

"Zirkuläres Bauen im Bestand und im Neubau: Praxisnahe Lösungen,,  
Landeshauptstadt München / Referat für Klima und Umweltschutz

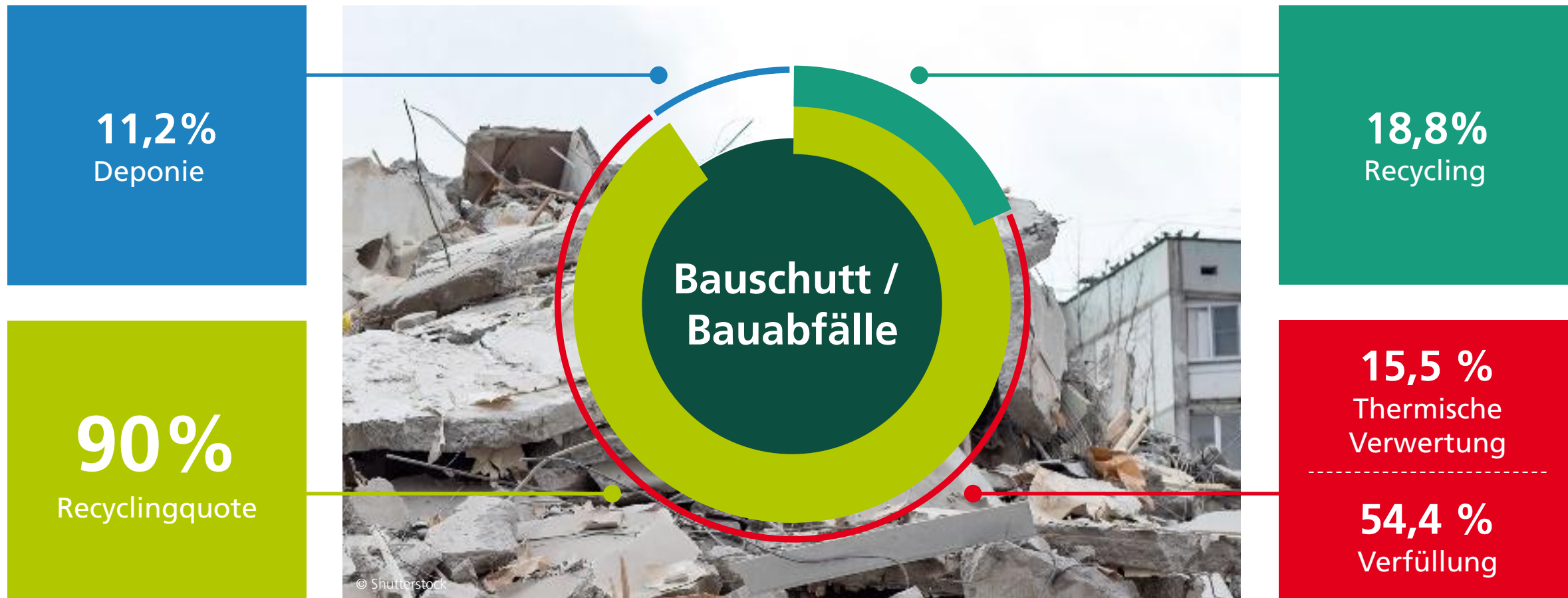
# » Bauschutt neu gedacht: Hochwertige Rohstoffe durch moderne Recyclingverfahren «

Dr. Volker Thome  
Abt.: Mineralische Werkstoffe  
und Baustoffrecycling

München, 07.05.2026



# »Bauschutt-Recycling-Musterschüler« Deutschland?





# Ausgangslage

## Wirtschaftliche Probleme

- Ressourcenmangel
- Nur 12,7% sekundäre Rohstoffe
- Verbrauch an Bausand ca. 50 Mrd. t / a

## Gesellschaftliche Probleme

- Kein echtes Recycling im Bauwesen
- Hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen der Bauwirtschaft
- Abhängigkeit von Rohstoff-Importen

9 INDUSTRIE,  
INNOVATION UND  
INFRASTRUKTUR



12 NACHHALTIGE/R  
KONSUM UND  
PRODUKTION



13 MASSNAHMEN ZUM  
KLIMASCHUTZ



Quelle: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/>

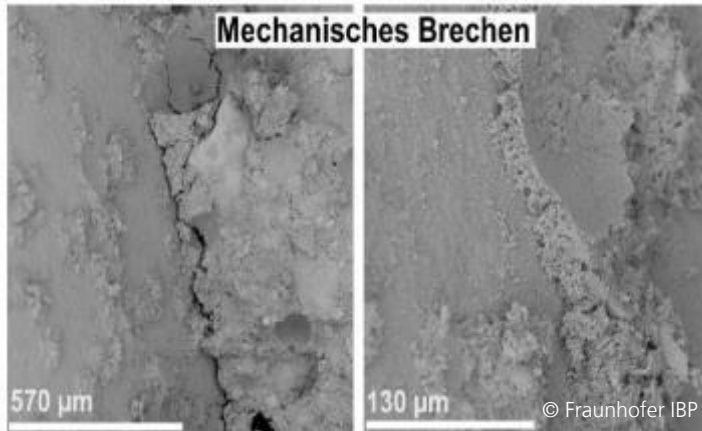


© Shutterstock

# Aktuelle Situation, Herausforderungen und Motivation

## Probleme bei der Nutzung mineralischer Sekundär-Rohstoffe

### QUALITÄT



»Die Qualität des RC-Materials entspricht nicht dem Primärrohstoff.«

**ELEKTRODYNAMISCHE  
FRAGMENTIERUNG**

### HETEROGENITÄT



»Die heterogene Zusammensetzung verhindert eine hochwertige Wiederverwendung«

**Bauschutt-Sortierung**

### SCHADSTOFFE



»Schadstoffe verhindern den Einsatz in vielen Bereichen«

**ENSUBA, INNOTEER**

# Herausforderungen Betonrecycling

## Probleme bei der Nutzung mineralischer Sekundär-Rohstoffe



»Mechanische Aufbereitung macht aus einem Großen viele Kleine!«

Verwertungsproblem für Frischbeton:

- Verringerung mechanischer Festigkeiten
- Wasseranspruch erhöht
- Verarbeitbarkeit erschwert

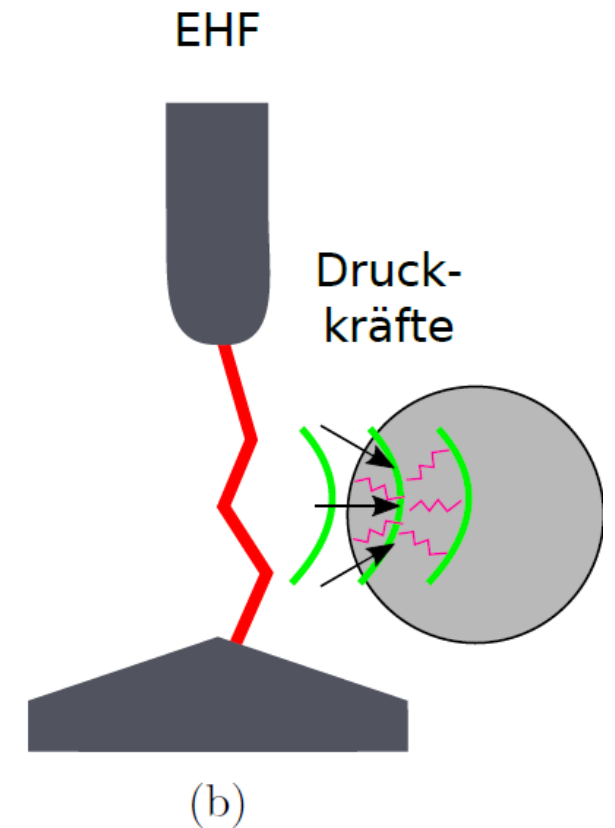
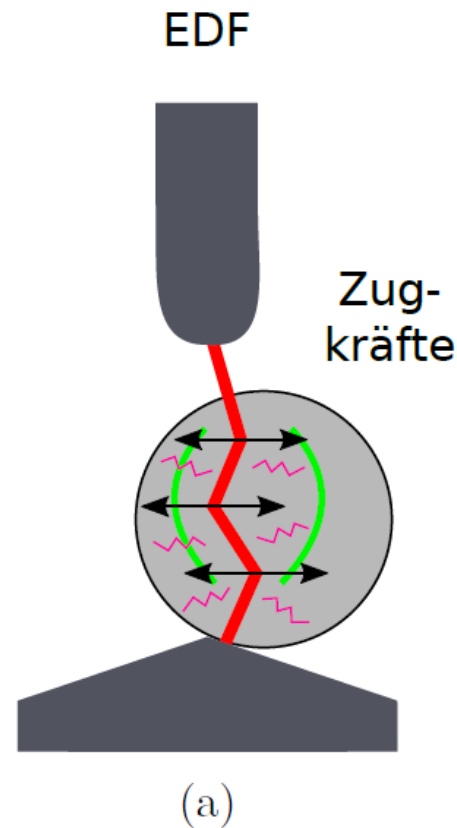
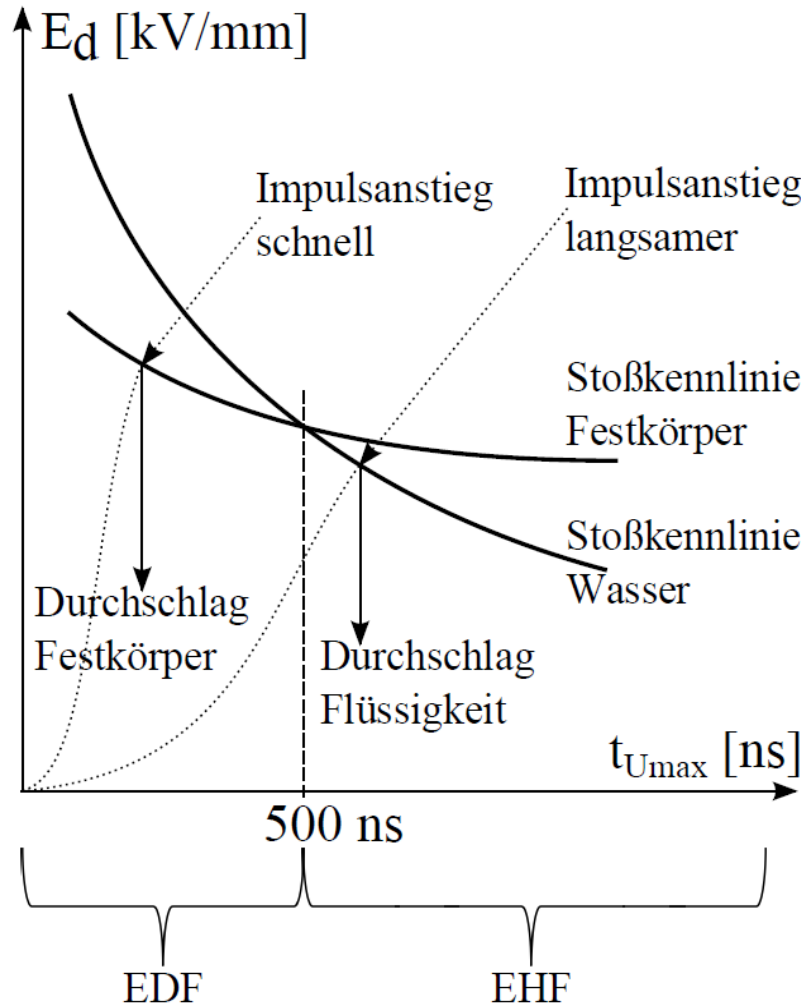
Für ein echtes Recycling müssen die im Verbund vorliegenden Bestandteile selektiv freigelegt werden



