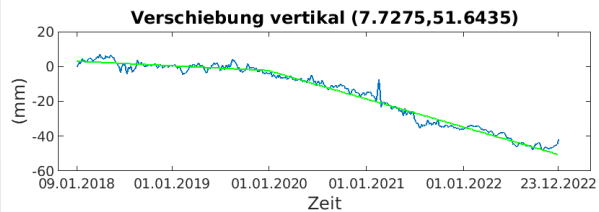
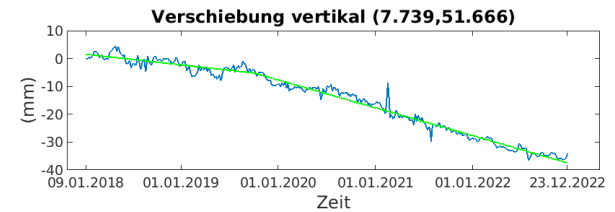
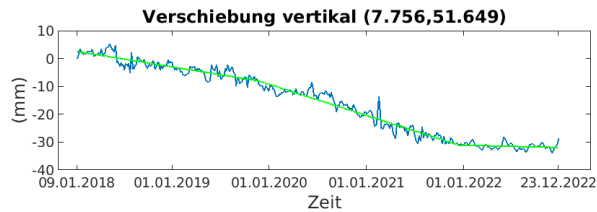
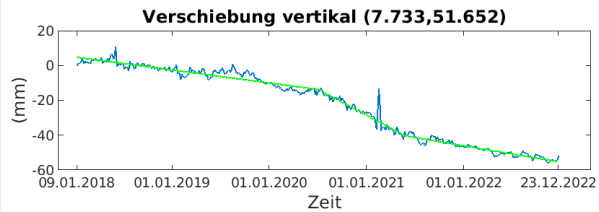
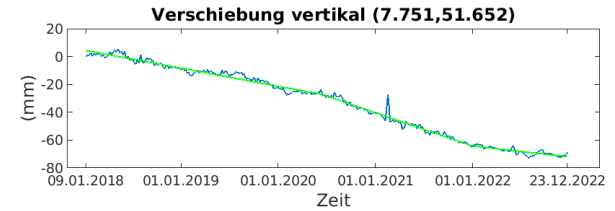
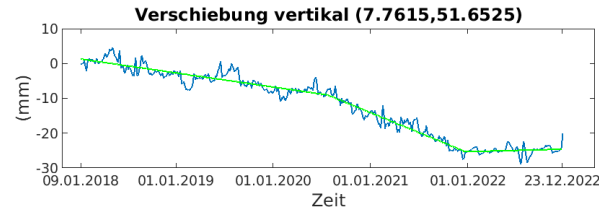
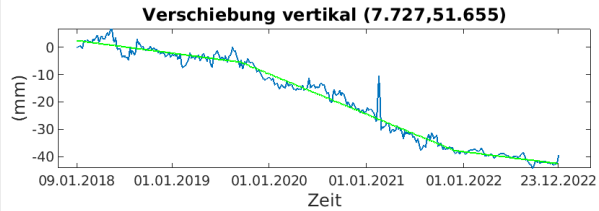
# Analyse der Bewegungsmuster



