



NanoRem: Ergebnisse aus dem EU-Forschungsvorhaben



Hans-Peter Koschitzky, Jürgen Braun, Norbert Klaas, Alexandra Gens, Joachim Roos
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart
vegass@iws.uni-stuttgart.de www.vegass.uni-stuttgart.de

af-Fachveranstaltung 2017
Altlastensanierung und Sanierungsziele



altlastenforum
Baden-Württemberg e.V.
Flächensanierung, Boden- und Grundwasser

Stuttgart, 17. November 2017



1



- NanoRem und „Nanosanierung“ (Nanoremediation)
- NanoRem Ansatz / Projekt Struktur
- Untersuchungen und Ergebnisse
- „NanoRem Toolbox“ und die Bulletins (Info-Blätter, Kurzdarstellung)



altlastenforum
Baden-Württemberg e.V.
Flächensanierung, Boden- und Grundwasser

NanoRem - Ergebnisse

af-Fachveranstaltung, Stuttgart, 17. November 2017



2

NanoRem?



NanoRem – Taking Nanotechnological Remediation Processes from Lab Scale to End User Applications for the Restoration of a Clean Environment



altlastenforum
Baden-Württemberg e.V.
Flächensanierung, Boden- und Grundwasser

NanoRem - Ergebnisse

af-Fachveranstaltung, Stuttgart, 17. November 2017



3

Worum geht es?



Boden- und Grundwassersanierung mit Nanopartikeln zur Wiederherstellung einer sauberen Umwelt: Von der Prozessforschung im Labormaßstab zur praktischen Anwendung



altlastenforum
Baden-Württemberg e.V.
Flächensanierung, Boden- und Grundwasser

NanoRem - Ergebnisse

af-Fachveranstaltung, Stuttgart, 17. November 2017



4



• **NanoRem: interdisziplinäres, branchenübergreifendes EU-gefördertes Forschungsprojekt, Budget ca. 14 Mio Euro**



• **Konsortium: 29 Partner aus 13 Ländern, Forschungsgruppen, Industrie, Ingenieurbüros und Behörden**



• **Laufzeit: 01.02.2013 – 31.01.2017**



NanoRem - Ergebnisse

af-Fachveranstaltung, Stuttgart, 17. November 2017



5

„Nanosanierung“ - was sind Nano-Sanierungstechnologien?



- Anwendung von Nanopartikeln (NP) für die Sanierung von verunreinigtem Grundwasser und Boden
- NP werden gewöhnlich als Partikel definiert, die in einer oder mehreren Dimensionen kleiner als 100 nm sind
- Je nach Anwendung verschiedener Partikelsorten ist der „Reinigungsprozess“ eine Reduktion, Oxidation, Sorption oder deren Kombination
- „Komposit“-Partikel (Verbundpartikel) sind größer, sie enthalten eingebettete NPs



NanoRem - Ergebnisse

af-Fachveranstaltung, Stuttgart, 17. November 2017

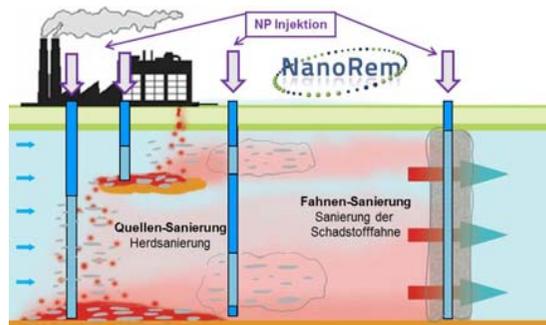


6

Charakteristika einer In-situ-Sanierung mit Nanopartikeln



- Kleine Partikel
→ große spezifische Oberfläche
→ hohe Reaktivität
- unter Gebäuden anwendbar
- „unabhängig“ von Anwendungstiefe
- Verschiedenartige NPs für unterschiedliche Schadstoffe
- innovative Technologie, mit Potenzial für neue Entwicklungen
- NPs (in einem Trägerfluid) werden über Brunnen oder DirectPush in die gesättigte Zone injiziert
- Fokus: Quellensanierung



