

# 05.17

Lizenziert für Dr. H.-P. Koschitzky, VEGAS, Stuttgart.  
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

26. Jahrgang  
Oktober 2017  
Seiten 161 – 200

# altlasten spektrum

Herausgegeben vom  
Ingenieurtechnischen Verband für Altlastenmanagement  
und Flächenrecycling e.V. (ITVA)

[www.ALTLASTENdigital.de](http://www.ALTLASTENdigital.de)



Organ des ITVA

## Ausgangszustandsbericht und Rückführungspflicht – ein Zwischenstand

J. Frauenstein, S. Strecker, B. Meise,  
R. Bulitta

## Altlastensanierung durch den Einsatz von Nanopartikeln – Beiträge und Ergebnisse des EU-Projekts NanoRem

H.-P. Koschitzky, J. Braun, N. Klaas



**ESV** ERICH  
SCHMIDT  
VERLAG

Foto: UVR-FIA



# Altlastensanierung durch den Einsatz von Nanopartikeln

Beiträge und Ergebnisse des EU-Projekts NanoRem

Hans-Peter Koschitzky, Jürgen Braun, Norbert Klaas

## 1. Veranlassung und Hintergrund

### 1.1 Altlastensituation in der EU

Die Europäische Umweltagentur (EEA) stellte in einem Bericht 2007 fest, dass in Europa an fast drei Millionen Standorten „potenziell umweltbelastende Tätigkeiten“ stattgefunden hatten. Die Zahl der Brachflächen in der EU, die von Altlasten (Boden- und Grundwasserkontaminationen) betroffen sind, wurden auf mehr als eine Million geschätzt ([23]; [36]). Für deren Sanierung würden in den Mitgliedstaaten Kosten von insgesamt schätzungsweise 38 Milliarden Euro pro Jahr entstehen [20]. Hinzu kommt das Problem des „Flächenverbrauchs“: Nach einem Bericht der EU der im Jahr 2012 veröffentlicht wurde [22], betrug die Neuinanspruchnahme von natürlichen Flächen in der EU bis zum Jahr 2000 über 1.100 km<sup>2</sup> pro Jahr, mit leicht fallender Tendenz im Zeitraum 2000–2006 auf nur 960 km<sup>2</sup> pro Jahr. Die „Roadmap“ zum Erreichen eines ressourcenschonenden Europas [21] schlägt daher vor, dass es bis zum Jahr 2050 keinen Nettolandverbrauch mehr geben sollte. Dieses Ziel kann nur mit einem effektiven Brachflächenrecycling/Brachflächenressourcenmanagement von ehemals genutzten Flächen, einschließlich der Sanierung von Altlasten, erreicht werden.

Eine Schätzung des weltweiten Sanierungsmarkts ging für 2011 von einem Finanzvolumen von 40 Milliarden Euro aus. Der weltweite Markt für Anwendungen von Nanotechnologien im Umweltbereich wurde auf etwa 4,7 Mrd. Euro/Jahr [26] prognostiziert. Für den Bereich der „Sanierung“ wurde das größte Wachstumspotenzial für die Nanotechnologie prognostiziert. In der Praxis wurde jedoch bisher die Mitte der 2000er-Jahre gestellte optimistische Prognose für die Anwendung der Nanotechnologie [26] für den Bereich der Sanierung nicht erreicht. Als Grund wurden bestehende Wissenslücken beim Einsatz der Nanomaterialien speziell unter Feldbedingungen, viel zu hohe Herstellungskosten der Nanomaterialien, aber auch die verstärkt aufkommenden Diskussionen und Bedenken hinsichtlich der Gefährdung von Mensch und Umwelt durch Nanopartikel genannt, die in einer Reihe nationaler Risiko-Nutzen-Studien zu Nanopartikeln adressiert wur-

den, z.B. Studien aus Kanada, USA, Belgien, Großbritannien, Schweiz, Österreich und Deutschland ([24]; [27]; [37+38]; [2]; [18]).

In Europa gibt es bislang relativ wenige großtechnische Anwendungen von Nanopartikeln bei In-situ-Sanierungen. Bardos et al. [2] identifizierten weltweit 58 Anwendungen von nullwertigem Nano-Eisen (nZVI) auf der Feldskala. Nur 17 von ihnen waren in Europa (Tschechien und Deutschland), obwohl die Nano-Forschung im Labormaßstab in der EU intensiv vorangetrieben wird. Die bisherigen In-situ-Anwendungen sind weitestgehend auf chlorierte Lösungsmittel beschränkt, für die es jedoch andere – auch innovative – Sanierungstechnologien gibt (s. z.B. ITVA Arbeitshilfe H1-13, [25]; TASK TisS Leitfaden [42]), die unter geeigneten Voraussetzungen effizient und zuverlässig eingesetzt werden können.

### 1.2 EU-Forschungsrahmenprogramm

Dies veranlasste die EU im Juli 2011 im 7. Forschungsrahmenprogramm zu einer Ausschreibung unter dem Themenschwerpunkt: *Nanoscience, Nanotechnologies. Materials and new Production Technologies*, – NMP, mit dem Untertitel *Nanotechnology solutions for in-situ soil and groundwater remediation*. Darin forderte die EU zur Einreichung interdisziplinärer Projekte auf, mit dem übergeordneten Ziel die Nanotechnologie unter Berücksichtigung aller wirtschaftlicher, umweltrelevanter und genehmigungsrechtlicher Aspekte für die Altlastensanierung einsatz- und marktfähig zu machen. NanoRem wurde aus mehreren Projektanträgen als einziges ausgewählt und erhielt eine vierjährige Förderung von ca. 10,4 Mio. Euro bei Gesamtprojektkosten von etwas über 14 Mio. Euro.

## 2. Was bedeutet Nanosanie rung

Eine Altlastensanierung mit Hilfe von Nanotechnologie – kurz *Nanosanie rung* – beschreibt den In-situ-Einsatz von Nanopartikeln (NP) zur Behandlung schadstoffkontaminierter Böden und Grundwasserleiter. NP sind definiert als Partikel, bei denen mindestens eine Dimension kleiner als 100 nm ist. In der Sanierungs-

# Altlastensanierung durch den Einsatz von Nanopartikeln

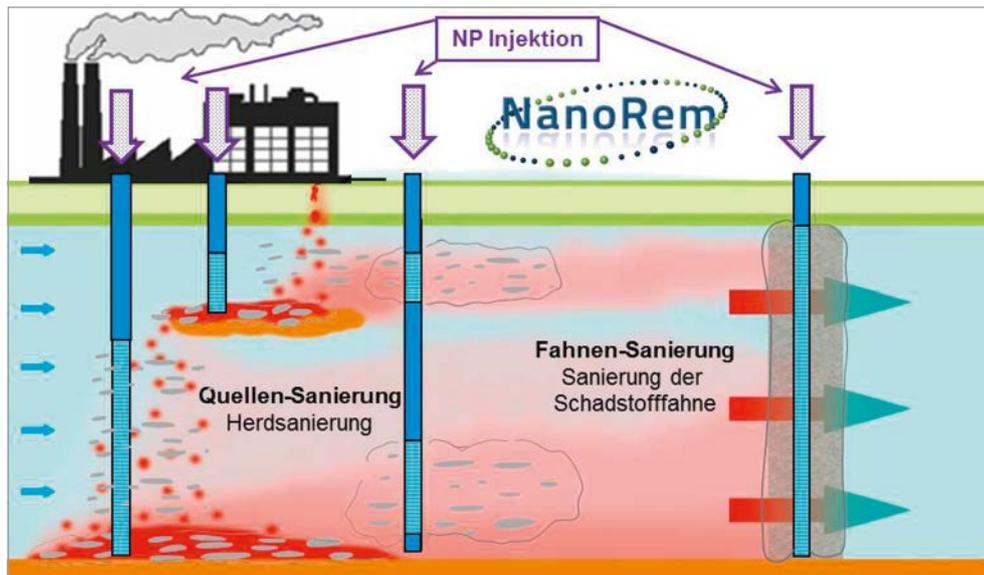


Abbildung 1: Nanosanierung: Möglichkeiten des Einsatzes von Nanopartikeln zur Grundwassersanierung

praxis können unter Umständen auch größere Teilchen zum Einsatz kommen, beispielsweise, weil die eigentlichen NP in Partikelträger (Composite Partikel) eingebettet sind.

