

Innovative Betone – von der Multifunktionalität bis zur Optimierung unter Weltraumbedingungen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held
Institut für Massivbau
Universität Duisburg-Essen

BETONSUISSE

14. Schweizer Betonforum: Gebäude neu denken!
19. Mai 2022, ETH Zürich

Inhalte

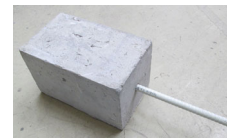


Beton – innovativ?

- **Multifunktionaler Beton**

→ Wärme, Schall, Brand, Luftreinigung

Ziel Einschalige Bauweise ‚Tragfähigkeit und Bauphysik‘,
weitere Eigenschaften



- **Beton unter Schwerelosigkeit**

→ Erkenntnisgewinn in der Erhärtungsphase des Betons
durch genauere Untersuchungen

Ziele Nachhaltigkeit: Einsparpotentiale, effektiverer Einsatz
Exploration: Bauen auf dem Mond



- Klimaerwärmung und Ressourcenschonung:
Anforderungen an Wärmedämmung von Wohn- und Industriebauten steigen weltweit.
- Einsatz von zweischaligen Konstruktionen unter Einsatz von (brennbaren oder entzündbaren) Wärmedämmstoffen (z.B. Polystyrol) umstritten.
- Ziele:
Entwicklung eines Werkstoffes, der eine einschalige Bauweise unter Einhaltung der ENEC, der Festigkeitsanforderungen, des Brandschutzes und des Schallschutzes erlaubt:
→ in eine Zementmatrix eingebettetes Silika-Aerogelgranulat:
“Aerogelbeton”.
- Vergleich traditioneller Baustoffe über einen Leistungsfaktor, der die Druckfestigkeit und die Wärmedämmfähigkeit ins Verhältnis setzt:

$$P \left[\frac{\text{MNm}^2\text{K}}{\text{Wkg}} \right] = \frac{f \left[\frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \right]}{\rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \lambda \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]} \quad (1)$$

Multifunktionaler Hochleistungsaerogelbeton - HPAC

- Traditionelle Wandbaustoffe weisen Leistungsfaktoren zwischen 3.3 und $57.6 \cdot 10^{-3} \text{ MNm}^2\text{K/Wkg}$ auf:

| Material | ρ (kg/m ³) | $f_k / f_{(l)ck}$ (MPa) | λ (W/(mK)) | $P_k [10^{-3}]$ MNm ² K/Wkg |
|--------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|---|
| Leichtbetonsteine Bisomark Hbn | 315-335 | 0.8 | 0.06 | 42.3 |
| Ytong PP 1,6-0,25 | 250 | 0.8 | 0.07 | 45.7 |
| Poroton Steine S9-MW | 810-900 | 4.2 | 0.09 | 57.6 |
| Porenbeton Ytong PP 2-0,40 | 400 | 1.8 | 0.10 | 45.0 |
| Leichtbetonsteine Bisoplan 14 | 600 | 2.5 | 0.14 | 29.8 |
| Poroton Plansteine T16 | 710-800 | 4.7 | 0.16 | 41.4 |
| Kalksandsteine Silka KS L-R P 12-1,4 | 1210-1400 | 5.6 | 0.56-0.70 | 8.3 |
| Leichtbeton LC20/22 | 900-1000 | 20.0 | 0.44-0.49 | 40.8 |
| Kalksandsteine Silka KS-R P 20-2,0 | 1810-2000 | 10.5 | 0.99-1.10 | 5.9 |
| Normalbeton C12/15 | 2200-2400 | 12.0 | 1.65-2.0 | 3.3 |
| Stahlbeton C20/25 | 2300-2500 | 20.0 | 2.3-2.5 | 3.5 |

Aerogele: Hochporöser Werkstoff auf Silikatbasis

Eigenschaften:

- Hydrophob, Inert
- UV-stabil, hohe Schallabsorption
- Porösität > 90%
- $\rho = 120 - 180 \text{ kg/m}^3$
- $\lambda = 0.02 \text{ W/(mK)}$ (bei 20°C)
- $\varnothing = 0.01 - 4 \text{ mm}$
- $S_m = 600 - 800 \text{ m}^2/\text{g}$



