



# Wo ist die Ökologie in der Bewertung unserer Grundwässer ?

**Christian Griebler**

Institut für Grundwasserökologie  
Helmholtz Zentrum München

**Hans Jürgen Hahn**

AG Grundwasserökologie  
Universität Koblenz-Landau

# Kurze Historie

- April 2005 – Treffen Landau – „Grundwasser – Lebensraum, Ressource und Schutzgut“
- Januar 2006 - UBA in Dessau - orientierendes Fachgespräch zum Thema „Grenzen und Möglichkeiten der biologischen Bewertung von Grundwasserökosystemen“
- UBA UFO - Plan 2006 Projektausschreibung

# Forderungen und Bemühungen nach Berücksichtigung ökologischer Aspekte für Grundwassermanagement ... ... gibt's schon länger

- **1990/1994** Ecological indicators of GW quality - US-EPA Program for protection of groundwater ecosystems (Job & Simons)

„*Research priority: „Development of a monitoring strategy for GW“*“

- **1994** Ecological risk assessment for soil & GW pollution (Notenboom - EEA)
- **1996** Use of GW fauna as indicators (Malard et al. – Univ Lyon)
- **1999** Faunistisches Grundwassermonitoring - Was kann es leisten? (Hahn & Friedrich)
- **2001** GW Organisms as Bioindicators (Mösslacher, Griebler, Notenboom)
- **2004** Need of GW Quality Guidelines for pesticides using SSD Approach – Ecotox-Thresholds (Hose & Grant)
- **2004** Incorporating ecological perspectives in European groundwater management policy (Danielopol et al.)
- **2006** Grundwasser-Fauna-Index (Hahn 2006)
- **2006** Biozönosen im Grundwasser – Grundlagen und Methoden der Charakterisierung von mikrobiellen Gemeinschaften (Bundesamt für Umwelt, Bern, Hunkeler et al.)
- **2006** Groundwater – strategies of groundwater protection under the European legislative framework in Germany (European Groundwater Conference, Keppner BMU)

- **2009** Zwei Sonderbände *Freshwater Biology* und *Hydrogeology Journal*

# Grundwasserökologie und -organismen in Gesetzen und Richtlinien

**1998** Schweizer Gewässerschutzverordnung

Die Biozönose unterirdischer Gewässer soll

1. naturnah und standortgerecht sein
2. typisch sein für nicht oder nur schwach belastete Gewässer

**Bisher sind keine Kriterien verfügbar**

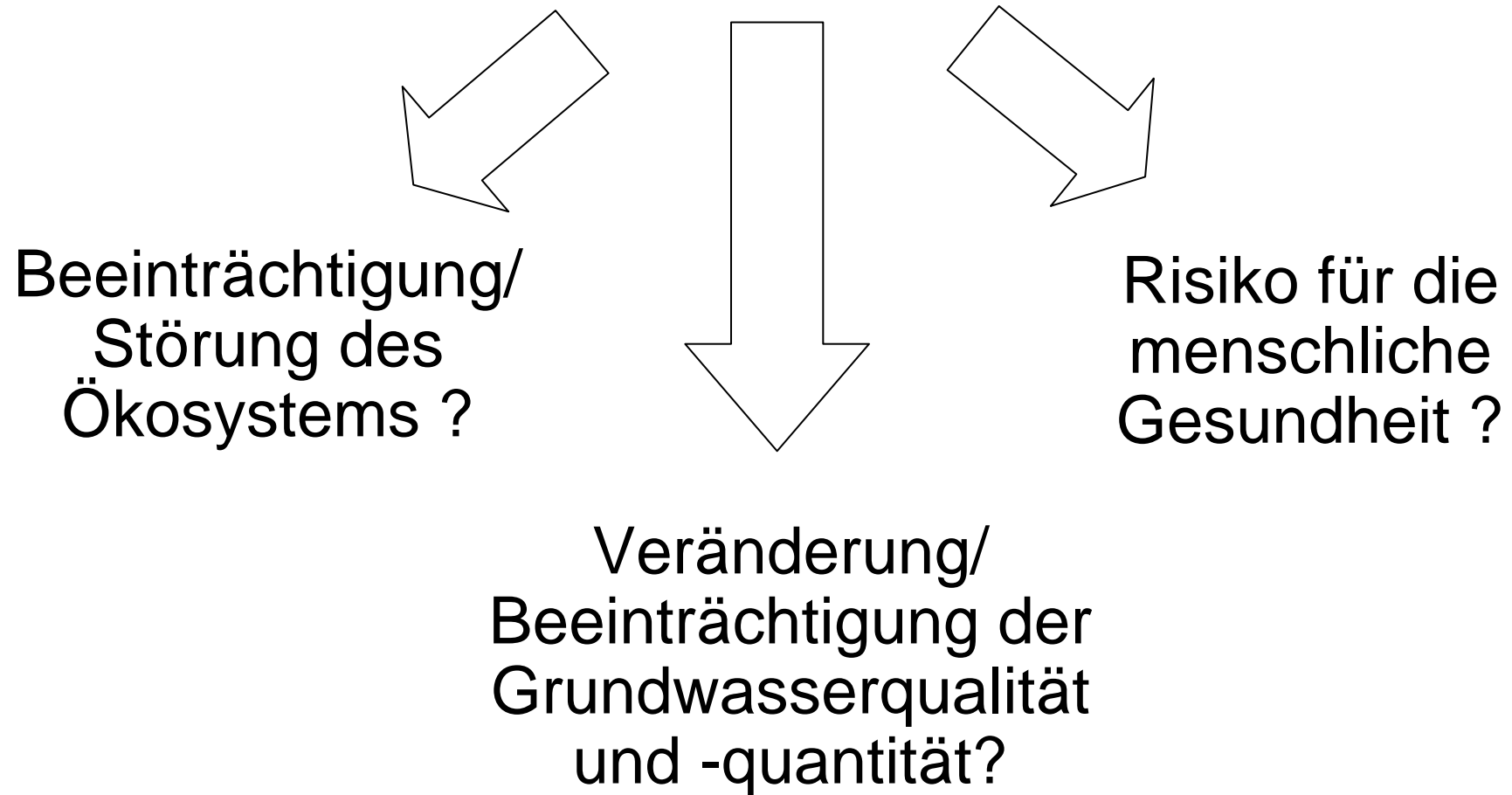
**2003** Western Australian Guidance for the assessment of environmental factors –

“Consideration of subterranean fauna in groundwater and caves during environmental impact assessment”

**2006/2007** EU-GW Richtlinie - “Forschung soll durchgeführt werden um in Zukunft bessere Kriterien zur Hand zu haben den guten Zustand der Grundwasserökosysteme zu sichern “

**2010/11** Grundwasserverordnung – Begründungen: „Gleichzeitig und gleichrangig werden die aquatischen Lebensräume geschützt ... und dass auch im GW eine eigene Biodiversität besteht, die des Schutzes bedarf.“

# Was wollen wir bewerten ?



# Ökologische Bewertung ! Was wollen wir bewerten ?

Wasserqualität (water quality) ?

Ökologischer Zustand (ecological status) ?

Ökosystemgesundheit (ecosystem health) ?

Ökosystemdienstleistungen und -funktionen (ecosystem services) ?

Ökosystemintegrität

= Ganzheitlichkeit

= Gesamtheit

= Intaktheit

Ökosystemzustand

Ökosystembedingungen

Ökosystemtrend

# Die ökologische Integrität (Intaktheit)

**Die biologische Integrität** ist die Fähigkeit eines Ökosystems eine ausgeglichene, angepasste Organismengemeinschaft zu ermöglichen und dauerhaft zu erhalten mit einer Artenzusammensetzung, Vielfalt und funktionellen Organisation wie sie in vergleichbaren natürlichen Lebensräumen derselben Region vorkommen ... die Summe der chemischen, physikalischen und biologischen Intaktheit ergibt die **ökologische Integrität** (Karr & Dudley, 1981).

- beinhaltet Nachhaltigkeit, Stabilität und Resilienz
- Ein ökologisch intaktes (gesundes) Ökosystem stellt wichtige Dienstleistungen zur Verfügung (... und ist zudem störungsresistent und hat ein großes Erholungspotential ???)

# Ökosystemgesundheit

**Ökosystemgesundheit** kann ähnlich der menschlichen Gesundheit begriffen werden. Ähnlich einem gesunden Menschen ist ein gesundes Ökosystem frei von Stress und Krankheiten mit Systemkomponenten (Organen) die planmäßig und zuverlässig funktionieren (Karr, 1999; Korbel & Hose, 2010).

➤ in den folgenden Abschnitten werden die Begriffe **Ökosystemintegrität**, **ökologischer Zustand** und **Ökosystemgesundheit** synonym verwendet.



# Brauchen wir ein ökologisches Bewertungssystem ?

## Vorteile

- Physikalisch-chemische Analysen beschreiben einen Momentanzustand zum Zeitpunkt der Untersuchung und umfassen eine nur beschränkte Anzahl von Parametern
- Biologische Messgrößen bilden ein zeitintegriertes Zustandsbild ab und können somit auch Belastungen durch nicht detailliert erfaßte Einflussgrößen ('neue Problemstoffe') anzeigen.
- Vorhandene Belastungen und Einflüsse können besser kategorisiert werden – Auswirkungen auf die Ökosystemfunktionen.