Abhängig vom eingesetzten Partikeltyp umfassen die Sanierungsprozesse im Allgemeinen Reduktion, Oxidation, Sorption oder eine Kombination. Verwendete NP sind meist aus Metallen oder Metalloxiden, häufig aus nanoskaligem Eisen hergestellt. Sie können in unterschiedlicher Weise produziert und verändert werden, um Handhabung und Sanierungsleistung zu verbessern. Beispielsweise werden sie mit einem Katalysator wie Palladium versetzt, in funktionelle Hüllmaterialien eingebettet oder auf aktive Träger (Aktivkohle) aufgebracht. Verschiedene NP können für diverse Schadstoffe eingesetzt werden.

Der Fokus der Nanosanierung liegt bei der Quellsanierung in der gesättigten Zone, aber eine Fahnen-

sanierung ist ebenfalls möglich (Abbildung 1). Die Technologie kann auch unter Gebäuden angewendet werden, nahezu unabhängig von der Anwendungstiefe.

Trotz der inzwischen erheblichen Fortschritte – auch durch NanoRem – in der Produktion und der Anzahl unterschiedlicher zur Verfügung stehender Partikel und deren Einsatzmöglichkeiten, muss die Nanosanierung nach wie vor als innovativ bezeichnet werden und ist noch nicht Stand der Technik.

### 3. Das EU-Projekt NanoRem

NanoRem ([www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)) war ein Forschungsprojekt im 7. Rahmenprogramm der EU vom 01.02.2013 bis 31.01.2017. Ziel war für die In-situ-Sanierung von Boden und Grundwasser mit Hilfe von Nanopartikeln praxistaugliche, effiziente, sichere und ökonomische Technologien zu entwickeln, um einen kommerziel-



Abbildung 2: Die NanoRem-Projektpartner

len Einsatz in Europa zu ermöglichen und zu stimulieren. Der Einsatzschwerpunkt von Nanopartikeln liegt bei der Sanierung von Schadensherden in Grundwasserleitern.

Das internationale NanoRem-Konsortium war mit 29 Partnern aus 13 Ländern interdisziplinär und branchenübergreifend aufgestellt (Abbildung 2).

Beteiligt waren führende europäische Forschungsgruppen und Entwickler im Bereich der Nanosanie- rung, außerdem Partner aus Industrie, Dienstleistungs- bereich (Ingenieurbüros) und Behörden. Koordiniert wurde NanoRem von VEGAS an der Universität Stuttgart.

## 4. Ausgangssituation / Stand des Wissens vor NanoRem

### 4.1 Nullwertige Nanoeisenpartikel – „Nano Zero Valent Iron, nZVI“

nZVI-Partikel zeigen eine sehr hohe Reaktivität, die vom Grundsatz her eine effektive Umwandlung von potenziell ca. 70 Umweltschadstoffen ermöglicht. Diese umfassen polychlorierte Kohlenwasserstoffe, hochgiftige Substanzen wie As (III), As (V), Cu (II), Co (II), Cr (VI) und Nitrit sowie Medikamente wie Amoxicillin und Ampicillin, weiterhin TNT, chemische Kampfstoffe [43] und sogar Cyanobakterien [34].

Die auf dem Markt verfügbaren nZVI-Produkte, die in einer ausreichenden Menge (für eine In-situ-Sanie-

Die verfügbaren Nanopartikel waren nicht besonders stabil [30] da sie ziemlich schnell oxidierten, was sich auf die Lagerfähigkeit, den sicheren Transport und die Lebensdauer negativ auswirkte. Die nZVI-Partikel neigten zur Agglomeration und zur Anlagerung an festen Oberflächen. Dies behindert die Ausbreitung in Grundwasserleitern ([39]; [40]; [41]; [43]; [19]). Um die Agglomeration und Sorption im Aquifer zu verhindern und damit eine Verbesserung des Ausbreitungsverhaltens zu erzielen, mussten die Oberflächen modifiziert werden. Ein weiterer wichtiger Schritt war die Entwicklung und Umsetzung einer großtechnischen Produktion von luftstabilem nZVI-Pulver, welches in einer neu zu entwickelnden Suspension in einen kontaminierten Aquifer injiziert werden kann und entsprechende Reichweiten und Reaktionsraten erreicht. Dies kann man mit ungiftigen und umweltfreundlichen Stabilisatoren erreichen.

### 4.2 Nicht-Eisen- und Composite-Nanopartikel

Das Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten von nZVI kann durch sogenannte „Nicht-Eisen- und Composite-Partikel“ erweitert werden. Deren Wirkung basiert auf der Kombination von Reduktions- oder Oxidations- und/oder Sorptionsprozessen. Dadurch wird die Palette der behandelbaren Kontaminanten erweitert. Zu diesen Partikeln zählt z.B. ein auf Eisen basierendes kolloidales Composite-Produkt: Carbo-Iron<sup>®</sup> [4].



Abbildung 3: Bei der UVR-FIA GmbH gemahlenes Eisen (nZVI).  
(Foto: UVR-FIA)

rung) zur Verfügung standen, wurden vor allem durch Reduktion von Oxiden bei hoher Temperatur in einer Wasserstoff-Atmosphäre erzeugt. Dieses Herstellungsverfahren ist aufwändig und teuer. Kostengünstiger kann die Herstellung von nZVI auch durch Mahlen von metallischen (Mikro-)Partikeln zu Nanopartikeln erreicht werden (Abbildung 3).

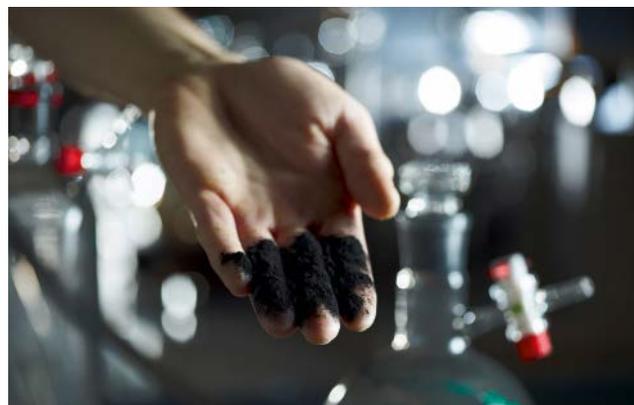


Abbildung 4: Carbo-Iron<sup>®</sup>: Kombination von Nano-Eisen- und Aktivkohlepartikel; eine Entwicklung des UFZ.  
(Foto: Künzelmann / Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ)

Carbo-Iron<sup>®</sup> (Abbildung 4) verbindet Oberflächeneigenschaften von Kohlenstoff (hohe Mobilität, geringe Agglomeration und kontrollierbare Ablagerung) mit der Reaktivität der nZVI. Es zeigt ein vielversprechendes Potenzial sowohl für die Schadensquellen- als auch für die Schadstofffahnenanierung [31+ 32+ 33]. Durch die Unterstützung des mikrobiellen Abbaus von Schadstoffen durch diese Partikel wird deren Wirksamkeit zusätzlich erhöht. Die Entwicklung der Produktionstechnologie für die kostengünstige und zuverlässige

## Altlastensanierung durch den Einsatz von Nanopartikeln



Abbildung 5: Projektstruktur des NanoRem-Projekts

Herstellung großer Mengen von Carbo-Iron<sup>®</sup> war eine der Herausforderungen.