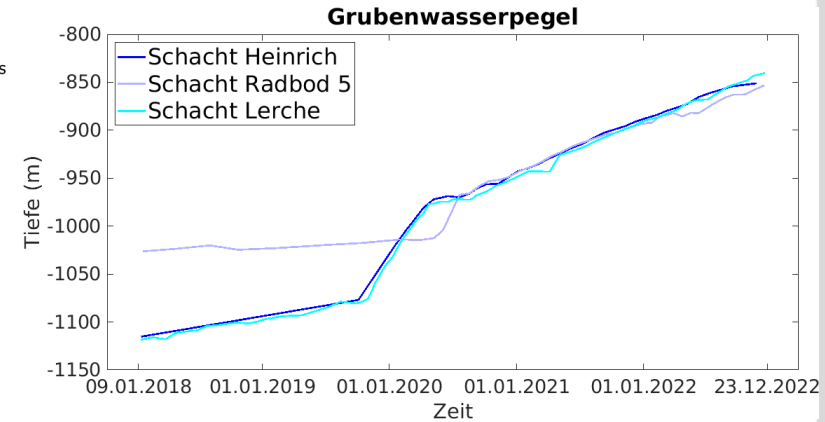
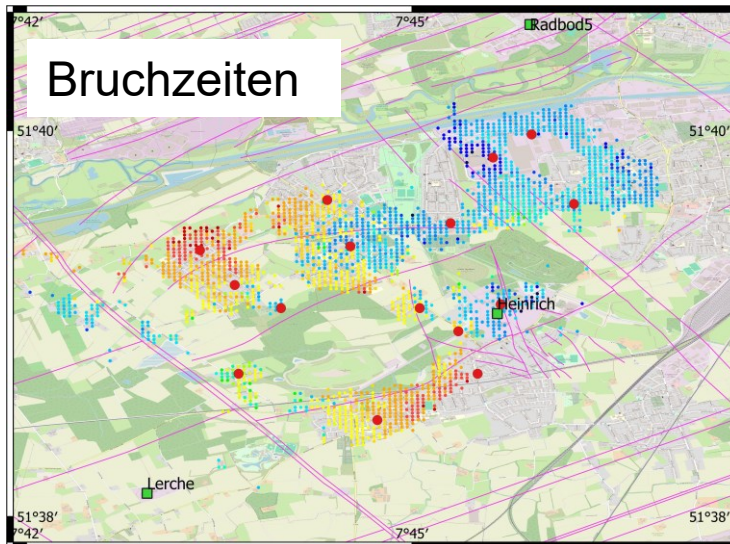
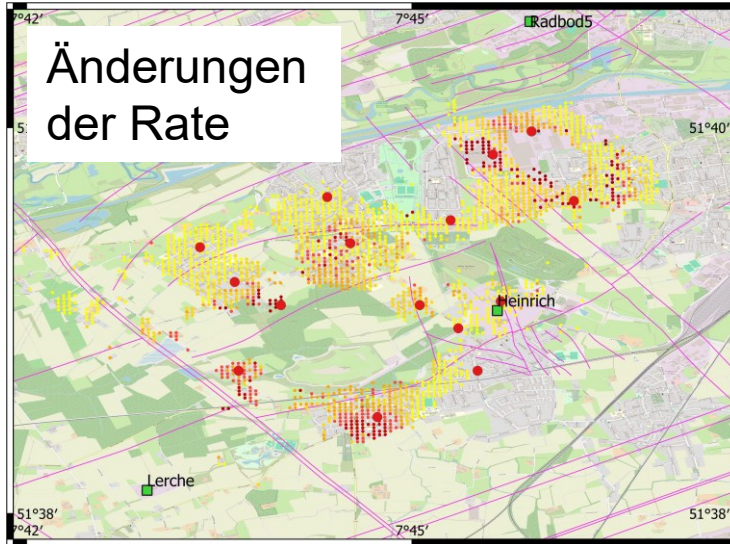
1. Fitten eines Broken-Stick-Models an die Zeitreihen
2. Bilden von Clustern der Messungen, für die sich die Bewegungsrate um mehr als 5 mm/y nach dem Bruchpunkt ändert
3. Die mittleren Bruchzeiten jeden Clusters werden zur Einteilung in Zeitabschnitte benutzt, für die jeweils die kumulierte Verschiebung berechnet wird.



