INSTITUT FÜR TECHNIKFOLGEN ABSCHÄTZUNG
ÖSTERREICHISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
NANOTRUST DOSSIER 72
Oktober 2026

Technisch hergestellte Nanomaterialien als Betonadditive

Ein Überblick

Gudrun Lettner*, Jean Schmitt

Zusammenfassung

Dieses NanoTrust-Dossier gibt einen systematischen Überblick über den Einsatz technisch hergestellter Nanomaterialien (Engineered Nanomaterials, ENMs) als funktionale Zusatzstoffe in Zement und Beton. Während konventioneller Beton zwar hohe Druckfestigkeit aufweist, aber auch spröde und anfällig gegenüber korrosiven Angriffen ist, führt die gezielte Beimischung nanoskaliger Partikel zu grundlegenden Gefügeverbesserungen: Additive wie Nanosiliziumdioxid, Nanocalciumcarbonat oder Nanoton wirken als „Mikrofiller" und Nukleationskeime. Sie verfeinern damit die Porenstruktur und steigern mechanische Belastbarkeit und Beständigkeit signifikant. Lichtreaktives (photokatalytisches) Nanotitandioxid verleiht Oberflächen selbstreinigende und schadstoffneutralisierende Eigenschaften. Kohlenstoffbasierte Materialien wie Carbon Nanotubes und Graphen erhöhen die Zugfestigkeit und erzeugen elektrische Leitfähigkeit, die smarte Funktionen wie Bauwerksüberwachung oder Selbstbeheizung ermöglicht. Trotz hohem Potenzial zur Zementeinsparung und CO_2-Reduktion stehen einer breiten Marktdurchdringung im konventionellen Hoch- und Tiefbau allerdings derzeit vor allem hohe Materialkosten sowie Herausforderungen bezüglich einer möglichst gleichmäßigen Partikelverteilung entgegen.

** Korrespondenzautorin*

Einleitung

Beton bezeichnet einen Baustoff, der aus einem Bindemittel (im Allgemeinen Zement), Gesteinskörnung und Wasser besteht. Je nach Anwendungsgebiet und erwünschten Eigenschaften werden Zusatzmittel wie Fließmittel, Stabilisierer oder (Reaktions-)Verzögerer zugesetzt. Klassischer Beton zeichnet sich durch hohe Druckfestigkeit, jedoch auch Sprödigkeit bei Zugbelastung sowie eingeschränkte plastische Verformbarkeit bei Druckbelastung aus. Er ist widerstandsfähig gegenüber Umwelteinflüssen, nicht brennbar und dauerhaft, jedoch anfällig für chemische Angriffe und Frosteinwirkung. Mit der Einarbeitung technisch hergestellter Nanomaterialien (ENMs, *Engineered Nanomaterials*) in Beton kann mitunter eine signifikante Verbesserung der mechanischen, thermoresistenten sowie der Verarbeitungseigenschaften erreicht werden. Dieses NanoTrust-Dossier gibt einen Überblick über solche ENMs, ihre eigenschaftsoptimierenden Funktionen sowie ihre Anwendungsgebiete.

Nanosiliziumdioxid (Nano-SiO_2)

Siliziumdioxid-Nanopartikel verfügen über herausragende puzzolanische Eigenschaften, also der Ausbildung von wasserunlöslichen Verbindungen bei Zugabe von Wasser und Calciumhydroxid. Dadurch tragen sie maßgeblich zur Härtung und Festigkeit von Beton bei. Sie fungieren als Füllstoffe für kleinste Leerstellen, bilden homogene Cluster von Calciumsilikathydraten (CSH) und reduzieren so die Poren der Zementmatrix.[1] Dadurch erhöhen sich Biege-, Zug- und Druckfestigkeit. Zusätzlich zeigt sich eine erhöhte Beständigkeit gegenüber chemisch hochreaktiven Substanzen wie Ammoniumnitrat oder Salzsäure. Durch diese Eigenschaftsverbesserungen verringern sich Ermüdungserscheinungen im Beton, die durch Auslaugung von Calciumionen entstehen.[1,2] Nano-SiO_2 fördert zudem die Beständigkeit gegenüber Temperaturschwankungen. Beschädigungen durch Frost-Tau-Zyklen treten ebenso weniger häufig auf wie Risse oder Abplatzungen bei großer Wärme oder Kälte.[3] Die allgemeine Verarbeitbarkeit verbessert sich, während sich die Abbindezeit bei gleichzeitig erhöhter Bindungsstärke verringert.[4]

Wie und in welchem Ausmaß sich diese positiven Effekte zeigen, ist maßgeblich von der Dosis abhängig. Bereits ab 0,7 % Nanosilziumdioxid im Zementmaterial lässt sich eine signifikante Verbesserung der Druckfestigkeit beobachten. Der optimale Anteil bewegt sich, abhängig vom Verhältnis Wasser zu Bindemittel (w/b-Wert), zwischen 2 % und 4 %.[1,3,5]

Vorsicht ist geboten, wenn das feste Nano-SiO_2 nicht ausreichend in der flüssigen Betonmatrix verteilt (dispergiert) wird, was nach wie vor eine Herausforderung darstellt. In diesem Fall besteht die Gefahr der Ausbildung von Löchern und Schwachstellen. Der schlechteren Verarbeitbarkeit kann durch Einsatz von bspw. Polycarboxylaten als Fließmittel entgegengewirkt werden.[2]

Glossar

Photokatalyse ..... chemische Reaktion unter Anwesenheit von UV-Strahlung und eines Katalysators (z. B. TiO_2);
Puzzolane ..... natürliche oder künstliche Gesteine, die in der Lage sind, durch Wasserzugabe eine chemische Reaktion mit Calciumhydroxid einzugehen und dadurch Hydrate zu bilden; maßgeblicher Beitrag zur Härtung und Festigkeit von Beton;
Hydratation ..... durch Kontakt von Wasser und Zement ausgelöste exotherme Reaktion, die zur Ausbildung stabiler, wasserunlöslicher Verbindungen (Calciumsilikathydrate, CSH) führt;
Dispergieren ..... gleichmäßiges bzw. (Fein-)Verteilen von Partikeln (ENMs) in einer flüssigen Phase (Wasser);
Nukleationskeim .. Partikel, das als Auslöser für einen Phasenübergang erster Ordnung (hier: Kristallisation) dient.

