

In-situ-Sanierung von Aquiferen mit Nanopartikeln

Ergebnisse des EU-Projekts NanoRem

Altlastsanierung mit Hilfe von Nanotechnologie - kurz **Nanosanierung** - 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 Sanierungspraxis können unter Umständen auch größere Teilchen zum Einsatz kommen, beispielsweise, weil die eigentlichen NP in Partikelträger eingebettet sind.

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.

Der Fokus von Nanosanierung liegt bei der Quellensanierung in der gesättigten Zone, aber Fahnenanierung ist ebenfalls möglich (Abb. 1). Die Technologie kann unter Gebäuden angewendet werden, nahezu unabhängig von der Anwendungstiefe. Verschiedene Nanopartikel (NP) können für diverse Schadstoffe eingesetzt werden.

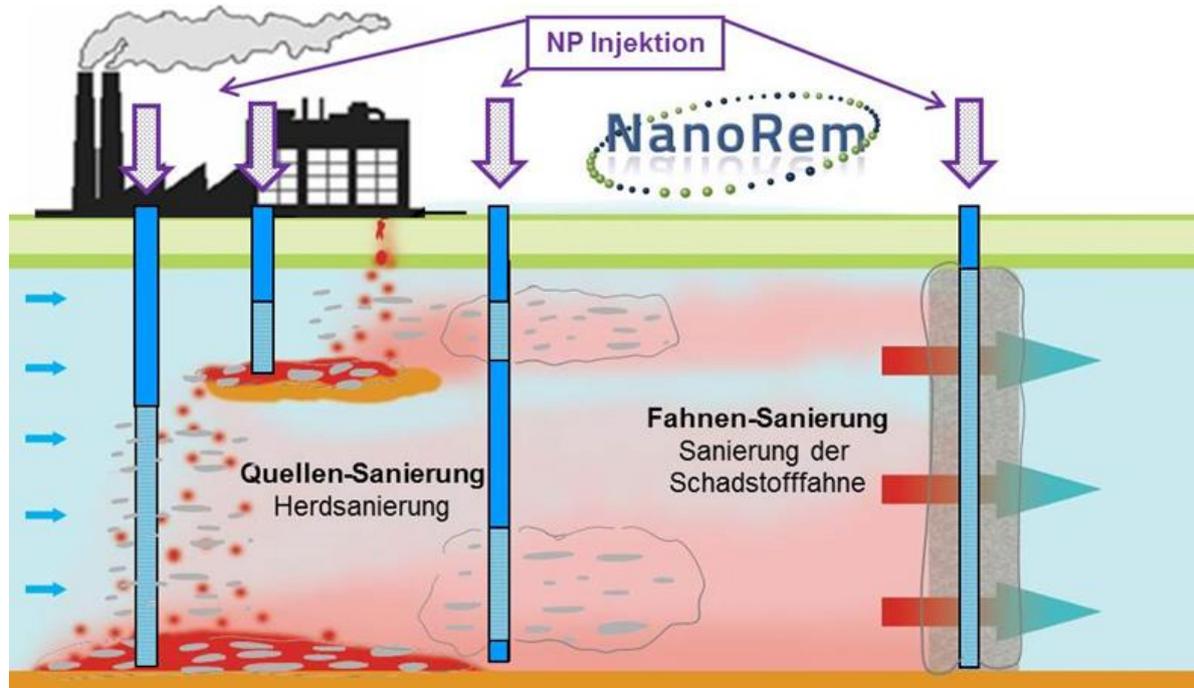


Abb. 1: Nanosanierung: Möglichkeiten des Einsatzes von Nanopartikel zur Grundwassersanierung

Der Stand des Wissens im Jahr 2012 wurde im *af-info 2/2013* dargestellt und es wurde dabei auch auf das am 01.02.2013 begonnene EU-Projekt **NanoRem** und dessen Ziele eingegangen. Über dessen Ergebnisse wird nachfolgend berichtet. Trotz erheblicher Fortschritte 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.