# Beispielzeitreihen Heinrich-Robert

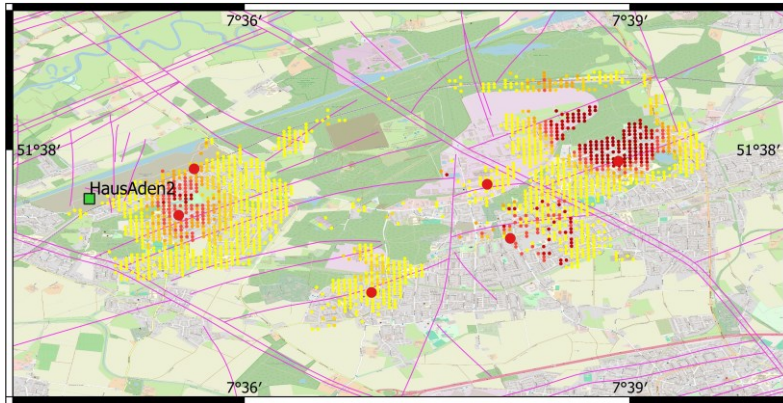


# Cluster Heinrich-Robert

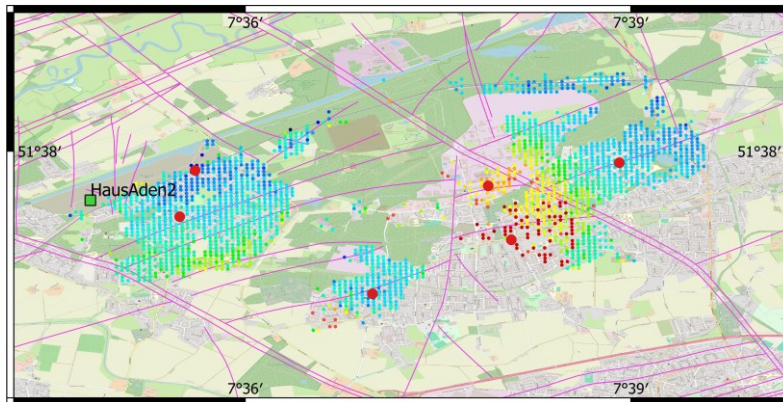


Die mittleren Bruchzeiten liegen beim 06.09.2019 und beim 15.07.2020.

# Cluster Haus Aden



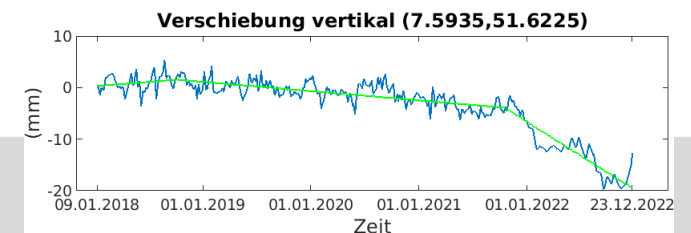
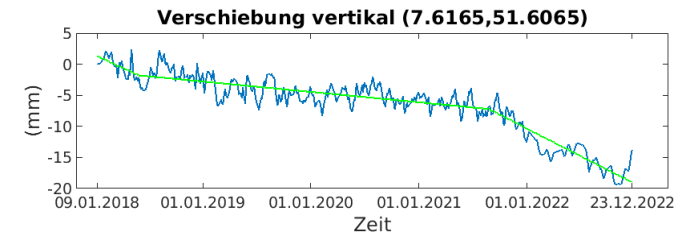
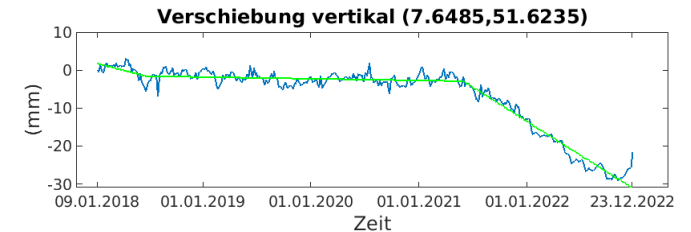
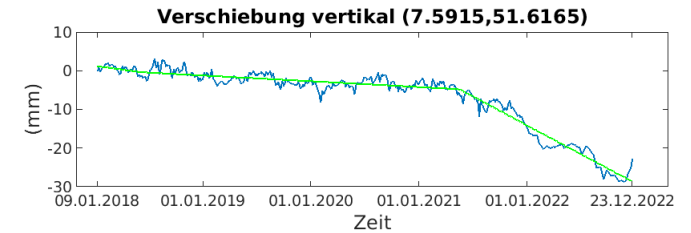
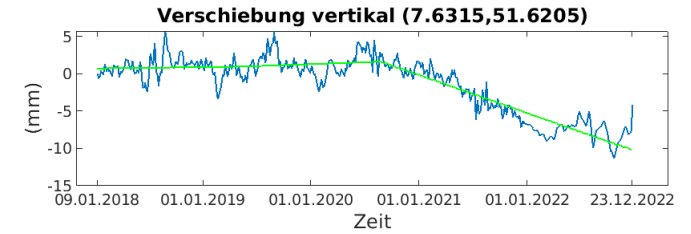
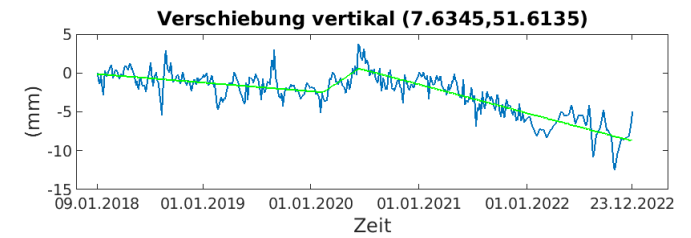
## Änderungen der Rate