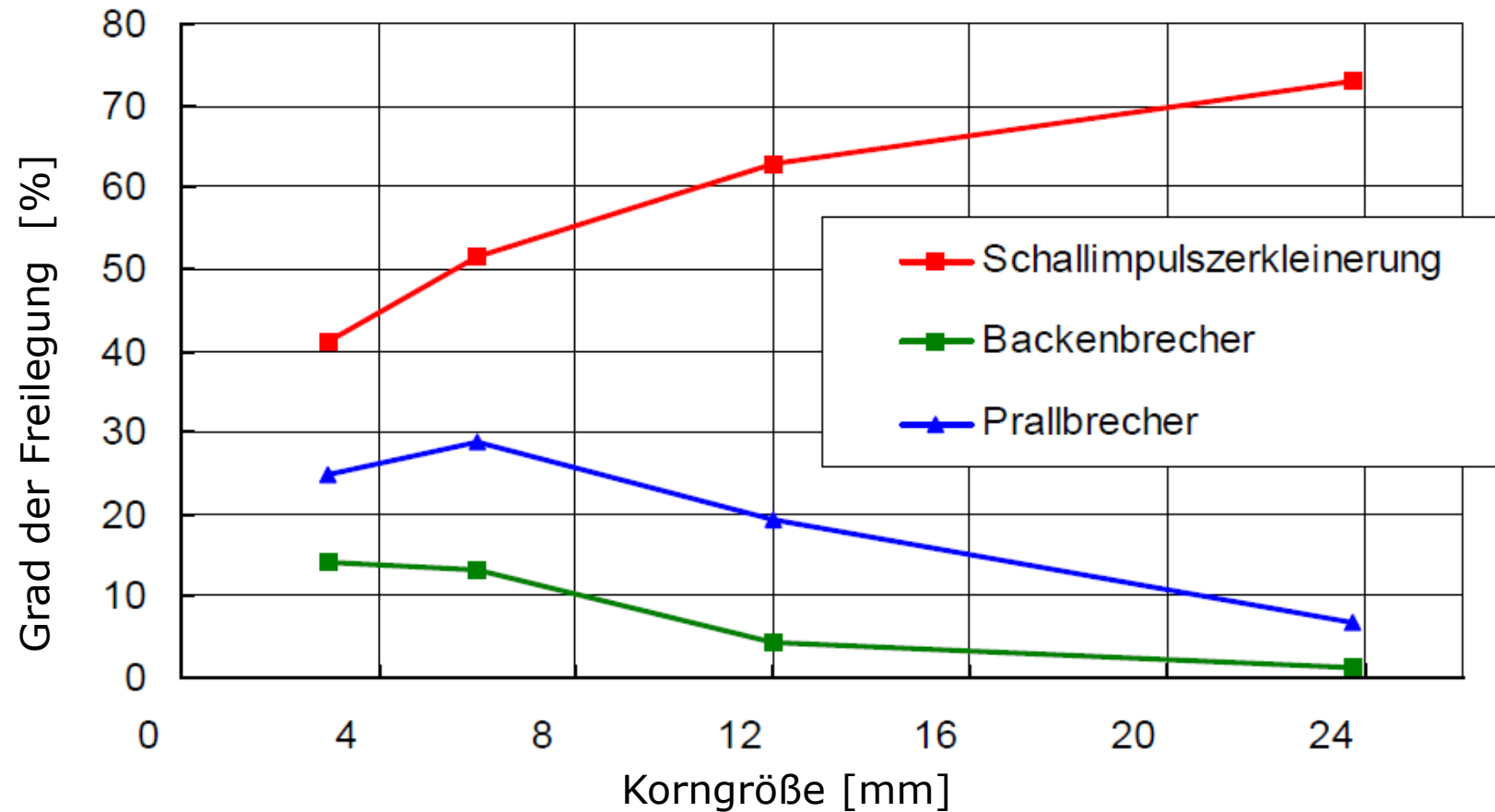
**» Trennen anstatt Zerkleinern «**

# Physikalische Prinzip der Hochleistungsimpulszerkleinerung

## Unterschied zwischen »elektrodynamisch« und »elektrohydraulisch«



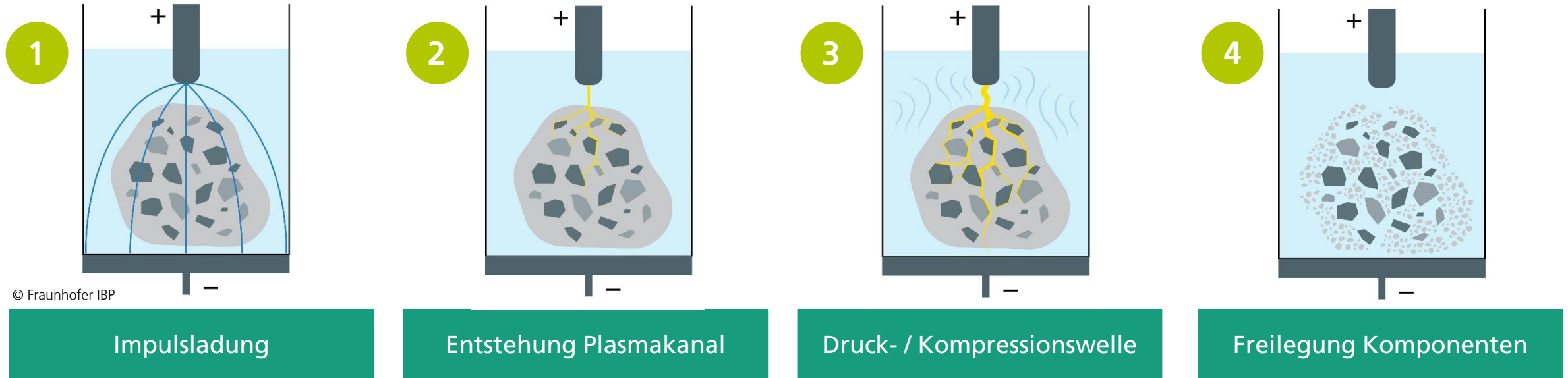
# Vergleich unterschiedlicher Aufbereitungsmethoden mechanische vs. Schallimpuls – Zerkleinerung (EHF)



Aus: A. Müller (Uni Weimar): „Aufbereiten und Verwerten von Bauabfällen – Angebote aus der Forschung für die Praxis“



# Prinzip der elektrodynamischen Fragmentierung (EDF)



## Schematische Darstellung einer elektrischen Entladung zwischen zwei Elektroden

- Eine Impulsentladung durchläuft den Festkörper entlang von Korngrenzen.
- Beim Durchschlag entsteht ein Plasmakanal, der sich schlagartig ausdehnt.
- Die Druckwelle wird von der Gefäßwand reflektiert und generiert zusätzlich eine Kompressionswelle.

Der elektrische Durchschlag verläuft bevorzugt an Phasengrenzen, der entstehende Plasmakanal mit  $T \sim 10^4$  K erzeugt eine Druckwelle mit ca. 10 GPa.

Die Druckwelle wird von der Gefäßwand reflektiert und erzeugt eine Kompressionswelle, welche die Freilegung der Komponenten verstärkt.



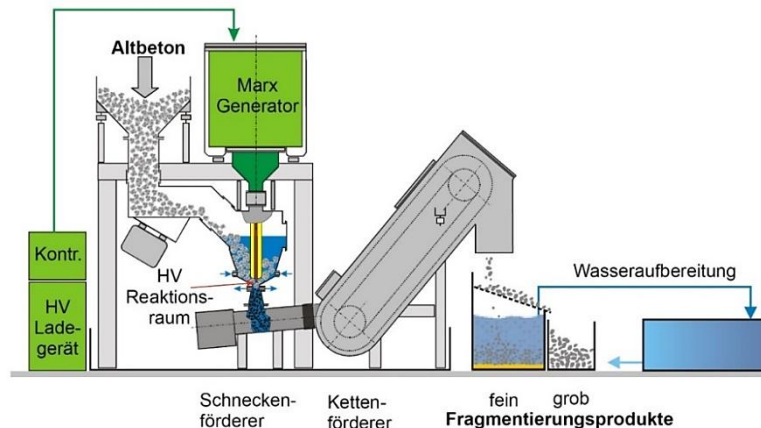
# Historie der elektrodynamischen Fragmentierung

hoher Energieverbrauch  
( $> 20 \text{ kWh/t Beton}$ )

geringer Durchsatz  
(max.  $1 \text{ t/h Beton}$ )



© Karlsruher Institut für Technologie KIT



© Fraunhofer IBP

Das Verfahren wurde in den 1950er Jahren an der Universität Tomsk entwickelt

1950

Erste Labor-Fragmentierungsanlage am KIT

1985

Masterarbeit von V. Thome zu EDF

1999

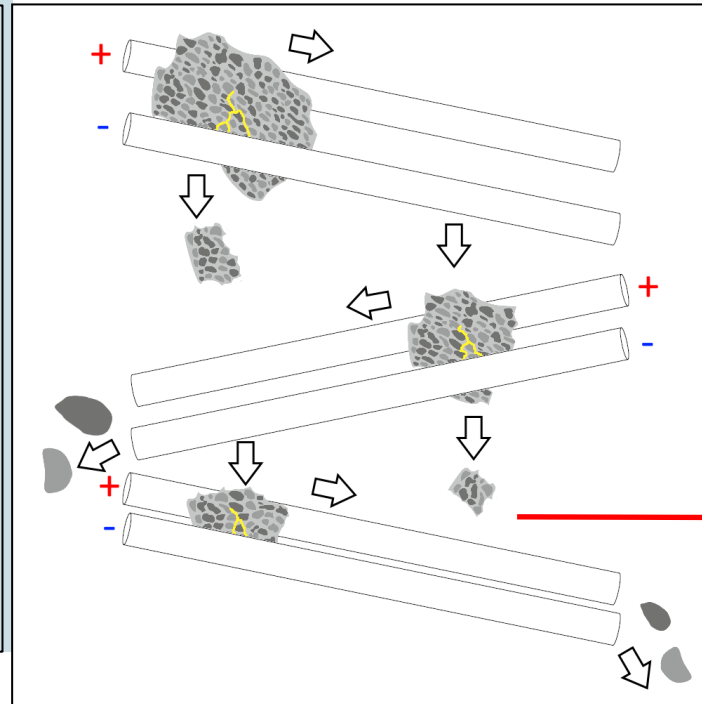
2000

Laboranlage für diskontinuierlichen Betrieb (IBP)

2011

# Kooperation IBP/Diehl (seit 2018) für Entwicklung von EDF-Großanlagen«

- Wiederholung von Fragmentierungs-Versuchen auf Diehl Generatoren
- Identische Ergebnisse, aber nur **1 Zehntel Energieverbrauch** im Vergleich zu KIT-Generatoren!
- Entwicklung und Patentierung eines »Elektrodenrutschensystems« zur Erhöhung des Durchsatzes

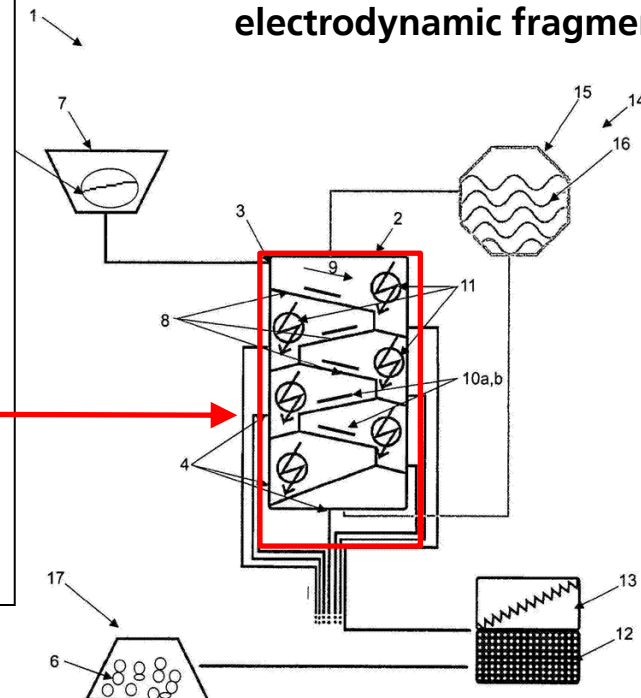


aus Masterarbeit (IBP) S. Lamoth (2020)

Patent IBP/Diehl für **EDF-Großanlagen** (2018)

DE 10 2018 003 512 A1 2019.10.31:

**Titel: »System and method for an electrodynamic fragmentation«**



Quelle: Stark et al. 2019

Nr.	Bedeutung
1	Anlage zur elektro-dynamischen Fragmentierung
2	Gehäuse
3	Einlass
4	Auslässe
5	Aufgabegut
6	Fragmentiertes Material
7	Materiallager
8	Transportwege
9	Transportrichtung
10	Elektrodenpaare
11	Hochspannungsquellen
12	Siebung
13	Rüttelband
14	Fördervorrichtung
15	Medientank
16	Medium
17	Auffangbehälter



## Produkte aus Altbeton nach einer EDF-Behandlung



- Elektrodynamische Fragmentierung von Altbeton auf IBP-Laboranlage
- Pulslänge: **120 nsec**
- Durchsatz: ca. **1 t / h**
- Energieverbrauch: **2,3 kWh / t** bzw. **75 J / Puls**
  
- Produkte wurden nach Fragmentierung getrocknet und gesiebt
- Der Filterkuchen besteht größtenteils aus **sekundärem Kalk** und Silika-Gelen



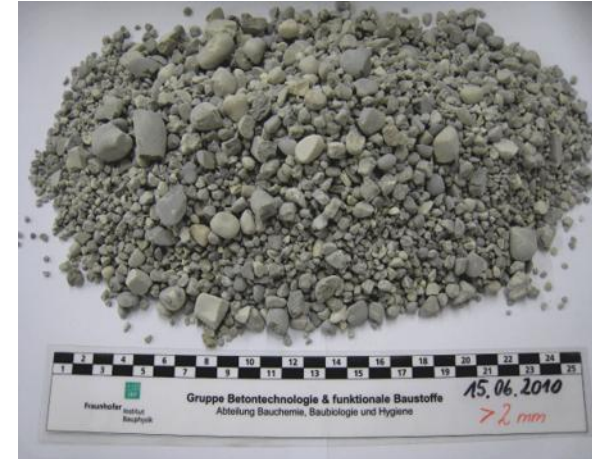
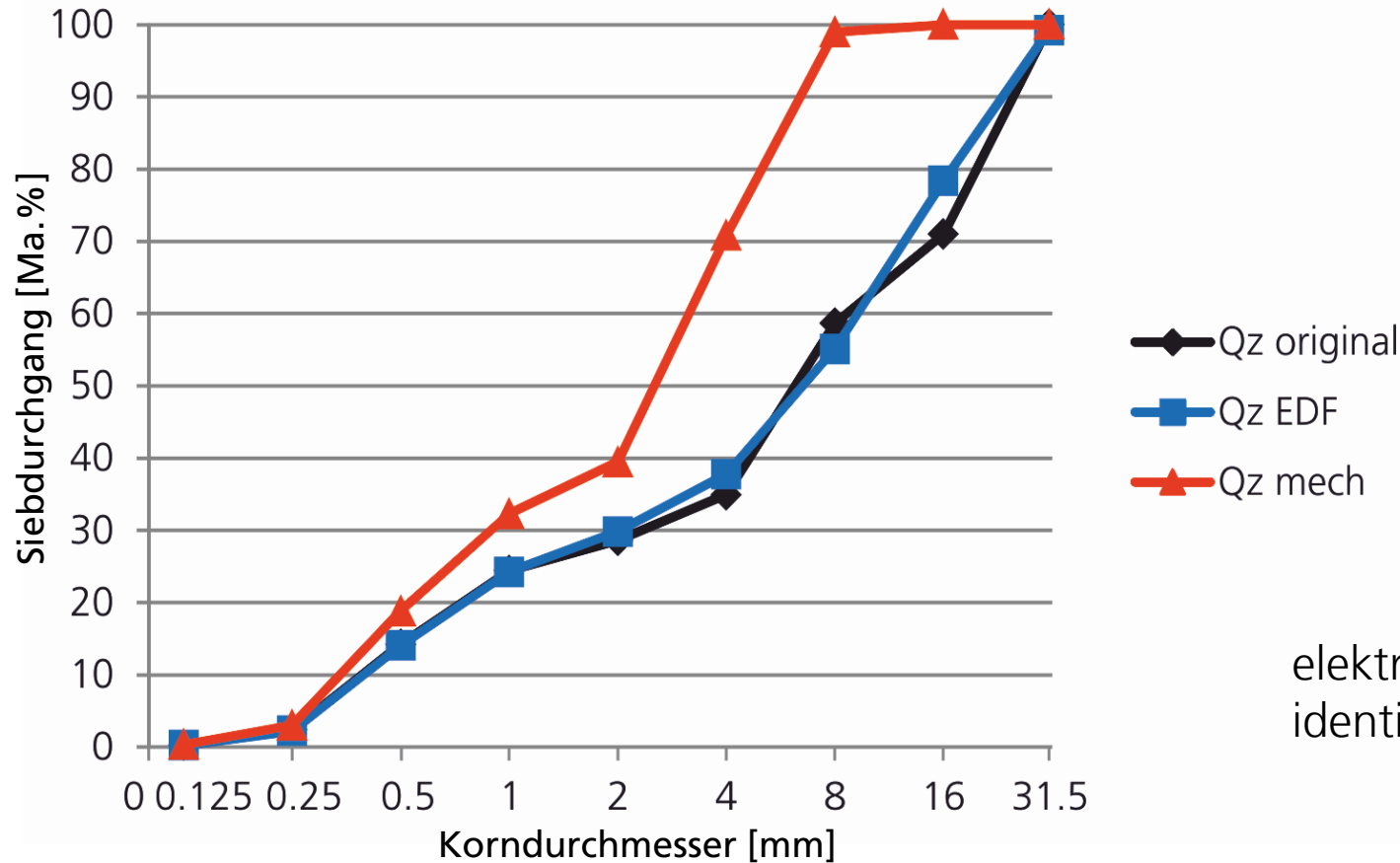
## Fragmentierung von Stahlfaser-Beton



