



GEOlogik



Sensatec Webinar

28. April 2026

Technische Aspekte der Injektion granulierter Aktivkohle zur Grundwassersicherung

Mark Zittwitz, Gordon Bures, Lars Erpel

unter Mitarbeit von:

Nicki Rachowski, Pierre Bachmann, Heiko Palme, Sascha Reimann, Thomas Sobek

von der Sensatec GmbH

MOTIVATION

Problemstellung:

- ▶ Sicherungsverfahren des Grundwasserabstroms an der Grundstücksgrenze kontaminierter Standorte bedeuten idR
 - Inanspruchnahme von Flächen
 - Energiekosten
 - Abwasser, Abfälle
 - häufig Behandlung großer Stoffströme mit geringen Frachten
 - laufende Kosten, hohe spezifische Kosten

Lösung:

- ▶ In situ Verfahren sind kostengünstig und haben einen geringen Site Impact!
- ▶ Mit dem TSE Verfahren (Injektion von Feststoffen als Wirkstoffdepot) sind in situ Sanierungen mittels Einmalinjektion möglich geworden (inzwischen zahlreiche Referenzen).
- ▶ Geht das auch mit Aktivkohle?

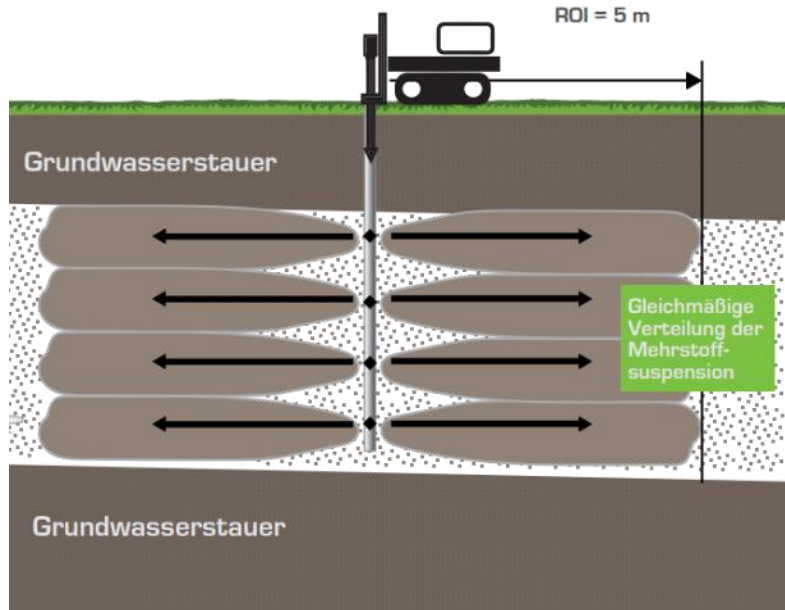
INHALT DES VORTRAGES

Technische Aspekte der Injektion granulierter Aktivkohle zur Grundwassersicherung:

- ▶ Verfahrensbeschreibung Feststoffinjektion
- ▶ Auslegung einer Injektionsbarriere
- ▶ Auswahl einer geeigneten Aktivkohle
- ▶ Anmischen und Injizieren
- ▶ Überwachung der Ausbreitung des Injektats zur Formierung der Barriere
- ▶ Möglichkeiten zur Regenerierung einer Aktivkohlebarriere
- ▶ Technische Grenzen
- ▶ Kosten einer Injektionsbarriere



TSE-TARGETED SOLIDS EMPLACEMENT



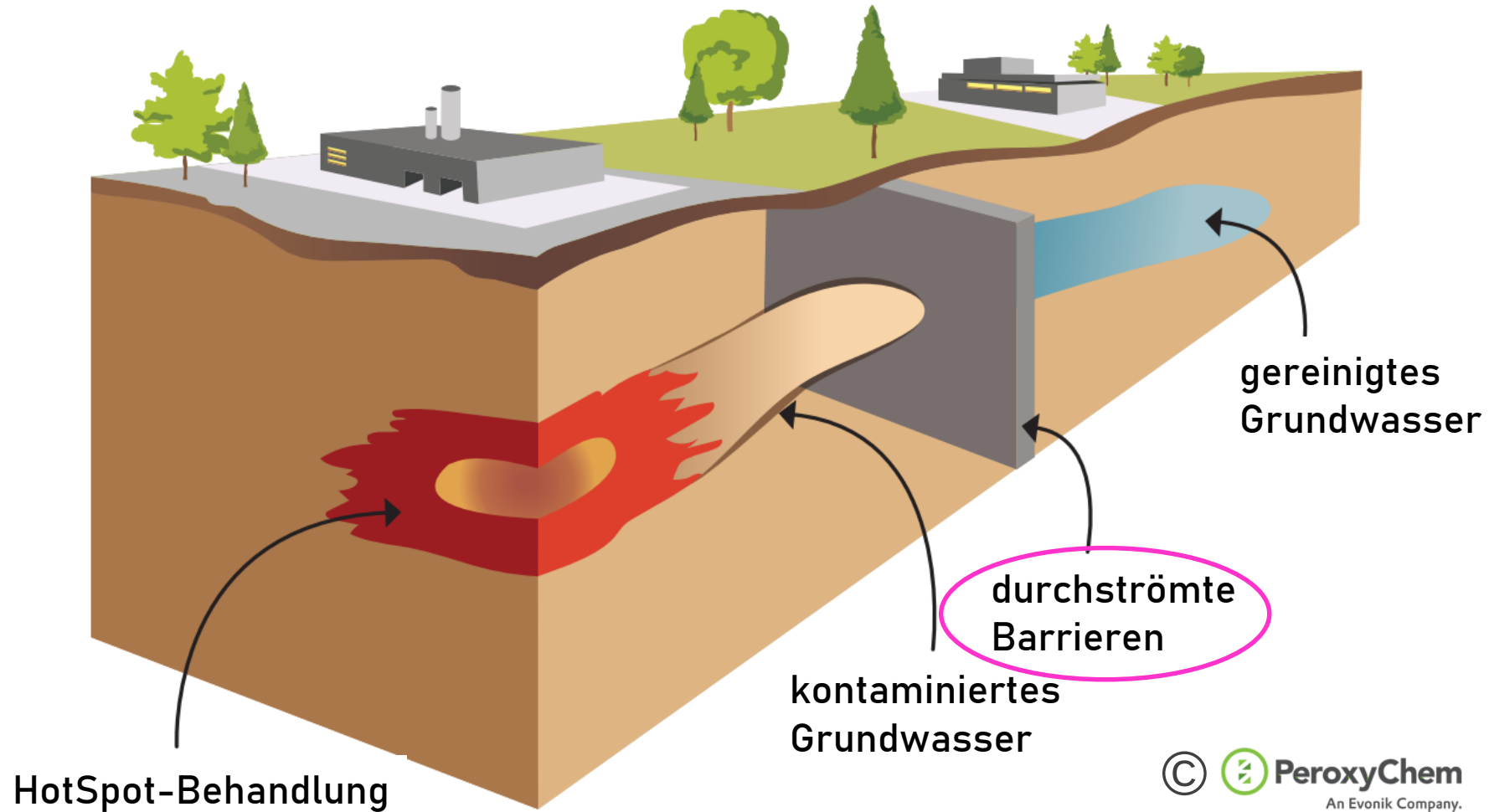
- ▶ gleichmäßige Verteilung um Ansatzpunkte, hohe Reichweiten, keine blind spots
- ▶ Vermeidung einer Verteilung auf dem Weg des geringsten hydraulischen Widerstandes bzw entlang von Vorzugswegsamkeiten