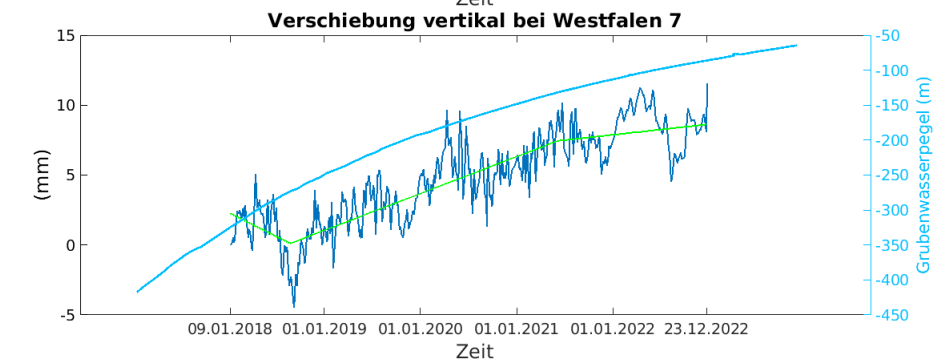
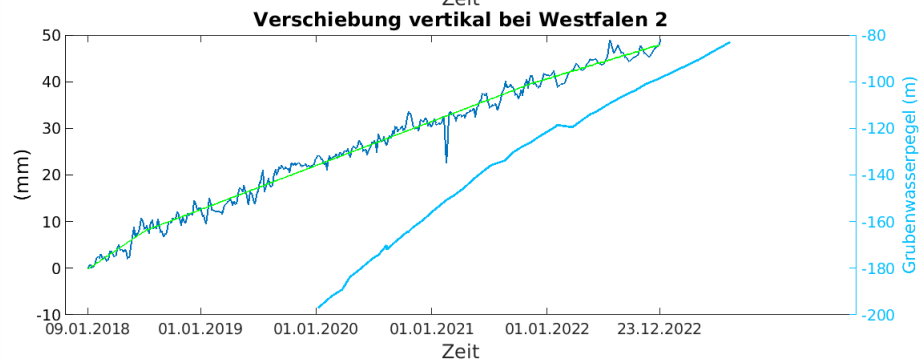
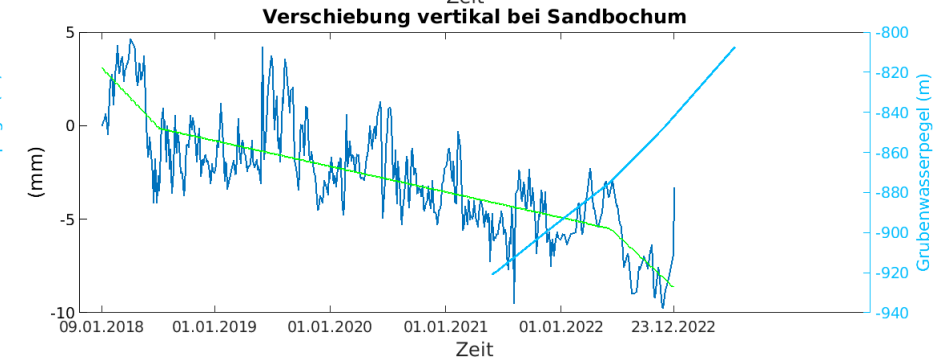
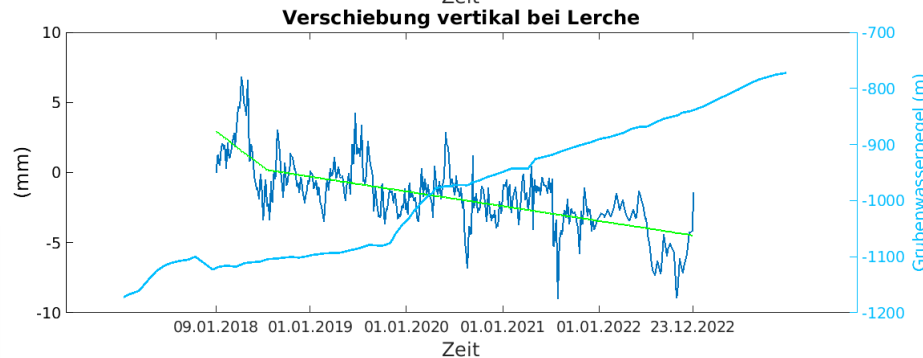
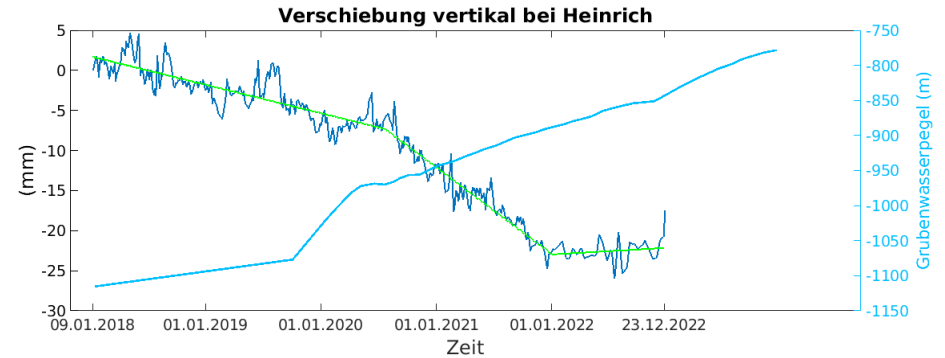
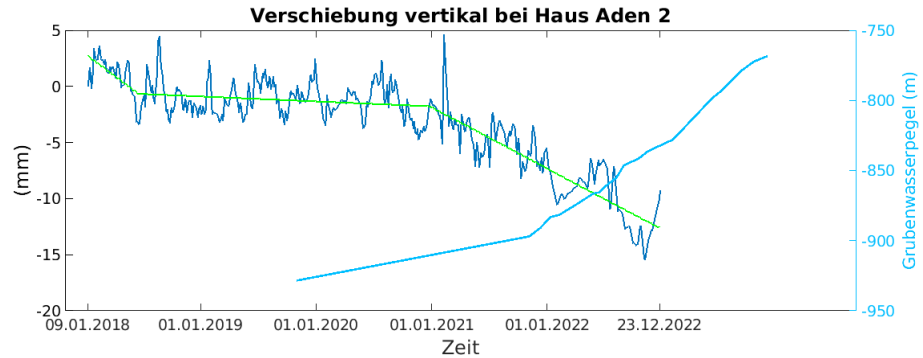
## Bruchzeiten