Foto: Heidrich, IfM

Multifunktionaler Hochleistungs-aerogelbeton - HPAC

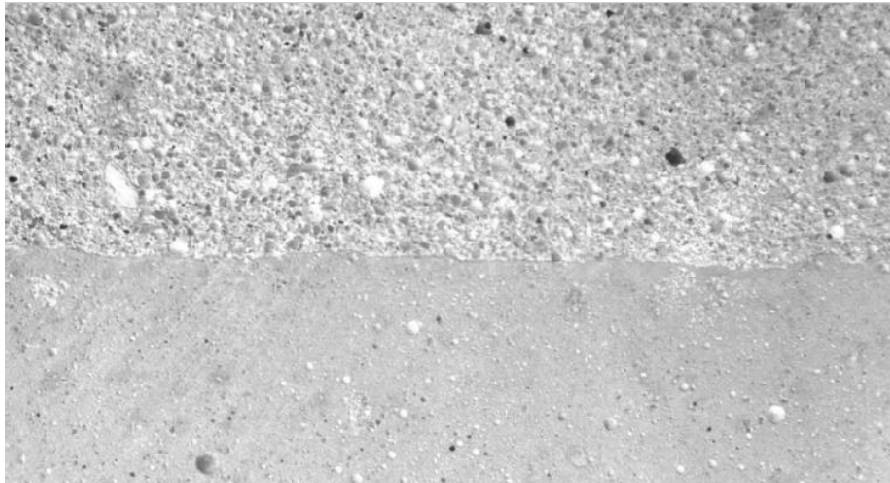
Leistungsfaktor ausgewählter Mischungen

| | | M43 | M7.3 | M7.5 | M7.6 | M7.8 |
|-------------------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| φ | vol% | 47 | 55 | 60 | 62.5 | 70 |
| ρ | kg/m ³ | 1340.0 | 1325.8 | 1133.3 | 1021.9 | 690.4 |
| $f_{\text{cm,cube150}}$ | MPa | 25.0 | 25.97 | 16.81 | 10.55 | 4.79 |
| λ | W/(mK) | 0.260 | 0.255 | 0.191 | 0.212 | 0.137 |
| P_m | 10 ⁻³ MNm ² K/Wkg | 71.8 | 76.8 | 77.7 | 48.7 | 50.6 |

- Leistung des HPAC ist zwei- bis dreimal höher verglichen mit bisher bekannten Aerogelbetonen,
- Leistung der meisten HPAC-Mischungen ist höher als die von konventionellen Wandbaustoffen, sogar höher als von Poroton,
- Klassifizierung des neuen Materials als “Hochleistungs-aerogelbeton - High Performance Aerogel Concrete”.

Gradierter HPAC

- Wärmedämm- und Tragfähigkeitseigenschaften können durch Realisierung eines gradierten HPAC weiter verbessert werden:
 - Tragende Schicht mit hoher Druckfestigkeit
 - Isolierende Schicht mit geringer Wärmeleitfähigkeit.



Isolierende Schicht

70 vol% Aerogel

$$f_{1cm,cube150} = 2.1 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0.09 \text{ W/(mK)}$$

$$t = 130 \text{ mm}$$

Tragende Schicht

50 vol% Aerogel

$$f_{1cm,cube150} = 19.5 \text{ MPa}$$

$$\lambda = 0.26 \text{ W/(mK)}$$

$$t = 120 \text{ mm}$$

Foto: Fickler, IfM

Multifunktionaler Hochleistungsaerogelbeton - HPAC

Bewehrter HPAC

- Intention: Biegebeanspruchte Bauteile aus HPAC
- Einsatz von Bewehrung aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)

Gründe:

- Wärmeleitfähigkeit:

GFK: $\lambda \approx 0.5 \text{ W/(mK)}$,

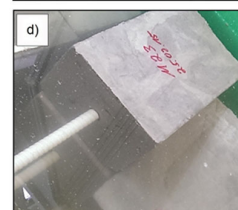
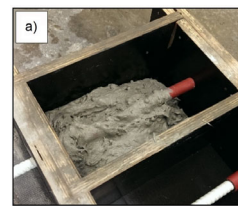
Stahl: $\lambda = 60 \text{ W/(mK)}$,

