

# Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Hans-Peter Koschitzky, Norbert Klaas & Jürgen Braun  
 Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung, Universität Stuttgart  
[koschitzky@iws.uni-stuttgart.de](mailto:koschitzky@iws.uni-stuttgart.de)



Altlastensymposium 2013  
 09. & 10. Juli 2013, Regensburg

## Was können Sie erwarten

Wie klein ist nano ?

Nanopartikel für die In-situ-Sanierung

Status quo – Kenntnisstand / Stand des Wissens

Bisherige Anwendungen „Nanosanierung“ in Europa

Reaktionen der EU → 7. Rahmenprogramm

Quo vadis – das EU-Projekt NanoRem

© VEGAS



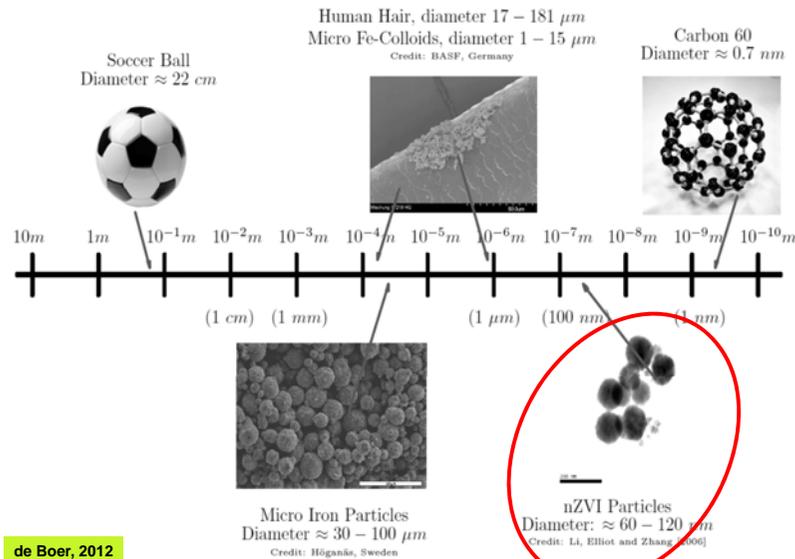
Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Altlastensymposium 2013  
 Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos 2

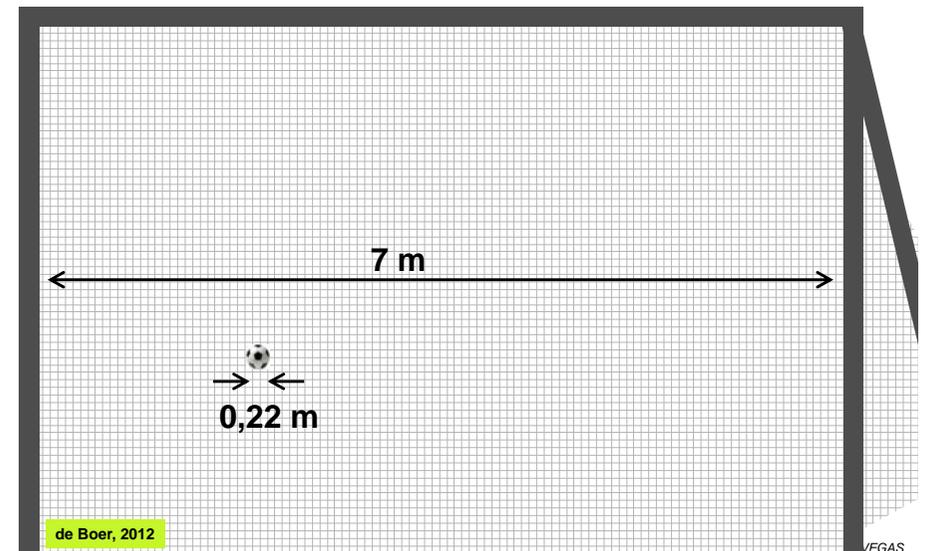
## Wie klein ist nano ?