Ein frühes Anwendungsbeispiel ist die Gärtnerplatzbrücke über die Fulda in Kassel. Durch den Einsatz von Hochleistungsbeton (UHPC, *Ultra High Performance Concrete*) – einer Betonart, die als wichtigsten Zusatzstoff Nano-SiO_2 enthält – konnte eine insgesamt 133 Meter lange Brücke von besonders schlanker Architektur ohne den Einsatz von Bewehrungsstahl realisiert werden. Die üblicherweise voluminöse und kostenintensive Stahlkonstruktion wurde durch die Zugabe feinster Metallfasern kompensiert.[6,7]

Nanotitandioxid (Nano-TiO_2)

Titandioxid (TiO_2) ist aufgrund seines außergewöhnlich hohen Brechungsindexes und der daraus resultierenden Färbe- und Deckkraft das bedeutendste Weißpigment weltweit. Hinzu kommt, dass es preiswert, chemisch weitgehend stabil (inert) und lichtbeständig ist. Im Bauwesen wird nicht-nanoskaliges TiO_2 für Anstriche, Putze sowie als Schutzauftrag verwendet. Die lange Haltbarkeit und Witterungsbeständigkeit, die durch den Einsatz von TiO_2-Partikeln erzielt werden, tragen wesentlich zur Verbesserung der Umweltbilanz der betreffenden Gebäude bei. Kunststoffkonstruktionen können ebenso vor lichtbedingter Alterung geschützt werden wie Betonbauteile vor Überhitzung: Durch das herausragende Lichtreflexionsvermögen können mit TiO_2 versetzte Anstriche Wärmestaus in Gebäuden reduzieren und in weiterer Folge den „städtischen Wärmeinseleffekt", der mit dem Voranschreiten des anthropogenen Klimawandels immer mehr Menschen betrifft, signifikant eindämmen.[8]

Als ENM-Additiv in der Betonherstellung werden vorwiegend seine Selbstreinigungs- und lichtreaktiven Eigenschaften genutzt. Versuche an mit Nano-TiO_2 versetztem Beton zeigten optimale Ergebnisse hinsichtlich lichtinduzierter (photokatalytischer) Selbstreinigung bei einer Zugabe von 2 % TiO_2-Nanopartikeln mit einer Partikelgröße zwischen 15-35 nm.[9] Luftschadstoffe wie Stickoxide, Kohlenmonoxid oder flüchtige organische Verbindungen (VOCs, *Volatile Organic Compounds*) werden in Anwesenheit von Licht, genauer gesagt durch Reaktion mit UV-Strahlung, gespalten, mithilfe von bspw. Calciumhydroxid aus der Betonmatrix zu (Calcium-)Nitrat umgewandelt, und durch Regenwasser (oder Reinigung) abgewaschen.

Diese Eigenschaft trägt nicht nur zu einer besseren Luftqualität bei, sondern bewahrt auch die ästhetische und strukturelle Integrität der Gebäude. Gerade für Gebäude in urbanen Bereichen mit hoher Luftverschmutzung, die ansonsten regelmäßiger und aufwendiger Sanierungsmaßnahmen bedürfen, ist das ein enormer Vorteil. Darüber hinaus mindert die Zugabe von Nano-TiO_2 die Anfälligkeit gegenüber korrosiven zersetzend wirkenden (korrosiven) Stoffen wie Chloriden und Sulfaten, wodurch sich die Dauerhaftigkeit von Betonkonstruktionen unter ungünstigen Umweltbedingungen (z. B. in Küstenregionen) erhöht und das Risiko der Korrosion von Bewehrungsstahl verringert.[2–4] Eine spezifische Eigenheit von Nano-TiO_2 als Betonadditiv ist, dass es die Abschirmung von und damit die Schutzwirkung gegenüber Gammastrahlen verbessert, was es für den Einsatz in Nuklearanlagen, Einrichtungen für Strahlentherapie und anderen Konstruktionen, die erhöhter Strahlenbelastung ausgesetzt sind, prädestiniert.[10]

Die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften ist ein (positiver) Nebeneffekt, der ebenfalls auf Fülleffekten und der Verringerung der Porosität beruht. Alleine zum Erzielen dieser Effekte ist Nano-TiO_2 jedoch bei Weitem zu teuer, weshalb das Hauptargument für seinen Einsatz vorrangig auf den erwähnten photokatalytischen Eigenschaften beruht. In der Praxis findet mit Nanotitandioxid versetzter Beton Anwendung im Tunnelbau, bei Fassaden sowie in Gehsteigen.[11]

Kohlenstoffnanoröhren (Carbon Nanotubes, CNTs)

CNTs werden vorrangig aufgrund ihrer herausragenden mechanischen Eigenschaften eingesetzt. Hinsichtlich der Druck-, Zug- und Biegefestigkeit lassen sich Performancesteigerungen um bis zu 30 % erzielen. Ausschlaggebend dafür sind die durch CNTs verursachten Mechanismen wie Porenverdichtung, das Verschließen von Mikrorissen sowie die Verdichtung der Hydratationsprodukte.[12] Besonders bemerkenswert ist die mögliche Steigerung der Duktilität von Betonbalken, also der plastischen Verformbarkeit, bevor es zu einem Bruch kommt: Diese konnte durch den Einsatz von CNTs um bis zu 150 % erhöht werden. Bezüglich Volumenminderung können CNTs sowohl das frühe als auch das Langzeitschwinden positiv beeinflussen.[2]

Multifunktionaler zementgebundener Verbundwerkstoff (MCCs, *Multifunctional Cementitious Composites*) vereint die fortgeschrittenen mechanischen Attribute mit funktionalen Eigenschaften. Ausschlaggebend dafür ist die elektrische Leitfähigkeit, mit der der (eigentliche) Isolator Beton durch die Zugabe von leitfähigen Füllstoffen ausgestattet wird. Diese Füllstoffe, zu denen neben CNTs bspw. Carbonfasern, Graphen oder Carbon Black (nanoskaliger Industrieruß) zählen, sorgen für die Abnahme des elektrischen Widerstands in der Betonmatrix.