- Wärmeausdehnungskoeffizient:

HPAC ($\alpha = 0.5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$),

GFK ($\alpha = 0.6 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$),

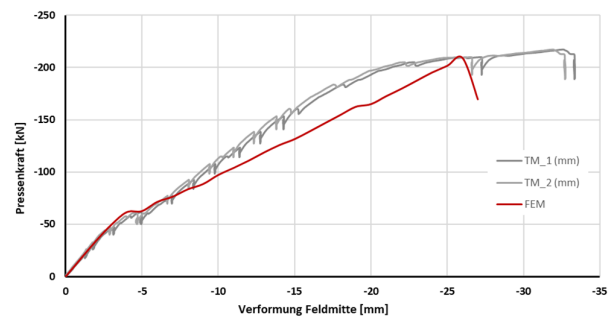
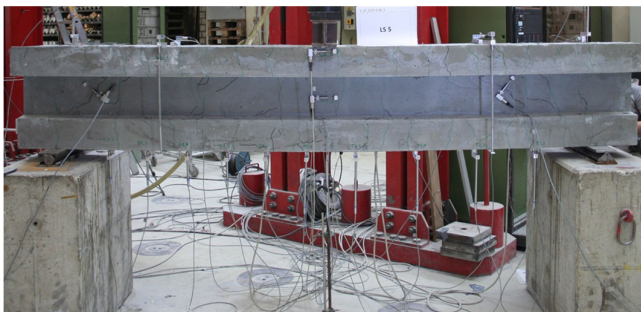
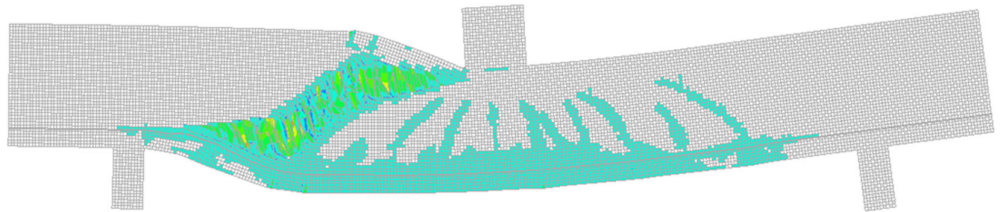
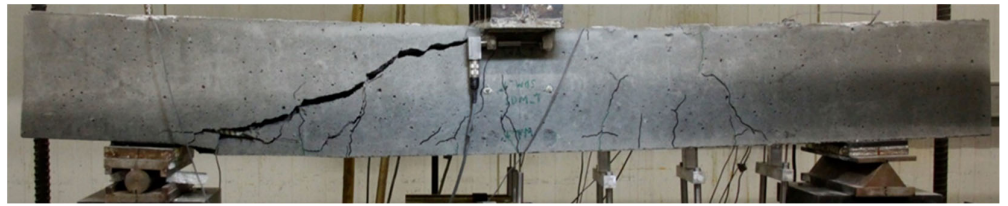
- Keine Korrosion.



Fotos: Heidrich, IfM

- Versuche: Ausziehversuche in Anlehnung an *RILEM*
→ Ermittlung der maximalen Verbundspannungen.
- HPAC als bewehrter Beton geeignet,
Verbundfestigkeiten geringfügig kleiner als die des LWAC.

