



---

# LEITFADEN: AMIIGA WERKZEUGE

---

D.T1.4.3

Version 1  
10 2019

---



---

## Inhaltsverzeichnis

1. Anwendungsbereich des Leitfadens.....	4
2. Einführung .....	4
3. AMIIGA Werkzeuge .....	11
4. Fazit.....	29



## List of Abbreviation

BMT:	Bio-Molekular-Tool
BTEX:	Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol
CE:	Chlorierte Ethene
CHC:	Chlorierter Kohlenwasserstoff
cis-DCE:	<i>cis-Dichlorethen</i>
CSIA:	Compound Specific Isotope Analysis (Substanzspezifische Isotopenanalyse)
DSS:	Experten-System (Decision Support System)
EDA:	Explorative Datenanalyse
ENA:	Enhanced Monitored Natural Attenuation
FUA:	Stadt-Umland-Gebiet (Functional Urban Area)
GIS:	Geo-Informationssystem (Geographical Information System)
GW:	Grundwasser
MNA:	Monitored Natural Attenuation
MPS:	Multiple Punktquellen (Multiple Point Sources)
NGS:	DNA-Sequenzierung (Next-Generation Sequencing)
NPS:	Diffuse Quellen (Non-Point Sources)
PCE:	Perchlorethen
PCR:	Polymerase-Kettenreaktion (polymerase chain reaction)
PS:	Punktquellen (Point Sources)
qPCR:	Quantitative PCR (real-time polymerase chain reaction)
TCE:	Trichlorethen
VC:	Vinylchlorid



## 1. Anwendungsbereich des Leitfadens

Die Bearbeitung großflächiger Grundwasserverunreinigungen wird entweder durch Betroffene oder durch Überwachungsbehörden angestoßen. Betroffene können beispielsweise die Betreiber von Wassergewinnungsanlagen sein, die Grundwasservorkommen zur Trink- oder Brauchwasserversorgung bewirtschaften.

Das vorliegende Dokument richtet sich an Fachleute, die Betroffene oder Behörden beraten, und gibt ihnen Instrumente an die Hand, mit deren Hilfe folgende Aufgaben qualifiziert unterstützt werden können:

- × Ermittlung des Ausmaßes der Grundwasserverunreinigung
- × Klärung der Schadstoffherkunft und der Schadstoffausbreitung
- × Abschätzung der anthropogenen Hintergrundbelastung
- × Quantifizierung möglicher natürlicher Abbauvorgänge im Grundwasser, auch unter dem Aspekt unterstützender Sanierungsmaßnahmen zur Erreichung von Sanierungszielen
- × Mitbenutzung von Daten und Informationen zur Unterstützung des Entscheidungsprozesses für eine Managementplan-Implementierung.

Die Qualitätsanforderungen für Grundwasser sind in Deutschland in der Trinkwasser- bzw. der Grundwasserverordnung geregelt. Im Einzelfall können jedoch - insbesondere unter Beachtung der Grundsätze der Verhältnismäßigkeit und der Angemessenheit - andere Anforderungen gelten.

Die in dem vorliegenden Dokument beschriebenen Werkzeuge sind innovativ und geeignet, die Qualitätsanforderungen auch bei großflächigen Verunreinigungen zu erreichen. Sie stellen an die Anwender wie auch an die einzuschaltenden Experten hohe fachliche Anforderungen. Der Markt für Dienstleister, die notwendige Untersuchungen, Aus- und Bewertungen durchführen können, ist eng begrenzt. Umso wichtiger ist es daher, dass Auftraggeber Art und Umfang notwendiger Dienstleistungen qualifiziert beschreiben und eingehende Angebote fachlich beurteilen können.

Das Dokument gibt auch den Auftraggebern einen Überblick über innovative technologische Möglichkeiten der Untersuchung großflächiger Grundwasserverunreinigungen und versetzt sie in die Lage, die Anwendbarkeit und Grenzen der vorgestellten Werkzeuge qualifiziert zu beurteilen. Es dient dazu, die notwendigen Expertenleistungen präzise zu beschreiben, die Implementierung kompetent zu begleiten und die Qualität der erzielten Ergebnisse angemessen zu beurteilen.

## 2. Einführung

Die kontinuierliche Entwicklung städtischer Gebiete (insbesondere Industrie- und Gewerbegebiete) steht im Zusammenhang mit großflächig kontaminierten



Grundwasserressourcen, bei denen es schwierig ist, Kontaminationsherde zu identifizieren.

Im von der Europäischen Union im Programm Interreg CENTRAL EUROPE geförderten Projekt AMIIGA wurden Werkzeuge entwickelt, die geeignet sind, großflächige Gebiete, sog. Stadt-Umland-Gebiete (FUA nach OECD, 2012<sup>1</sup>) und komplexe Kontaminationen zu untersuchen. Stadt-Umland-Gebiete bestehen aus einem urbanen Zentrum und seinem Umland.

### Arten von Kontaminationen

Die Ursachen der Grundwasserverunreinigung können generell in drei verschiedenen Klassen eingeteilt werden:

- a) Punktquellen (Point Sources, PS) bzw. Kontaminationsherde, aus denen großflächige Fahnen mit hohen Schadstofffrachten freigesetzt werden.
- b) Multiple Punktquellen (Multiple Point Sources, MPS), bei denen die Schadstofffracht von mehreren Punktquellen stammt, die jeweils geringe Schadstoffmengen freisetzen und daher schwer zu identifizieren sind. MPS können für diffuse Grundwasserkontaminationen verantwortlich sein, die auch als anthropogene Hintergrundbelastungen definiert werden können.
- c) Diffuse Quellen (Non-Point Sources, NPS), bei denen die Kontamination durch anthropogene Aktivitäten auf großen Flächen verursacht wird (z. B. Eintrag von Nitrat oder Pestiziden durch die Landwirtschaft).

### Ausmaß der Kontamination

Häufig befinden sich Punktquellen innerhalb eines kontaminierten Standorts, der ein aktiver oder ein stillgelegter (Altstandort) Industriebetrieb sein kann (lokale Skala oder Standortskala). Die Kontamination kann auch ein bestimmtes Industriegebiet betreffen. Sie kann sich darüber hinaus ausbreiten und auch ein Stadt-Umland-Gebiet (FUA) betreffen.

Multiple Quellen kommen häufig in relativ großen Gebieten (z. B. Industriegebieten) vor. Dann kann das gesamte Stadt-Umland-Gebiet (FUA) auf einer mittleren Skala oder „FUA-Skala“ von der Verunreinigung betroffen sein.

Diffuse Quellen schließlich sind i.d.R. sehr großflächig, und die damit verbundene Kontamination muss auf einem Grundwasserkörper-Maßstab (gemäß EU-Grundwasserrichtlinie 2006 bzw. Grundwasserverordnung 2010) bewältigt werden. Der Grundwasserkörper ist i.d.R. größer als ein Stadt-Umland-Gebiet (FUA).

Das AMIIGA-Projekt konzentriert sich auf die Grundwasserkontaminationen im FUA-Maßstab mit Multiplen Punktquellen. Die dabei einzusetzenden Maßnahmen erfolgen im mittleren Maßstab (dem FUA-Maßstab).

<sup>1</sup> OECD, 2012, Redefining “Urban”: A New Way to Measure Metropolitan Areas. OECD Publ., pp. 1-9  
<https://doi.org/10.1787/9789264174108-en>



## Rechtlicher Hintergrund

Die bestehende Gesetzgebung enthält für den Umgang mit Multiplen Punktquellen keine geeigneten Regelungen. Vielmehr besteht eine Lücke zwischen der EU-Grundwasserrichtlinie bzw. deutscher Grundwasserverordnung für Grundwasserkörper mit Regelungen zu diffusen Quellen und der deutschen Altlasten-Gesetzgebung in den Wasser- und Bodenschutzgesetzen, die sich auf Punktquellen beziehen.

## Technologische Herausforderung

Vielfach besteht das Problem bei der Untersuchung und Sanierung im FUA-Maßstab darin, dass Gebiete, die durch mehrere Schadstoffeintragsstellen verunreinigt sind, nicht mit den üblichen Techniken für kleine kontaminierte Standorte behandelt werden können. Dafür gibt es hauptsächlich zwei Gründe:

- a) bestimmte Punktquellen sind aufgrund der geringen freigesetzten Masse schwer zu identifizieren, und
- b) kontaminierte Gebiete sind großflächig.

Beide Aspekte erfordern alternative Ansätze, da der Einsatz von Standardverfahren nicht effektiv, wirtschaftlich und nachhaltig sind. Außerdem müssten die Behörden die durch Multiple Punktquellen (MPS) verursachten Kontaminationen auf dem gesamten FUA-Gebiet bearbeiten, um z.B. nachhaltige Zielwerte für lokale Sanierungsmaßnahmen ermitteln zu können.

## Hintergrund

Das AMIIGA-Projekt baut sich auf den Ergebnissen des CENTRAL EUROPE-Projekts FOKS (2008-2012) auf. Allgemeines Ziel des FOKS-Projekts war es, im Fall von MPS die wichtigsten Kontaminationsquellen zu identifizieren.

Spezifische Ziele des FOKS-Projekts waren:

- × Darstellung und Anwendung innovativer Instrumente für ein integrales Grundwasserrisikomanagement in kontaminierten Gebieten
- × Priorisierung der Grundwasser- und Boden-Sanierungsmaßnahmen bei den Haupteintragsstellen
- × Durchführung von Pilotanwendungen und Rahmensanierungskonzepten
- × Anpassung der EU-Grundwasserrichtlinie an die Standortskala.

