

Monitored Natural Attenuation - Konzepte im Rahmen der systematischen Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg

(Stand März 2006)

Dr.-Ing. Wolfgang Kohler
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und
Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)
Tel.: 0721-5600-1438
e-mail: wolfgang.kohler@lubw.bwl.de

1. Einleitung

Natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse (Natural Attenuation, NA) können die Ausbreitung von Schadstoffen in Grundwasserleitern verlangsamen oder zum Stillstand bringen. Aufmerksam auf diesem Phänomen wurde man durch Beobachtungen, dass bei einer erheblichen Anzahl von Altlasten im Grundwasser Schadstofffahnen von geringerem Ausmaß als erwartet beobachtet werden. Vielfach gibt es in diesem Zusammenhang auch Hinweise, dass die Schadstoffausbreitung im Grundwasserleiter zum Stillstand gekommen ist, d. h., dass sich eine stationäre Schadstofffahne ausgebildet hat. Es liegt in diesen Fällen ein begrenzter Grundwasserschaden vor, der sich nicht weiter vergrößert.

Die Art der Grundwasserkontamination beeinflusst dieses Verhalten sehr wesentlich: So konnte im Rahmen von statistischen Auswertungen nachgewiesen werden, dass bei Mineralölkohlenwasserstoffe die Fahnenlänge selten 200 m übersteigt, während bei LCKW in der Regel deutlich längere Schadstofffahnen beobachtet werden, die zum Teil eine Länge von 10 km und mehr mit der Tendenz der weiteren Ausdehnung erreichen können.

Bei der Beurteilung der Sanierungsnotwendigkeit von Altlasten fanden diese Sachverhalte in der Vergangenheit keine Berücksichtigung. Entscheidend für die Sanierungsnotwendigkeit einer Altlast sind die Schadstoffkonzentrationen und Schadstofffrachten im direkten Abstrom einer Altlast. Eine Berücksichtigung von NA-Prozessen ermöglicht eine Differenzierung der Altlasten im Hinblick ihrer Auswirkungen im weiteren Abstrom. Bei Vorliegen entsprechender Voraussetzungen, wie z. B. eine stationäre Schadstofffahne mit einer relativ geringen Ausdehnung, ist es erwägenswert zu prüfen, ob die Möglichkeit besteht, auf eine herkömmliche Altlastensanierung zu verzichten. Voraussetzung hierbei ist, dass die natürlichen Abbau- und Rückhalteprozesse nachgewiesen und quantifiziert werden können. Ein Langzeit-Monitoring muss sicherstellen, dass der vorliegende begrenzte Grundwasserschaden keine weitere Ausdehnung erfährt.

Die damit verbundene Kostenreduzierung kann erheblich sein und insbesondere auch eine Fokussierung der begrenzten finanziellen Mittel auf wirklich brisante Fälle ermöglichen. Die

praktischen Erfahrungen der letzten 20 Jahre haben zudem gezeigt, dass die Sanierungsmaßnahmen an vielen Altlasten vielfach ineffizient und in absehbaren Zeiträumen nicht erfolgreich abgeschlossen werden können. Insbesondere hydraulische Sanierungen bzw. Sicherungen sind in vielen Fällen in überschaubaren Zeiträumen nicht erfolgreich abschließbar. Im Extremfall, wie z.B. bei PAK-Kontaminationen, muss mit Sanierungszeiträumen von einigen hundert, möglicherweise auch tausend Jahren gerechnet werden.

Die administrative Umsetzung von Sanierungsvorhaben mit diesem Zeithorizont dürfte wenig realistisch sein. Die hierbei auflaufenden Kosten, auch wenn sie über lange Zeit verteilt, zunächst nicht allzu erheblich erscheinen, werden letztendlich immense Höhen erreichen. Die Umweltbelastungen, die durch die Sanierungsmaßnahmen selbst verursacht werden, werden einen Umfang annehmen, die die Sinnhaftigkeit der Maßnahme an sich in Frage stellt.

NA-Konzepte sollen und können eine aktive Altlastensanierung nicht ersetzen. Bei Vorliegen von geeigneten Voraussetzungen kann bei einem nicht unerheblichen Anteil der sanierungsbedürftigen Altlasten (möglicherweise bis zu 20 %) ein NA-Konzept eine aktive Sanierung ersetzen. Von großer Bedeutung hierbei ist das Vorliegen von klaren Entscheidungskriterien, so dass die Vorgehensweise hierbei nachvollziehbar und transparent ist. Dies ist auch deshalb wichtig, um gegenüber dem Sanierungspflichtigen, der in der Regel aus Kostengründen ein NA-Konzept bevorzugen wird, eine notwendige aktive Sanierung durchsetzen zu können.

2. Definitionen

2.1 Natural Attenuation (NA)

Der Begriff Natural Attenuation (NA) wurde ursprünglich von der Umweltbehörde EPA der USA geprägt. In ihren Publikationen zu diesem Themenbereich wird Natural Attenuation sehr allgemein als die Summe aller physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse umschrieben, die unter geeigneten Bedingungen ohne menschliches Zutun die Masse, Toxizität, Mobilität und Konzentration von Schadstoffen in Boden und Grundwasser verringern.

Diese sehr weit gefasste EPA-Definition hat im Verlauf der innerhalb der BRD zu diesem Themenbereich intensiv geführten Diskussionen eine Einengung erfahren. Bei der in BRD gebräuchlichen Definitionen werden nur Prozesse berücksichtigt, die zu einer tatsächlichen Reduzierung der Schadstofffracht im Abstrom der Fahne beitragen. Der entscheidende Unterschied zur amerikanischen Definition ist, dass diese auch den Rückgang von Schadstoffkonzentrationen im Fahnenbereich berücksichtigt, wenn dieser wesentlich auf Verdünnungs- bzw. Verflüchtigungseffekte beruht. Die Prozesse, die im Fahnenverlauf eine tatsächliche Frachtreduktion bewirken können in destruktive und nichtdestruktive Prozesse unterschieden werden:

Destruktive Prozesse sind in der Regel von mikrobiologischer Natur. Abiotische Prozesse sind grundsätzlich möglich, spielen quantitativ jedoch in der Regel keine wesentliche Rolle. Voraussetzung ist die mikrobiologisch Abbaubarkeit der Kontaminanten zu möglichst unbedenklichen Stoffen, was in der Regel mit der vollständigen Mineralisierung gleichzuset-

zen ist. Der Bereich der Schadstofffahne im Grundwasserleiter stellt in diesem Fall einen Reaktionsraum dar, innerhalb dem die Abbaureaktionen ablaufen. In vielen Fällen führt das Vorliegen von effektiven Abbauprozessen zur Ausbildung einer sog. „stationären Schadstofffahne“. Es hat sich hierbei ein Gleichgewicht zwischen der Schadstoffnachlieferung aus dem Schadensbereich und dem Schadstoffabbau innerhalb der Fahne eingestellt. Es ist hierbei zu beobachten, dass keine weitere Ausdehnung der Schadstofffahne stattfindet und die Fahnen spitze, von Schwankungen abgesehen, im Mittel ortsfest ist.

Weitere wichtige Prozesse der Frachtreduktion innerhalb der Schadstofffahne sind Sorptions- und Fällungsreaktionen, die zu den nichtdestruktiven Prozessen zählen. Die Schadstoffe werden hierbei aus dem kontaminierten Grundwasser entfernt, indem sie entweder eine sorptive oder chemische Verbindung mit dem Untergrundmaterial des Grundwasserleiters eingehen. Diese Prozesse führen nicht zu einem Abbau der Schadstoffe, sondern nur zu einer Verlagerung in den Untergrundbereich. Sorptionsprozesse und Fällungsreaktionen sind grundsätzlich reversibel, so dass ein dauerhafter Rückhalt der Schadstoffe nicht in jedem Fall gesichert ist.