Vielversprechende Anwendungsfelder für MCCs finden sich etwa im Bereich der intelligenten Gebäude bzw. Infrastruktur (*smart infrastructure*) in drei Formen – Selbstdiagnose, selbstheizende Eigenschaften oder Energieautarkie – die in der Folge dargestellt werden.

Selbstdiagnose *(self-sensing)*

Wie auch die anderen im Folgenden besprochenen Eigenschaften beruht die Selbstdiagnose auf dem piezoelektrischen Effekt, also der Fähigkeit bestimmter Materialien, unter Einfluss von mechanischem Stress eine elektrische Spannung zu erzeugen. Dieser mechanische Stress, der mechanische Belastung ebenso inkludiert wie Änderung der Umweltbedingungen, wird üblicherweise mittels in den Beton eingebetteter Elektroden, aber ohne den Einsatz von zusätzlichen Sensoren direkt erfasst. Das Monitoring bezieht sich nicht nur darauf, dass ein Schaden vorliegt, sondern auch auf dessen Lokalisierung, Schweregrad sowie die zu erwartende verbleibende Lebensdauer der Konstruktion.[13,14]

Selbstheizende Eigenschaften *(self-heating)*

Durch die Umwandlung elektrischer Energie in Wärmeenergie kann Beton ohne externe Wärmequelle beheizt werden. Diese Anwendung ist insbesondere für den Einsatz in kälteren Regionen interessant. Durch vereiste Gehsteige oder schneebedeckte Straßen wird das von ganz spezifischen Witterungsbedingungen abhängige Transportsystem der industrialisierten Länder immer wieder auf die Probe gestellt. Selbstheizende Konstruktionen können dabei als präventive und zugleich kosteneffiziente sowie umweltschonende Alternative zu Streusalz oder anderen Chemikalien dienen. Der Einsatz von selbstheizendem Beton wurde über mehrere Winter auf einem Testgelände am Flughafen Des Moines (Iowa, USA) erprobt und für vielversprechend befunden. Positive Effekte lassen sich auch abseits von Alternativen zur Schnee- und Eisentfernung feststellen. Bei niedrigen Temperaturen ist die verzögerte Erstarrungszeit ebenso eine Schwäche von konventionellem Beton wie die verringerte Stärke. Die Zugabe selbstheizender Zusatzmittel kann dazu beitragen, die gesamte Konstruktion innerhalb eines optimalen Temperaturbereichs zu halten. Durch ein Verhindern ständiger Auf- und Abtauzyklen kann darüber hinaus die Lebensdauer von Bauwerken verlängert werden.[13,14]

Energieernte und -autarkie *(self-powering)*

Im Gegensatz zur Selbstdiagnose wird hier die durch mechanische Reize erzeugte Spannung nicht genutzt, um ein Signal auszusenden. Vielmehr kann die als Nebenprodukt anfallende elektrische Energie direkt verwendet oder bspw. in Batteriespeichern gelagert werden. Damit würde nicht nur die Abhängigkeit von konventionellen Energiequellen wie fossilen Brennstoffen reduziert, sondern grundsätzlich die Energieautarkie von Gebäuden und anderen Betonkonstruktio-

nen gefördert. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von „smarten" Straßenbelägen. Die so durch mechanische Reize, wie den Druck durch das Gewicht von Fahrzeugen, erzeugte elektrische Energie kann bspw. direkt zum Betreiben von Ampeln oder Warnschildern entlang der Transportinfrastruktur verwendet werden.[13,14]

Natürlich bringt der Einsatz von CNTs als Additiv auch Schwierigkeiten mit sich. Hinsichtlich der Verarbeitbarkeit seien die Schwierigkeiten beim Dispergieren genannt. Carbonanotubes tendieren stark zur Agglomeration. Um dem zu begegnen, werden unterschiedliche Dispergiertechniken erforscht. Darunter fällt die Behandlung mit (Ultra-)Schallwellen zur gleichmäßigen Verteilung der Teilchen in der Flüssigkeit ebenso wie die Verwendung chemischer Zusätze wie oberflächenaktiver Substanzen.

Ein wesentlicher Faktor beim Einsatz von CNTs sind die relativ hohen Kosten der Röhrchen, insbesondere bei einer idealen Dosierung von rund 1 %. Mit Fokus auf die elektrische Leitfähigkeit wird daher auf einen Mix von Carbonfasern und CNTs zurückgegriffen, um eine kostengünstigere Variante bei (annähernd) gleichen mechanischen und elektrischen Eigenschaften zu erreichen.[2,13,14]

Graphen

Die Eigenschaften von Graphenen als Betonadditiv decken sich in vielerlei Hinsicht mit denen von Kohlenstoffröhren. Wie diese fungieren sie als Nukleationskeime und beschleunigen so den Hydratationsprozess, womit sie für ein schnelleres Erreichen der gewünschten Festigkeit sorgen. Graphen-Nanoplättchen (GNPs) zeigten dabei noch positivere Effekte auf die Festigkeit von Ultrahochleistungsbeton, da sie die kumulative Wärme effektiver erhöhen und dadurch den Hydratationsgrad noch weiter steigern als CNTs.[15] Graphene erhöhen ebenfalls die Zug-, Druck- und Biegezugfestigkeit, beschleunigen den Aushärtungsprozess, verhindern Entstehung und Wachstum von Mikrorissen und machen die Betonmatrix widerstandsfähiger gegenüber korrosiven Stoffen, wie Praxistests zeigten.[16]

Nanoaluminiumoxid (Nano-Al_2O_3)

