

Modelle und Methoden zur Entscheidungsfindung in der Grundwasserbewirtschaftung

von

Frido Reinstorf

Hochschule Magdeburg-Stendal
Professur für Hydrologie und Geographische Informationssysteme

mit Ergebnissen der Arbeiten von:
Matthias Beyer, Dorothea Weller, Lars Roith, Kerstin Heblack, Matthias Pätsch &
dem Team des EU-Projektes „Tools for landuse changes“

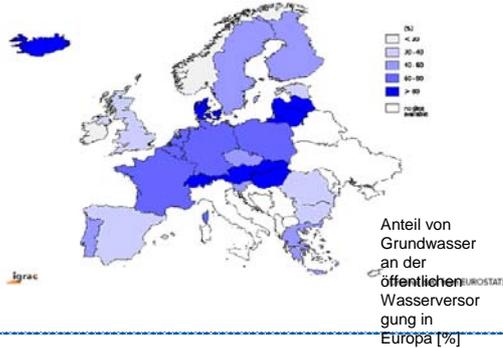
Gliederung

1. Einleitung
2. Multikriterielles Entscheidungshilfesystem - Fallbeispiel Thülsfeld
3. Kompartimentmodelle, Gekoppelte Modellierung & Unsicherheiten
4. Anwendungsergebnisse des Prototyps des Entscheidungshilfesystems & Unsicherheiten
5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Problemstellung & Relevanz

Problem: „... Das Grundwasser ist in Europa mehrfach gefährdet und belastet. Zu den größten Problemen gehört die **Belastung mit Nitrat** und Pestiziden – vor allem durch die Verwendung von nitrathaltigen Düngemitteln und Stallung ...“ (Europäische Umweltagentur, 2000).

Nitrat: „... Der natürliche Nitratgehalt des Grundwassers liegt im allgemeinen unter 10 mg NO₃/l. Ein **höherer Gehalt ist immer vom Menschen verursacht** ...“ (Europäische Umweltagentur, 2000).



Quelle: EUA (1998).

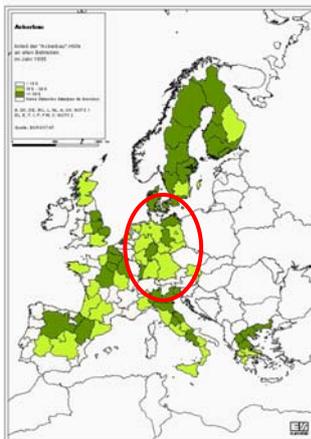
Graz, 24.06.08



Anteil von Grundwasser an der öffentlichen Wasserversorgung in Europa [%]

Problemstellung & Relevanz

Bedeutung der landwirtschaftlichen Bodennutzung



Anteil der BWA "Ackerbau" an der Gesamtzahl der Betriebe (relativer Wert), NUTS II, 1990
http://ec.europa.eu/agriculture/envir/report/de/expl_de/map1.htm

Basic data - key agricultural statistics

		Utilized agricultural area (1 000 ha)		Number of holdings (1 000 holdings)		UAA per holding (ha)		Employment in the agriculture, forestry, hunting and fishing sector		Output of the agricultural industry (Mio EUR)		Consumption of inputs (Mio EUR)	
		2004	2003	2004	2003	Number (1 000 persons)	Share in employed civilian working population (%)	2004	2003	2004	2003		
1	EU-25	162 305	162 305	9 671	9 671	15,8	15,8	9 653	5,0	330 455	330 455	152 723	152 723
	Belgien/Belgie	1 364	1 364	55	55	25,4	25,4	92	2,2	6 858	6 858	4 154	4 154
	Česká republika	3 631	3 631	45	45	79,4	79,4	208	4,4	3 623	3 623	2 368	2 368
	Dänmark	2 770	2 770	37	37	54,7	54,7	3,3	3,3	5 262	5 262	5 262	5 262
	Deutschland	17 020	17 020	412	412	41,2	41,2	836	2,4	44 019	44 019	24 758	24 758
	Estland	770	770	37	37	21,6	21,6	35	5,5	273	273	274	274
	Italien	3 960	3 960	825	825	4,8	4,8	546	12,6	12 105	12 105	3 479	3 479
	España	25 249	25 249	1 141	1 141	22,1	22,1	979	5,5	43 800	43 800	15 185	15 185
	France	29 632	29 632	614	614	45,3	45,3	964	4,0	64 839	64 839	33 762	33 762

http://ec.europa.eu/agriculture/agrista/2005/table_en/index.htm

Mehrfachnutzung →

Abgestimmte Bewirtschaftung erfordert nachhaltige Entscheidungen

↓
Entscheidungshilfesysteme (DSS)