# Brauchen wir ein ökologisches Bewertungssystem ?

## Nachteile

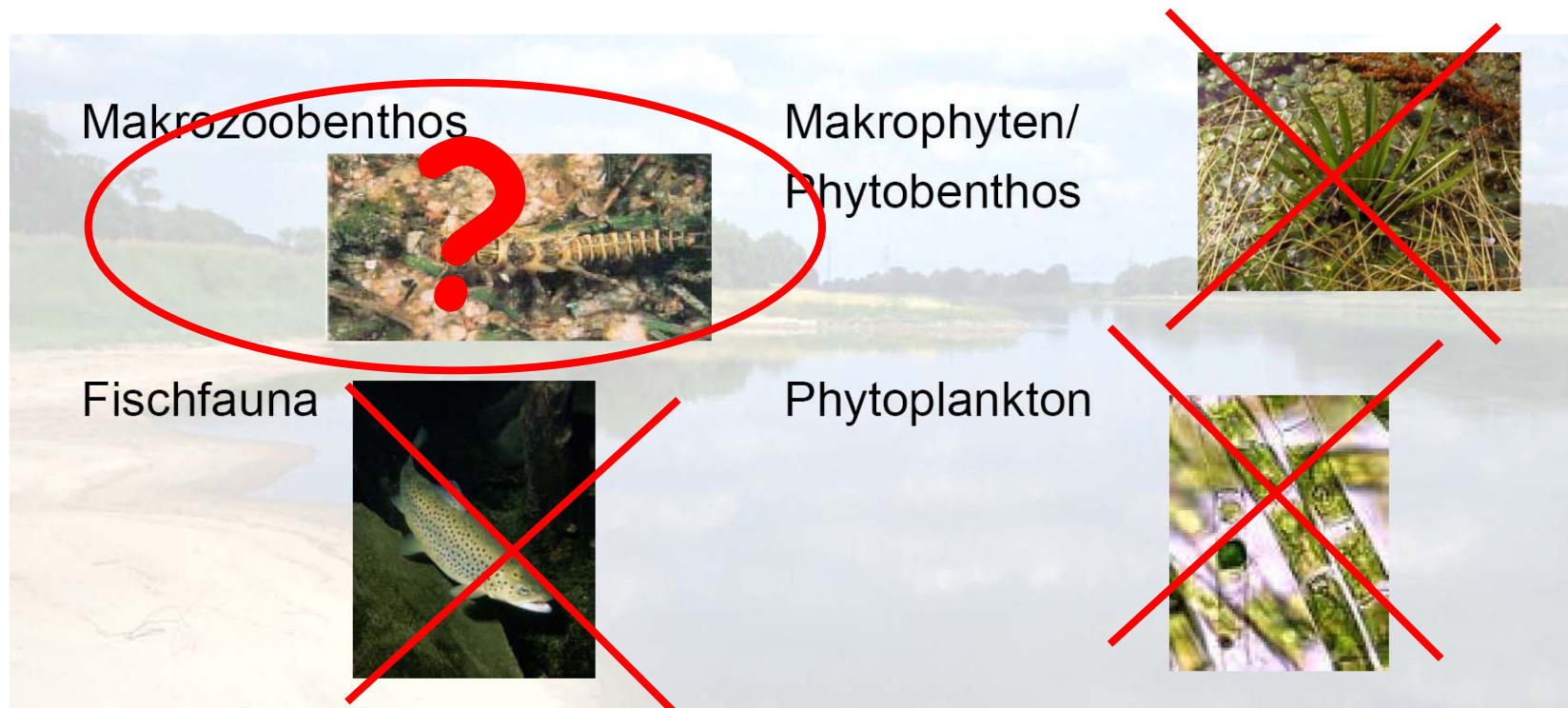
- Physikalisch-chemische Analysen sind standardisiert während es für biologische Kriterien noch kaum Routineprotokolle gibt.
- Wir wissen noch vergleichsweise wenig über die Verbreitung, Sensitivität und Ökologie von Grundwasserorganismen
- Zusätzliche Parameter verursachen Mehrkosten

Es bedarf ökologischer Kriterien um Ökosysteme zu bewerten !

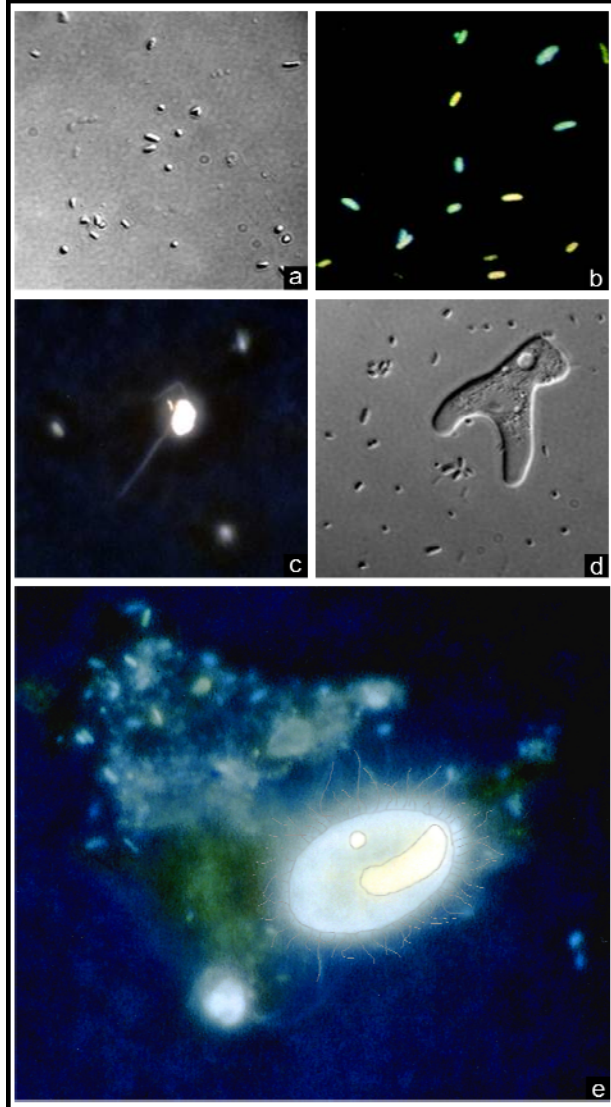
# Biologische Kriterien sind Routine bei der Bewertung von Oberflächengewässern

aufgenommen in die EU Wasserrahmenrichtlinie

Berücksichtigte Organismengruppen:



# Biozönosen in Grundwasserökosystemen



## Die mikrobiellen Gemeinschaften

(a, b) Bakterien,

(c) Heterotrophe Nanoflagellaten (HNF),

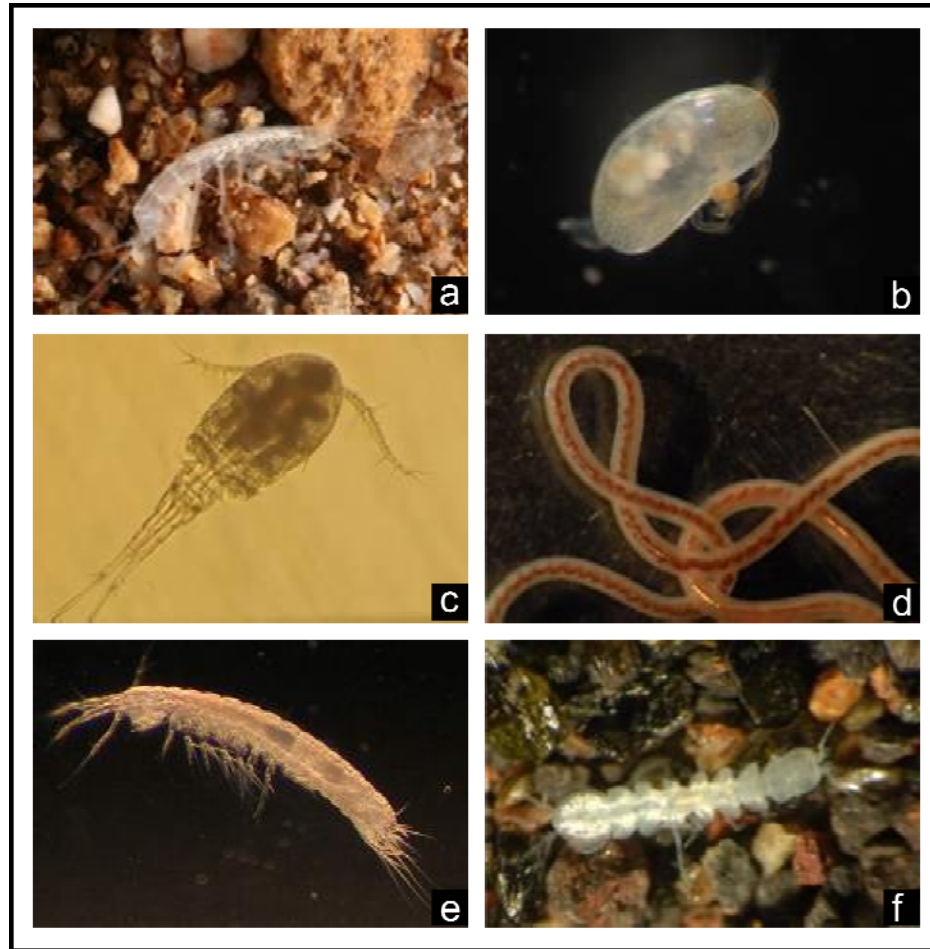
(d) Amöben,

(e) (peritricher) Ciliat der an aggregierten Bakterien frisst

(a, d = Phasenkontrastaufnahmen,

c, b, e = Epifluoreszenzaufnahmen)

# Biozönoesen in Grundwasserökosystemen



## Grundwasserfauna

- (a) *Niphargus aquilex* (Amphipode, 1 cm),
- (b) *Mixtacandona laisi* (Ostracode, 0,7 mm),
- (c) Cyclopoida (Copepode, ca. 0,7 mm),
- (d) Oligochaet (ca. 5 cm),
- (e) *Bathynella* sp (Syncaridae, 1 mm),
- (f) *Proasellus cavaticus* (Isopode, 3,7 mm)

(Fotos: A. Fuchs und H.J. Hahn, Grabow, M. Haggemüller).

# Notwendige Schritte zu einem ökologischen Bewertungssystem

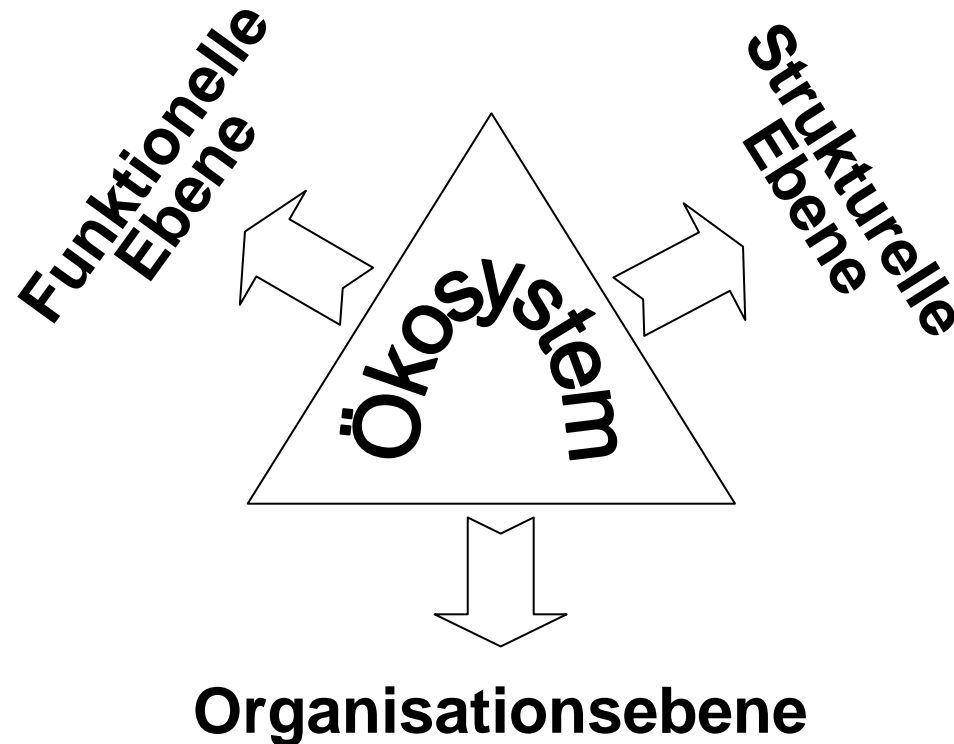
1. Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)
2. Inventur an ausgewählten Untersuchungsstandorten
3. Suche nach einer ökologisch sinnvollen Untergliederung von Grundwassersystemen
4. Definition von Referenzzuständen (natürliche Hintergrundwerte)
5. Identifizierung von (Bio)Indikatoren
6. Bewertungsschema **ökologischer Zustand** („ecosystem status or health“) von Grundwassersystemen