Biege- und querkraftbewehrter HPAC: hier Querkraftversuche

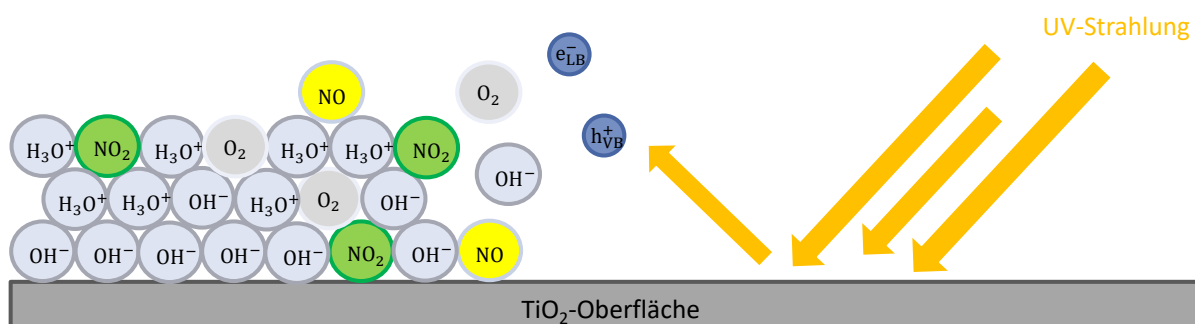


Fotos: Heidrich; IfM

Multifunktionaler Hochleistungsaerogelbeton - HPAC

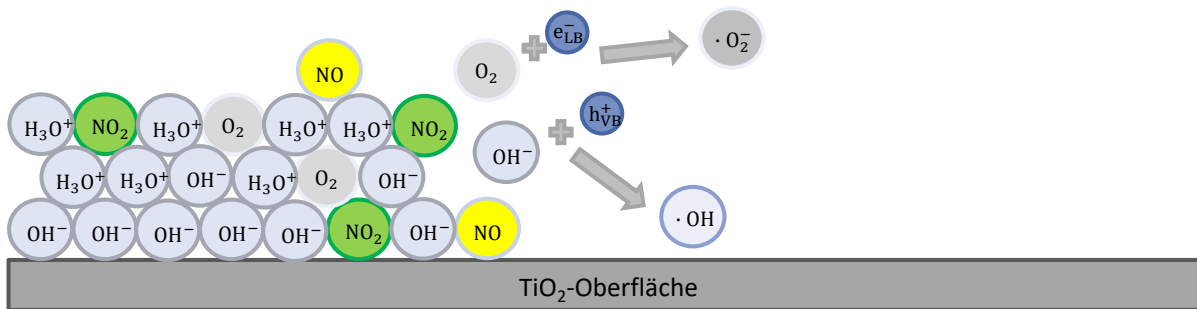
Reduzierung von Schadstoffen (Stickoxiden) in der Umwelt durch Einsatz des Photokatalysators Titandioxid (TiO₂-Photokatalyse)

- Bildung eines Wasserfilms aus Hydroxid- (OH⁻) und Hydroniumionen (H₃O⁺), Sauerstoff (O₂), Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) auf der TiO₂-Oberfläche
- Durch UV-Strahlung und die Halbleitereigenschaften kommt es zur Bildung von Photoelektronen und Elektronenleerstellen



Mechanismus der TiO₂-Photokatalyse

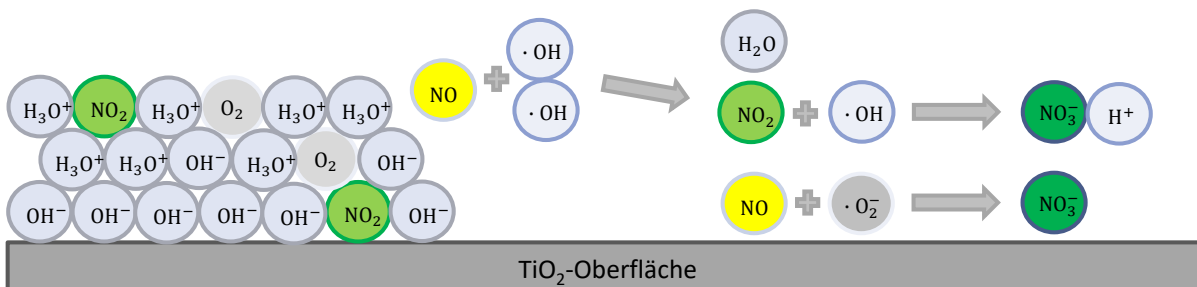
- Photoelektronen und Elektronenleerstellen reagieren mit den Sauerstoff- (O₂) und Hydroxidmolekülen (OH⁻)
- Bildung von radikalischen Hyperoxidanionen ($\cdot\text{O}_2^-$) und Hydroxylradikalen ($\cdot\text{OH}$)