Durch eine elektrodynamische Fragmentierung können auch Stahlfasern aus Altbeton freigelegt werden



# Recycling von Altbeton: Gesteinskörnung

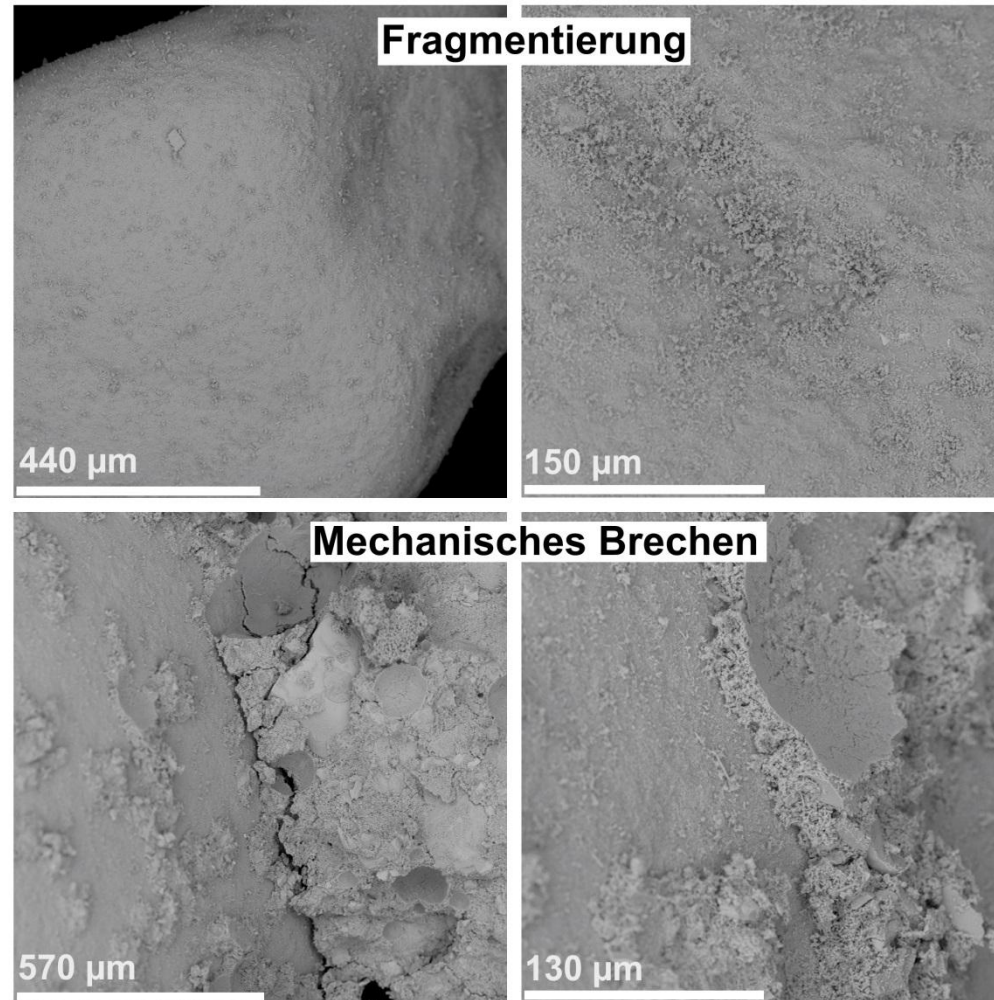


elektrodynamische Aufbereitung führt zu identischer Sieblinie wie in der originalen Probe!

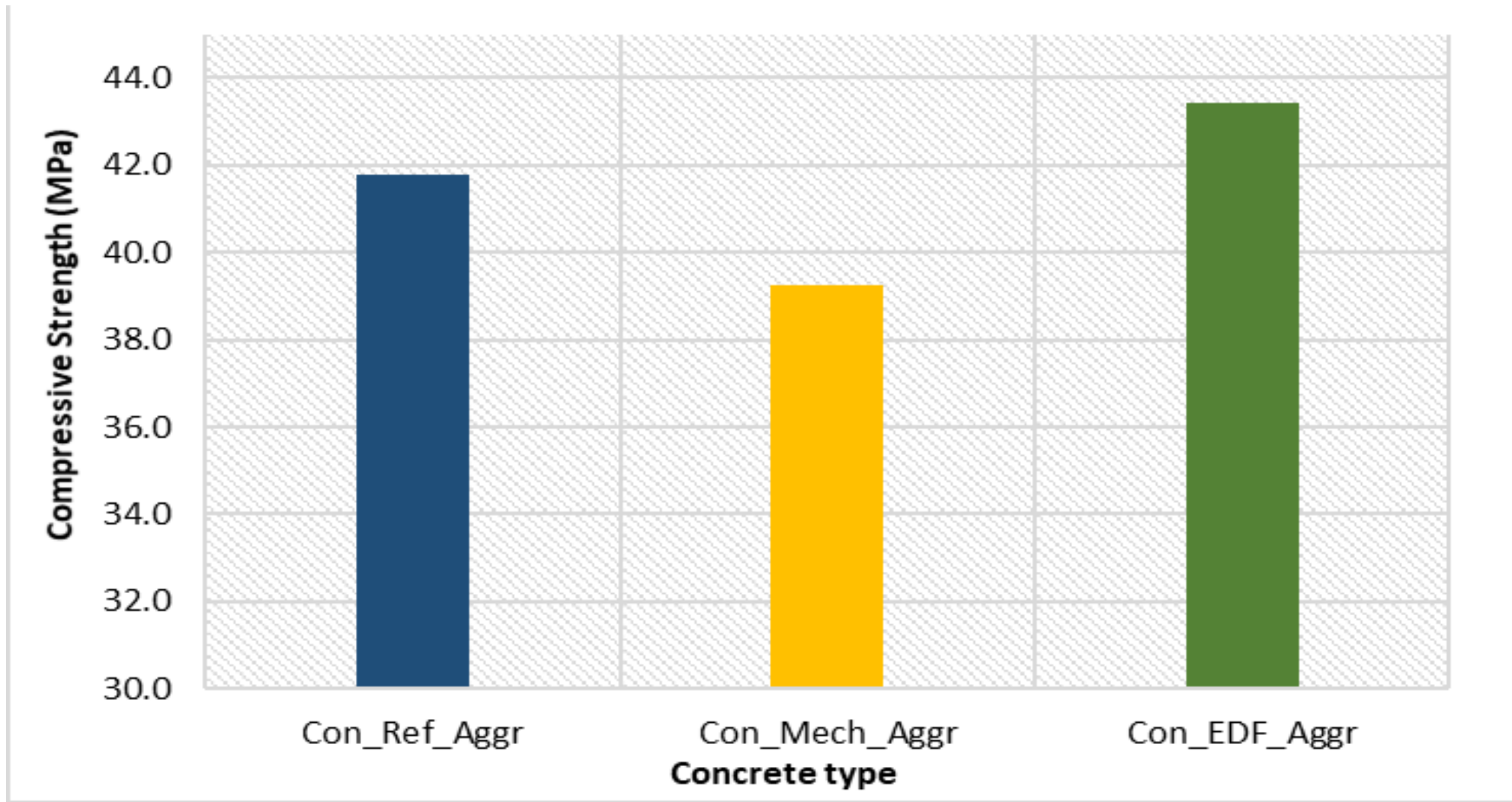


## Recycling von Altbeton: Gesteinskörnung

- Nach Fragmentierung nur Anhaftungen von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  auf den Oberflächen des Zuschlages
- Nach dem Brechen Anhaftungen von Zementstein auf den Oberflächen des Zuschlages

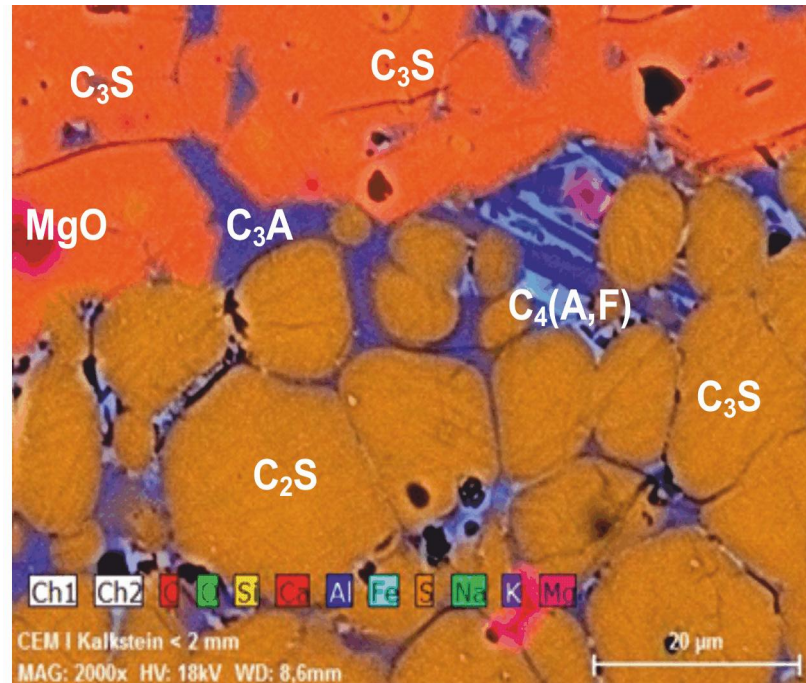
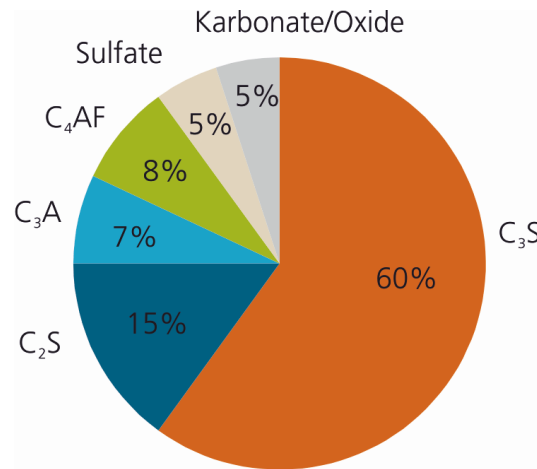


# Vergleich der Druckfestigkeiten in RC-Betonen



# Recycling von Altbeton: Feinfraktion < 2 mm

## Rohstoffersatz für die Herstellung von »RC-Zement«



**Herstellung von Zement aus Altbeton ist möglich!**

Aus BMBF-Projekt: „ELDYNTON“ mit den Partnern Schwenk Zement Co. KG und Leiblein GmbH



# Verwertungsplan EDF-Anlagen am Beispiel für Transportbetonwerk

## Schaffung eines Beton- und CO<sub>2</sub>-Kreislaufes !

- Schonung von primären Ressourcen
- CO<sub>2</sub>-Reduzierung in der Zementproduktion
- *Echtes* Recycling
- Schonung von Deponieflächen
- Keine Deponierungsgebühren
- Kürzere Transportwege
- ....



# Multi-Branchen Ansatz »elektrodynamische Fragmentierung«



## Feuerfestbeton (Feuerfestkeramik)

IBP-Patent: Europäische Patentanmeldung: 18778428.5 (2017)

»Verfahren zum Recyclen von Keramiken, danach erhältliche Regenerate und Verwendung der Regenerate zur Herstellung von Keramiken«



## Mauerwerk (Ziegel + Gips)



© Fraunhofer IBP

## Müllverbrennungs-Aschen



© Fraunhofer IBP



## Altbeton

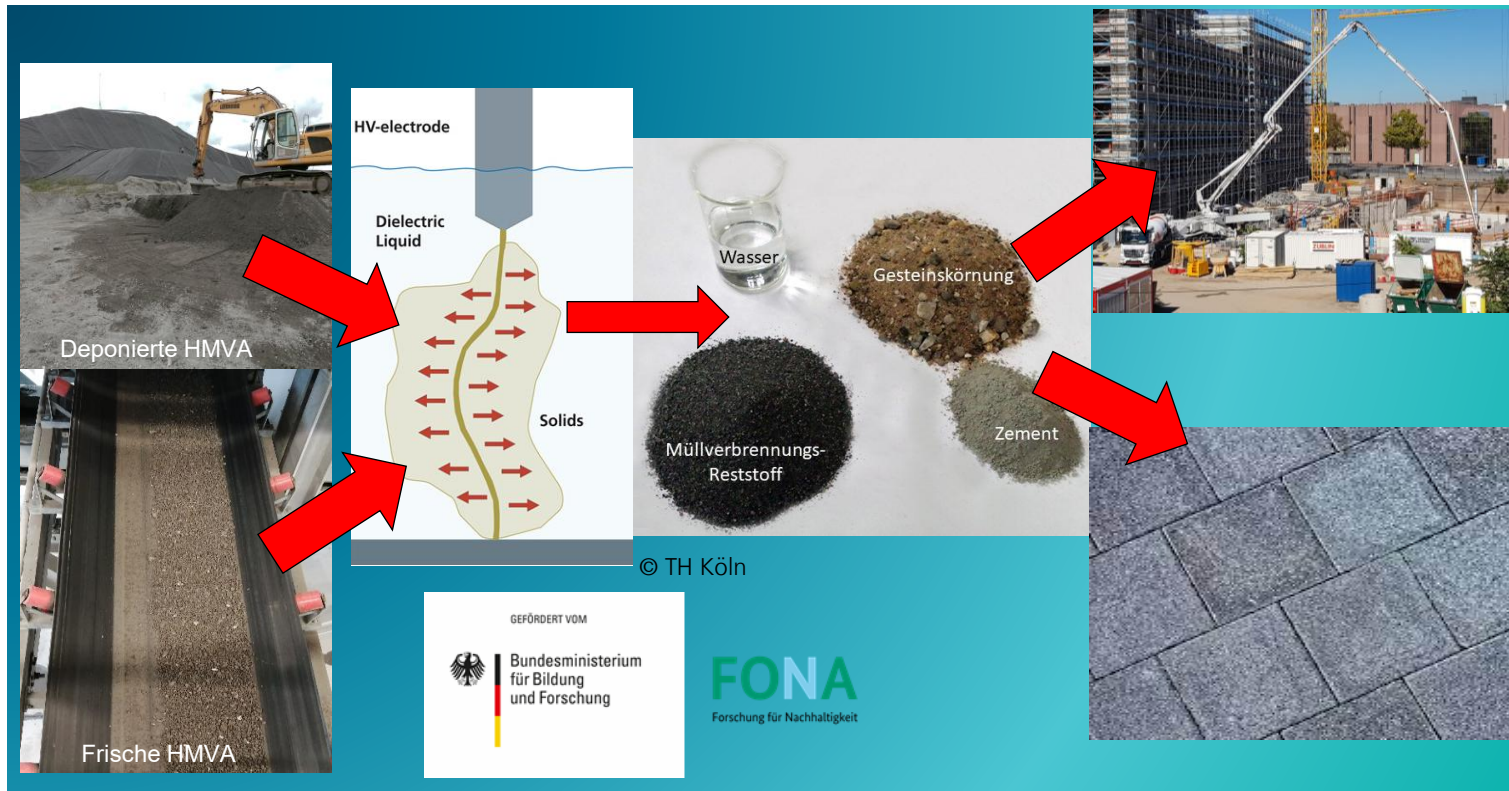
© Fraunhofer IBP

RC-Zuschlag (Sand und Kies) CO<sub>2</sub>-armer Zement-Ersatzrohstoff

# ReMin-Projekt »ASHCON«

Einsatz von aufbereiteter Müllverbrennungsasche als Ausgangsstoff bei der Betonherstellung