Da die Sorptions- und Fällungskapazität von Bodenmaterialien begrenzt ist, wird sich der Bereich der aktiven Reaktionszone mit der Zeit abstromig verlagern. Eine stationäre Schadstofffahne allein durch sorptive Prozesse ist daher prinzipiell nicht möglich. In der Praxis können diese Prozesse jedoch so effektiv sein, so dass die Ausbreitung der Kontaminanten im Grundwasserleiter so stark reduziert wird, dass von einem „quasi-stationären“ Fahnenverhalten gesprochen werden kann: Die Fahnen spitze verlagert sich jährlich nur noch um wenige Meter oder weniger. Dieses Verhalten kann quantitativ auch mit so genannten Retardierungsfaktoren beschrieben werden. 4- und 5-Ring PAK oder Schwermetalle im tonigen Untergrund können um den Faktor 100-1000 und mehr gegenüber dem Grundwasserstrom retardiert sein.

2.2 Monitored Natural Attenuation (MNA)

Im deutschsprachigen Raum hat sich für "Monitored Natural Attenuation" die Umschreibung "Kontrollierter natürlicher Rückhalt und Abbau von Schadstoffen" etabliert. In diesen Formulierungen wird die besondere Bedeutung des Monitorings bzw. der Überwachung deutlich. Ein MNA-Konzept kann daher als umfassendes Verständnis, Nachweis und Überwachung aller unter NA fallende Prozesse definiert werden. Werden NA-Prozesse gezielt zur Bewertung insbesondere unter dem Aspekt der Sanierungsnotwendigkeit einer Altlast berücksichtigt, so müssen diese sowohl qualitativ als auch quantitativ nachgewiesen werden und dauerhaft überwacht werden.

Bei einem MNA-Konzept handelt es sich nicht um eine aktive Sanierungsmaßnahme, sondern um eine Entscheidungsoption, die eine notwendige Sanierungsmaßnahme ersetzen bzw. überflüssig machen kann. Die grundsätzliche Sanierungsnotwendigkeit wird hierdurch nicht in Frage gestellt, sondern ein räumlich begrenzter Grundwasserschaden wird lediglich geduldet. Der Nachweis einer stationären Schadstofffahne ist dabei eine erforderliche Voraussetzung.

2.3 Enhanced Natural Attenuation (ENA)

Enhanced Natural Attenuation (ENA) stellt im Gegensatz zu MNA eine aktive Maßnahme dar, die im direkten Abstrom der Altlast wirksam wird. Ziel hierbei ist es, durch Induzierung bzw. Beschleunigung von mikrobiologischen Abbauprozessen die Ausdehnung der Schadstofffahne zu reduzieren bzw. in eine stationäre überzuführen. Die technische Realisierung beruht darin, dass Sauerstoff bzw. geeignete Sauerstoffträger in den Grundwasserleiter injiziert werden, um aerobe Abbauprozesse zu ermöglichen. Es besteht auch die Möglichkeit durch die Eingabe von sauerstoffzehrenden Reagenzien wie z. B. Melasse anaerobe Verhältnisse im Grundwasserleiter zu induzieren, wie sie z. B. für den mikrobiologischen Abbau der LCKW erforderlich sind.

ENA ist durch den aktiven Charakter der Maßnahme daher als Sonderform einer In-situ-Sanierungstechnologie einzustufen. ENA unterscheidet sich von der mikrobiologischen In-situ-Sanierungstechnik dadurch, dass der Eingriff im Fahnenbereich der Altlast erfolgt, während bei der „mikrobiologischen In-situ-Sanierung“ die Zielrichtung darin besteht, dass Schadstoffpotenzial im Schadensherd zu reduzieren. Eine mikrobiologische In-situ-Sanierung ermöglicht es unter günstigen Voraussetzungen eine Altlast innerhalb eines überschaubaren zeitlichen Rahmens (einige Jahre) zu sanieren. Eine ENA Maßnahme muss so lange aufrechterhalten werden bis kein Austrag von Kontaminanten aus dem Schadensherd mehr stattfindet. Eine ENA-Maßnahme ist daher von der zeitlichen Perspektive mit einer hydraulischen Sicherung zu vergleichen, die im Bereich von Jahrzehnten insbesondere bei PAK auch im Bereich von Jahrhunderten liegen kann.

ENA wird daher als Alternative zu einer hydraulischen Sicherung nur sinnvoll sein, wenn wirtschaftliche Vorteile erkennbar sind. Ein weiterer Aspekt hierbei ist, dass mit einer hydraulischen Sicherung im direkten Abstrom die Sanierungsziele eingehalten werden können, während bei einer ENA-Maßnahme dies durch die Notwendigkeit eines Reaktionsraumes erst im weiteren Abstrom möglich ist.

3. NA-Potential altlastenrelevanter Schadstoffgruppen

3.1 Grundsätzliche Einflussparameter auf das NA-Potential

Das NA-Potenzial eines Schadstoffs wird im Wesentlichen durch die mikrobiologische Abbaubarkeit und durch die Intensität der Sorption an die Bodenmatrix charakterisiert. Die Kenntnis dieser Stoffeigenschaften ermöglicht die grundsätzliche Einschätzung des NA-Potenzials und eine Prognose, ob ein MNA-Konzept für einen Altlastenstandort aussichtsreich erscheint. Die tatsächliche Realisierbarkeit hängt jedoch letztendlich auch von den Standortgegebenheiten ab, da diese auch einen entscheidenden Einfluss haben, ob die möglichen Rückhaltprozesse auch zum Tragen kommen können.

Neben der grundsätzlichen mikrobiologischen Abbaubarkeit von Kontaminanten ist auch die so genannte Bioverfügbarkeit von Bedeutung: Da sich der mikrobiologische Abbau in der wässrigen Phase abspielt, muss die entsprechende Verbindung zunächst im Wasser gelöst

werden. Geringe Löslichkeiten bzw. auch starke Adsorption am Bodenmaterial können sich daher limitierend auf den tatsächlichen Abbau auswirken.

Im Gegensatz zu den mikrobiologischen Abbauprozessen handelt es sich bei der Sorption an das Bodenmaterial um einen nichtdestruktiven Prozess. Die Kontaminanten werden nur sorptiv an die Bodenmatrix gebunden und bleiben stofflich erhalten. Dieser Prozess ist reversibel, so dass die Möglichkeit besteht, dass insbesondere bei Änderung von physikalisch-chemischen Parametern des Grundwasserleiters die Kontaminanten wieder freigesetzt werden. Eine tatsächlich stationäre Schadstofffahne kann sich allein aufgrund von Sorptionsprozessen nicht ausbilden, da die Sorptionsfähigkeit des Bodenmaterials quantitativ begrenzt ist, wird sich die Schadstofffahne sukzessive in Richtung Abstrom in Bereiche mit noch freier Sorptionskapazität verlängern.

Die Geschwindigkeit der Verlagerung der Fahnen Spitze kann unter bestimmten Randbedingungen so gering sein, dass von „quasi-stationären“ Verhältnissen gesprochen werden kann. Die Verlängerung einer quasi-stationären Schadstofffahne kann unter Umständen sehr gering sein, z. B. 1 m und weniger pro Jahr, so dass es sich von einer tatsächlichen stationären Fahne kaum unterscheidet. Quasi-stationäre Fahnen können daher unter günstigen Voraussetzungen durchaus Gegenstand eines MNA-Konzepts sein. Fällungsreaktionen, wie sie z. B. bei gelösten Schwermetallen im Grundwasserleiter auftreten können, sind vergleichbar mit ihren Auswirkungen zu Sorptionsprozessen.

