



## EINSATZ VON GEOPOLYMERBASIERTEM SPRITZBETON FÜR DIE BRANDSCHUTZTECHNISCHE INSTANDHALTUNG VON TUNNELN

**GÖTZ VOLLMANN & CHRISTIAN RHEIN**

18. Fachtagung Sicherheit in Tunnelanlagen

13. September 2022, Hamburg – Hotel Hafen

# Einführung

## Tunnelbestand in Europa

- Tunnelinfrastruktur in Mitteleuropa altert allmählich
  - Straßentunnel in Deutschland: gebaut seit 1970
  - Eisenbahntunnel in Deutschland: gebaut seit 1850
- Dramatische Tunnelbrandereignisse wie Montblanc (1999) und Gotthard (2001) führten zur Novellierung der Richtlinien
- Großteil bestehender Verkehrstunnel wurde nach veralteten Richtlinien gebaut
- Angriff der Straßentunnelsubstanz durch Umwelteinflüsse, bspw. Eintrag von Chloriden und Sulphaten



Tunnel Kuckucksly: Baujahr 1870, Trier  
(KOINOR, 2020)



Tunnel Montblanc nach Brandereignis in 1999, Frankreich  
(Associated Press, 1999)

# Problemstellung

## Tunnelsanierung

- Aufgrund fortschreitender Alterung muss ein Großteil der Tunnel (bald) saniert werden
- Tunnelsanierung sollte baulichen Richtlinien entsprechen
- Nationales Forschungsprojekt **KOINOR**
  - Entwicklung neuer Konzepte für die Instandsetzung und Nachrüstung
  - Entwicklung eines spritzbaren Geopolymerbetons
  - Besonderer Fokus: Brandszenarien



Tunnel Kuckuckslay  
(KOINOR, 2020)



Spritzapplikation von  
Geopolymerbeton (KOINOR, 2020)

# Inhalt

## Einsatz von geopolymerbasiertem Spritzbeton für die brandschutztechnische Instandhaltung von Tunneln

- Einführung
- Problemstellung
- **Projektvorstellung**
- Anforderungen an Instandsetzungssysteme
- Geopolymerbeton
- Untersuchungen
- Zusammenfassung & Ausblick



Probe des Geopolymerbetons vor und nach Temperaturexposition  
(KOINOR, 2020)

# KOINOR - Projektvorstellung

RUHR  
UNIVERSITÄT  
BOCHUM

RUB



BE SURE. BUILD SURE.



STUVA



## Projektziele

- Entwicklung eines Brandschutzcoating aus Geopolymerbeton
- Materialuntersuchungen bzgl. mechanischer Eigenschaften, Verhalten unter thermischer Belastung, Dauerhaftigkeit und Verbundverhalten
- Untersuchung der Verfahrenstechnik (Maschinenauswahl, Arbeitssicherheit, Rückprallanalysen etc.)
- Versuche zur Analyse der Wirksamkeit

# Inhalt

## Einsatz von geopolymerbasiertem Spritzbeton für die brandschutztechnische Instandhaltung von Tunneln

- Einführung
- Problemstellung
- Projektvorstellung
- **Anforderungen an Instandsetzungssysteme**
- Geopolymerbeton
- Untersuchungen
- Zusammenfassung & Ausblick

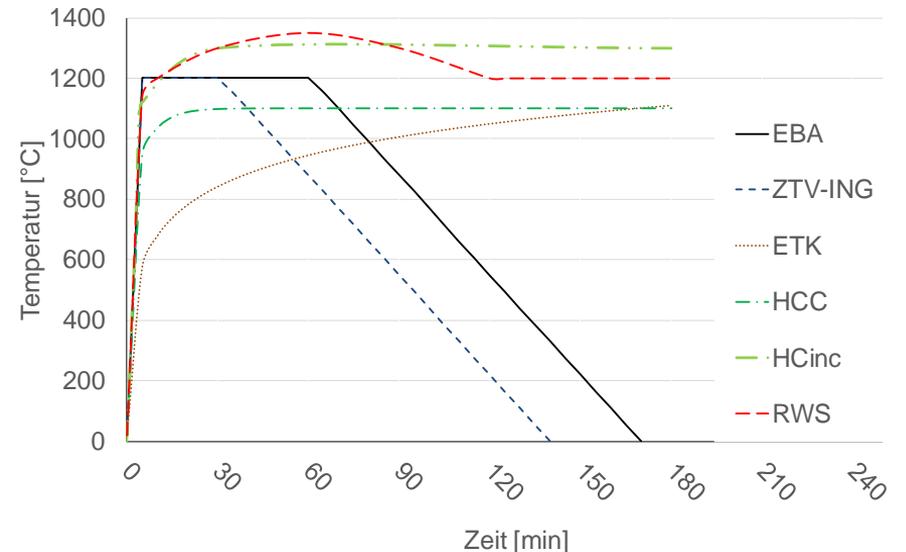


Probe des Geopolymerbetons vor und nach Temperaturexposition  
(KOINOR, 2020)

# Anforderungen an Instandsetzungssysteme

## Brandkurven

- International kommen unterschiedliche Brandkurven zum Einsatz
- Deutschland: Geschlossene Brandkurven nach ZTV-ING und EBA Richtlinie
  - Aufheizrate: 240 K/min
  - $T_{\max} = 1,200 \text{ °C}$
  - 55 min Vollbrandphase (EBA)
- Die EBA-Kurve wurde als nationales Worst-Case-Szenario und maßgebliche Vorgabe der deutschen Richtlinien für die Untersuchungen gewählt.