de Boer, 2012

© VEGAS

## Größenvergleich



de Boer, 2012

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Altlastensymposium 2013  
 Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos 3



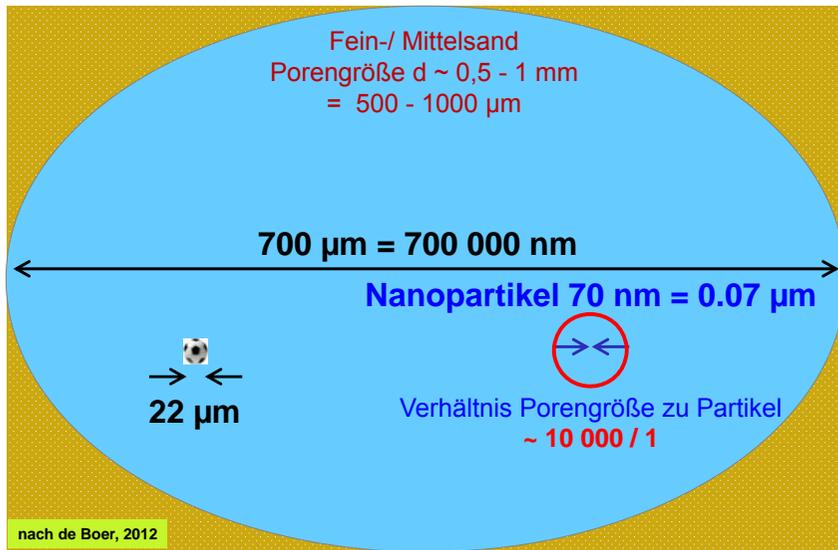
Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Altlastensymposium 2013  
 Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos 4

## nano im „Boden“



VEGAS



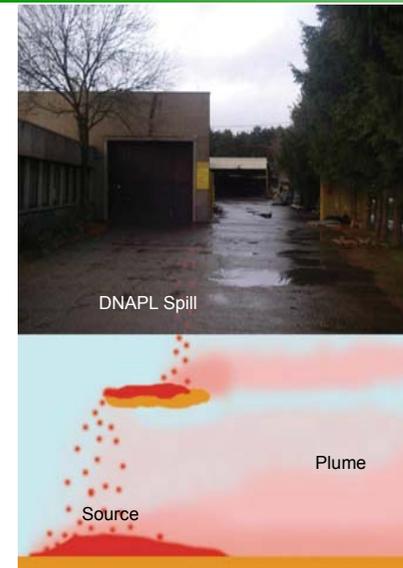
Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alllastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos 5

## Nanopartikel für die In-situ-Sanierung



- „Fokus Reinigung von Schadensquellen
- Unter Bauwerken möglich
- Prinzipiell in „beliebige“ Tiefen möglich
- „Semi-Passives“ Verfahren
- Z.B. Nano-Eisen (Fe(0))
- Innovatives Verfahren

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alllastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos 6

## Rückblick – wie es begann



- Große Unterschiede zwischen Nano-Eisen-Suspension und Tracer
  - Eisen zeigt deutliche Retardierung
- **Maximale Ausbreitung ist begrenzt**



© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?

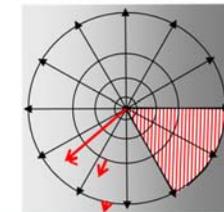
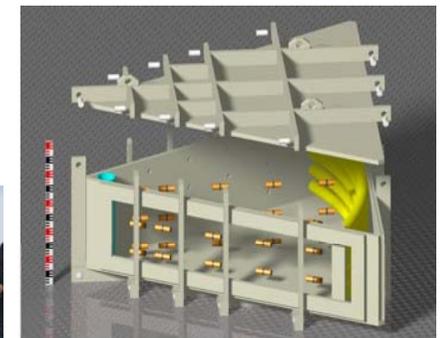


Alllastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos 7

## Großskaliger Versuch

Kunststoffbehälter für zerstörungsfreie Messung mittels neuer Messtechnik



© VEGAS



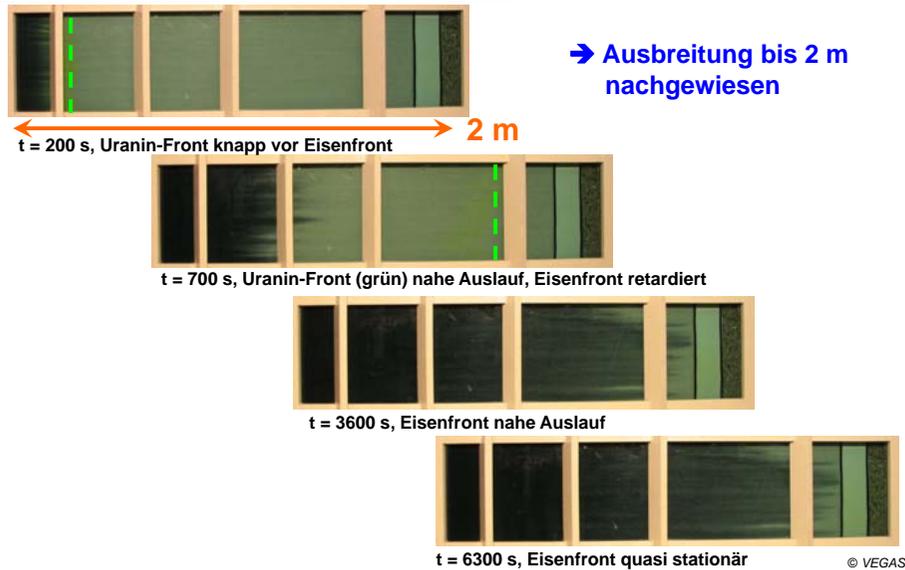
Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alllastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos 8

## Ergebnisse



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltlastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
9

## Offene Fragen / Klärungsbedarf → Nano-Forschung

- **Transport**
  - Erzielbare Transportweiten in der Natur
    - Abstand der Injektionsbrunnen
  - Einflussfaktoren / Kontrollmechanismen / erzielbare Partikelkonzentrationen ?
    - Vorkonditionierung, Injektionsraten, Injektionsdauer, Injektionszyklen
- **Reaktivität**
  - Langzeitstabilität / Langzeitreaktivität (Wirkungsdauer)
    - Wieviele Partikel sind erforderlich, wie oft ?
- **Monitoring / Überwachung**
  - Kurzzeitig: Nachweis der Partikel / Injektionsdauer-/menge, Konzentrationen
  - Langzeit: (Sanierung): Injektionsraten
    - Verbleib in der Umwelt (geringe Konzentrationen, Spuren?)



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltlastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
10

## Forschungsaktivitäten national / EU

DaNa <http://www.nanoobjects.info/cms>

START PROJEKTE WISSENSBASIS GLOSSAR HÄUFIGE FRAGEN NEUIGKEITEN DIALOG PRESSE

**Laufende Projekte**

- DaNa - Über uns
- CarbonBlack
- CarboTox
- Fe-NANOSIT
- NADINE
- NanoExpo
- NanoGEM
- NanoKon
- NanoMed
- NanoMembrane
- NanoPharm
- NanoPurification
- NanoSan
- Nano-SCR
- Nanosilberpartikel
- NanoTrack
- NAPASAN
- UMSICHT
- Inno.CNT

**Abgeschlossene Projekte**

- NanoFlow
- Nanokiesel
- InnoCNT-CarboSafe
- InnoCNT-CarboAir
- NanoCare
- INOS

Wissensplattform Nanomaterialien - Projekte

**Projekte**

Industriell hergestellte Nanopartikel bieten Potenzial für eine Vielzahl unterschiedlichster Produkte. Zu den Auswirkungen dieser Nanopartikel auf Mensch und Umwelt besteht Forschungsbedarf. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert zusammen mit der Industrie Projekte um Wissenslücken zu schließen und Maßnahmen zur Risikoerkennung und -minimierung einzuleiten. Ergebnis sollen neue Methoden zur frühzeitigen Bewertung der Auswirkungen von Nanomaterialien auf Gesundheit und Umwelt sein.