- ▶ TSE Verfahren: zielgerichtete Injektion einer hochviskosen Wirkstoffsuspension mittels hydraulischen Drucks über ein Bohrgestänge direkt in den Untergrund (Environmental Fracturing)
- ▶ Trägermedium verhindert Entmischung der Wirkstoffe und ermöglicht größere Injektionsradien durch fracturing
- ▶ Hochdruck ermöglicht Injektion in gering durchlässigen Böden (Schluff, Ton) und sogar Festgestein
- ▶ Aufhebung der Massenlimitation durch Löslichkeit der Wirkstoffe bei der Injektion von Feststoffen
- ▶ Aufhebung der Massenlimitation durch verfügbares Porenvolumen durch Fracturing
- ▶ Injektion von Feststoffen bewirkt Schaffung von Wirkstoffdepots

WELCHER WIRKSTOFF FÜR WELCHE ANWENDUNG?

Anwendung	Wirkstoff
▶ Biologische Oxidation	Permeox®, ORC®, Regenox® (Calciumperoxide)
▶ Biologische Reduktion	EHC®, Provect-IR®, HRC® (organische Substrate + ZVI)
▶ In situ chemische Oxidation (ISCO)	Permanganate, (aktivierte) Persulfate
▶ In situ chemische Reduktion (ISCR, abiotischer Abbau)	Injektion von ZVI-S / gezielte Bildung von FeS im Untergrund
▶ Erhöhung der Permeabilität	Injektion von Sand
▶ Verringerung der Permeabilität	Injektion von Bentonit
▶ In situ Adsorption	Injektion von Aktivkohle, Zeolithe, Metafix®, MercLock®, PlumeStop®, RemBind®

WELCHE KONFIGURATION FÜR WELCHE ANWENDUNG?



AUSLEGUNG EINER INJEKTIONSBARRIERE

▶ Standortparameter

- Schadstoffkonzentration
- Schadstoffgesamtmenge
- Grundwasserfließgeschwindigkeit
- Fracht

▶ Sanierungsziel

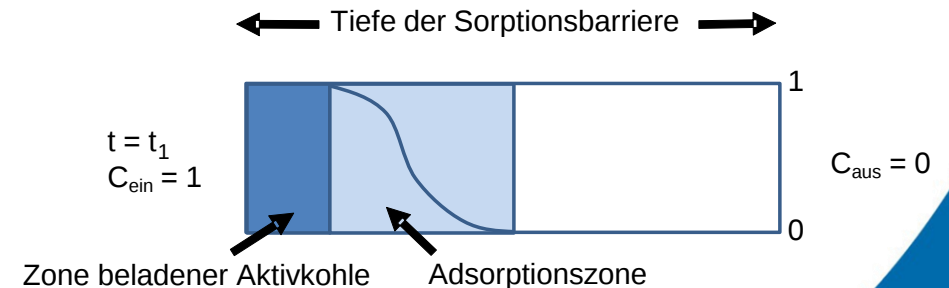
- Abreinigungszielwerte

▶ Menge Adsorbens = Maximalwert der folgenden Kriterien:

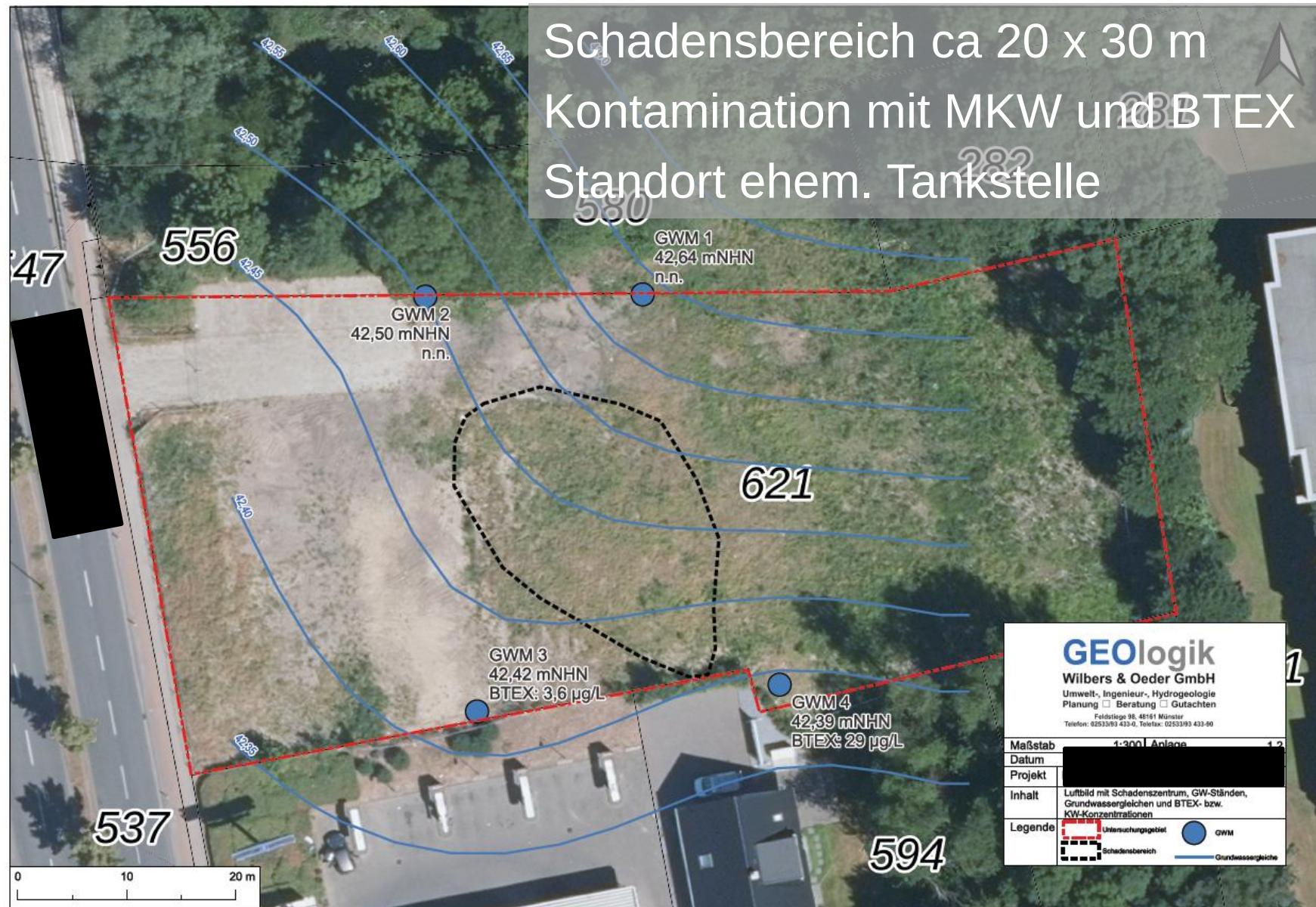
- gemessen an der Fracht / Verweildauer
- gemessen an der Gesamtmenge
- geometrische Kriterien (häufig entscheidend!)

