Nano-1: Teil 1

Nanotechnologie:

Anwendungen in Architektur und Bauwesen

Zusammenfassung für eilige Leser

Datum: 21. Dezember 2009

Autoren: Pavel Trtik, Matthias Koebel, Claudia Som

Inhalt

1. Ziele des Projektes

2. Kurze Definition(en) der Nanotechnologie

3. Überblick über die Literatur der Nanotechnologie wie in der Projektvorgabe enthalten

3.1 Überblick in tabellarischer Form der Einschätzung der einzelnen Bereiche

3.2 Synoptischer Blick auf die Literaturübersicht

4. Zusammenfassungen der Kapitel 2 bis 5 aus dem ausführlichen Bericht

5. Vorschläge für die zukünftige Arbeit und Projekte

1. Zielvorgaben für das Projekt

Ein erstes Ziel des Projektes ist es, Gebiete der Nanotechnologie mit viel versprechenden Aussichten für die im Bauwesen verwendeten Baustoffe (dies gilt speziell für Hersteller von Zement- und Beton) aufzuzeigen. Ein weiteres Ziel des Projektes ist es, möglichst umfassende objektive bzw. kritische Einschätzungen der möglichen zukünftigen (positiven und negativen) Auswirkungen der Nanotechnologien auf Baumaterial zu sammeln, wobei der Fokus wiederum auf den Bereichen Zement und Beton liegt.

Die Möglichkeitsstudie (d.h. das Hauptergebnis dieses Projektes) soll einen Überblick über die im Bereich von Baumaterial eingesetzte Nanotechnologie geben und Möglichkeiten und Nutzen für den Einsatz der Nanotechnologie in der Zement- und Betonindustrie aufzeigen. Sowohl Vorteile als auch Risiken sollen untersucht werden.

Da die in dem Bericht enthaltenen Informationen eine Hilfe für die Entscheidungsfindung der Schweizer Zementindustrie für zukünftige Forschungsaktivitäten sein sollen, wurde er in zwei Abschnitte unterteilt – eine „Zusammenfassung für den eiligen Leser“ und ein tiefer gehender Bericht über ausgewählte Themen der Nanotechnologie und der Nanowissenschaften mit - nach Meinung der Verfasser des Berichts – Auswirkungen für die Zement- und Betonindustrie.

2. Kurze Definition(en) der Nanotechnologie

Die Definition des Begriffs Nanotechnlogie ist problematisch. Es herrscht wenig Einstimmigkeit darüber, was Nanotechnologie ist und welche Bereiche unter diesem gemeinsamen Oberbegriff vereint werden sollten.

Die Nanotechnologie ist Wirklichkeit (zu mindestens für einige akademisch im Nanomaßstab arbeitende Wissenschaftler). Eigenartig jedoch, dass einige dieser Wissenschaftler ihre Arbeit gar nicht Nanotechnologie nennen. Auch sind einige Aspekte von dem, was heute Nanotechnologie genannt wird, nicht neu (z.B. wurden Nanomaterialien schon in antiken Baustoffen wie Buntglas verwendet).

Auch wenn Richard Feynman wahrscheinlich der Vater der Technologie im Nanomaßstab genannt werden kann, so war es doch Taniguchi, der 1974 den Begriff „Nanotechnologie“ zum ersten Mal verwendete und sich dabei auf eine Produktionstechnologie bezieht „to get the extra high accuracy and ultra fine

dimensions, i.e. the preciseness and fineness in the order of 1 nm (nanometer) in length“. Dies kann als der „top-down“ Ansatz der Nanotechnologie bezeichnet werden. Im Gegensatz dazu steht der „bottom-up“ Ansatz, bei dem die Nanoteilchen (z.B. Atome) zu komplexeren Clustern zusammengesetzt werden. Ebenfalls hilfreich ist es zu erwähnen, dass einige Wissenschaftler den Begriff Nanotechnologie für etwas verwenden, das besser mit „Nanowissenschaft“ umschrieben werden sollte.

In einer möglichst breiten Auslegung kann die Nanotechnologie als Untersuchung und Kontrolle von Vorgängen und Materialien mit Längenmaßstäben unter 100 nm gesehen werden. Nanotechnologie könnte aber auch als die Möglichkeit verstanden werden, Substanzen mit Abmessungen von ca. 1 bis 100 nm zu verstehen und zu kontrollieren. In dieser Größenordnung unterscheiden sich die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften der Materialien in grundlegender Weise von den Eigenschaften einzelner Atome und den Eigenschaften der Materialien als Ganzes. Diese einzigartigen Vorgänge/Eigenschaften sind vielversprechend für verschiedene neue Anwendungen. Führt man jetzt Nanowissenschaft, Ingenieurwesen und Technologie zusammen, kann die Nanotechnologie auch als Bilderfassung, Messen, Modellieren und Manipulation von Materialien obiger Größenordnung gesehen werden.

In den vergangenen Jahrzehnten sind die Vorsilbe „Nano-„ und der Begriff „Nanotechnologie“ zu einem wahren Modewort geworden, zunächst in der akademischen Welt, dann auch für industrielle Anwendungen. Die Verwendung der Vorsilbe „nano“ kann verglichen werden mit anderen überstrapazierten Vorsilben (wie „mikro-„ „e-„ usw.) in der Vergangenheit. Aus unterschiedlichen Gründen ist man heute sogar dabei (z.B. um in bestimmte Finanzierungsprogramme aufgenommen zu werden), einige Forschungsbereiche und Entwicklungsprojekte umzubenennen, um aus ihnen allgemein „nano-„ und/oder „Nanotechnologien zu machen.

All dies führt zu unterschiedlichen Meinungen darüber, was Nanotechnologie ist oder nicht ist bzw. darüber wie Einsatz und Auswirkungen der Nanotechnologie zu bewerten sind. Auch wenn sich das Interesse hauptsächlich auf Anwendungen der Nanotechnologie für Baumaterialien und insbesondere für Zement bzw. Beton konzentriert, werden Aussichten/Möglichkeiten der Nanotechnologie von unterschiedlichen Personen unterschiedlich bewertet. Die Meinungen reichen von hohen Erwartungen wie von Prof. Konstantin Sobolev [**1**]) („*Für die Betonwissenschaft werden in den kommenden Jahren große Fortschritte durch die Anwendung neuer Kenntnisse erwartet, die in dem schnell wachsenden Bereich der Nanotechnologie gesammelt werden.*“) bis zu zurückhaltend wie von Prof. Karen Scrivener [**2**] (“*… die Möglichkeiten der Nanotechnologie im engeren Sinn des Begriffs … sind weniger eindeutig*”).