GWM, Graz, 24.06.08



Zielstellung

Entscheidungshilfesysteme (DSS) - Was und Warum?

Definition:

DSS - ein interaktives, flexibles und adaptierbares System, welches Daten, Modelle, Entscheidungsregeln und Äußerungen der Akteure nutzt, um spezifische Aktionen zur Lösung von Problemen anzuzeigen (Turban, 1990)

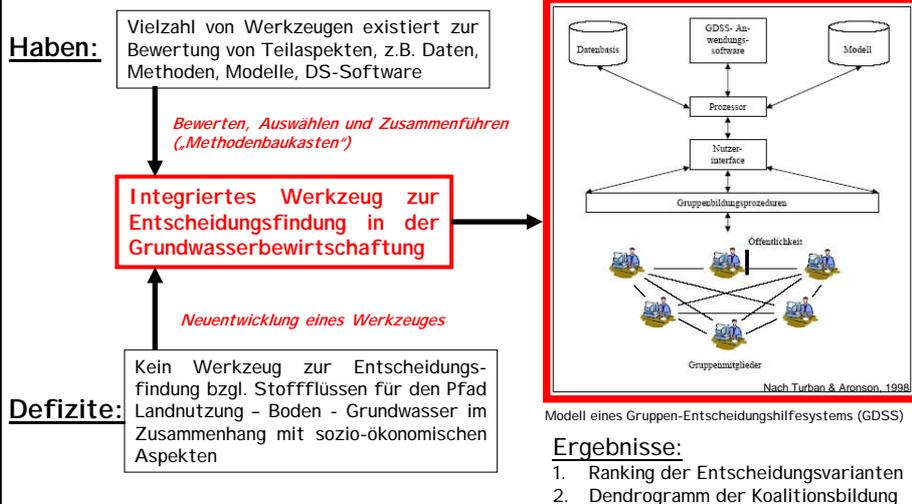
Warum?:

- Verbesserung der Qualität von Entscheidungen
 - analytische Strukturierung eines Problems kann konstruktive Vergleiche stimulieren
 - durch die Bereitstellung eines Rahmens zur Integration von Expertenwissen, spielt das DSS die Rolle eines nicht-existierenden „Around“-Experten
- Liefert für Behörden und Öffentlichkeit eine technische Dokumentation

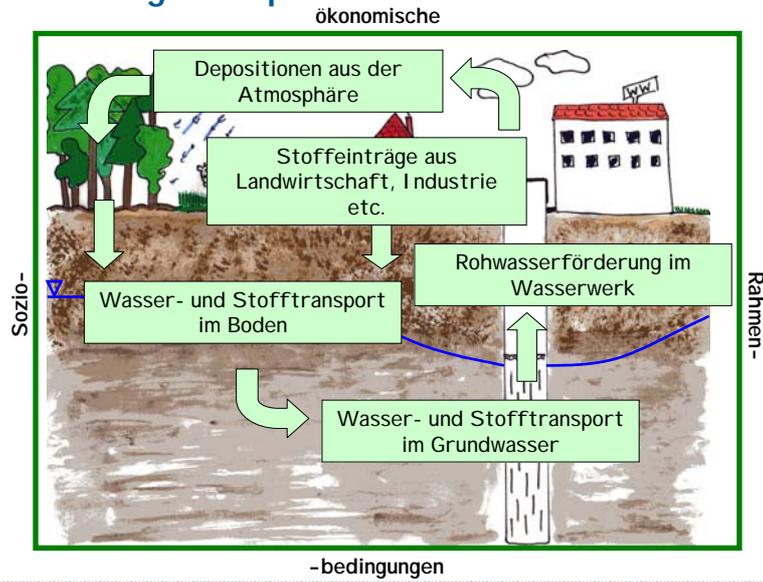
Ein DSS zeigt nicht nur an, welche Information genutzt wurde und von wo sie kommt, sondern auch, wie sie verwendet wurde und warum die getroffene Entscheidung die „beste“ Alternative ist.