Die Verwendung alternativer Metall-Nanopartikel (z. B. Al, Mg und deren Legierungen) kann das Einsatzspektrum der Nanopartikel noch erweitern ([5]; [1]; [29]; [3]). Da diese Materialien bisher noch nicht für In-situ-Sanierungen in Betracht gezogen wurden, musste sich die Forschung auf ihre Stabilität, Reaktivität und Selektivität gegenüber verschiedenen Schadstoffklassen konzentrieren. Insbesondere Al und Mg bauen den Schadstoff stöchiometrisch besser ab als Fe und die geringere Dichte wirkt sich zudem u.U. positiv auf die Transportfähigkeit der Partikel aus. Weitere Nanopartikel, z.B. aus Eisen (II, III)-oxid haben vielseitige Anwendungsmöglichkeiten bei der Dehalogenierung und als reduktive/sorptive Verfahren zur Entfernung von Metallen/Metalloiden aus dem Wasser [28].

### 5 Struktur und Projektansatz von NanoRem

Das wissenschaftliche Projektmanagement und die Koordination lag bei VEGAS unterstützt durch das KIT für das Finanzmanagement. Das Projekt wurde von einer internationalen Expertengruppe (Project Advisory Group, PAG) mit Mitgliedern die alle relevante „Stakeholder“ vertraten (Forschung, Consulting, Industrie, Altlastbesitzer und Behörden) begleitet. NanoRem wurde in neun thematische Arbeitspakete (Workpackages, WP 2 bis WP 10) gegliedert, der F&E-Ansatz von NanoRem beinhaltet vier Ebenen (Abbildung 5):

- (I) Entwicklung und Produktion: WP2 und WP3
- (II) Test der Partikel: WP4 und WP5 sowie Entwicklung von Tools zur Unterstützung der Feldanwendungen: WP6 und WP7
- (III) Großversuche und Pilotstandorte: WP8 und WP10
- (IV) Verbreitung, Kommunikation und Verwertung: WP9

### 6 Die sechs NanoRem-Ziele

Ziel von NanoRem war, das Potenzial der In-situ-Boden- und Grundwassersanierung unter Anwendung von NP nachzuweisen, die Anwendungsmöglichkeiten auszuweiten und die Anwendung der „Nanotechnologie“ zur Sanierung kontaminierter Standorte zu unterstützen. Dabei musste insbesondere auch die Umweltverträglichkeit nachgewiesen werden.

Die Marktpotenziale dieser Technologie in Europa sollten ermittelt, bisherige Anwendungshemmnisse identifiziert und beseitigt und damit die Voraussetzungen für den Markteintritt und eine verbreitete Anwendung dieser Technologie in der EU geschaffen werden. Die ambitionierten Ziele und Arbeiten von NanoRem lassen sich mit sechs Zielen umreißen:

- (1) Identifizierung der am besten geeigneten technologischen Ansätze, die eine deutliche Veränderung/Verbesserung bei der In-situ-Sanierung in der Praxis erzielen können.
- (2) Weiterentwicklung und Optimierung von Nanopartikeln bis hin zu kostengünstigeren, großtechnischen Herstellungsverfahren für eine wirtschaftliche Produktion von größeren Mengen an Nanopartikeln.
- (3) Untersuchung der Mobilität, der Reaktivität, der Langzeitstabilität und des Migrationspotenzials von Nanopartikeln im Untergrund einschließlich ihrer potenziell negativen Auswirkungen auf das Ökosystem und mögliche Akzeptoren bis hin zu Oberflächengewässern.
- (4) Entwicklung eines umfassenden „Werkzeugkastens“ für die Ausführung und die Überwachung von In-situ-Sanierungen mit Nanopartikeln im Feld. Dazu gehören auch Messmethoden und Messtechniken für den In-situ-Nachweis der Partikelverteilung und des Partikelabbaus, Entscheidungsunterstützungssysteme sowie numerische Modelle

zur effizienten Sanierungsplanung und Überwachung.

- (5) Einsatz der Nanotechnologie auf verschiedenen Skalen bis hin zu Pilotsanierungen auf verschiedenen Standorten in der EU zur Validierung der F&E-Ergebnisse.
- (6) Kommunikation mit allen beteiligten Akteuren (Stakeholder) einer Sanierung (Eigentümer/Pflichtiger, Planer, Gutachter, Behörde, ...), um Anforderungen der Behörden zu berücksichtigen. Abbau potenzieller Vorbehalte der Öffentlichkeit, Verbreitung der Ergebnisse um die Fortschritte und Entwicklungen zeitnah für Sanierungsprojekte nutzbar zu machen und die Anwendung von Nanopartikeln in der EU auszubauen.

## 7. Die wesentlichen Ergebnisse von NanoRem

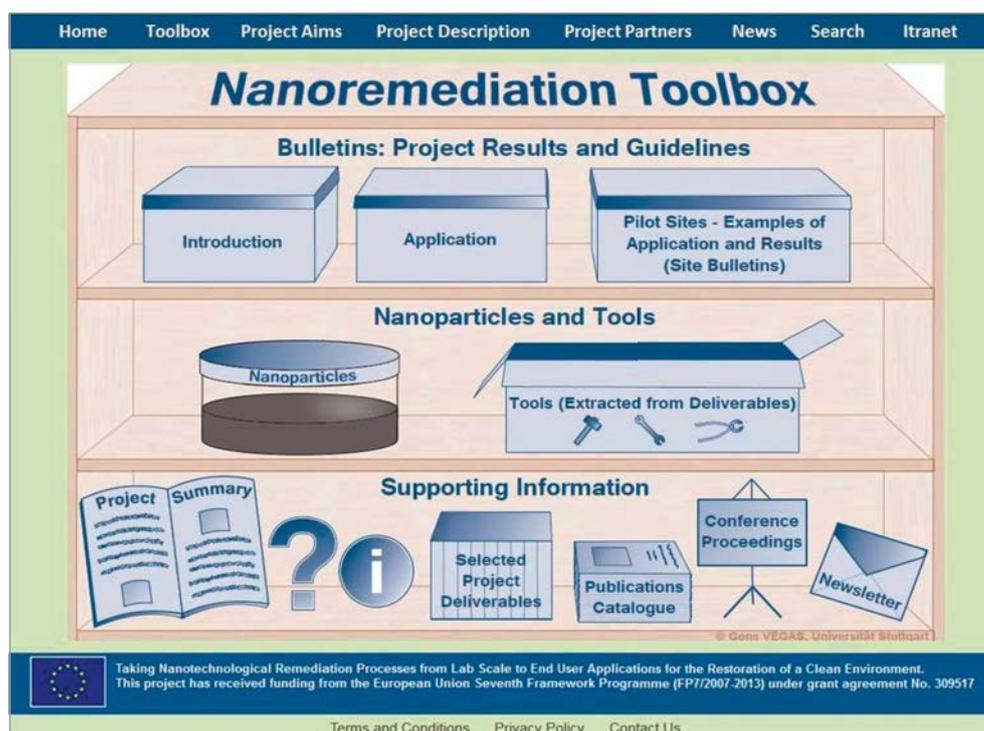
Die Ergebnisse von NanoRem sind, aufbereitet für die Praxis, zusammenfassend in 12 thematischen Bulletins auf jeweils vier bis acht Seiten dargestellt (z.B. *Abbildung 12*). Diese sind auf der NanoRem-Homepage ([www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)) als kostenlose PDF-Dateien im Downloadbereich (Toolbox) verfügbar. Eine gewisse Anzahl steht bei VEGAS in gedruckter Form zur Verfügung. Deutschsprachige Bulletins sollen noch erscheinen. Darüber hinaus sind alle Projektergebnisse und weiterführende Informationen in der *NanoRem-Toolbox* (*Abbildung 6*) auf [www.nanorem.eu/toolbox](http://www.nanorem.eu/toolbox) als Download kostenfrei erhältlich.