3.2 NA-Potential: Aromatische Kohlenwasserstoffe (BTEX), Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW)

Aromatische Kohlenwasserstoffe und Mineralölkohlenwasserstoffe sind aufgrund ihrer relativ guten mikrobiologischen Abbaubarkeit und sonstigen Stoffeigenschaften prädestiniert für MNA-Konzepte. Die geringe Sorptionsneigung mit der Bodenmatrix fördert einerseits durch die hohe Bioverfügbarkeit den mikrobiologischen Abbau, bewirkt andererseits jedoch keine merkliche Retardation der Schadstofffahne. Der mikrobiologische Abbau kann sowohl unter aeroben als auch anaeroben Verhältnissen stattfinden. Der anaerobe Abbau kann unter nitratreduzierenden, sulfatreduzierenden bis hin zu methanogenen Bedingungen stattfinden.

Die relativ hohe Wasserlöslichkeit dieser Stoffgruppen und das hieraus resultierende Konzentrationsniveau im Grundwasser führen bei Vorhandensein von mikrobiologischen Abbauprozessen zu einer deutlichen Beeinflussung der Grundwasserbeschaffenheit. So weist eine Reduktion des Nitrat- bzw. Sulfatgehalts im Grundwasser oder eine Veränderung des Redoxpotenzials bzw. des pH-Werts auf mikrobiologische Prozesse hin. Der Reaktionsraum bildet sich somit in der ungesättigten Zone ab und ist durch relativ wenig aufwändige Untersuchungen abzugrenzen. Die Entstehung von toxischen Metaboliten ist relativ unwahrscheinlich, da diese Schadstoffgruppe mikrobiologisch meist vollständig mineralisiert wird.

3.3 NA-Potential: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Die Stoffeigenschaften der PAK entsprechend der Definition der EPA variieren deutlich mit der Ringanzahl: Die Wasserlöslichkeit und die davon abhängige Bioverfügbarkeit nimmt mit zunehmender Ringanzahl ab. Ein vollständiger mikrobiologischer Abbau unter aeroben Bedingungen ist in der Regel nur bei den Zwei- und Drei-Ringen PAK zu beobachten. Bei den höher kondensierten PAK vollzieht sich der mikrobiologische Abbau meist sehr langsam und vielfach auch nur partiell. Die Sorptionsneigung der PAK nimmt bei zunehmender Ringanzahl zu. Die hochkondensierten PAK werden dadurch deutlich stärker retardiert. Bezüglich MNA-Konzepte hat dieses unterschiedliche Verhalten der PAK folgende Konsequenzen:

PAK mit bis zu vier Ringen können ähnlich wie Mineralölkohlenwasserstoffe stationäre Schadstofffahnen ausbilden. Überkondensierte PAK bilden aufgrund der starken Retardation, aber schlechten mikrobiologischen Abbaus, quasi stationäre Schadstofffahnen aus. Die bisherige Erfahrung zeigt, dass an der Fahnen Spitze in der Regel Phenanthren oder Anthracen auftreten. Höher kondensierte PAK können im Bereich der Fahnen Spitze in der Regel nicht beobachtet werden, da sie offensichtlich durch Sorptionsprozesse sehr effektiv zurückgehalten werden. Zu beachten ist, dass bei Gaswerksstandorten die Gruppe der PAK nur etwa 10-20% des Schadstoffinventars ausmachen. Heterocyclische aromatische Kohlenwasserstoffe als eine weitere wichtige Verbindungsgruppe können möglicherweise für MNA-Konzepte auch von Bedeutung sein.

3.4 NA-Potential: Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW)

LCKW werden als mikrobiologisch abbaubare Verbindungen eingestuft. MNA-Konzepte werden bei dieser Verbindungsgruppe jedoch nur in seltenen Fällen aussichtsreich sein, da die vollständige Mineralisation der für die Praxis relevanten 3- und 4-fach chlorierten LCKW unter unterschiedlichen Reaktionsbedingungen erfolgt: Perchlorethen wird unter anaeroben Verhältnissen zu Dichlorethen bzw. Vinylchlorid dechloriert. Ein weiterer mikrobiologischer Abbau ist unter anaeroben Bedingungen in der Praxis nicht möglich. Ein weiterer Abbau von Dichlorethen bzw. Vinylchlorid ist unter aeroben Bedingungen gut möglich und erfolgt bei Vinylchlorid relativ schnell.

Ein NA-Prozess kann nur dann zu einer vollständigen Mineralisierung führen, wenn im direkten Abstrom zunächst eine anaerobe Zone im Grundwasserleiter ausgebildet ist, in der Perchlorethen partiell dechloriert werden. Daran anschließen muss sich eine aerobe Zone, in der die vollständige Mineralisierung der Metaboliten erfolgen kann. Diese notwendige Voraussetzung wird man nur in seltenen Fällen in der Praxis antreffen.

In der Realität können zwei unterschiedliche Szenarios bei LCKW-Schadensfällen beobachtet werden:

- ***In aeroben Grundwasserleitern ist meist kein mikrobiologischer Abbau zu beobachten***
- ***In anaeroben Grundwasserleitern findet ein mikrobiologischer Abbau statt, der maximal bis zum Vinylchlorid voranschreitet.***

Bei beiden Szenarios bilden sich keine stationären Fahnen aus, d. h., MNA-Konzepte sind an den meisten LCKW-Standorten nicht realisierbar.

3.5 NA-Potential: Methyl-tertiär-Butylether (MTBE)

Die Auswirkungen von Schadensfällen bei Tanklagern oder Tankstellen waren in der Vergangenheit meist, was ihre Ausdehnung im Grundwasserleiter betrifft, begrenzt. Der Zusatz von MTBE in Superkraftstoffen hat die Brisanz solcher Schadensfälle deutlich erhöht. Während die Ausbreitung der herkömmlichen Superkraftstoffe selten 200 m übersteigen, konnten bei den bisher bekannten Schadensfällen mit MTBE erheblich längere Kontaminationsfahnen beobachtet werden.

Entsprechend der z. Z. vorliegenden Erfahrungen handelt es sich bei MTBE um eine relativ schwer mikrobiologisch abbaubare Substanz mit hoher Wasserlöslichkeit bzw. hoher Mobilität im Grundwasserleiter. Ein mikrobiologischer Abbau scheint auch nur im aeroben Milieu möglich. Solange im Grundwasserleiter andere Benzininhaltsstoffe vorhanden sind, ist - da diese in der Regel ein anaerobes Milieu erzeugen - kein Abbau möglich.

Erst nach Abschluss des mikrobiologischen Abbaus der Benzinphase ist durch Diffusions- und Dispersionsprozesse die Ausbildung eines aeroben Grundwasserleiters möglich. Da diese Prozesse quantitativ limitiert sind, ist mit langen MTBE-Fahnen zu rechnen.

Die Perspektive von MNA-Konzepten bei MTBE-Kontaminationen werden daher nach gegenwärtigem Kenntnisstand als wenig aussichtsreich eingeschätzt.

3.6 NA-Potential: Ammonium

Ammonium, das häufig im Abstrom von Altablagerungen zu beobachten ist, kann als mikrobiologisch gut abbaubar eingestuft werden. Trotzdem sind die in der Realität zu beobachtenden Schadstofffahnen mit 500 bis einigen 1000 Meter Länge deutlich länger als bei den vergleichsweise auch gut mikrobiologisch abbaubaren Mineralölkohlenwasserstoffen.

Während der mikrobiologische Abbau von Mineralölkohlenwasserstoffen Sauerstoff aus z. B. Nitratreduktionen nutzen kann, ist der Abbau von Ammonium nur in Gegenwart von physikalisch gelöstem Sauerstoff möglich. Der mikrobiologische Abbau kann daher nur in dem Maße fortschreiten, wie durch Dispersion und Diffusion Sauerstoff in den Bereich der Ammoniumfahne transportiert wird, d. h., der Abbau ist durch den Sauerstofftransport limitiert und gegenüber der Abbaukinetik stark verzögert.