Zielstellung & Relevanz

Wie baut man ein DSS?



Berücksichtigte Aspekte

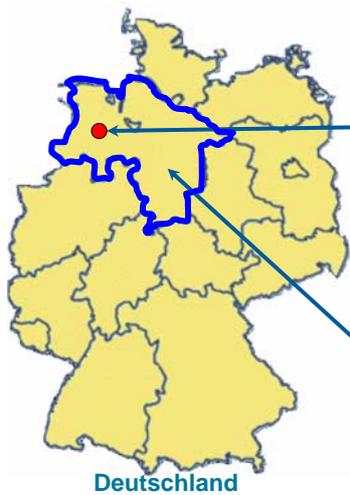


GWM, Graz, 24.06.08

6

Fallbeispiel Thülsfeld

Untersuchungsgebiet



Thülsfeld b. Oldenburg

Niedersachsen



Fassung A, Wasserwerk Thülsfeld

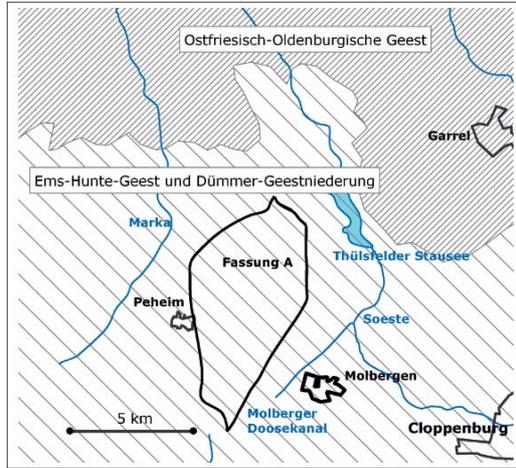


GWM, Graz, 24.06.08

7

Untersuchungsgebiet (1)

Naturräumliche Lage des Gebietes & Böden



- maritimer Klimabereich mit Niederschlägen zwischen 700 – 800 mm/a
- leicht welliges Relief, höchste Erhebung 40 m üNN (Dwergter Sand)
- generelle Abflachung des Geländes von S nach N (37 – 28 m üNN)

Bodenarten:

- Fein- und Mittelsande
- vereinzelt im Süden lehmige bis sandig-lehmige Substrate

Bodentypen:

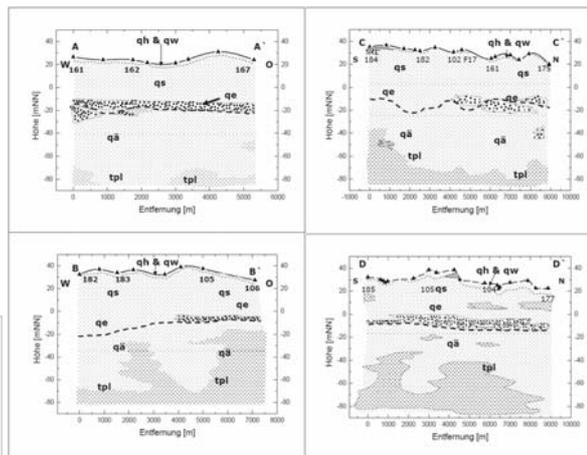
- Podsol aus Flugsanden über glazifluviatilen Sanden
- vereinzelt Pseudogley-Podsol über Lehmsand

Untersuchungsgebiet (2)

Geologie

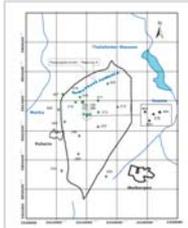


Legende:
 ● E84 - Aufschlussbohrung ▲ Fassungsbunnen
 --- Schnittführung entlang der ausgewählten Bohrungen