NanoRem - Ergebnisse

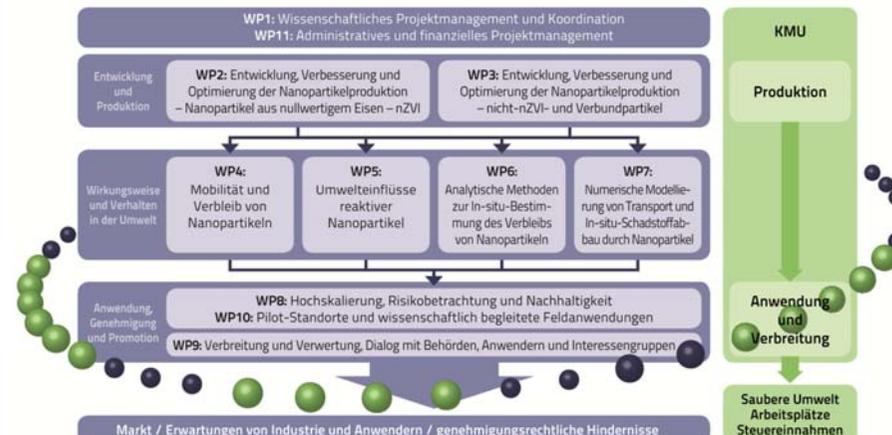
af-Fachveranstaltung, Stuttgart, 17. November 2017



5



Boden- und Grundwassersanierung mit Nanopartikeln zur Wiederherstellung einer sauberen Umwelt: Von der Prozessforschung im Labormaßstab zur praktischen Anwendung



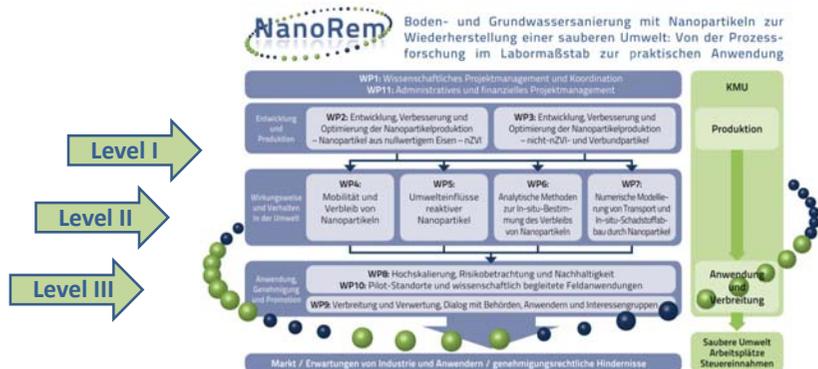
NanoRem - Ergebnisse

af-Fachveranstaltung, Stuttgart, 17. November 2017



8

NanoRem: Drei-Stufen-Ansatz



- I Entwicklung und Produktion: **WP2 und WP3**
- II Eigenschaften und Verhalten in der Umwelt: **WP4 bis WP7**
- III Anwendung, Genehmigung und Bekanntmachung (Verbreitung, KnowHow-Tansfer)
 - Großskalige Versuche und Pilot Standorte: **WP8 und WP10**
 - Verbreitung, Kommunikation und PR: **WP9**

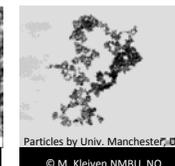
NanoRem Ergebnisse (1)



(1) Identifizierung der **am besten geeigneten technologischen Ansätze**, die eine **deutliche Verbesserung** bei der In-situ-Sanierung erzielen können.

- Untersuchung von Mobilität, Reaktivität, Wirkungszeit und Reaktionsprodukten mit Hilfe von existierenden und neuen Modellsystemen
- Einfluss von Größe, Oberflächenchemie, Struktur und „Rezeptur“ auf die Leistungsfähigkeit bzw. das Anwendungsspektrum
- ✓ Optimierung von NP und Entwicklung neuer Nano- und Verbundpartikel
- ✓ Deutliche Verbesserung: Ausweitung des Anwendungsbereichs auf weitere Schadstoffe

Weitere Informationen
Bulletin Nr. 4: "A Guide to Nanoparticles for the Remediation of Contaminated Sites"



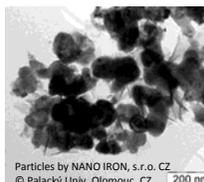
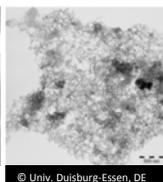
NanoRem Ergebnisse (2)



(2) Entwicklung **kostengünstigerer Produktionsmethoden** und Herstellung der Nanopartikel in **großen Mengen** (kommerzielle Produktion).