▶ Injektionsraster

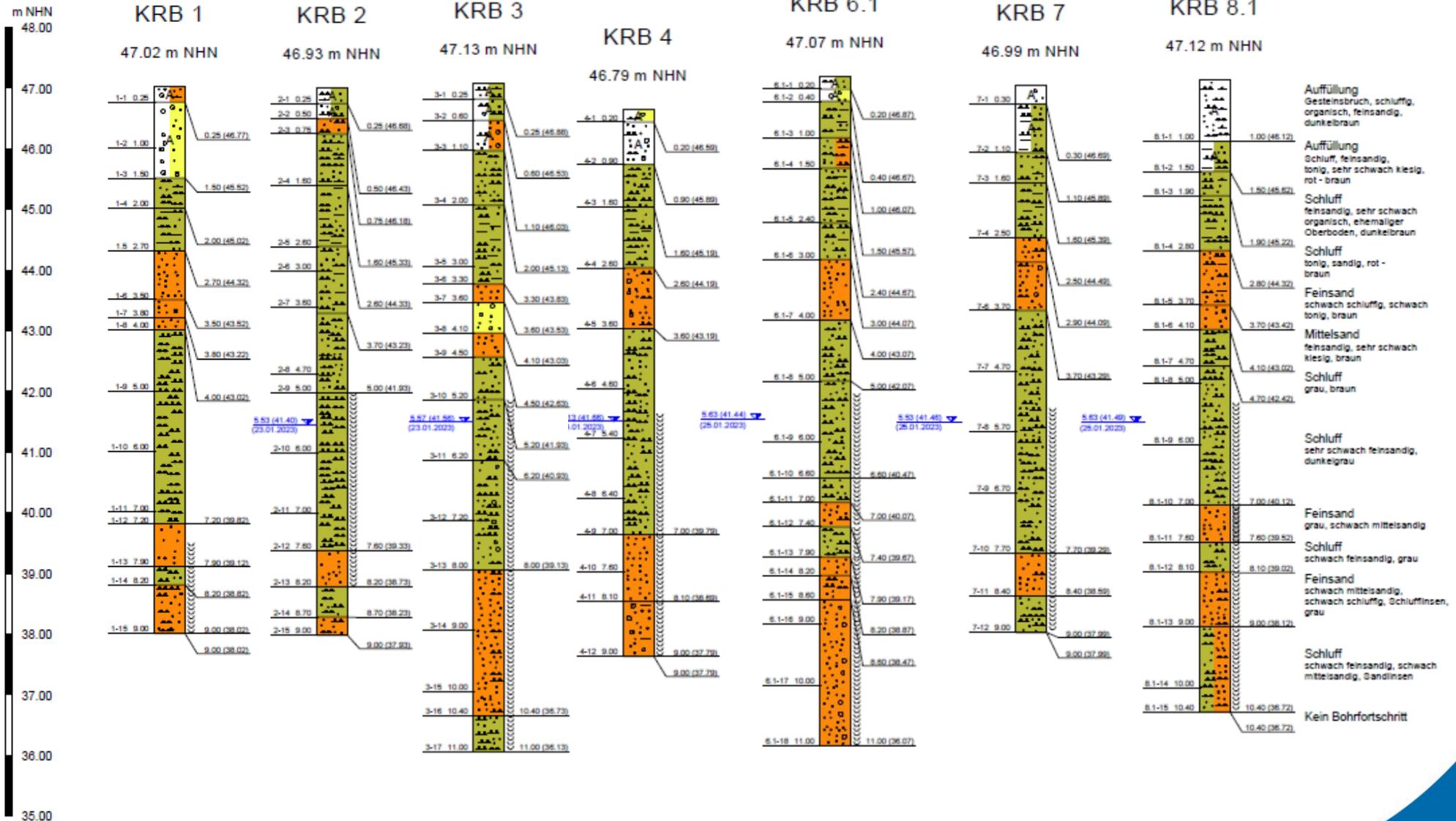
- abhängig von horizontaler Ausdehnung des Behandlungsbereiches (optimal: 5 m Raster)
- abhängig von vertikaler Ausdehnung des Schadens (optimal + 1m)