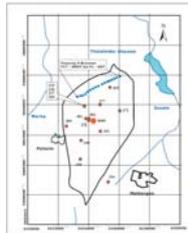
Untersuchungsgebiet (3)

Hydrogeologie & Messstellen



Legende:

377 - Lokation der Beobachtungsstelle 377 & Pumpenbrunnen



Legende:

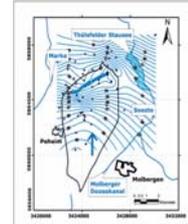
● Lokation der Bohrung SGM

Hydrogeologische Bedingungen:

- hydraulische Homogenität des Aquifers
- 14 Gütemessstellen (FOK zwischen 7,5 – 57 m uGOK)
- Grundwasserneubildung ca. 310 mm/a
- hydraulischer Kontakt zwischen GWL und Talsperre
- Aquiferparameter:

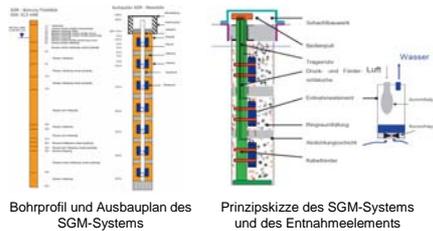
Parameter	Zeichen	Wert	Einheit
nutzbarer Porenraum	n_e	10-20	%
Abtandgeschwindigkeit	v_a	50-150 (m Mittel 80)	m/a
Grundwassergefälle	i	0,001-0,003	-
Grundwasserfließabstände	-	0,5-10	m
Durchlässigkeitbeiwerte	k	$0 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-3}$	m/s

(Josopait, 1976, 1990; Harms, 1987; OÖWV, 2000)



Legende:

— Grundwassergefährde als Linie gleicher Druckhöhe in m NN



SGM-System:

Entnahmeelemente bei 5,6;
10,6; 15,6; 20,6; 25,6; 30,6;
35,6 m uGOK

Staffelpegel:

Filteroberkanten 13, 23, 33
m uGOK

Gekoppelte Modellierung

Einführung

Ziel:

- **Schaffung eines integrierten Modells** für die ungesättigte und gesättigte Zone auf Grundwassereinzugsgebiets-Skala zur Verwendung in einem DSS

Warum nötig?:

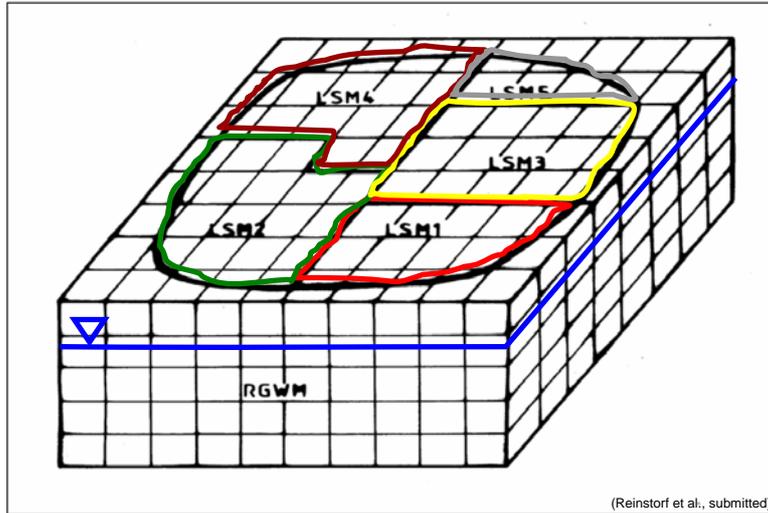
- **kompartimentübergreifende** und **wechselwirkende** Prozesse
- **Instationarität** der Prozesse und auch der Randbedingungen
- **Zeit- und Arbeitersparnis**

Auswahlkriterien:

- Modellbewertungen (SWAT, ANIMO, FLOTRANS, MODFLOW/MT3D, HERMES, WAVE)
 - keines der Modelle liefert eine Gesamtbeschreibung der Kompartimente Vegetation, Boden, Kapillarsaum, Grundwasser
 - alle Modelle sind frei verfügbar und/oder weit verbreitet
 - es sind Schnittstellen für eine Modellkopplung nutzbar oder der Quelltext ist verfügbar

Prinzip der Modellkopplung

Allgemeines Strukturmodell



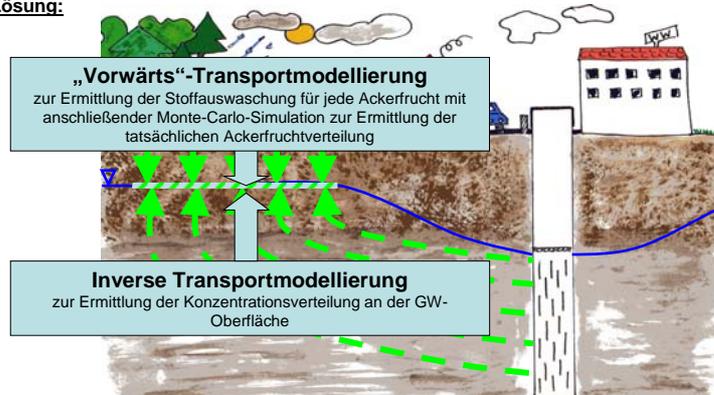
(Reinstorf et al., submitted)

Problem: Verteilung des Eintrages in den Boden

Rekonstruktion des flächenhaften Eintrages

Problem: Wir kennen die Verteilung des Eintrages über die Fläche nicht!

Lösung:



(Reinstorf et al., submitted)

Unsicherheiten bei der Modellierung (1)

3. Gekoppelte Modellierung

Mittlerer absoluter Fehler $MAE = 1/n \sum_{i=1}^n |X_{calc} - X_{obs}|$

Grundwassermodell: Grundwasserstand: 0,34 m
Nitrat-Konzentration: 4,15 mg/L

Bodenmodell:

Bodenfeuchte	Depth [cm]	Measured values water content [cm ³ /cm ³]			Number of measurements n	Average absolute error [cm ³ /cm ³] F
		Average	Minimum	Maximum		
	0 - 30	0.213	0.138	0.317	6	0.08
	30 - 60	0.136	0.074	0.191	6	0.05
	60 - 90	0.157	0.101	0.218	6	0.05

Nitratkonzentration	Depth [cm]	Nitrate concentrations [mg/L]			Number of measurements	Average absolute error [mg/L] / percentage [%]
		Average	Minimum	Maximum		
	50	13.6	1.9	37.8	14	14.1 / 104
	100	12.7	0.3	28.6	18	8.2 / 64
	150	14.6	4.4	50.6	18	5.2 / 36
	200	0.4	0.0	0.7	2	- ¹⁾ / -



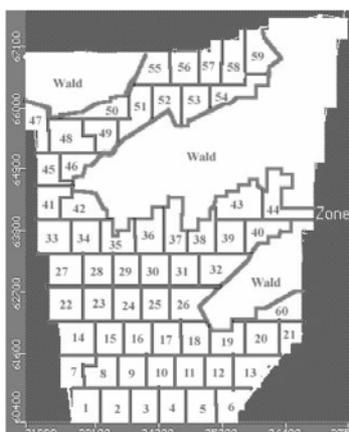
GWM, Graz, 24.06.08

14

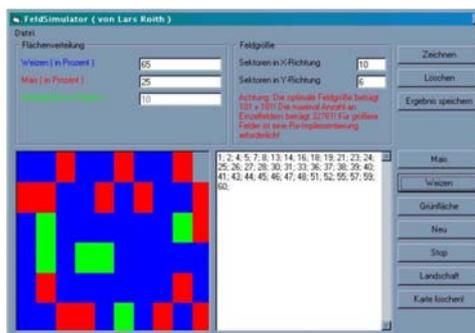
Rekonstruktion des flächenhaften Eintrages

Stochastische Modellierung

3. Gekoppelte Modellierung



Felderaufteilung für den Feldsimulator und Waldgebiete



Eingabemaske des Feldsimulators

(Reinstorf et al., submitted)