# Notwendige Schritte zu einem ökologischen Bewertungssystem

1. Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)
2. Inventur an ausgewählten Untersuchungsstandorten
3. Suche nach einer ökologisch sinnvollen Untergliederung von Grundwassersystemen
4. Definition von Referenzzuständen (natürliche Hintergrundwerte)
5. Identifizierung von (Bio)Indikatoren
6. Bewertungsschema **ökologischer Zustand** („ecosystem status or health“) von Grundwassersystemen

# Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)

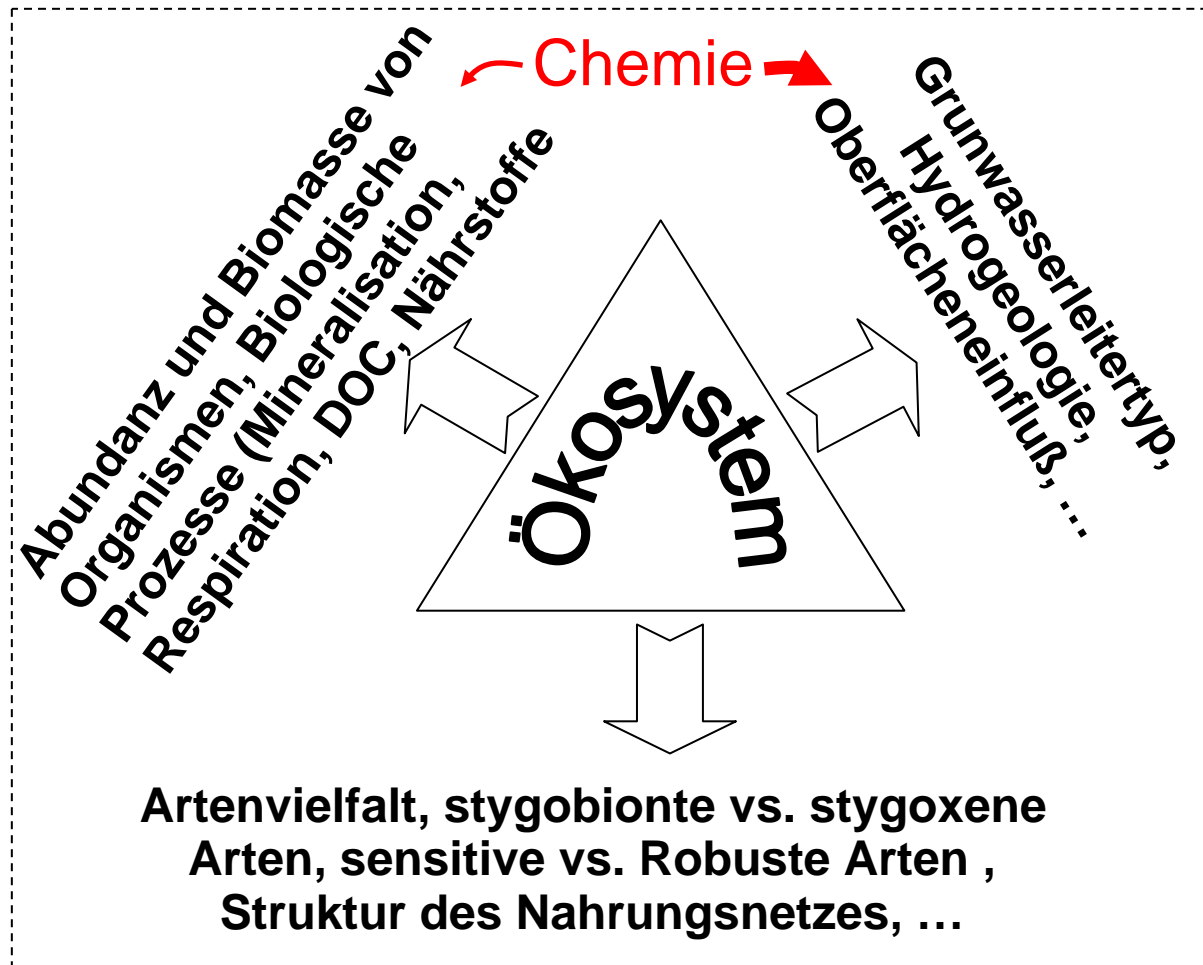
Ökosysteme setzen sich aus verschiedenen Komponenten bzw. Ebenen zusammen





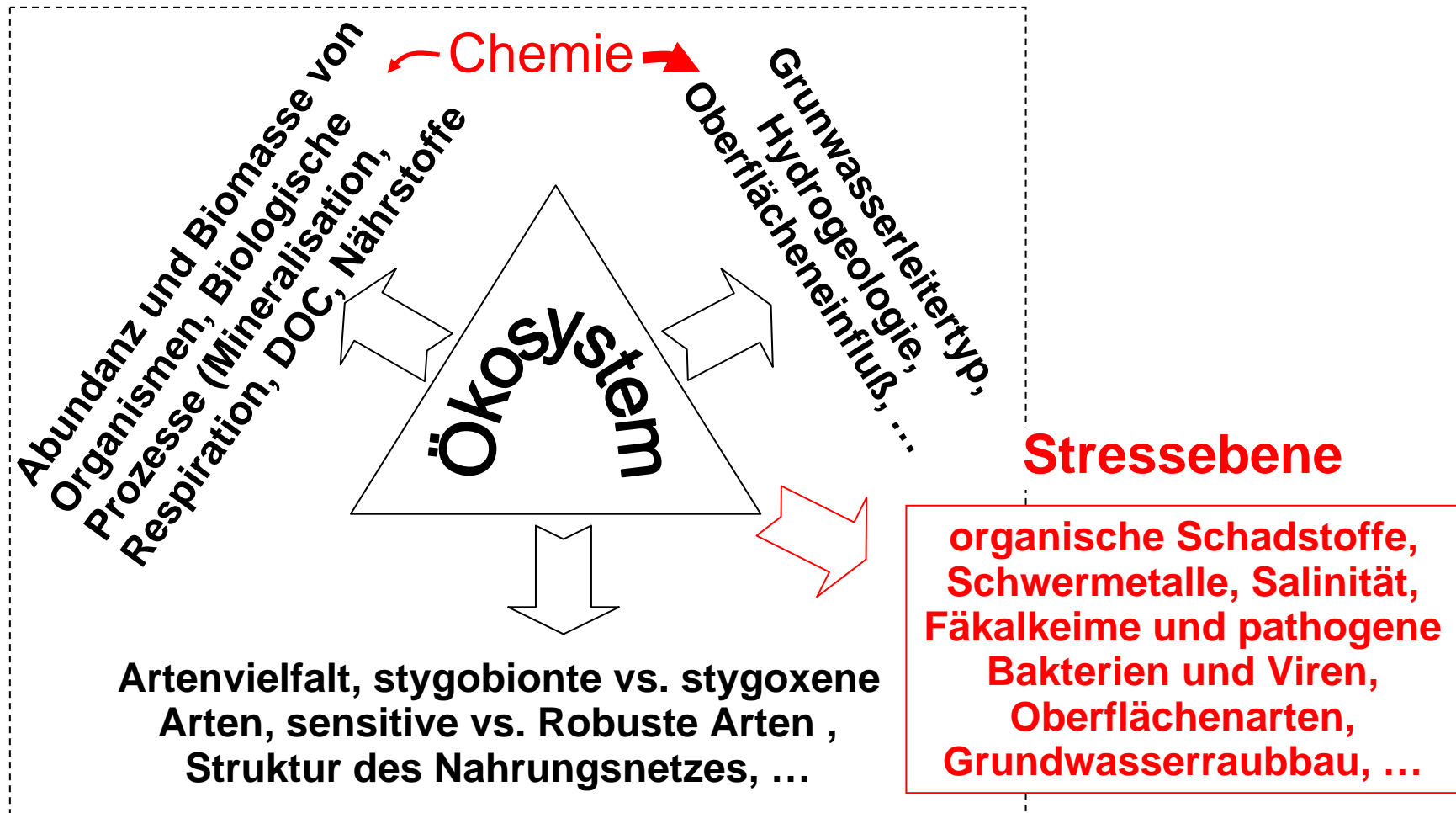
# Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)

Bewertungskriterien müssen alle Ebenen berücksichtigen und erfassen



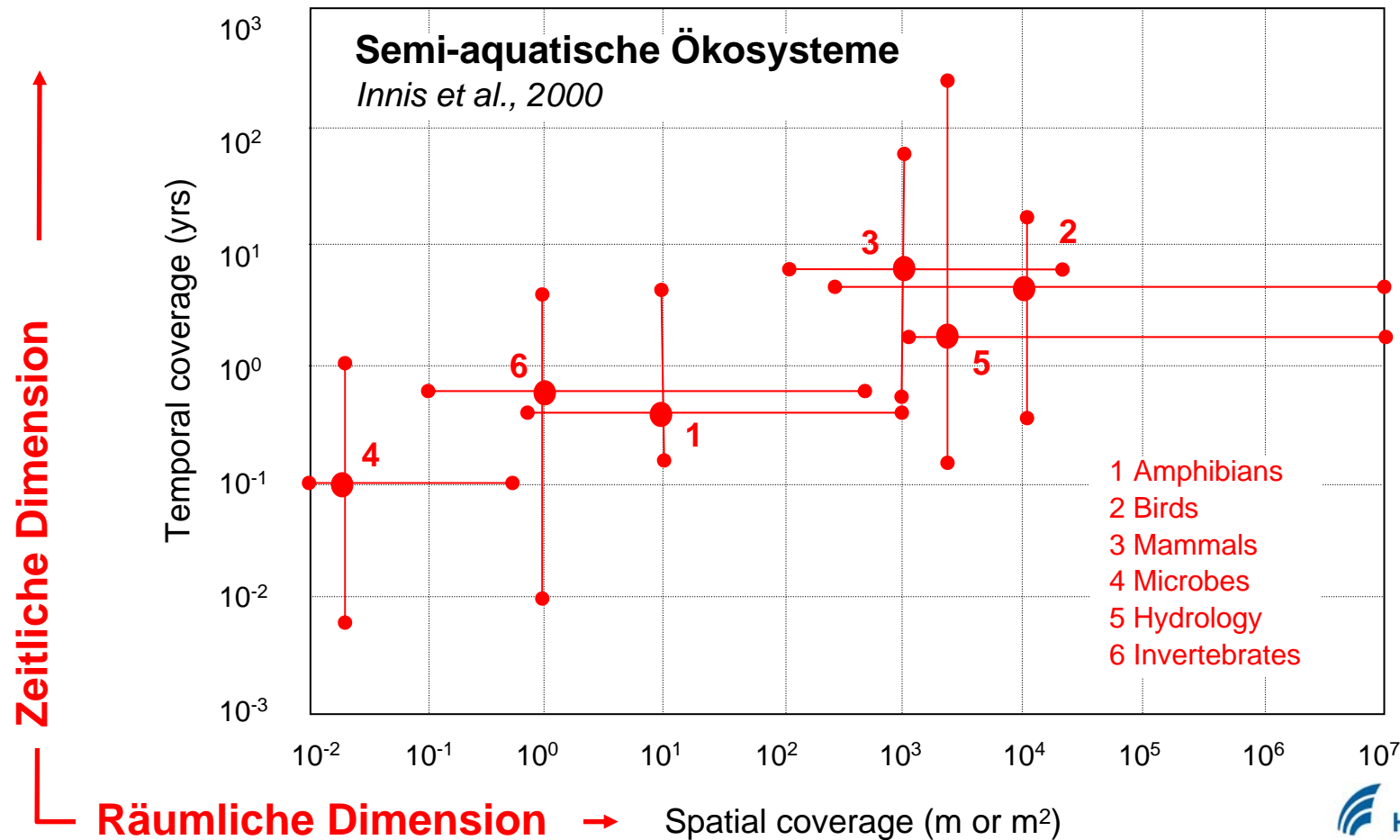
# Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)