## Förderkennzeichen 033R258A



### Technologie

- Sortenreine Trennung von Stoffen in Müllverbrennungsaschen durch das Verfahren der elektrodynamischen Fragmentierung
- Einsatz von mineralischen Bestandteilen der Aschen als Ersatz für Gesteinskörnung in Beton

### Ziele

- Entwicklung von Verwertungswegen für aufbereitete Hausmüllverbrennungsaschen (HMVA) als Ausgangsstoff für Beton im Sinne der Kreislaufwirtschaft

# → Mechanische vs. elektrodynamische Aufbereitung

	Prallmühle, Backenbrecher	Elektrodynamische Fragmentierung
<b>Energieeintrag</b>	mechanisch	elektrisch
<b>Kräfte zur Zerkleinerung</b>	> Druckfestigkeit	> Zugfestigkeit
<b>Verschleiß, Staub</b>	Hoch (durch Abrieb)	Niedrig (nur Elektrode)
<b>Zerkleinerung</b>	nicht selektiv	selektiv
<b>Produkte</b>	Konglomerate	sortenrein
<b>Edukte</b>	Altbeton ohne Bewehrung	auch Stahlfaserbeton
<b>Kontamination</b>	hoch	niedrig

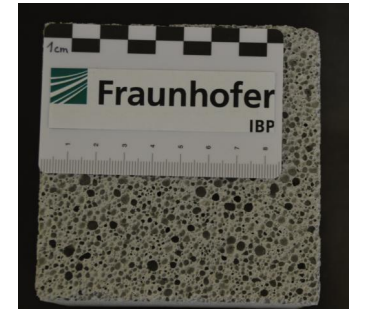
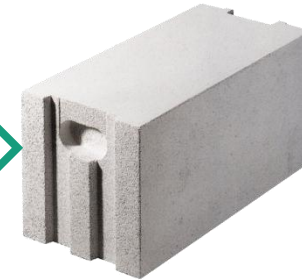
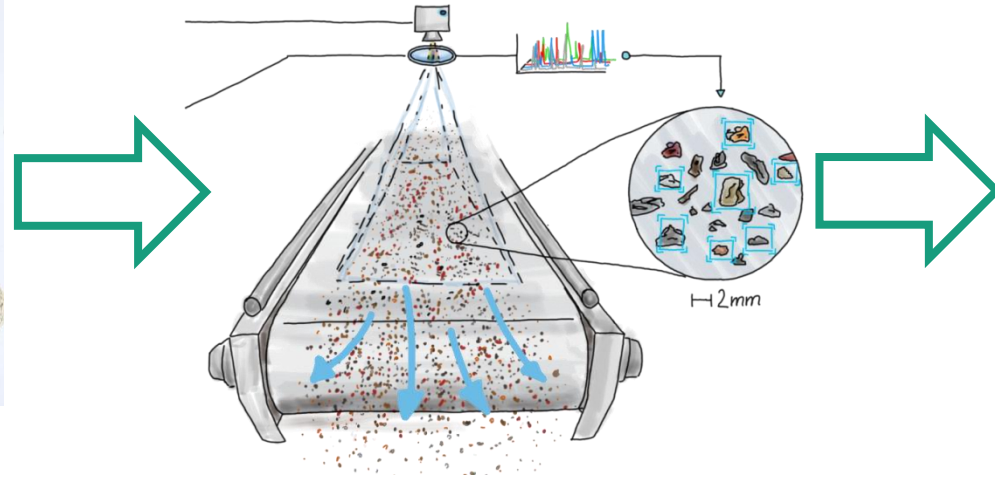
# Zusammenfassung Elektrodynamische Fragmentierung

Vorteile einer **elektrodynamischen Fragmentierung** gegenüber der **mechanischen Aufbereitungsmethoden**:

- **Selektive Freilegung** der Betonkomponenten Zementstein und Zuschläge
- Energieverbrauch im Bereich der mechanischen Aufbereitung **2-3 kWh/t**
- Kies-Grobfraktion  $> 4$  mm besitzt mind. **gleiche oder höhere Festigkeiten** als der Originalzuschlag
- **Verarbeitbarkeit** (Wasser- und Fließmittelanspruch) der Fragmentierungsprodukte ist **ähnlich der Originalmischung**
- **Staubfreies Verfahren**, da Unterwasser-Prozess
- **Keine Kontamination** des Mahlgutes durch Abrieb der Mahlwerkzeuge
- **Vielseitig einsetzbar, allg. für alle Nichtleiter**, speziell für Verbundwerkstoffe, Komposite, Erze oder sehr harte Materialien
- Erzeugt **sekundären Kalk** und trägt zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementproduktion bei
- In Q3 2026 Aufskalierung auf 1m<sup>3</sup> Prozessgefäß geplant

# DAS VERBUNDPROJEKT »BAUCYCLE«

## Aufbereitung und Verwertungsmöglichkeiten für feinkörnigen Bauschutt



Ein Gemeinschaftsprojekt von

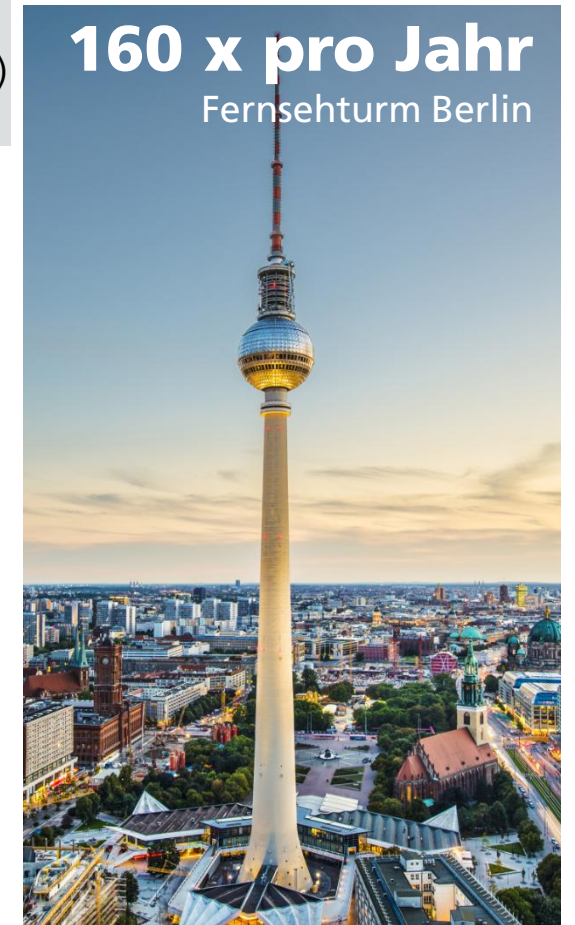
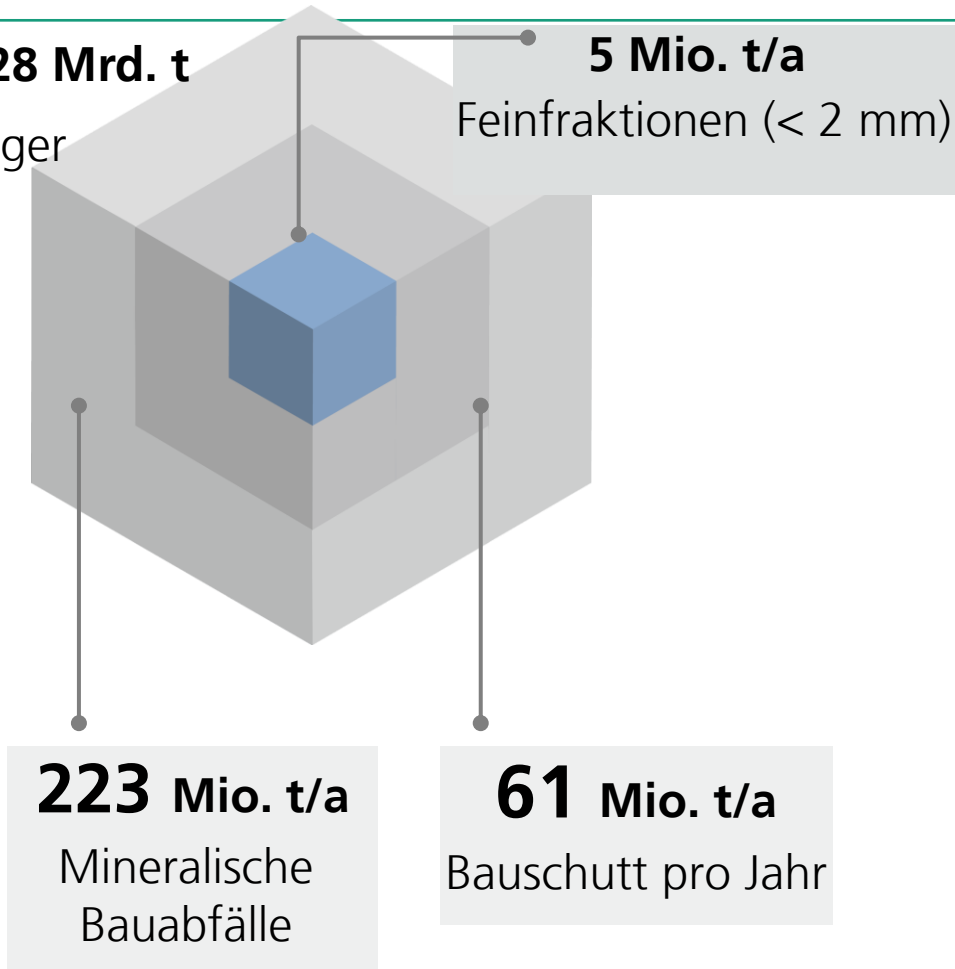


# WARUM BAUCYCLE?

Gebäudebestand inkl. Infrastruktur ist mit **28 Mrd. t**  
ein bedeutendes anthropogenes Rohstofflager