Multifunktionaler Hochleistungsaerogelbeton - HPAC

Mechanismus der TiO₂-Photokatalyse

- Hyperoxidanionen ($\cdot\text{O}_2^-$) und Hydroxylradikale ($\cdot\text{OH}$) reagieren mit Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) zu Nitrat (NO₃⁻)
- Nitrat (NO₃⁻) wird durch ein Regenereignis von der TiO₂-Oberfläche abgetragen



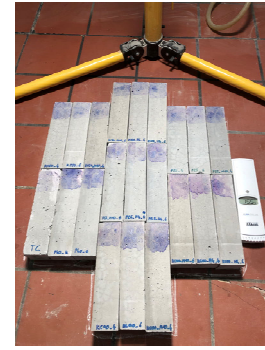
Vergleich der photokatalytischen Aktivität



NOx-Abbau nach 0 Stunden

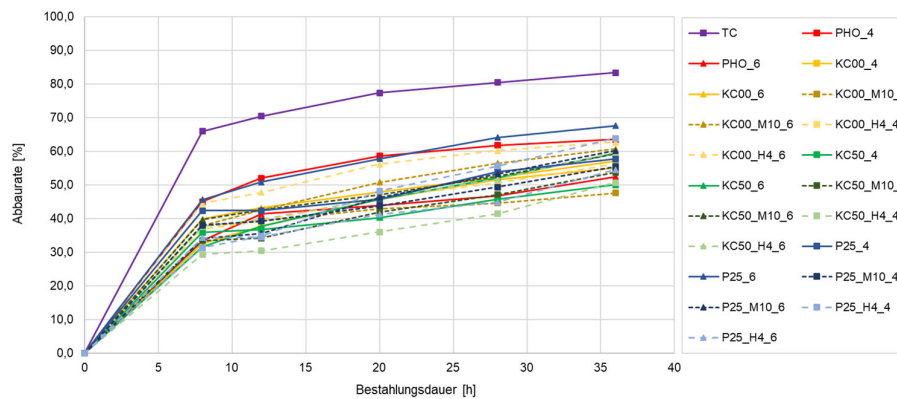


Abbau nach 8 Stunden



Abbau nach 36 Stunden

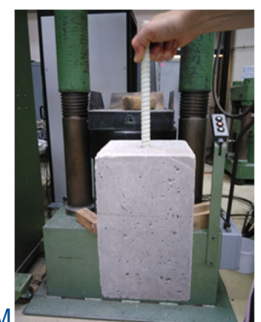
Fotos: Sprenger; IfM



Multifunktionaler Hochleistungsaerogelbeton - HPAC

Hochleistungsaerogelbeton (HPAC):

- Hohe Druckfestigkeit,
 - Geringe Wärmeleitfähigkeit,
 - Hohe Schallabsorption,
 - Geringe Wasserdurchlässigkeit,
 - Geringe Wasserdampfdiffusionskoeffizienten
 - Hoher Feuerwiderstand.
 - Luftreinigende Wirkung
- HPAC erlaubt die Produktion tragender einschaliger Außenwände ohne weitere thermische Isolierung.
- Steuerung der Betoneigenschaften über den Aerogelanteil.
 - Hochleistungsaerogelbeton ist als bewehrter Beton einsetzbar für biege- und querkraftbeanspruchte Bauteile,
 - Ein Bemessungskonzept für GFK-bewehrte Bauteile wurde erstellt.



Fotos: Heidrich, IfM

- Beton klimaneutraler?
U.A. detailliertes Verständnis über die Erhärtung von Beton erforderlich
→ Einsparpotenziale
- Mischen von Sand, Wasser und Zement:
sensitiv gegenüber der Schwerkraft (s. Parabelflüge)
- Projekt **MASON**:
Mechanismen und Auswirkungen der Betonerhärtung in Schwerelosigkeit werden untersucht. Ausschluss von gravitationsbedingten Prozessen.
- **ISS**: Mechanismen sind gezielt und ohne Störeffekte aufklärbar,
Untersuchungen zu Herstellung und Erhärtung von Beton ideal
- Ziele: besseres Verständnis der Betonerhärtung auf der Erde
→ Beitrag für einen **effektiveren Einsatz dieses Baustoffes**.
- Alternativen für den Mond (Regolith) werden auch auf der ISS getestet.
- **Exploration**: Bauen auf Mond und Mars
- Entwicklung der Experimentbehälter
- **64 Proben** auf der **ISS**
für Matthias Maurer