Schlaglichtartig lassen sich die Ergebnisse von NanoRem wie folgt zusammenfassen:

- Bulletin 1: „Nanotechnology for Contaminated Land Remediation – Possibilities and Future Trends

Resulting from the NanoRem Project“ (Nanotechnologie für die Altlastensanierung – Potenziale und Trends aus dem NanoRem-Projekt) gibt einen kurzen Überblick über NanoRem und seine wesentlichen Ergebnisse.

- Verbesserte eisenbasierte NP (nullwertiges Eisen) als auch neue NP-Arten (z.B. Goethite, Zeolithe) sowie Verbundpartikel (z.B. Carbo-Iron<sup>®</sup>) wurden entwickelt. (Beispiele s. *Abbildung 7*, s. auch *Tabelle 1* und *Tabelle 2*).
- Der Anwendungsbereich der Nanosanierungstechnologie wurde auf weitere Schadstoffe erweitert.
- Herstellungsprozesse im Labor wurden für die industrielle Fertigung angepasst. Sechs der untersuchten NP sind inzwischen kommerziell erhältlich. Diese NP sind im NanoRem-Bulletin 4: „A Guide to Nanoparticles for the Remediation of Contami-



*Abbildung 6:* Die NanoRem-Toolbox ist eine zusammenfassende Darstellung aller Projektprodukte und stellt diese auf der Homepage [www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu) als Downloads zur Verfügung  
© VEGAS, Universität Stuttgart, Deutschland

## Altlastensanierung durch den Einsatz von Nanopartikeln

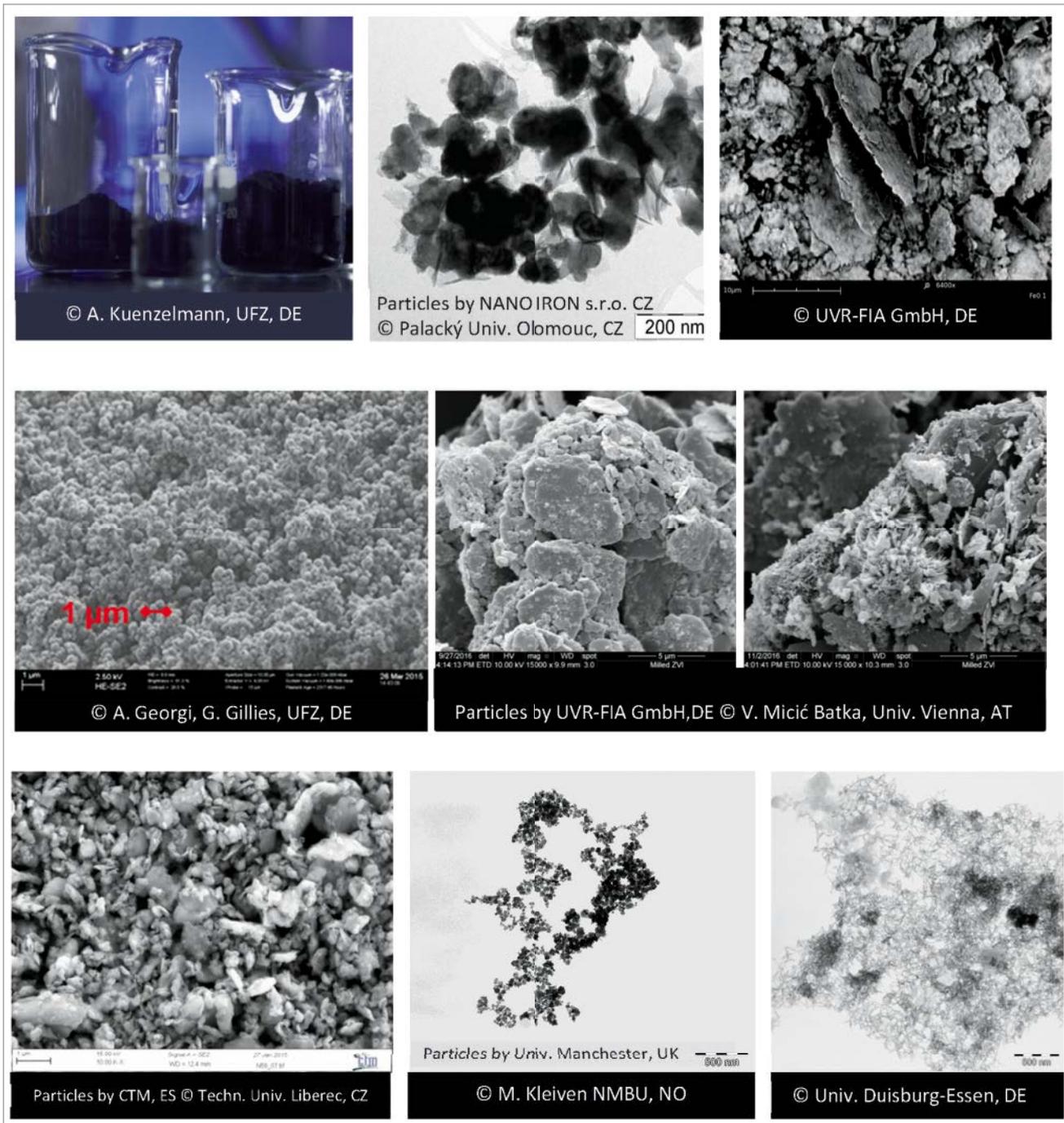


Abbildung 7: Verschiedene Nanopartikel, von links nach rechts: oben: Carbo-Iron<sup>®</sup>, NANOFE (nullwertiges nanoskaliges Eisen), gemahlene nullwertige Nanoeisenpartikel; Mitte: Trap-Ox Fe-Zeolithe, gemahlene nullwertige Nanoeisenpartikel; unten: gemahlene nullwertige Nanoeisenpartikel, mit Palladium dotiertes Bionanomagnetit, Nano-Goethite

nated Sites“ (Überblick über zur Altlastensanierung geeignete Nanopartikel) zusammengestellt und beschrieben.

- Die Mobilität der Partikel während der Injektion in den Untergrund sowie ihr Ausbreitungsverhalten im Nachgang durch die Grundwasserbewegung wurde auf verschiedenen Skalen untersucht: vom Labormaßstab (Säulen), über Versuche in Großbehältern in einer Versuchshalle (Abbildung 8) bis hin zu Feldversuchen an Pilotstandorten (Abbildung 9).
- Dabei wurden optimierte Formulierungen der Partikelsuspensionen sowie verbesserte Injektionstechniken entwickelt.
- Die Reaktivität der Partikel wurde unter Laborbedingungen, in feldtypischen Langzeitversuchen bei VEGAS sowie im Feld untersucht und daraus Informationen zu der zu erwartenden Lebensdauer der Partikel unter verschiedenen Randbedingungen gewonnen. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die Bildung von Metaboliten und Kon-



Abbildung 8: Injektion in die große Rinne bei VEGAS  
© VEGAS, Universität Stuttgart, Deutschland

kurrenzreaktionen gelegt. Aus diesen Erkenntnissen wurden Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz der Partikel abgeleitet.