Bewertungskriterien müssen alle Ebenen berücksichtigen und erfassen



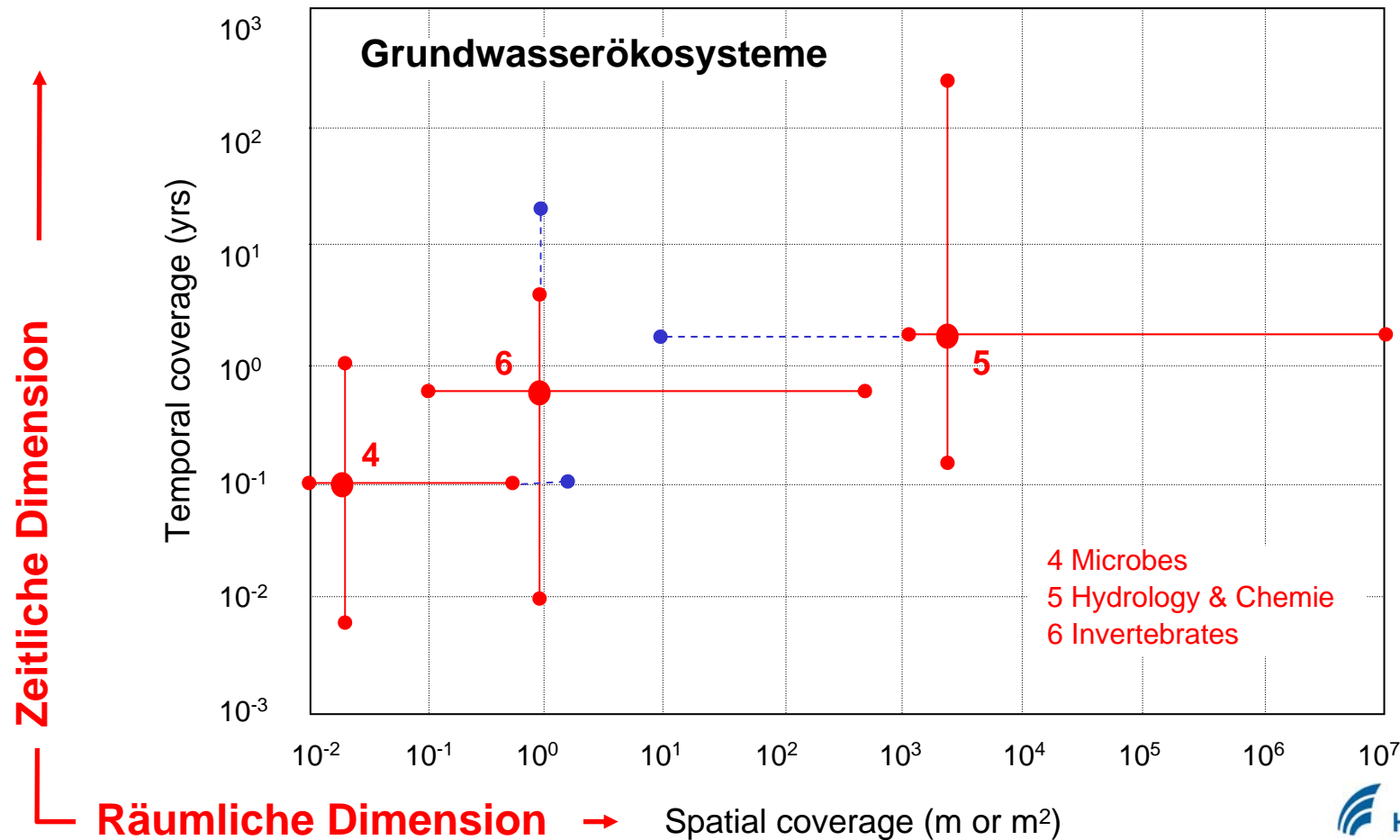
# Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)

Parameter müssen alle räumlichen und zeitlichen Skalen abdecken

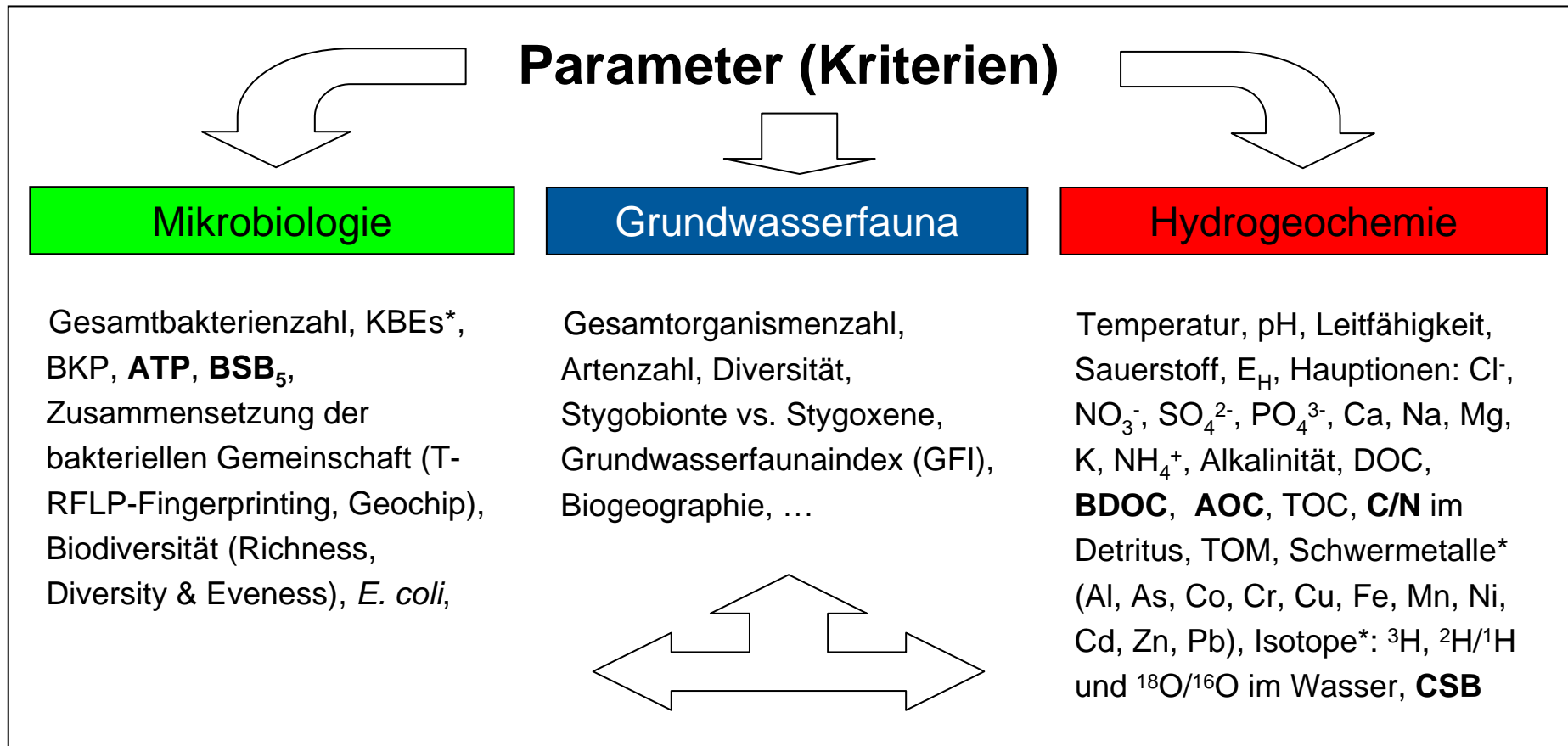


# Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)