Siliziumdioxid und Aluminiumdioxid sind die beiden Stoffe, die maßgeblich an der Hydratation von Zement beteiligt sind, wobei Al_2O_3 vorrangig die Abbindezeit beeinflusst. Der Zusatz von Nano-Al_2O_3 beschleunigt vor allem bei UHPC (Ultrahochleistungsbeton) die initiale Abbindezeit und trägt darüber hinaus dazu bei, Entmischung (Segregation) und Flockung zu vermeiden. Darüber hinaus erhöht sich bereits die anfängliche Druckfestigkeit.[17] [18,19]

Generell ist der Einfluss von Nano-Al_2O_3 auf die mechanischen Eigenschaften von Beton umfassend. Insbesondere in Kombination mit TiO_2 kann eine signifikante Steigerung von Zug-, Druck- und Biegefestigkeit erreicht werden.[1] Die Verbesserung der Dauerhaftigkeit, der chemischen Beständigkeit gegenüber korrosiven Stoffen sowie erhöhte Widerstandsfähigkeit gegenüber Temperaturschocks optimieren mit Nano-Al_2O_3 versetzte Betonstrukturen für den Einsatz in marinen oder industriellen Umgebungen, sowie in Gegenden mit hohem Verkehrsaufkommen (und folglich hoher Luftverschmutzung) für mechanische Belastung.[3,20,21]

Nanoton

Nanoton zählt wie Nanocalciumcarbonat zu den kostengünstigsten nanoskaligen Additiven. Ebenso wie dieses beschleunigt Nanoton die Zementhydratation und verfeinert durch den Füllereffekt die Porenstruktur bei gleichzeitiger Verringerung der Porosität. Neben der allgemeinen Verbesserung von Robustheit und Dauerhaftigkeit, führt das zu einer Reduktion der Permeabilität (der Durchlässigkeit für andere Atome, Ionen etc.) und damit höherer Widerstandsfähigkeit gegenüber korrosiven Stoffen wie Chloriden. Dadurch eignet sich Nanoton als Betonadditiv optimal für Bereiche, in denen hoher mechanischer Stress, extreme Temperaturen oder starke chemische Belastungen zu erwarten sind. Die wärmeisolierenden Eigenschaften, die Nanoton mit sich bringt, reduzieren die erforderliche Heiz- und Kühlleistung und sorgen damit für mehr Kosten- und Energieeffizienz.[3,12,17,22]

Eine weitere Rolle spielt Nanoton durch Beeinflussung des Fließverhaltens. Insbesondere eine Verbesserung der Thixotropie (reversible Abnahme der Viskosität bei mechanischer Beanspruchung) tritt auf, was Nanoton für den Einsatz in 3D-Druck-Beton interessant macht. Die Aufbaufähigkeit, also die Fähigkeit des frischen Betons, ohne Kollaps sofort neu extrudierte Schichten zu tragen, konnte in Studien bei richtiger Dosierung (weniger als 1,3 %) um bis zu 150 % gesteigert werden.[23]

Nanocalciumcarbonat (Nano-$CaCO_3$)

Durch die Kombination aus Kosteneffizienz und Verfügbarkeit ist Nano-$CaCO_3$ das am häufigsten verwendete Nanomaterial unter den Betonzusatzstoffen. Die Kosten betragen nur etwa 1/10 derer für Nanosiliziumdioxid. Neben diesem herausragenden ökonomischen Vorteil weist Nano-$CaCO_3$ wesentliche mechanische Eigenschaften auf. Als Nukleationskeim beschleunigt es den Hydratationsprozess und sorgt dabei für eine dichte Packung der Produkte dieses Prozesses. Als physikalischer Füllstoff verringert es die Porosität der Matrix und erhöht die Strukturdichte. Das Ergebnis spiegelt sich in Steigerung der Druck- und Zugfestigkeit, verringertem Schwinden, Eindämmen von Mikrorissen sowie geringer Anfälligkeit gegenüber korrosiven Stoffen wider.[12,24] Auch außerhalb seiner nanoskaligen Form fällt Calciumcarbonat eine wichtige Rolle in Zusammenhang mit selbstheilendem Beton zu. Durch Zugabe von Bakterien kann die Ausfällung von Nano-$CaCO_3$ zur Schließung von Mikrorissen angeregt werden.[18]

Hinsichtlich umweltrelevanter Vorteile wird an Nanocalciumcarbonat in zwei Richtungen geforscht: einerseits an der Bindung von CO_2 aus der Zementproduktion durch die Synthese zu $CaCO_3$, andererseits an der Anwendung von Nano-$CaCO_3$ in umweltfreundliche Portlandzementalternativen.

Weitere Überlegungen betreffen die Substitution von Flugasche durch Nano-$CaCO_3$. Obgleich Flugasche dank ihrer leistungs- und dauerhaftigkeitssteigernden Eigenschaften seit beinahe einem Jahrhundert als Zementersatz (SCM, *Supplementary Cement Material*) in der Betonproduktion verwendet wird, kann die ausreichende Verfügbarkeit qualitativ (ausreichend) hochwertigen Materials nicht als gesichert angenommen werden. Durch die Umstellung der Energieerzeugung auf nachhaltige und umweltfreundliche Alternativen fallen große Mengen Flugasche als Nebenprodukt in Kohlekraftwerken weg. Darüber hinaus wird dem Verbrennungsgas Ammoniak zugesetzt, um Emissionen von Stick- und Schwefeloxiden sowie Quecksilber auf das vorgegebene Ausmaß zu begrenzen. Das führt ebenso wie der Einsatz von Kohle aus Flusseinzugsgebieten (*river basin coal*) zu einem Qualitätsverlust der Flugasche. Nano-$CaCO_3$ kann nicht nur diese Limitationen umgehen, sondern zeigt auch im Vergleich zu mit Flugasche versetztem Beton signifikant gesteigerte mechanische Eigenschaften, Frost-Tau-Beständigkeit und geringere Permeabilität, was es als verlässlichen Ersatz qualifiziert.[25]