NanoRem (www.nanorem.eu) war ein Forschungsprojekt im 7. Rahmenprogramm der EU. Ziel war, für die In-situ-Sanierung von Boden und Grundwasser mit Hilfe von Nanopartikeln praxistaugliche, effiziente, sichere

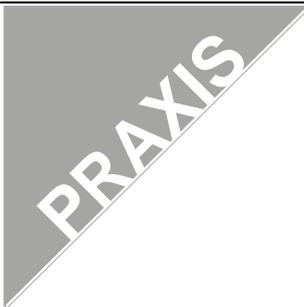
und ökonomische Technologien zu entwickeln, um einen kommerziellen Einsatz in Europa zu ermöglichen und zu stimulieren. Der Einsatzschwerpunkt von Nanopartikeln liegt verfahrensbedingt bei der Sanierung von Schadensherden in Grundwasserleitern.

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

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



Abb. 2: Die NanoRem-Projektpartner



In-situ-Sanierung von Aquiferen mit Nanopartikeln

Projektansatz von NanoRem

Der F&E Ansatz von NanoRem beinhaltet vier Ebenen (Abb.3):

- 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



Abb.3: Projektstruktur des NanoRem-Projekts

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. Abb. 10). Diese sind auf der NanoRem-Homepage (www.nanorem.eu) als kostenlose PDF-Dateien im Downloadbereich (Toolbox) verfügbar.

Eine gewisse Anzahl steht bei VEGAS in gedruckter Form zur Verfügung. Deutschsprachige Bulletins werden in nächster Zeit noch erscheinen. Darüber hinaus sind alle Projektergebnisse und weiterführende Informationen in der NanoRem-Toolbox (Abb. 4) auf www.nanorem.eu/toolbox als Download kostenfrei erhältlich.

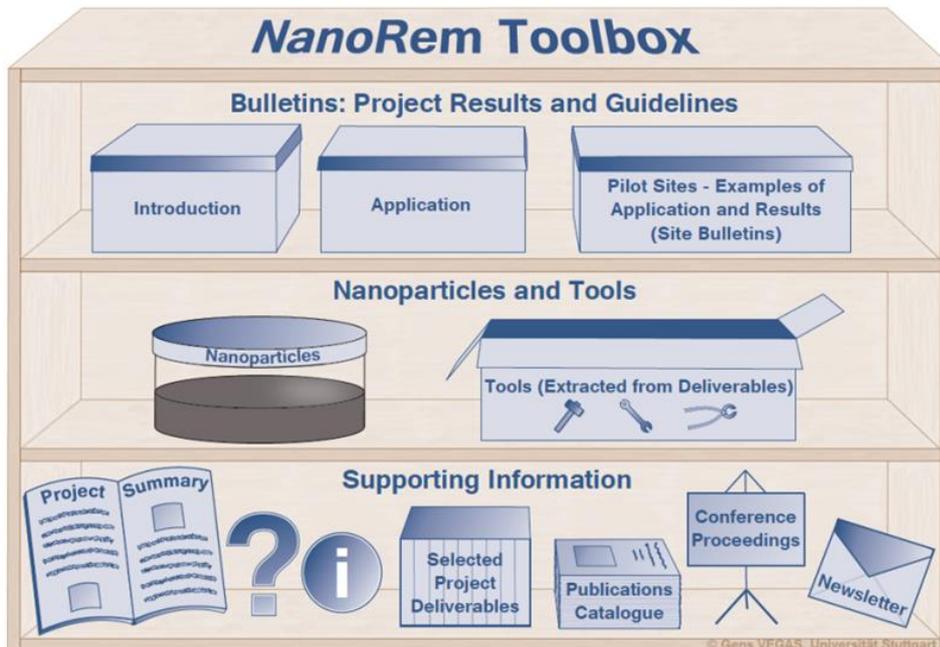


Abb.4: Die NanoRem-Toolbox ist eine zusammenfassende Darstellung aller Projektprodukte und stellt diese auf der Homepage www.nanorem.eu als Downloads zur Verfügung © VEGAS, Universität Stuttgart, Deutschland