- ✓ Herstellungsprozesse im Labor wurden für die industrielle Fertigung angepasst und erfolgreich umgesetzt, so dass nun wettbewerbsfähige Technologien zur Herstellung verschiedener Nanopartikel zur Verfügung stehen
- ✓ nZVI-Partikel wurden durch eine neue Oberflächenbeschichtung dahingehend verbessert, dass sie als trockenes Pulver gelagert und transportiert werden können

Weitere Informationen
Bulletin Nr. 4: "A Guide to Nanoparticles for the Remediation of Contaminated Sites"



NanoRem Ergebnisse (3a)



(3a) Untersuchung von **Mobilität und Ausbreitungsverhalten** von Nano-Partikeln im Untergrund hinsichtlich ihrer **Wirksamkeit bei der Sanierung**.

- Experimente zur Bestimmung von Mobilität und Ausbreitungsverhalten in Labor, Großbehälter und im Feld
- ✓ Final Report on *Three Large-Scale Experiments*
- ✓ *Generalized Guideline for Application*
- ✓ Projektbericht *Stability, Mobility, Delivery and Fate of optimized NPs under Field Relevant Conditions*

Weitere Informationen
NanoRem Standort-Bulletins Nr. 7-12
NanoRem Application-Guideline, Bulletin Nr. 3

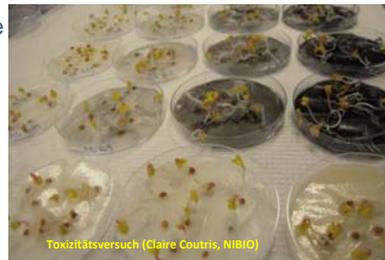


NanoRem Ergebnisse (3b)



(3b)...und ihrem möglicherweise vorhandenen Schädigungspotential für die Umwelt.

- Erforschung unerwünschter Nebeneffekte der NP-Anwendung auf Umwelt und Ökosysteme
- In Laborversuchen wurden keine signifikanten toxischen Effekte auf Organismen in Boden und Wasser beobachtet
- Drei von vier Pilotstandorten zeigten bis neun Monate nach der NP-Injektion keine toxischen Effekte, ein Standort zeigte vorübergehend eine gering erhöhte Toxizität
- Bei zwei Standorten wurden standortspezifische mikrobiologische Gemeinschaften durch NP-Injektionen stimuliert



Toxizitätsversuch (Claire Coutris, NIBID)

Kommerziell verfügbare NanoRem-Partikel



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

NanoRem-Partikel in Entwicklung



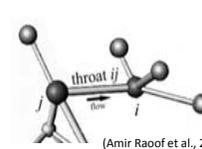
Partikelname	Partikelart	Hersteller	Schadstoffentfernung durch	Behandelte Schadstoffe
Trap-Ox Zeolites	Nanoporöses Alumosilikat, mit Fe(III) beladen	UFZ Leipzig, Deutschland	Adsorption und Oxidation (Katalysator)	Kleine Moleküle (hängt von Porengröße der Zeolithe) – z.B. BTEX, MTBE, Ethylenchlorid, Chloroform
Bionano-magnetite	Aus Nano-Fe(III) Mineralen	University of Manchester, UK	Reduktion, Adsorption von Schwermetallen	Schwermetalle, z.B. Cr(VI)
Palladized bionano-magnetite	Mit Palladium dotiertes Biomagnetit	University of Manchester, UK	Reduktion (Katalysator)	z.B. halogenierte Substanzen (breiteres Schadstoffspektrum als nZVI)
Abrasive Milling nZVI	Gemahlenes Eisen	Centre Tecnològic de Manresa, Spanien	Reduktion	Halogenierte Aliphate und Cr(VI)
Barium Ferrate	Fe(VI)	VEGAS, Universität Stuttgart, Deutschland	Oxidation	BTEX?, Nitroaromaten? (Untersuchungen laufen noch)
Mg/Al Partikel	Nullwertige Metalle	VEGAS, Universität Stuttgart, Deutschland	Reduktion (Reagens)	Halogenierte Kohlenwasserstoffe
Nano-FerAl	Verbundpartikel aus Fe und Al	UVR-FIA GmbH / VEGAS, Universität Stuttgart, Deutschland	Reduktion (Reagens)	Halogenierte Kohlenwasserstoffe