- Potenziell negative Auswirkungen der NP-Anwendung, insbesondere potenziell negative Auswirkungen auf Umwelt und Ökosysteme inklusive Gewässer, wurden ebenfalls untersucht (z. B. Abbildung 11).
  - Es wurden keine signifikant toxischen Effekte auf Organismen im Boden und Wasser beobachtet (inklusive der Interaktion der NP mit den Schadstoffen und den Abbauprodukten).
  - Auf den Pilotstandorten wurden bis zu neun Monate nach den NP-Injektionen die Effekte auf ausgesuchte Mikroorganismen und Pflanzen in Boden und Wasser überprüft. Bei drei von vier untersuchten Standorten wurden keine toxischen Effekte beobachtet. Nur bei einem Standort wurde eine vorübergehende Erhöhung der Toxizität direkt nach der NP-Injektion festgestellt.
  - Im Gegensatz dazu wurden bei zwei Standorten positive Effekte auf die standortspezifischen mikrobiologischen Gemeinschaften dahingehend festgestellt, dass der natürliche Schadstoffabbau (NA) durch NP-Injektionen stimuliert wurde.
- In Bulletin 6 sind numerische Tools zur Abschätzung des Nanopartikeltransports im Boden zusammengefasst: „Forecasting Nanoparticle Transport in Support of *In Situ* Groundwater Remediation“



Abbildung 9: Injektion von FerMEG12 (nullwertiges nanoskaliges Eisen) in den Solvay-Standort  
© VEGAS, Universität Stuttgart, Deutschland

(Modellierung der Ausbreitung von Nanopartikeln bei der In-situ-Grundwassersanierung).

- 1D-Modellierungstool (MNM) zur begleitenden quantitativen Analyse von Säulenversuchen und zur Planung von Pilotinjektionen von Nanopartikeln (radiale 1D-Simulation).
- 3D Transportmodul (MNM3d) zur Simulation der Ausbreitung und des Transports von Partikeln in heterogenem Untergrund im Feldmaßstab bei Injektion mittels eines oder mehrerer Injektionsbrunnen.



Abbildung 10: Vorbereitung der Monitoring-Ausrüstung auf dem Spolchemie-Standort 1  
© VEGAS, Universität Stuttgart, Deutschland

## Altlastensanierung durch den Einsatz von Nanopartikeln

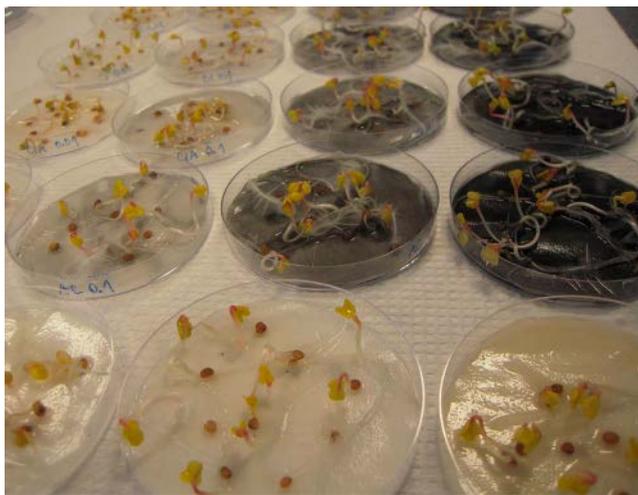


Abbildung 11: Die im Projekt entwickelten NP wurden dahingehend getestet, ob sie sich auf die Verlängerung von Pflanzenwurzeln auswirken. Das Bild zeigt einen Überblick über den Test nach einer sechstägigen Exposition von Rettichsamen (*Raphanus sativus*) gegenüber (von vorne nach hinten) Fe-Zeolithen, Aktivkohle, gealtertem Carbo-Iron® und Carbo-Iron® bei einer Konzentration von je 0,01, 0,1 und 10 g/L. © Claire Coutris, NIBIO, Norwegen

- Analytische Methoden und In-situ-Messsysteme zur Überwachung der Ausbreitung der NP während und nach der Injektion und zur Überprüfung der Sanierungseffizienz (Bulletin 5: „Development and Application of Analytical Methods for Monitoring Nanoparticles in Remediation“ (Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Analyse von Nanopartikeln bei der Sanierung)). Zum Beispiel In-situ-Messsysteme auf Basis magnetischer Suszeptibilitätsmessungen (Messprinzip von Minensuchgeräten, *Abbildung 10*).
- Die Ergebnisse der großskaligen Langzeitversuche bei VEGAS wurden durch die Pilotanwendungen auf den Teststandorten unter realen, heterogenen 3D Bedingungen verifiziert. Die Partikel NANO FER STAR, FerMEG12 und Carbo-Iron® haben CKW-Quellen (teilweise) abgebaut. Weiterhin wurde gezeigt, dass Nano-Goethite-Partikel eine BTEX-Kontaminationsfahne im Grundwasser abgereinigt haben („polishing“), nachdem die BTEX Primärquelle entfernt worden war. Im Feld wurden die Ergebnisse der Großversuche hinsichtlich ihrer Effektivität der Nanosanierung und hinsichtlich des Ausbreitungsverhaltens der NP und ihrer Nebenprodukte validiert.
- Die Pilotstandorte und die dort erzielten Ergebnisse sind in den Standort-Bulletins dargestellt (NanoRem-Bulletins 7–12). Alle Feldversuche wurden mit einem Risikomanagement begleitet. Für zwei Standorte wurde eine qualitative Nachhaltigkeitsbewertung durchgeführt.
- Es konnte gezeigt werden, dass Nanosanierung erfolgreich eingesetzt werden kann, wenn Sanierungsexperten die für den Feldstandort geeigneten Partikel auswählen (wichtig zu beachten:

Masse und Verteilung der Kontamination, hydrogeochemische Parameter des Feldstandorts) und die Grundsätze berücksichtigen, die im „Allgemeinen Leitfadens für den Einsatz einer Nanosanierung“ (Bulletin 3) dargelegt sind (s. u.).

- Es wurden verschiedene Erkenntnisse aus den Pilottests gewonnen:
  - *Behörden*: Eine der zentralen Fragen, die Genehmigungs- und Überwachungsbehörden stellen, ist die nach dem potenziellen Risiko und Nutzen. Dabei bezieht sich das Risiko sowohl auf die menschliche Gesundheit als auch auf die Umwelt. Besonders interessieren sich die Behörden für die Ökotoxizität und die Lebensdauer der NP und der Inhaltsstoffe der injizierten Suspension. Falls die eingesetzte NP-Suspension eine hohe Mobilität aufweist, müssen Vorsichtsmaßnahmen (Sicherungsbrunnen) getroffen werden. Wenn die Anträge gut fundiert sind, werden die Genehmigungen für eine Injektion in einem Zeitraum von 6 bis 24 Monaten nach der Antragstellung erteilt.
  - *Sanierungspflichtige*: Einige Problembesitzer (u. a. Sanierungspflichtige) zeigten sich an der Technologie interessiert. Ausschlaggebend sind vor allem die Fragen nach der Wirksamkeit, der Anwendungsdauer und den Kosten. Problembesitzer wollen meist „Beweise“ der Effizienz, zum Beispiel anhand eines Referenzfalles, bei dem die Technologie erfolgreich angewendet wurde und im besten Falle auch noch schneller bzw. effizienter und kostengünstiger als eine andere Sanierungstechnologien zum Ziel geführt hat.
  - *Kommunikation*: Probleme bei der Anwendung können dann auftreten, wenn der Einsatz der Nanotechnologie nicht angemessen kommuniziert wird. Ungenügende Kommunikation, schlecht informierte Behörden und/oder Öffentlichkeit, können ernstzunehmende und unnötige Vorbehalte verursachen. Daher ist es u. a. wichtig, gut verständliches Informationsmaterial über die Nanosanierungstechnologie zur Verfügung zu stellen.
- Um den Markteintritt und die Anwendung der Nanosanierung in der EU zu fördern, wurden Marktpotenziale für diese Technologie in Europa ermittelt, Hindernisse für die Anwendung der Nanosanierung identifiziert und unter anderem durch Risiko-Nutzen-Analysen und Nachhaltigkeitsbewertungen adressiert [35].