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 Ergebnisse.
- Sowohl verbesserte eisenbasierte NP (nullwertiges Eisen) als auch neue NP-Arten (z.B. Goethite, Zeolithe) sowie Verbundpartikel (z.B. Carbo-Iron®) wurden entwickelt. (Beispiele Abb. 5, s. auch Tab. 1 u. 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 Nr. 4: “A Guide to Nanoparticles for the Remediation of Contaminated 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 (Abb. 6) bis hin zu Feldversuchen an Pilotstandorten (Abb. 7). 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 Konkurrenzreaktionen gelegt. Aus diesen Erkenntnissen wurden Maßnahmen zur Verbesserung der Effizienz der Partikel abgeleitet.
- Potentiell negative Auswirkungen der NP-Anwendung, insbesondere potentiell negative Auswirkungen auf Umwelt und Ökosysteme inklusive Gewässer, wurden ebenfalls untersucht (z.B. Abb. 9).
 - 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“ (Modellierung der Ausbreitung von Nanopartikeln bei der In-situ-Grundwassersanierung).
 - 1D-Modellierungstool (MNM3d) 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.
- 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, Abb. 8).
- 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-Goethit-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 (Bulletins 7-12). Alle Feldversuche wurden mit einem Risikomanagement begleitet. Für zwei Standorte wurde eine qualitative Nachhaltigkeitsbewertung durchgeführt.
- Es konnte gezeigt werden, dass Nanosanie- rung erfolgreich eingesetzt werden kann, wenn Sanierungsexperten die für den Feld- standort geeigneten Partikel auswählen (wichtig zu beachten: Masse und Verteilung der Kontamination, hydro-geo-chemische Parameter des Feldstandorts) und die Grundsätze berücksichtigen, die im „Allge- meinen Leitfaden für den Einsatz einer Nano- sanierung“ (Bulletin 3) dargelegt sind (s.u.).
- Es wurden verschiedene Erkenntnisse aus den Pilottests gewonnen:
 - **Behörden:** Die wichtigste Frage, die Genehmigungs- und Überwachungsbe- hörden stellen, ist die nach dem potenti- ellen Risiko und Nutzen. Dabei bezieht sich das Risiko sowohl auf die menschi- che Gesundheit als auch auf die Um- welt. Besonders interessieren sich die Behörden für die Ökotoxizität und die Lebensdauer der NP und der Inhaltstof- fe der injizierten Suspension. Falls die eingesetzte NP-Suspension eine hohe Mobilität aufweist, müssen Vorsichts- maßnahmen (Sicherungsbrunnen) ge- troffen werden. Wenn die Anträge gut fundiert sind, werden die Genehmigun- gen für eine Injektion in einem Zeitraum von 6 bis 24 Monaten nach der Antrag- stellung erteilt.
 - **Sanierungspflichtige:** Einige Problem- besitzer (u.a. Sanierungspflichtige) zeig- ten sich an der Technologie interessiert. Ausschlaggebend sind vor allem die Fragen nach der Wirksamkeit, der An- wendungsdauer und den Kosten. Probl- embesitzer 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 An- wendung können dann auftreten, wenn der Einsatz der Nanotechnologie nicht angemessen kommuniziert wird. Unge- nügende Kommunikation, schlecht in- formierte Behörden und/oder Öffentli- cheit können ernstzunehmende und un- nötige Vorbehalte verursachen. Daher ist es u.a. wichtig, gut verständliches In- formationsmaterial über die Nanosanie- rungstechnologie zur Verfügung zu stel- len.
- Um den Markteintritt und die Anwendung der Nanosanie- rung in der EU zu fördern, wurden Marktpotentiale für diese Techno- logie in Europa ermittelt, Hindernisse für die Anwendung der Nanosanie- rung identifiziert und unter anderem durch Risiko-Nutzen- Analysen und Nachhaltigkeitsbewertungen adressiert (Projektbericht DL 9.2).