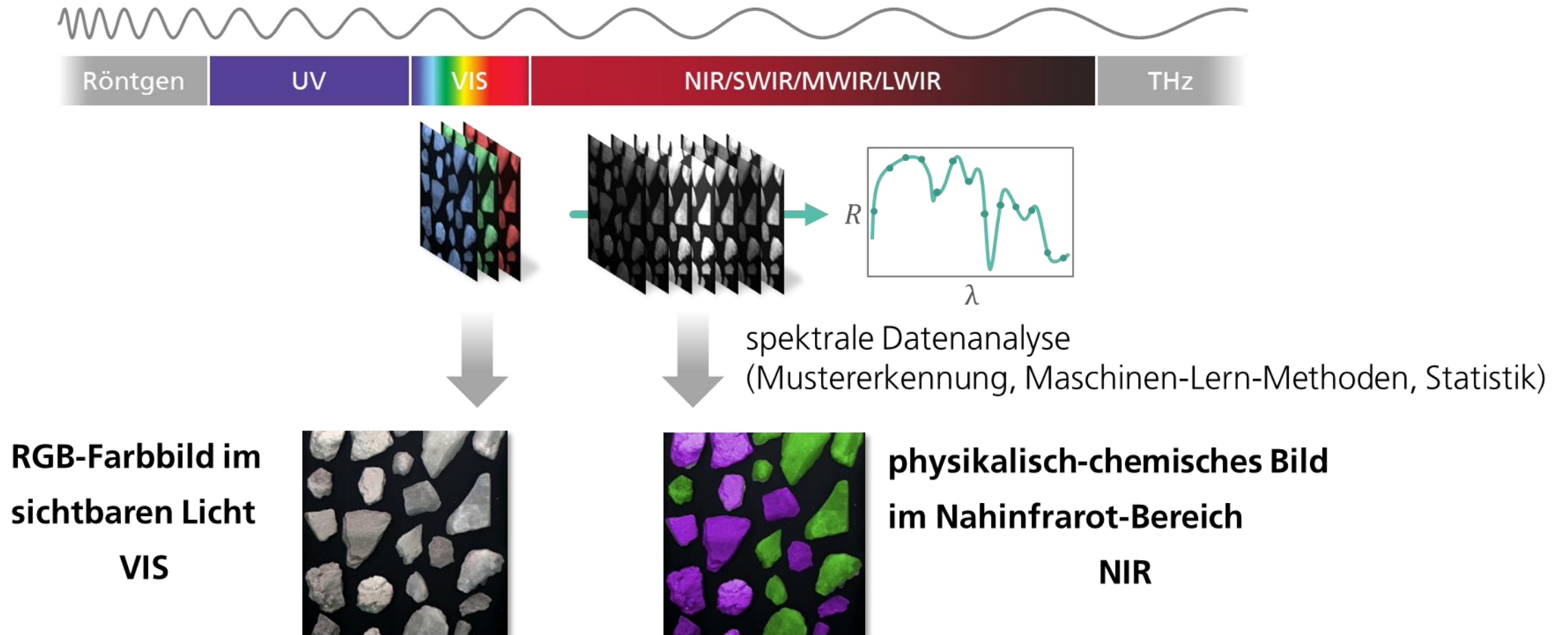


**Bauschutt** ist ein heterogenes Gemenge  
aus den Hauptbestandteilen:  
**Kalksandstein, Beton, Ziegel und Gips**

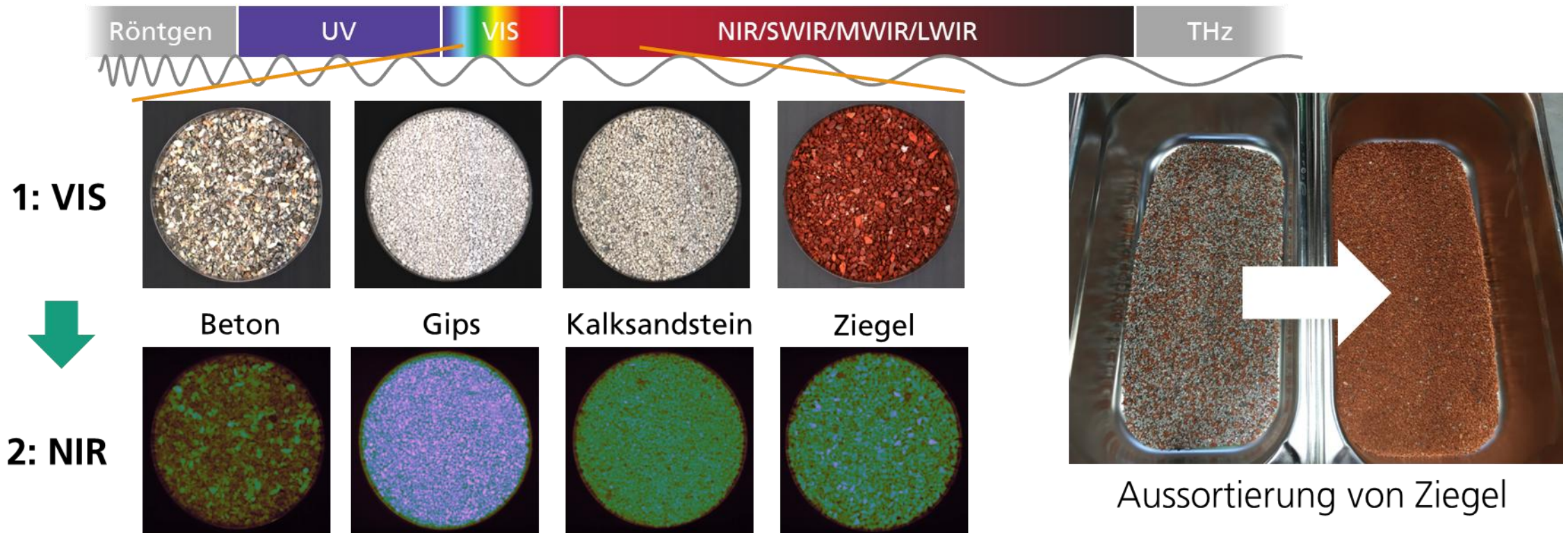


# HYPER-SPECTRAL IMAGING ZUR MATERIALERKENNUNG

- Erfassung der physikalisch-chemischen Eigenschaften der Bauschutt-Bestandteile



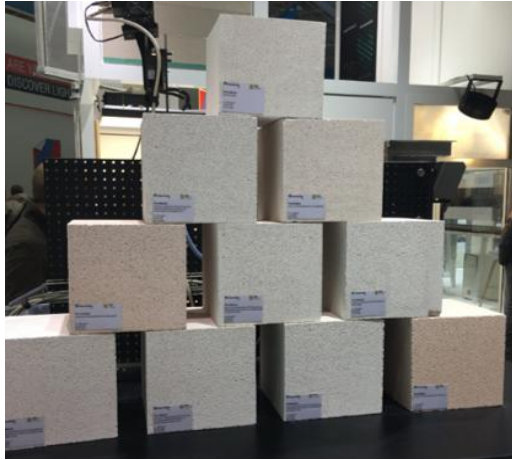
# SORTIERTECHNOLOGIE MIT SPEZIELLER HYPERSPEKTRALKAMERA



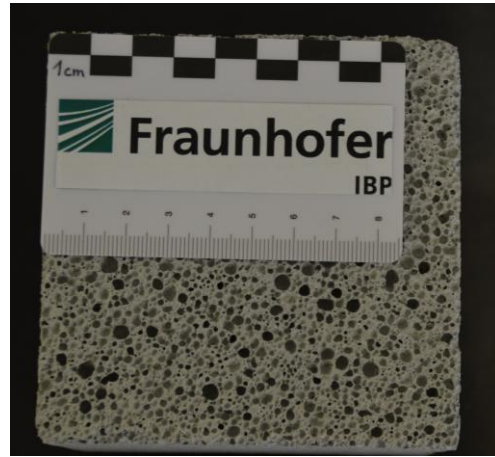
**Ziegel** wird allein durch Farberkennung im sichtbaren Licht (VIS) elektrooptisch analysiert und pneumatisch aussortiert.

Im Nahinfrarotbereich (NIR) können auch **Beton**, **Gips** und **Kalksandstein** voneinander getrennt werden.

# PRODUKTENTWICKLUNGEN AUS BAUSCHUTT-FEINFRAKTIONEN



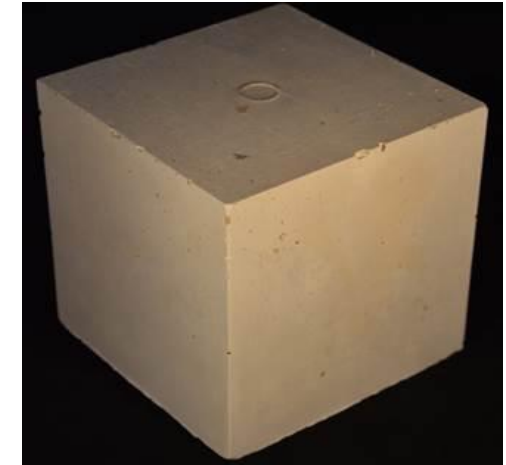
**Porenbetone** aus  
**30-60 %** Bauschutt



**Akustische Schallabsorber**  
aus **60 %** Bauschutt



**Pflanzsubstrate** für  
Fassadenbegrünung aus  
**80 %** Bauschutt



**Zementfreie säure-  
beständige Bindemittel**  
aus **90 %** Bauschutt

**Produktqualität identisch** wie die von Produkten aus primären Rohstoffen !

technische Grenze der Sortierbarkeit: **1 mm** / wirtschaftliche Grenze der Sortierbarkeit: **2 mm**

Reinheit der Einzelfractionen **> 99,5 %** !

Durchsatz: **ca. 1,5 t/h**, Kosten: **5-6 €/t**

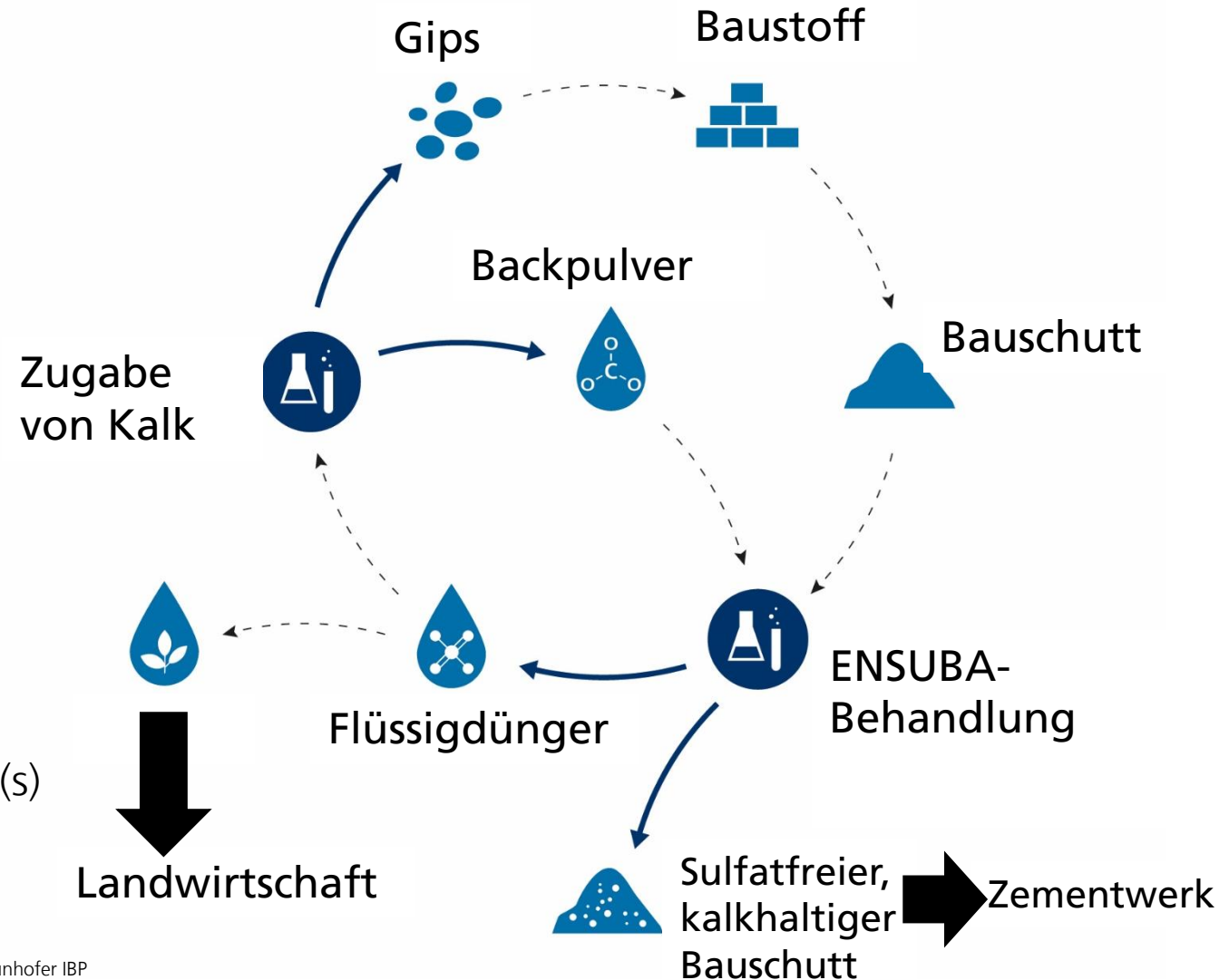
# Entsulfatisierung von Bauschutt-Feinfraktionen (< 2 mm)

## Vorteile des »ENSUBA«-Verfahrens

### Hintergrund

- Jährlich werden in BRD **500.000 t Gips** aus Bauschutt-Feinfraktionen (< 2 mm) deponiert
- Ressourcenverknappung (- 6 Mio. t REA Gips) durch Abbaustopp und Schließung von Kohlekraftwerken.
- Deutsche Patentanmeldung: Nr. 10 2017 211 730.3; »Verfahren zur Kalziumsulfatentfernung aus kalziumsulfathaltigem Bauschutt«

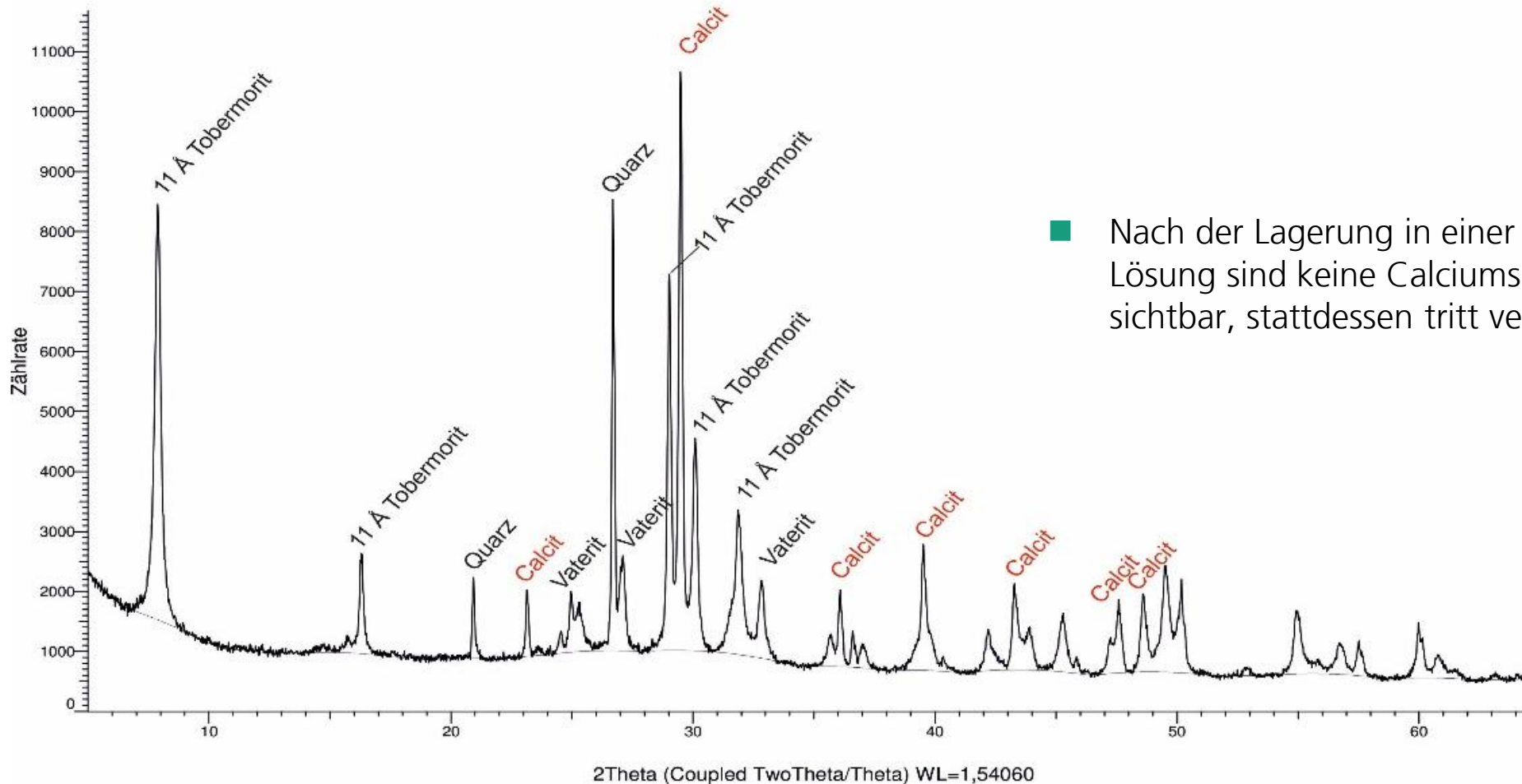
Feststoff-Austauschreaktion:



© Fraunhofer IBP



# Behandlung von Porenbeton mit »ENSUBA-Verfahren«



- Nach der Lagerung in einer Ammoniumcarbonat-Lösung sind keine Calciumsulfat-Peaks mehr sichtbar, stattdessen tritt vermehrt Calcit auf.