Das FOKS-Projekt hat es geschafft, innovative Instrumente für ein integrales Grundwasserrisikomanagement zu demonstrieren und anzuwenden, und zwar hauptsächlich auf lokaler Ebene. In einer Reihe von Workshops wurden Instrumente (der Ansatz der integralen Grundwasseruntersuchung, Passivsammler, das Isotopen-Fingerprinting, die numerische Modellierung und das Backtracking, der risikobasierte Ansatz und die robuste Datenverarbeitung) demonstriert und erfolgreich an FOKS Pilotstandorten angewendet.



## Fokus des AMIIGA-Projektes

In Ergänzung dazu arbeitet das AMIIGA-Projekt in einem größeren Maßstab als FOKS und konzentriert sich auf Stadt-Umland-Gebiete (FUAs), sofern die Grundwasserverschmutzung über die Verwaltungsgrenzen hinausreicht. Ein Ziel von AMIIGA ist es, die Planungs-, Management- und Entscheidungskapazitäten der Behörden in FUAs zu stärken. Die von FOKS erstellten und implementierten Tools und Experten-Systeme (DSS) für Altstandorte wurden in AMIIGA weiterentwickelt und skaliert, um sie für FUAs anwenden zu können.

Spezifischen Ergebnisse des AMIIGA-Projekts:

- 1) Bereitstellung von Instrumenten und Verfahren für die umfassende Charakterisierung der Grundwasserverunreinigung in FUAs
- 2) Bereitstellung innovativer mikrobiologischer Technologien zur Verbesserung der Grundwasserqualität in FUAs
- 3) Beschreibung des Grundwassermanagementplans als strategisches Instrument für regionale Grundwasserkörper (FUAs).

## Inhalte und Struktur dieses Leitfadens

Das vorliegende Dokument ist ein praktischer Leitfaden, der die in AMIIGA entwickelten Werkzeuge zusammenfasst und die Synergien mit den FOKS-Tools berücksichtigt, um den Leser bei der Auswahl der am besten geeigneten Werkzeuge für das eigene Kontaminationsproblem zu unterstützen. Dazu wird ein Entscheidungsbaum (Abbildung 1) erstellt, in dem alle Werkzeuge auf einen Blick - in FUA- und Standortkala unterteilt - aufgezeigt werden. Auf dieser Grundlage kann der Leser die verfügbaren Werkzeuge überprüfen und auswählen, um das Wissen über das Ausmaß der Kontamination, das für die Erarbeitung eines Managementplans erforderlich ist, schrittweise zu erweitern.

Sowohl auf der FUA- als auch auf der Standortebene ist der erste Schritt die Datenerfassung, bei der alle verfügbaren Informationen zusammenstellt werden (z.B. Monitoring-Netzwerk, Schadstoffkonzentrationen, Grundwasserstände, Aquifere, historische Daten zu Altlasten, frühere Nutzungen).

Im Rahmen von FOKS wurde das mathematische Gnostic-Tool als effiziente Methode zur Verbesserung der Datenanalyse auf Standortebene beschrieben. Auf der FUA-Skala stammen die Daten aus privaten, kommunalen und regionalen Netzwerken. Daher ist der zu analysierende Datensatz mit den Konzentrationswerten sehr umfangreich und komplex. Daten, die über viele Jahre in Monitoring-Kampagnen gesammelt wurden, spielen eine entscheidende Rolle bei der Identifizierung von Schadstoffen und deren Quellen. Aus diesem Grund wurde das FOKS Gnostic-Tool für die mittlere Skala erweitert, um den großen FUA-Datensatz genauer untersuchen zu können. Die explorative Datenanalyse (EDA) kann zum Einrichten der Datenbankstruktur, zum Erkennen von Ausreißern, von Fehlern, von fehlenden Daten und zum Erkennen von PS und MPS-Messstellen verwendet werden (siehe Bericht D.T1.1.2).



Um die Umsetzung des konzeptionellen Grundwassermodells zu unterstützen, führt AMIIGA das Biological Molecular Tool (BMT) ein (siehe Bericht D.T1.3.4). BMT bewertet die Fähigkeit natürlicher (d.h. am Standort vorhandener) Mikrobiozönosen (Mikrobengesellschaften), bestimmte Schadstoffe in situ abzubauen. Darüber hinaus liefert BMT Beweise für den Stand des unterstützten biologischen Abbaus oder beschreibt die Auswirkungen bestimmter Sanierungsmethoden auf standortspezifische Mikroorganismen in verschiedenen Sanierungsphasen.

Um den Zusammenhang zwischen Quellen und Fahnen zu untersuchen und damit das konzeptionelle Modell für den Transport von Schadstoffen zu erstellen stellt AMIIGA die folgenden neuen Tools zur Verfügung:

Isotopenanalyse (Compound Specific Isotope Analysis, CSIA) (siehe Bericht D.T1.2.4) zur Unterscheidung unterschiedlicher Schadstoffquellen. Mit diesem Werkzeug können einzelne Punktquellen (PS) identifiziert werden, die für die Kontamination auf lokaler und mittlerer Skala verantwortlich sind, und / oder um Abbauprozesse nachzuweisen. CSIA ist ein geeignetes Instrument bei der Sanierungsplanung.

Die inverse numerische Transportmodellierung (siehe Bericht D.T1.1.3) kann zur räumlichen Abgrenzung von Schadstofffahnen, zur Unterscheidung von Grundwasserverunreinigungen durch PS und MPS und zur Identifizierung von Gebieten, die am wahrscheinlichsten MPS enthalten und für großflächige Schadstofffahnen verantwortlich sind, herangezogen werden. Damit kann die inverse numerische Transportmodellierung die Umsetzung des Managementplans unterstützen.

Schließlich werden multivariate und geostatistische Analysen sowie WebGIS-Anwendungen vorgestellt, die für die Auswahl der Maßnahmen und die Erstellung des Managementplans angewendet werden können. Diese können auch zur Unterstützung des Entscheidungsprozesses eingesetzt werden (Einzelheiten zum Managementplan siehe Bericht D.T3.3.7). Multivariate und geostatistische Analysen ermöglichen es, die von der MPS-Kontamination betroffenen FUA-Gebiete zu identifizieren und die Hintergrundkonzentrationen der diffusen Kontamination über große Gebiete abzuschätzen (siehe Bericht D.T1.1.2). WebGIS ist ein innovativer Ansatz zum Austausch von Daten und Informationen zwischen Institutionen und technischen Ämtern, zur Verbesserung der internen und externen Kommunikation, zur Unterstützung und Erleichterung von Entscheidungen, zur Weiterentwicklung der Datenanalyse und zur Interpretation konzeptioneller Modelle (siehe Bericht D.T1.1.1).

### SWOT-Analyse

Die Analyse der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT-Analyse) der AMIIGA-Tools unterstützt den Leser bei der Bewertung des Mehrwerts für die Verarbeitung von Daten, bei der Ermittlung des Ausmaßes der Grundwasserverunreinigung, der Identifizierung der Schadstoffquellen (Schadensherd-Fahnen-Zusammenhänge), der Verbesserung des konzeptionellen Modells, der Bewertung anthropogener



Hintergrundkontaminationen und natürlicher Abbauprozesse sowie bei der Planung und Auswahl von Untersuchungs- und Sanierungsmaßnahmen.

### Auswahl geeigneter Werkzeuge

Die allgemeinen Schlüsselfragen für die Auswahl geeigneter Werkzeuge sind:

- × Liegt ein großer Datensatz im FUA-Maßstab vor? Durch Einsatz der explorativen Datenanalyse kann der Datensatz bereinigt und es können geeignete PS / MPS-Messstellen identifiziert werden.
- × Werden zusätzliche Daten zur mikrobiologischen Grundwassercharakterisierung benötigt? BMT kann die Erstellung des konzeptionellen Modells unterstützen.
- × Gibt es noch unbekannte Schadstoffquellen? CSIA und inverse numerische Transportmodellierung können die Zusammenhänge zwischen Schadstoffquellen und Fahnen klären und das konzeptionelle Transportmodell verbessern.
- × Ist ein Entscheidungsunterstützungsprozess erforderlich? Multivariate, geostatistische Analysen und WebGIS können den Entscheidungsprozess für die Auswahl von Maßnahmen und bei der Erstellung des Managementplans unterstützen.