NanoRem Ergebnisse (4)

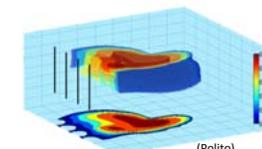


(4) Entwicklung von **Messtechniken, Planungs-, Untersuchungs- und Überwachungsmethoden** für Auslegung und Anwendung der Nano-Sanierungstechnologie. Der „Werkzeugkasten“ umfasst Messmethoden und Messtechniken vom Labor bis zum In-situ-Nachweis sowie numerische Modelle.

- Bulletin Nr. 2: *“Appropriate Use of Nanoremediation”*
- Bulletin Nr. 3: *“Generalized Guideline for Application”*
- Bulletin Nr. 5: *“Methods for Monitoring NP in Remediation”*
- Bulletin Nr. 6: *“Forecasting NP Transport for Soil Remediation”*
- Pre-Deployment Risk Assessment Tool



(Amir Raouf et al., 2010)



(Polito)



Messtechnik auf Pilotstandorten (VEGAS/USTUTT)



NanoRem Ergebnisse (5)



- (5) **Kommunikation** mit **allen beteiligten Akteuren einer Sanierung** zur Unterstützung der zielorientierten Forschung, der Berücksichtigung von möglichen **Risiken, Nachhaltigkeitsaspekten** bis hin zu **genehmigungsrechtlicher Fragen**, um eine langfristige wirtschaftliche Vermarktung der Verfahren sicherzustellen.
- Berücksichtigung wirtschaftlicher Interessen und behördlicher Vorgaben
 - ✓ *“Exploitation Strategy, Risk-Benefit Analysis and Standardisation Status”* verfügbar auf www.nanorem.eu
 - ✓ Bericht zur Lebenszyklusanalyse (LCA) in: *“Final Report on Three Large-Scale Experiments and Generalized Guideline for Application”*
 - ✓ Leitfaden zum Vorgehen bei der Erstellung einer Nachhaltigkeitsanalyse (Sustainability Analysis): *“NanoRem Case Study Sustainability Assessment Background and Workbook”*

NanoRem Ergebnisse (6a)



- (6) Ausführung **mehrerer Pilotprojekte** in verschiedenen europäischen Ländern, um die Einsatzfähigkeit der Technologie zu demonstrieren.
- ✓ Nanopartikel wurden sowohl in Großversuchen bei VEGAS als auch an Pilotstandorten eingesetzt, um die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zu validieren
 - ✓ Alle Feldversuche im Projekt wurden im Rahmen eines Risikomanagementregimes durchgeführt um die behördlichen Anforderungen zu erfüllen und die Genehmigungen zur Durchführung zu erhalten
 - ✓ Für zwei Standorte (1x NanoRem, 1x Extern) wurde eine qualitative Nachhaltigkeitsbewertung durchgeführt



Injection at Hungarian pilot site (Golder)

NanoRem Ergebnisse (6b)



- (6) Ausführung **mehrerer Pilotprojekte** in verschiedenen europäischen Ländern, um die Einsatzfähigkeit der Technologie zu demonstrieren.
- ✓ Der Einsatz von NANO FER STAR, FerMEG12 und Carbo-Iron® führte zu einem (partiellen) Abbau von CHC-Quellen
 - ✓ Es wurde gezeigt, dass Nano-Goethite-Partikel eine verbleibende BTEX-Kontamination (Grundwasserfahne) nach der Entfernung einer primären Quelle weiter abbauen „Polishing“
 - ✓ Eine Beschreibung der Pilotstudien und der Ergebnisse ist in den Standort-Bulletins auf www.nanorem.eu erhältlich