Nanocellulose

Nanocellulose ist in erster Linie durch die Positionierung als „grünes Material", das erneuerbar und biokompatibel ist und dadurch eine nachhaltige Alternative zu konventionellen Nanoadditiven bieten kann, in den Fokus des Interesses gerückt. Die mechanischen Eigenschaften werden als durchaus interessant eingestuft, insbesondere in Hinblick auf die Biegezugfestigkeit. In Versuchen konnte eine Steigerung dieser um bis zu 50 % bei Zugabe von 5 % Nanocellulose nachgewiesen werden.[17] Versuche, Cellulose-Nanokristalle (CNCs) als Zusatzmittel in zementhaltige Verbundwerkstoffe für den 3D-Betondruck ein-

zusetzen, ergaben ebenfalls eine erhöhte Biegefestigkeit, weniger Extrusionsdruck, sowie einen erhöhten Hydratationsgrad.[23]

Das Interesse an Nanocellulose als Betonadditiv beruht nicht zuletzt auf den allumfassend verfügbaren Ausgangsstoffen (und damit einhergehend geringeren Kosten, z. B. durch Gewinnung aus Biomasseabfällen). Gegenwärtig gibt es aber noch viele offene Fragen, wie etwa potenzielle Umweltdegradation oder beeinträchtigte thermische Stabilität.[17]

Beispiele für kommerzielle Anwendung

Die zahlreichen Vorteile, die sich durch die Anwendung von ENMs als Betonadditive ergeben, werden bislang hauptsächlich im Labormaßstab und bei Pilotprojekten oder Spezialanwendungen sichtbar. Neben den Abschätzungen zur Verwendung, die sich aus der Sichtung wissenschaftlicher Publikationen und einschlägiger Literatur ergibt, sind Herstellerangaben ein wichtiger Indikator für den technologischen Reifegrad (TRL, *Technology Readiness Level*). Hersteller spezifischer Produkte aus dem Bereich ENM-verstärkter Beton bewerben v. a. die herausragenden mechanischen Eigenschaften, die Möglichkeit zur Herstellung von Hochleistungsbetonen, aber auch völlig neuartige Materialkombinationen. Gerade im deutschsprachigen Raum finden sich allerdings wenige Produzenten, die explizit mit der Verwendung von synthetisch hergestellten Nanomaterialien als Zusatzmittel in ihren Betonprodukten werben.

ENMs in der Betonmatrix

Das gezielte Einbringen nanoskaliger Teilchen verändert die Packungsdichte und die chemische Reaktivität des Zementsteins grundlegend. Produkte wie der *Dyckerhoff NANODUR Compound 5941* bieten Premiumzement mit nanoskaliger Kieselsäure als Additiv.[26] Durch die Kombination mit feinstem Quarzsand lassen sich dank der außergewöhnlichen puzzolanischen Eigenschaften von **Nano-SiO_2** und der daraus resultierenden hohen Packungsdichte ultrahochfeste Betone herstellen, die sogar in konventionellen Mischanlagen verarbeitet werden können.

Stanford Advanced Materials (SAM), ein „US-amerikanischer Lieferant von über 10.000 fortschrittlichen Materialien“ [27], vertreibt **Nanocalciumcarbonat (Nano-$CaCO_3$)**. Unter den vom Unternehmen aufgelisteten Anwendungsmöglichkeiten finden sich neben Papierherstellung und pharmazeutischen Produkten auch explizit Baumaterialien. Beworben wird Nano-$CaCO_3$ damit, dass es u. a. die Druckfestigkeit und Haltbarkeit von Zement oder Beton verbessert.

Unternehmen, die in ihrer Onlinepräsenz bereitwillig über die Verwendung von **Graphenen** als Betonzusatz informieren, finden sich bspw. auf der iberischen Halbinsel oder in Großbritannien. Die spanische *Graphenano Group* vertreibt über *Graphenano SmartMaterials* die Produktlinie *Solid MECHANIC*. Diese beinhaltet Zusätze auf Graphenbasis, die in erster Linie als Fließmittel (Betonverflüssiger) angeboten werden. Sie sollen die Herstellung von Hochleistungsbeton oder selbstverdichtendem Beton (SCC, *Self Compacting Concrete*) mit verbesserten mechanischen und Oberflächenfähigkeiten sowohl für die Anwendung in Betonmischanlagen als auch für Transportbeton ermöglichen.[28]

Das britische Startup *Concretene* setzt bewusst auf nachhaltige Gewinnung des Graphenmaterials, indem es Nanoteilchen aus Abfallströmen nutzt. Das Unternehmen verspricht Performancesteigerungen von 15-30 % bei gleichzeitig signifikanter Reduktion des benötigten Zements und damit verbundenen reduzierten CO_2-Emissionen. Das mit *Concretene*-Additiven versetzte Produkt ist ebenfalls für die Anwendung in Mischanlagen sowie für Transportbeton geeignet. Erste großskalige Anwendungen finden sich im Infrastrukturbau, bspw. zur Errichtung von Eisenbahnschwellen im Auftrag der britischen Regierung. Aktuell bereitet das Unternehmen die Kommerzialisierung der Graphen-Additive vor.[29]

Ebenfalls Wurzeln im Vereinigten Königreich hat *Graphene Innovations Manchester* (GIM), die neben anderen graphenbasierten Produkten *GIM concrete* als eine neue Generation von Beton bewerben. Dieser funktioniert ohne Wasser oder Zement, wodurch zwei der Hauptumweltproblematiken der Betonherstellung – Kohlendioxidemissionen bei der Zementproduktion und Wasserknappheit (nicht nur) im Globalen Süden – adressiert werden. Die Hersteller versprechen erheblich beschleunigte Aushärtung innerhalb eines Tages, Gewichtsreduktion von bis zu 30 %, sowie Festigkeitssteigerungen um ein Vielfaches im Vergleich zu herkömmlichem Beton. Darüber hinaus ist *GIM concrete* in einer umfangreichen Farbpalette von Blau- und Grünschattierungen bis hin zu Rottönen verfügbar.[30]

2023 unterzeichnete *GIM Ltd.* ein Abkommen mit dem Ministerium für Energie und Infrastruktur der Vereinigten Arabischen Emirate zur Herstellung von ressourcenschonendem, (weitgehend) wasser- und zementfreiem Beton in den VAE. Dem ging ein Vertrag mit *Quazar Investment Company* zur Produktion nachhaltiger und umweltfreundlicher Graphenerzeugnisse mit einem Investitionsvolumen von mehr als 1 Mrd. US-$ voraus.[31,32]

Kohlenstoffnanofasern in Ultrahochleistungsbeton (UHPC)

Das 2011 in Singapur gegründete Unternehmen *ceEntek* zählt zu den globalen Marktführern im Bereich UHPC. Die Marktgröße für diese Betonsorte lag Schätzungen zufolge 2025 bei rund 460 Mio. US-$, bei einer angenommenen Erhöhung auf 760 Mio. US-$ bis zum Jahr 2034.[33,34] Unter dem Handelsnamen „UHPC2.0“ vertreibt *ceEntek* selbstverdichtenden Ultrahochleistungsbeton mit Kohlenstoffnanofasern, der sowohl als Fertig- als auch Transportbeton erhältlich ist. Hervorgehoben werden neben Dauerhaftigkeit, Frost-Tau-Beständigkeit und Abriebfestigkeit die erheblich verkürzte Dauer bis zum Erreichen einer signifikanten Frühfestigkeit (sechs Stunden im Vergleich zu 28 Tagen bei konventionellem Beton). Letztere spielt etwa beim Ersatz von Brücken eine entscheidende Rolle. Neben Infrastruktur wie Brücken, Strommasten oder erschütterungsresistenten Gebäuden, eignet sich UHPC für verschiedene Offshore-Anwendungen wie Windparks.[35]

ENMs und „Grüner Beton“

Die erheblichen CO_2-Emissionen, für die die globale Zement- und Betonindustrie verantwortlich zeichnet, lässt Unternehmen und Initiativen, die auf nachhaltigen Beton setzen, in den Fokus rücken.

Der ehemalige Düngemittelhersteller *Argo Living Soils* setzt mit *Argo Green Concrete Solutions* auf die kolportierte Nachfrage nach umweltfreundlichem Baumaterial, die sich aus der Kombination von Bewusstsein für den ökologischen Fußabdruck, EU Green Deal und den erwarteten Wiederaufbau der Ukraine ergeben soll. Durch die geplante Kooperation mit der indonesischen *AGIC* wird die Produktion von Bio-Graphen basierend auf Biomasseabfälle angestrebt. Durch die so hergestellten Graphenplättchen verspricht *Argo* ultrahochfesten Beton mit 50 % weniger Verbrauch von konventionellem Zement, signifikant erhöhte Wasserresistenz und gesteigerte Dauerhaftigkeit.[36,37]

Einen anderen Weg kündigte *Evonik* an. Das Unternehmen setzte im Projekt *WallCraft* auf die Entwicklung und Kommerzialisierung von selbstheilendem Beton mithilfe von Bakterien. Die Mischung aus natürlichen Mikroben – im Speziellen *Bacillus subtilis* –, Nährstoffen für die Bakterien und oberflächenaktiven Inhaltsstoffen sorgt im Festbeton dafür, dass Reparaturmechanismen ausgelöst und damit Risse und Poren verschlossen werden. Durch die selbstheilenden Eigenschaften und die dadurch verringerten Instandhaltungsmaßnahmen eignet sich dieser Baustoff bspw. für die Anwendung in Wasserre-

servoirs, Dämmen, Brücken oder Tunneln. Die Vermarktung von *WallCraft* durch *Evonik* erfolgt unter dem Produktnamen *SITREN Self-Heal*.[38-40]

ENMs für Reparaturen und Oberflächenschutz

Auch in der Instandsetzung haben sich nanoskalige Additive etabliert, wobei der Fokus oft auf der verbesserten Haftung und der Kapillarwirkung liegt.

Das Baustoffunternehmen *Sika* bietet mit Produkten wie dem *Nanocret* Reparaturmörtel oder dem *Nanorapid* Fliesenkleber „Nanotechnologie für das Handwerk", wobei aus den Datenblättern nicht hervorgeht, ob „Nano" sich auf nanoskalige Additive oder auf Nanostrukturen in der Matrix bezieht. *Nanorapid* wird mit hoher Belastbarkeit und langer Korrigierzeit beworben, während sich *Nanocret* durch Witterungs- und Frosttausalzbeständigkeit, Beständigkeit gegenüber chemisch aggressiven Substanzen sowie hohe mechanische Belastbarkeit auszeichnen soll.[41,42]

Bei *Protectosil* der Firma *Evonik* handelt es sich um einen Fassadenschutz auf Basis von nanoskaligen Organosilanen. Diese dringen tief in die Bausubstanz ein und bewirken eine Hydrophobierung (wasserabweisende Imprägnierung) des Porengefüges, wodurch kein Wasser von außen in die Konstruktion eindringen kann.[43]

Situation in Österreich

Der Einsatz von technisch hergestellten Nanomaterialien in der österreichischen Bauindustrie wurde für dieses Dossier auf Basis systematisch erhobener Expert:inneninterviews ermittelt. Diesen Ergebnissen zufolge ist die Verwendung von ENMs als Zusatzmittel unter den großen Zement- und Betonherstellern in Österreich nicht üblich. Materialeigenschaften wie verringerte Porosität oder Dauerhaftigkeit könnten kostengünstiger auf anderem Wege erreicht werden. Der erzielte Nutzen würde in keinem Verhältnis zum finanziellen Mehraufwand stehen.

Für Spezialanwendungen wie etwa Beton mit CNTs, die Energieautarkie oder Selbstdiagnose ermöglichen, sind bspw. kleinere Ingenieursbüros die Ansprechpartner der Wahl, die sich für die Umsetzung dann wiederum an Betonproduzenten wenden. Da es sich aber noch um Nischenanwendungen handelt, ist in absehbarer Zeit nicht mit einem erhöhten Aufkommen von ENMs in österreichischen Betonkonstruktionen zu rechnen.

Fazit

Der gezielte Einsatz von technisch hergestellten Nanomaterialien verbessert nicht nur die mechanischen Eigenschaften, sondern transformiert Beton von einem rein strukturellen Baustoff zu einem hochleistungsfähigen, smarten und potenziell nachhaltigeren Verbundwerkstoff. Die wesentlichen Eigenschaftsoptimierungen führen zu einer Erhöhung der Lebensdauer von Infrastrukturbauten, zur Reduktion des CO_2-intensiven Zementanteils sowie zur Implementierung neuer Funktionalitäten wie automatischer Bauwerksüberwachung oder Schadstoffreduktion in Städten.

Dem enormen technischen Potenzial stehen jedoch signifikante Hürden gegenüber, die sich bereits beim Mischvorgang zeigen. Die Neigung nanoskaliger Partikel zur Agglomeration (insbesondere bei CNTs und Nano-SiO_2) erfordert aufwendige chemische oder physikalische Vordispergierverfahren, da andernfalls Clusterbildung zu Schwachstellen in der Betonmatrix führt. Darüber hinaus beschränken hohe Materialkosten den Einsatz derzeit primär auf Nischen-, Spezial- und High-End-Anwendungen.

Wie das Beispiel Österreich zeigt, verzichten große Baustoffhersteller im konventionellen Hoch- und Tiefbau bislang weitgehend auf ENMs als Betonadditive, da konventionelle Optimierungsmethoden wirtschaftlicher und für die geforderten Einsatzbereiche ausreichend sind. Technisch hergestellte Nanomaterialien können somit kurz- bis mittelfristig vor allem dort ihren festen Platz finden, wo außergewöhnliche mechanische Anforderungsprofile, smartes Monitoring oder gezielte Dekarbonisierungsansätze den finanziellen Mehraufwand rechtfertigen.

Aufbauend auf dem in diesem Dossier gebotenen Überblick werden sich zwei Folgedossiers mit den Auswirkungen von technisch hergestellten Nanomaterialien auf Umwelt und Gesellschaft beschäftigen und insb. Freisetzungsszenarien sowie Potenziale hinsichtlich Katastrophenresilienz thematisieren.

Anmerkungen und Literaturhinweise

1. L. Laím et al., Review: Effects of nanoparticles in cementitious construction materials at ambient and high temperatures, *Journal of Building Engineering*, 35, 102008, **2021**. doi: 10.1016/j.jobe.2020.102008.
2. H. Saleem et al., Recent Advancements in the Nanomaterial Application in Concrete and Its Ecological Impact, *Materials*, 14, 21, 6387, **2021**. doi: 10.3390/ma14216387.
3. N. Makul, *Dictionary of Concrete Technology*. Singapore: Springer Nature Singapore, **2025**. doi: 10.1007/978-981-97-2998-2.
4. G. Goel et al., The use of nanomaterials in concrete: A review, *Materials Today: Proceedings*, 69, 365–371, **2022**. doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.051.
5. D. E. Tobbala et al., Performance and microstructure analysis of high-strength concrete incorporated with nanoparticles subjected to high temperatures and actual fires, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22, 2, 85, **2022**. doi: 10.1007/s43452-022-00397-6.
6. Elo Beton, UHPC von Elo Beton, 2021. elo-beton.de/leistungsspektrum/uhpc (accessed 05.05.2026).
7. RKW, Nanotechnik und Bionik – Hightech in der Bauwirtschaft. RKW-Kompetenzzentrum, 2011. Nanotechnik_Bionik_Hightech_Bau_web_20111221.pdf.
8. TDMA, Titandioxid in der nachhaltigen baulichen Umwelt, *TDMA*, 2026. tdma.info/de/nachhaltigkeit/titandioxid-in-der-nachhaltigen-baulichen-umwelt/ (zuletzt abgerufen 13.10.2026).
9. Z. F. Akbulut, Influence of Nano-TiO_2 Particle Size on Fresh, Physical, Mechanical, Photocatalytic, and Cost Performance of Cement Mortars, *ACS Omega*, 11, 16, 24835–24850, **2026**. doi: 10.1021/acsomega.6c02257.
10. M. Mohtasham Moein et al., A Critical Review Examining the Characteristics of Modified Concretes with Different Nanomaterials, *Materials*, 17, 2, 409, **2024**. doi: 10.3390/ma17020409.
11. H. Witkowski et al., The Potential Risk of Nanoparticulate Release from Photocatalytic Pavement Concrete Surface Due to a Simulated Abrasion Load – An Experimental Study, *Materials*, 17, 12, 3022, **2024**. doi: 10.3390/ma17123022.
12. Q. Yang et al., A Review of the Effects of Nanomaterials on the Properties of Concrete, *Buildings*, 15, 13, 2363, **2025**. doi: 10.3390/buildings15132363.
13. M. J. Roshan and A. Gomes Correia, Multifunctional Cementitious Composites from Fabrication to Their Application in Pavement: A Comprehensive Review, *Applied Sciences*, 15, 7, 3451, **2025**. doi: 10.3390/app15073451.

14. C. Zhao et al., Toward intelligent buildings and civil infrastructure: A review on multifunctional concrete through nanotechnology, *Cement and Concrete Composites*, 163, 106165, **2025**. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2025.106165.

15. D.-Y. Yoo et al., Nanomaterials in ultra-high-performance concrete (UHPC) – A review, *Cement and Concrete Composites*, 134, 104730, **2022**. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104730.

16. Graphene Engineering Innovation Centre (GEIC), Building A Sustainable Future for Concrete with Concretene, Oct. 11, 2023. azonano.com/news.aspx?newsID=40513 (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

17. M. A. Macías-Silva et al., Nanomaterials in construction industry: An overview of their properties and contributions in building house, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100863, **2024**. doi: 10.1016/j.cscee.2024.100863.