**EU 7th Framework Programme FP7 ENV 2008.3.1.1.1.**

der und d zu en V tut Nanoms ausgeschrieben. Insgesamt werden 2005-2013 20 Projekte mit einem Förderumfang von ca. 36 Mio. € durch das BMBF gefördert.

**NanoCare**

Ziel der Fördermaßnahme **NanoCare** ist es, die humantoxikologischen Aus- und Wechselwirkungen bei der Herstellung, Verarbeitung und Anwendung von synthetischen Nanomaterialien systematisch weiter zu

**Ihre Fragen an unsere Experten**

Wissensplattform Nanomaterialien DaNa-Flyer zum Download

**Nano-Risikoerkennung Chancen und Risiken von Nanomaterialien** BMBF-Flyer zum Download

**Gesundheitsergebnisse**



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltlastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
11

## Status quo – Kenntnisstand

- Nanotechnologien zur **In-situ-Sanierung von Grundwasserleiter geeignet**
- Für die **ungesättigten Zone (Böden) nicht geeignet**, die meisten NP werden in Gegenwart von Luft (-sauerstoff) rasch inaktiviert
- **Zwei Entwicklungsschienen**
  - (1) Nullwertige Eisen Nanopartikel – „Nano Zero Valent Iron, nZVI“
  - (2) Nicht-Eisen- und Composite-Nanopartikel „Non-ZVI-and Composite-nP“ (z.B. Carbo-Iron)



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltlastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
12

## Bisherige Anwendungen „Nanosanierung“ in Europa

- Bisher wenige großtechnische Anwendungen von NP bei In-situ-Sanierungen
- 58 Anwendungen weltweit von nullwertigem Nano-Eisen (nZVI) auf der Feldskala (Bardos et al. 2011)
- **17 Anwendungen in Europa** (Tschechien und Deutschland)
- Bisherigen In-situ-Anwendungen weitestgehend auf chlorierte Lösungsmittel beschränkt

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alllastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
13

## Situation in der EU

- Bericht der Europäische Umweltagentur (EEA, 2007): auf ca. 3 Mio. Standorten "potenziell umweltbelastende Tätigkeiten"
  - Brachflächen in der EU mit Altlasten geschätzt > 1 Mio.
  - Durch die Verschlechterung der Bodenqualität in den Mitgliedstaaten Kosten von ca. 38 Milliarden Euro pro Jahr (DNR & EEB 2011)
  - Problem „Flächenverbrauchs“, aktuell Neuinanspruchnahme von natürlichen Flächen in der EU ca. 1.000 km<sup>2</sup> pro Jahr
  - „Roadmap“ für ressourcenschonendes Europas (EC 2011): netto Land-Verbrauch = 0 bis zum Jahr 2050
- ➔ **Ziel nur mit effektiven Brachflächenrecycling einschließlich der Sanierung von Altlasten erreichbar**

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alllastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
14

## Prognose Sanierungsmarkt

Prognose für Anwendungen der **Nanotechnologien im Umweltbereich ca. 4,7 Mrd. €/ Jahr** (JRC Ispra 2007) für vier Bereiche:

### (1) Sanierung/ Reinigung

(2) Schutz/ Sicherung/ Konservierung

(3) Wartung/ Unterhalt

(4) Verbesserung/ Erweiterung

➔ **größte Wachstumspotential für Sanierung**

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alllastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
15

## Realität Sanierungsmarkt - Defizite

- **optimistische Prognose** für die Anwendung der Nanotechnologie (JRC Ispra 2007) d.h. die Marktentwicklung für den Bereich der Sanierung nicht erreicht
- ➔ **Durchbruch fand bis heute nicht statt**