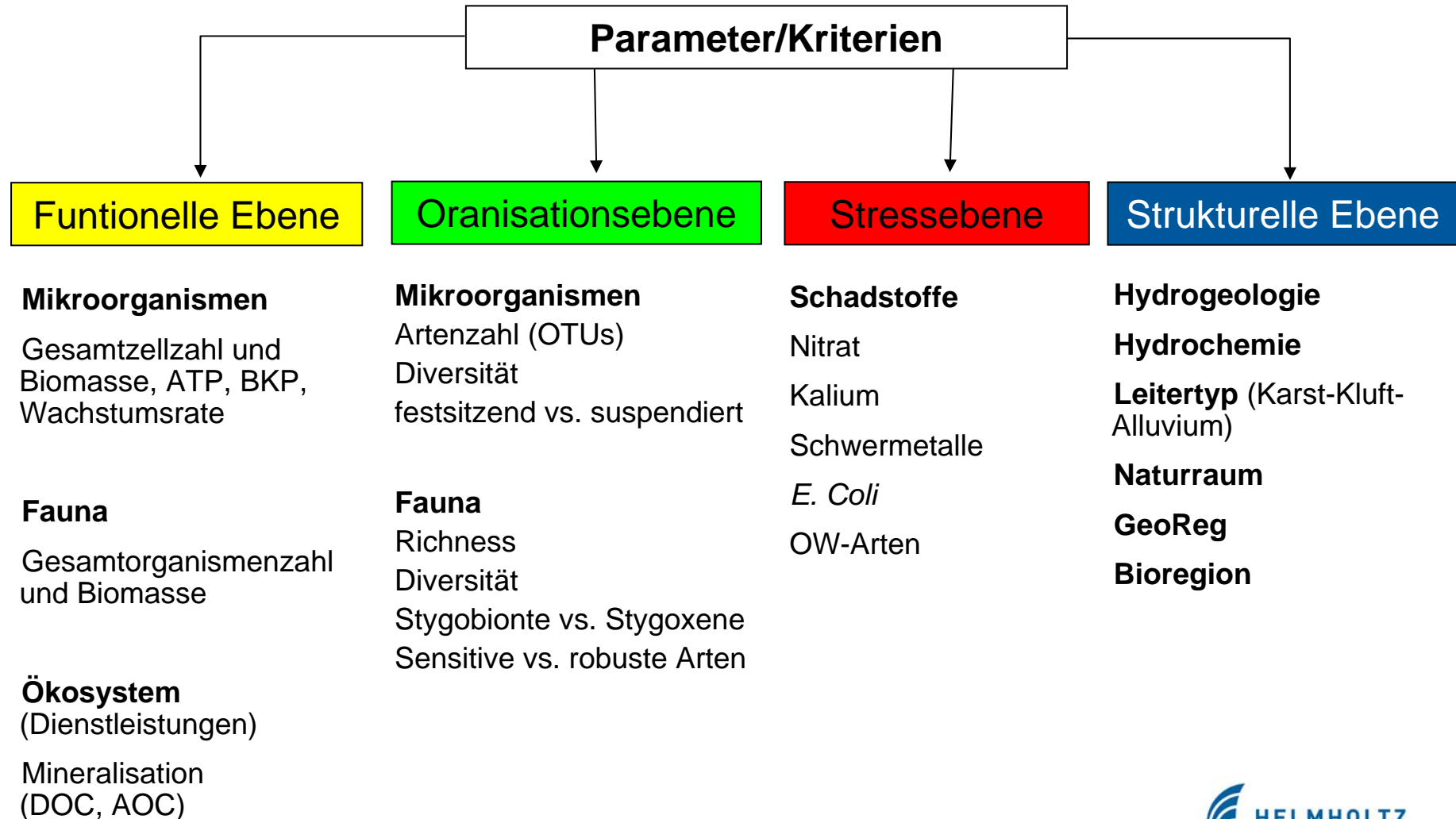
Parameter müssen alle räumlichen und zeitlichen Skalen abdecken



# Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)



# Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)



# Notwendige Schritte zu einem ökologischen Bewertungssystem

1. Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)
2. Inventur an ausgewählten Untersuchungsstandorten
3. Suche nach einer ökologisch sinnvollen Untergliederung von Grundwassersystemen
4. Definition von Referenzzuständen (natürliche Hintergrundwerte)
5. Identifizierung von (Bio)Indikatoren
6. Bewertungsschema **ökologischer Zustand** („ecosystem status or health“) von Grundwassersystemen

# Untersuchungsstandorte im Rahmen des UBA Projekts

## Erfthgebiet:

### **Kölner Bucht (Rur- & Erftscholle)**

- 'Schotter & Kiese des Niederrheins'

### **Mechernicher Voreifel (Eifel)**

- 'Paläozoische Sedimentgesteine'

## Alb-Donau-Kreis:

### **Lonetal-Flächenalb (Alluvium & Karst)**

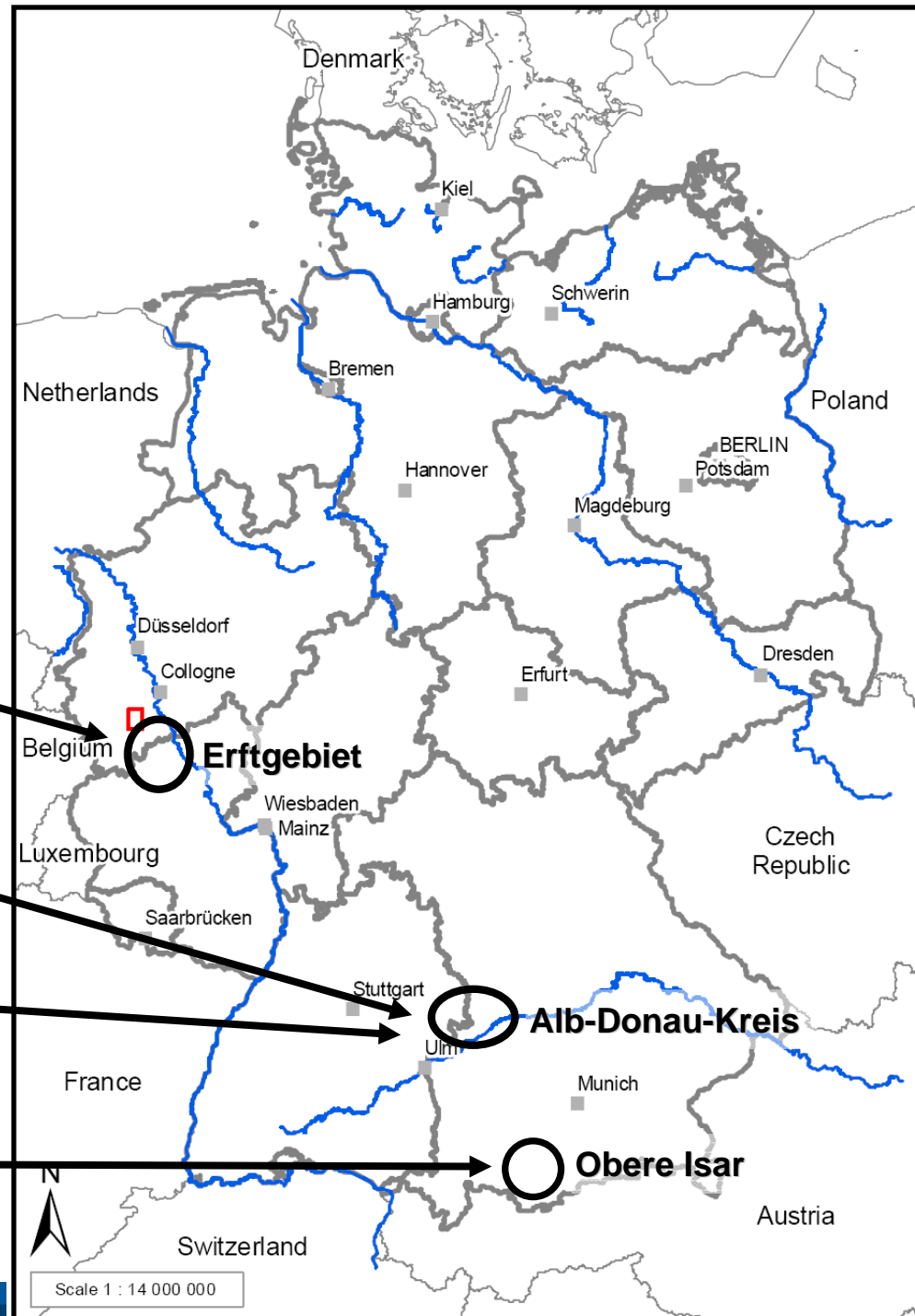
- 'Kalksteine des Oberen Jura'

### **Donauried (Alluvium & Karst)**

- 'Schotter & Moränen des Alpenvorlands'
- 'Kalksteine des Oberen Jura'

## Obere Isar:

- 'Kalksteine alpiner Raum'





# Weitere Untersuchungs- standorte gefördert durch die LAWA

## Ratzeburg und Soltau:

- 'Sande & Kiese Norddeutschland'

## Erfthgebiet:

### Kölnener Bucht (Rur- & Erftscholle)

- 'Schotter & Kiese des Niederrheins'

### Mechernicher Voreifel (Eifel)

- 'Sandsteinfolgen des Buntsandsteins'

## Alb-Donau-Kreis:

### Lonetal-Flächenalb (Lockergestein & Karst)

- 'Kalksteine des Oberen Jura'

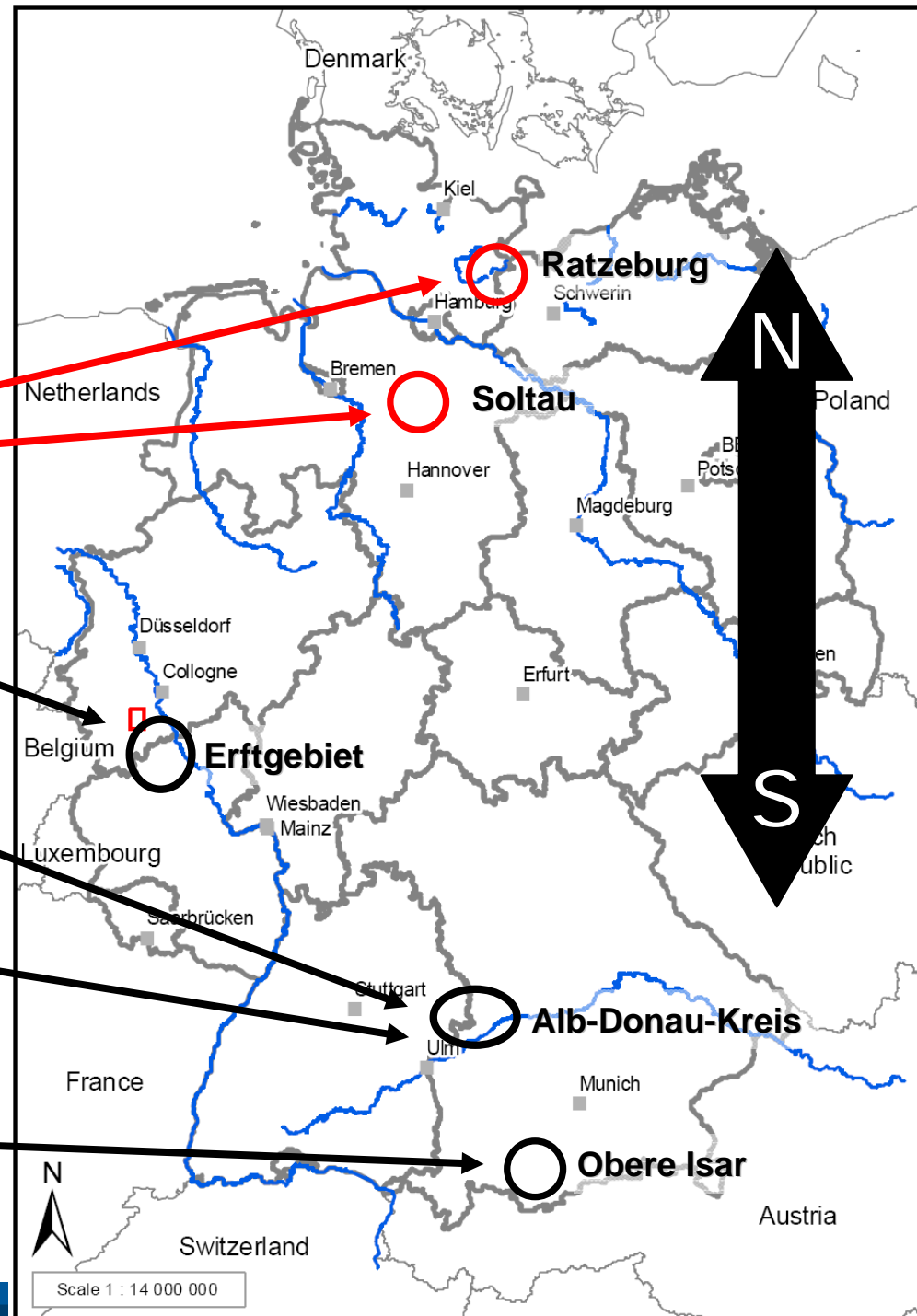
### Donauried (Lockergestein & Karst)