Temperatur-Zeit-Kurven im Vergleich nach (Peter, 2016)

# Anforderungen an Instandsetzungssysteme

## Abplatzungen

- Zementbasierte Betone neigen in nahezu allen Brandszenarien zu Abplatzungen
- Explosive Abplatzungen stellen die größte Gefahr für die Stabilität eines Tunnels im Falle eines Brandes dar
- Abplatzungen können durch den Einsatz von Polypropylen (PP) Fasern reduziert werden
- Der Einfluss von PP Fasern insbesondere auf die Verarbeitbarkeit von Betonen negative (Sitchwort Spritzbarkeit)



Betonoberfläche nach Brand, ohne PP-Fasern  
(Dehn et.al., 2010)



Betonoberfläche nach Brand, mit PP-Fasern  
(Dehn et.al., 2010)

# Anforderungen an Instandsetzungssysteme

## Bewehrungstemperatur

- Max. Temperaturen von Betonoberfläche o. Bewehrung
- Deutschland (ZTV-ING):
  - Mindestbetondeckung: 60 mm
  - Maximale Bewehrungstemperatur: 300 °C

## Schutzziele

- Ausfall der Bewehrung
- Partielles Versagen der Tunnelinnenschale
- Verlust der Gebrauchstauglichkeit
- Vollständiger Bauwerksverlust

| Land                              | GER                                   | AUS                      | CHE                                    | NED                      | USA                        | Int.                            |
|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|--|--------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Regelwerk                         |                                       |                          |  |                          |                            |                                 |
| Tunnellänge                       | ≥250m                                 | >200m                    |  | ≥80m                     | ≥90m                       | ≥100m                           |
| Brandkurve                        | ZTV-ING<br>EBA                        | UTC<br>HC <sub>inc</sub> | ISO<br>RWS<br>HC <sub>inc</sub><br>ZTV | RWS<br>HC <sub>inc</sub> | RWS                        | ISO<br>RWS<br>HC <sub>inc</sub> |
| Maximale Bewehrungstemperatur     | ≤ 300 °C                              | ≤ 250 °C                 |  | ≤ 250 °C                 | ≤ 250 °C                   |                                 |
| Maximale Beton-temperatur         |                                       | ≤ 350 °C                 | ≤ 450 °C                               | ≤ 380 °C                 | ≤ 380 °C                   | ≤ 380 °C                        |
| Materialien für tragende Bauteile | Klasse A (DIN 4102)<br>Nicht brennbar | Euroklasse A2            |  |                          | non-flammable (ASTM E 136) | class. A2 (2004/147/E G)        |

# Inhalt

## Einsatz von geopolymerbasiertem Spritzbeton für die brandschutztechnische Instandhaltung von Tunneln

- Einführung
- Problemstellung
- Projektvorstellung
- Anforderungen an Instandsetzungssysteme
- **Geopolymerbeton**
- Untersuchungen
- Zusammenfassung & Ausblick



Probe des Geopolymerbetons vor und nach Temperaturexposition  
(KOINOR, 2020)

# Geopolymerbeton

## Anwendung

- Wurde bereits in verschiedenen Bereichen der internationalen Bauindustrie erfolgreich eingesetzt
- Wurde bisher nur für die Herstellung von Ortbeton oder Betonfertigteilen verwendet.
- Bisher kaum Erfahrungen in der Anwendung als Spritzbeton
- KOINOR-Projekt führte erste Untersuchungen zur Spritzbarkeit durch



Anwendung von Geopolymerbeton am Airport Brisbane (MC-Bauchemie, 2020)

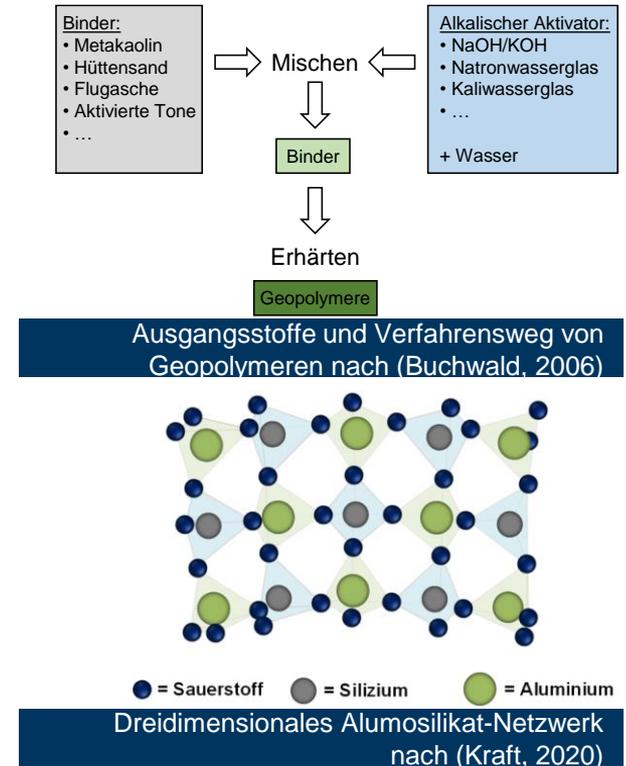


Experimenteller Spritzauftrag von Geopolymerbeton (KOINOR, 2020)

# Geopolymerbeton

## Zusammensetzung

- Alkalisches aktiviertes Bindemittel = anorganische Zweikomponentensysteme:  
Reaktive Feststoffkomponente + alkalische Aktivatorlösung
  - Wasser nur als „Transportmittel“ des Aktivators zur Feststoffkomponente
  - Keine physikalische oder chemische Einbindung des  $H_2O$  in die Matrix des Betons  
→ Geringe Permeabilität und Reduktion des Abplatzverhaltens
- Reduktion von  $CO_2$ -Emission durch Verwendung von „Sekundärrohstoffen“ (hier Hüttensande)



# Geopolymerbeton

## Brandbeständigkeit und Wärmetransport

- Sehr gute Eigenschaften unter Temperatureinwirkung wegen geringem Wasseranteil in der Matrix.
- Untersuchungen unter Temperaturexposition sind nicht weit verbreitet, und es gibt nur wenige belastbare Ergebnisse aus solchen Untersuchungen.
- Weder Betonabplatzungen noch andere Schadensbilder wurden bisher veröffentlicht
- KOINOR: Voruntersuchungen zu Schadensbildern



# Inhalt

## Einsatz von geopolymerbasiertem Spritzbeton für die brandschutztechnische Instandhaltung von Tunneln

- Einführung
- Problemstellung
- Projektvorstellung
- Anforderungen an Instandsetzungssysteme
- Geopolymerbeton
- **Untersuchungen**
- Zusammenfassung & Ausblick