Die Beurteilung des NA-Potenzials einer Ammoniumfahne beruht daher im Wesentlichen auf die Einschätzung bzw. Modellierung des Sauerstofftransports in den Fahnenbereich und innerhalb der Fahne. Der wesentliche Einflussparameter auf die Fahnenlänge ist in der vertikalen Mächtigkeit der Ammoniumfahne zu sehen, da der Sauerstofftransport bei zunehmender Mächtigkeit über größere Distanzen erfolgen muss. Die bisher durchgeführten Modellierungen weisen auf quadratische Abhängigkeit zwischen Fahnenmächtigkeit und Fahnenlänge hin, d. h., bei Verdoppelung der Mächtigkeit vervierfacht sich die Fahnenlänge.

Der mikrobiologische Abbau von Ammonium erreicht in der Regel keine vollständige Mineralisation, sondern als Endprodukt tritt Nitrat auf. Bei der Bewertung des Abbauprodukts Nitrat ist zu berücksichtigen, dass für das Ammonium zwei Quellen möglich sind: Die im direkten Abstrom festgestellte Ammoniumfracht kann von Emissionen aus dem Deponiebereich herrühren. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass ein Teil der Ammoniumfracht aus der Reduktion von Nitrat zum Ammonium herrührt. Dieser Vorgang erscheint plausibel, da sich im Sohlenbereich einer Deponie meist eine reduzierende Zone ausbildet, die die genannte Reaktion begünstigt. Ammonium, das durch diesen Prozess entsteht und im weiteren Abstrom wieder zu Nitrat oxidiert wird, trägt nicht zu einer tatsächlichen Erhöhung des Nitratgehalts bei.

3.7 Beeinflussung der NA-Prozesse durch Standortgegebenheiten

Neben der stoffspezifischen Eignung der am Altlastenstandort relevanten Kontaminationen wird die Realisierung eines MNA-Konzepts auch durch eine Reihe von Standortgegebenheiten wesentlich beeinflusst. Förderlich für eine Ausbildung einer reaktiven Zone im Untergrund sind möglichst stationäre Verhältnisse: Schwankende Fließrichtungen des Grundwassers oder stark schwankende Grundwasserstände, wobei die auch häufig mit Veränderungen der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers verbunden sind, stellen eine Störung des Reaktionsraums dar. Dies kann zu einer Reduzierung der Abbauraten führen oder im Einzelfall auch zum völligen Zusammenbruch der NA-Prozesse. Häufig sind damit auch starke Schwankungen des Emissionsverhaltens des Schadensherds verbunden, deren Auswirkungen ebenfalls negativ sein können.

Mikrobiologische Reaktionszonen erfordern für ihre Ausbildung bzw. Anpassung an geänderten Randbedingungen längere Zeiträume. Eine geänderte Fließrichtung der Schadstofffahne bedeutet, dass Kontaminationen in Bereiche vordringen, in denen bisher keine aktive Mikrobiologie vorzufinden war. Bis zum Aufbau einer adaptierten Mikrobiologie in dieser Zone wird keine ausreichende Frachtreduzierung durch NA-Prozesse zu beobachten sein. Ähnliche Auswirkungen sind auch bei intermittierenden Schadstoffaustragungen aus der Altlast möglich. Kluftgrundwasserleiter sind mit ihrem häufig stark instationärem Fließverhalten ebenfalls als problematisch einzustufen.

Standortgegebenheiten, die in o. g. Sinne keine für die Ausbildung einer stabilen Reaktionszone förderlichen Randbedingungen aufweisen, sind nicht von vornherein ungeeignet für ein MNA-Konzept. Gelingt an solchen Standorten der Nachweis einer quantitativen Frachtreduktion unter der Ausbildung einer stationären Schadstofffahne, müssen die damit verbundenen Unsicherheiten in die langfristige Prognose der Wirksamkeit der NA-Prozesse einfließen. Der

Umfang des Monitoring-Programms muss diese Unsicherheiten entsprechend berücksichtigen, was in der Praxis ein sowohl räumlich wie zeitlich verdichtetes Messprogramm bedeuten kann.

Störende Einflüsse infolge instationärer Strömungsverhältnisse im Grundwasserleiter sind für MNA-Konzepte, die im Wesentlichen auf Sorptionsprozesse beruhen, in der Regel weit weniger gravierend, wenn im gesamten Reaktionsraum die Sorptionseigenschaften des Untergrundmaterials nur wenig unterschiedlich sind.

Eine grundlegende Forderung an MNA-Konzepte ist der Nachweis einer stationären Schadstofffahne und ihrer dauerhaften Überwachung (Monitoring). Komplexe geologische bzw. hydrogeologische Standortgegebenheiten können den Nachweis, aber auch das Monitoring der NA-Prozesse erheblich erschweren und im Einzelfall auch gänzlich unmöglich machen. In Kluftgrundwasserleitern werden die Möglichkeiten von MNA-Konzepten z. Zt. als wenig aussichtsreich eingeschätzt, da der Nachweis der Abbauprozesse und ein Monitoring mit entsprechenden Sicherheiten kaum möglich erscheint, obwohl auch in diesen Grundwasserleitern unter Umständen effektive NA-Prozesse vorhanden sein können.

4. Elemente eines MNA-Konzepts

4.1 Grundsätzliche Anmerkungen

Ein MNA-Konzept beinhaltet eine Reihe von Arbeitsschritten und Planungsphasen, die im Rahmen der systematischen Altlastenbearbeitung durchgeführt werden. Ziel hierbei ist es, die NA-Prozesse zunächst zu identifizieren und dann ein plausibles konzeptionelles Modell hinsichtlich der chemisch-physikalisch und mikrobiologischen Vorgänge im Grundwasserleiter zu erarbeiten. Dieses Prozessverständnis ist notwendige Voraussetzung, um die Auswirkungen der NA-Prozesse im Grundwasserleiter zu modellieren. Ziel hierbei ist es eine Frachtreduktion im Grundwasserleiter abstromig der Altlast nachzuweisen. Die Ergebnisse sollen eine Prognose ermöglichen, dass die Schadstofffahne ein stationäres Verhalten aufweist und daher keine weitere Ausdehnung des Grundwasserschadens zu befürchten ist. Die Stationarität einer Schadstofffahne stellt das zentrale Kriterium für eine mögliche Akzeptanz eines MNA-Konzepts anstelle einer Sanierung dar. Mit einem Monitoring-Programm müssen die in den vorangehenden Arbeitsschritten ermittelten Ergebnisse dauerhaft überwacht werden, insbesondere ob sich die Schadstofffahne entsprechend der Prognose tatsächlich stationär verhält.

In der nachfolgenden Zusammenstellung (Abb.1) sind die Arbeitsschritte und Kriterien, die Voraussetzung für die Akzeptanz eines MNA-Konzepts sind, zusammengestellt. Der Aufwand und die Tiefe der einzelnen Arbeitsschritte muß an die Bedeutung bzw. Komplexität des Einzelfalls angepasst werden. Es sollte jedoch grundsätzlich auf kein Element der nachfolgenden Zusammenstellung verzichtet werden. Daran anschließend werden die einzelnen Elemente eines MNA-Konzepts im Detail beschrieben und die Vorgehensweise in der Praxis näher erläutert.