## AMIIGA-Werkzeuge Baumdiagramm

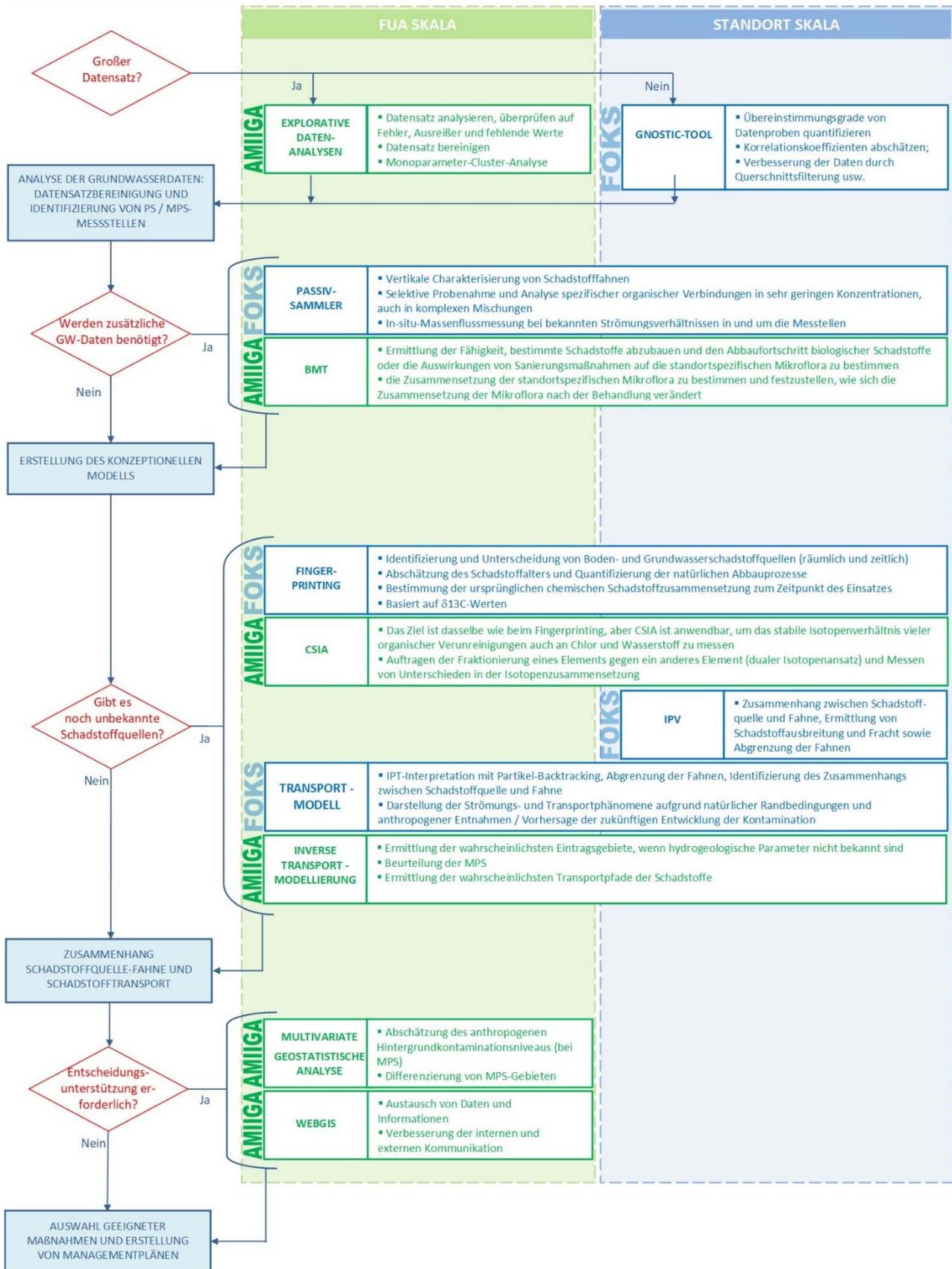


Abbildung 1 Baumdiagramm zur Auswahl von AMIIGA Werkzeugen.



### 3. AMIIGA Werkzeuge

In diesem Kapitel werden die Leitfragen zur Analyse der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT) der einzelnen AMIIGA-Werkzeuge beantwortet. Darüber hinaus werden Anwendungsbeispiele in den Pilotanwendungen beim AMIIGA-Projekt beschrieben, um dem Leser zu helfen, die Anwendbarkeit der Werkzeuge in verschiedenen Zusammenhängen zu verstehen.

<p><b>STÄRKEN</b></p>	<p>Was sind die Stärken und Vorteile dieses Werkzeugs oder dieses Werkzeugs in Kombination mit anderen, um die festgelegten Ziele zu erreichen?</p> <p>Welche Daten liefert das Werkzeug für jedes Ziel?</p> <p>Für welche Ziele funktioniert es besser? Warum?</p> <p>Andere Stärken?</p>
<p><b>SCHWÄCHEN</b></p>	<p>Was sind die Schwächen und Nachteile des Werkzeugs?</p> <p>Was sind die Schwächen in Bezug auf die festgelegten Ziele?</p> <p>Welche Aspekte werden nicht abgedeckt?</p> <p>Für welche Ziele ist das Werkzeug weniger geeignet? Warum?</p> <p>Andere Schwäche?</p>
<p><b>CHANCEN</b></p>	<p>Was sind die zusätzlichen Vorteile für den Benutzer?</p> <p>Gibt es Potenziale zur Verbesserung der Wirksamkeit des Werkzeugs?</p>
<p><b>RISIKEN</b></p>	<p>Welches sind die Risiken bei der Entwicklung des Werkzeugs zu einem bewährten Werkzeug für das ausgewählte Ziel?</p> <p>Könnte es Probleme bei der Wirksamkeit geben?</p> <p>Könnte es Akzeptanzprobleme geben?</p>



## DIE EXPLORATIVE DATENANALYSE (D.T1.1.2)

**Beschreibung:** Die Explorative Datenanalyse umfasst die statistischen Analysemethoden (Datenbereinigung, Erkennen fehlender Daten, erläuternde Analyse, Monoparameter-Cluster-Analyse), die auf FUA-Skala zur Auswertung zeitlich und räumlich großer und multiparametrischer Grundwasserdatensätze verwendet werden (z.B. für Monitoringdaten von Schadstoffkonzentrationen). Das Werkzeug umfasst alle Aktivitäten, die erforderlich sind, um Ausreißer, Fehler und fehlende Daten zu entdecken, um die Hotspots zu identifizieren und die Punktquellen (PS) von den multiplen Punktquellen (großflächige Kontamination) zu unterscheiden.

**Anwendbarkeit:** Großer Datensatz auf FUA-Skala, z.B. für Schadstoffkonzentrationen oder Grundwasserstände, der aus verschiedenen Netzwerken (privat, kommunal und regional) gesammelt wurde.

**Verknüpfung mit anderen Tools:** Das Monoparameter-Cluster-Analyse-Verfahren kann zwischen Hotspots (PS) und großflächigen Kontaminationen (MPS) unterscheiden. Das deterministische und das inverse Transportmodell liefern die Informationen über die Geometrie der Schadstofffahnen in dem Gebiet. Zusammengenommen können diese Informationen das Verständnis des konzeptionellen Schadstoffmodells und der räumlichen Verteilung der großflächigen Kontamination verbessern, um den Entscheidungsprozess für den Managementplan zu unterstützen (z.B. bei der Auswahl des Monitoring-Netzwerks).

<b>ZIELE</b>	Analyse der Grundwasserdaten: Datensatzbereinigung und Identifizierung von PS- / MPS-Messstellen	X
	Erstellung des konzeptionellen Modells	
	Zusammenhang Schadstoffquelle-Fahne und konzeptionelles Modell für den Schadstofftransport	
	Auswahl geeigneter Maßnahmen und Erstellung des Managementplans	X
<b>STÄRKEN</b>	<p>Die Explorative Datenanalyse ist anwendbar im FUA-Maßstab, analysiert große und komplexe Datensätze und Daten, die im Verlauf vieler Jahre gesammelt wurden.</p> <p>Die Explorative Datenanalyse erkennt Ausreißer, Fehler und fehlende Daten bei großen Datensätzen.</p> <p>Die Monoparameter-Cluster-Analyse gruppiert die Daten in Cluster und unterscheidet Cluster voneinander.</p> <p>Das Werkzeug identifiziert die Hotspots und ermöglicht die Unterscheidung zwischen durch PS kontaminierten Messstellen und Messstellen, die durch MPS großflächig kontaminierte Gebiete erschließen.</p>	
<b>SCHWÄCHEN</b>	<p>Vor der Anwendung statistischer Methoden ist eine aufwendige Datenerfassung und Datensatzvorbereitung erforderlich. Da die Daten von verschiedenen Institutionen gesammelt werden müssen, sind sie i.d.R. nicht homogen. Es ist auch notwendig, die Institutionen selbst einzubeziehen, um die Informationen angemessen bereitzustellen.</p> <p>Die verschiedenen Verfahren zur Datenbereinigung (Fehlererkennung, Konsistenzprüfung und Behandlung fehlender Rückmeldungen) können zu</p>	



	<p>unterschiedlichen Ergebnissen führen. Daher sollte bei der Datenbereinigung mit äußerster Sorgfalt vorgegangen werden.</p> <p>Die Datenbereinigung sollte so gering wie möglich gehalten werden.</p> <p>Fehlende Daten (z.B. wenn in einer Messstelle die Konzentration für einen zu berücksichtigenden Parameter nicht verfügbar ist) können die Ergebnisse stark beeinflussen. Wenn die fehlenden Daten mehr als 30 % betragen, ist dies problematisch. Es muss eine Entscheidung zur Behandlung fehlender Daten getroffen werden.</p>
<b>CHANCEN</b>	<p>Das Werkzeug erkennt Mängel in Monitoring-Netzwerken und kann neue potenzielle Schadstoffquellen identifizieren. Es kann von den Behörden für die Auswahl von Monitoring-Netzwerken und zur Parameteranalyse eingesetzt werden, um die Ergebnisse zu verbessern und die Effizienz und Wirksamkeit von Maßnahmen zu optimieren.</p>
<b>RISIKEN</b>	<p>Die Ergebnisse müssen mit dem konzeptionellen Modell (hydrogeologische Struktur, Grundwasserströmung und Schadstofftransport) übereinstimmen. Die Gefahr besteht darin, dass die statistischen Methoden angewendet werden, ohne die Eigenschaften der Messstellen zu berücksichtigen.</p>
<p><b>ANWENDUNGSBEISPIEL IM AMIIGA-PROJEKT</b></p> <p><b>Pilotprojekt Mailand (Italien)</b></p> <p>Die Explorative Datenanalyse wurde im FUA Mailand eingesetzt, wobei die beiden Hauptgrundwasserleiter (flacher und tiefer Grundwasserleiter) berücksichtigt wurden. Der Datensatz stammte aus einem Monitoring-Netzwerk von etwa 2.000 Punkten mit verfügbaren hydrochemischen Daten.</p> <p>Die Cluster-Analyse, die auf mehr als 45.000 PCE-Konzentrationsdaten angewendet wurde, ermöglichte die Erkennung von Ausreißern, die Unterscheidung von durch PS kontaminierten Messstellen und von MPS großflächig kontaminierten Messstellen. Durch die Identifizierung von Hotspots (PS-Messstellen) und der MPS-Messstellen konnte ein numerisches Transportmodell entwickelt werden.</p> <p>Darüber hinaus unterstützten die Ergebnisse den Entscheidungsprozess für das Grundwassermanagement, indem Mängel im Monitoring-Netzwerk erkannt und die Bereiche, in denen neue Messstellen erforderlich sind, identifiziert wurden.</p>	



### BMT - Biological Molecular Tool (D.T1.3.4)

**Beschreibung:** BMT ist ein biomolekulares Werkzeug zur Charakterisierung autochthoner Bakterienkonsortien mit fortschrittlichen genetischen Methoden (Echtzeit-PCR und Next Generation Sequencing, NGS). Spezifische Bakterienstämme oder Enzyme können mithilfe der Echtzeit-PCR analysiert werden, während komplexe Bakterienkonsortien mithilfe des NGS beschrieben werden können. Mit Hilfe des BMT können das Vorhandensein und die Menge von Bakterien-Spezies oder Gruppen überprüft werden, die in der Lage sind, vorhandene Schadstoffe zu metabolisieren. Darüber hinaus ist es möglich, explizite biologische Abbauprodukte zu identifizieren und diese mit biologischen Abbauprodukten oder Nebenprodukten zu verknüpfen. Wenn der biologische Abbau in situ als die Sanierungsmethode gewählt wird, muss die Fähigkeit standortspezifischer Mikrobiozönosen charakterisiert werden, die Schadstoffe durch spezifische Bakterienstämme oder Enzyme metabolisieren können.