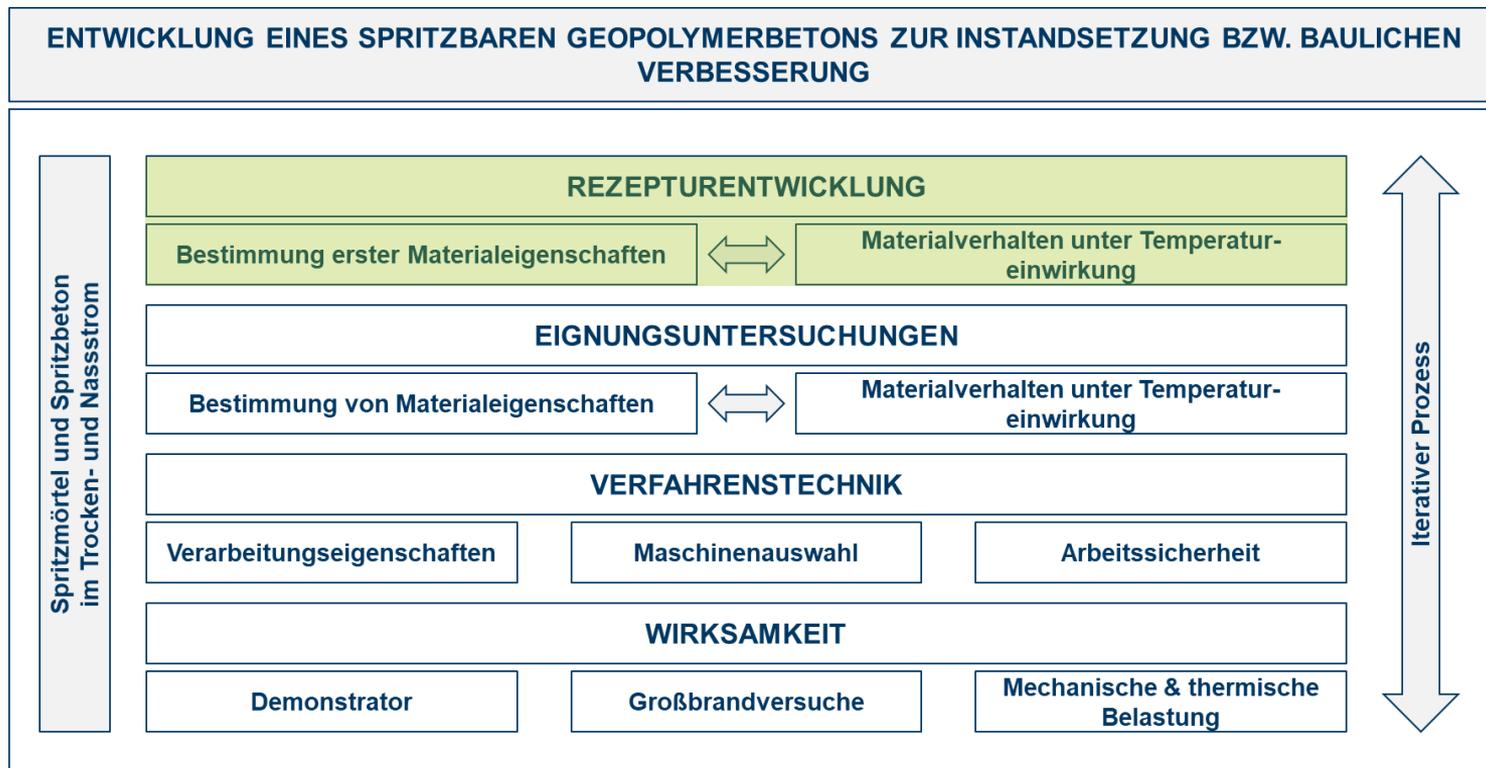


Probe des Geopolymerbetons vor und nach Temperaturexposition  
(KOINOR, 2020)

# Untersuchungen – Vorgehensweise



# Untersuchungen – Vorgehensweise



# Untersuchungen – Kleinskalig

## ENTWICKLUNG EINES SPRITZBAREN GEOPOLYMERBETONS ZUR INSTANDSETZUNG BZW. BAULICHEN VERBESSERUNG

Spritzmörtel und Spritzbeton  
im Trocken- und Nassstrom

### REZEPTURENTWICKLUNG

Entwicklung unterschiedlicher zementfreier Ausgangsrezepturen

Bestimmung erster Materialeigenschaften

Mechanische Eigenschaften

Verarbeitungseigenschaften

Dauerhaftigkeit

KLEINSKALIG

Materialverhalten unter Temperatur-  
einwirkung

Optische Beurteilungen

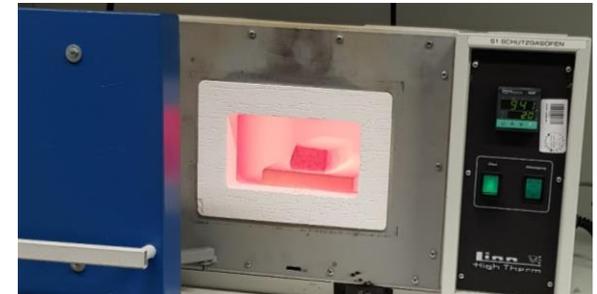
Identifizierung Eutektikum

Iterativer Prozess

# Untersuchungen – Kleinskalig

## Rezepturentwicklung

- 20 Proben aus 10 Varianten
- Verhalten unter Temperaturexposition
  - Untersuchung kleinformatiger Prismen (4,0 x 4,0 x 16,0 cm<sup>3</sup>) im Muffelofen, Anlehnung an EBA-Kurve
  - Vollbrandphase: 55 Minuten bei 1200°C
- Identifizierung des Eutektikums
  - zwischen 1100 °C und 1200 °C, Beginn Sinterungsprozess



Muffelofen für erste Untersuchungen unter Temperaturexposition (KOINOR, 2019)