4.2 Identifikation von NA-Prozessen

Die NA-Prozesse müssen identifiziert werden, d. h., es muss geklärt werden, welche Prozesse wesentlich zur Schadstoffreduktion im Grundwasserleiter beitragen. Ziel ist es, ein umfassendes Prozessverständnis zu entwickeln, das sowohl unter chemisch-physikalischen bzw. mikrobiologischen Aspekten als plausibel erscheint. Ein solches konzeptionelles Modell ist Voraussetzung für die Planung und Durchführung des quantitativen Nachweises der NA-Prozesse. Eine Reihe von Erkundungsergebnissen und Standortauffälligkeiten weisen qualitativ auf das Vorhandensein von NA-Prozessen hin:

- Die Schadstoffausbreitung im Grundwasserleiter ist weitaus geringer als erwartet. Zu berücksichtigen hierbei ist, dass sich viele Kontaminanten (z.B. PAK) ein retardiertes Ausbreitungsverhalten zeigen.
- Es liegen Hinweise vor, dass die Ausbreitung der Schadstofffahne zum Stehen gekommen ist.
- Die Konzentrationsabnahme im Abstrom einer Schadstofffahne ist auffällig hoch und nicht alleine durch Verdünnungseffekt interpretierbar.
- Es werden in der Schadstofffahne Veränderungen von chemisch-physikalischen Parametern beobachtet, die auf mikrobiologischen Abbau hinweisen (z.B. die Reduktion der Konzentrationen von Sauerstoff, Nitrat und Sulfat oder Änderungen des Redoxpotenzials und pH-Werts).
- Hinweise auf mikrobiologische Aktivitäten im Bereich der Schadstofffahne durch entsprechende Laboruntersuchungen.

4.3 Quantifizierung der NA-Prozesse

Nach der Identifikation der NA-Prozesse muss mit der Quantifizierung der NA-Prozesse die tatsächliche Auswirkung auf den Grundwasserleiter näher bestimmt werden. Maß hierfür ist die Frachtreduktion der Kontaminanten im Fahnenverlauf. Zur Umsetzung der Quantifizierung stehen z. Zt. grundsätzlich zwei methodisch unterschiedliche Vorgehensweisen zu Verfügung:

- Die Schadstofffracht der Fahne wird in mehreren Kontrollebenen ermittelt. Die vorliegende Frachtreduktion in der Schadstofffahne wird aus den Differenzen der einzelnen Kontrollebenen ermittelt. Als Erkundungstechniken hierzu stehen die so genannten Immissionspumpversuche und die Isotopenfraktionierung zur Verfügung.
- Die Frachtreduktion wird mit Hilfe eines numerischen Modells prognostiziert. Das Modell muss in der Lage sein, die Strömungsverhältnisse, Transportvorgänge und die Reaktionskinetik der Abbauvorgänge darstellen zu können. Standortparameter wie z.B. hydraulische Durchlässigkeit, Sorptionskapazität und mikrobiologische Abbaukinetik müssen möglichst gut bekannt sein, um mit der Modellierung das reale Verhalten der Schadstofffahne möglichst genau nachbilden zu können.

Das Maß der Frachtreduktion in der Schadstofffahne ermöglicht Rückschlüsse auf die Fahnenlänge.

4.4 Stationarität der Schadstofffahne

Der Stationarität einer Schadstofffahne liegt die Vorstellung zu Grunde, dass der Austrag aus dem Schadensbereich und die Frachtreduktion in der Schadstofffahne durch Abbauprozesse quantitativ gleich, bzw. zum Gleichgewicht gekommen sind. Liegen diese Voraussetzungen vor, so vergrößert sich der Reaktionsraum nicht mehr, d. h. die Fahnenlänge ist konstant bzw. die Schadstofffahne verhält sich stationär. Die Stationarität lässt sich genau genommen aus der Quantifizierung der Abbauprozesse nicht unmittelbar ableiten, sondern stellt eine Interpretation der Ergebnisse dar. Der tatsächliche Nachweis einer stationären Schadstofffahne erfordert eine längere Beobachtungszeit, um diesen Sachverhalt tatsächlich nachzuweisen.

4.5 Langfristige Stabilität der NA-Prozesse

Die Quantifizierung der NA-Prozesse stellt nur eine Momentaufnahme der Standortverhältnisse dar. Eine Prognose ist daher erforderlich, die zeigt, dass die relevanten Prozesse langfristig stabil und nicht reversibel sind. Der Prognose liegt die Annahme zu Grunde, dass bei konstanten Reaktionsbedingungen innerhalb der Schadstofffahne unter der Voraussetzung gleich bleibender Schadstoffemissionen die frachtreduzierenden Prozesse keiner Änderung unterworfen sind. Die Reaktionsbedingungen werden durch Strömungsverhältnisse, Wasserinhaltsstoffe und chemisch-physikalische Parameter wesentlich beeinflusst.

4.6 Grundsätzliche Anforderungen an das Monitoringkonzept

Auch hohe Anforderungen an die Quantifizierung der NA-Prozesse und der Prognose ihrer langfristigen Stabilität können keine vollständige Sicherheit bieten. Eine dauerhafte Überwachung mit einem Monitoringprogramm ist daher unverzichtbarer Bestandteil eines jeden MNA-Konzepts.

Das Monitoring-Konzept ist so zu konzipieren, dass die Stationarität der Schadstofffahne, d. h. die Begrenzung des Grundwasserschadens überwacht werden kann und negative Entwicklungen zeitnah erkannt werden können. Bei der Konzeption des Monitoring-Konzepts sollten die nachfolgend aufgeführten Zielrichtungen berücksichtigt werden:

- Die Stationarität der Schadstofffahne wird durch geeignete Grundwassermessstellen im Bereich der Fahnen Spitze überwacht. Eine Zunahme der Konzentration der Kontaminanten in diesem Bereich deutet auf eine Wanderung der Fahnen Spitze hin.

- Änderungen der Reaktionsbedingungen, wie z. B. Strömungsverhältnisse, Wasserinhaltsstoffe und chemisch-physikalische Parameter können die Abbaurate beeinflussen und unter ungünstigen Bedingungen die Stationarität der Schadstofffahne negativ beeinflussen. Auffällige Überwachungsergebnisse stellen daher ein erstes Alarmzeichen dar, dass die Voraussetzungen des MNA-Konzepts nicht mehr gegeben ist. Eine mögliche Reaktion darauf kann in der Intensivierung der Überwachungsmaßnahmen bestehen (Abb.4).
- Die Länge bzw. Stationarität der Schadstofffahne ist auch abhängig von der Quellstärke der Kontaminanten im Schadensbereich.

Die Zeitintervalle der Überwachungsmaßnahmen sollten zu Beginn des Monitoring-Programmes relativ eng gewählt werden (z.B. vierteljährig). Ergeben sich innerhalb des Überwachungsprogramms keine Auffälligkeiten, so können die Intervalle deutlich vergrößert werden und möglicherweise die Anzahl der Überwachungsparameter bzw. der Messstellen reduziert werden. Eine völlige Aufgabe des Monitorings ist mangels Langzeiterfahrung mit MNA-Konzepten aus derzeitiger Sicht nicht möglich.

Ergeben sich aus dem Monitoring-Programm Hinweise, dass die Annahmen, die zur Akzeptanz eines MNA-Konzepts geführt haben, nicht zutreffend sind, bedarf es einer grundsätzlichen Überprüfung der bisherigen Vorgehensweise am Standort. Falls diese Überprüfung negativ für das MNA-Konzept ausfällt, ist am Standort eine aktive Sanierungsmaßnahme durchzuführen. Um dies sicherzustellen, muss eine alternative Handlungsoption bei zukünftigen Nutzungen der Altlastenfläche berücksichtigt werden (Abb.5).

Entscheidungskriterien

Die NA-Prozesse müssen identifiziert werden, d.h. es muss geklärt werden, welche Prozesse wesentlich zur Schadstoffreduktion im Grundwasserleiter beitragen.