### Gründe

- Wissenslücken beim Einsatz der Nanomaterialien unter „Feldbedingungen“

- zu hohen Herstellungskosten der Nanomaterialien

- aufkommende Diskussionen und Bedenken hinsichtlich der Gefährdung von Mensch und Umwelt durch NP

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alllastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
16

## Reaktion der EU → 7. Forschungsrahmenprogramm

EU 7. Rahmenprogramm Ausschreibung (Juli 2011):

### Nanosciences, Nanotechnologies, Materials and new Production Technologies – NMP

Unterpunkt NMP 2012.1.2-1:

#### Nanotechnology solutions for in-situ soil and groundwater remediation



- Verschiedenartige Nano-Partikel vom Labor **zur Feldanwendung** führen
- **Einsatzmöglichkeiten, Auswirkungen, Nachweis der Unbedenklichkeit**, Entwicklung bzw. Optimierung von Nachweis- und Messverfahren für NP im Labor und im Feld bis hin zu Akzeptanzfragen (Genehmigungsfähigkeit)
- Schaffung von Grundlagen für den Markteintritt und für eine verbreitete Anwendung der NPs bei der Sanierung

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltagssymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
17

## Quo vadis – das EU-Projekt NanoRem



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

- ganzheitlichen Ansatz für die Entwicklung und die **Anwendung von Nano-Partikel bei der In-situ-Sanierung**
- Entwicklung und Optimierung **verschiedener Nano-Partikel für verschiedene Schadstoffe**

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltagssymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
18

## EU-Projekt NanoRem



- **27 Partner aus 12 Ländern**
  - **11 Arbeitspakete**
  - 9 Industriepartner und Dienstleister
  - eine Organisation mit politischen und regulatorischen Zielen
  - Laufzeit 4 Jahre
- ➔ Offizieller Projektstart  
(Förderbeginn) 01. Februar 2013

© VEGAS



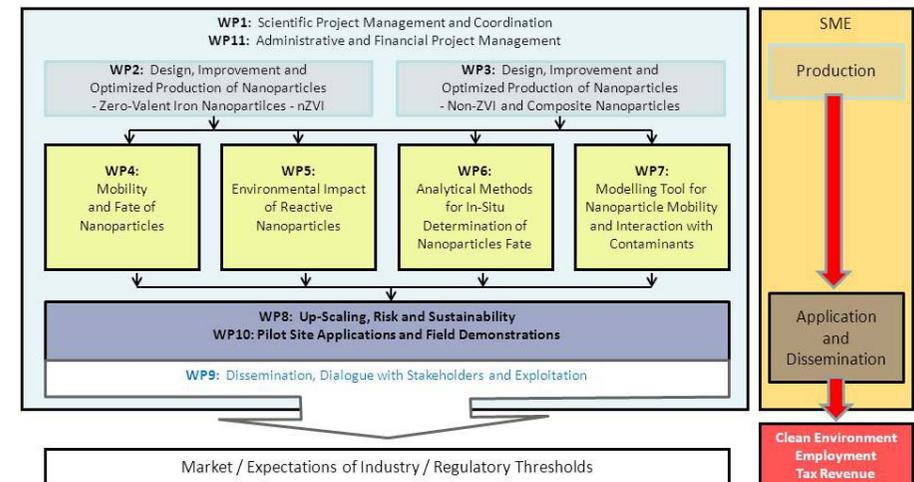
Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltagssymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
19