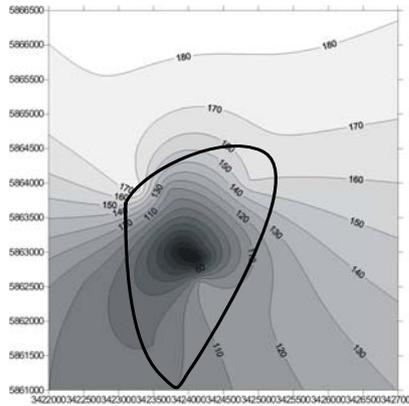


GWM, Graz, 24.06.08

15

Rekonstruktion des flächenhaften Eintrages

Ergebnis der inversen bzw. stochastischen Modellierung



Verteilung der Nitratkonzentration an der Grundwasseroberfläche aus der **inversen Grundwassertransportmodellierung**

(Reinstorf et al., submitted)

Unsicherheiten bei der Modellierung (2)

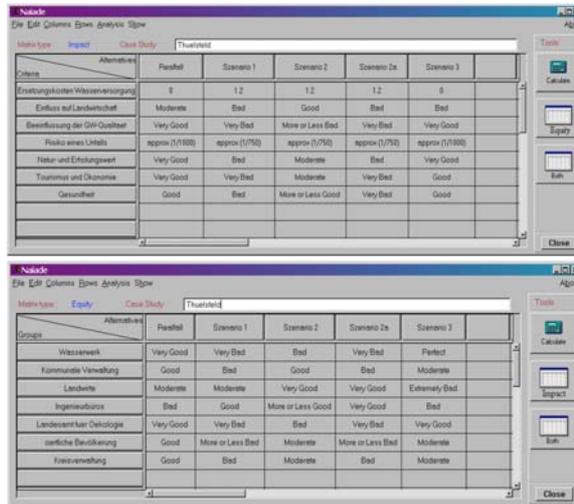
Vergleich des Mittelwertes und der Standardabweichung der interpolierten Karten der Nitratkonzentration an der GW-Oberfläche und der stochastisch basierten Nitratauswaschungsmodellierung

	Average at the well recharge locations [mg/L]	Standard deviation at the well recharge locations	Average of all mapping points [mg/L]	Standard deviation of all mapping points
Water table concentration	95.3	51.7	141.8	34.7
Stochastically based soil leaching modelling	100.1	56.8	152.2	47.7
Total difference [mg/L] / deviation [%]	+4.8 / +4.8	+5.1 / +9	+10.4 / +6.8	+13 / +27.3

Eingaben für das Entscheidungshilfesystem NAIADE - Einflussmatrix & Gleichheitsmatrix

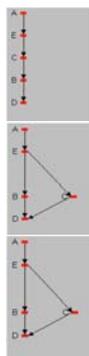
Szenarien:

- (A) Realfall: Winterroggen, Triticale, Winterroggen, Kartoffel, Winterroggen, Triticale; Frühjahrsdüngung
- (B) Sz. 1: Originale Ackerfrucht ohne Winterfrucht; Frühjahrsdüngung
- (C) Sz. 2: Originale Ackerfrucht mit Winterfrucht; Frühjahrs- und Herbstdüngung
- (D) Sz. 2a: Originale Ackerfrucht ohne Winterfrucht; Frühjahrs- und Herbstdüngung
- (E) Sz. 3: Grünland; keine Düngung



GWM, Graz, 24.06.08

Ergebnisse des Entscheidungsfindungsprozesses NAIADE-Ranking der Bewirtschaftungsalternativen



Hohe Unsicherheit ($\alpha=0.2$)
 $\Phi(A)=0.51$ $\Phi(B)=0.08$ $\Phi(C)=0.13$ $\Phi(D)=0.00$ $\Phi(E)=0.48$
 $\Phi(A)=0.00$ $\Phi(B)=0.37$ $\Phi(C)=0.36$ $\Phi(D)=0.46$ $\Phi(E)=0.00$
 Nach Φ^* ergibt sich folgendes Ranking:
 $A \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D$
 Nach Φ ergibt sich folgendes Ranking:
 $A \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D$