Die NA-Prozesse müssen quantifiziert werden, d.h. eine Frachtreduktion der Schadstoffe im Verlauf der Fahne muss nachgewiesen werden. Die Ergebnisse sind in der Regel mit einer numerischen Modellierung der Strömungs- und Transportprozesse zu überprüfen. Wesentliche Zielrichtung dieser Untersuchungen ist der Nachweis der räumlich begrenzten Ausbreitung der Schadstoffe im Grundwasserleiter, d.h. die Schadstofffahne verhält sich stationär.

Die Stationarität der Schadstofffahne ist wesentliche Voraussetzung für die Akzeptanz von NA-Prozessen als Alternative zu einer Sanierungsmaßnahme.

Eine Prognose ist erforderlich, dass die Prozesse langfristig stabil und nicht reversibel sind.

Mit einem Monitoringkonzept (MNA) sind die NA-Prozesse dauerhaft zu überwachen.

Es ist eine alternative Handlungsoption (in der Regel Sanierungsmaßnahme) vorzusehen, falls die NA-Prozesse am Standort nicht mehr im erforderlichen Umfang zu beobachten sind. Die alternative Handlungsoption muss bei zukünftigen Nutzungen der Altlastenfläche berücksichtigt werden.

Die Voraussetzung für die Akzeptanz eines NA-Konzepts ist neben den fachlichen Anforderungen die Unverhältnismäßigkeit einer Sanierungsmaßnahme. Die Prüfung dieses Sachverhaltes ist von rechtlicher Natur. In diesem Zusammenhang können Teilsanierungen durchaus verhältnismäßig sein.

Die grundsätzliche Sanierungsnotwendigkeit wird durch die Akzeptanz eines NA-Konzepts nicht in Frage gestellt, sondern es handelt sich hierbei nur um die Duldung eines räumlich begrenzten Grundwasserschadens.