### 8. Empfehlungen / NanoRem-Leitfaden

- Das Grundlagenpapier „Gezielte und sichere Anwendung von Nanopartikeln bei der Altlastensanierung“ fasst die Empfehlungen des NanoRem-Projekts für eine zielgerichtete und zweckmäßige Anwendung von Nanopartikeln bei der In-situ-Sanierung zusammen (Bulletin 2: „Appro-

priate Use of Nanoremediation in Contaminated Land Mangement“).

- Ein Modell („Risk Screening Model“) steht zur Verfügung, um abzuschätzen, ob NanoRem-Partikel injiziert werden können, ohne eine zusätzliche Gefährdung von Grund- oder Oberflächenwasser zu verursachen.
- Der Leitfaden „Generalised Guideline for Application of Nanoremediation“ (Allgemeiner Leitfaden für den Einsatz einer Nanosanierung), dargestellt in Kurzfassung im Bulletin 3, gibt einen Überblick über die Implementierung dieser Art der Sanierung. Damit kann deren prinzipielle Eignung für einen Sanierungsstandort beurteilt werden. Der

Leitfaden liefert eine erste Orientierung, nennt die Randbedingungen für eine Nanosanierung. Er behandelt die dabei zu klärenden zentralen Fragen und gibt Anleitungen, die für eine erfolgreiche Anwendung von Nanopartikeln in der Altlastensanierung zu beachten sind. Er liefert eine praktische Hilfe für Anwender und Beratungsunternehmen bei der Auswahl der geeignetsten Verfahren für einen konkreten Sanierungsfall. Kommt Nanosanierung prinzipiell in Frage, liefert der Leitfaden Kriterien für die Sanierungsplanung und Parameter zur Kontrolle des Sanierungsverlaufs und des Sanierungserfolgs. Zudem unterstützt er Genehmigungs- und Überwachungsbehörden bei der Bewer-

Tabelle 1: Kommerziell verfügbare NanoRem-Partikel: nZVI (nanoskaliges nullwertiges Eisen)

Partikelname	Partikelart	Hersteller	Schadstoffentfernung durch	Behandelte Schadstoffe
Carbo-Iron®	Verbundpartikel aus Fe(0) und Aktivkohle	SciDre GmbH, Deutschland	Adsorption + Reduktion	Halogenierte Kohlenstoffe (Schadstoffspektrum wie nZVI)
FerMEG12	nZVI-Partikel durch Mahlen hergestellt	UVR-FIA GmbH, Deutschland	Reduktion	Halogenierte Kohlenwasserstoffe
NANOFER 25S	nZVI-Partikel, chemisch hergestellt	NANO IRON s.r.o., Tschechien	Reduktion	Halogenierte Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle
NANOFER STAR	Stabilisiertes trockenes nZVI-Pulver, chemisch hergestellt	NANO IRON s.r.o., Tschechien	Reduktion	Halogenierte Kohlenwasserstoffe und Schwermetalle
Nano-Goethite	Eisenoxid, stabilisiert mit Huminsäure	Universität Duisburg-Essen, Deutschland	Oxidation (Katalysator für mikrobiellen Abbau) + Adsorption von Schwermetallen	Biologisch abbaubare (vorzugsweise nicht halogenierte) Kohlenstoffe, wie z. B. BTEX, Schwermetalle

Tabelle 2: NanoRem-Partikel in Entwicklung

Partikelname	Partikelart	Hersteller	Schadstoffentfernung durch	Behandelte Schadstoffe
Trap-Ox Fe-Zeolite	Nanoporöses Aluminiumsilikat, mit Fe(III) beladen	UFZ Leipzig	Adsorption und Oxidation (Katalysator)	Kleine Moleküle (hängt von Porengröße der Zeolithe ab) – z. B. BTEX, MTBE, Ethylenchlorid, Chloroform
Bionanomagnetite	Aus Nano-Fe(III)-Mineralen	University of Manchester, UK	Reduktion, Adsorption von Schwermetallen	Schwermetalle, z. B. Cr(VI)
Palladierte Biomagnetite	Mit Palladium beschichtete Biomagnetite	University of Manchester, UK	Reduktion (Katalysator)	z. B. halogenierte Substanzen (Schadstoffspektrum > als nZVI)
Gemahlenes nZVI	nZVI-Partikel durch Mahlen hergestellt	Centre Tecnològic de Manresa, ES	Reduktion	Halogenierte aliphatische Kohlenwasserstoffe und Cr(VI)
Barium Ferrate	Fe(VI)	VEGAS, Universität Stuttgart	Oxidation	BTEX?, Nitroaromaten? (noch in Untersuchung)
Mg/Al Partikel	Nullwertige Metalle	VEGAS, Universität Stuttgart	Reduktion (Reagens)	Halogenierte Kohlenwasserstoffe
Nano-FerAl	Verbundpartikel aus Fe und Al	UVR-FIA GmbH / VEGAS, Universität Stuttgart	Reduktion (Reagens)	Halogenierte Kohlenwasserstoffe

# Altlastensanierung durch den Einsatz von Nanopartikeln

Standort	Land	Ansprechpartner	Ziel-schadstoff	NP-Typ	Reaktions-prinzip	Aquifer-tyt
Solvay	CH	Solvay	CKW	FerMEG12	Reduktion	Poren-GWL / ungespannt
Spolchemie 1	CZ	Aquatest	CKW	NANOFER 25S / NANOFER STAR	Reduktion	Poren-GWL / ungespannt
Spolchemie 2	CZ	Aquatest	BTEX	Nano-Goethit (Eisen-Oxid)	Oxidation / verbesserter mikrobieller Abbau	Poren-GWL / ungespannt
Neot Hovav	IS	BGU	TCE, cis-DCE, Toluol	Carbo-Iron®	Adsorption / Reduktion	Kluftaquifer
Blassagyarmat	HU	Golder	PCE, TCE, DCE	Carbo-Iron®	Adsorption / Reduktion	Poren-GWL / ungespannt
Nitrastur	ES	Tecnalia	As, Pb, Zn, Cu, Ba, Cd	NANOFER STAR	Reduktion	Poren-GWL / ungespannt

Tabelle 3: NanoRem-Pilotstandorte in Europa

tung von Möglichkeiten und Grenzen einer Sanierung mit Nanopartikeln. Der Leitfaden enthält ein Pre-Screening-Tool, das kommerziell erhältliche NP und ihre Anwendungsbereiche (operating windows) mit den standortspezifischen Gegebenheiten abgleicht. Als weitere Themenbereiche im Leitfaden werden behandelt: Tests ausgewählter NP im Labor hinsichtlich ihrer Reaktivität und Mobilität unter den standortspezifischen Gegebenheiten (vor der Anwendung im Feld), numerische Modellierung, Monitoring (Konzept, Techniken/Verfahren), Durchführung von Pilottests, Planung der Nanosanierung, Installierung des erforderlichen Sanierungsequipments auf dem Standort, Überwachung nach der Injektion der NP und Fragen, die oft von den Behörden gestellt werden.