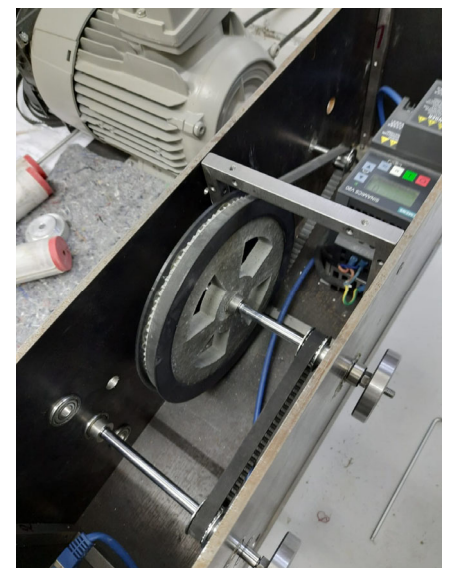
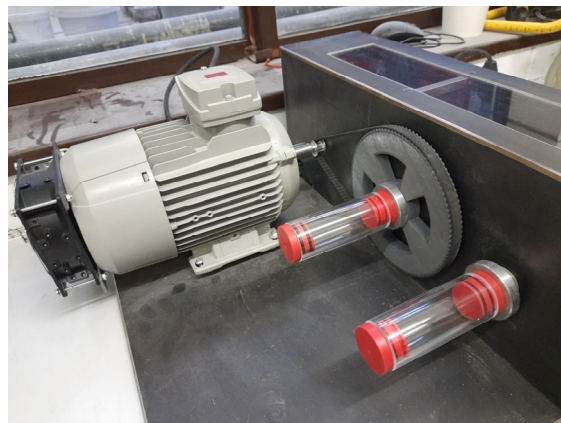
→ Patent angemeldet (IfM+DLR)

Ersteinsatz Klinostat: **Simulation der Betonerhärtung in Schwerelosigkeit auf der Erde, Projekt MASON**
(MAterial science on Solidification of cONcrete)
(MAterialforschung in Schwerelosigkeit an BetON)

Erstmals: Mischen eines Betons auf der ISS



Fotos: Müller; IfM



Agenturen: DLR, ESA, NASA; **Akkommodation:** Columbus Modul

Hardware: Univ. Duisburg-Essen, Univ. zu Köln und BIOTESC

Wissenschaft: Univ. Duisburg-Essen (Prof. M. Schnellenbach-Held), Univ. zu Köln (Prof. M. Sperl)

Anforderungen

- Entwicklung eines ‚Betonmischers‘ (Concrete Mixer)

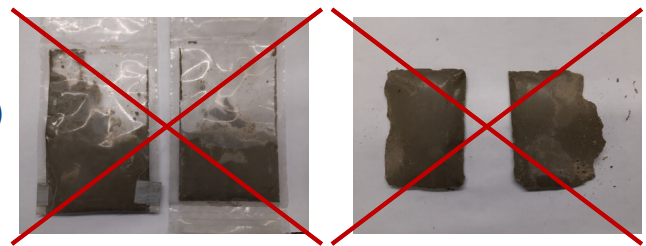
- Einhaltung aller Sicherheitsvorschriften
- leicht bedienbar auch für ungeschulten Astronauten

- Transparenz des Mischbehälters
Mischprozess soll sichtbar sein



- definierte Probengeometrie (Festbeton) – vergleichbare Auswertungen
Ø 30 mm, h = 50 mm

Beutel (Pouches)



Fotos: Müller; IfM

Beton unter Schwerelosigkeit MASON

Anforderungen

- Standardmischungen

- Zement / Sand / Wasser
- Zement / Regolith / Wasser
- teilweise Zugabe von
Fließmittel / Luftporenbildner