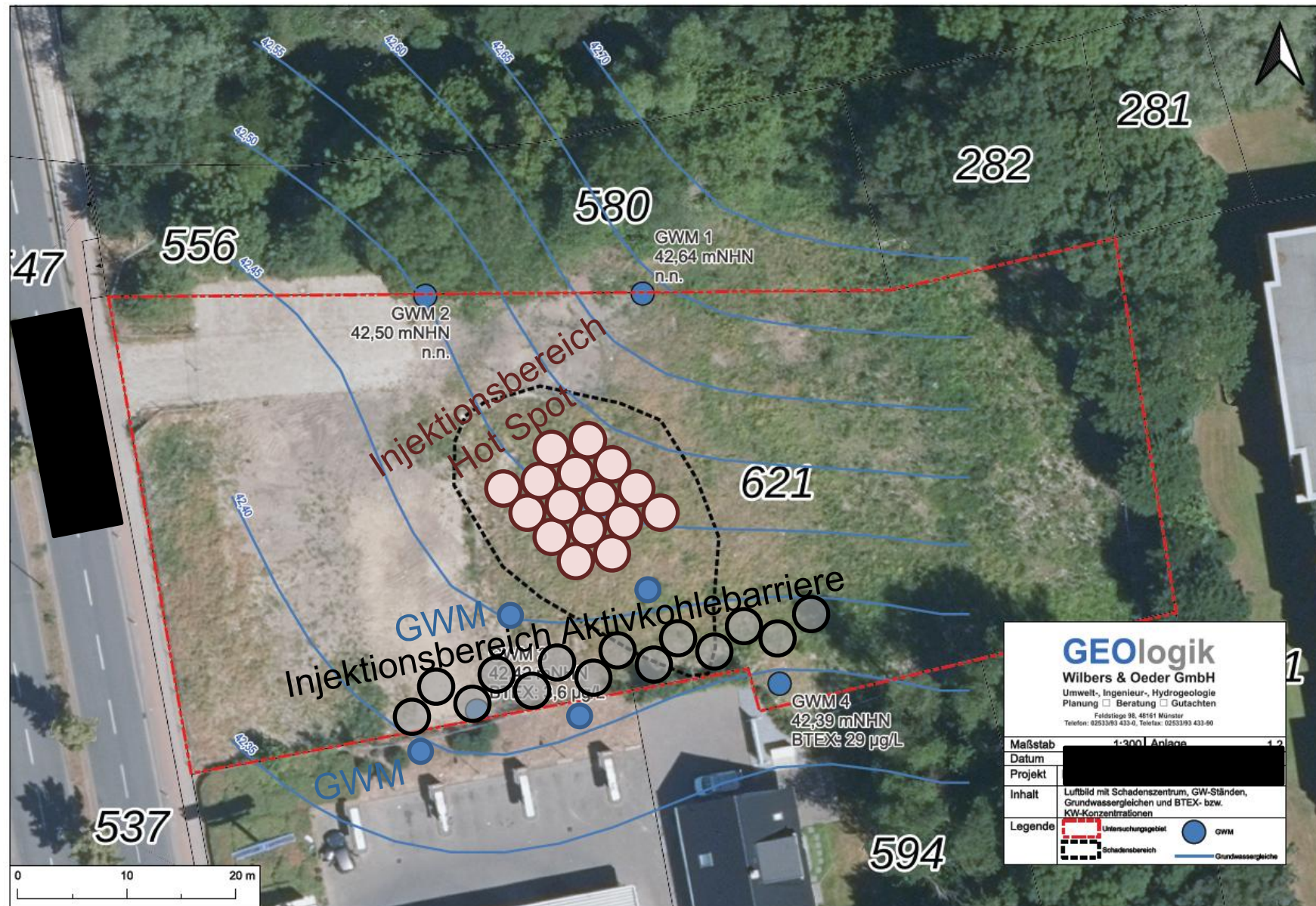
LAGE UND AUSDEHNUNG DER KONTAMINATION



UNTERGRUNDAUFBAU IM BEREICH DER KONTAMINATIONSFLÄCHEN



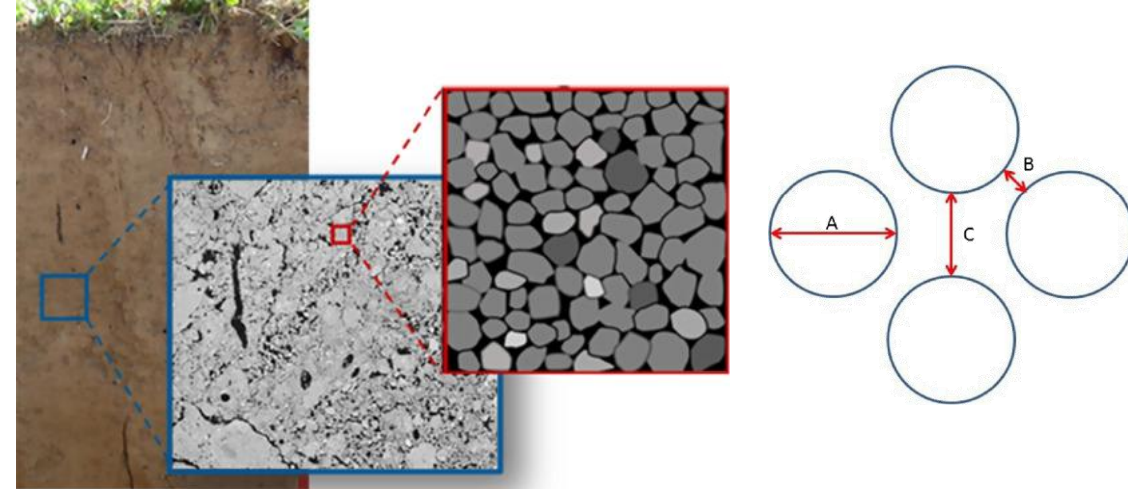
VORSCHLAG ZUR SICHERUNG UND QUELLSTÄRKENMINIMIERUNG



AUSWAHL EINER GEEIGNETEN AKTIVKOHLE

▶ Parameter der Aktivkohle

- Sorptionsneigung in Abhängigkeit vom Schadstoff (unterschiedliche Kohlen für PFAS, CKW, Quecksilber)
- Korngröße vs. Porenhalsdurchmesser des zu behandelnden Untergrundes (Ortstabilität ist ein wichtiger Unterschied zu Nano-Produkten!)