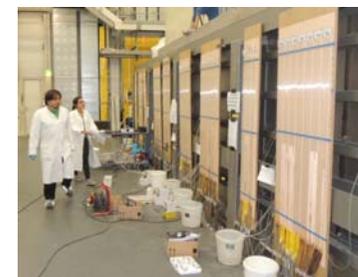
Injection of FerMEG12 (HzVI) at Solvay site, CH (© VEGAS)



Großbehälter (VEGAS/USTUTT)



Große Rinne (VEGAS/USTUTT)



NanoRem Pilotstandorte



Standort	Land	Zuständig	Schadstoff	NP-Typ	Reaktionsprinzip	Aquifer
Solvay	CH	Solvay	LHKW	FerMEG12 (gemahlen, nZVI)	Reduktion	Porös / frei
Spolchemie 1	CZ	Aquatest	LHKW	NANOFER 25S / NANOFER STAR	Reduktion	Porös / frei
Spolchemie 2	CZ	Aquatest	BTEX	Nano-Goethite (Eisenoxid)	Oxidation / mikrobiologische Unterstützung	Porös / frei
Neot Hovav	IS	BGU	TCE, cis-DCE, Toluol	Carbo-Iron®	Adsorption / Reduktion	Kluft
Balassagyarmat	HU	Golder	PCE, TCE, DCE	Carbo-Iron®	Adsorption / Reduktion	Porös / frei
Nitrastur	ES	Tecnalia	As, Pb, Zn, Cu, Ba, Cd	NANOFER STAR	Reduktion	Porös / frei



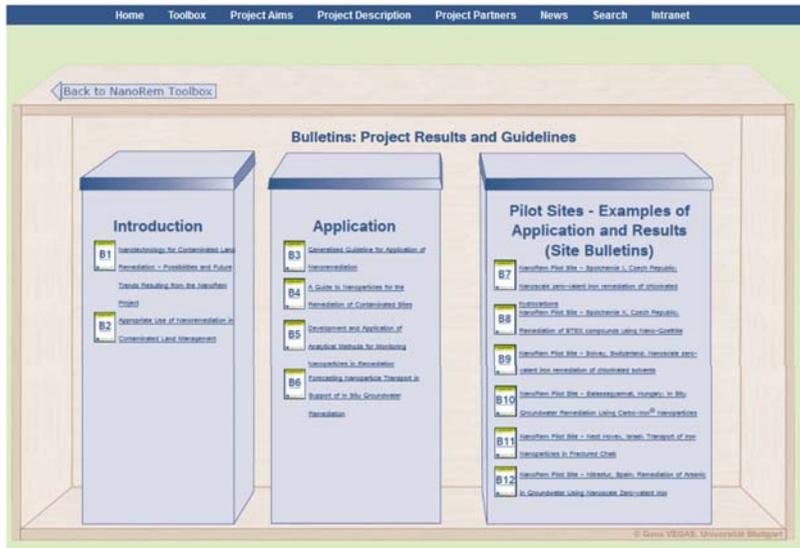
Spolchemie Pilot Site 1, Check der Mikropumpen (VEGAS/USTUTT) Installationen auf der Solvay Pilot Site (VEGAS/USTUTT)