**Anwendbarkeit:** BMT ist zur Charakterisierung laufender biologischer Abbauprozesse in kontaminierten Grundwässern und Böden geeignet. Basierend auf dem Vorhandensein und der Menge spezifischer biologischer Marker kann eine Entscheidung über das Sanierungsverfahren getroffen werden. Wenn zum Beispiel die Menge von zum biologischen Abbau fähiger Bakterien am Standort zu gering ist, kann diese durch Zugabe eines geeigneten Substrats erhöht werden. Zum Abbau gut geeignete Mikroorganismen können in Brunnen mit geringer biologischer Abbaubarkeit überführt werden. Es ist auch möglich, mikrobielle Konsortien zu analysieren, die auf Biomasseträgern in kontaminierten Grundwasserleitern eingetaucht wurden.

**Verknüpfung mit anderen Tools:** Die BMT-Analyse stellt zusammen mit der chemischen Analyse, dem CSIA, physikalischen Parametern und geologischen Informationen ein starkes Instrument zur Bewertung des natürlichen Abbaus (NA) und / oder Enhanced Natural Attenuation (ENA) dar.

<b>ZIELE</b>	Analyse der Grundwasserdaten: Datensatzbereinigung und Identifizierung von PS- / MPS-Messstellen	
	Erstellung des konzeptionellen Modells	X
	Zusammenhang Schadstoffquelle-Fahne und konzeptionelles Modell für den Schadstofftransport	
	Auswahl geeigneter Maßnahmen und Erstellung des Managementplans	X
<b>STÄRKEN</b>	<p>BMT beinhaltet eine sehr genaue Analyse eines breiten Spektrums von Bakterienspezies oder Enzymen in komplexen Proben. In Kombination mit anderen Instrumenten (CSIA, chemische Analyse) bietet es ein starkes Instrument zur Beschreibung des kontaminierten Standorts und zur Bewertung seiner biologischen Aktivität.</p> <p>Basierend auf der spezifischen Bakterienmenge liefert BMT relative Werte für die Grundwassercharakterisierung. Dann ist es möglich, die metabolische Fähigkeit der Mikroflora in der Probe zu prognostizieren und vor allem die Fähigkeit, Schadstoffkontaminationen auf anaerobe / aerobe Weise abzubauen. Schließlich ist es möglich vorherzusagen, ob das untersuchte Umfeld für den biologischen Abbau geeignet ist (zum Beispiel durch das Vorhandensein von sulfatreduzierenden oder denitrifizierenden Bakterien).</p>	



	<p>Die qPCR-Analyse ist zielgerichtet, schnell und kostengünstig, während das Next Generation Sequencing, NGS -Tool ein komplexeres Bild über das mikrobielle Umfeld in situ liefert. Daher führt die Kombination dieser beiden Methoden zur besten Charakterisierung des Umfelds.</p>
<b>SCHWÄCHEN</b>	<p>Die größte Herausforderung bei BMT besteht darin, genetisches Material (DNA) zu extrahieren. Einige Proben können eine hohe Konzentration chemischer Verbindungen enthalten, die die DNA-Isolierung stören. Dies kann die Ergiebigkeit und Qualität der isolierten DNA und damit die BMT-Ergebnisse beeinflussen. Es ist nur möglich, das relative Niveau der Marker (spezifischer Gene) innerhalb des Probenahmezeitraums zu messen und damit zu bewerten, wie das Sanierungsverfahren autochthone Bakterien beeinflusst. Zur Interpretation der Ergebnisse sind Fachkenntnisse der örtlichen Gegebenheiten (durch CSIA und chemische Analysen) erforderlich.</p> <p>Die qPCR-Marker wurden noch nicht für den biologischen Abbau aller möglichen Schadstoffe der Umwelt entwickelt. Es gibt noch viele unbekannte spezifische Bakterien oder Enzyme, die bei biologischen Abbauprozessen wichtig sein könnten.</p> <p>Die Verarbeitung von Next Generation Sequencing, NGS -Daten hängt entscheidend von der sorgfältigen Arbeit eines Bioinformatikers ab. Gute Bioinformatiker sind nur begrenzt verfügbar.</p>
<b>CHANCEN</b>	<p>BMT-Ergebnisse ermöglichen ein besseres Verständnis der mikrobiellen Aktivitäten auf dem kontaminierten Standort. BMT-Daten zeigen das biologische Abbaupotenzial des sanierten Standorts an, sie können helfen, die Verwendbarkeit gewählter Sanierungsverfahren zu beurteilen und die Anzahl der Anwendungen der chemischen Behandlung zu korrigieren.</p> <p>Es besteht auch die Möglichkeit, das Spektrum spezifischer Marker zu erweitern, da das Wissen über den bakteriellen Metabolismus rasch zunimmt.</p> <p>Die Aussagekraft von BMT könnte durch eine Kombination mit anderen Methoden (CSIA, chemische und physikalische Analysen, geologische Informationen) verbessert werden.</p>
<b>RISIKEN</b>	<p>Das größte Risiko ist die geringe Qualität der DNA und ein zu geringer Gehalt an getesteten Markern. Beide haben einen starken Einfluss auf die BMT-Ergebnisse und müssen sehr sorgfältig interpretiert werden.</p>

**ANWENDUNGSBEISPIEL IM AMIIGA-PROJEKT**

**Pilotprojekt Parma (Italien)**

In der FUA in Parma wurde eine BMT-Analyse durchgeführt, bei der die Grundwasserverunreinigung (BTEX und Chlorierte Ethene, CE) durch den unsachgemäßen Betrieb einer Tankstelle verursacht worden war. Im Dezember 2017 und Mai 2018 wurden zwei Beprobungskampagnen durchgeführt. Während der Beprobungskampagnen wurden physikalische Parameter (z. B. pH, Redox-Potenzial und Leitfähigkeit) gemessen.

Die BMT-Ergebnisse zeigten einen steigenden Trend in der gesamten bakteriellen Biomasse in der 2. Kampagne an (tausendfach höhere Werte). Dies kann durch einen höheren Grundwasserstand und auch durch die jahreszeitlichen Schwankungen erklärt werden. Denitrifizierende (nirK-Gen) und sulfatreduzierende (dsrA-Gen) Bakterien konnten nachgewiesen werden. Geringe Gehalte an BTEX-



Abbauprodukten für den anaeroben Abbau (bssA-Gen) und etwas höhere Gehalte für den aeroben Abbau (DEF / G-Gen) in beiden Beprobungskampagnen bestätigten den anhaltenden BTEX-Abbau. Die Anwesenheit von Organohalogen-vertatmenden Bakterien (bvcA-, vcrA-Gene, Dehalococcoides sp., Desulfitobacterium sp., Dehalobacter sp.) wurde nicht beobachtet (sowohl auf dem Enzym- als auch auf Bakteriengenusniveau). Da die CE-Konzentrationen niedrig waren, wurde wahrscheinlich nur eine geringfügig aktive Organohalogenidatmung festgestellt. VC-Reduktasen wurden nicht gefunden. Da eine reduktive Dehalogenierung nicht nachgewiesen wurde, könnte sie beim aeroben und kometabolischen Abbau auftreten, der jedoch mit vorhandenen Primern nicht nachgewiesen werden konnte.

Die folgenden Tabellen zeigen die sechs Messstellen in zwei Beprobungskampagnen (Dezember 2017 - links, Mai 2018 - rechts) und den Nachweis des spezifischen Abbaus. Gesamtbakterielle Biomasse (U16SRT), Vinylchloridenzyme (bvcA, vcrA), Dehalococcoides sp. (DHC-RT), Desulfitobacterium sp. (Dsb), Dehalobacter sp. (Dre), sulfatreduzierende Bakterien (dsrA), denitrifizierende Bakterien (nirK), HCH-Degrader (linA) und BTEX (DEF / G, bssA).

Primer	PM3	PM5	PZ3	PZ4	PZ5	PZ8	Primer	PM3	PM5	PZ3	PZ4	PZ5	PZ8
U16SRT							U16SRT						
bvcA							bvcA						
vcrA							vcrA						
DHC-RT							DHC-RT						
Dsb							Dsb						
Dre							Dre						
dsrA2							dsrA2						
nirK							nirK						
linA							linA						
DEF/G							DEF/G						
bssA							bssA						

Diese Beispiele zeigen, dass BMT einen guten Überblick über den Standort liefert. Diese Analysen wurden als zusätzliches Monitoring zu chemischen Analyse und CSIA eingesetzt, um biologische Prozesse am Standort besser zu verstehen. Basierend auf der BMT-Analyse wurde eine Empfehlung für den nächsten Sanierungsschritt erarbeitet: Für den Pilotstandort Parma wurde eine Substratanwendung zur Verbesserung der mikrobiellen Gemeinschaft vorgeschlagen.