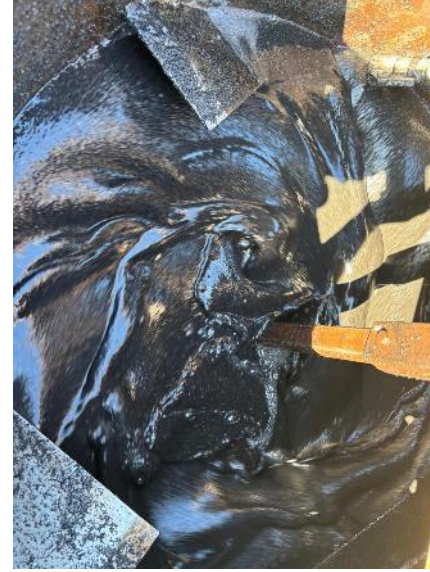
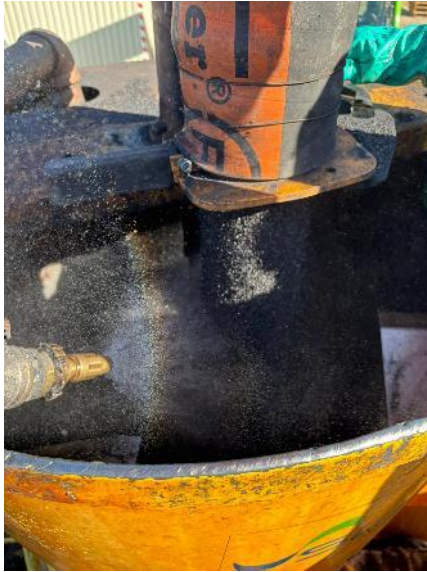


▶ Labormischtests mittels Viskosimeter zur Festlegung der Art und Einsatzkonzentration geeigneter

- Verdickungsmittel
- Quervernetzer
- Enzymkettenbrecher



ANMISCHEN UND INJIZIEREN



- ▶ Erzeugen einer hochviskosen Wirkstoffsuspension, Aktivkohleanteil bis zu 20 Gew% (beachte geringes spezifisches Gewicht!)

ANMISCHEN UND INJIZIEREN

- ▶ Abteufen von Injektionsbohrungen mittels Direct-Push Technologie
 - Verwendung spezieller, verschleißbarer Injektionsspitze
 - bevorzugtes Vorgehen top => down
- ▶ Injektion mittels Hochdruckpumpen (max 100 bar)
 - Druck zur Ausbildung der Fraktur >>
 - Druck für das Einbringen der Suspension
- ▶ Tagesleistung ca. 1 t Wirkstoff (hier Aktivkohle)
- ▶ Back Pressure Relief häufig limitierender Faktor



ÜBERWACHUNG DER AUSBREITUNG DES INJEKTATS ZUR FORMIERUNG DER BARRIERE



- ▶ indirekter Nachweis der Ausbreitung mittels sichtbaren Effekten an der Oberfläche

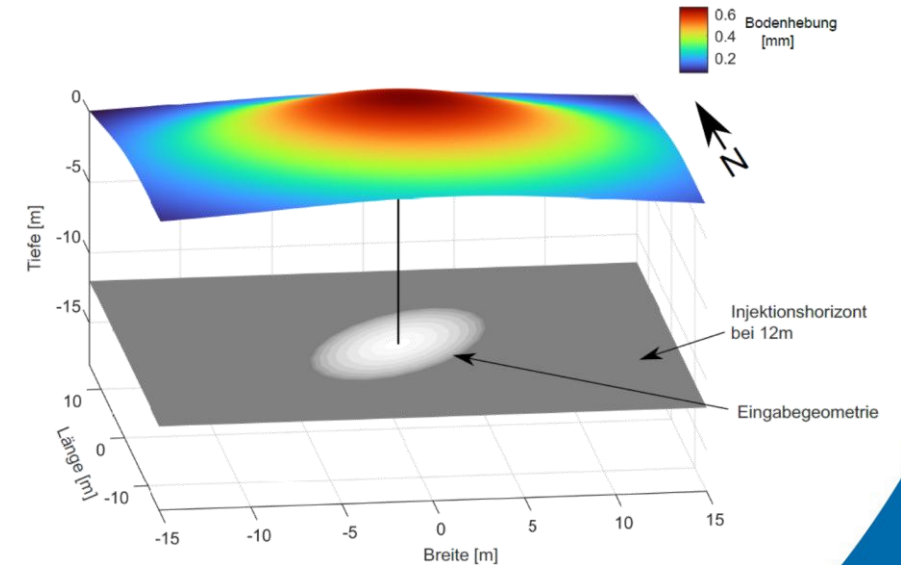
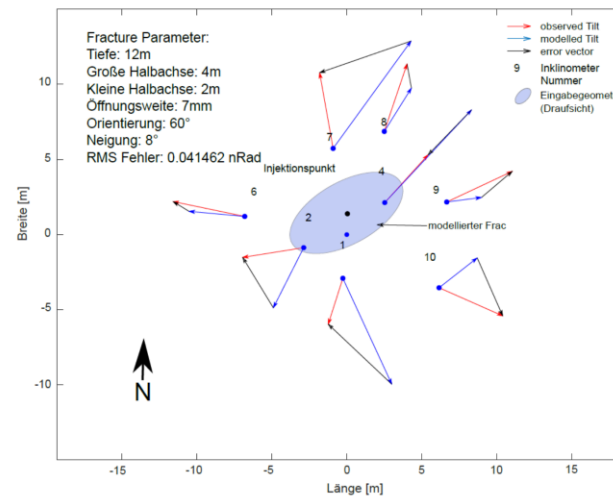
ÜBERWACHUNG DER AUSBREITUNG DES INJEKTATS ZUR FORMIERUNG DER BARRIERE