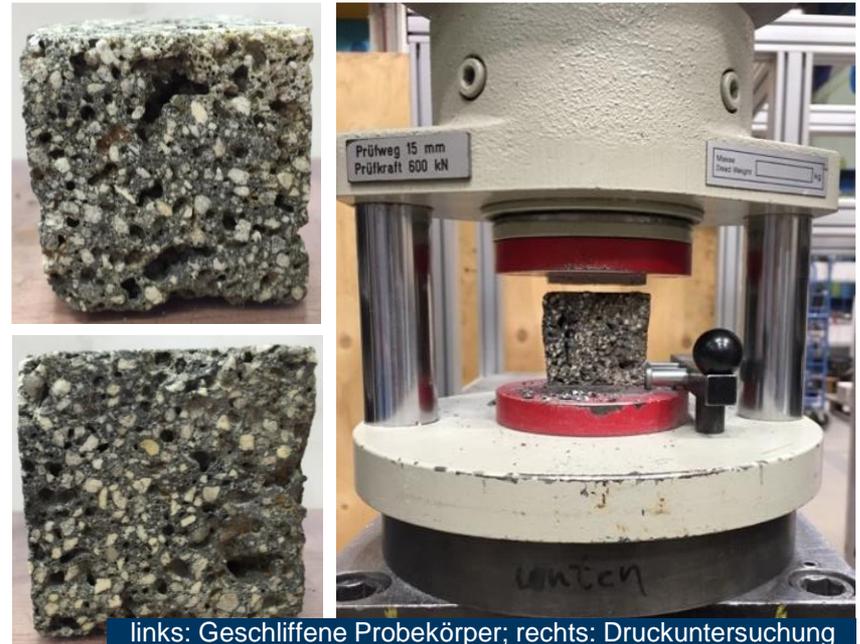


Detail: Sinterung der Probekörper (KOINOR, 2019)

# Untersuchungen – Kleinskalig

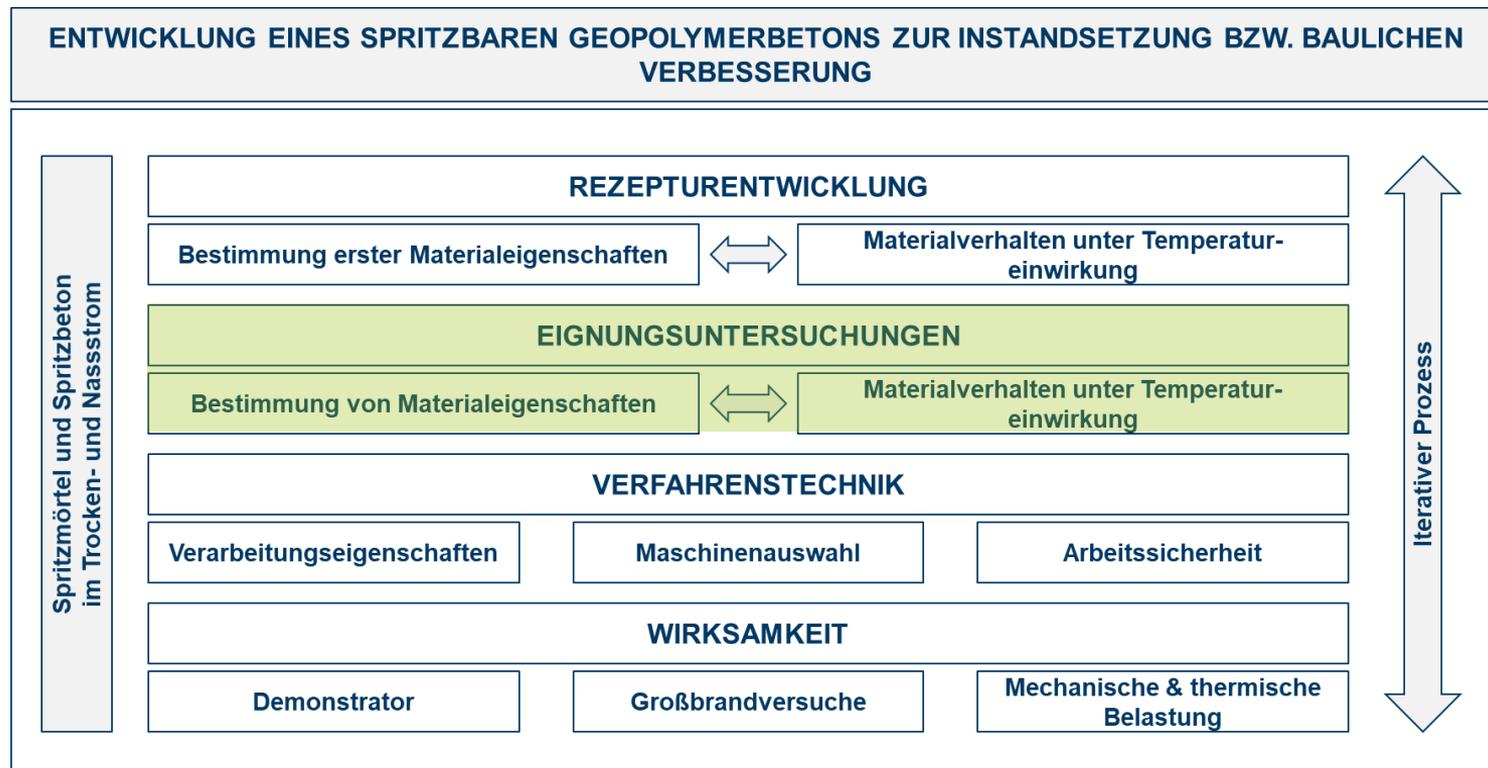
## Rezepturenentwicklung

- Untersuchung der Materialeigenschaften:
  - Vor Temperaturbeaufschlagung
    - Druckfestigkeiten
    - E-Moduli
    - Spaltzugfestigkeiten
  - Nach Temperaturbeaufschlagung
    - Druckfestigkeiten 25 – 50% der Ausgangsfestigkeiten