- 'Schotter & Moränen des Alpenvorlands'

- 'Kalksteine des Oberen Jura'

## Obere Isar:

- 'Kalksteine alpiner Raum'

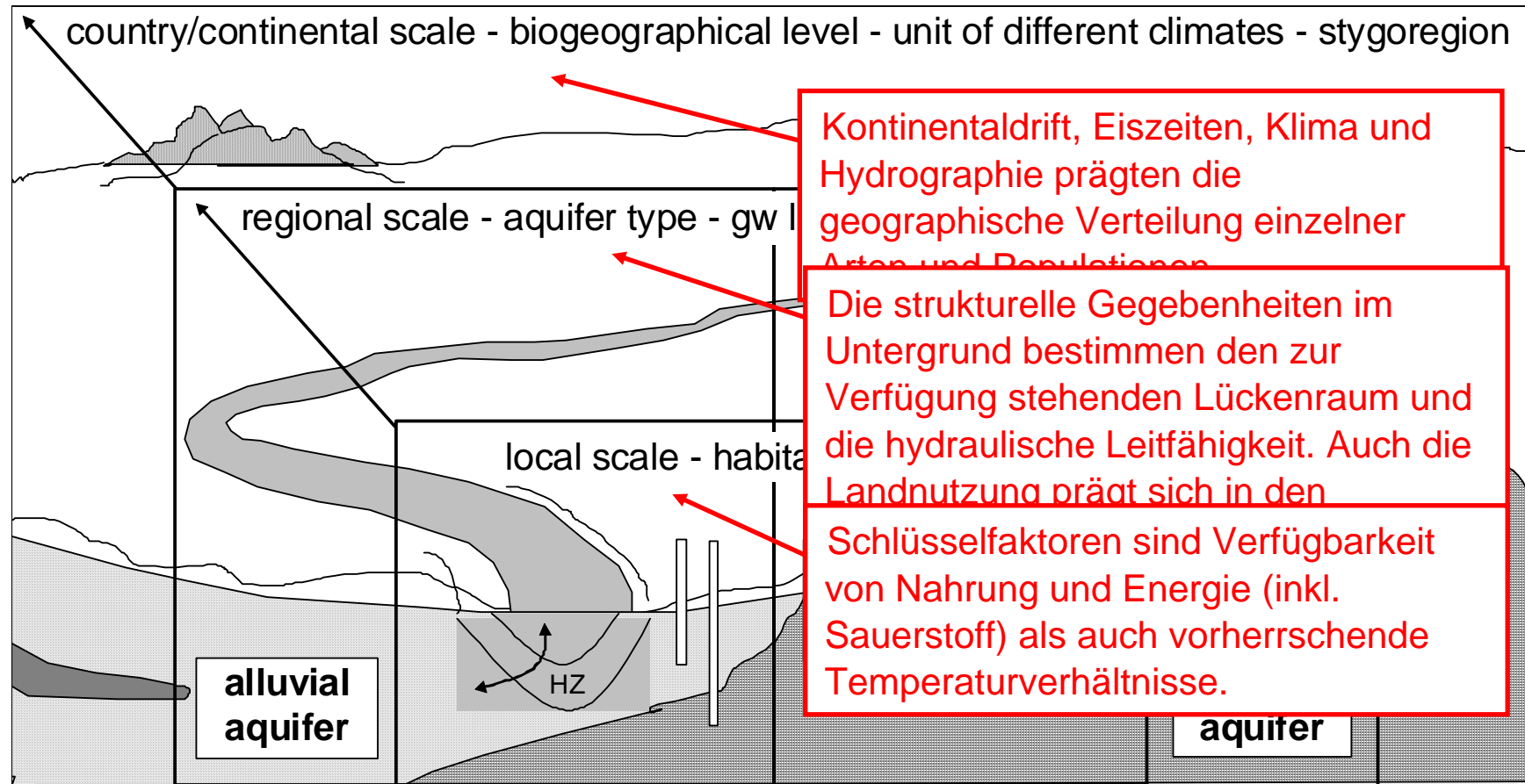


# Notwendige Schritte zu einem ökologischen Bewertungssystem

1. Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)
2. Inventur an ausgewählten Untersuchungsstandorten
3. Suche nach einer ökologisch sinnvollen Untergliederung von Grundwassersystemen
4. Definition von Referenzzuständen (natürliche Hintergrundwerte)
5. Identifizierung von (Bio)Indikatoren
6. Bewertungsschema **ökologischer Zustand** („ecosystem status or health“) von Grundwassersystemen

# Untergliederung – Klassifizierung

## So machen das die Ökologen



# Untergliederung – Klassifizierung

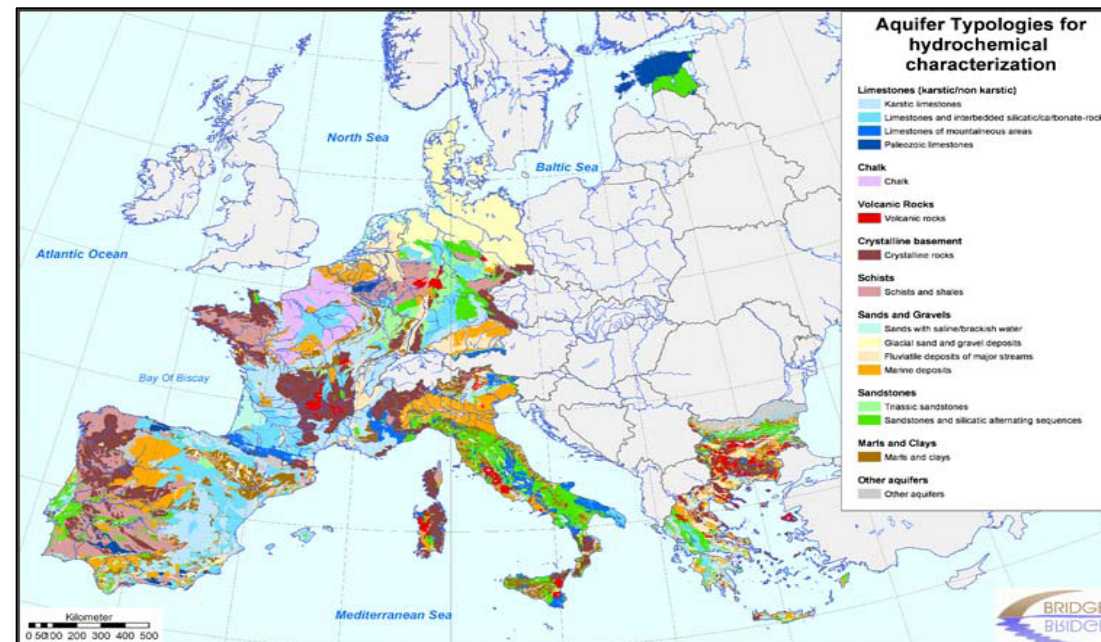
## So machen das die Hydrogeologen

Kriterien sind Ergiebigkeit, Durchlässigkeit, Geochemie, Hydrogeologie (z.B. Hydrogeologischer Atlas Deutschland)

# Untergliederung - Klassifizierung

Kriterien sind Ergiebigkeit, Durchlässigkeit, Geochemie, Hydrogeologie (z.B. Hydrogeologischer Atlas Deutschland)

Wendlandpapier für Europa (Wendland et al., 2007; BRIDGE) - Unterteilt Europa in hydrochemische GW-Landschaften



Wendland F, Blum A, Coetsiers M, Gorova R, Griffioen J, Grima J, Hinsby K, Kunkel R, Marandi A, Melo T, Panagopoulos A, Pauwels H, Ruisi M, Traversa P, Vermooten JSA, Walraevens K (2007) European aquifer typology: a practical framework for an overview of major groundwater composition at European scale. Environ Geol. doi:10.1007/s00254-007-0966-5

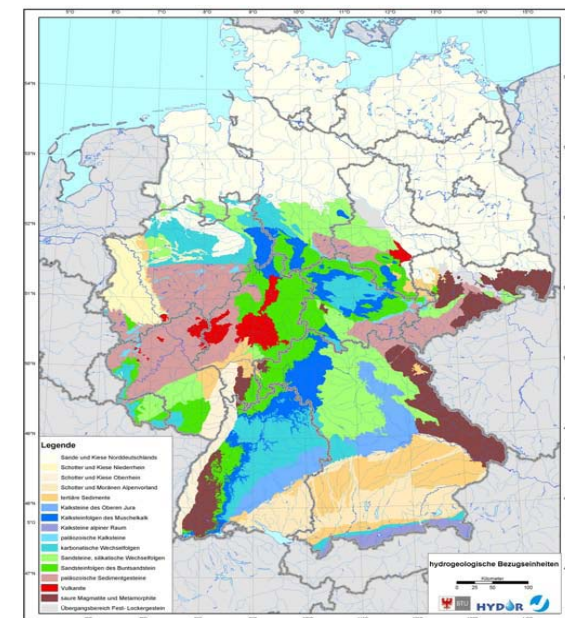
# Untergliederung - Klassifizierung

Kriterien sind Ergiebigkeit, Durchlässigkeit, Geochemie, Hydrogeologie (z.B. Hydrogeologischer Atlas Deutschland)

Wendtlandpapier für Europa (Wendtland et al., 2007; BRIDGE) - Unterteilt Europa in hydrochemische GW-Landschaften

Untergliederung Deutschlands in 17 GW-Landschaften basierend auf hydrogeologischen und hydrochemischen Parametern nach Kunkel et al. (2004)

**Ist eine derartige Untergliederung ökologisch relevant und nachvollziehbar ?**



Kunkel R, Wendland F, Voigt HJ, Hannappel S (2004) Die natürliche, ubiquitär überprägte Grundwasserbeschaffenheit in Deutschland, Band 47. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment, Jülich, Germany

# Notwendige Schritte zu einem ökologischen Bewertungssystem

1. Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)
2. Inventur an ausgewählten Untersuchungsstandorten
3. Suche nach einer ökologisch sinnvollen Untergliederung von Grundwassersystemen
4. **Definition von Referenzzuständen** (natürliche Hintergrundwerte)
5. Identifizierung von (Bio)Indikatoren
6. Bewertungsschema **ökologischer Zustand** („ecosystem status or health“) von Grundwassersystemen