18. G. F. Huseien et al., Sustainability of nanomaterials based self-healing concrete: An all-inclusive insight, *Journal of Building Engineering*, 23, 155-171, **2019**. doi: 10.1016/j.jobe.2019.01.032.

19. M. S. M. Norhasri et al., Applications of using nano material in concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 133, 91–97, **2017**. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005.

20. S. Barbhuiya et al., Advancements in nano-engineering of cement and concrete: a comprehensive review, *Emergent Materials*, **2025**. doi: 10.1007/s42247-025-01003-0.

21. K. Kishore et al., Technological challenges in nanoparticle-modified geopolymer concrete: A comprehensive review on nanomaterial dispersion, characterization techniques and its mechanical properties, *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02265, **2023**. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02265.

22. A. Jahami et al., Utilization of Nano Clay in Concrete: A Review of Mechanical, Durability, and Workability Properties, *ES Materials & Manufacturing*, **2024**. doi: 10.30919/esmm1333.

23. M. Razzaghian Ghadikolaee et al., Nanomaterials as Promising Additives for High-Performance 3D-Printed Concrete: A Critical Review, *Nanomaterials*, 13, 9, 1440, **2023**. doi: 10.3390/nano13091440.

24. Y. Wang et al., Rheology and mechanical properties of limestone calcined clay based engineered cementitious composites with nano $CaCO_3$, *Cement and Concrete Composites*, 157, 105923, **2025**. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2025.105923.

25. L. Poudyal et al., Nano Calcium Carbonate ($CaCO_3$) as a Reliable, Durable, and Environment-Friendly Alternative to Diminishing Fly Ash, *Materials*, 14, 13, 3729, **2021**. doi: 10.3390/ma14133729.

26. Dyckerhoff, Dyckerhoff NANODUR® Compound 5941. Dyckerhoff, Wiesbaden. [Online]. Available: dyckerhoff.com/NANODURCompound5941.pdf (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

27. SAM, Nano-Kalziumkarbonat (CaCO3)-Pulver (CAS-Nr. 471-34-1), *Stanford Advanced Materials*, 2026. samaterials.de/nano-calcium-carbonate-caco3-powder.html (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

28. Graphenano Smart Materials, Solid Mechanic – Graphenano Smart Materials, 2026. graphenanosmartmaterials.com/en/solid-mechanic/ (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

29. Concretene, Concretene – Home, 2026. concretene.co.uk/concretene-home (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

30. Giga Graphene Technologies, Our Products, 2023. gigagraphene.com/product (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

31. Graphene Innovations Manchester, Major UAE Deal – Graphene Innovations, 2023. grapheneinnovations.co.uk/major-uae-deal/ (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

32. World Construction Network, New agreement to develop sustainable GIM Concrete in UAE, *World Construction Network*, Dec. 13, 2023. worldconstructionnetwork.com/news/agreement-gim-concrete-development/ (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

33. ceEntek, ceEntek ranked at the top of the Important Key Players category within the Global UHPC Market, 2026. ceentek.com/update/ceentek-ranked-at-the-top-of-the-important-key-players-category-within-the-global-uhpc-market/ (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

34. Fortune Business Insights, Marktwachstum für Ultrahochleistungsbeton (UHPC), 2034, 2026. fortunebusinessinsights.com/de/markt-f-r-ultrahochleistungsbeton-uhpc--102954 (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

35. ceEntek, About UHPC, 2026. ceentek.com/about-uhpc/ (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

36. Argo Graphene Solutions Corp., Home – ARGO Graphene Solutions, Aug. 15, 2025. argographene.com/ (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

37. Kanza, Argo Launches Green Concrete Division in the USA for Sustainable Building Solutions, 2025. greenconcretenews.com/2025/02/green-concrete-argo-living-soils-corp.html (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

38. N. Garz, Die treibende Kraft, 2021. elements.evonik.com/projectwallcraft.html (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

39. T. Rademacher, Heilende Wände, 2021. elements.evonik.com/de/articles/2-2021/beton_conrete.html (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

40. Evonik, SITREN® Selfheal 455. evonik.com/en/products/ou/pr_52055310.html (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

41. Sika Österreich GmbH, PCI Nanorapid® Verformungsfähiger Fliesenkleber – PCI Österreich – PCI Augsburg GmbH, 2026. pci.at/de/produkte/pci-nanorapid (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

42. Sika Österreich GmbH, PCI Nanocret® R2 Leichter Reparaturmörtel – PCI Österreich – PCI Augsburg GmbH, 2026. pci.at/de/produkte/pci-nanocret-r2 (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

43. Evonik, Protectosil – Ihr Partner für den Bautenschutz. 2020. products.evonik.com/Protectosil.pdf. (zuletzt abgerufen 13.10.2026).

Danksagung

Die Autor:innen danken Florian Part vom Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) für die wertvollen Kommentare und Vorschläge

IMPRESSUM

Medieninhaber: Österreichische Akademie der Wissenschaften; Juristische Person öffentlichen Rechts (BGBl 569/1921 idF BGBl I 31/2018); Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, A-1010 Wien

Herausgeber: Institut für Technikfolgen-Abschätzung (ITA); Bäckerstraße 13, A-1010 Wien; www.oeaw.ac.at/ita

Erscheinungsweise: Die NanoTrust-Dossiers erscheinen unregelmäßig und dienen der Veröffentlichung der Forschungsergebnisse des Instituts für Technikfolgen-Abschätzung sowie seiner Kooperationspartner:innen im Rahmen des Projekts NanoTrust. Die Berichte werden ausschließlich über das Internetportal „epub.oeaw“ der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt: epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/

NanoTrust-Dossier Nr. 072, Oktober 2026: epub.oeaw.ac.at/ita/nanotrust-dossiers/dossier072.pdf

ISSN: 1998-7293

Dieses Dossier steht unter der Creative Commons (Namensnennung-NichtKommerziell-KeineBearbeitung 2.0 Österreich) Lizenz: creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/at/deed.de