Pulverröntgendiagramm von Porenbeton **NACH** einer ENSUBA-Behandlung

# ENSUBA-Technikumsanlage am IBP



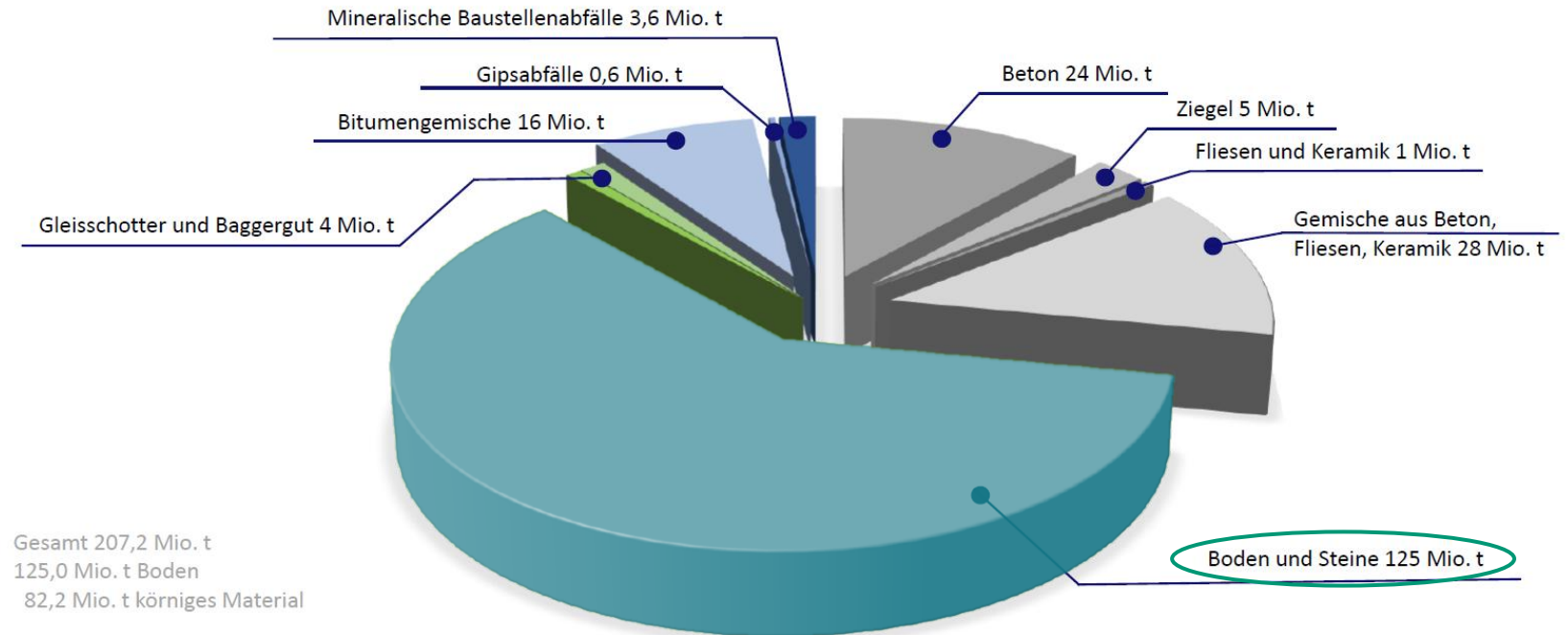
- Demoanlage im Technikum des IBP
- Prozessgefäß 70 l
- Fest-Flüssig-Trennung
- Automatische pH-Wert und Temperaturkontrolle
- Aufskalierbar auf 700 l Prozessgefäß
- für alle Sulfat-haltigen Feinfraktionen < 2 mm anwendbar
- Aktuell laufende Projekte mit Zement- und Stahlindustrie

# Sekundäre tonhaltige Ressourcen

## Durchschnittlicher Anfall mineralischer Bau- und Abbruchabfälle



### Durchschnittlicher Anfall mineralischer Bau- und Abbruchabfälle

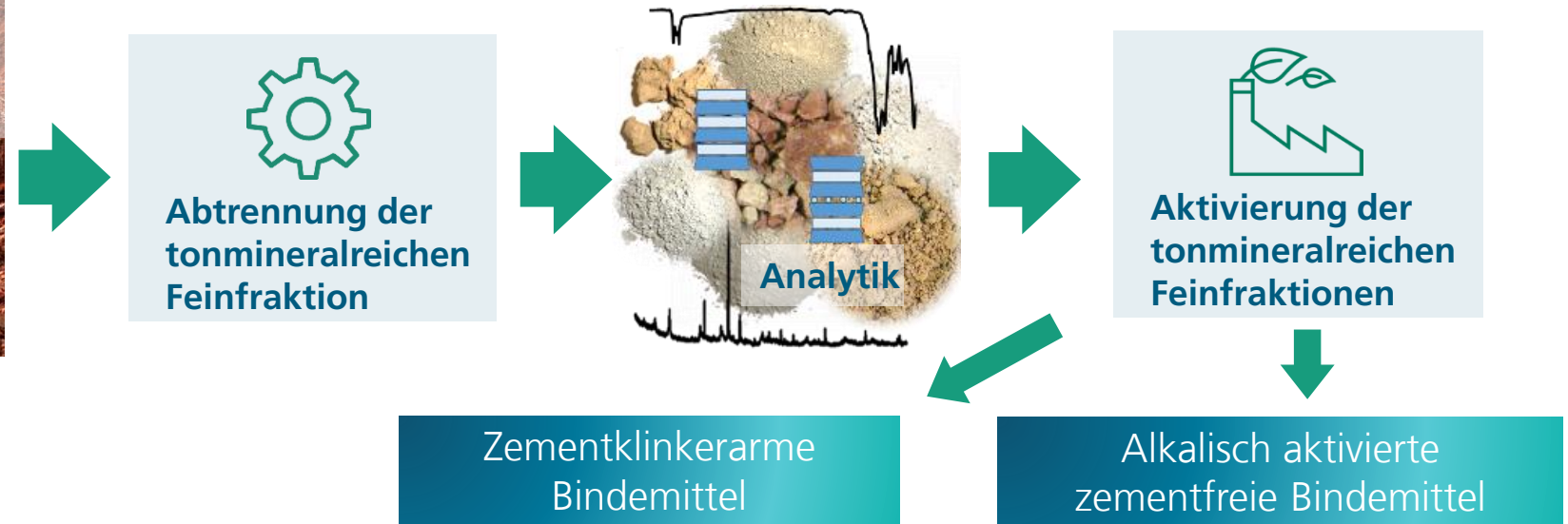


**+ ca. 15 Mio. t an tonmineralhaltigen Waschschlämmen aus der Sand- und Kiesaufbereitung**

nach BBS, Ausschuss Bauwirtschaft und Logistik

# Attract-Projekt LOCALAY

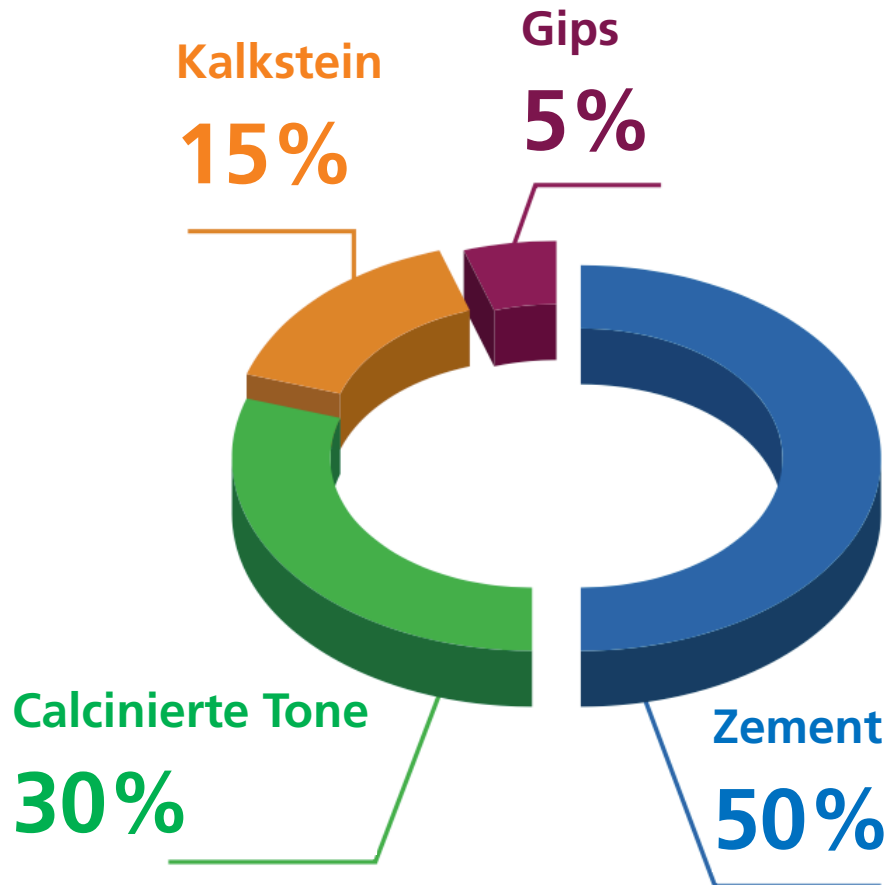
## Low Carbon Clay-based Construction Materials



Ziel: Entwicklung von ressourcen- und klimaschonenden Bindemitteln auf Basis von Tonmineralen unter Verwendung von ressourceneffizienten Sekundärstoffströmen für den Einsatz in Massenbaustoffen

# Calcinierte Tone – der zukünftige CO<sub>2</sub>-arme Zementzumahlstoff

CO<sub>2</sub>-reduzierte »LC3-Zemente«

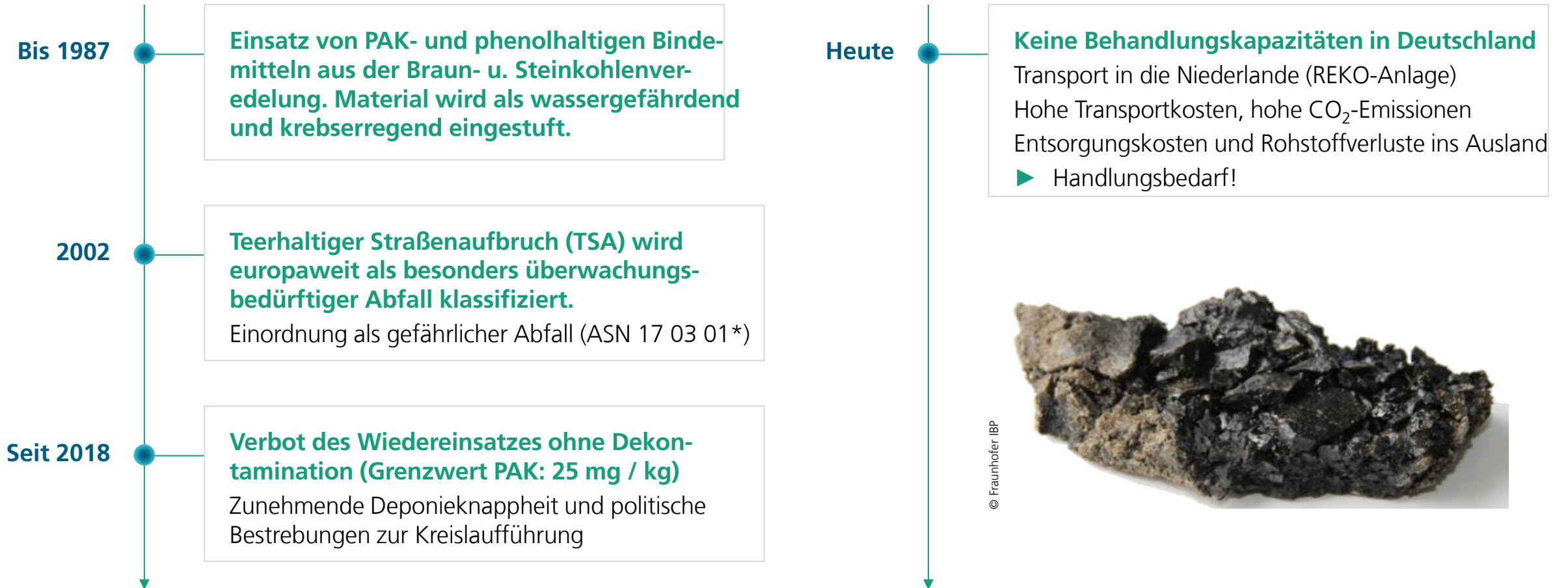


Nach Quelle: nach [www.LC3.ch](http://www.LC3.ch)

## Hintergrund

- 50%-iger Zementzusatz durch calcinierte Tone
- Gleiche mechanische Eigenschaften wie Betone, die aus 100% Zement hergestellt wurden
- Tone sind in Deutschland ausreichend verfügbar, um den Bedarf abzudecken
- Hürden: Zulassung neuer Zementformulierungen und Entwicklung neuer Additive

# Hintergrund zum Projekt »InnoTeer«



# Aktuelle Dekontaminationsanlage

## Technische, ökonomische und ökologische Situation



### Rohstoffverluste und Wertschöpfung ins Ausland

Bis zu **223 Mio. € / a** Verluste durch Behandlungskosten und Erlöse des Outputs



### Dekontamination thermisch-oxidativ bei 850 °C bis 1.000 °C



### Schädigung der Mineralik

- »Quarzsprung« bei 573 °C
- Kalzinierung (CO<sub>2</sub>-Freisetzung)