PRAXIS

In-situ-Sanierung von Aquiferen mit Nanopartikeln

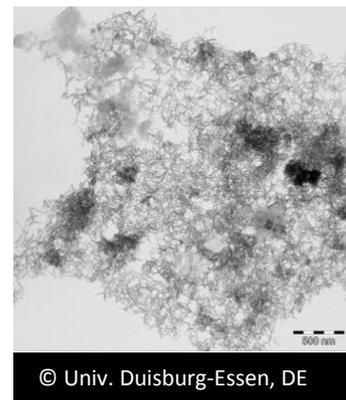
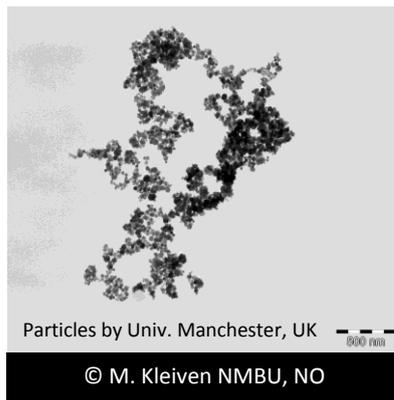
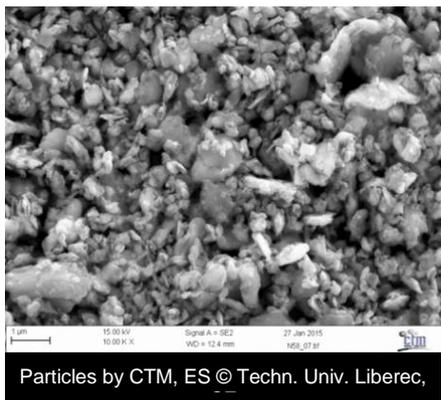
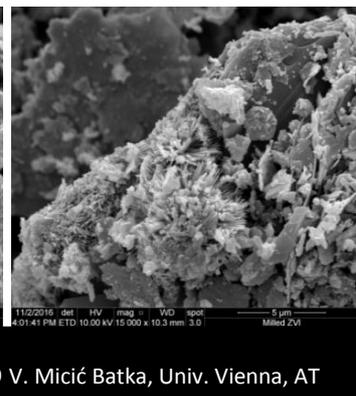
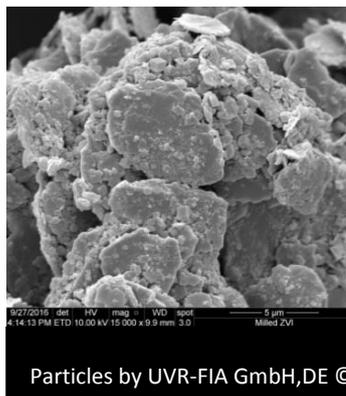
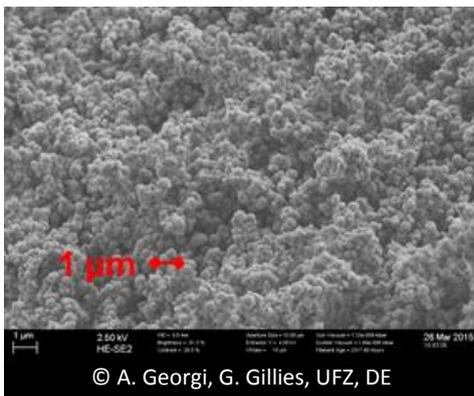
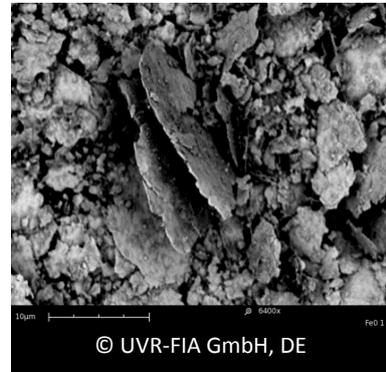
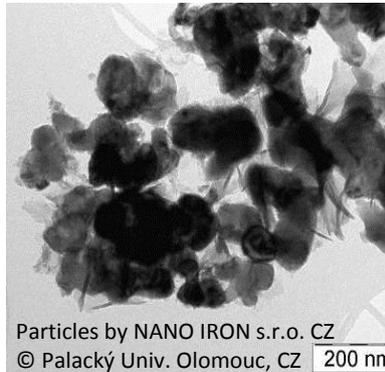