# Definition eines hydrochemischen Referenzzustandes

Kunkel et al., 2004



HYDRO

Die natürliche  
überprägte Grundwasser-  
beschaffenheit

R. Kunkel, H.-J. Voigt, F. W.

Tabelle 20: Obergrenzen bzw. Unter- und Obergrenzen der natürlichen, ubiquitär überprägten Grundwasserbeschaffenheit für die Lockergesteinseinheiten. Bei der Interpretation der Ergebnisse sind die Erläuterungen in Kap. 7.2 zu beachten. Die in grün dargestellten Werte entstammen der primärstatistischen Auswertung und sind im Allgemeinen nicht mit der natürlichen Grundwasserbeschaffenheit gleichzusetzen.

| Parameter        |       | Sande und Kiese Norddeutschland |           |           | Schotter und Kiese Rhein |           | Schotter, Moränen Alpenvorl. | tertiäre Sedimente |
|------------------|-------|---------------------------------|-----------|-----------|--------------------------|-----------|------------------------------|--------------------|
|                  |       | Entnahmetiefe                   |           |           | Niederrhein              | Oberrhein |                              |                    |
|                  |       | 0 - 10 m                        | 10 - 25 m | 25 - 50 m |                          |           |                              |                    |
| Na               | mg/l  | 38                              | 32        | 17        | 35                       | 19        | 17                           | 14                 |
| K                | mg/l  | 4,0                             | 5,1       | 4,2       | 7,9                      | 4,7       | 3,3                          | 2,4                |
| Mg               | mg/l  | 22                              | 27        | 24        | 18                       | 33        | 37                           | 36                 |
| Ca               | mg/l  | 153                             | 149       | 157       | 169                      | 197       | 136                          | 127                |
| Fe               | mg/l  | 8,0                             | 4,8       | 9,3       | 0,24                     | 3,3       | 0,12                         | 0,32               |
| Mn               | mg/l  | 1,4                             | 0,73      | 0,52      | 0,07                     | 0,65      | 0,02                         | 0,11               |
| HCO <sub>3</sub> | mg/l  | 351                             | 332       | 340       | 377                      | 438       | 437                          | 424                |
| SO <sub>4</sub>  | mg/l  | 189                             | 197       | 73        | 172                      | 249       | 45                           | 73                 |
| Cl               | mg/l  | 87                              | 76        | 46        | 106                      | 99        | 56                           | 26                 |
| NH <sub>4</sub>  | mg/l  | 0,10                            | 0,35      | 0,44      | 0,23                     | 0,04      | 0,01                         | 0,04               |
| NO <sub>3</sub>  | mg/l  | 0,90                            | 0,50      | 0,62      | 13                       | 1,2       | 25                           | 0,54               |
| NO <sub>2</sub>  | mg/l  | 0,06                            | 0,04      | 0,04      | 0,07                     | 0,05      | 0,001                        | 0,01               |
| PO <sub>4</sub>  | mg/l  | 0,10                            | 0,08      | 0,05      |                          | 0,18      | 0,12                         | 0,06               |
| DOC              | mg/l  | 8,8                             | 6,2       | 4,8       | 2,5                      | 3,7       | 1,9                          | 2,5                |
| LF               | µS/cm | 993                             | 1013      | 922       | 1161                     | 1296      | 906                          | 863                |
| O <sub>2</sub>   | mg/l  | 0,2 - 6,0                       | 0,1 - 7,3 | 0,1 - 3,3 | 0,1 - 9,1                | 0,2 - 8,2 | 2,3 - 10,6                   | 0,8 - 10,0         |
| H                | µg/l  | 0,20                            | 0,23      | 0,14      | 0,44                     | 0,10      | 0,10                         | 0,10               |
| pH               | -     | 6,8 - 8,2                       | 7,2 - 7,9 | 6,8 - 7,7 | 6,4 - 7,2                | 7,0 - 7,4 | 7,0 - 7,6                    | 7,0 - 7,7          |



# Definition eines biologischen/ökologischen Referenzzustandes

## Biologische Merkmale eines ökologisch „intakten“ Grundwasserökosystems

- Eine geringe mikrobielle Biomasse und Abundanz
- Kleine, morphologisch sehr einheitliche Zellen
- Geringe mikrobielle Aktivitäten
- Eine geringe mikrobielle Diversität
- Ein hoher Anteil festsitzender Bakterien
- Dort wo Fauna vorkommt, ein hoher Anteil an Crustaceen
- Ein geringer Anteil an Würmern (Oligochaeten und Nematoden)
- Ein überwiegender Anteil von Stygobionten (echte GW-Tiere)
- Keine exotischen Arten
- Niedrige Kohlenstoff (DOC, TOC) und Stickstoffwerte ( $\text{NO}_3$ )
- Keine Schadstoffe nachweisbar (z.B. Aromaten, Pestizide, Schwermetalle)
- Abwesenheit von Fäkalkeimen und -viren

Natürliche  
Variabilität ?

Geologie ?

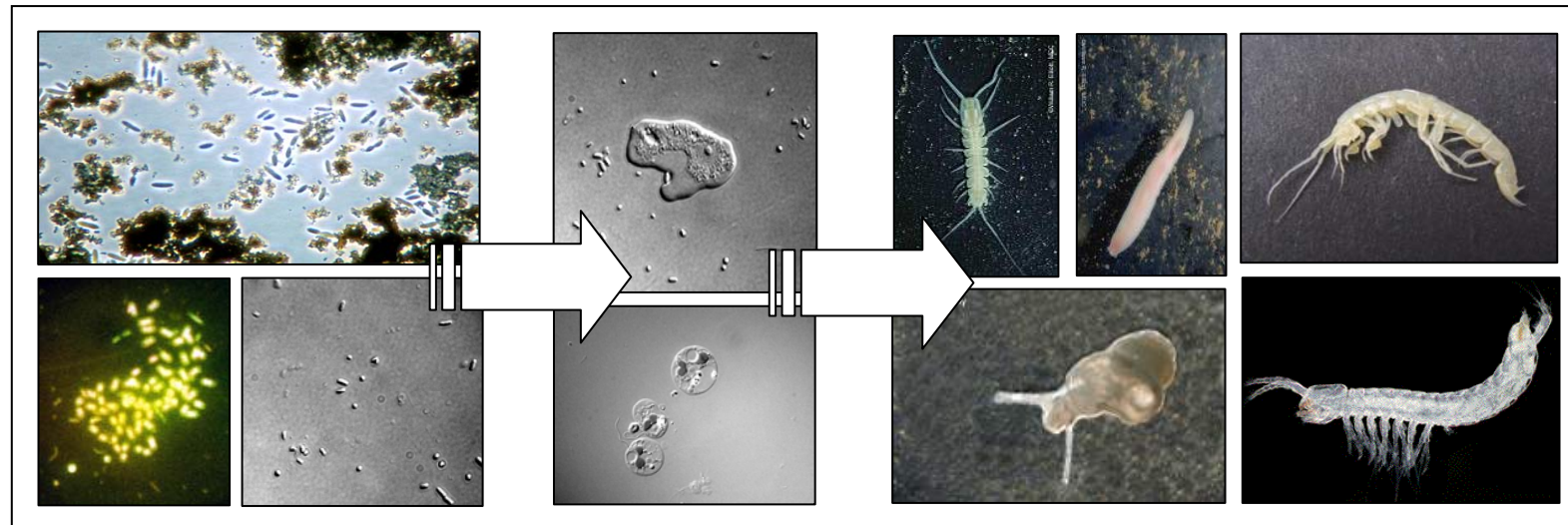
Biogeographie?

Wir brauchen  
Zahlen !!

# Notwendige Schritte zu einem ökologischen Bewertungssystem

1. Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)
2. Inventur an ausgewählten Untersuchungsstandorten
3. Suche nach einer ökologisch sinnvollen Untergliederung von Grundwassersystemen
4. Definition von Referenzzuständen (natürliche Hintergrundwerte)
5. Identifizierung von (Bio)Indikatoren
6. Bewertungsschema **ökologischer Zustand** („ecosystem status or health“) von Grundwassersystemen

# Bioindikatoren für Grundwasserökosysteme?



Bakterien & Archaeen

Protozoen/Pilze

Fauna

Mikrobielle Gemeinschaften beinhalten vielversprechende Indikatoreigenschaften

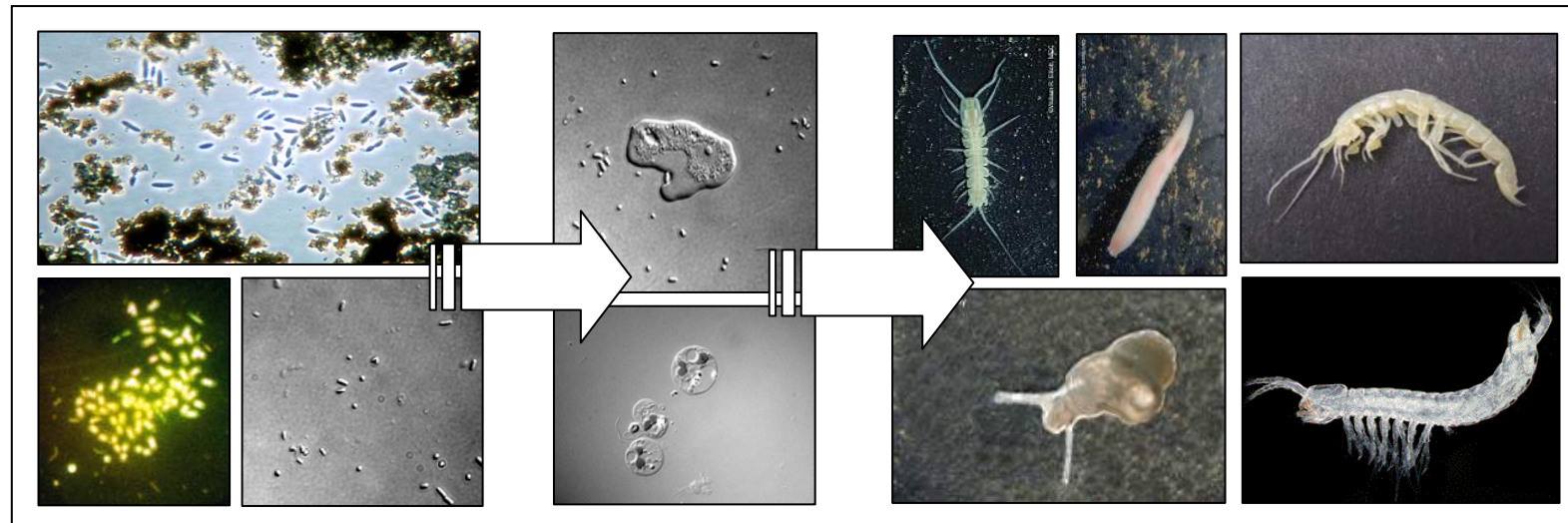
**Eutrophierung und organische Verunreinigung** (z.B. Pearl et al. 2003)