## 9. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse von NanoRem tragen in hohem Maße dazu bei, einen sachgerechten, zielgerichteten, effizienten, ökonomischen, und damit auch risikoarmen Einsatz von Nanopartikeln bei der In-situ-Sanierung von Boden- und Grundwasserkontaminationen zu gewährleisten. Dies umfasst neben der nun zur Verfügung stehen Auswahl kommerziell erhältlicher, unterschiedlichster NP für verschiedene Kontaminanten auch Analyse-, Simulations- und Monitoringtechniken, Anwendungsleitlinien für Ingenieurbüros und Sanierungsfirmen bis hin zu Informationen und Beurteilungshilfen für Entscheidungsträger (z. B. Sanierungspflichtige) und Behörden.

Das Projektkonsortium hofft, dass die Ergebnisse von NanoRem einen Beitrag leisten, die Nano-Sanierungstechnologie in Zukunft zur Lösung von Altlastenproblemen in Europa verstärkt einzusetzen im Sinne der Wiederherstellung einer sauberen Umwelt.

## Literatur

- [1] Arnold, W.A.; Ball, W.P.; Roberts, A.L. (1999): Polychlorinated ethanes reaction with zero-valent zinc: pathways and rate control, J. Cont. Hydrol. 40, 183–200.
- [2] Bardos, P., Bone, B., Elliott, D., Hartog, N., Henstock, J. and Nathanail, P. (2011): Risk/benefit approach to the application of iron nanoparticles for the remediation of contaminated sites in the environment - CB0440. Report for the Department of Environment, Food and Rural Affairs. <http://randd.defra.gov.uk/Default.aspx?Menu=Menu&Module=More&Location=None&Completed=0&ProjectID=17502>
- [3] Birke, V. Mattik, J. Runne, D. (2004): Mechanochemical reductive dehalogenation of hazardous poly-halogenated contaminants, Journal of Materials Science 39, 5111–5116.
- [4] Bleyl, S.; Kopinke, F.-D.; Mackenzie K. (2012): Carbo-Iron – Synthesis and stabilization of Fe(0)-doped colloidal activated carbon for in-situ groundwater treatment, Chem. Eng. J. 191, pp 588–595

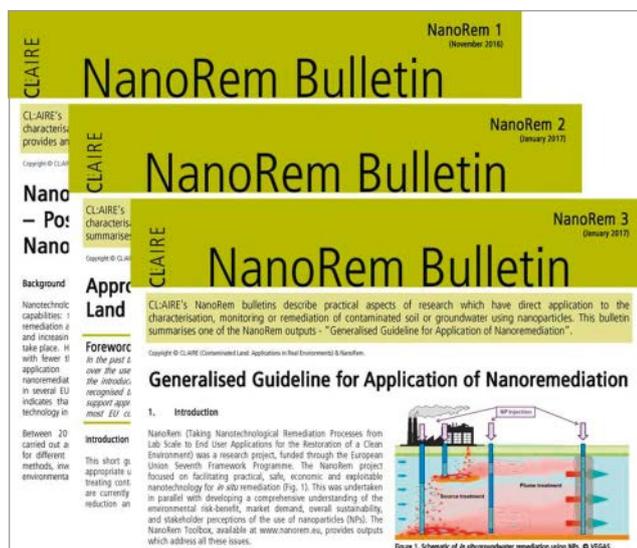


Abbildung 12: Beispiele der Bulletins

- [5] Boronina, T.; Klabunde, K.J. (1995): Destruction of organohalides in water using metal particles. *Environ. Sci. Technol.* 29, 1511–1517.
- [6] Bulletin 1: Alexandra Gens, Joachim Roos, Hans-Peter Koschitzky: Nanotechnology for Contaminated Land Remediation – Possibilities and Future Trends Resulting from the NanoRem Project. November 2016. [www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)
- [7] Bulletin 2: Paul Bardos (Lead Editor): Appropriate Use of Nanoremediation in Contaminated Land Management. Januar 2017. [www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)
- [8] Bulletin 3: Jürgen Braun, Norbert Klaas, Petr Kvapil, Vesna Micic Batka, Thilo Hofmann, Tiziana Tosco, Carlo Bianco, Raja Sethi, Pauline van Gaans, Deborah Oughton, Anett Georgi, Katriin Mackenzie, Judith Nathanail: Generalised Guideline for Application of Nanoremediation. Januar 2017. [www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)
- [9] Bulletin 4: Rob Sweeney, Nicola Harries (Editors): A Guide to Nanoparticles for the Remediation of Contaminated Sites. November 2016. [www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)
- [10] Bulletin 5: Deborah Oughton, Philip Kozin, Steffen Bleyl, Jan Filip, Petra Skácelová, Norbert Klaas, Frank von der Kammer, Andreas Gondikas: Development and Application of Analytical Methods for Monitoring Nanoparticles in Remediation. Januar 2017. [www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)
- [11] Bulletin 6: Carlo Bianco, Tiziana Tosco, Rajandrea Sethi, Pauline van Gaans, Johan Valstar, Amir Raouf: Forecasting Nanoparticle Transport in Support of In Situ Groundwater Remediation. Januar 2017. [www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)
- [12] Bulletin 7: Vojtech Stejskal, Tomas Lederer, Petr Kvapil, Jan Slunsky, Petra Skácelová: NanoRem Pilot Site – Spolchemie I, Czech Republic: Nanoscale zero-valent iron remediation of chlorinated hydrocarbons. Januar 2017. [www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)
- [13] Bulletin 8: Tomas Lederer, Vojtech Stejskal, Petr Kvapil, Rainer Meckenstock, Beate Krok: NanoRem Pilot Site – Spolchemie II, Czech Republic: Remediation of BTEX compounds using Nano-Goethite. Januar 2017. [www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)
- [14] Bulletin 9: Randi Bitsch, Pierre Matz, Petr Kvapil, Norbert Klaas: NanoRem Pilot Site – Solvay, Switzerland: Nanoscale zero-valent iron remediation of chlorinated solvents. Januar 2017. [www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)
- [15] Bulletin 10: Tamas Laszlo, Marton Szabo: NanoRem Pilot Site – Balassagyarmat, Hungary: In Situ Groundwater Remediation Using Carbo-Iron® Nanoparticles. Januar 2017. [www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)
- [16] Bulletin 11: Meirav Cohen, Noam Weisbrod: NanoRem Pilot Site – Neot Hovav, Israel: Transport of Iron Nanoparticles in Fractured Chalk. Januar 2017. [www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)
- [17] Bulletin 12: Nerea Otaegi, Ekain Cagigal: NanoRem Pilot Site – Nitrastur, Spain: Remediation of Arsenic in Groundwater Using Nanoscale Zero-valent Iron. Januar 2017. [www.nanorem.eu](http://www.nanorem.eu)
- [18] Bundesamt für Umwelt (2010): Natürliche Ressourcen in der Schweiz. *Umwelt. Nanotechnologie* 3/2010 pp20–30.
- [19] de Boer, C. (2013): Transport of nano sized zero valent iron colloids during injection into the subsurface: Promotionsschrift, Mitteilungsheft des Instituts für Wasserbau Nr. 215 Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, 3/2013. ISBN: 978-3-942036-19-1.
- [20] DNR - German League for Nature and Environment and EEB – European Environmental Bureau (2011): Soil: worth standing your ground for. Arguments for the Soil Framework Directive. EEB, Brussels. [www.eeb.org/EEB/?LinkServID=1D2DA6F8-B28F-78BB-6E212DDC63EE80E7](http://www.eeb.org/EEB/?LinkServID=1D2DA6F8-B28F-78BB-6E212DDC63EE80E7)
- [21] European Commission (2011): Roadmap to a Resource Efficient Europe. Brussels, <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2011-571-roadmap-to>
- [22] European Commission (2012): <http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/guidelines/DE%20-%20Sealing%20Guidelines.pdf>
- [23] European Environment Agency (2007): European Environment Agency (2007) Progress in management of contaminated sites (CSI 015) – Assessment published on line August 2007. [http://themes.eea.europa.eu/IMS/IMS/ISpecs/ISpecification20041007131746/IAssessment1152619898983/view\\_content](http://themes.eea.europa.eu/IMS/IMS/ISpecs/ISpecification20041007131746/IAssessment1152619898983/view_content)
- [24] Gouvernement Du Québec (2006): Ethics and Nanotechnology: A Basis for Action, Position Statement at Commission de L'éthique de la Science et de la Technologie, National Library of Canada, Québec.
- [25] ITVA H1-13 (2010): „Innovative In-situ-Sanierungsverfahren“, Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA), [www.itva-altlasten.de](http://www.itva-altlasten.de)
- [26] JRC (2007): Report from the Workshop on Nanotechnologies for Environmental Remediation. JRC Ispra 16-17 April 2007. David Rickerby and Mark Morrison. [www.nanowerk.com/nanotechnology/reports/reportpdf/report101.pdf](http://www.nanowerk.com/nanotechnology/reports/reportpdf/report101.pdf)
- [27] Karn B, Kuiken T, Otto M. (2009): Nanotechnology and In-situ Remediation: A Review of the Benefits and Potential Risks. *Environ. Health. Perspect.* 117: 1823-1831.
- [28] Lee K.Y., Bosch J., Meckenstock R.U. (2012): Use of metal-reducing bacteria for bioremediation of soil contaminated with mixed organic and inorganic pollutants. *Environ. Geochem. Health* 34, 135–142.
- [29] Lien, H.L. (2005): Transformation of chlorinated methanes by zero-valent aluminium coupled with Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: *Environ. Technol.* 26, 663–672.