Abb. 5: Verschiedene Nanopartikel, von links nach rechts: oben: Carbo-Iron®, NANOFER (nullwertiges nanoskaliges Eisen), gemahlene nullwertige Nano-eisenpartikel; Mitte: Trap-Ox Fe-Zeolithe, gemahlene nullwertige Nano-eisenpartikel; unten: gemahlene nullwertige Nano-eisenpartikel, mit Palladium dotiertes Bionanomagnetit, Nano-Goethit

In-situ-Sanierung von Aquiferen mit Nanopartikeln



Abb.6: Injektion in die große Rinne bei VEGAS © VEGAS, Universität Stuttgart, Deutschland



Abb.7: Injektion von FerMEG12 (nullwertiges nanoskaliges Eisen) in den Solvay-Standort © VEGAS, Universität Stuttgart, Deutschland



Abb.8: Vorbereitung der Monitoring-Ausrüstung auf dem Spolchemie-Standort 1 © VEGAS, Universität Stuttgart, Deutschland

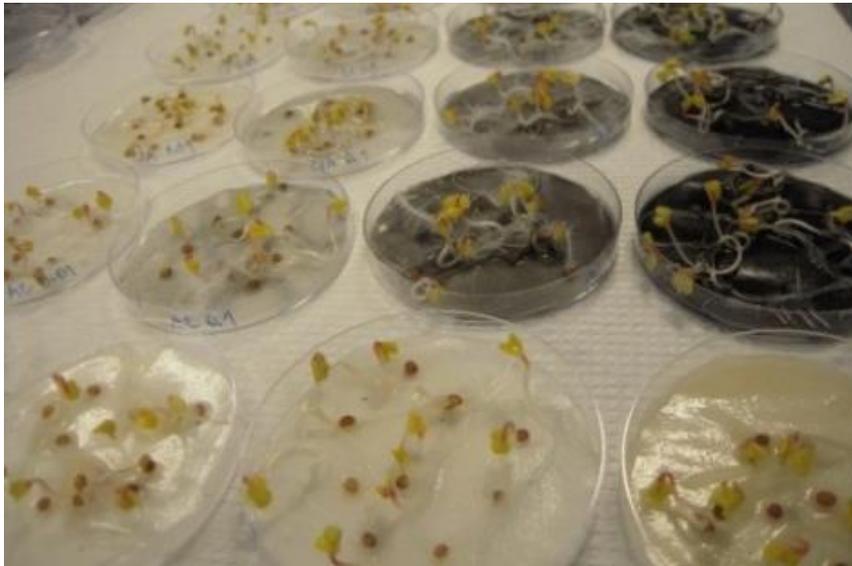


Abb.9: Die im Projekt entwickelten NP wurden dahingehend getestet, ob sie sich auf die Verlängerung von Pflanzenwurzeln auswirken. Das Bild zeigt einen Überblick über den Test nach einer sechstägigen Exposition von Rettichsamen (*Raphanus sativus*) gegenüber (von vorne nach hinten) Fe-Zeolithen, Aktivkohle, gealtertes Carbo-Iron® und Carbo-Iron® bei einer Konzentration von je 0,01, 0,1 und 10 g/L. © Claire Coutris, NIBIO, Norwegen