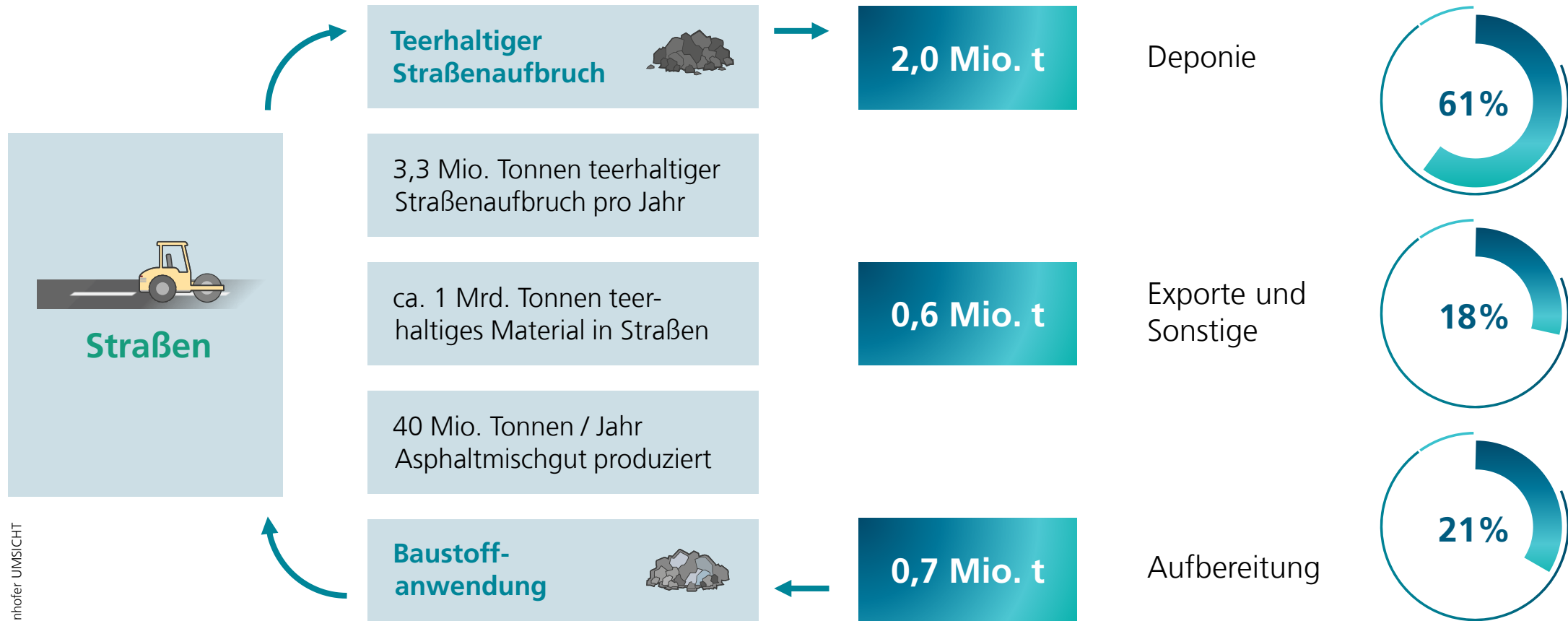
### Ökologisch-ökonomische Faktoren

- Hohe energetische Aufwendungen
- Aufwändige Transporte



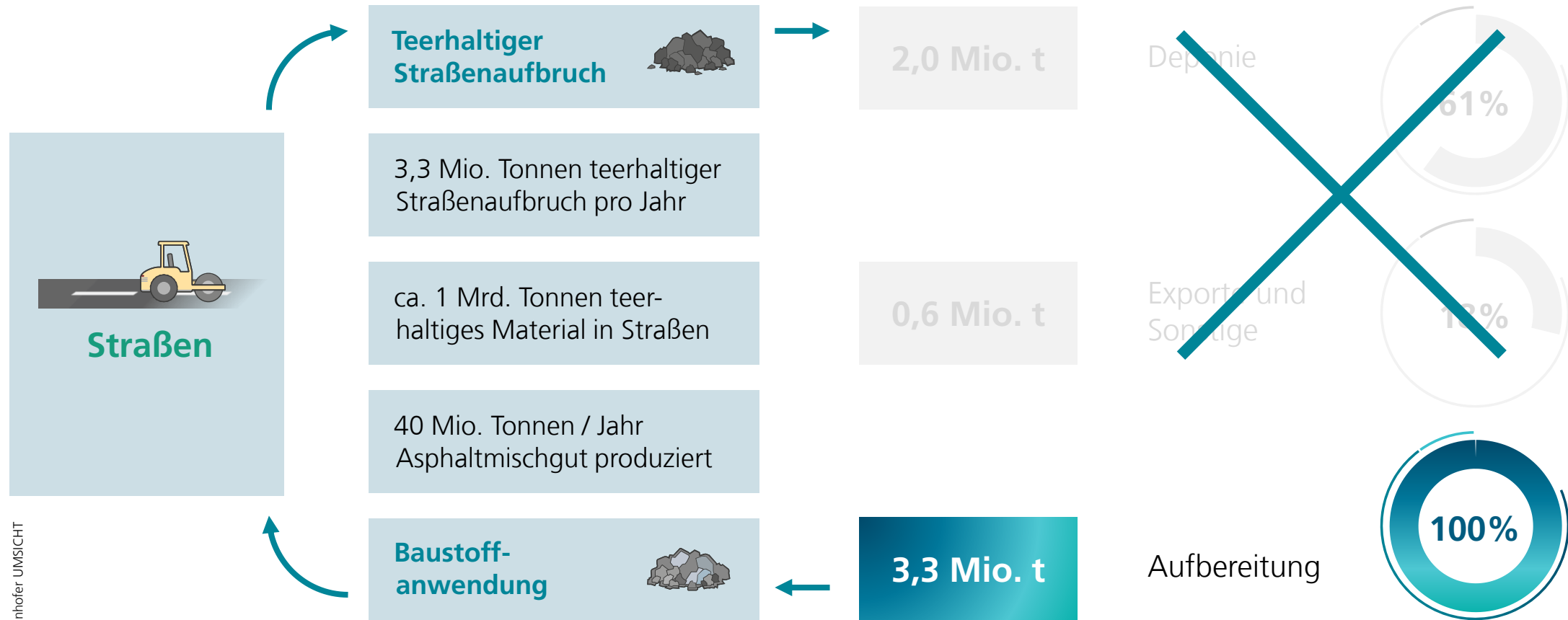
Quelle: Recycling Kombinate REKO B.V., 2018

# Situation in Deutschland

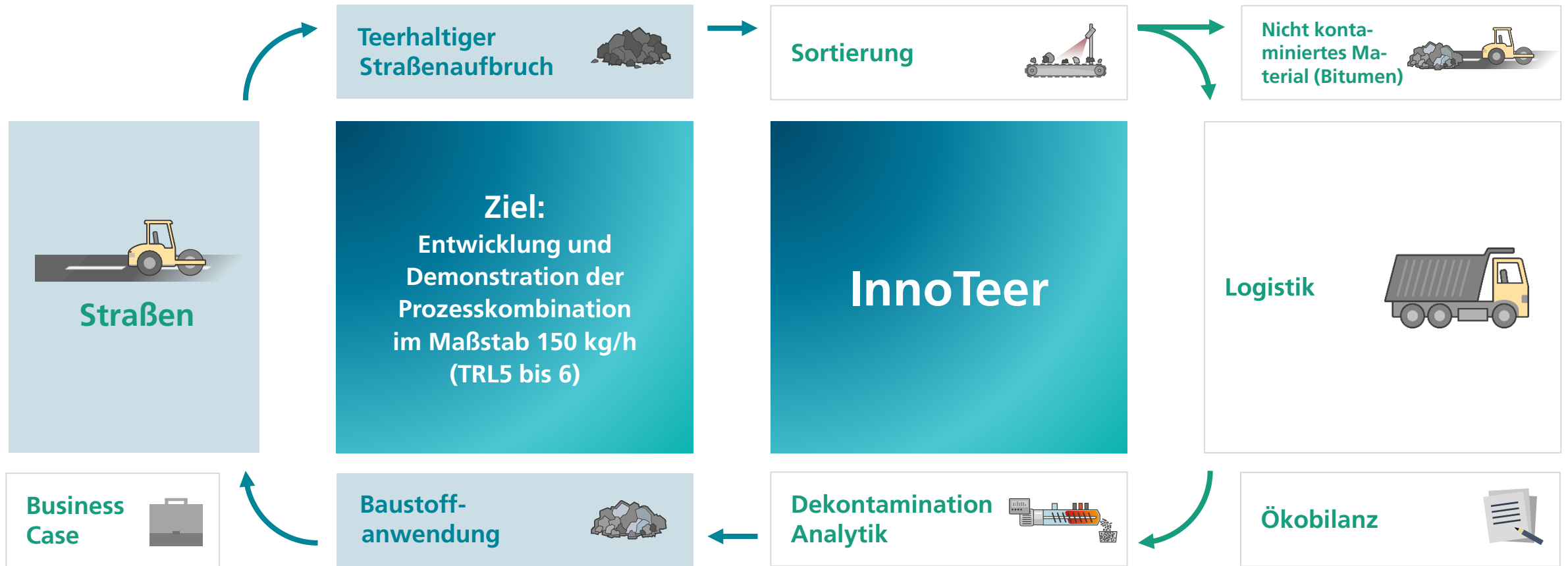


# Projektziel

## Schließung regionaler Stoffkreisläufe im Bausektor

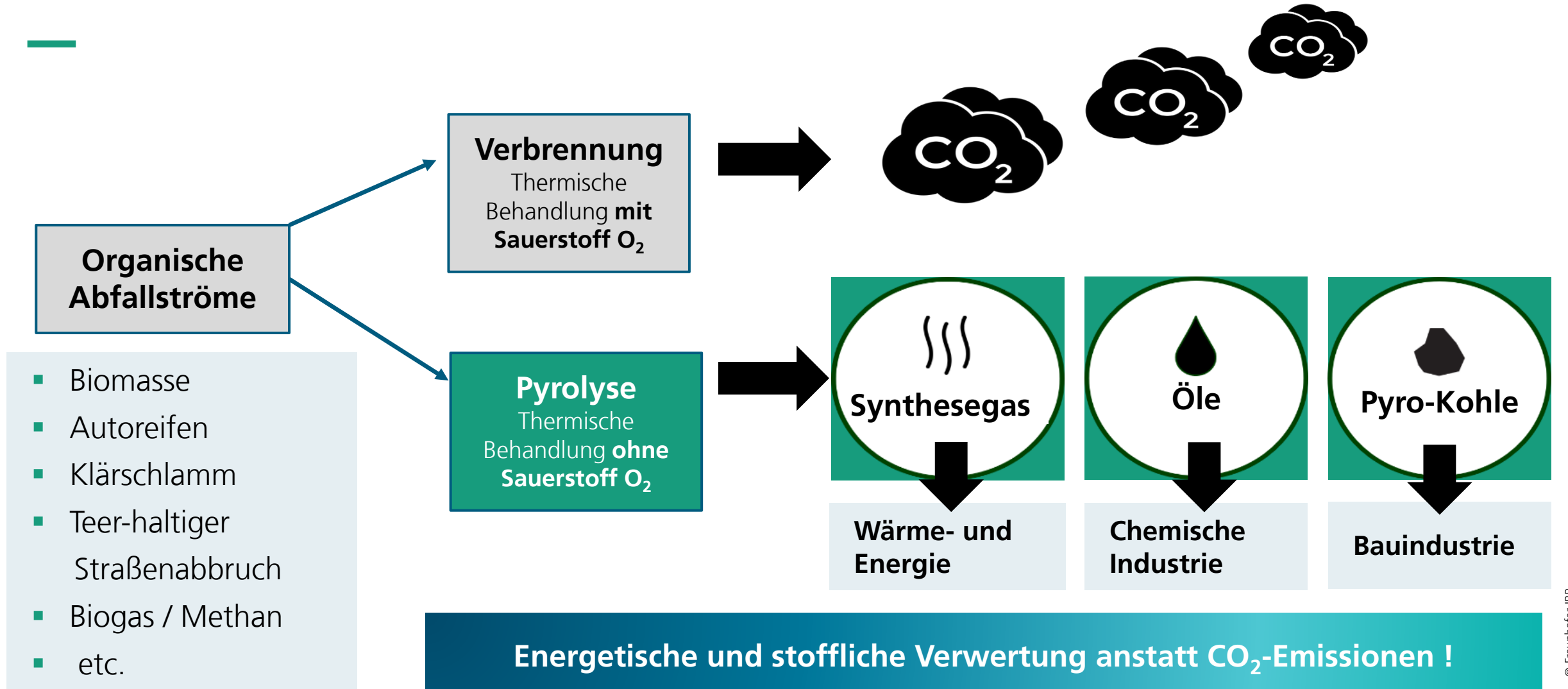


# Die Lösung: InnoTeer

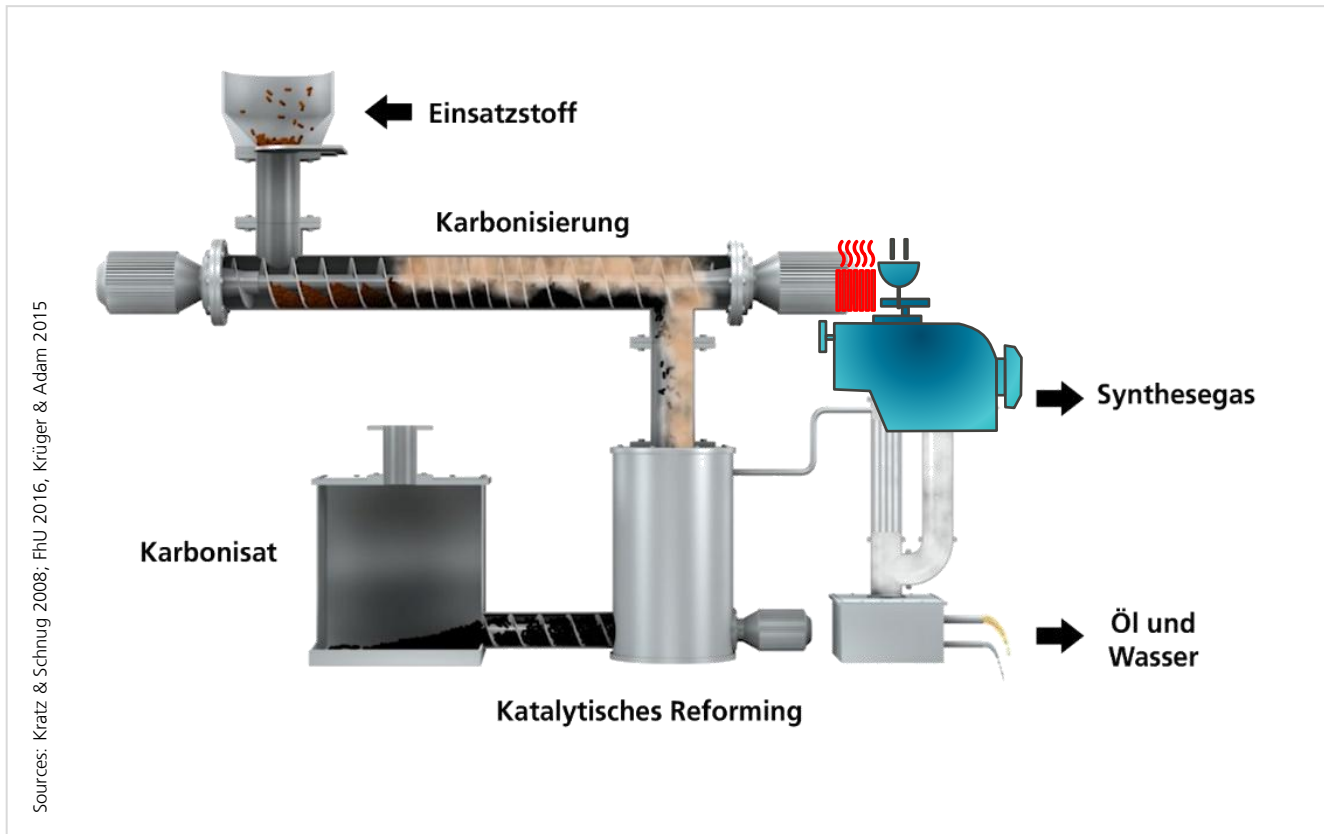


© Fraunhofer UMSICHT

# Pyrolyse als klimapositives Verfahren !

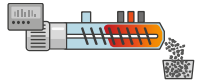


# Stand der Technik: TCR-Verfahren (Thermo-Catalytic-Reforming)



# Dekontamination durch Pyrolyse

Ziel: Demonstrator Dekontaminationsanlage (500 kg/h)