3. Überblick über die Literatur der Nanotechnologie wie in der Projektvorgabe enthalten

3.1 Überblick der untersuchten Bereiche

Dieser Abschnitt enthält einen Überblick über die Bereiche, die von *cemsuisse* als relevant angesehen werden und die für die Möglichkeitsstudie übernommen werden sollten. Es sind folgende:

- Photokatalytische Beschichtungen von Oberflächen und Gebäudefassaden (mit selbstreinigender oder NO_x verringernder Wirkung)
- Organische LED für innovative Beleuchtungstechniken
- Nanobeschichtungen für Architekturglas und Sonnenpaneele
- Nanotechnologie – Innovationen für Mörtel und Beton – wie z.B. für Hochleistungsbeton
- Nanokomposite – Bindemittel für Fassadenfarben
- Neue Flammen/Feuer verzögernde Produkte
- Farbbeschichtete Solarzellen für die Bautechnologie

Die oben genannten Bereiche wurden mit Hilfe des akademischen Werkzeuge für eine Literaturdurchsicht (wie z.B. ISI Web of Knowledge) sowie anderer Suchmaschinen untersucht. Um die Bedeutung/Auswirkung der oben genannten Felder den Bereichen Zement und Beton zuordnen zu können, wurde die Suche mit Hilfe relevanter Schlüsselwörter und Begriffe wie „Zement“ und „Beton“ durchgeführt. Anschließend wurden die Ergebnisse dieser Arbeit analysiert und in Frage kommende Veröffentlichungen festgelegt. Sie sind in der folgenden Tabelle 1 zusammengefasst.

„NT“ od. Pseudo-NT-Themen-gebiete	Gesuchte Begriffe	Anz. der Treffer	Anz. der für Z. und B. relev. Treffer	Bereits bekannte relevante Anwendungen f. Z. u. B	Vorherges./-vorhersehbare Anwendungen	Relevanz f. Z. u. B.
TiO2 Photokatalyse	„Photokatalyse AND (Beton OR Zement)	9	7	Festkörper und Dünnfilmtechnik: Anger. Zement u. Beschichtungen, Selbstreinigung, NO_x Verringerung	Funktionalisierung von Oberflächen mittels aktiver TiO2 Schichten	Bewährt und hoch
	„TiO2“ AND (Beton OR Zement)	81	19			
Organische Leuchtdiode	(OLED* OR organische Diode)	0	0	Offensichtlich keine	Wahrscheinlich keine	Sehr gering
Funktionelle Beschichtung für d. Glasindustrie	„Beschichtetes Glas“ AND (Beton OR Zement)	8	0	Offensichtlich keine	Beschichtung zur Erzeugung des Lotuseffekts auf Betonoberflächen	Gering bis mittel
	„Glasbe-schichtung“ AND (Beton OR Zement)	1	0			
	„Funktio-nelle Beschichtung“ AND (Beton OR Zement)	0	0			
	„Lotus-Effekt“ AND (Beton OR Zement)	3	1			
Nanotechn. Innovationen für Mörtel u. Beton	Nanokomposit AND (Zement OR Beton)	48	16	Anz. Anwendungsmöglichkeiten (im folgenden Text beschrieben)	Anz. Anwendungsmöglich-keiten (im folgenden Text beschrieben)	Bewährt und hoch
	Nanopartikel AND (Zement OR Beton)	119	32			
	Nanosilikate AND (ZementOR Beton)	7	7			
Nanokomp. Bindemittel f. Fassadenfar-ben	Nanokomposite AND (Zement OR Beton) AND (Farbe OR Pigment OR Färben)	0	0	Offensichtlich keine	(siehe unten)	Gering
Neue Flammen-verzögerer	Aerogel AND (Zement OR Beton)	1	1	Offensichtlich keine	Aerogel Beton, Leicht-gewichtige Zusatzmittel auf Aerogel-basis	Mittel bis hoch
	Nanoclay AND (Zement OR Beton) & (Flamme OR Feuer)	0	0			
Farbbeschich-tete Solarzellen	(DSSc OR DYSC OR “Solarzelle”) AND (Zement OR Beton)	0	0	Offensichtlich keine	Sehr wahrscheinlich keine	Sehr gering

Tabelle 3.1 – Literaturdurchsicht der vorgegebenen Nanotechnologie-bezogenen Bereiche sowie deren Relevanz für Produktion und Anwendung in der Zement- und Betonindustrie

Anhand der Ergebnisse für die oben genannten Bereiche kommentieren die Verfasser des vorliegenden Berichts die Anwendbarkeit der untersuchten Technologien für die Zement- und Betonindustrie.

Photokatalytische Beschichtung von Oberflächen

Anwendungsgebiete von photokatalytischen Materialien für Zement und Beton sind bereits bekannt. Zu diesen gehört TioCem® - ein Zement, der mit nano-kristallinem Titandioxid angereichert ist, das im resultierenden Produkt eine photokatalysierende Funktion übernimmt (d.h. mit Hilfe von Licht werden Luftschadstoffe in neutrale Bestandteile aufgespaltet). Ebenfalls erwähnt werden muss hier die selbstreinigende Wirkung von TiO_2.

Allgemein gesprochen ist es sinnvoller, TiO_2 der Beschichtung und nicht dem gesamten Material zuzufügen, denn die gewünschte photokatalytische Reaktion benötigt als Energiequelle Licht. Bei normalen Baustoffen dringt der größte Teil des Lichts in die wenige Mikrometer starken Oberflächenschichten ein, sodass nur die obersten Schichten aktiv sind. Folglich können dünne Beschichtungen genauso leistungsstark wie gesamthaft mit TiO_2 angereichertes Material sein. TiO_2 im gesamten Material ist verschwendet, wenn nur die Oberfläche aktiv ist. Eine der vorstellbaren Möglichkeiten für den Bereich der Betonbauten ist folglich, nur sehr dünne Schichten aus mit TiO_2 angereichertem Material herzustellen. Die Herausforderung dieses Ansatzes und auch eine mögliche Gefahr bestehen darin, dass derart mit TiO_2 angereicherte Oberflächenschichten dauerhaft Teil der Betonbauten bleiben. Das bedeutet für die zukünftige Forschung, dass die Herausforderung sowohl die Optimierung der photokatalytischen Eigenschaften von TiO_2 ist, aber auch das Problem der Optimierung der Verteilung der photokatalytischen Partikel in der Betonstruktur in den Griff bekommen werden muss.