### CSIA - Compound Specific Isotope Analysis (D.T1.2.4)

**Beschreibung:** CSIA kann angewendet werden, um verschiedene Schadstoffquellen zu unterscheiden und die Herkunft der Schadstoffe in einer Fahne zu bestimmen. Somit ist das Werkzeug ein wertvoller Ansatz, Schadstoffquellen zu identifizieren, die für die Grundwasserverunreinigung in einem Untersuchungsgebiet verantwortlich sind (FUA oder Standort). Es kann auch ermöglichen, das konzeptionelle Modell des Schadstofftransports zu verbessern und Punktquellen (PS) von multiplen Punktquellen (MPS) zu unterscheiden. Darüber hinaus kann mit CSIA festgestellt werden, ob natürliche Abbauprozesse auftreten und ob die Schadstoffe abgebaut werden können, was für die Sanierungsplanung von großem Interesse ist.

**Anwendbarkeit:** Mittels CSIA ist es möglich, den Anteil stabiler Isotope bei der Kohlenstoff-, Chlor- und Wasserstoff-Moleküle vieler organischer Schadstoffe zu messen. Abhängig von Laborgeräten ist ein Mindestkonzentrationswert des Schadstoffs von etwa 1-5 µg/l erforderlich.

**Verknüpfung mit anderen Tools:** CSIA kann in Verbindung mit anderen Tools, wie z. B. biologischen molekularen Tools (BMTs), angewendet werden, insbesondere zur Überwachung des natürlichen Abbaus (MNA) und für die Entwicklung und Überwachung von Strategien von ENA-Sanierungen. Auf diese Weise wird der Entscheidungsprozess für das Grundwassermanagement unterstützt, z.B. die Auswahl von Sanierungsmethoden.

<b>ZIELE</b>	Analyse der Grundwasserdaten: Datensatzbereinigung und Identifizierung von PS- / MPS-Messstellen	
	Erstellung des konzeptionellen Modells	
	Zusammenhang Schadstoffquelle-Fahne und konzeptionelles Modell für den Schadstofftransport	X
	Auswahl geeigneter Maßnahmen und Erstellung des Managementplans	X
<b>STÄRKEN</b>	<p>Die Änderungen des Verhältnisses zwischen den stabilen Isotopen (durch Isotopenfraktionierung) können eindeutig die Existenz eines Schadstoffabbaus im Grundwasser nachweisen und Informationen zur Quantifizierung des biologischen Abbaus liefern.</p> <p>Die Verwendung der Isotopen-Tools ermöglicht ein besseres Verständnis des Verhaltens von Schadstoffen im Grundwasser, sowie der Bedeutung von physikalischen (d.h. Verdünnungs- oder abiotischen Prozessen) und biologischen Transformationen.</p> <p>CSIA quantifiziert die Isotopenzusammensetzung eines bestimmten Schadstoffs und bietet daher eine zusätzliche und oft einzigartige Methode zur Zuordnung und Unterscheidung von Schadstoffquellen organischer Verbindungen. Darüber hinaus hilft CSIA bei der Identifizierung von Transformationsreaktionen und der Quantifizierung des Prozentsatzes der abgebauten Schadstoffmasse, um die Entwicklung der Schadstoffgehalte vorhersagen zu können.</p>	
<b>SCHWÄCHEN</b>	<p>CSIA-Beprobung und Probenkonservierung müssen sorgfältig durchgeführt werden, um den biologischen Abbau oder die abiotische Umwandlung von Schadstoffen auf dem Transportweg zu verhindern. Andernfalls können die Ergebnisse beeinträchtigt werden.</p>	



	<p>Ein Mindestkonzentrationswert der Schadstoffkonzentration von etwa 1-5 µg/l ist erforderlich, abhängig von den Laborgeräten, den ausgewählten Isotopen und den analysierten Verbindungen.</p> <p>Die analytische Unsicherheit der CSIA-Methode kann ein Problem darstellen, da eine signifikante Variabilität in Abhängigkeit von den internen Protokollen und den in Laboren angewandten Analysemethoden besteht. Es liegt in der Verantwortung des Auftraggebers zu klären, ob die Unsicherheit für seine spezifische Anwendung akzeptabel ist. Um diese Methode effizienter zu gestalten und die Ergebnisse zwischen verschiedenen Labors vergleichbar zu machen, sollten europäische Analyseprotokolle entwickelt werden.</p> <p>Für die Verwendung von CSIA zur Bewertung des biologischen Abbaus gelten verschiedene Einschränkungen, beispielsweise Unsicherheiten in Bezug auf das Vorhandensein mehrerer Schadstoffquellen, komplex kontaminierte Standorte, aber auch geringfügige Auswirkungen von Sorptions-/Desorptionsprozessen.</p> <p>Eine weitere wichtige Einschränkung ist die korrekte Messung der Isotopensignatur an der Schadstoffquelle, wenn die Schadstoffquellen weit entfernt sind oder noch nicht vollständig identifiziert wurden.</p>
<b>CHANCEN</b>	<p>Durch die routinemäßige Verwendung von CSIA für Altlastenuntersuchungen und die Charakterisierung von FUAs werden Daten generiert, die eine angemessenere Bewertung der natürlichen Abbauprozesse und / oder des Fortschritts der Sanierungsmaßnahmen ermöglichen. Darüber hinaus ist es möglich, das konzeptionelle Modell zu verifizieren oder zu verbessern und die Entwicklung des Schadstoffabbaus zu vorherzusagen.</p>
<b>RISIKEN</b>	<p>Es wird empfohlen, die Wassersäulen in den Messstellen vor der Probenahme auszutauschen. Sonst ist die Grundwasserprobe möglicherweise nicht repräsentativ, was zu einer Fehlinterpretation der Analyseergebnisse führt.</p> <p>Es wird empfohlen, den Verlust leichtflüchtiger Schadstoffe zu minimieren, indem der Zutritt von Luftsauerstoff zur Grundwasserprobe verhindert wird. Denn Sauerstoff kann in gelösten organischen Verbindungen leicht zu einem aeroben Abbau führen. Es wird auch empfohlen, die Probe durch Zugabe eines Bakterizids zu stabilisieren, um einen Abbau während der Probenaufbewahrung und -des Probentransport zu vermeiden.</p> <p>Zur Erstellung geeigneter Probenahmestrategien ist ein umfassendes und angemessenes Verständnis des hydrogeologischen konzeptionellen Modells und des Monitoring-Netzwerks erforderlich. Dies erleichtert die Auswahl geeigneter Messstellen und Aquifere. Die Verwendung von Messstellen, die unterschiedliche Aquifere erschließen, erschwert die Datenauswertung, da Informationen aus verschiedenen geologischen Einheiten i.d.R. nicht vergleichbar sind.</p>
<p><b>ANWENDUNGSBEISPIEL IM AMIIGA-PROJEKT</b></p> <p><b>Pilotprojekt Mailand (Italien)</b></p> <p>CSIA wurden im Mailand angewendet, um die Fahnen diffuser Verunreinigung abzugrenzen. Verschiedene stabile Isotopenzusammensetzungen für PCE (sowohl für Kohlenstoff [13C] als auch für Chlor [37Cl]) wurden hauptsächlich verwendet, um festzustellen, ob eine Verunreinigung Teil einer bestimmten Fahne ist oder eine großflächige Hintergrundkontamination darstellt. CSIA-Daten wurden</p>	



verwendet, um genauere konzeptionelle Modelle für mehrere Bereiche innerhalb des Pilotgebiets zu erstellen. Dadurch könnten die Schadstoffquellgebiete ermittelt werden.

Ein weiteres Ziel war es, die biologischen Abbauprozesse zu bewerten und allgemein den natürlichen Abbau des betrachteten Kontaminanten PCE zu bewerten. Die Isotopenzusammensetzung von TCE und cis-DCE wurde verwendet, um Einblicke in die Abbauwege und das Ausmaß von PCE zu erhalten und um zu verstehen, ob TCE an ausgewählten Stellen ein Abbauprodukt oder eine primäre Kontamination ist.



### INVERSE TRANSPORTMODELLIERUNG (D.T1.1.3)

**Beschreibung:** Die inverse Transportmodellierung kann angewendet werden, um Unsicherheiten bei der Wahl der Aquifer-Parameter zur Transportsimulation zu bewerten. Unter Berücksichtigung unterschiedlicher möglicher Verteilungen der Parameter (z. B. hydraulische Konduktivität, Porosität usw.) ist es möglich, die wahrscheinlichsten Fließrichtungen zu ermitteln. Die Technik kann angewendet werden:

- (i) ausgehend von der Schadstoffquelle, der wahrscheinlichsten Fließrichtung folgend (als Vorwärtsmodellierung (Forward-tracking) bezeichnet) oder
- (ii) ausgehend von einer kontaminierten Grundwassermessstelle, der Fließrichtung folgend (als Rückwärtsmodellierung oder Backward-tracking bezeichnet), um die wahrscheinlichsten Schadstoffquellen zu identifizieren.

Die inverse Transportmodellierung ermöglicht es, die Zusammenhänge zwischen Schadstoffquellen und Fahnen herzustellen und das konzeptionelle Transportmodell zu verbessern. Es handelt sich um ein wichtiges Instrument, das Entscheidungsträger bei der Überwachung, Untersuchung und beim Management von Grundwasserkontaminationen unterstützen kann.