Regolith: mondähnliches Gestein

| Bezeichnung | Bindemittel | Zuschlag | Zusatzmittel | Zement | Wasser | Zuschlag | w/z | Kit |
|-------------|-------------------|-------------------------|-------------------|--------|--------|----------|------|-----|
| | OPC ¹⁾ | | | [g] | [g] | [g] | [-] | |
| R | CEM I 52.5 R | - | | 54 | 21,5 | 0 | 0,40 | 10 |
| R-SS | CEM I 52.5 R | CEN-Standard Sand (0/2) | | 17 | 11,5 | 51 | 0,68 | 9 |
| R-QS | CEM I 52.5 R | Quartz Sand H33 (0/0.5) | | 22 | 11 | 44 | 0,50 | 5 |
| R-R | CEM I 52.5 R | Regolith EAC-1A (0/1) | | 22 | 15,5 | 44 | 0,70 | 12 |
| R-SP | CEM I 52.5 R | - | SP ²⁾ | 54 | 15,5 | 0 | 0,29 | 19 |
| R-QS-SP | CEM I 52.5 R | Quartz Sand H33 (0/0.5) | SP ²⁾ | 22 | 8,5 | 44 | 0,39 | 11 |
| R-R-SP | CEM I 52.5 R | Regolith EAC-1A (0/1) | SP ²⁾ | 22 | 10,5 | 44 | 0,48 | 7 |
| R-AEA | CEM I 52.5 R | - | AEA ³⁾ | 54 | 21 | 0 | 0,39 | 18 |
| R-QS-AEA | CEM I 52.5 R | Quartz Sand H33 (0/0.5) | AEA ³⁾ | 22 | 11 | 44 | 0,50 | 14 |
| R-R-AEA | CEM I 52.5 R | Regolith EAC-1A (0/1) | AEA ³⁾ | 22 | 15 | 44 | 0,68 | 15 |
| N | CEM I 42.5 N | - | | 54 | 19 | 0 | 0,35 | 6 |
| N-SS | CEM I 42.5 N | CEN-Standard Sand (0/2) | | 17 | 11,5 | 51 | 0,68 | 2 |
| N-QS | CEM I 42.5 N | Quartz Sand H33 (0/0.5) | | 22 | 11 | 44 | 0,50 | 1 |
| N-R | CEM I 42.5 N | Regolith EAC-1A (0/1) | | 22 | 15,5 | 44 | 0,70 | 4 |
| N-SP | CEM I 42.5 N | - | SP ²⁾ | 54 | 15,5 | 0 | 0,29 | 20 |
| N-QS-SP | CEM I 42.5 N | Quartz Sand H33 (0/0.5) | SP ²⁾ | 22 | 8,5 | 44 | 0,39 | 17 |
| N-R-SP | CEM I 42.5 N | Regolith EAC-1A (0/1) | SP ²⁾ | 22 | 10,5 | 44 | 0,48 | 16 |
| N-AEA | CEM I 42.5 N | - | AEA ³⁾ | 54 | 19 | 0 | 0,35 | 13 |
| N-QS-AEA | CEM I 42.5 N | Quartz Sand H33 (0/0.5) | AEA ³⁾ | 22 | 11 | 44 | 0,50 | 4 |
| N-R-AEA | CEM I 42.5 N | Regolith EAC-1A (0/1) | AEA ³⁾ | 22 | 15 | 44 | 0,68 | 8 |

Mischungszusammensetzungen aller Proben

Stand der Arbeiten

- 64 Proben sind auf der ISS hergestellt (Anfang Februar 2022 von Matthias Maurer)
- Zeitgleich Herstellung von Proben identischer Zusammensetzung auf der Erde (1g und 0g)
- Warten auf Rückflug mit SpaceX25 im Juli 2022
- Rückkehr der Proben nach Europa / D ca. September 2022

→ Auswertung und Vergleich mit Klinostatproben



Beton unter Schwerelosigkeit MASON

Ersteinsatz: Klinostat

- Simulation der Schwerelosigkeit auf der Erde
- Klinostat: Apparat mit langsam drehenden Achsen, am Ende Platzierung von Versuchsobjekten



Foto: Müller; IfM

- Entwicklung aus der Biologie
→ keine Erfahrung in der Materialwissenschaft (Betontechnologie)



Foto: Schnellenbach-Held; IfM

- Im Klinostaten: Rotation des Frischbetons bis zur vollständigen Erhärtung



Ersteinsatz: Klinostat

- Frage:

Welche Umdrehungsgeschwindigkeit erzielt den Effekt der Schwerelosigkeit?