Nachdem dieser Bereich als einer der relevanten für die Zement- und Betonindustrie erkannt wurde, wird er ausführlich in Teil 2 des vorliegenden Berichts behandelt.

Organische Leuchtdioden (OLED) für innovative Beleuchtungstechniken

Es wurden keine Veröffentlichungen gefunden, die die Möglichkeit einer Verbindung des Bereichs der organischen Leuchtdioden mit den Bereichen Zement und Beton erkennen lassen. OLEDs sind Leuchtdioden, deren emittierende elektrolumineszente Schicht sich aus einer Schicht organischer Bestandteile zusammensetzt. Gewöhnlich enthält die Schicht eine Polymersubstanz, die es ermöglicht, eine geeignete organische Verbindung aufzutragen. OLEDs können Licht mit verschiedenen Farben ausstrahlen. Sie werden als dünne Schicht hergestellt. Für den Designer sind sie eine neue

Möglichkeit, innovative Beleuchtungstechnologien einzusetzen wie durchsichtige Leuchtpaneele oder Leuchttapeten, das Ausleuchten großer Flächen usw.

Obwohl OLEDs für Architektur und Design interessante Aussichten bieten, finden die Verfasser des vorliegenden Berichts nur eine geringe Relevanz für OLEDs in der Produktion von Zement und Beton. Im Hinblick auf Bauten aus Beton ist es kaum vorstellbar, dass der Einsatz von OLEDs sehr viel anders ist, als der Einsatz in Gebäuden/Bauten aus anderen Baustoffen.

Nanobeschichtungen für Architekturglas und Solarzellen

Architekturglas kann mit einem Dünnfilm im Nanobereich beschichtet werden, um dadurch eine besondere Funktionalität zu erhalten (z.B. Durchlässigkeit von Licht mit nur einer bestimmten Wellenlänge, Beschichtungen, die auf Änderungen des elektrischen Feldes reagieren usw.). Besagte Anwendungen mögen recht interessant vom Gesichtspunkt der Architektur/Gebäudephysik sein, sie haben jedoch nach Auffassung der Verfasser des vorliegenden Berichts wenig Relevanz für die Produktion von Zement und Beton.

Kürzlich erschien allerdings eine interessante Veröffentlichung über die Anwendung wasserabweisender Kompositbeschichtungen aus Nanopartikeln [**3**]. Diese werden auf Glas oder verschiedene andere Träger (wie auch Beton) gesprayt, um einen Lotuseffekt zu erzeugen.

Nanotechnologie – Innovationen für Mörtel und Beton (wie z.B. Hochleistungsbeton)

Hierbei handelt es sich um einen Bereich, für den in der Literatur eine relativ große Anzahl Veröffentlichungen gefunden wurde. In allen spielen Nanopartikel eine Schlüsselrolle. In diesem Zusammenhang sollte darauf hingewiesen werden, dass nach Meinung der Verfasser des vorliegenden Berichts die gesteuerte Synthese von Nanomaterialien und insbesondere Nanopartikeln als Nanotechnologie definiert werden sollte. Keine Nanotechnologie ist hingegen die Beimischung dieser Partikel zu einem Material bzw. die Vermischung von Partikel mit diesem Material.

i) Die Beimischung von Nanopartikeln (Nanoobjekten) zu Betonmischungen, die (ii) Verwendung von Nanopartikeln für die Oberflächenveränderung bestehender Betonbauten (iii), die Produktion funktioneller Partikel für die Verwendung als oder in zementgebundenen Materialien sind Bereiche, die nach Durchsicht der Literaturübersicht als relevant angesehen werden.

(i) Die Verwendung von Nanoobjekten (wie Nanopartikel) in Beton mit dem Ziel, die Druckfestigkeit zu erhöhen, ist ein Thema, das seit kurzem häufig in Berichten über den Einsatz von Nanotechnologien für Baustoffe behandelt wurde. In diesen Berichten heißt es, dass der Einsatz von Nanopartikeln bei der Herstellung von Beton zu einer Steigerung der Druckfestigkeit des Betons bis zu 500 MPa (Laborwerte) führt. In anderen Berichten heißt es wiederum, dass der Einschluss von Silikat in Beton nur zu einer geringen Steigerung der Druckbelastbarkeit führt.

Signifikanter ist es wahrscheinlich, dass der Einschluss von Nanopartikeln einen Einfluss auf die Mikrostruktur des Materials (wie z.B. als Kristallisationskeime) bzw. auf den Reaktionsablauf des Abbindens hat. Ebenfalls erwähnt werden sollte, dass Nanosilikat als die Viskosität veränderndes Zusatzmittel für Betonmischungen im Handel ist.

(ii) Hinsichtlich des Einsatzes von Nanopartikeln für die Behandlung bereits bestehender Betonbauten wurde vom Einschluss von Nanopartikeln in die Oberflächenschichten von Zementstein berichtet und zwar mit Hilfe der Behandlung durch elektrokinetische Nanopartikel. Von solchen Methoden heißt es, dass sie im Vergleich zu unbehandelte Proben für Zementstein eine um eine Größenordnung geringere Permeabilität ergeben. Der Nachteil solcher Techniken zur Verbesserung der Permeabilität ist, dass lokales Rissbildung im Bauwerk eine solche Behandlung nutzlos machen.

(iii) Funktionelle Partikel – In diesen Bericht aufgenommen wurde auch das Konzept der (nano-)beschichteten Partikel, die bestimmte Fraktionen Klinker ersetzen. Keine Hinweise auf wirklich nanotechnisch entwickelte Core-Shell-Zementpartikel wurden in der Literatur gefunden.

Die Chancen, solche Zementarten in der Zukunft zu entwickeln, liegen im effizienten Einsatz des Klinkermaterials und damit in der Verringerung des CO_2 Ausstoßes und der Umweltbelastung bei der Zementproduktion. Aus einer weiteren Literaturdurchsicht, die für den Abschnitt 2 des vorliegenden Berichts vorgenommen wurde, geht hervor, dass die Produktion solcher Partikel möglich ist. Gefahren in Verbindung mit der Verwendung solcher Partikel können möglicherweise in den Bereichen Umwelt, Gesundheit und Sicherheit gefunden werden.