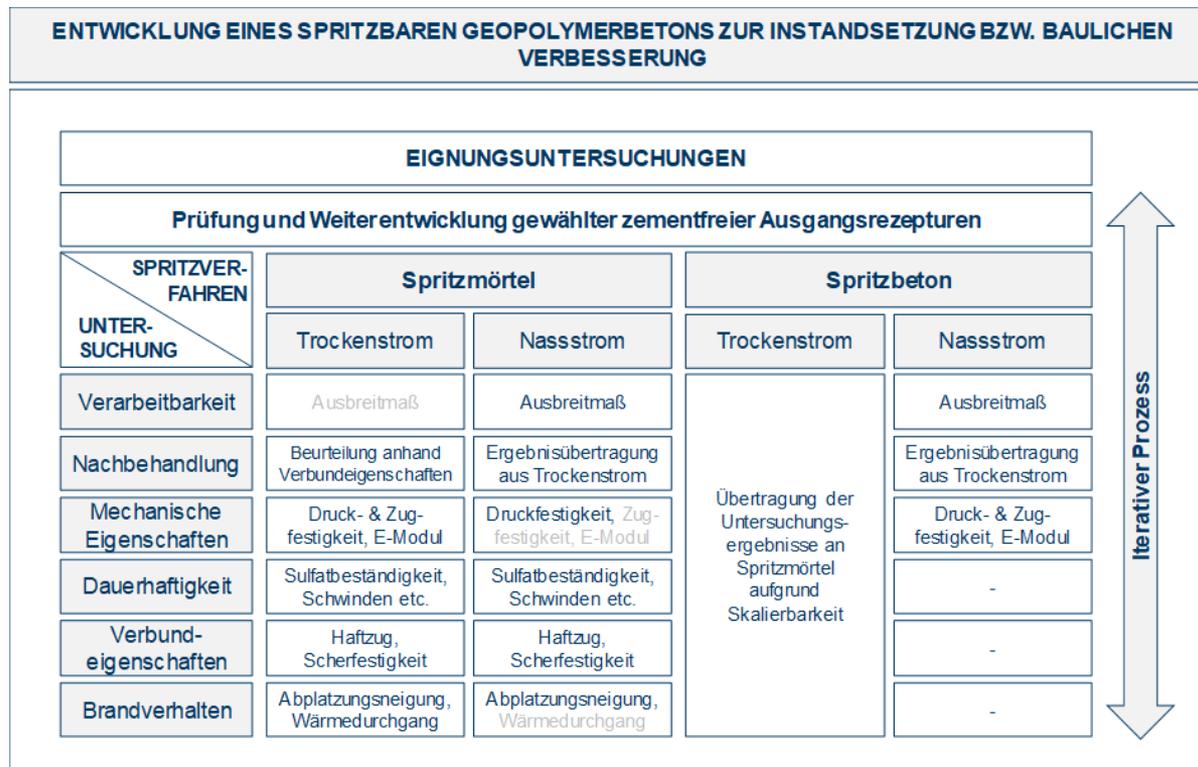


links: Geschliffene Probekörper; rechts: Druckuntersuchung (KOINOR, 2021)

# Untersuchungen – Vorgehensweise



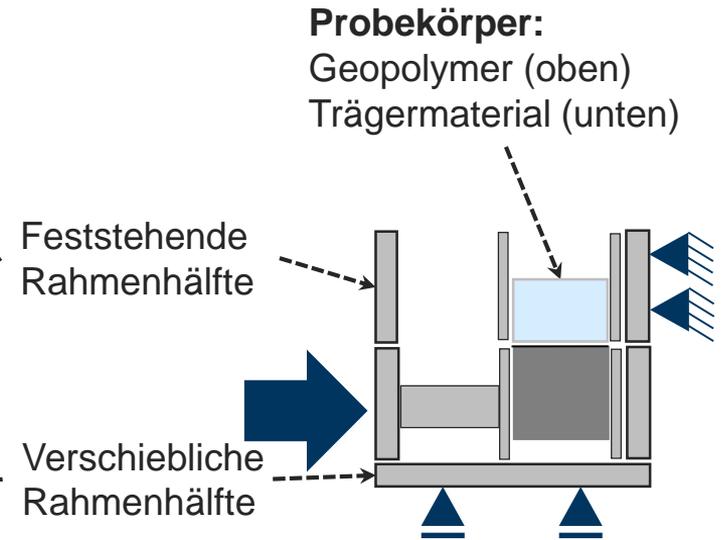
# Untersuchungen – Vorgehensweise



# Untersuchungen – Kleinskalig

## Eignungsuntersuchungen – Verbundeigenschaften

- Untersuchungen zur Verbundfestigkeit des spritzbaren Geopolymerbetons auf verschiedenen Untergründen im Rahmenscherversuchsstand



links: Rahmenscherversuchsstand; rechts: Schematischer Versuchsablauf (KOINOR, 2021)

# Untersuchungen – Kleinskalig

## Eignungsuntersuchungen – Verbundeigenschaften

- Untersuchungen zur Verbundfestigkeit auf verschiedenen Untergründen



Mauerwerk Nassstrom – Ansichten der Rissfuge  
links: unten, rechts: oben (KOINOR, 2021)