## NanoRem Struktur - Arbeitspakete



© VEGAS



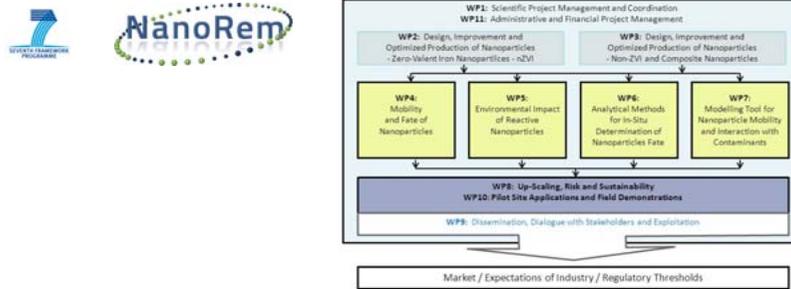
Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltagssymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
20

## NanoRem Ansatz



Der Ansatz von NanoRem erstreckt sich über vier Ebenen

- I Partikel-Produktion: WP2 und WP3
- II Umsetzung, Nachweis und Unterstützung der Feldanwendungen: WP4 bis WP7
- III Großversuche und Pilotstandorte: WP8 und WP10
- IV Verbreitung, Kommunikation und Verwertung: WP9

© VEGAS



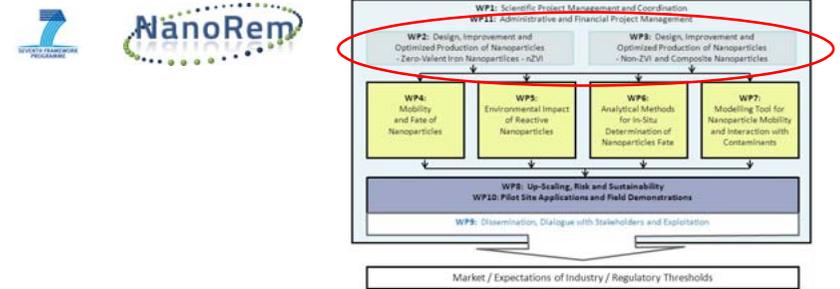
Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltlastensymposium 2013 Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos 21

## Produktion



- Produktion neuer nZVI Partikel mit Oberflächenstabilisierung
- Produktion und Verbesserung gemahlener nZVI Partikel
- Untersuchung und Produktion von nicht-nZVI Partikeln
- Optimierung der Partikeleigenschaften
- Chemische und physikalische Charakterisierung der Partikel
- Bereitstellung von Partikeln und Entwicklung ökonomischer Herstellungsprozesse
- Untersuchungen zur Erweiterung potentieller Anwendungsbereiche

© VEGAS



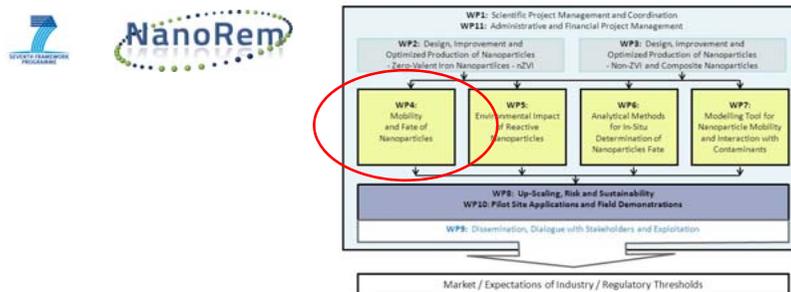
Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltlastensymposium 2013 Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos 22

## Transport / Reaktivität



- Untersuchung der entwickelten / optimierten NP
- Standardisierung der Untersuchungen zum direkten Vergleich verschiedener NP
- Verbesserung des Partikeltransports und Ableitung optimaler Transportvoraussetzungen
- Bereitstellung relevanter Informationen zur Reaktivität der Partikel im Feldeinsatz
- Bereitstellung von Transport- und Reaktionsparametern zur Entwicklung eines numerischen Modells
- Untersuchung zum Abbau, zur Abbauleistung und zur Lebensdauer von Partikeln