Abschließend kann gesagt werden, dass Nanopartikel ein Grundbaustein der Nanotechnologie sind. Die Verfasser gehen von einer ziemlich großen Anzahl Versuche aus, unterschiedliche Nanopartikel in die Struktur des Betons zu integrieren. Wie im Abschnitt 2 des vorliegenden Berichts gezeigt, liefert die Materialkunde heute eine fast unbegrenzte Anzahl Zielvorgaben für die Produktion unterschiedlicher Arten Nanoobjekte mit verbesserten Eigenschaften. Skalierbarkeit der Produktionsvolumen für die Zement- und Betonproduktion ist ein wichtiges Thema, das in Abschnitt 2 des Projektes behandelt wird.

Risiken in Verbindung mit dem Einsatz von Nanopartikeln lassen sich besonders in den Bereichen Umwelt, Gesundheit und Sicherheit erkennen (detaillierte Informationen befinden sich im Abschnitt 2, Kapitel 5 des vorliegenden Berichts). Ebenfalls erwähnt werden sollte, dass der Einsatz von Nanomaterialien in Zement und Beton auch auf deren volumetrische Verfügbarkeit in für die Betonproduktion typischen Maßstäben beschränkt ist.

Nanokomposit-Bindemittel für Fassadenfarben

Im Bereich Fassadenfarben sind dünnwandige zementgebundene Baustoffe (auf der Grundlage mittels zementgebundener Kompositmaterialien verstärkter pigmentierter Glasfasern) bereits im Handel erhältlich. Aus der Literatur ergibt sich eine nur sehr geringe Verbindung zwischen diesem Bereich und der Zement- und Betonindustrie. Für Architekten ist die Vorstellung, die Oberflächen von Betonbauten mittels funktioneller Färbemittel zu funktionalisieren, sehr attraktiv.

Flammen verzögernde Stoffe

Es wurden relevante Veröffentlichungen über den Feuerschutz von Zement und Beton gefunden. Es heißt, dass die neuartige Anwendung von Wasser abweisendem Aerogel als Betonzuschlag einen zementgebundenen Baustoff der Feuerwiderstandsklasse über F120 ergibt. Es wurde gezeigt, dass die Möglichkeiten des Einsatzes von Aerogels in zementgebundenen Baustoffen ausgesprochen vielseitig sind. Ein weiterer Vorteil dieser Materialien ist ihr geringes Gewicht.

Die möglichen Risiken (in der Zukunft noch zu untersuchenden) des Einsatzes von Aerogels als Betonzuschlag mit geringem Gewicht sind dessen Dauerhaftigkeit in der Zementmatrix. Dieser Aspekt der Verwendung von Aerogels in Beton scheint bisher noch nicht untersucht worden zu sein. Aerogel ist eines der wichtigsten Produkte, die mit Hilfe der Sol-Gel-Technologie entstehen und aus diesem Grund werden sie ausführlich im 2. Abschnitt dieses Berichts behandelt. Weitere Arten von Flammen/Feuer-Verzögerer, die bei einem Feuer aktiv einen stabilen Schaum entstehen lassen, sind solche auf der Basis von Nano-Ton-Partikeln, die sich besonders als Zusatzmittel für Polymere eigenen.

Farbstoff-Solarzellen

Die Literaturdurchsicht ergab keine relevanten Veröffentlichungen mit Hinweisen für eine Verbindung zwischen den Bereichen Farbstoff-Zellen und Beton und Zement. Bei den Farbstoffsolarzellen (Grätzel-Zellen) handelt es sich um eine relativ neue Art der „kostengünstigen“ Solarzellen, die zur Familie der Dünnfilm-Solarzellen gehören. Einige der Dünnfilm-Solarzellen werden auf einer Polymer-Folie präpariert, die auch auf einer unebenen (bzw. nicht ganz glatten) Oberfläche (wie eben die Oberfläche von Beton) aufgeklebt werden kann. Diese Anwendung mag für Architekten interessant sein, ist aber für die Produktion von Zement und Beton nicht relevant.

Zum Abschluss dieses Überblicks muss darauf hingewiesen werden, dass im vergangenen Jahrzehnt eine Reihe Berichte über den Einsatz der Nanotechnologie für die Bauindustrie veröffentlicht wurden [**4**, **5**, **6**, **7**, **8**]. Darüber hinaus fanden auch zahlreiche Konferenzen [**9**, **10**, **11**, **12**] und wissenschaftliche Tagungen statt, die weitere Ergebnisse zur Nanotechnologie in der Bauindustrie hervorbrachten. Eine ausführlichere Zusammenfassung dieser Veröffentlichungen einschließlich von Beispielen für nano-bezogene wissenschaftliche Netzwerke und Beispiele ähnlicher Veröffentlichungen aus anderen Baustoffbereichen werden in Abschnitt 2 des vorliegenden Berichts vorgestellt. Ein gemeinsames Merkmal dieser Veröffentlichungen ist – aufgrund der weit gefassten Definition der Nanotechnologie und des vielseitigen Einsatzgebietes von Baumaterial – die geringe Synergie zwischen den Veröffentlichungen und den einzelnen Konferenzen (gleiches gilt auch für die einzelnen Kapitel der Berichte).

3.2 Synoptischer Blick auf den Literaturüberblick

Die Nanotechnologie bietet eindeutig eine Anzahl möglicher und auch interessanter Anwendungen für Architektur und Baustoffe. Allerdings lassen sich nicht alle für den Bereich der Baustoffe möglichen Anwendungen für die Zement- und Betonindustrie nutzen. Hier sollte vielleicht eine allgemeine Anmerkung gestattet sein: all die oben genannten Anwendungen mit möglichem Einfluss auf die Funktionalität der Oberflächen von Zement (einschließlich solcher, die nur für die Architektur interessant sind), haben wahrscheinlich allgemeine Auswirkungen für die Betonproduktion. Die Verfasser des vorliegenden Berichts gehen davon aus, dass der verbreitete Einsatz dieser Technologien zu einer Erhöhung der Produktion von Fertigbeton führen könnte.

Nachdem (i) weder die Nanotechnologie noch die "Nanotechnologie in Baustoffen" als kohärente Bereiche angesehen werden können und (ii) die Definition von Nanotechnologie recht weit ist, liegt es den Verfassern daran zu betonen, dass die oben genannten analysierten Themen nicht die einzigen mit einem Bezug zu "nano" sind.