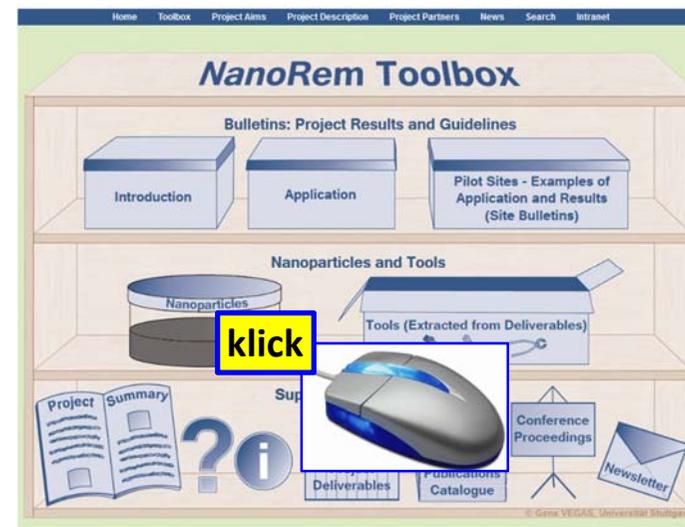
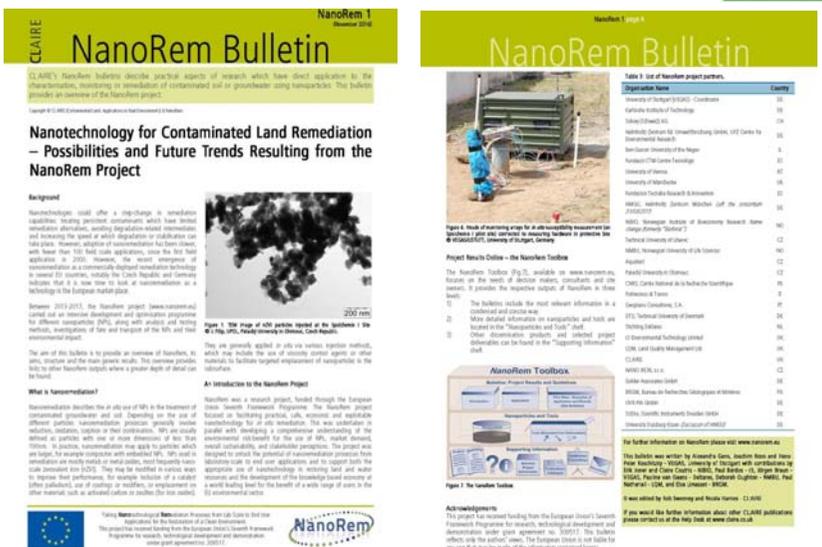
Injektion: Spolchemie Pilot Site 1 (VEGAS/USTUTT) NPs für Solvay Pilot Site (VEGAS/USTUTT)

www.nanorem.eu



Nr.	Titel
1	Nanotechnology for Contaminated Land Remediation - Possibilities and Future Trends Resulting from the NanoRem Project
2	Appropriate Use of Nanoremediation
3	Generalised Guideline for Application of Nanoremediation
4	A Guide to Nanoparticles for the Remediation of Contaminated Sites
5	Development and Application of Methods for Monitoring Nanoparticles in Remediation
6	Forecasting Nanoparticle Transport for Soil Remediation
7-12	Site-Bulletins (Standort Bulletins)





The screenshot shows the NanoRem website interface. At the top, there are navigation links: Home, Toolbox, Project Aims, Project Description, Project Partners, News, Search, and Intranet. Below this is a 'Back to NanoRem Toolbox' button. The main content area is titled 'Nanoparticles and Tools' and includes a sub-header 'Particle characterisation and reactivity studies (pZV, nano-ZV and composite particles)'. It features three main sections: 'Commercially Available Products' (listing Carbon-Iron, Fe/MgO12, NANOER 258, NANOER 259, Nano-Goodite, and Trap-On Fe-zincites), 'Products In Development' (listing Abrasive Milling nZVI, Barium Ferrate, Nanocomposites, Mo/Al particles, Nano-Fe/Al, and Palladium), and 'Tools' (listing Generalised Guidelines for Application of Nanoremediation, Pre-Screening Tool, Risk Screening Model, Briefing Document for Sustainability, Assessment, Sustainability Assessment Detailed, and Methodology and Workbook). A 'Links to safety data sheets' link is also present.



This block contains a collage of documents. On the left is a 'PRAXIS' article titled 'In-situ-Sanierung von Aquiferen mit Nanopartikeln' with a sub-header 'Ergebnisse des EU-Projekts NanoRem'. In the center is a 'altlastenforum' 'af-info 1/2017' document. On the right is an article titled 'Altlastensanierung durch den Einsatz von Nanopartikeln' with a sub-header 'Beiträge und Ergebnisse des EU-Projekts NanoRem'. Below the articles is a diagram of a remediation site showing 'NP Injektion', 'Fahnen-Sonde', and 'Quellen-Sanierung + Fernsanierung'. The bottom right corner features a '05.17 altlastenspektrum' magazine cover.