**Anwendbarkeit:** Der in AMIIGA entwickelte inverse Modellierungsansatz sollte auf einer mittleren Skala (FUA) angewendet werden, bei der viele Schadstoffquellen für die im Grundwasser nachgewiesene Kontamination verantwortlich sein können. Die inverse Modellierungstechnik kann sowohl für die PS als auch für die MPS angewendet werden. Im AMIIGA-Projekt wurde das Tool angewendet, um den wahrscheinlichsten Eintragsbereich zu ermitteln (PS und MPS) oder den advektiven Schadstofftransport abstromig von vermuteten Schadstoffquellen abzugrenzen (PS). In AMIIGA wurden die numerischen Programme MODFLOW für das Strömungsmodell, MODPATH für die Partikelverfolgung, PEST für die K-Feld-Erzeugung und inverse Modellierung, sowie MT3DMS für die advektiv-dispersive Modellierung verwendet. Die Methode kann jedoch auch auf Basis anderer numerischer Programme für Strömungs- und Schadstofftransportmodellierung angewendet werden. Voraussetzung zur Anwendung ist ein klassisch (d. H. deterministisch) kalibriertes Strömungsmodell.

**Verknüpfung mit anderen Tools:** Durch Kombination mit statistischen Tools wird die Zuverlässigkeit bei der Lokalisierung von Schadstoffquellen verbessert. Die Kombination mit einem vollständigen Transportmodell (advektiv + dispersiv) unterstützt die Identifizierung der vermuteten Quellen und die Ermittlung der Ausdehnung von Fahnen. Außerdem wird es möglich, die Wahrscheinlichkeit zu bewerten, dass eine Fahne eine bestimmte Ausdehnung aufweist.

<b>ZIELE</b>	Analyse der Grundwasserdaten: Datensatzbereinigung und Identifizierung von PS- / MPS-Messstellen	
	Erstellung des konzeptionellen Modells	
	Zusammenhang Schadstoffquelle-Fahne und konzeptionelles Modell für den Schadstofftransport	X
	Auswahl geeigneter Maßnahmen und Erstellung des Managementplans	X
<b>STÄRKEN</b>	Bei multiplen Punktquellen (MPS), die großflächige Grundwasserkontamination in FUAs verursachen müssen unkonventionelle Management- und Sanierungsmaßnahmen eingesetzt werden. MPS sind i.d.R. unbekannte Schadstoffquellen. Konventionelle Transportmodelle können diese diffusen Kontaminationen nicht plausibel nachbilden. Dagegen können inverse	



	<p>Transportmodelle diese Art von Kontamination simulieren. Aus diesem Grund sind sie ein wesentliches Instrument, um die Entwicklung von Kontaminationen zu bewerten und ihr Management effektiv zu planen.</p> <p>Darüber hinaus kann auch eine inverse Transportmodellierung- angewendet werden, um die wahrscheinlichste Schadstoffquelle (PS) zu identifizieren, die für eine einzelne Fahne verantwortlich ist (durch Backward-tracking). Es gibt keine Einschränkungen für die Anwendung bei Substanzen, die im Grundwasser vorkommen.</p>
<p><b>SCHWÄCHEN</b></p>	<p>Um die mit den hydrogeologischen Eigenschaften verbundenen Unsicherheiten eingehend zu untersuchen, wäre es nützlich, bei jeder inversen Modellierung eine große Anzahl von Parametern zu verwenden. Die Anzahl der zu variierenden Parameter darf nicht größer als 4 sein, um Modellinstabilität oder nicht kalibrierte Modellergebnisse zu vermeiden. Es wird erwartet, dass die Möglichkeiten zur inversen Modellierung in Zukunft mit verbesserten Computerleistungen zunehmen werden.</p> <p>Die Output-Daten umfassen häufig große Datenmengen (z.B. die Anzahl der Partikel, die eine Zelle durchlaufen, in verschiedenen Schichten für jede Simulation) und sind in einer GIS-Umgebung schwierig zu analysieren (d.h. eine selbst erstellte Software ist zur Analyse der Häufigkeit und der räumlichen Wahrscheinlichkeit vorzuziehen).</p> <p>Derzeit verfügen nur wenige Modellierer über die erforderliche Erfahrung, um inverse Modelle zu implementieren.</p>
<p><b>CHANCEN</b></p>	<p>Die Unsicherheitsanalyse wird den Behörden helfen, den Einsatz öffentlicher Ressourcen zu optimieren. Untersuchungen werden in den Gebieten geplant, die wahrscheinlich für großflächige Schadstoffkontaminationen verantwortlich sind. Darüber hinaus identifizieren die Ergebnisse der inversen Transportmodellierung Bereiche, in denen das FUA-Monitoring-Netzwerk verbessert werden sollte, um die Kontaminationen besser zu erfassen. Schließlich kann auch die Verwaltung der Grundwasserentnahmen durch Pumpmaßnahmen für öffentliche Zwecke optimiert werden.</p>
<p><b>RISIKEN</b></p>	<p>Die Ergebnisse sollten sorgfältig ausgewertet werden und verglichen mit denen konzeptioneller Modelle (bzgl. hydrogeologischer Struktur, Grundwasserströmung, Schadstofftransport) widerspruchsfrei sein. Die Gefahr besteht darin, dass die Ergebnisse des inversen Modells von der Qualität der Kalibrierung des numerischen / deterministischen Modells abhängen, das die Grundlage für seine Anwendung ist.</p>
<p><b>ANWENDUNGSBEISPIEL IM AMIIGA-PROJEKT</b></p> <p><b>Pilotprojekt Mailand (Italien)</b></p> <p>In einem Teil der Mailand-FUA wurde eine inverse Transportmodellierung angewendet, um die Gebiete mit der höchsten Wahrscheinlichkeit von MPS zu identifizieren. Ausgehend von einem kalibrierten Modell (deterministisch) war es notwendig, 400 verschiedene Verteilungen der hydraulischen Konduktivitätswerte (K-Felder) zu erzeugen. Unter diesen Verteilungen wurden 11 ausgeschlossen, weil sie die Kalibrierungsziele nicht erfüllen konnten, d.h. das Modell konnte die Piezometerhöhe nicht plausibel darstellen.</p>	



Die verbleibenden 389 kalibrierten Verteilungen zeigten geringfügige Unterschiede in den K-Werten auf. Da alle in der Lage waren, die Piezometerhöhen plausibel darzustellen, wurden sie als gleich wahrscheinlich angesehen. Anschließend wurde jedes der Verteilungen verwendet, um Partikel aus Messstellen zurückzuverfolgen, von denen bereits bekannt war, dass sie durch eine großflächige Kontamination verunreinigt waren. Im vorliegenden Fall wurden unter den Messstellen, die eine solche Kontamination aufwiesen, nur diejenigen Punkte für die Rückverfolgungsphase ausgewählt, die einen mittleren PCE-Wert von mehr als  $10 \mu\text{g/l}$  aufwiesen (der PCE-Prüfwert nach italienischem Trinkwasserstandard beträgt  $10 \mu\text{g/l}$ ). Da die Partikel-Backtrack-Analyse empfindlich auf die Startposition der Partikel reagiert, wird diese als Tiefenlage im Bereich der Filterstrecke der Grundwassermessstelle definiert. Bei jeder Messstelle erfolgte die Eingabe der Partikel in der Mitte der Filterstrecke. Dann wurde jedes Modell-Partikel rückwärts verfolgt. Die unterschiedlichen Strömungslinien, denen das Partikel in 389 Simulationen folgt, resultieren aus den unterschiedlichen K-Wert-Feldern, die nach dem oben beschriebenen Verfahren erzeugt wurden. Durch Berechnung der Anzahl der Partikel, die jede der Modellzellen in allen 389 Simulationen durchfließen, war es möglich, die Häufigkeit des Partikeldurchgangs für jede Schicht zu berechnen: In den Modellzellen, in denen die Anzahl der Partikeldurchgänge am höchsten ist, ist die Wahrscheinlichkeit, dass diffuse Kontaminationen vorhanden sind, höher als in den anderen Zellen (MPS). Dieses Ergebnis gilt dann als repräsentativ für die FUA-Gebiete.

Darüber hinaus wurde die inverse Transportmodellierung verwendet, um die Gebiete potenzieller PS mit der höchsten Wahrscheinlichkeit zu identifizieren. Das Verfahren zur Erzeugung von K-Feldern und gleich wahrscheinlichen Verteilungen war das gleiche wie oben beschrieben. In diesem Fall wurden die Partikel jedoch nur in den Messstellen hinzugefügt, die eine hohe PCE-Konzentration aufwiesen und nicht zu den Punkten gehörten, die von der diffusen Kontamination betroffen waren (Ergebnis einer explorativen Datenanalyse). Dies bedeutet, dass nur die Punkte berücksichtigt wurden, bei denen der Verdacht bestand, dass sie von einer Fahne getroffen wurden.

Danach wurde das MODPATH-Programm angewendet, um Backward-Strömungspfade für verschiedenen K-Felder zu erzeugen. Anschließend wurden Karten erstellt, in denen die Anzahl der zurückverfolgten Partikel angezeigt wurde, die jede Modellzelle in jedem kalibrierten Modell durchfließt. Das Ergebnis wurde als repräsentativ für die FUA-Gebiete mit der höchsten Wahrscheinlichkeit angesehen, eine Punktquelle (PS) zu enthalten, die für die Kontamination verantwortlich ist. Die Ergebnisse wurden mit dem deterministischen Transportmodell (Fahnen in FUA) und mit den in den AMIIGA-Beprobungskampagnen gewonnenen hydrochemischen Analysen verglichen.