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	Schadstoff-entfernung 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
Bionano-magnetite	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)
Gemahlene 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

Tabelle 3: NanoRem-Pilotstandorte in Europa

Standort	Land	Ansprechpartner	Ziel-schadstoff	NP-Typ	Reaktionsprinzip	Aquifer-typ
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	Negev, 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

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: „Appropriate 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 Randbedingung und adressiert die wichtigsten Fragen 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 der des Sanierungsverlaufs und des Sanierungserfolgs. Zudem unterstützt er Genehmigungs- und Überwachungsbehörden bei der Bewertung von Möglichkeiten und Grenzen einer Sa-

nierung 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 der erforderlichen Sanierungsequipments auf dem Standort, Überwachung nach der Injektion der NP und Fragen, die oft von den Behörden gestellt werden.

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 zur 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.

NanoRem 1
(November 2016)

CL:AIRE
NanoRem Bulletin

CL:AIRE's NanoRem bulletins describe practical aspects of research which have direct application to the characterisation, monitoring or remediation of contaminated soil or groundwater using nanoparticles. This bulletin provides an overview of the NanoRem project.

Copyright © CL:AIRE (Contaminated Land: Applications in Real Environment) & NanoRem.

Nanotechnology for Contaminated Land Remediation – Possibilities and Future Trends Resulting from the NanoRem Project

Background

Nanotechnologies could offer a step-change in remediation capabilities: treating persistent contaminants which have limited remediation alternatives, avoiding degradation-related intermediates and increasing the speed at which degradation or stabilisation can take place. However, adoption of nanoremediation has been slower, with fewer than 100 field scale applications, since the first field application in 2000. However, the recent emergence of nanoremediation as a commercially-deployed remediation technology in several EU countries, notably the Czech Republic and Germany indicates that it is now time to look at nanoremediation as a technology in the European market-place.

Between 2013-2017, the NanoRem project (www.nanorem.eu) carried out an intensive development and optimisation programme for different nanoparticles (NPs), along with analysis and testing methods, investigations of fate and transport of the NPs and their environmental impact.

The aim of this bulletin is to provide an overview of NanoRem, its aims, structure and the main generic results. This overview provides links to other NanoRem outputs where a greater depth of detail can be found.

What is Nanoremediation?

Nanoremediation describes the *in situ* use of NPs in the treatment of contaminated groundwater and soil. Depending on the use of different particles nanoremediation processes generally involve reduction, oxidation, sorption or their combination. NPs are usually defined as particles with one or more dimensions of less than 100nm. In practice, nanoremediation may apply to particles which are larger, for example composites with embedded NPs. NPs used in remediation are mostly metals or metal oxides, most frequently nano-scale zerovalent iron (nZVI). They may be modified in various ways to improve their performance, for example inclusion of a catalyst (often palladium), use of coatings or modifiers, or emplacement on other materials such as activated carbon or zeolites (for iron oxides).

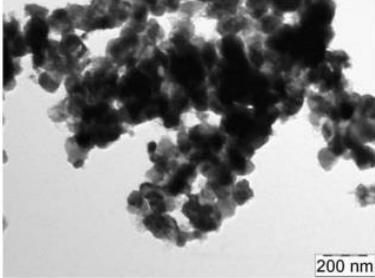


Figure 1. TEM image of nZVI particles injected at the Spolchemie I Site © J. Filip, UPOI, Palacký University in Olomouc, Czech Republic.

They are generally applied *in situ* via various injection methods, which may include the use of viscosity control agents or other materials to facilitate targeted emplacement of nanoparticles in the subsurface.

An Introduction to the NanoRem Project

NanoRem was a research project, funded through the European Union Seventh Framework Programme. The NanoRem project focused on facilitating practical, safe, economic and exploitable nanotechnology for *in situ* remediation. This was undertaken in parallel with developing a comprehensive understanding of the environmental risk-benefit for the use of NPs, market demand, overall sustainability, and stakeholder perceptions. The project was designed to unlock the potential of nanoremediation processes from laboratory-scale to end user applications and to support both the appropriate use of nanotechnology in restoring land and water resources and the development of the knowledge based economy at a world leading level for the benefit of a wide range of users in the EU environmental sector.