Die Gründe, warum die Verfasser sich entschieden haben, die Themen, wie in Abschnitt 2 enthalten, ausführlich zu behandeln, können wie folgt beschrieben werden: Die Verfasser haben versucht, die Aufmerksamkeit auf die Bereiche zu lenken, die (a) wirklich als Nanotechnologie definiert werden können (d.h. keine Pseudo-Nanotechnologie) UND noch wichtiger (b) für *cemsuisse* relevant sind.

Themen wie (i) hochauflösende 3D-Eigenschaften von Materialien auf Zementbasis für die Bewertung des Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von zementgebundenen Baustoffen, (ii) nano-beschichtete (funktionalisierte) zementgebundene Partikel (iii), Einsatz der Sol-Gel-Verfahren für funktionalisierte Beschichtungen wurden während eines Zwischenmeetings der an diesem Projekt arbeitenden Arbeitsgruppe als

vielversprechende Bereiche der Nanotechnologie erkannt und folglich ausführlicher in Abschnitt 2 des vorliegenden Berichts beschrieben.

Die Verfasser des vorliegenden Berichts erheben nicht den Anspruch, dass die Auswahl eine vollständige Liste der Themen ist, die die Voraussetzungen (a) und (b) erfüllen. Ein Beispiel für ein solches Thema, das nicht in der Liste enthalten ist, ist die Entwicklung von Fliessmitteln. Dieser Bereich könnte möglicherweise der Nanotechnologie zugeordnet werden und er ist für Zementhersteller zweifelsohne relevant.

4. Zusammenfassungen aus dem ausführlichen Bericht

Dieses Kapitel enthält in knapper und präziser Form eine Zusammenfassung der ausführlichen Beschreibungen im Bericht (siehe Nano 2: Teil 1). Teil 2 des Berichts ist in verschiedene Kapitel unterteilt. Zwei Kapitel behandeln Anwendungen – ein Kapitel über nano-modifiziertes Gesamt-Material und ein Kapitel über nano-modifizierte große Oberflächen (von Betonbauten). Dazu kommt das Kapitel „Nano-Werkzeuge“, in dem die Fortschritte in (nano-gestützten) Analyseverfahren und ihre Möglichkeiten für die Zement- und Betonwissenschaft untersucht werden. Das folgende Kapitel behandelt denkbare Aspekte der Umwelt, Gesundheit, Sicherheit, Nachhaltigkeit von Nanotechnologien. Die letzten beiden Kapitel enthalten Vorschläge der Verfasser dazu, in welche Richtung sich die Forschung entwickeln sollte sowie Schlussfolgerungen.

Zusammenfassung des Kapitels über nano-modifiziertes Material als Ganzes

Das Kapitel über nano-modifizierte Festkörper enthält einen Überblick über die Nanopartikel-Synthese und die Sol-Gel-Prozesse. Nachfolgend eine entsprechende Zusammenfassung:

- Es gibt unterschiedliche Konfigurationen für Nanomaterialien, die aufgrund ihrer geometrischen Formen eingeteilt werden: Nanopartikel als Kugeln, Würfel oder in anderer Form, Nanostäbe, Nanodrähte oder Nanoröhren sind nur einige. Als allumschreibenden Begriff einigte man sich auf „Nanoobjekt“.

- Allgemein wird der Begriff Nanopartikel für ein Nanoobjekt mit einer besonderen Geometrie verwendet, wie Nanodrähte oder Nanoprismen, um nur zwei zufällig ausgewählte Beispiele zu nennen.

- Genauso vielseitig wie die Konfigurationen von Partikeln, ist auch die Auswahl von Verbundstoffen, die als Nanomaterial erhalten werden: Fast jede der Menschheit bekannte chemische Substanz kann als Nanopartikel erhalten werden. Die wichtigsten Klassen Nanomaterial sind:

- Metall und hier speziell Edelmetalle wie Gold, Platin, Silber usw.

- Metalloxide: Silikat, Alumiumoxid, Zerium, Zirkon, Eisenoxid, Manganoxid und viele mehr

- Halbleiter: Indium Gallium-Arsenid, Zinkselenid/Zinksulfid

- Kohlenstoff (Nanopartikel, Nanoröhrchen, Graphen-artige Schichten)

- Die gesteuerte Synthese von Nanomaterial und insbesondere von Nanopartikeln kann als Nanotechnologie definiert werden

- Zu den bekanntesten Syntheseverfahren gehören: Synthese in Lösung, Synthese in Dampf, Schablonen- und Core-Shell- (oder Beschichtungs-) Verfahren. Bei letzterem entstehen Dual- oder Mehrkomponenten / Mehrphasen-Partikel.

- Das Beimischen eines (nicht funktionellen) Nanopartikels zu Material wie Beton oder eine Vermischung kann nicht als Nanotechnologie bezeichnet werden.

- Es gibt eine große Anzahl Partikel und dies auch in einem kleinen Materialvolumen. Die typischen Eigenschaften, mit denen Partikel definiert werden, sind an erster Stelle die Partikelgröße und die Korngrößenverteilung (die im Versuch gemessen werden kann). Als Regel gilt, je aufwendiger ein Syntheseverfahren, umso mehr Kontrolle kann über die Dispersität der Probe ausgeübt werden und umso besser ist das Endprodukt.

- Das Beimischen von Nanomaterial zu herkömmlichen Baustoffen wird in den nächsten Jahren stark an Bedeutung gewinnen. Viele der auf diese Art entstandenen Produkte werden sich mit der Vorsilbe „Nano“ schmücken. Dies ist ein Bilderbuchbeispiel für den Missbrauch des Begriffs „Nano“ zu Marketing-Zwecken. Stellen Sie sich selber die Frage: wird die Vorsilbe „Nano“ verwendet, um die Attraktivität des Produktes zu erhöhen? Wenn die Antwort „Ja“ lautet, dann steigt die Wahrscheinlichkeit, dass das Produkt mit „echter“ Nanotechnologie wenig zu tun hat.

- Nanopartikel sind eine der Grundlagen der Nanotechnologie. Die größte Anzahl größen-abhängiger Arten physikalischer Eigenschaften auf Nanomaßstab werden für Nanopartikel genannt. Sie bleiben auch weiterhin im Fokus der weit verbreiteten Nano-Forschung.

- Für die Sol-Gel-Chemie kommt die gesteuerte Hydrolyse eines geeigneten Ausgangsstoffes zur Anwendung. Das Ergebnis sind kolloidale Dispersionen.

- Sol-Gel Prozesse bedürfen nur einer geringen Anzahl Versuche, sie sind schnell und skalierbar.