**Schwermetallbelastung** (z.B. Solé et al. 2008)

**Anwesenheit von pathogenen Bakterien, Protozoen und Viren** (z.B. Lucena et al. 2006)

**Biologischer Schadstoffabbau und aktive Redoxprozesse** (z.B. Winderl et al. 2007)

# Bioindikatoren für Grundwasserökosysteme?



Bakterien & Archaeen

Protozoen/Pilze

Fauna

Innerhalb der Fauna gibt es Indikatoren für

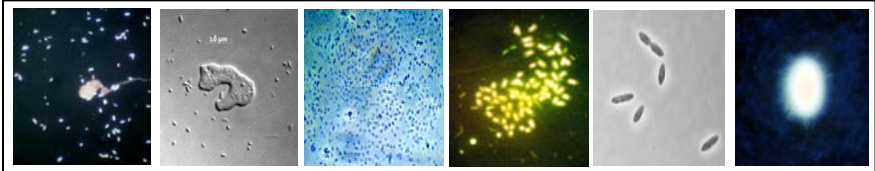
**Oberflächeneinflüsse** (Husmann 1971; Sket 1973; Malard et al. 2004; Hahn 2006)

**Eutrophierung** (Holsinger 1966; Sket 1973; Culver et al. 1992; u.a.)

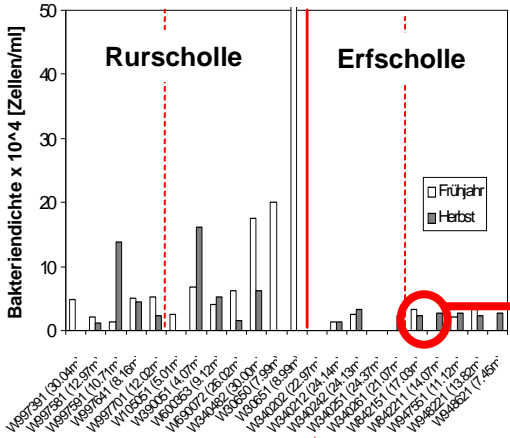
**Sedimentstruktur und Porosität** (Mösslacher 1998, Paran et al. 2004; u.a.)

**Redox- und Sauerstoffverhältnisse** (Mösslacher 1998, Dole-Olivier et al. 2004; u.a.)

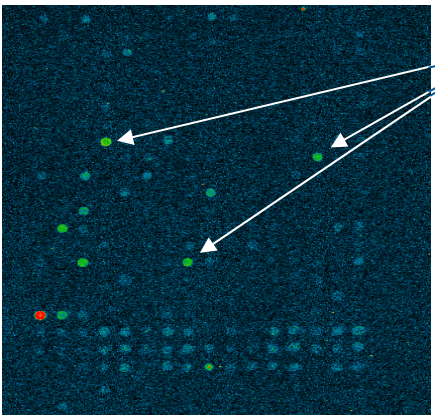
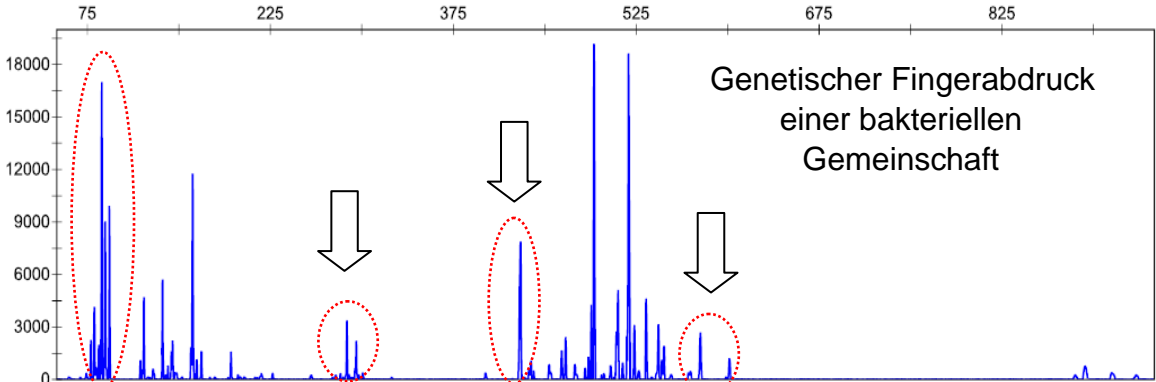
# Bioindikatoren innerhalb der Mikroorganismen



## Grundwasserprobe

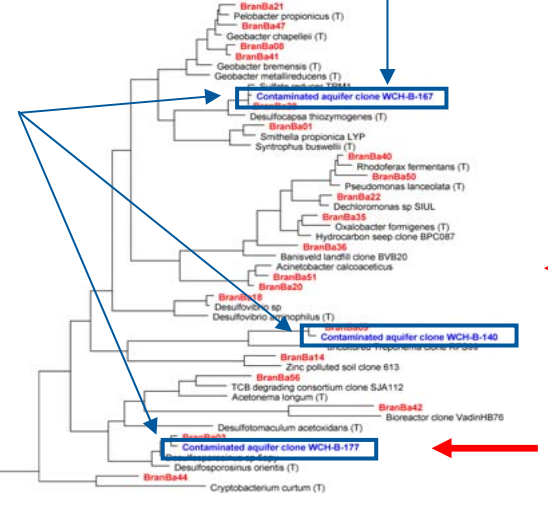


## Fingerprint (hier T-RFLP)



DNA – Chip (Phylochip)

## Indikatorsequenzen



Phylogenetischer Stammbaum

Multivariate Statistik

# Welche Methoden können angewandt werden um Indikatororganismen zu identifizieren ?

- Direkte Korrelation zu Störgröße(n)

Es gibt keine einfachen und direkten Korrelationen in GWÖksystemen !

- Multivariate Statistik

## Datenerkundung

PCA (Hauptkomponentenanalyse)  
CA (Korrespondenzanalyse)  
NMDS (non metric multidimensional scaling)  
Clusteranalyse

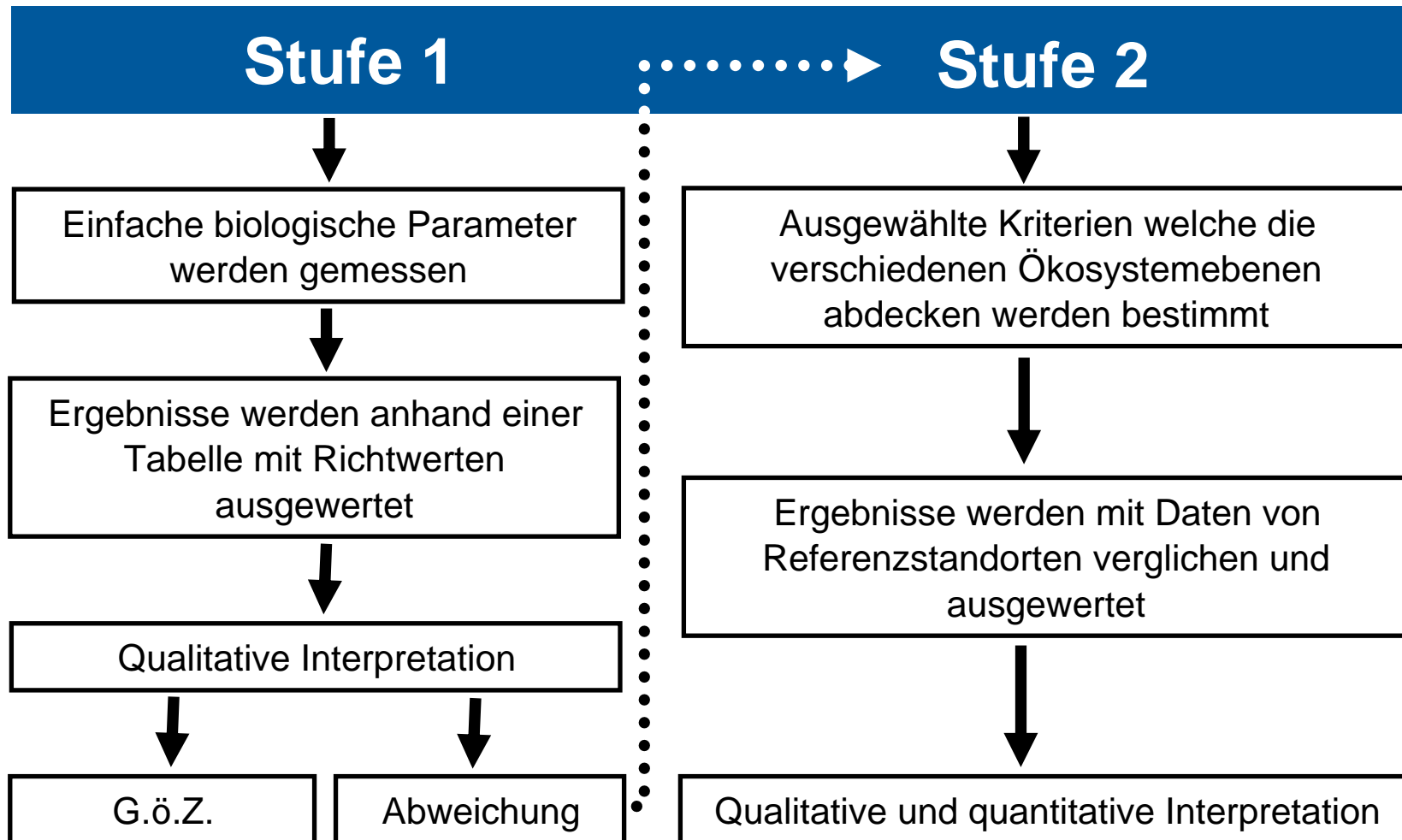
## Einfluß von Umweltvariablen

RDA (Redundanzanalyse)  
CCA (Kanonische Korrespondenzanalyse)  
Diskriminanzanalyse  
MRT (Multivariate Regressionsbäume)

# Notwendige Schritte zu einem ökologischen Bewertungssystem

1. Auswahl geeigneter Untersuchungsparameter (Kriterien)
2. Inventur an ausgewählten Untersuchungsstandorten
3. Suche nach einer ökologisch sinnvollen Untergliederung von Grundwassersystemen
4. Definition von Referenzzuständen (natürliche Hintergrundwerte)
5. Identifizierung von (Bio)Indikatoren
6. Bewertungsschema **ökologischer Zustand** („ecosystem status or health“) von Grundwassersystemen

# Abgestuftes Evaluierungsschema zur Bewertung des ökologischen Zustands von Grundwässern





# Projektergebnisse im Detail

***Stygoregionen — eine ökologisch sinnvolle Gliederung von Grundwasser-  
ökosystemen***

*(Hans Jürgen Hahn, Universität Koblenz-Landau)*

***Ökologische Bewertungskriterien und Bioindikatoren für das Grundwasser***

*(Heide Stein & Sven Berkhoff, Universität Koblenz-Landau)*

***Biologische Referenzzustände in deutschen Grundwässern***

*(Claudia Kellermann, HelmholtzZentrum München)*

***Bewertung des ökologischen Zustandes von Grundwassersystemen –  
Vision oder Illusion?***

*(Christian Griebler, HelmholtzZentrum München)*

Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit