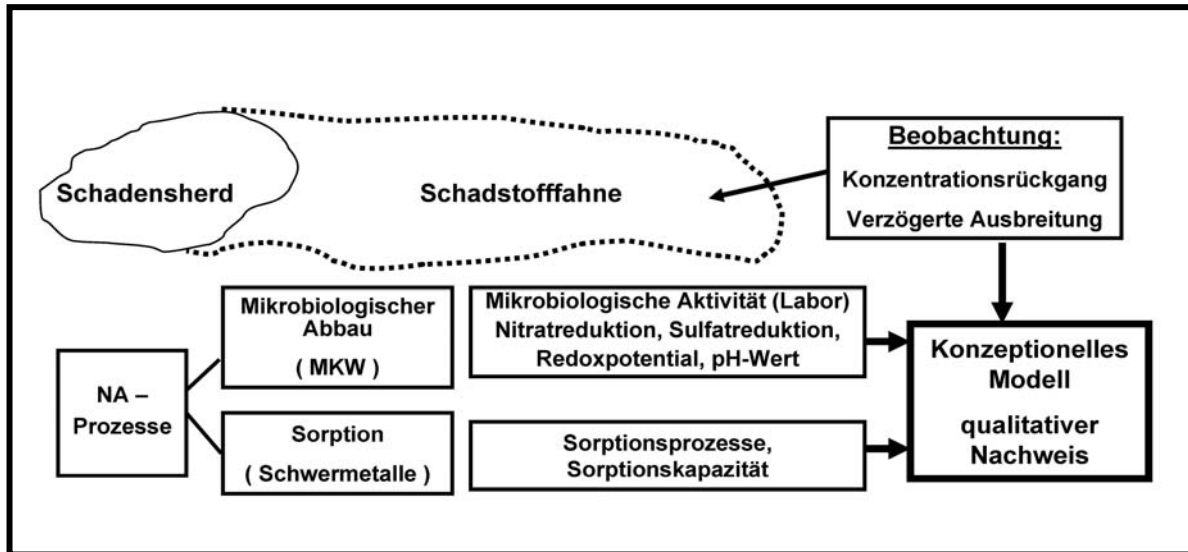


Abb. 2: Identifizierung der NA-Prozesse

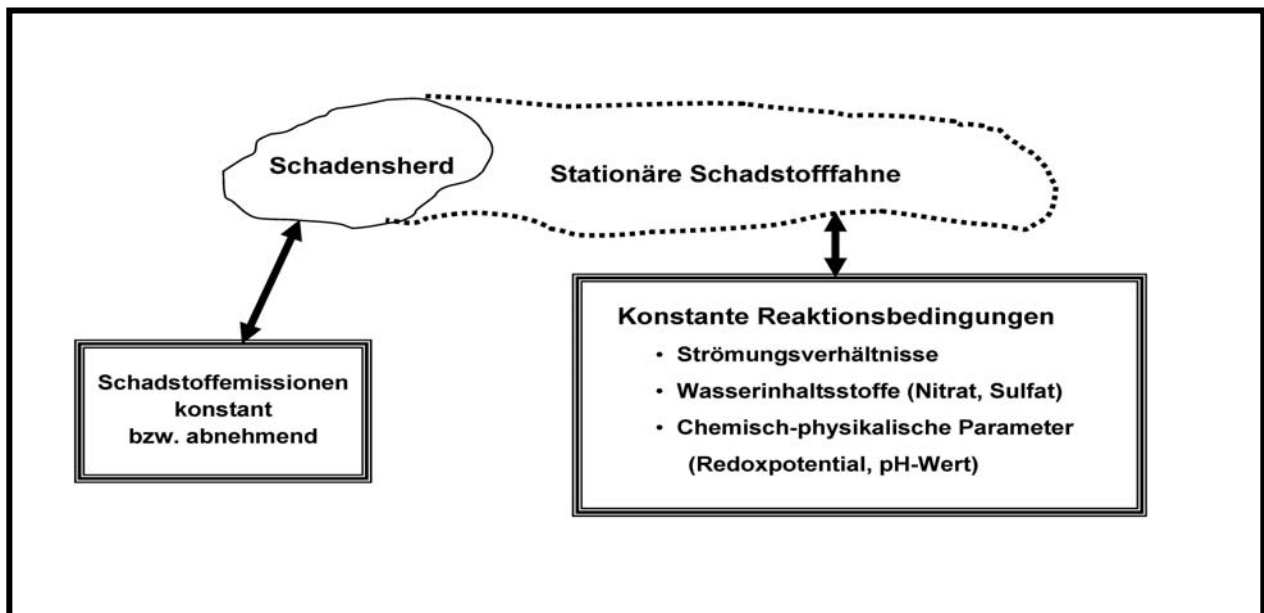


Abb. 3: Prognose der langfristigen Stabilität der Prozesse

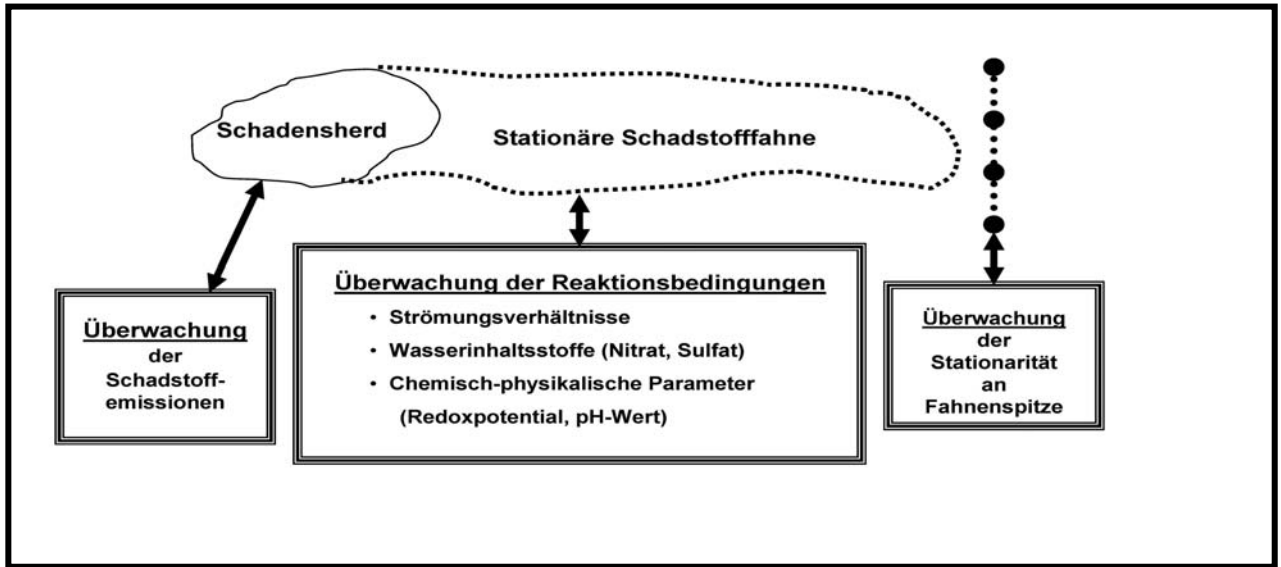


Abb. 4: Monitoringkonzept (MNA) zur dauerhaften Überwachung der NA-Prozesse

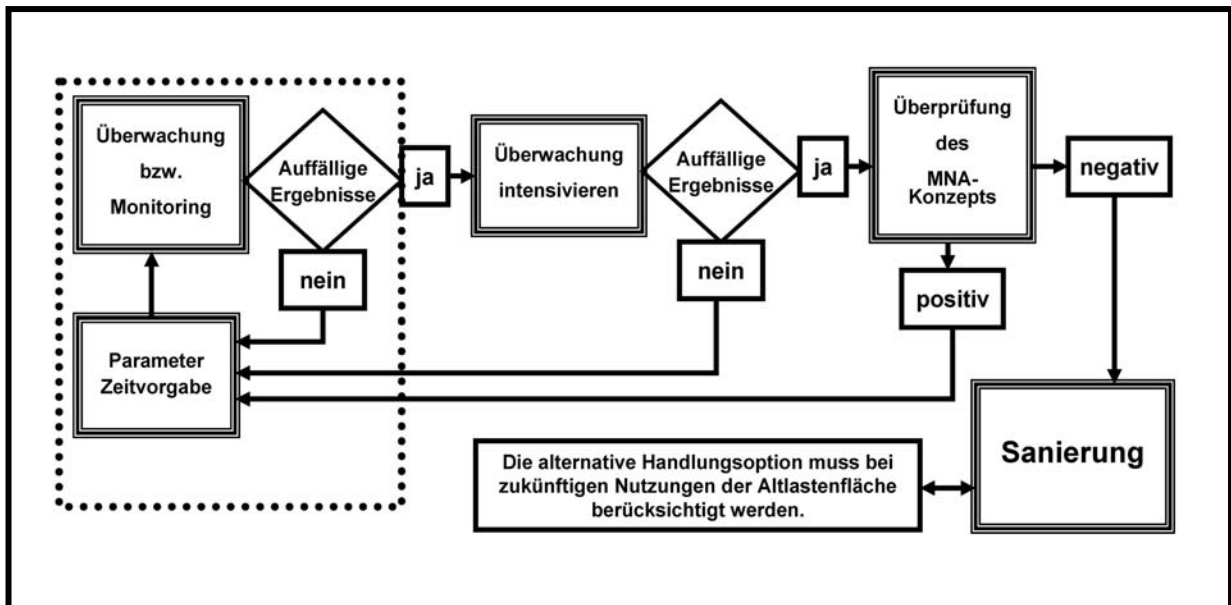


Abb. 5: Alternative Handlungsoption bei unzureichender Wirkung der NA-Prozesse am Standort

5. Einordnung von MNA-Konzepten in die systematische Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg

5.1 Grundsätzliches

In Baden-Württemberg ist bei der Erkundung und Sanierung von Altlasten ein stufenweises Vorgehen eingeführt. Für jede Untersuchungsstufe sind Anforderungen definiert, die für die Erreichung des entsprechenden Beweisniveaus notwendig ist. Das MNA-Konzept als Alternative zu einer Sanierungsmaßnahme fand bisher in dieser Systematik noch keine Berücksichtigung. Nachfolgend wird aufgezeigt, welchen Beitrag die einzelnen Untersuchungsstufen für die Erarbeitung eines MNA-Konzepts leisten können.

5.2 Orientierende Untersuchung, Detailuntersuchung

Diese Untersuchungsstufen zielen darauf ab, den Schadensherd und die Emissionen einer Altlast näher zu erkunden. Da eine systematische Fahnen erkundung in diesem Zusammenhang in der Regel nicht durchgeführt wird, können diese Erkundungsstufen nur Hinweise auf mögliche NA-Prozesse beisteuern (siehe Abb.6); So deutet eine Reduktion von Nitrat im Grundwasserleiter auf mikrobiologische Abbaureaktionen hin, ebenso bestimmte Redoxpotentiale, die relativ einfach gemessen werden können. Andererseits können, wenn die Erkundungen auf ungünstige geologische bzw. hydrogeologische Randbedingungen für MNA-Konzepte, wie z. B. durch Kluftgrundwasserleiter, hinweisen, die Perspektiven für solche Konzepte zu diesem Zeitpunkt schon deutlich reduzieren.

5.3 Sanierungsuntersuchung

Im Rahmen der Sanierungsuntersuchung wird ermittelt, ob für die Altlast Sanierungsbedarf besteht und welche Sanierungsvarianten unter Berücksichtigung der Kosten geeignet sind. Es scheint daher sinnvoll, die speziellen NA-Untersuchungen im Rahmen der Sanierungsuntersuchung durchzuführen, da diese eine mögliche Alternative zu einer aktiven Sanierungsmaßnahme darstellen. Da die Erarbeitung eines MNA-Konzepts mit erheblichen Kosten verbunden ist, sollte sichergestellt sein, dass für den betreffenden Standort eine Sanierungsnotwendigkeit vorliegt. Der Entscheidungsprozess, der auf die Akzeptanz eines MNA-Konzepts hinführt, gliedert sich in zwei Stufen:

1. Die Bewertungskommission unterzieht die Sanierungsuntersuchung und die darin enthaltenen NA-Untersuchungen einer fachlichen Prüfung. Bei einer vorliegenden Sanierungsnotwendigkeit wird sie eine Sanierungsvariante empfehlen. Die NA-Untersuchungen werden einer fachlichen Prüfung unterzogen, insbesondere die Stationarität der Schadstofffahne muss als gesichert gelten.
2. Die Voraussetzung für die Akzeptanz eines NA-Konzepts ist neben den fachlichen Anforderungen die Unverhältnismäßigkeit einer Sanierungsmaßnahme. Die Prüfung dieses Sachverhalts ist von rechtlicher Natur und daher von der unteren Verwaltungs-

behörde vorzunehmen. Die grundsätzliche Sanierungsnotwendigkeit wird durch die Akzeptanz eines MNA-Konzepts nicht in Frage gestellt, sondern es handelt sich hierbei um die Duldung eines räumlich begrenzten Grundwasserschadens.