## Altlastensanierung durch den Einsatz von Nanopartikeln

- [30] Liu, Y.; Majetich, S.A.; Tilton, R.D.; Sholl, D.S.; Lowry, G.V. (2005): TCE Dechlorination Rates, Pathways, and Efficiency of Nanoscale Iron Particles with Different Properties. *Environ. Sci. Technol.* 39, 1338–1345.
- [31] Mackenzie, K.; Hildebrand, H.; Kopinke, F.-D. (2007): Nano-catalysts and colloidal suspensions of Carbo-Iron for environmental application. *NSTI-Nanotech 2007*, www.nsti.org, ISBN 1420061836, Vol. 2, 639–642.
- [32] Mackenzie, K.; Schierz, A.; Georgi, A.; Kopinke, F.-D. (2008): Colloidal activated carbon and Carbo-Iron – Novel materials for in-situ groundwater treatment. *Global NEST Journal* (ISSN 1108-4006) 10(1), 54–61.
- [33] Mackenzie K., Bleyl S., Georgi, A., Kopinke F.-D. (2012): Carbo-Iron – an Fe/AC composite – as an alternative to nano-iron for groundwater treatment. *Water Res.* 46, pp 3817–3826.
- [34] Marsalek, B.; Jancula, D.; Marsalkova, E.; Mashlan, M.; Safarova, K.; Tucek, J.; Zboril, R. (2012): Multimodal Action and Selective Toxicity of Zerovalent Iron Nanoparticles against Cyano-bacteria, *Environ. Sci. Technol.* 46, 2316–2323.
- [35] NanoRem DL 9.2: Paul Bardos, Corinne Merly (Lead Authors, Collators, Editors): DL9.2 Final Exploitation Strategy, Risk Benefit Analysis and Standardisation Status. Dezember 2016. www.nanorem.eu
- [36] Oliver, L., Ferber, U., Grimski, D., Millar, K. and Grimski, D. (2005): The Scale and Nature of European Brownfields. CABERNET Project paper www.cabernet.org.uk/resourcefs/417.pdf
- [37] OVAM (2006a): Injectie van (bi)metallisch nanoschaal ijzerpartikels in met chloorkoolwaterstoffen verontreinigde aquifers. Fase 1: Literatuurstudie stand van de techniek. [Online] Available at: www.ovam.be/jahia/Jahia/pid/5
- [38] OVAM (2006b): Injectie van (bi)metallisch nanoschaal ijzerpartikels in met chloorkoolwaterstoffen verontreinigde aquifers. Fase 2: Labotesten. [Online] Available at: www.ovam.be/jahia/Jahia/pid/5
- [39] Saleh, N.; Phenrat, T.; Sirk, K.; Dufour, B.; Ok, J.; Sarbu, T.; Matyjaszewski, K.; Tilton, R.D.; Lowry, G.V. (2005): Adsorbed Triblock Copolymer Deliver Reactive iron nanoparticles to the oil/water interface. *Nano Lett.* 5 (12), 2489–2494.
- [40] Saleh, N., Sirk, K., Liu, Y., Phenrat, T., Dufour, B., Matyjaszewski, K., Tilton, R.D., Lowry, G.V. (2007): Surface Modifications Enhance Nanoiron Transport and NAPL Targeting in Saturated Porous Media. *Environmental Engineering Science* 24, 45–57.
- [41] Schrick, B., Hydutsky, B.W., Blough, J.L., Mallouk, T.E. (2004): Delivery Vehicles for Zerovalent Metal Nanoparticles in Soil and Groundwater. *Chemistry of Materials* 16, 2187–2193.
- [42] TASK Leipzig (2012): Leitfaden: Thermische In-situ-Sanierungsverfahren (TISs) zur Entfernung von Schadensherden aus Boden und Grundwasser, TASK Leipzig, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, www.task-leipzig.info
- [43] Zhang, W. (2003): Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview. *J. Nanopart. Res.* 5, 323–332.

Fördervertrag Nr. 309517. Dieser Artikel beschreibt die Ansicht der Autoren. Die Europäische Union ist nicht verantwortlich für den Gebrauch der in diesem Artikel beschriebenen Informationen.

### Autorenschaft

**Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky**  
Technischer Leiter und Koordinator von NanoRem

**Jürgen Braun, PhD**  
Wissenschaftlicher Leiter und WP-Leader in NanoRem

**Dr.-Ing. Norbert Klaas**  
Leiter des Analytiklabors und in verschiedene WPs in NanoRem involviert

VEGAS, Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 61  
70569 Stuttgart  
Tel.: 0711 / 6 85-6 47 17  
vegas@iws.uni-stuttgart.de

### English Summary

*Nanoremediation stands for the use of nanoparticles (NPs) for treatment (remediation) of contaminated soil and groundwater. Depending on the use of different particle types nanoremediation processes generally involve reduction, oxidation, sorption or a combination of these. NPs are usually defined as particles with one or more dimensions of < 100 nm, but they can include larger composite particles with embedded nanoparticles. The main focus is on source treatment in the saturated zone, but plume treatment is also an option. It is applicable underneath buildings, “independent” of application depth. Different NPs can be used for various contaminants. But it is still an innovative technology. NanoRem was a research project, funded through the European Union’s Seventh Framework which focused on facilitating a practical, safe, economic and exploitable nanotechnology for in situ remediation of soil and groundwater. This was undertaken in parallel with developing a comprehensive understanding of the environmental risk-benefit for the use of nanoparticles (NPs), their market demand, overall sustainability, and stakeholder perceptions. The NanoRem consortium was multidisciplinary, cross-sectoral and transnational and consisted of 29 partners from 13 countries. Since spring 2017 the NanoRem results are available as twelve condensed bulletins. Moreover all results are available in the structured NanoRem toolbox on www.nanorem.eu.*

### Danksagung und Disclaimer

Dieses Projekt wurde von der Europäischen Union im 7. Rahmenprogramm für Forschung, technologische Entwicklung und Demonstration gefördert unter dem