© VEGAS



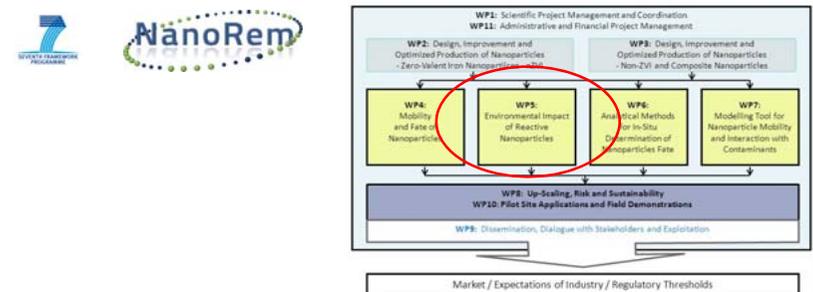
Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltlastensymposium 2013 Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos 23

## Ökotoxikologie



- Untersuchung der Ökotoxikologie von NP, möglichen Transformationsprodukten und Schadstoffmetaboliten
- Untersuchung potentieller Ökotoxizität nach Transport, Reaktion und Alterung der NP
- Beschreibung der Interaktion zwischen NP und Mikrobiologie im Aquifer

© VEGAS



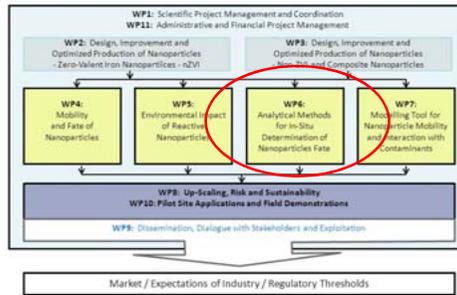
Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltlastensymposium 2013 Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos 24

## Überwachung



- Weiterentwicklung und Optimierung von Überwachungs- und Nachweismethoden
- Anwendung moderner Analytik für die On-Site-Messung und In-Situ-Charakterisierung der NP
- Überprüfung der Methoden in Labor und Feld
- Vorschlag anwendungsorientierter Nachweisgrenzen

© VEGAS



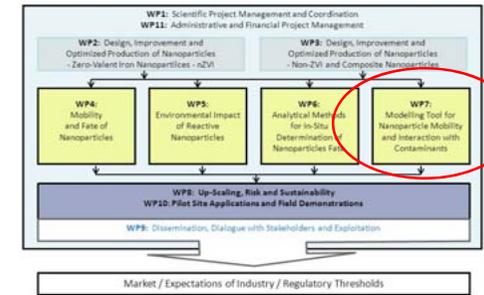
Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltagssymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
25

## Numerische Modellierung



- Entwicklung eines benutzerfreundlichen Simulationstools (RT3D Modul) zur Vorhersage von Transport und Verbleib der NP im Aquifer während und nach der Sanierung
- Beispielhafte Anwendung bei Demoprojekten

© VEGAS



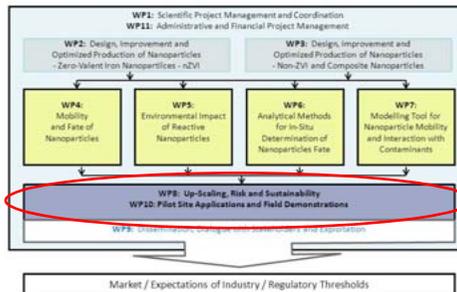
Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltagssymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
26

## Up-Scaling → Feldanwendungen



- Untersuchung neuer, erfolgversprechender NP in kontrollierten Großversuchen
- Rückmeldung an Hersteller von NP und von Überwachungs- und Nachweismethoden → Verbesserung von NP und Methoden
- Untersuchung der Bildung von Abbauprodukten unter realitätsnahen Bedingungen
- Entwicklung und Test geeigneter Injektionstechniken