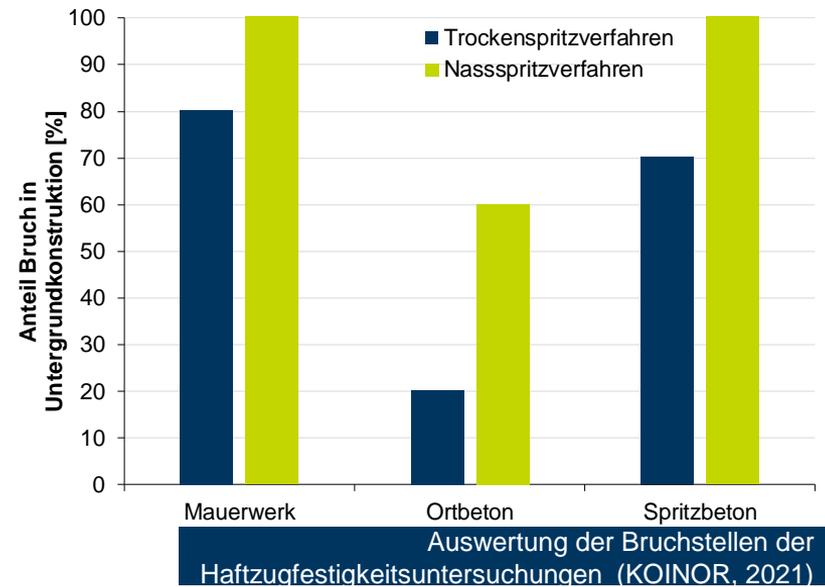
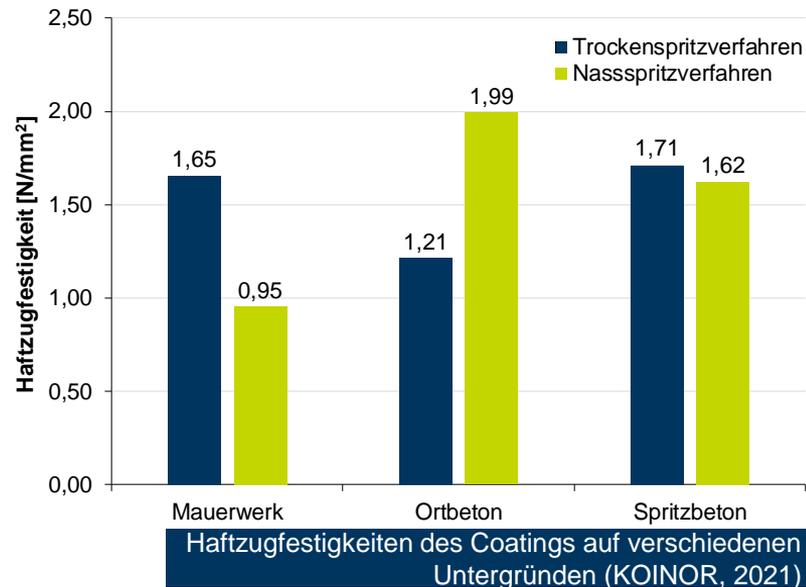
Ortbeton Nassstrom – Ansichten der Rissfuge  
links: unten, rechts: oben (KOINOR, 2021)

- Versagen stets jeweils im Trägermaterial unterhalb der Verbundfuge
- Mittlere Scherfestigkeiten zwischen  $2,1 \text{ N/mm}^2$  und  $3,3 \text{ N/mm}^2$
- Verbundfestigkeit damit im Bereich üblicher Steinzugfestigkeiten

# Untersuchungen – Kleinskalig

## Eignungsuntersuchungen – Verbundeigenschaften

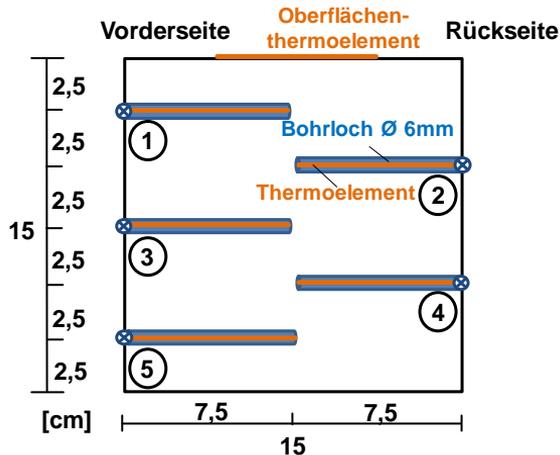
- Untersuchungen zur Verbundfestigkeit auf verschiedenen Untergründen



# Untersuchungen – Kleinskalig

## Eignungsuntersuchungen – Wärmedurchgang

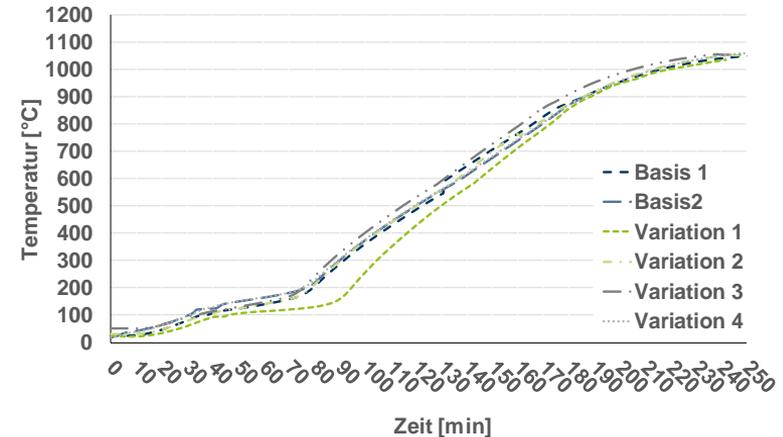
- Anordnung von Thermoelementen im Inneren von kubischen Probekörpern
- Ermittlung der Temperaturverteilung innerhalb der Probekörper bei Temperaturbeaufschlagung



Anordnung der Thermoelemente  
(KOINOR, 2019)



PK nach thermischer Belastung  
(KOINOR, 2019)



Temperatur-Zeitkurven von sechs verschiedenen  
Mischungen (KOINOR, 2019)