5.4 Weitere Aspekte

Zeitvorgaben für ein MNA-Konzept sind wenig sinnvoll, da die Lebensdauer einer Schadstofffahne vom Emissionsverhalten des Schadensherds abhängt. Es liegen Abschätzungen vor, dass eine PAK-Kontamination in der Größenordnung von 1.000 Jahren in den Grundwasserleiter emittieren kann. Eine Vorgabe, dass nach 20 Jahren die Durchführung eines MNA-Konzepts keine Emissionen aus der Altlast mehr vorhanden sein dürfen, ist daher unrealistisch und würde ein K.O.-Kriterium für diese Entscheidungsoption bedeuten. Ebenfalls ist die Vorgabe von maximalen Fahnenlängen wenig hilfreich, da die Vorgabe „Stationarität“ die Fahnenlänge zwangsläufig begrenzt. In der praktischen Fallbearbeitung ist es jedoch durchaus vorstellbar, dass die akzeptablen Fahnenlängen durch äußere Randbedingungen wie z. B. Grundstücksgrenzen einer Limitierung unterzogen sein können.

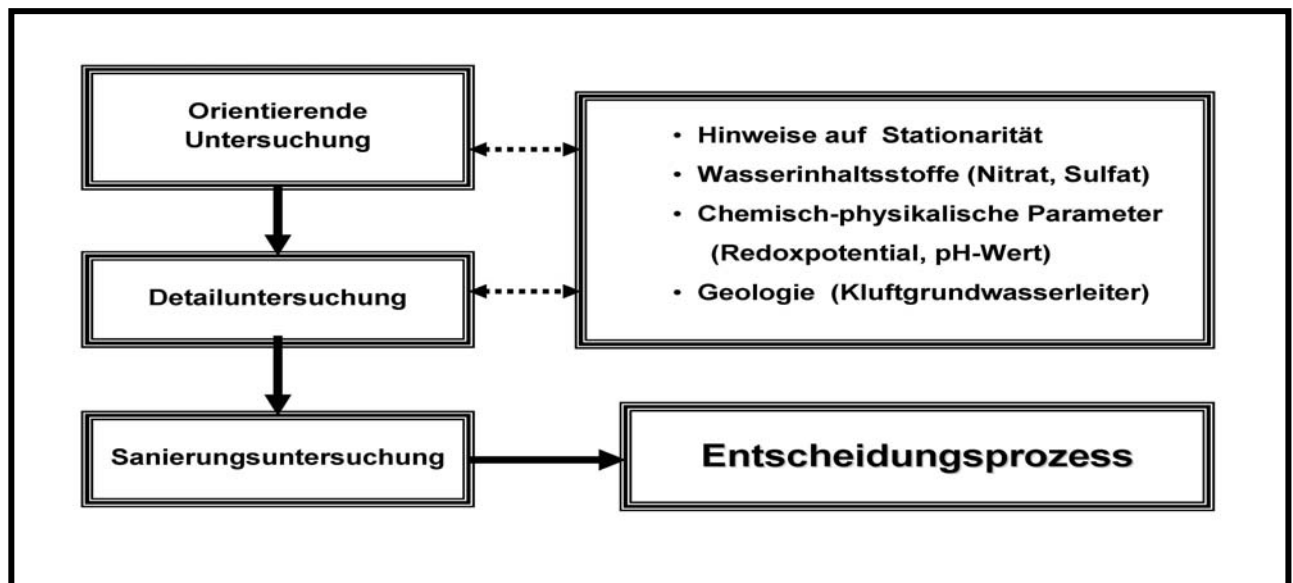


Abb. 6: Einordnung von MNA Konzepten in die systematischen Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg

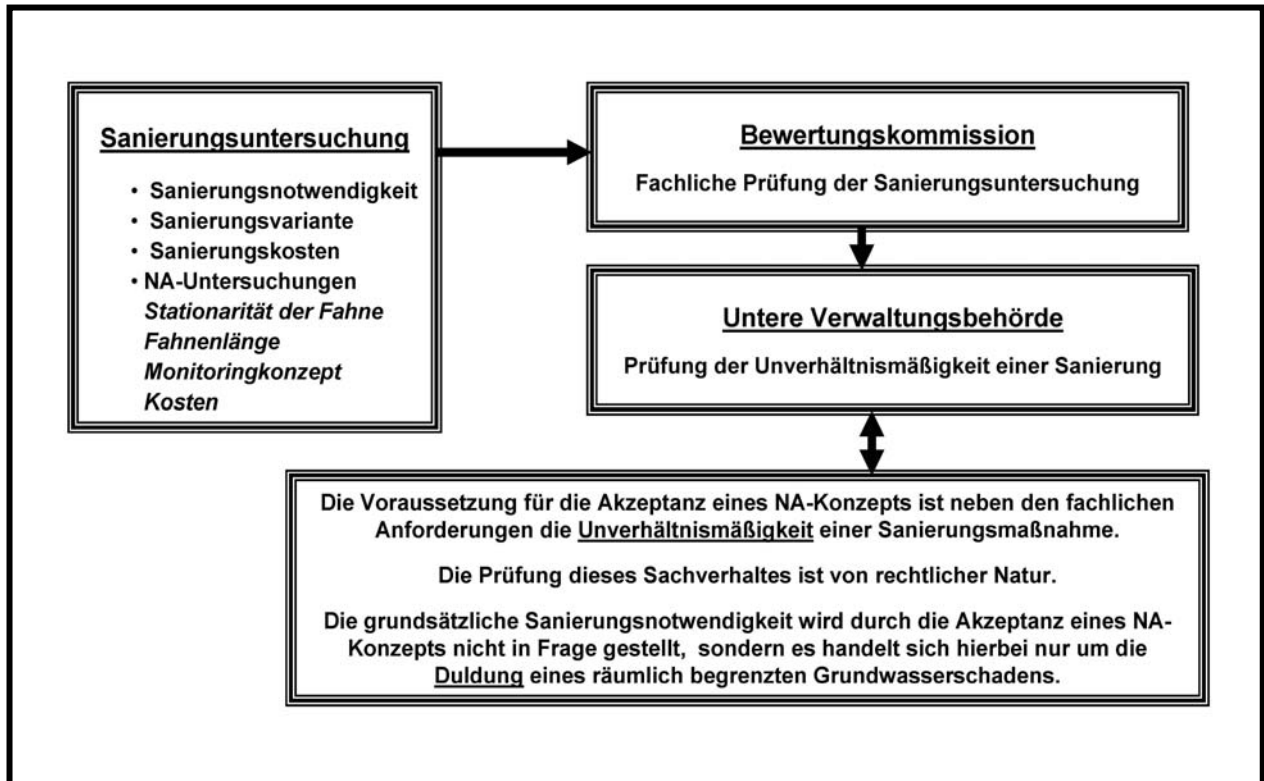


Abb. 7: Einordnung von MNA Konzepten in die systematischen Altlastenbearbeitung in Baden-Württemberg

6. Ausblick

Die Diskussion im Zusammenhang mit NA war und ist sowohl durch Hoffnungen, als auch durch Ängste geprägt. Die Hoffnung, dass man im Einzelfall auf eine aufwendige und daher kostenintensive Sanierung verzichten kann, ist durchaus berechtigt. Die Befürchtung, dass die Altanierung völlig zum Erliegen käme, ist eher unbegründet. An vielen Standorten werden die notwendigen Randbedingungen für die Akzeptanz eines MNA-Konzepts nicht erfüllbar sein. Bei den zahlreichen LCKW-Kontaminationen im Land wird ein MNA-Konzept die große Ausnahme bilden. Ebenso werden bei vielen geologischen Formationen, wie z. B. Kluftgrundwasserleiter, solche Konzepte nur eingeschränkte Bedeutung haben, da die geforderten Nachweise an diesen Standorten nur schwer zu erbringen sind. Eine Sanierung bietet auch größere Sicherheit, da ein MNA-Konzept keine 100-prozentige Sicherheit bieten kann und beim Auftreten von größeren Problemen die Sanierung zu einem späteren und unkalkulierbaren Zeitpunkt erforderlich werden kann. MNA-Konzepte werden daher nur zu einem kleineren Teil der Altlasten mit Sanierungsnotwendigkeit als Lösung beitragen können.