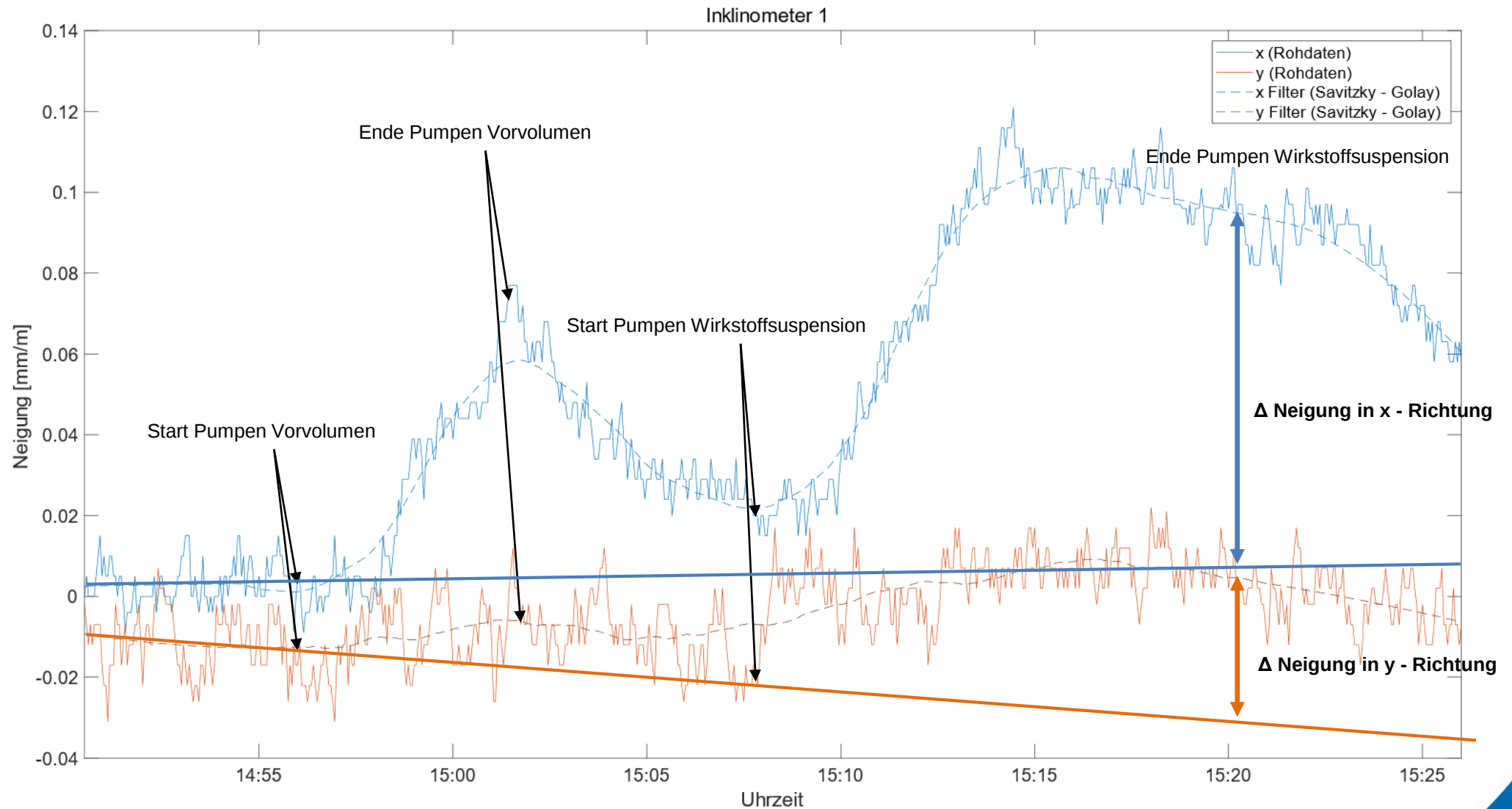
- ▶ direkter Nachweis der Ausbreitung mittels Rammkern-Sondierung

ÜBERWACHUNG DER AUSBREITUNG DES INJEKTATS ZUR FORMIERUNG DER BARRIERE

- ▶ Kartierung mit Bodenneigungsmetern „Tiltmeter Geophysics“
- ▶ Messung der Bodenneigung (Winkel und Richtung) während des Injektionsvorganges
- ▶ Auswertung als 3D-Modell
- ▶ Nachweisung der Wirkstoffverteilung