# Untersuchungen – Kleinskalig

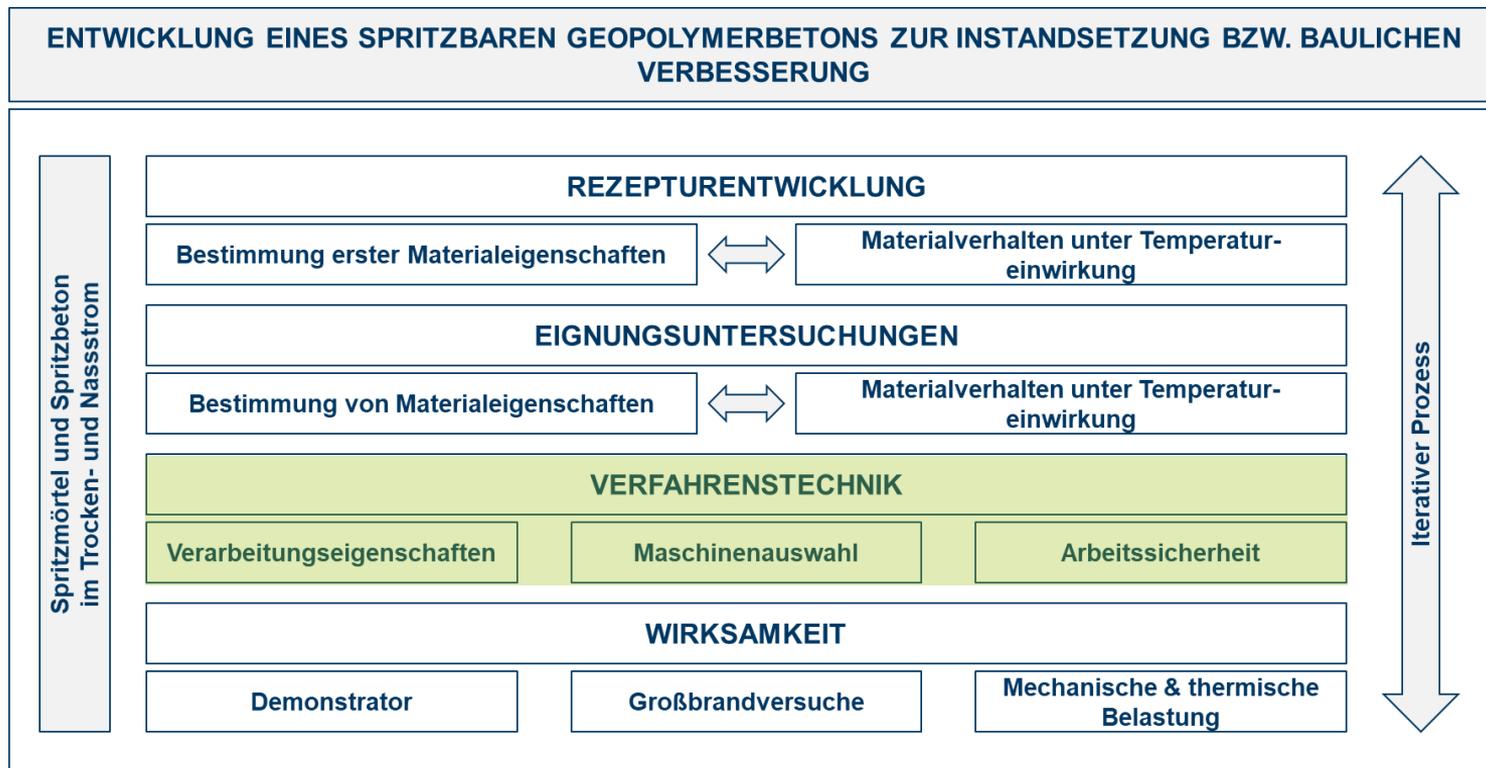
## Eignungsuntersuchungen – Temperaturexposition & Wärmedurchgang

- Spritzbarer Geopolymerbeton widersteht der Temperaturbelastung ohne offensichtliche Verschlechterung
- Verwendung von Mikro-Hohlkugeln hat einen deutlichen Einfluss auf die Wärmeübertragung
- Herkömmliche Luftporenbildner haben nicht gewünschten Effekt auf Wärmeübergang



Exemplarisch: Probekörper der Branduntersuchungen  
(KOINOR, 2021)

# Untersuchungen – Vorgehensweise



# Untersuchungen – Vorgehensweise

## ENTWICKLUNG EINES SPRITZBAREN GEOPOLYMERBETONS ZUR INSTANDSETZUNG BZW. BAULICHEN VERBESSERUNG

| VERFAHRENSTECHNIK               |  |  |   |  |
|---------------------------------|--|--|---|--|
| SPRITZVERFAHREN<br>UNTERSUCHUNG | Spritzmörtel                             |  | Spritzbeton   |  |
|                                 | Trockenstrom                             | Nassstrom                                | Trockenstrom  | Nassstrom                                |
| Maschinen-<br>auswahl           | Rotormaschine                            | Schneckenpumpe                           | Übertragung der<br>Untersuchungs-<br>ergebnisse an<br>Spritzmörtel aufgrund<br>Skalierbarkeit | Kolbenpumpe                              |
| Verarbeitungseigenschaften      | Förderbarkeit,<br>Glätteigenschaften     | Förderbarkeit,<br>Glätteigenschaften     |   | Förderbarkeit,<br>Glätteigenschaften     |
| Arbeits-<br>sicherheit          | Staubentwicklung                         | Staubentwicklung                         |   | Staubentwicklung                         |
| Wirtschaft-<br>lichkeit         | Investitionskosten,<br>Rückprallanalysen | Investitionskosten,<br>Rückprallanalysen |   | Investitionskosten,<br>Rückprallanalysen |

# Untersuchungen – Kleinskalig

## Verfahrenstechnik

- Auswahl der Maschinenteknik und der Verarbeitungseigenschaften in Laborexperimenten
  - Pumpbarkeit im Nassstrom
  - Förderbarkeit im Trockenstrom
  - Rückprall
- Validierung in Demonstratorversuchen
  - Überprüfung der Baustellentauglichkeit
  - Wirtschaftlichkeitsanalysen
  - Untersuchungen der Arbeitssicherheit