## MULTIVARIATE UND GEOSTATISTISCHE ANALYSE (D.T1.1.2)

**Beschreibung:** Die multivariate (mehrdimensionale) statistische Analyse (Principal component analysis oder Hauptkomponentenanalyse, Faktoranalyse, Multiparameterclusteranalyse, Regressionsanalyse) und die geostatistische Analyse sind statistische Methoden, die sich von denen für die explorative Datenanalyse unterscheiden. Sie unterstützen die Datenanalyse und den Entscheidungsprozess für das Grundwassermanagement (z.B. die Priorisierung oder die Auswahl von Maßnahmen) auf einer mittleren Skala (FUA-Skala). Ziel ist es, das anthropogene Hintergrundkontaminationsniveau (durch MPS) abzuschätzen und Gebiete mit unterschiedlicher Stärke diffuser Kontamination in derselben FUA zu differenzieren.

Multivariate Analyse: Bewertung der Hauptkomponente des Datensatzes (zum Beispiel der Hauptkontaminanten) und des Musters der diffusen Kontamination, die in der FUA vorhanden sein könnten.

Geostatistische Analyse: Bewertung der räumlichen Verteilung der diffusen Kontamination.

**Anwendbarkeit:** Die multivariate Analyse besteht aus einer Sammlung statistischer Methoden, die verwendet werden können, wenn mehrere Messungen an einer Messstelle durchgeführt werden. Die multivariate Analyse kann auf verschiedene Arten von Parametermessungen (z.B. Schadstoffkonzentrationen) angewendet werden, wobei die räumliche Variable jeder Messstelle berücksichtigt wird. Indikativ kann die Analyse angewendet werden, wenn in der FUA zwei Messstellen je 100 ha verfügbar sind. Multivariate Analysemethoden können auf alle Standortbedingungen angewendet werden, z.B. Identifizierung der Eintragsstellen, Standortcharakterisierung, Sanierung, Überwachung. Geostatistische Methoden können in Verbindung mit den Ergebnissen der multivariaten Analyse verwendet werden, um Umweltdaten, die häufig unausgewogen, geclustert und räumlich korreliert sind, besser zu befassen.

**Verknüpfung mit anderen Tools:** Multivariate und geostatistische Analyseergebnisse in Kombination mit deterministischen und inversen numerischen Transportmodellern unterscheiden PS- und MPS-Bereiche und geben Aufschluss über die diffusen Kontaminationsstärken. Diese Informationen unterstützen den Entscheidungsprozess für das Grundwassermanagement, um die Hintergrundkonzentrationswerte der diffusen Kontamination abzuschätzen.

<b>ZIELE</b>	Analyse der Grundwasserdaten: Datensatzbereinigung und Identifizierung von PS- / MPS-Messstellen	
	Erstellung des konzeptionellen Modells	
	Zusammenhang Schadstoffquelle-Fahne und konzeptionelles Modell für den Schadstofftransport	
	Auswahl geeigneter Maßnahmen und Erstellung des Managementplans	x
<b>STÄRKEN</b>	In kontaminierten Bereichen wird in der Regel mehr als eine Variable gleichzeitig in jeder Messstelle gemessen und kann möglicherweise korreliert werden. Dazu ist es notwendig, die durch korrelierte Variablen bereitgestellten überlappenden Informationen zu entwirren, um die zugrundeliegende Struktur zu ermitteln. Daher ist das Ziel vieler multivariater Ansätze die Vereinfachung, indem versucht wird, das Geschehen in Form eines reduzierten Satzes von Dimensionen auszudrücken (d. h. beispielsweise die Schadstoffe zu gruppieren, die dasselbe Muster aufweisen).	



	<p>Multivariate Analysemethoden untersuchen die zeitliche Entwicklung von Parametern und die Zusammenhängen zwischen verschiedenen Parametern.</p> <p>Die multivariate Analyse ermöglicht die Bewertung der Hauptkomponenten des Datensatzes (z.B. Haupteintragsstellen) und der Muster der diffusen Kontamination, die in der FUA vorhanden sein könnten, um den Hintergrund der diffusen Kontamination über große Gebiete abzuschätzen.</p> <p>Die räumliche Interpolation (geostatistische Analyse) schätzt die unbekanntes Datenwerte an bestimmten Stellen unter Verwendung der bekannten Datenwerte für andere Punkte.</p> <p>Die geostatistische Analyse bewertet die räumliche Verteilung der diffusen Kontamination.</p> <p>Multivariate und geostatistische Analyseergebnisse unterstützen den Entscheidungsprozess für das Grundwassermanagement auf mittlerer Ebene (FUA-Skala).</p>
<b>SCHWÄCHEN</b>	<p>Sobald die Daten gesammelt wurden, muss der endgültige Datensatz überprüft, validiert und aufbereitet werden, bevor mit der Analyse fortgefahren werden kann. Es sind mehrere Schritte erforderlich, um die Daten für die Analyse vorzubereiten: Datenbearbeitung und -codierung (z.B. Überprüfung auf Fehler oder Auslassungen) und Datenbereinigung (siehe exploratives Datenanalysetool). Eine homogene räumliche und zeitliche Verteilung der Daten erleichtert die Analyse. Die Erhöhung der räumlichen und zeitlichen Datendichte verbessert die Solidität der Ergebnisse.</p>
<b>CHANCEN</b>	<p>Die Ergebnisse multivariater und geostatistischer Analysen können zur Überwachung der Kontaminationsentwicklung herangezogen werden, wenn sie immer an denselben Monitoring-Netzwerk angewendet werden.</p>
<b>RISIKEN</b>	<p>Die Ergebnisse müssen mit dem konzeptionellen Modell übereinstimmen (Beachtung hydrogeologischer Aspekte, von Grundwasserströmung und Schadstofftransport). Die Gefahr besteht darin, dass die statistischen Methoden angewendet werden, ohne die Eigenschaften der Messstellen zu berücksichtigen (z. B. Tiefe und Länge der Filterstrecke).</p> <p>Derzeit ist es in der geostatistischen Analyse schwierig, die beste räumliche Interpolationsmethode für eine Vielzahl von georeferenzierten Daten auszuwählen. Daher ist die Auswahl einer geeigneten Methode mit geeigneten Parametern für eine bestimmte Anwendung von entscheidender Bedeutung. Unterschiedliche Methoden können sehr unterschiedliche räumliche Darstellungen erzeugen, und es ist eine gründliche Kenntnis des Phänomens erforderlich, um zu bewerten, welches der Realität besser entspricht. Die Verwendung einer ungeeigneten Methode oder ungeeigneter Parameter kann zu einem verzerrten Modell der räumlichen Verteilung führen, was zu möglicherweise falschen Entscheidungen auf der Grundlage irreführender räumlicher Informationen führen kann.</p>



## ANWENDUNGSBEISPIEL IM AMIIGA-PROJEKT

### Pilotprojekt Mailand (Italien)

Multivariate und geostatistische Analysen wurden in der FUA Mailand angewendet, wo zwei Grundwasserleiter vorkommen (flacher und tiefer Grundwasserleiter). Der Datensatz bestand aus einem Monitoring-Netzwerk von etwa 2.000 Punkten mit verfügbaren hydrochemischen Daten. Die Multiparameter-Clusteranalyse könnte Konzentrationsprofile verschiedener Schadstoffe korrelieren. 5 Cluster wurden als repräsentativ für die diffuse PCE-Kontamination identifiziert, sie stellten die größte Gruppe der Hintergrundwertmessungen dar. Die Eigenschaften und die mittleren zeitlichen PCE-Trends der fünf Cluster, die die diffuse Kontamination darstellten, wurden genauer untersucht.

Darüber hinaus wurde mit Hilfe der geostatistischen Methode die räumliche Verteilung der 5 Cluster im Untersuchungsgebiet analysiert und anhand multivariater Analyseergebnisse die repräsentativsten Cluster für jede Zone identifiziert. Dabei wurde erkannt, dass aufgrund der Inhomogenität nicht ein eindeutiger Wert der diffusen Kontamination im gesamten Untersuchungsgebiet für die tatsächliche diffuse Kontaminationsverteilung repräsentativ ist, sondern dass der FUA mehr als ein Hintergrundkonzentrationswert zugewiesen werden muss.

Statistische und geostatistische Analysen, kombiniert mit numerischen und inversen Transportmodellergebnissen, unterscheiden PS- und MPS-Gebiete und liefern die repräsentativsten Konzentrationswerte der diffusen Kontamination in Mailand.

Die Ergebnisse unterstützten den Entscheidungsprozess für das Grundwassermanagement, die Planung der Maßnahmen und die Identifizierung neuer potenzieller Schadstoffquellenbereiche, die überwacht werden müssen.



### WEBGIS (D.T1.1.1)

**Beschreibung:** Das WebGIS ist ein Tool, mit dem Daten im Internet angezeigt und verarbeitet werden können. Es bietet die Möglichkeit, online auf Informationen zuzugreifen und diese auszutauschen. Es verbessert die Effizienz der Datenanalyse und der Interpretation des konzeptionellen Modells und ermöglicht den Austausch von Daten und Informationen zwischen Institutionen. Ziel ist es, Daten in einer Karte darzustellen, die Diskussion über Projektdaten und -ergebnisse zu ermöglichen und den Entscheidungsprozess für das Grundwassermanagement zu unterstützen und zu erleichtern.

**Anwendbarkeit:** FUA-Skala. Die Verfügbarkeit und Leistung des Internets muss ausreichend sein.

**Verknüpfung mit anderen Tools:** Die Ergebnisse der explorativen Datenanalyse, chemischen Analyse, Grundwasserstandsmessungen, von BMT, CSIA, inversen und deterministischen Transportmodellen, multivariaten und geostatistischen Analysen können gleichzeitig oder in verschiedenen Kombinationen dargestellt werden, um das Verständnis des konzeptionellen Modells zu verbessern.