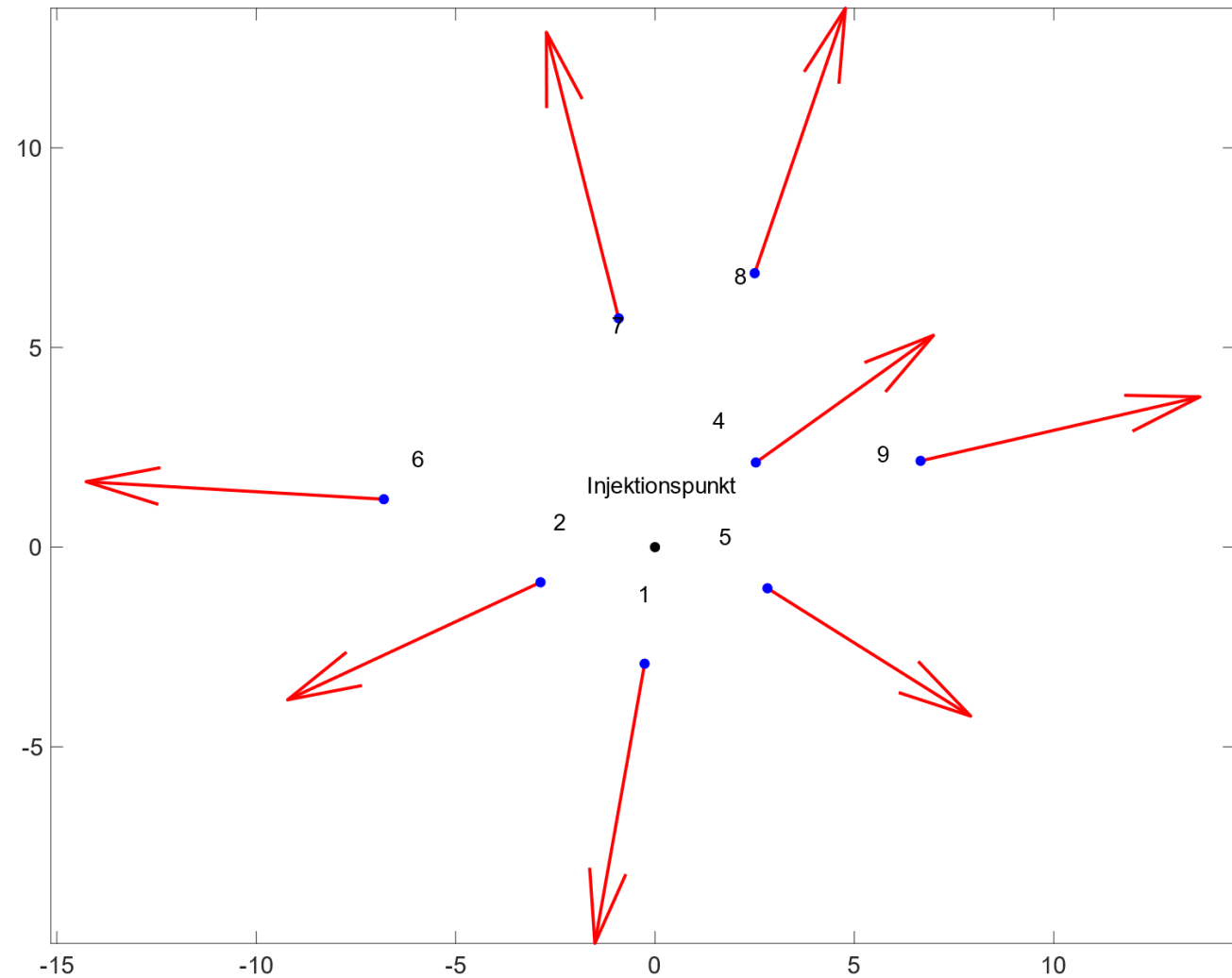


TILTMETERMESSUNGEN



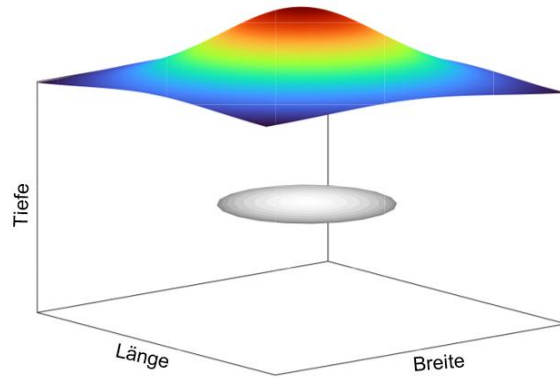
TILTMETERMESSUNGEN

$$\text{Neigungsvektor} = \begin{pmatrix} \Delta \text{Neigung in x - Richtung} \\ \Delta \text{Neigung in y - Richtung} \end{pmatrix}$$

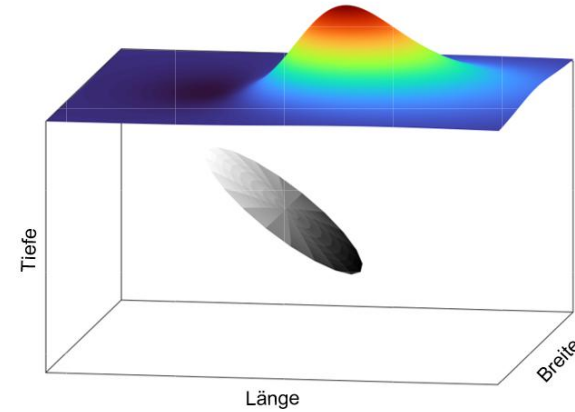


BODENHEBUNG VS. FRAC - ORIENTIERUNG

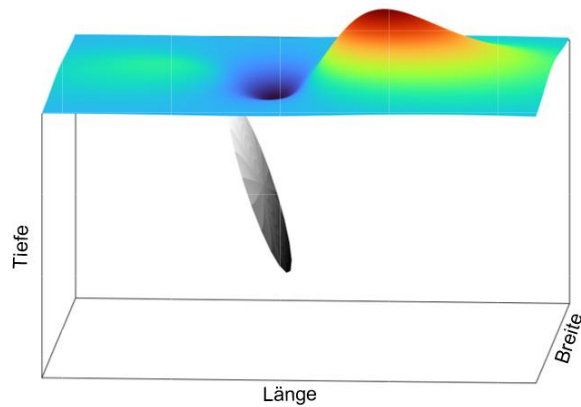
Flach liegende Fracture
(0° Einfallen)



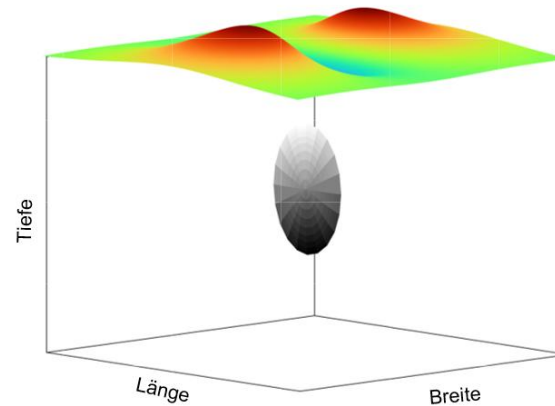
schräg stehende Fracture
(45° Einfallen)



Sehr steile Fracture
(75° Einfallen)

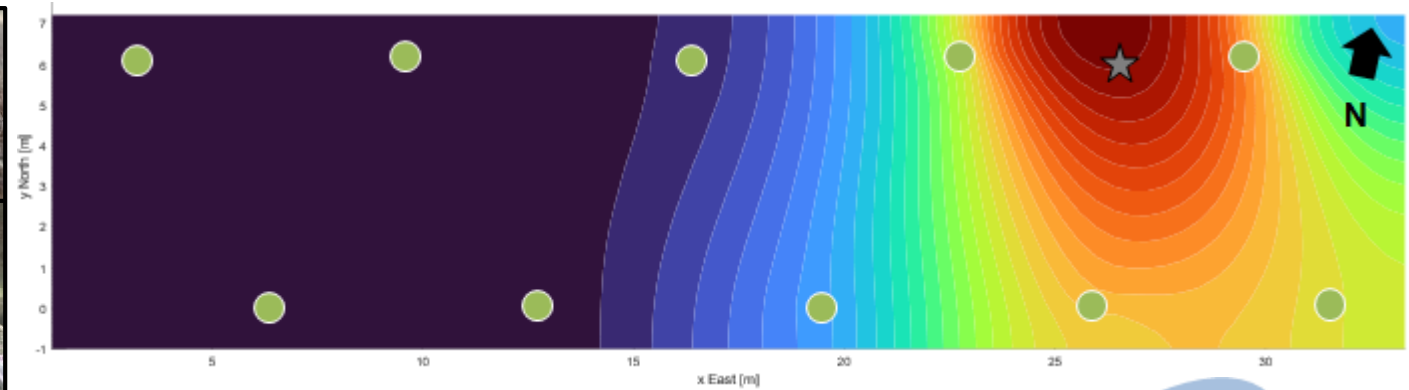


senkrecht stehende Fracture
(90° Einfallen)