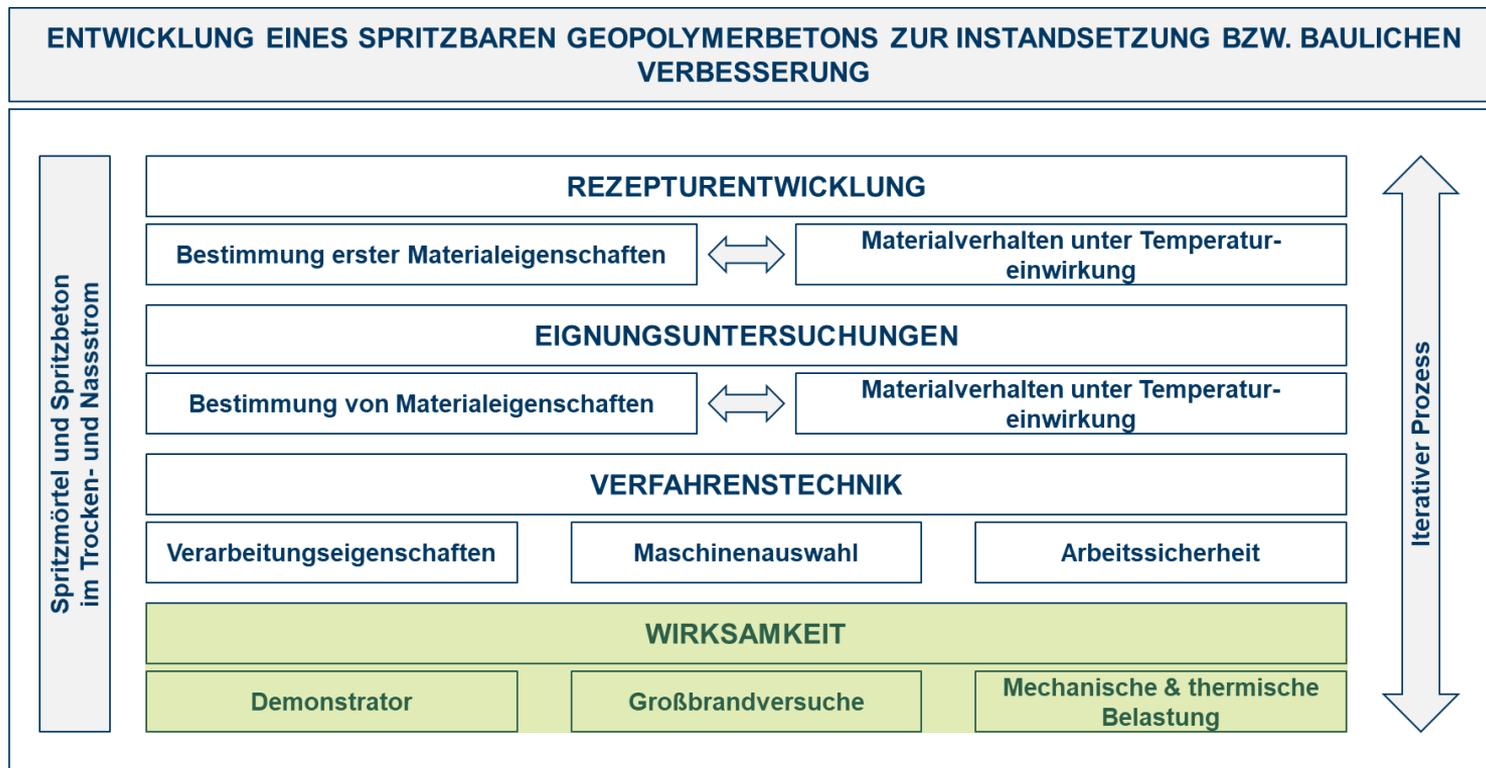


Verwendete Spritzbetonpumpen (KOINOR, 2021)



Demonstrator Tunnel Kuckuckslay – Fotos des Spritzbetonauftrags (KOINOR, 2021)

# Untersuchungen – Vorgehensweise



# Untersuchungen – Vorgehensweise

**ENTWICKLUNG EINES SPRITZBAREN GEOPOLYMERBETONS ZUR INSTANDSETZUNG BZW. BAULICHEN VERBESSERUNG**

**UNTERSUCHUNGEN ZUR WIRKSAMKEIT AN GROßFORMATIGEN PROBEKÖRPERN**

**Demonstratorversuche am  
Tunnel Kuckuckslay**

**Grobrandversuche nach  
EBA-Kurve**

**Kombinierte mechanische  
& thermische Belastung**

# Inhalt

## Einsatz von geopolymerbasiertem Spritzbeton für die brandschutztechnische Instandhaltung von Tunneln

- Einführung
- Problemstellung
- Projektvorstellung
- Anforderungen an Instandsetzungssysteme
- Geopolymerbeton
- Untersuchungen
- **Zusammenfassung & Ausblick**



Probe des Geopolymerbetons vor und nach Temperaturexposition  
(KOINOR, 2020)

# Zusammenfassung & Ausblick

## Zusammenfassung

- Spritzbarer Geopolymerbeton zeigt gute Ergebnisse hinsichtlich
  - Verarbeitbarkeit
  - Nachbehandlung
  - mechanischer Eigenschaften
  - Dauerhaftigkeit
  - Verbundeigenschaften
  - Brandverhalten
- Einsetzbar im Trocken- und Nassspritzverfahren
- Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emission durch Verwendung von Sekundärrohstoffen

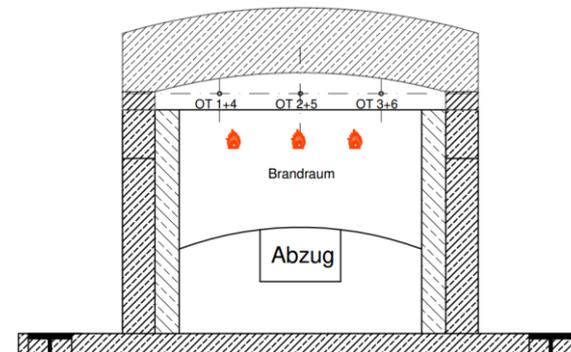


Modularer Versuchsofen an der RUB  
(KOINOR, 2020)

# Zusammenfassung & Ausblick

## Ausblick

- Aufgrund von Einschränkungen des Aufbaus entsprachen die Testbedingungen noch nicht den EBA-Richtlinien
  - Schnelle Erwärmung
  - Maximale Temperatur
  - Einseitige Belastung
- Großflächige Brandversuche geplant
  - Drei großformatige Probekörper mit eingebauten Thermoelementen
  - Wärmeübertragungsparameter sollen für die numerische Simulation ermittelt werden



Konzept für Brandversuche unter den Bedingungen der EBA-Kurve (MFPA Leipzig, 2020)



Hochdruckwassergestahlte Unterkonstruktionen für Brandversuche (KOINOR, 2021)

# VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT.



## KOINOR Partner:

- Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Ruhr-Universität Bochum
- PORR GmbH & Co. KGaA
- MC-BAUCHEMIE MÜLLER GmbH & Co. KG
- STUVA e.V.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat im Rahmen des KOINOR-Forschungsprojekts (Förderkennzeichen 13N14566 bis 13N14569, [www.sifo.de](http://www.sifo.de)) finanzielle Unterstützung gewährt, für die wir uns herzlich bedanken.