## Temperatur (200 – 550 °C)

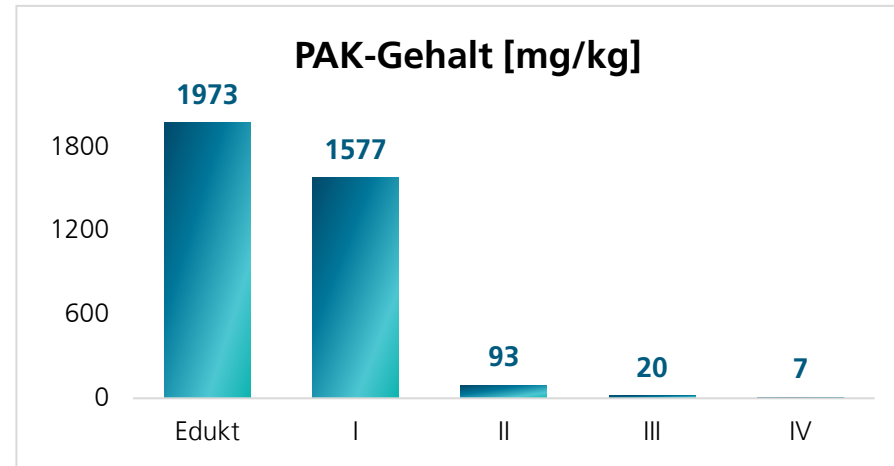
- Vermeidung Quarzsprung bei quarzitischem Gestein
- Vermeidung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Kalkstein

## Unterdruck (500 – 1.013 mbar abs)

- Absenkung der Siedepunkte der PAK

## Oxidationshilfen (Luft, O<sub>2</sub>, Wasserdampf)

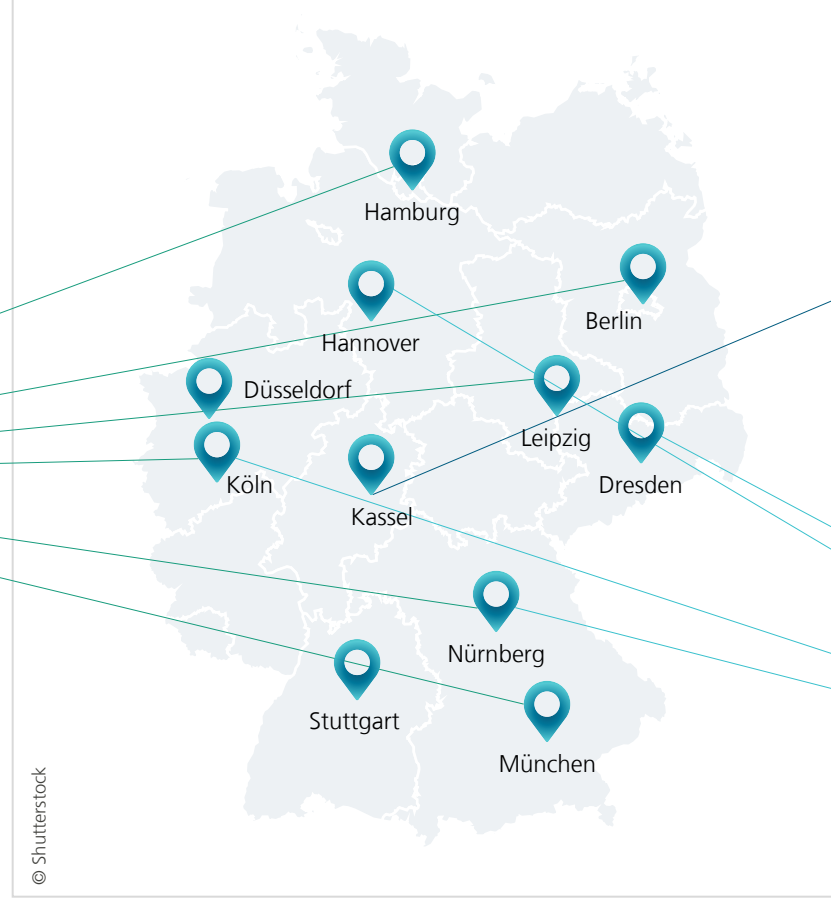
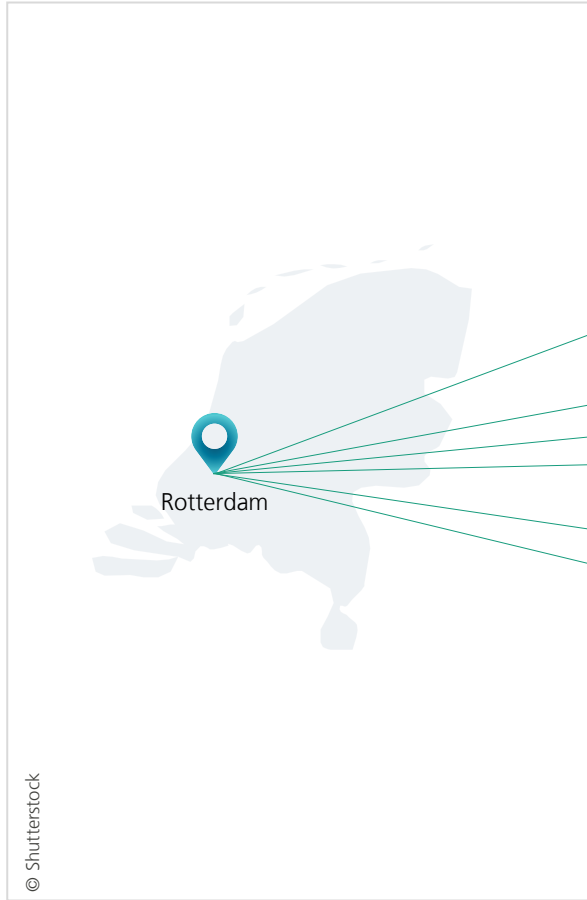
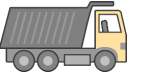
- Cracken schwerflüchtiger Kohlenwasserstoffe



Versuch	I	II	III	IV
Hilfsmittel	N <sub>2</sub>	Luft	Luft	Luft
Temperatur [°C]	<350	<550	<550	<550
Druck [mbar abs]	1013	1013	500	500
Verweilzeit [min]	<60	<20	<20	>20

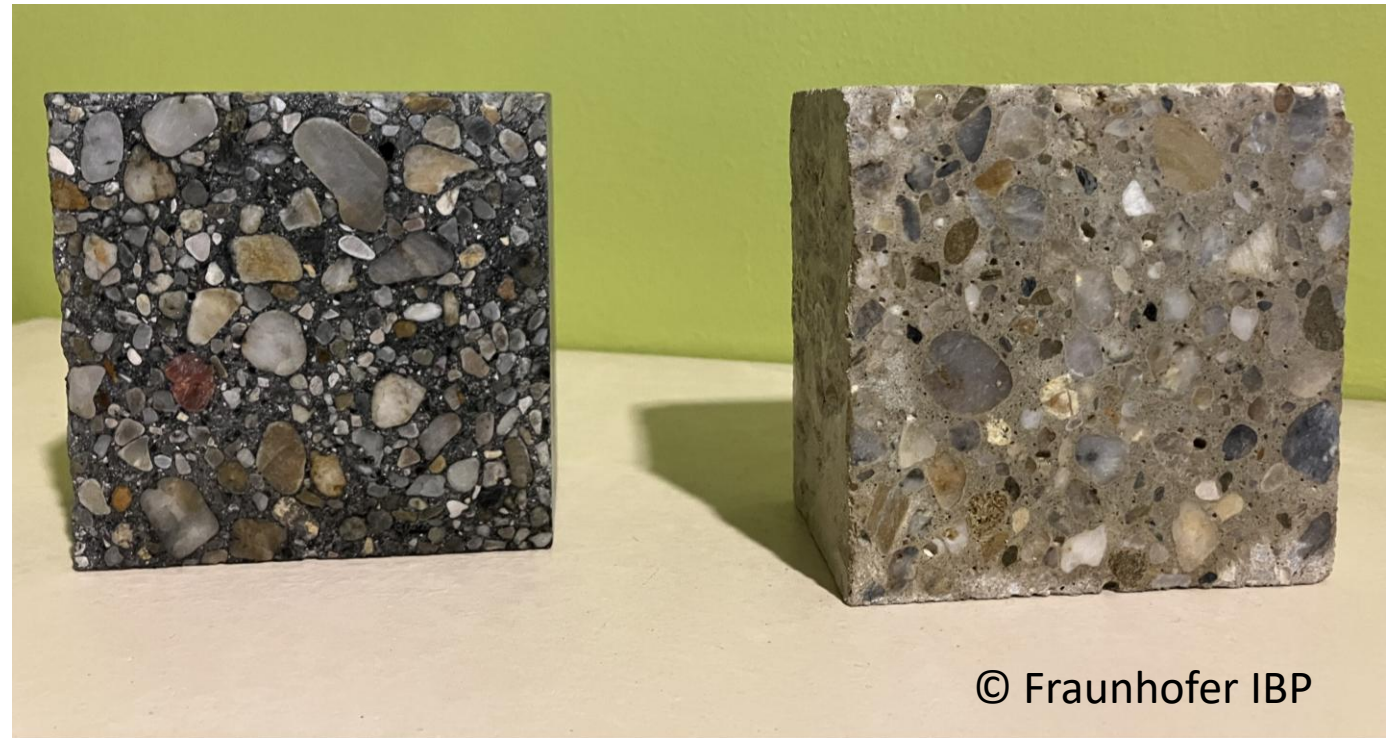
# Logistik

Ziel: IT-Plattform zur Logistikoptimierung



# Einsatz von Pyrokohle im Baubereich, z.B. in Mörtel und Beton

**1 Teil Pyrokohle reduziert Produkt um ca. 3 Teile CO<sub>2</sub> !!!**

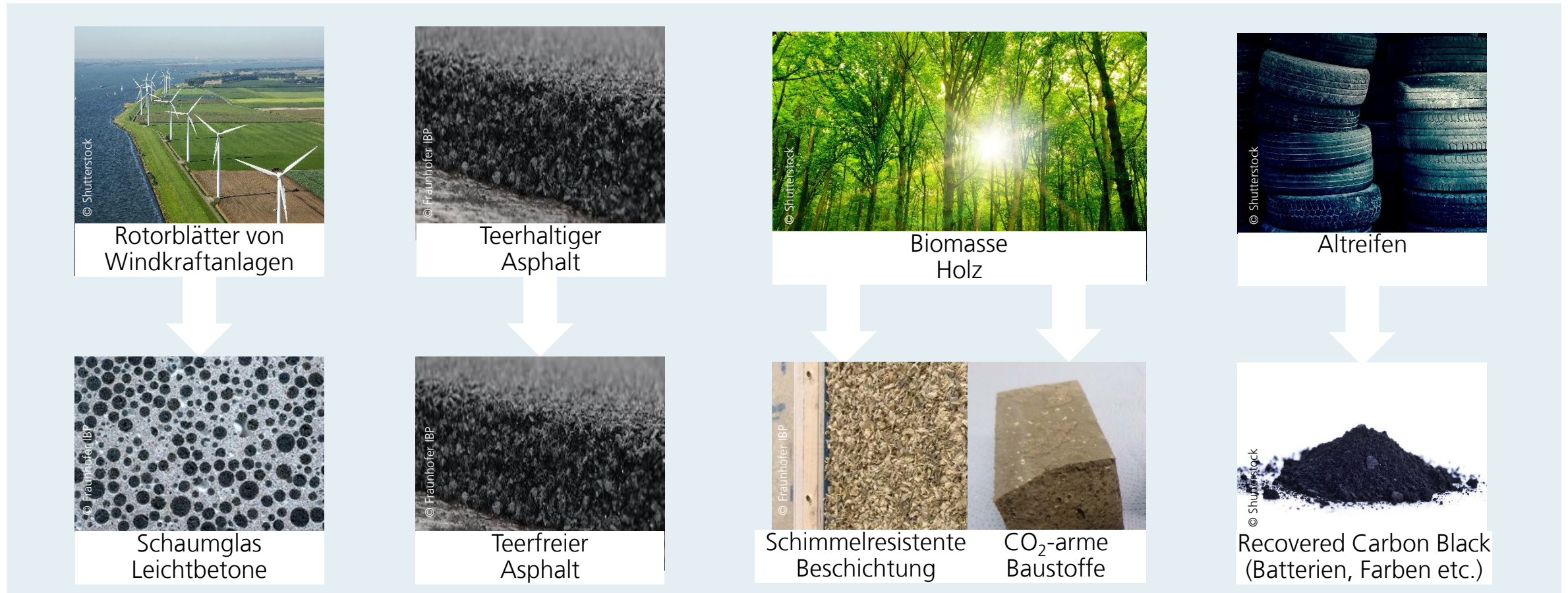


© Fraunhofer IBP

Vergleich: Mörtel ohne und mit Pyrokohle (linkes Bild), Beton mit und ohne Pyrokohle (rechtes Bild)

# Verwertungsmöglichkeiten für Pyrolyseprodukte im Bau (aktuelle Projekte)

Pyrokohle ermöglicht die Entwicklung von klimafreundlichen Produkten



# Zusammenfassung

- **EDF – Trennverfahren** für Verbundwerkstoffe  
**Ziel:** Aufskalierung auf mind. 10 t/h, Aufbau einer Forschungsplattform in 2026
- **BAUCYCLE – Sortierverfahren:** Forschungsanlage am IBP vorhanden  
**Ziel:** Anpassung und Optimierung von Sortierverfahren an jeweiligen Stoffstrom  
Erweiterung des Kamertechnik für Detektion von Asbest und Teer
- **ENSUBA:** Demoanlage wurde 2025 aufgebaut  
diverse aktuelle Projekte: Test von ENSUBA an unterschiedlichen Stoffströmen bei Aufbereitern
- **INNOTEER:** Demonstrator wurde auf 20 t/h aufskaliert
- **Pyrolyseprodukte** sind klimapositive Additive zur Herstellung zukünftiger klimafreundlicher Bauprodukte

# Kontakt

---

**Dr. Volker Thome**

**Abteilungsleitung**

**»Mineralische Werkstoffe  
und Baustoffrecycling«**

**Tel. +49 8024 643 – 623**

**[volker.thome@ibp.fraunhofer.de](mailto:volker.thome@ibp.fraunhofer.de)**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Fraunhoferstraße 10

83626 Valley

[www.ibp.fraunhofer.de](http://www.ibp.fraunhofer.de)

**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit !**