

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:

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

- 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 Hochleistungsaerogelbeton - 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 “Hochleistungsaerogelbeton - 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: $\lambda \approx 0.5 \text{ W/(mK)}$,

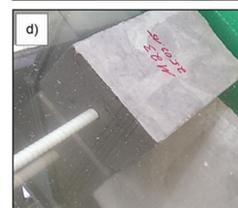
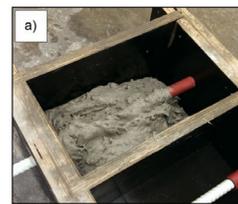
Stahl: $\lambda = 60 \text{ W/(mK)}$,

- Wärmeausdehnungskoeffizient:

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

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

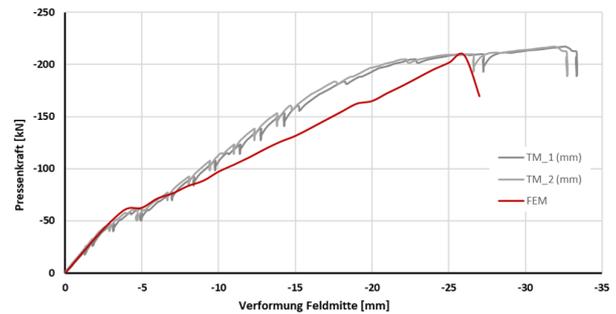
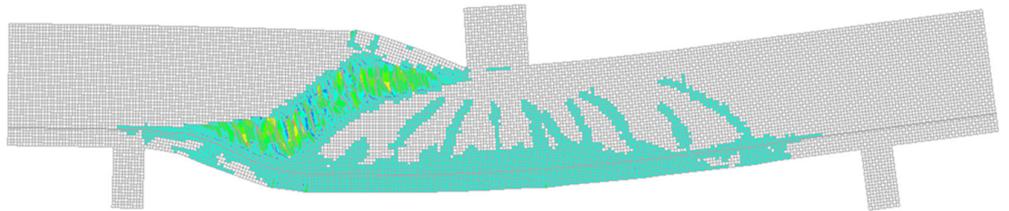
- Keine Korrosion.



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

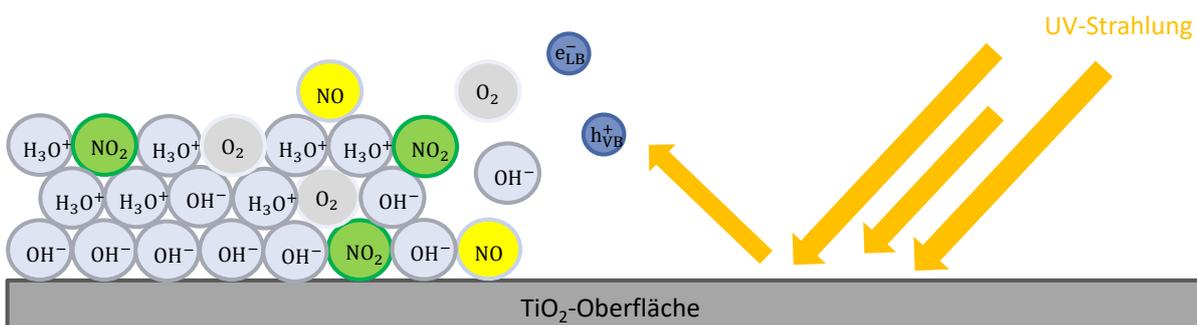


Fotos: Heidrich; IfM

Multifunktionaler Hochleistungsaerogelbeton - HPAC

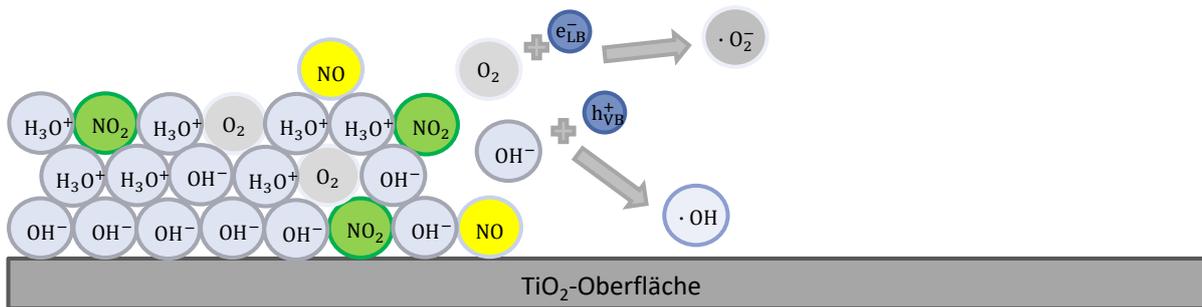
Reduzierung von Schadstoffen (Stickoxiden) in der Umwelt durch Einsatz des Photokatalysators Titandioxid (TiO₂-Photokatalyse)

- 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

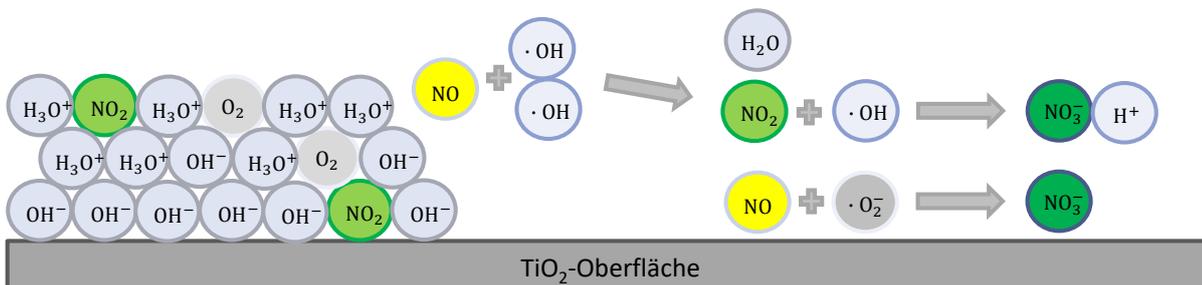
- Photoelektronen und Elektronenleerstellen reagieren mit den Sauerstoff- (O₂) und Hydroxidmolekülen (OH⁻)
- Bildung von radikalischen Hyperoxidanionen ($\cdot\text{O}_2^-$) und Hydroxylradikalen ($\cdot\text{OH}$)



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

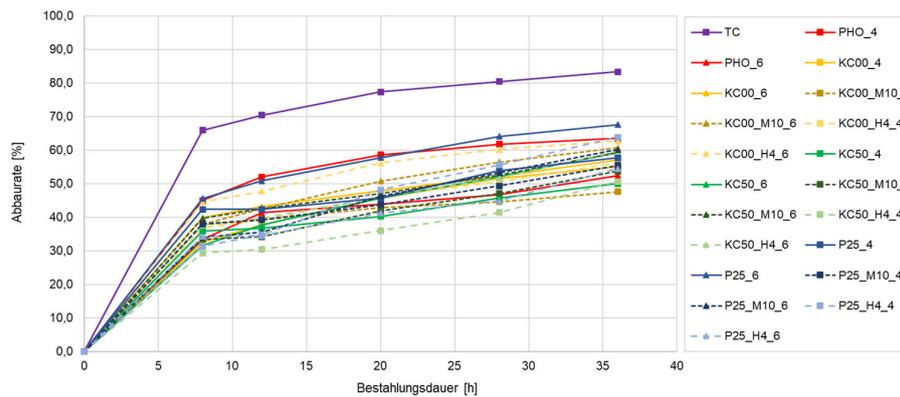


Abbau nach 8 Stunden



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



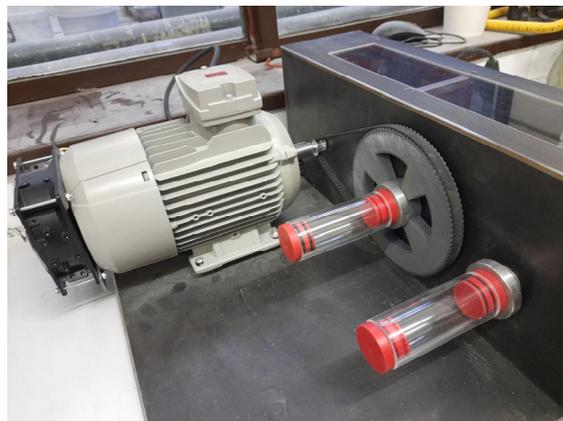
→ Patent angemeldet (IfM+DLR)

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

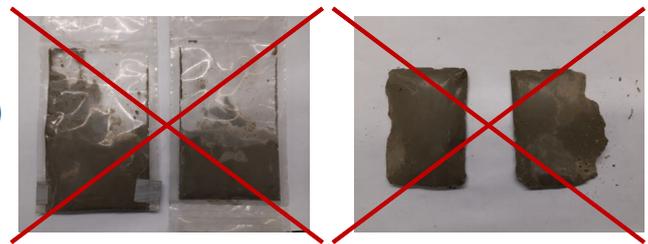
Wissenschaft: Univ. Duisburg-Essen (Prof. M. Schnellenbach-Held), Univ. zu Köln (Prof. M. Sperl)

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

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

Ersteinsatz: Klinostat

- Erste Erkenntnisse:

- Verminderte Sedimentation schwerer Partikel in Klinostatproben

- Luftporen treiben nicht an Probenoberseite

 - Erhöhter Luftporengehalt in der Matrix

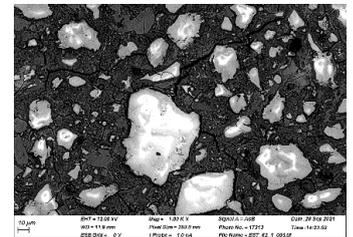
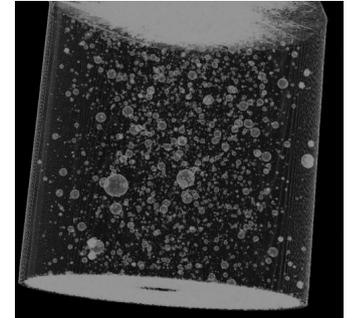
- Endgültige Aussage / Vergleich erst nach Erhalt und Untersuchung der ISS-Proben



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