- Die gesteuerte Synthese von Solen (kolloidale Partikel, Nanopartikel) mit gemischter Stöchiometrie und die Verwendung von Dual- oder Mehrkomponenten-Systemen machen die Sol-Gel-Technologie außergewöhnlich vielseitig. Diese Vielseitigkeit bietet dem Forscher ausreichend Raum, um neue Baustoffe mit maßgeschneiderten Eigenschaften zu entwickeln.

- Das einfache Beimischen kolloidaler Solen zu Materialien als Ganzes gilt nicht als Nanotechnologie, während die gesteuerte Synthese einer gewünschten kolloidalen Partikel-Suspension als solche angesehen werden sollte.

- Die drei wichtigsten Anwendungsbereiche für das Sol-Gel-Verfahren sind:

- Dünnfilme und Beschichtungen

- Aerogels und Xerogels

- Keramik

- Die ersten beiden Anwendungsbereiche sind für die Zement-, Betonindustrie und das Bauwesen von großem Interesse. Für die Zukunft sind ausgezeichnete Möglichkeiten für die Entwicklung neuer, preisgünstiger und skalierbarer Beschichtungstechnologien auf Sol-Gel-Basis für unterschiedlichste Anwendungsbereiche wie Verglasungen, Fassaden, Farben, Beschichtungen usw. vorhersehbar.

Ein weiteres Kapitel handelt vom Einsatz von Nanopartikeln in Hochleistungsbeton.

- Es gibt eine Anzahl Arten Nanoobjekte, die Betonmischungen beigemengt werden. Zu diesen gehören Nanosilikate, Nanoaluminiumoxid, Nanoclay, Carbon-Nanoröhrchen usw.

- Das Potenzial liegt in Verbesserungen wie folgt: mechanische Eigenschaften des Betons, gesteuerte Freigabe der beigemengten Substanzen in den Beton, erhöhter Widerstand gegen Entmischen und Formbarkeit der Mischung, verbesserte Wärmeeigenschaften usw.

- Ein weiteres Potenzial für das Beimengen von Nanopartikel in Beton besteht darin, dass Keime für die Kristallisierung von Hydratationsprodukten verfügbar werden, d.h. das Ergebnis sind maßgeschneiderte Mikrostrukturen von Zementsteinund damit eine verbesserte Dauerhaftigkeit.

In einem weiteren Kapitel wird der Einsatz von nano-beschichteten (Core-Shell) zementgebundenen Partikeln beschrieben:

- Unhydratisierter Klinker in der Mikrostruktur von Beton ist hinsichtlich des CO_2 Ausstoßes „vergeudetes“ Material.

- Besser wäre folglich, Klinker-Partikel im Zement durch (Core-Shell) Partikel mit speziell entwickelten, haftenden Shells zu ersetzen.

- Bei der Flammensprüh-Pyrolyse handelt es sich um einen Prozess, der ein Werkzeug für die Produktion von maßgeschneiderten Nanopartikeln auf Calziumsilikat-Basis liefert. Besagte Partikel verfügen über ein Potenzial, das sie für die Verwendung in Verbindung mit Shells von monobeschichteten (Core-Shell) Partikeln geeignet macht.

- Neben der Senkung des $C0_2$-Ausstoßes könnten sich die Core-Shell-Partikel auch für die Produktion von Leichtbeton eignen (in Kombination mit Leichtzuschlag).

Sol-Gel-Verfahren (Produktion von Aerogels) könnten sich für solche Anwendungen als ausgesprochen nützlich erweisen.

Zusammenfassung des Kapitels über nanomodifizierte Betonoberflächen

Fokus des Kapitals für nanomodifizierte große Betonflächen ist die TiO_2-Photokatalyse.

- TiO_2 gibt es als normales einem anderen Material beigemischtes Produkt oder als Nanomaterial (TiO_2 Nanopartikel)

- Die Steuerung der Eigenschaften von TiO_2-Nanopartikeln kann als Nanotechnologie angesehen werden. Werden diese aber dem Zement oder Beton nur beigemischt, so handelt es sich nicht um Nanotechnologie.

- Für die Photophysik und die damit verbundenen Verfahren zum Auslösen von oxidativen chemischen Prozessen gibt es eine breite Palette möglicher Anwendungen wie:

  - Selbstreinigende Oberflächen, Abbau von Mikroorganismen wie Algen und Pilze

  - Wasserabstoßende Oberflächen

  - Leicht zu reinigende Oberflächen

  - Neutralisieren von Schadstoffen wie Ruß, flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) oder Stickstoffoxid (NO_x) aus der Luft: Neutralisierung der Luftverschmutzung durch große Fassadenflächen.

- Die Aussichten für den kommerziellen Einsatz für Gebäude, Fassaden und Oberflächen aus Beton (Fußbodenbelag, Architektursteine usw.) durch das gezielte Einsetzen der maßgeschneiderten Eigenschaften von Nano-TiO_2 im Rahmen der obengenannten Anwendungen sind ausgezeichnet.

- TiO_2 ist für die Betonindustrie auch von Interesse, weil das Produkt manchmal Zement als funktionelles Zusatzmittel beigemischt wird. TiO_2 ist aber auch für die Beschichtungsindustrie ausgesprochen interessant.

- Bei den zement-basierten Stoffen dringt das meiste Licht nur in die ersten Mikrometer Oberfläche ein, sodass nur die obersten Schichten aktiv sind. Folglich können dünne Schichten genau so leistungsstark wirken wie wenn TiO_2 einem Material gesamthaft zugegeben wird. Ein Beimischen von TiO_2 zu einem Material als Ganzes ist allerdings Verschwendung, denn nur das Oberflächenmaterial ist aktiv.

Zusammenfassung des Nanotoolbox-Kapitels

- Charakterisierungstechniken sind nützliche Werkzeuge, um das Struktur-/Eigenschafts-Verhältnis eines beliebigen Baustoffs zu verstehen. Die Nanotechnologie

hat sich hier als ausgesprochen nützlich für die Anwendung auf feuchtigkeitsempfindlichen Baustoffen, wie zementgebundene Materialien, erwiesen.

- Für die Zukunft vorausgesehen wird der Einsatz von Nanomaterialien (wie manipulierte Nanopartikel) für zementgebundene Stoffe. Folglich benötigt man entsprechende Charakterisierungstechniken, um die Auswirkungen ihrer Anwendung auf die Eigenschaften des resultierenden Materials bewerten zu können.