→ Herantasten durch mathematisch-physikalische Betrachtungen

→ Testläufe mit unterschiedlichen Umdrehungszahlen

→ Parallel Herstellung von Proben identischer Zusammensetzung unter Gravitation



Fotos: Müller; IfM



Fotos: Schnellenbach-Held; IfM

Beton unter Schwerelosigkeit MASON

Ersteinsatz: Klinostat

- Erste Erkenntnisse:

- Verminderte Sedimentation schwerer Partikel in Klinostatproben

- Luftporen treiben nicht an Probenoberseite

 - Erhöhter Luftporengehalt in der Matrix

- Endgültige Aussage / Vergleich erst nach Erhalt und Untersuchung der ISS-Proben

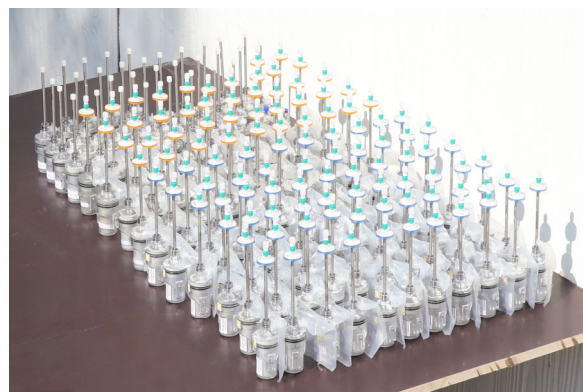
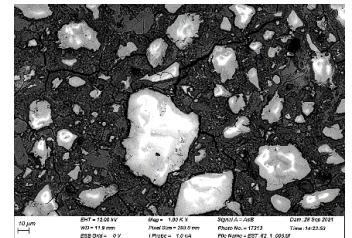
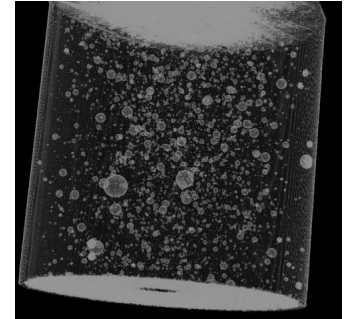


Foto: Müller; IfM

Ausblick: Untersuchungen (0g und 1g Proben)

- CT-Scans (LP-Verteilung in ganzer Zylinderprobe)
- Mikroskopie (Dünnschliffproben)
- Rasterelektronenmikroskopie
- Quecksilberdruckporosimetrie (LP-Erfassung $\geq 40 \mu\text{m}$)
- Ultraschall (Dichte, dynamischer E-Modul)
- Druckfestigkeitsprüfungen



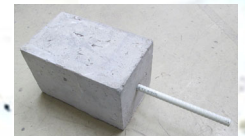
Fotos / Aufnahmen
Universität Duisburg-Essen, J. Müller /
Universität zu Köln, K. Tell

Innovative Betone – von der Multifunktionalität bis zur Optimierung unter Weltraumbedingungen

• Multifunktionaler Beton (HPAC)

→ Wärme, Schall, Brand, Luftreinigung

Ziel Einschalige Bauweise unter Gewährleistung der Tragfähigkeit und bauphysikalischen Eigenschaften, luftreinigend → **erreicht**



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

• Beton unter Schwerelosigkeit

→ Erkenntnisgewinn in der Erhärtungsphase des Betons

Ziele Nachhaltigkeit: Einsparpotentiale, effektiverer Einsatz

Exploration: Bauen auf dem Mond

→ **Auswertungen** stehen noch aus,

Betonherstellung und – **erhärtung** funktioniert