- Beispiel-PS
- Mine water measurements
- ds\_bc\_1\_combOrb
  - -Inf - -19
  - -19 - -17
  - -17 - -15
  - -15 - -13
  - -13 - -11
  - -11 - -9
  - -9 - -7
  - -7 - -5
- KO10\_Tektonik
- OpenStreetMap

- Beispiel-PS
- Mine water measurements
- t\_bc\_1\_combOrb
  - 01.05.2020-31.05.2020
  - 01.06.2020-30.06.2020
  - 01.07.2020-31.07.2020
  - 01.08.2020-31.08.2020
  - 01.09.2020-30.09.2020
  - 01.10.2020-31.10.2020
  - 01.11.2020-30.11.2020
  - 01.12.2020-31.12.2020
  - 01.01.2021-31.01.2021
  - 01.02.2021-28.02.2021
  - 01.03.2021-31.03.2021
  - 01.04.2021-30.04.2021
  - 01.05.2021-31.05.2021
  - 01.06.2021-30.06.2021
  - 01.07.2021-31.07.2021
  - 01.08.2021-31.08.2021
  - 01.09.2021-30.09.2021
  - 01.10.2021-31.10.2021
  - 01.11.2021-30.11.2021
  - 01.01.2022-31.01.2022
- KO10\_Tektonik
- OpenStreetMap



# PS bei Grubenwasserpegelmessstellen







# Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Diese Arbeit wurde von von verschiedenen Personen und Organisationen unterstützt, für deren Hilfe wir dankbar sind:

DMT (Daniel Schröder, Uwe Kalz)

RAG

RUB (Martina Rische)

Wir danken dem BMBF für die Förderung des Projektes FloodRisk im Rahmen des Programms GEO:N.