Mittlere Unsicherheit ($\alpha=0.4$)
 $\Phi(A)=0.26$ $\Phi(B)=0.01$ $\Phi(C)=0.04$ $\Phi(D)=0.00$ $\Phi(E)=0.23$
 $\Phi(A)=0.00$ $\Phi(B)=0.15$ $\Phi(C)=0.16$ $\Phi(D)=0.21$ $\Phi(E)=0.00$
 Nach Φ^* ergibt sich folgendes Ranking:
 $A \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D$
 Nach Φ ergibt sich folgendes Ranking:
 $E \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$

Geringe Unsicherheit ($\alpha=0.6$)
 $\Phi(A)=0.11$ $\Phi(B)=0.00$ $\Phi(C)=0.01$ $\Phi(D)=0.00$ $\Phi(E)=0.08$
 $\Phi(A)=0.00$ $\Phi(B)=0.05$ $\Phi(C)=0.05$ $\Phi(D)=0.09$ $\Phi(E)=0.00$
 Nach Φ^* ergibt sich folgendes Ranking:
 $A \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow D$
 Nach Φ ergibt sich folgendes Ranking:
 $A \rightarrow E \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$

- Alternativen sind vergleichbar und ordnen sich daher aufeinanderfolgend an; beste Variante ist A
- Alternativen B und C sind jetzt miteinander nicht mehr vergleichbar; beste Variante ist A
- Alternativen sind auch hier nicht miteinander vergleichbar; beste Variante ist A

Sensitivitätsuntersuchung:

Untersuchung zur Robustheit der Lösung und zum Einfluss der Modellparameter, neben dem α – Wert auf das NAI ADE-Ranking:

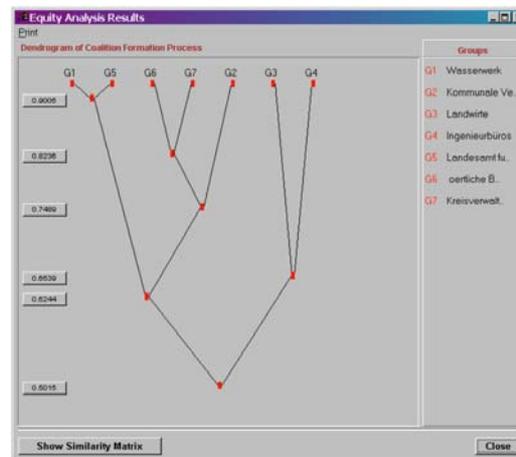
- Einfluss des Operators (Zimmermann-Zysno-Operator anstatt Minimumsoperator)
- Repräsentativität der Kriterienverteilung (z.B. Ersetzungskosten halbieren)



GWM, Graz, 24.06.08

Ergebnisse des Entscheidungsfindungsprozesses

NAIADE-Dendrogramm der Koalitionsbildung für die Akteure



Schlussfolgerungen

- Es wurde ein **Prototyp** erstellt, mit dem **komplexe Zusammenhänge behandelt** werden können.
- Durch eine gekoppelte Boden- und Grundwassertransportmodellierung ist der **interkompartimentelle Wasser- und Stofffluss** beschreibbar geworden.
- Durch die kombinierte Anwendung von Methoden der inversen und stochastischen Modellierung wurden Möglichkeiten der **Verminderung der Informationsdefizite** bzgl. landwirtschaftlicher Daten aufgezeigt.
- Das Ziel, die **Integration** von hydrogeologischen Erkundungsmethoden, numerischen Modellen und sozio-ökonomischen Aspekten zu einem **multikriteriellen Entscheidungshilfswerkzeug**, konnte erreicht werden.

Ausblick

- **längere** Aussagezeiträume und **größere** Untersuchungsräume testen
- **Mehrfachnutzungen** verschiedener Wasserressourcen & Nachhaltigkeit - **Zielformulierung** möglich?
- konkrete Untersuchungen zur **Übertragbarkeit, Akzeptanz und interdisziplinären Kooperation**
- **Verringerung** der Modell-Unsicherheiten durch verbessertes Monitoring, Parametrisierung & Kalibrierung

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