- Es wird erwartet, dass sich die auf die Nanotechnologie stützende WETSEM-Technologie als nützlich für die in-situ Untersuchung des beginnenden Hydratationsprozesses unter dem Elektronenmikroskop erweisen wird.

- Auch für Cryo-TEM-Techniken wird vorausgesehen, dass sie Informationen über die Mesostruktur von Kalziumsilikat Hydraten liefert.

- Die Porosität spielt eine bedeutende Rolle für die Dauerhaftigkeit von Baustoffen auf Zement-Basis. Für die Bewertung der Porencharakteristika in porösen Baustoffen wird ein dreidimensionales bildgebendes Verfahren mit hoher Auflösung benötigt.

- Mit den Focused-Ion-Beam-Techniken (FIB-nt) steht ein Werkzeug für die dreidimensionale Untersuchung mit hoher Auflösung der Porosität von zementgebundenen Baustoffen (aber auch anderer Phasen) zur Verfügung. Erste Pilotversuche finden im Rahmen des von *cemsuisse* unterstützten Projektes über die Porosität und Permeabilität von gehärtetem zementgebundenem Material statt. Der Nachteil ist, dass es sich um eine Technik handelt, die nicht zerstörungsfrei ist. Folglich ist es nicht möglich, dynamische Prozesse zu beobachten.

- Die vierdimensionale Beobachtung (3D als Funktion der Zeit) mit einer ausreichend hohen Auflösung (wie die sychrotron-basierte Nanotomographie) von Prozessen in Zementstein ist eine Möglichkeit, die Vorgänge während der Hydratation zerstörungsfrei zu verfolgen.

Zusammenfassung des Kapitels über Nanosicherheit

- Mit jeder neuen Generation Baustofftechnologie, insbesondere wenn es sich um abgeleitete chemische Prozesse handelt, müssen möglicherweise schädliche Komponenten identifiziert werden und der kausale Zusammenhang zu Gesundheit und Umwelt oder eben auch, ob es einen solchen nicht gibt, festgelegt werden.

- Nanoobjekte (wie Nanopartikel) sind sehr viel kleiner als menschliche oder tierische / pflanzliche Zellen. Das kann dazu führen, dass solche Partikel die Zellwände durchstoßen und sich innerhalb eines Organismus frei bewegen.

- Die chemischen Eigenschaften von NanoBaustoffen (wie Reaktivität, Zwischenprodukte, Reaktionsprodukte, Reaktionsarten, Reaktionsgeschwindigkeiten usw.) sind jeweils anders, je nachdem ob es sich um Nanomaterialien oder einzelne Molekül-Baustoffe handelt. Aus diesem Grund könnten Nanowerkstoffe eine Bedrohung darstellen, denn ihre stark unterschiedliche Reaktivität kann auf der

Grundlage von Kenntnissen über die Molekül-Konfiguration nicht mit großer Genauigkeit bestimmt werden.

- Die Gefahr eines Schadens ergibt sich aufgrund der „Wahrscheinlichkeit, sich ihnen auszusetzen“ sowie der „Nebenwirkungen“ oder „Toxizität“.

- Die Wahrscheinlichkeit, sich Nanowerkstoffen auszusetzen, hängt davon ab, wie die lebenden Zellen Nanowerkstoffe aufnehmen. In-vitro Untersuchungen helfen zu verstehen, wie lange die Nanopartikel in einem bestimmten Organismus verbleiben und wo sie sich vorzugsweise ansammeln.

- Die Toxizität hängt von gewissen Mechanismen ab, die in einem Lebewesen, in einer Pflanze oder in ganzen Ökosystemen Nebenwirkungen erzeugen. Sie sind außergewöhnlich komplex und müssen für jeden Wirt-Nanomaterial-Kombination getrennt untersucht werden. Solche Tests sind sehr zeitaufwendig und teuer. Aus diesem Grund wurden bis heute nur einige wenige ausgewählte und allgemein verbreitete Produkte untersucht.

- Die bekanntesten hier untersuchten und für die Zement- und Bauindustrie als relevant ausgesuchten, sind: Silber (Ag), Zinkoxid (ZnO), Siliziumdioxid (SiO2),

- Titandioxid (TiO2), Schichtsilikate („nanoclays“, z.B. Montmorillonit)

- $Al_2[(OH)_2/Si_4O_{10}]\bullet nH_2O$, Carbon-Nanoröhrchen

- Die von den Nanopartikeln SiO_2, TiO_2 und Montmorillonit für Gesundheit und Umwelt ausgehende Gefahr ist verhältnismäßig klein. Andere wie (CNTs, Ag-Nanopartikel) machen verantwortungsvollere Handlingverfahren notwendig.

- Es ist sicherlich sinnvoll, davon auszugehen, dass ein bisher unbekannter (Nano)Werkstoff stark toxisch ist, und die entsprechenden Vorkehrungen zu treffen, anstatt eine Gefahr oder ein nicht leicht quantifizierbares Risiko zu ignorieren.

6. Vorschläge für die zukünftige Arbeit und Projekte

Während des Zwischentreffens der mit dem Projekt beschäftigten Arbeitsgruppe wurden zwei Bereiche festgelegt, die weiterzuverfolgen es sich lohnt: (i) Techniken der 3D-Bildgebung mit hoher Auflösung für die Bestimmung des Material-Struktur-Verhältnisses. Ziel ist die Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Zementstein. – (ii) (Nano)-beschichtete zementgebundene Partikel mit dem Ziel, Klinker zu ersetzen.

<u>Techniken der 3D-Bildgebung mit hoher Auflösung für die Bestimmung von Material-Struktur-Verhältnissen mit dem Ziel der Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Beton</u>

Hochauflösende Techniken der 3D Bildgebung dienen dazu, die Eigenschaften der Materialien komplexer Mikro-/Nanostrukturen zu verstehen. Versuchstechniken mit Längen- und Zeitskala Auflösung für auf hydraulischem Zement aufbauenden Baustoffen werden in der akademischen Welt inzwischen routinemäßig angewandt.

In Abschnitt 2, Kapitel 4.3 wurde aufgezeigt, dass die nach diesen bildgebenden Techniken entstandenen Ergebnisse viel weiter gehen, als nur beeindruckende 3D Bilder zu ergeben. Aus dreidimensionalen Bildern lassen sich mittels „virtueller Versuchstechniken“ Materialeigenschaften (wie mechanische und Transporteigenschaften) ableiten.