Danke der EU
& dem
NanoRem
Team



Danke für Ihr Interesse und Ihre
Aufmerksamkeit – Haben Sie Fragen ?



This project has received funding from the European Union's Seventh Framework Programme for research, technological development and demonstration under Grant Agreement No. 309517.

This presentation reflects only the author's views. The European Union is not liable for any use that may be made of the information contained therein.



Hans-Peter Koschitzky
Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung
Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart
vegas@lws.uni-stuttgart.de www.vegas.uni-stuttgart.de



13 Länder
Industrie
Behörden

• Laufzeit



NanoRem - Ergebnisse

af-Fachveranstaltung, Stuttgart, 17. November 2017



Projektziele (1)



- (1) Identifizierung der **am besten geeigneten technologischen Ansätze**, die eine **deutliche Verbesserung** bei der In-situ-Sanierung in der Praxis erzielen können.
- (2) Entwicklung **kostengünstigerer Produktionsmethoden** und Herstellung der Nanopartikel in **größeren Mengen** (kommerzielle Produktion).
- (3) Untersuchung der **Mobilität, der Reaktivität, der Langzeitstabilität und des Migrationspotenzials** von Nanopartikeln im Untergrund sowie Erforschung der **Auswirkungen von Partikeln und deren Abbauprodukte** auf Ökosysteme und Gewässer.



NanoRem - Ergebnisse

af-Fachveranstaltung, Stuttgart, 17. November 2017



Projektziele (2)



- (4) Entwicklung eines **umfassenden "Werkzeugkastens"** für die Ausführung und Überwachung von In-situ-Sanierungen. Dieser umfasst **Messmethoden und Messtechniken** vom Labor bis zum In-situ-Nachweis sowie **numerische Modelle**.
- (5) **Kommunikation mit allen beteiligten Akteuren** einer Sanierung zur Unterstützung der zielorientierten Forschung, der Berücksichtigung von möglichen Risiken, Nachhaltigkeitsaspekten bis hin zu genehmigungsrechtlichen Fragen, um eine langfristige wirtschaftliche Vermarktung der Verfahren sicherzustellen.
- (6) Ausführung **mehrerer Pilotprojekte** in verschiedenen europäischen Ländern, um die **Einsatzfähigkeit der Technologie zu demonstrieren** und Ergebnisse und Kosten von realen Anwendungsfällen zu erhalten.



NanoRem - Ergebnisse

af-Fachveranstaltung, Stuttgart, 17. November 2017



Charakteristika einer In-situ-Sanierung mit Nanopartikeln



- Partikel, z.B. nZVI sind klein
→ große spezifische Oberfläche
→ höhere Reaktivität
- NPs (in einem Trägerfluid) werden über Brunnen in die gesättigte Zone injiziert
- Fokus: Quellsanierung
- unter Gebäuden anwendbar
- "unabhängig" von Anwendungstiefe
- Verschiedenartige NPs für
- unterschiedliche Schadstoffe
- innovative Technologie, mit Potenzial für neue Entwicklungen



NanoRem - Ergebnisse

af-Fachveranstaltung, Stuttgart, 17. November 2017



(6) Carry out a **series of full scale applications in several European countries** to provide cost estimations and performance, fate and transport findings

- ✓ NPs were applied in both large-scale containers and on pilot sites to provide on-site validation of the lab-scale results
- ✓ Site results can be found in the site bulletins on www.nanorem.eu
- ✓ All field trials were carried out within a risk management regime that gained the required regulator approvals
- ✓ Qualitative sustainability assessment for one NanoRem pilot site and an external one
- ✓ NANO FER STAR, FerMEG12 and Carbo-Iron® led to a (partial) degradation of CHC sources. Nano-Goethite particles were shown to “polish” a remaining BTEX contamination (groundwater plume) after a primary source removal.



Large Scale Flume
(© VEGAS / University of Stuttgart, DE)



Injection of FerMEG12 (nZVI)
into the Solvay site
(© VEGAS / University of
Stuttgart, DE)