<b>ZIELE</b>	Analyse der Grundwasserdaten: Datensatzbereinigung und Identifizierung von PS- / MPS-Messstellen	
	Erstellung des konzeptionellen Modells	
	Zusammenhang Schadstoffquelle-Fahne und konzeptionelles Modell für den Schadstofftransport	
	Auswahl geeigneter Maßnahmen und Erstellung des Managementplans	x

<b>STÄRKEN</b>	<p>Das WebGIS ist ein Open-Access-Tool zur Datenbereitstellung. Auf WebGIS kann überall von verschiedenen Plattformen aus zugegriffen werden, wobei unterschiedliche Berechtigungen durch die Zugriffsebenen (mit Benutzername und Passwort) erteilt werden können. Dies bedeutet, dass es möglich ist, die Berechtigungen für bestimmte Benutzer oder bestimmte Gruppen so zu steuern, dass ihnen ein Zugriff auf bestimmte Teilmengen an Daten oder Karten ermöglicht wird. Auf diese Weise können mehrschichtige Features auf einer einzigen Web-Karte veröffentlicht und freigegeben werden. Es verbessert die Effizienz der Datenanalyse und der konzeptionellen Modellinterpretation. Es ist eine gute Möglichkeit, Daten und Informationen zwischen Institutionen auszutauschen, die interne und externe Kommunikation sowie die Zusammenarbeit zu verbessern und Entscheidungen zu unterstützen und zu erleichtern. Die Informationen können regelmäßig aktualisiert werden, so dass alle WebGIS-Benutzer gleichzeitig und jederzeit auf die neuesten Informationen zugreifen können. Es ermöglicht Organisationen, effizienter und angemessener auf ihre Geodaten zu reagieren. Viele Funktionen wie Zoomen, Drucken, Hochladen und Überlappen von Daten mit vorhandenen Karten, Suchen von Daten nach Adresse und Verarbeiten von Daten können implementiert werden. Es ermöglicht jedem, nicht nur Experten, einfach und mit wenig Aufwand auf Geodaten zuzugreifen und diese zu verstehen. Benutzer, die keine Experten in der Geoinformatik sind, können die GIS-Tools verwenden, die sich auf Daten ihres</p>
----------------	---



	<p>jeweiligen Zuständigkeitsbereichs konzentrieren.</p> <p>Es sind keine besonders leistungsfähigen PCs zur Verwaltung der Daten erforderlich.</p> <p>Die Daten müssen nicht auf einem Computer gespeichert werden, da alle Daten cloudbasiert sind.</p>
<b>SCHWÄCHEN</b>	<p>Die Verfügbarkeit und Leistung des Internets ist bereits ein Problem, wird sich aber wahrscheinlich in Zukunft verbessern.</p> <p>Um das Tool zu implementieren und Informationen zu aktualisieren, sind Experten erforderlich, die sich speziell mit der Entwicklung und Pflege von Umweltdatensätzen und WebGIS-Funktionen befassen.</p>
<b>CHANCEN</b>	<p>Es sollte möglich sein, auch komplexe Analysen und Verarbeitungen von Vektor- und Rasterdaten im Web durchzuführen und jederzeit mit anderen Benutzern zusammenzuarbeiten.</p>
<b>RISIKEN</b>	<p>Das Verteilen von Daten ist kein einfacher Prozess.</p> <p>GIS-Benutzer tendieren dazu, ihre eigenen Datensätze zu entwickeln. Dies impliziert zum Beispiel, dass sie möglicherweise andere verfügbare vorhandene Datensätze, oder die Korrekturen von Fehlern durch andere Benutzer nicht kennen. Im Allgemeinen ist der Zugriff auf vollständige und zuverlässige Datensätze schwierig.</p> <p>Nicht jeder GIS-Benutzer ist daran gewöhnt, Datensätze mit anderen Institutionen zu teilen. Einige der Schwierigkeiten bei der Weitergabe von Daten werden durch ein allgemeines Misstrauen hinsichtlich der Datenqualität Dritter verursacht. Daten können „falsch“ verwendet werden, wenn sie mit Dritten geteilt werden.</p> <p>Fachleute, die sich speziell mit der Entwicklung und Pflege von Umweltdatensätzen befassen, sind in der Struktur des Arbeitsteams nicht immer verfügbar. Umweltdatensätze arbeiten häufig auch in der Phase der Vorbereitung von Datensätzen für bestimmte Aufgaben, mit denen sie sich befassen. Dies kann bedeuten, dass Datensätze nicht für den allgemeinen Gebrauch freigegeben werden können.</p>

## ANWENDUNGSBEISPIEL IM AMIIGA-PROJEKT

### Alle Pilotprojekte

Das AMIIGA WebGIS ist für die Projektpartner unter folgendem Link verfügbar: <http://131.175.56.100/lm/>. Sieben WebGIS-Projekte, eines für jeden Pilotbereich, wurden durchgeführt und nur AMIIGA-Partner können mit einem persönlichen Login und Passwort auf die Projekte zugreifen. Auf das WebGIS kann über einen einfachen Webbrowser auf jedem Gerät zugegriffen werden.

Die gesamte Software ist auf einem Server installiert, der mit einer Ubuntu 14.04-Installation arbeitet. Alle Komponenten in der Architektur sind Freie und Open Source-Software (FOSS). Die Architektur beginnt mit der Hauptkomponente QGIS, einer freien Open Source Software für Geospatial (FOSS4G). QGIS ermöglicht es, die Datenverarbeitung durchzuführen und alle Layer in einer lokalen Datenbank zu speichern. Die ausgewählte Datenbank ist PostgreSQL mit einer PostGIS-Erweiterung, die speziell für den Umgang mit Geodaten geeignet ist. Eine weitere Komponente der Architektur ist der QGIS Server, der den Layer in einem QGIS-Projekt, also aus der Datenbank, mithilfe von OGC-Standards wie einem Web Map Service (WMS) über das Web bereitstellt. Um alle Ebenen in einem Webbrowser anzuzeigen, implementiert die Architektur eine dynamische Komponente namens Lizmap, die ein WebGIS basierend auf den Benutzeranforderungen generiert.



Alle Partner waren an Datenerfassungsaktivitäten beteiligt (Überwachung der Netzwerkmerkmale, Konzentrationswerte, Grundwasserleitereigenschaften usw.). Im AMIIGA-WebGIS werden folgende Daten angezeigt: Arbeitsgebiet und FUA; Monitoring-Netzwerk; Grundwasserleiter; Verwerfungen; Schadstoffkonzentrationen; Altstandorte; Diffuse Kontaminationskarten.

Für jeden Partner verbessert das AMIIGA-WebGIS die Effizienz der Datenanalyse und der Interpretation des konzeptionellen Modells, vereinfacht den Daten- und Informationsaustausch zwischen Instituten mit dem Ziel, den Entscheidungsprozess für das Grundwassermanagement zu unterstützen und zu erleichtern.



## 4. Fazit

AMIIGA-Tools können nach ihren Zielen zusammengefasst werden. Die folgenden Tabellen geben einen Überblick über die im vorherigen Kapitel beschriebenen Werkzeuge.

### Ziele der AMIIGA-Werkzeuge

Die Tabelle zeigt die Ziele der einzelnen Werkzeuge gemäß der Beschreibung im vorherigen Kapitel.

		Ziele			
		Analyse der Grundwasserdaten	Erstellung des konzeptionellen Modells	Zusammenhang Schadstoffquelle-Fahne und Schadstofftransport	Auswahl geeigneter Maßnahmen und Managementplan
AMIIGA- Werkzeuge	Datenanalyse	x			x
	BMT		x		x
	CSIA			x	x
	Inverse Transportmodellierung			x	x
	Multivariate und geostatistische Analyse				x
	WEBGIS				x

### AMIIGA-Tools in den Pilotgebieten

Die Tabelle gibt einen Überblick über die im Projekt angewendeten AMIIGA-Tools und die in den Pilotgebieten erreichten Ziele.

Pilotgebiet (PA)		PA1 (HR)	PA2 (SL)	PA3 (IT)	PA4 (IT)	PA5 (CZ)	PA6 (PL)	PA7 (DE)
Größe des Arbeitsgebiets [ha]		6 500	7 000	15 740	600	3,1	2 475	530
Größe des FUA [ha]		26 000	25 100	52 100	58 594	3 750	20 190	4 810
Kontamination		Bakterien, Nitrate	Cr VI, NO3, B, Desethyl- - Atrazine (neue Schad- stoffe)	PCE, TCE	PCE	CHC	Pesti- zide, orga- nische Lösungs- mittel	CHC
ZIELE	Analyse der Grundwasserdaten			X	X		X	X
	Erstellung des konzeptionellen Modells	X		X			X	X
	Zusammenhang Schadstoffquelle-Fahne und Schadstofftransport	X	X	X	X		X	X
	Auswahl geeigneter Maßnahmen und Managementplan	X	X	X	X	X	X	X
AMIIGA TOOLS	Datenanalyse		X	X				
	BMT		X		X	X	X	X
	CSIA		X	X	X	X	X	X
	Inverse Transportmodellierung	X		X				
	Multivariate und geostatistische Analyse	X		X				
	WEBGIS	X	X	X	X	X	X	X



## Literatur

- 2011 - *FOKS Handbook for Integral Groundwater Investigation - Toolbox for the identification of key sources of groundwater contamination*
- D.T1.1.1, *WebGIS tool development for groundwater database management and open-access consultation*
- D.T1.1.2, *Guideline for statistical method and geostatistical analysis for GW quality studies at FUA*
- D.T1.1.3, *GW contamination modeling at FUA: "inverse iterative modeling" guideline for implementation and use*
- D.T1.1.4, *Technical protocol for statistical analysis coupled with transport modeling for GW pollution assessment*
- D.T1.2.4, *Final version of the CSIA technical protocol for GW pollution assessment and remedial evaluation*
- D.T1.3.4, *Final version of the BMTs technical protocol for remedial implementation and performance evaluation*
- D.T3.3.7 *Management Strategy on groundwater contamination in Functional Urban Areas of Central Europe*