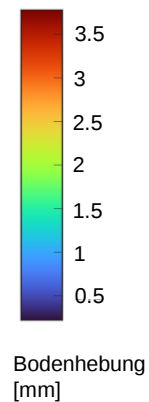


ÜBERWACHUNG DER AUSBREITUNG DES INJEKTATS ZUR FORMIERUNG DER BARRIERE

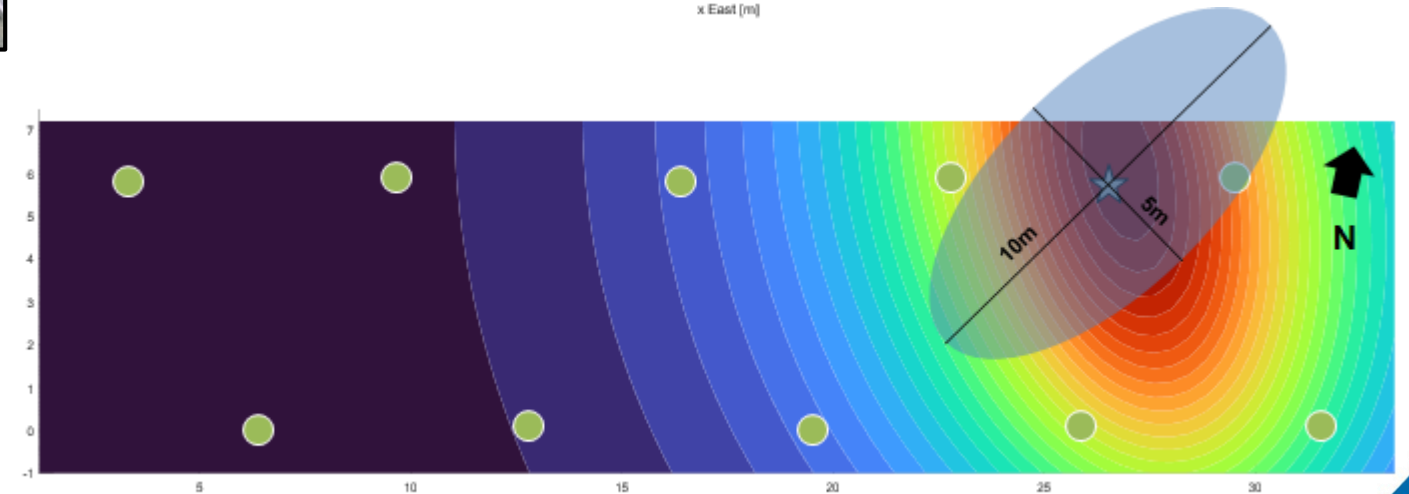
- ▶ Kartierung mit Bodenneigungsmetern „Tiltmeter Geophysics“



- ★ Injektionspunkt
- Bodenneigungsmeter
- Modellierte Ausbreitung



Bodenhebung
[mm]



MÖGLICHKEITEN ZUR REGENERIERUNG EINER AKTIVKOHLEBARRIERE

Einfache Lösung:

- ▶ Nachinjektion zur Erhöhung der Wanddicke

Einbringung von Wirkstoffen über Lanzen in der Barriere:

- ▶ Direktgasinjektion von Sauerstoff oder Belüftung zur Initiierung eines aeroben biologischen Abbaus
- ▶ Infiltration flüssiger Substrate zur Initiierung eines anaeroben biologischen Abbaus (bevorzugt EVO)
- ▶ vorgenannte Maßnahmen in Verbindung mit einer Bioaugmentation

Spezialfälle:

- ▶ Thermodesorption und Bodenluftabsaugung
- ▶ thermisch aktiviertes Persulfat (Zerstörung von PFAS)



TECHNISCHE GRENZEN

Randbedingungen des Standortes:

- ▶ Back Pressure Relief
- ▶ unkonsolidierte Auffüllungen
- ▶ schlecht oder nicht verfüllte Sondier- / Bohrlöcher
- ▶ Witterung, Frost im allgemeinen aber:
 - für den Suspensionsaufbau notwendige Hilfsstoffe funktionieren nicht unter 5°C!
 - Tilttermessungen bei gefrorenem Boden sind nur bedingt auswertbar
- ▶ Zugänglichkeit der Bohransatzpunkte

Anmischen der Suspension:

- ▶ geringes spezifisches Gewicht
- ▶ Entlüftung der Aktivkohlepartikel / Schaumbildung
- ▶ zeitlich begrenzte Stabilität der Suspension



KOSTEN EINER INJEKTIONSBARRIERE

▶ Baustelleneinrichtung:

- Geoprobe Bohrgerät
- Feststoffinjektionseinheit
- Radlader
- Mobilstrom
- Wasseranschluss über Hydranten
- Modulcontainer (einschl. WC, Waschmöglichkeit, Aufenthaltsbereich, Auffangbehälter, Treppe)
- Bauzaun
- Container für Baumischabfälle

▶ Grundpreis: psch 13.200,- EUR

▶ Vorhalten: pro Woche 1.275,- EUR

▶ Arbeitsschutz: pro Woche 375,-EUR

▶ Wirkstoffinjektion kg-basiert!

- Einrichten je Bohrpunkt Stk 150,- EUR
- Bohren pro Meter 35,- EUR
- Injektionsspitze Stk 150,- EUR
- Wirkstoff pro kg 5,- EUR
- Verdickungsmittel (Menge prozentual von Wirkstoff) pro kg 10,- EUR
- Injektion pro kg zw. 5,- und 10,- EUR

▶ Dokumentation: 1 % von Angebotssumme

▶ Sonstiges (nicht vergessen):

- Kernbohrung
- Handschachtung
- Kampfmittel- und Leitungsfreigaben
- Augmentation
- Einmessen
- Verfüllen/Verpressen

FAZIT

Machbarkeit:

- ▶ TSE Verfahren ist geeignet, granuliert Aktivkohle zu injizieren
- ▶ Formierung einer passiv durchströmten Adsorptionsbarriere im Untergrund kann messtechnisch belegt werden

Vorteile des Verfahrens:

- ▶ Einbringung großer Mengen möglich
- ▶ Ortstabilität der Barriere
- ▶ attraktive Gesamtkosten / keine Betriebskosten
- ▶ äußerst geringer Energieverbrauch

To Do:

- ▶ Wirksamkeitsnachweis in dieser Größenordnung bisher nur in Nordamerika



VIELEN DANK FÜR IHRE
AUFMERKSAMKEIT



Für Fragen stehe ich zur Verfügung

Mark Zittwitz

Sensatec GmbH
Sanierungs- und
Sensoriktechnologien

NL Berlin

Tempelhofer Weg 8
D- 12099 Berlin

Tel. 030 8094 1576

m.zittwitz@sensatec.de