Eine der wichtigsten Schlussfolgerungen aus dem von *cemsuisse* finanzierten „Porosität /Permeabilität“-Projekt (und folglich der Dauerhaftigkeit von Mörtel und Beton) ergibt sich aus der Permeabilität der Zementstein-Matrix und nicht aus den Eigenschaften der Kontaktzonen (ITZ). Folglich führen die maßgeschneiderte Zusammensetzung von Zement und damit der Eigenschaften der Zementsteinmatrix in Mörtel und Beton direkt zur Verbesserung der Eigenschaften dieser Baustoffe.

Wie im vorliegenden Dokument berichtet, hat das Einschließen von Nanopartikeln in Zement und Beton anscheinend einen Einfluss auf den Hydratationsprozess und auf die Eigenschaften des gehärteten Betons. Die wichtigste Aufgabe im Rahmen eines Projektes wäre damit die Optimierung des Einsatzes von Nanopartikeln zum Zweck der Verbesserung Zementstein und der Dauerhaftigkeit von Beton.

(Nano)-beschichtete Partikel

Im Rahmen dieses Projektes wurden verschiedene Prozesse festgelegt, die mögliche Alternativen für die Produktion funktioneller zementgebundener Core-Shell-Partikel unterschiedlicher Größe darstellen. Die wichtigsten Zielvorgaben für ein nachfolgeprojekt könnten sein:

- Festlegung der besonders vielversprechenden Produktionsweise solcher Partikel unterschiedlicher Größe
- Versuch einer Produktion von Core-Shell-Zementpartikeln als Beweis für die Richtigkeit des Konzeptes.
- Falls dieser erfolgreich ausfällt, Bewertung der Skalierbarkeit für größere Volumen.

7. Schlussfolgerungen

Nanotechnologie – in ihrer weitesten Auslegung – ist der Oberbegriff für eine Vielfalt unabhängiger Technologiebereiche. Im letzten Jahrzehnt wurde eine Anzahl Arbeiten und Berichte veröffentlicht, die die verschiedenen Bereiche der Nanotechnologie zum Thema hatten, die für das Bauwesen und Baumaterial von Interesse sind. Oft ist der gemeinsame Nenner dieser Bereiche der Nanotechnologie nur die Tatsache, dass Eigenschaften im Nanomaßstab untersucht bzw. gesteuert werden. Die einzelnen Baumaterialien verlangen jeweils ihre „eigene“ Nanotechnologie. Nicht alle Bereiche

der Nanotechnologie sind jedoch für die Produktion und Anwendung für Zement und Beton relevant.

In Abschnitt 1 des vorliegenden Berichts werden die von *cemsuisse* vorgegebenen Bereiche der Nanotechnologie untersucht. Ihre Bedeutung für Produktion und Einsatz in Zement und Beton wird anhand der Literatur und subjektiv durch die Verfasser beurteilt.

Die Verfasser ermittelten, dass das Beimischen von Nanoobjekten (wie Nanosilikate, Nanotitandioxid, Nanoaluminiumdioxid, Carbon-Nanoröhrchen) zu Beton ein Trend mit wachsender Tendenz in der Zukunft ist. Allerdings sollte diese Art der Anwendung nicht „Nanotechnologie“ genannt werden.

Aus Sicht der Zementhersteller wurde die Produktion von Zement mit maßgeschneiderten Core-Shell-Partikeln (nicht notwendigerweise nur im Nanomaßstab) als die besonders vielversprechende zukünftige Technik für Anwendungen erkannt, die von Leichtzement bis zu Zement mit maßgeschneiderten Eigenschaften usw. reicht. Sol-Gel-Techniken und Techniken der Flammensprüh-Synthese wurden als mögliche Verfahren erkannt, solche Zementarten zu produzieren.

Zementgebundene Baustoffe wie Zementstein, Mörtel und Beton sind komplexe Baustoffe mit Porösität und anderen (mikro) Struktureigenschaften, die über verschiedene Längenskalen reichen. Um das Verhältnis zwischen Struktur-Eigenschaften solcher Baustoffe zu verstehen, bedarf es entsprechender Techniken (FIB-nt, SRnCT), die hochauflösende 3D-Informationen über die Eigenschaften besagter Baustoffe verfügbar machen. Diese Techniken können wertvolle Informationen über Eigenschaften wie z.B. über den Zusammenhang der Porosität auf Nanomaßstab in zementgebundenen Baustoffen (siehe cemsuisse-Projekt zur Porosität/Permeabilität) liefern und sind folglich für das Verständnis der Dauerhaftigkeit dieser Baustoffe von Bedeutung.

Abschnitt 2 des vorliegenden Berichts liefert weiter vertiefte Informationen darüber, auf welche Art unter oben genannten Bereichen eine Auswahl möglich ist. Ebenfalls detailliert werden die Umwelt-, Gesundheit-, und Sicherheitaspekte über den Einsatz speziell entwickelter Nanoobjekte beschrieben.

---

[1] Sobolev K. and Ferrada-Gutiérrez M., How Nanotechnology Can Change the Concrete World: Part 2. American**,** Ceramic Society Bulletin, 11 (2005) 16-19

[2] Scrivener K. L. and Kirkpatrick R.J., Innovation in use and research on cementitious materials, Cement & Concrete Research, 38 (2008) 128-136

[3] Manoudis PN, Karapanagiotis I, Tsakalof A, Zuburtikudis I, Panayiotou C. Superhydrophobic composite films produced on various substrates. Langmuir 2008;24:11225.

[4] Zhu W., et al., 'Application of Nanotechnology in Construction', State-of-the-art-Report, NANOCONEX project,2003.

[5] Mann S., 'Nanotechnology and construction', Institute of Nanotechnology report. 2006

[6] Brockman T., et al. 'Nanotechnologie im Bauwesen', Beton- und Stahlbetonbau, 7, (2008),446

[7] 'Nanotechnologie im Bauwesen'. (2007) Kassel University Press

[8] Nanobau – Einsatz von Nanotechnologien in Architektur und Bauwesen, Hessen Nanotech 2008

[9] Nanotechnology in Construction. P. J. M Bartos, et al. (ed.) Royal Society of Chemistry, 2004

[10] Applications of Nanotechnology in Concrete Design. D. Ravindra et al (ed.). Thomas Telford Services Ltd., 2005

[11] 2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction, (ed. Y. R. de Miguel), 2007, RILEM proceedings**,** PRO 45

[12] Nanotechnology in Construction 3. Z. Bittnar P. J. M Bartos (ed.) Springer, 2009