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



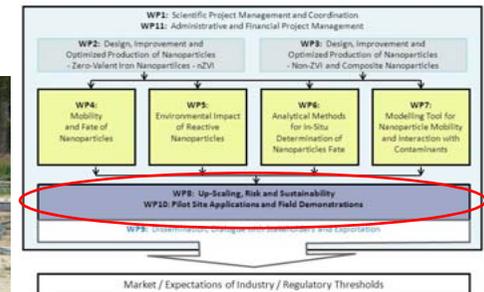
Alltagssymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
27

## Feldanwendungen / Demoprojekte



Photo Field trial in GZ (courtesy AQUATEST)



- Einsatz und Test erfolgversprechender NP auf Pilotstandorten
- Test von Injektionstechniken, Überwachungs- und Nachweismethoden
- Untersuchung der Wirksamkeit / Effektivität der Sanierungsmethode (Bereitstellung relevanter Informationen zum Transport, Reichweite, Reaktivität der Partikel)
- Bereitstellung von Leistungsdaten der Sanierungstechnologie für potentielle Anwendern und Behörden
- Nachweis der Einsatzfähigkeit

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltagssymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
28

## Feldstandort (1)



- Schweiz
- Porengrundwasserleiter, Rheintal
- Chemische Industrie
- PCE / TCE Schadensfall

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltagssymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
29

## Feldstandort (2)



- Israel
- Arides Klima, Kluftgrundwasserleiter
- Ehemalige chemische Industrie
- Schadstoff - Cocktail

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltagssymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
30

## Feldstandort (3)



- Tschechien
- Porengrundwasserleiter, urbanes Industriegebiet
- Chemische Industrie
- DNAPL / LNAPL

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltagssymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
31

## Feldstandort(4)



- Portugal
- Porengrundwasserleiter, urbanes Industriegebiet, Küste
- Großindustrie
- Schwermetalle

© VEGAS



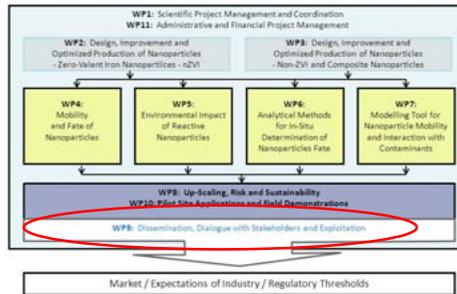
Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alltagssymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
32

## Verbreitung der Ergebnisse → Vermarktung



- Kommunikation und Dialog mit den „Stakeholder“ um Anforderungen / relevante Fragen in den Arbeitspaketen berücksichtigen zu können
- Sicherstellung der Verbreitung der Ergebnisse
- Aufbau von Kommunikationsstrategien zur Erarbeitung „weicher“ Anwendungskriterien → Akzeptanz schaffen (Risikobewertung)
- Kosten-Nutzen-Analyse zur Verbesserung des Vermarktungspotentials

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alllastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
33

## Erwartungen



- EU hat hohe Erwartungen an NanoRem
- Mittel- und langfristig wird der Erfolg des Vorhabens daran gemessen werden, ob die Ergebnisse erfolgreich vermarktet werden.
- Durch Projektkonstellation wird erwartet, dass auf dem Gebiet der In-situ-Sanierung unter Einsatz von Nanopartikeln ein erheblicher Fortschritt erzielt und der „Altlastensanierungsbranche“ ein zusätzliches In-situ-Sanierungsverfahren zur Verfügung gestellt wird zur Lösung zahlreicher Problemfälle.

© VEGAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alllastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
34

## NanoRem Kick-Off Meeting 10.-12. April 2013



...danke für Ihre Geduld  
und Ihr Interesse

Fragen ?

[koschitzky@iws.uni-stuttgart.de](mailto:koschitzky@iws.uni-stuttgart.de)  
<http://www.vegas.uni-stuttgart.de>  
Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky,  
Coordinator NanoRem

GAS



Nanomaterialien in der Boden- und Grundwassersanierung: Status quo – quo vadis?



Alllastensymposium 2013  
Regensburg, 09.-10.07.2013

Kos  
35