Taking **N**anotechnological **R**emediation Processes from Lab Scale to End User Applications for the Restoration of a Clean Environment.
This project has received funding from the European Union's Seventh Framework Programme for research, technological development and demonstration under grant agreement no. 309517.



Abb.10: Beispiel für ein Bulletin

Literaturhinweise

In Ergänzung zu den Hinweisen im *af-Info* 2/2013

DL 9.2: Paul Bardos, Corinne Merly (Lead Authors, Coauthors, Editors): DL9.2 Final Exploitation Strategy, Risk Benefit Analysis and Standardisation Status. Dezember 2016. www.nanorem.eu

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

Bulletin 2: Paul Bardos (Lead Editor): Appropriate Use of Nanoremediation in Contaminated Land Management. Januar 2017. www.nanorem.eu

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, Katrin Mackenzie, Judith Nathanail: *Generalised Guideline for Application of Nanoremediation*. Januar 2017. www.nanorem.eu

Bulletin 4: Rob Sweeney, Nicola Harries (Editors): *A Guide to Nanoparticles for the Remediation of Contaminated Sites*. November 2016. www.nanorem.eu

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

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

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

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

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

Bulletin 10: Tamas Laszlo, Marton Szabo: *NanoRem Pilot Site – Balassagyarmat, Hungary: In Situ Groundwater Remediation Using Carbo-Iron® Nanoparticles*. Januar 2017. www.nanorem.eu

Bulletin 11: Meirav Cohen, Noam Weisbrod: *NanoRem Pilot Site – Neot Hovav, Israel: Transport of Iron Nanoparticles in Fractured Chalk*. Januar 2017. www.nanorem.eu

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

Danksagung und Disclaimer

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

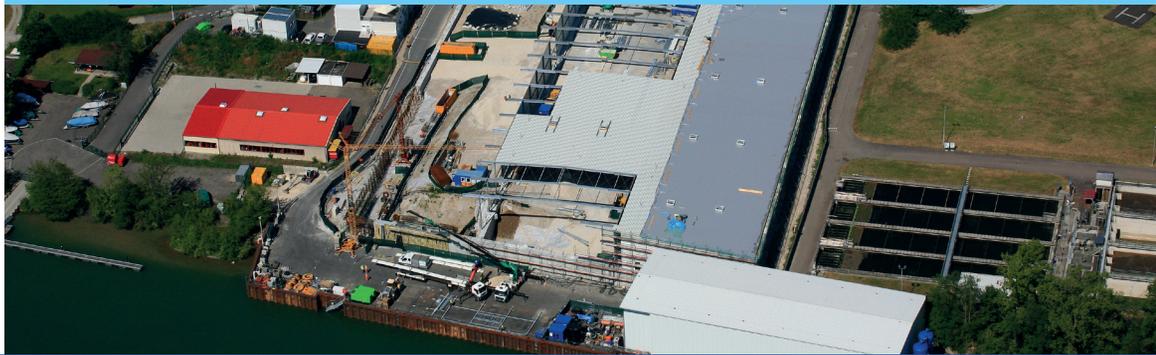
Ansprechpartner:

Hans-Peter Koschitzky
 Jürgen Braun
 Norbert Klaas
 Alexandra Gens
 VEGAS, Universität Stuttgart
 Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart
 Tel.: 0711 / 685 – 64717
vegas@iws.uni-stuttgart.de

altlastenforum

Baden-Württemberg e.V.

Flächenrecycling, Boden- und Grundwasserschutz



20 Jahre af

NanoRem

Recht & Normen

Dies & Das

Veranstaltungen

Termine

September

af-info 1/2017