



# Hochwasservorhersage, Großhangbewegungen, Schadstofftransport

## IMAF-relevante Projektbeispiele und Vorhaben am Institut für Geoökologie

Erwin Zehe, Axel Bronstert, Sybille Itzerott, András Bárdossy, Jürgen Ihringer

# Gliederung

- OPAQUE: Operationelle Abfluss- und Hochwasservorhersage in Quellgebieten.
  - Axel Bronstert, Erwin Zehe



- DFG-Forschergruppe FOR 581: Kopplung von Strömungs- & Deformationsprozessen zur Modellierung von Großhangbewegungen
  - Erwin Zehe, András Bárdossy

- Stofftransport Feldskala



# OPAQUE: Ziel

## Ziele + Projektpartner

- Verbesserte Operationelle Hochwasservorhersage in Quellgebieten
- HW-Management durch angepasste Talsperrensteuerung
- Weißeritz, Iller, Donau

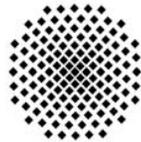
Universität Potsdam



Bayerisches Landesamt  
für Wasserwirtschaft



Universität Stuttgart



Landesanstalt für Umweltschutz  
Baden-Württemberg  
Hochwasser-Vorhersage-Zentrale



Landestalsperrenverwaltung  
Freistaat Sachsen

Geoforschungszentrum  
Potsdam



Dr.-Ing. K. Ludwig  
Beratender Ingenieur



Potsdam-Institut für  
Klimafolgenforschung



Landesamt für Umwelt  
und Geologie Sachsen  
Landeshochwasserzentrum



# OPAQUE: Problemstellung

Hochwasser in Quellgebieten

- Hohe Reliefenergie, extrem schnelle & heftige Gebietsreaktion (1h)

Essentiell für Vorhersage

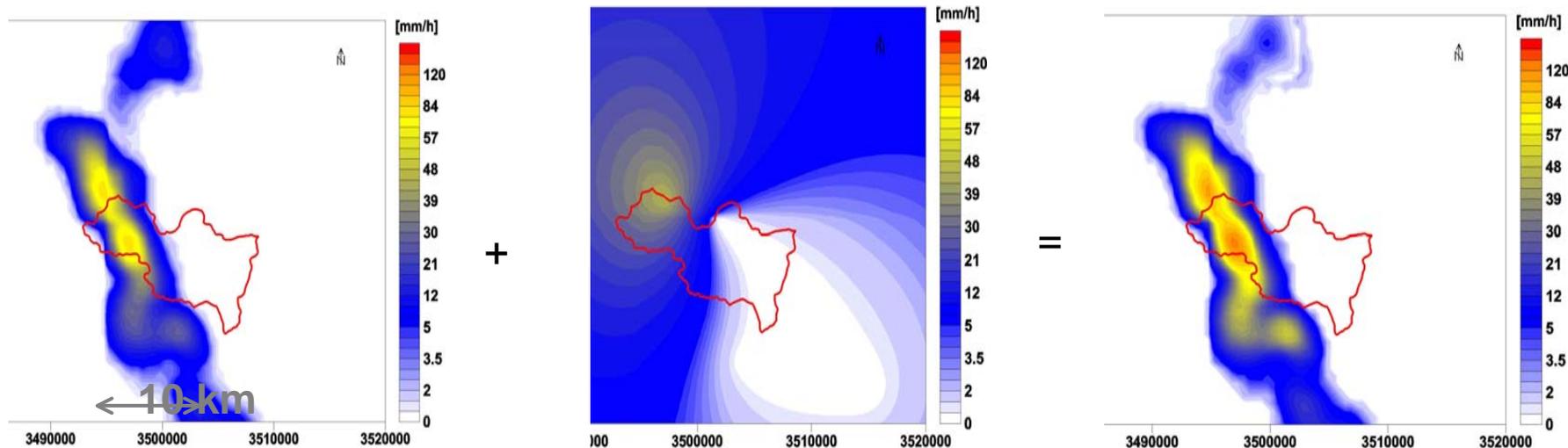
- raum-zeitliches Muster des Niederschlags (Ehret, 2002; Zehe et al., 2005)
  - DWD Vorhersagen zu ungenau (räumlich & Menge)
- räumliches Muster Anfangsbodenfeuchte (Zehe & Blsöchls, 2004, Meyles et al., 2004)
  - Bodenfeuchtedaten nicht operationell



# OPAQUE: Herangehen

Raum-zeitliches Muster des Niederschlags????

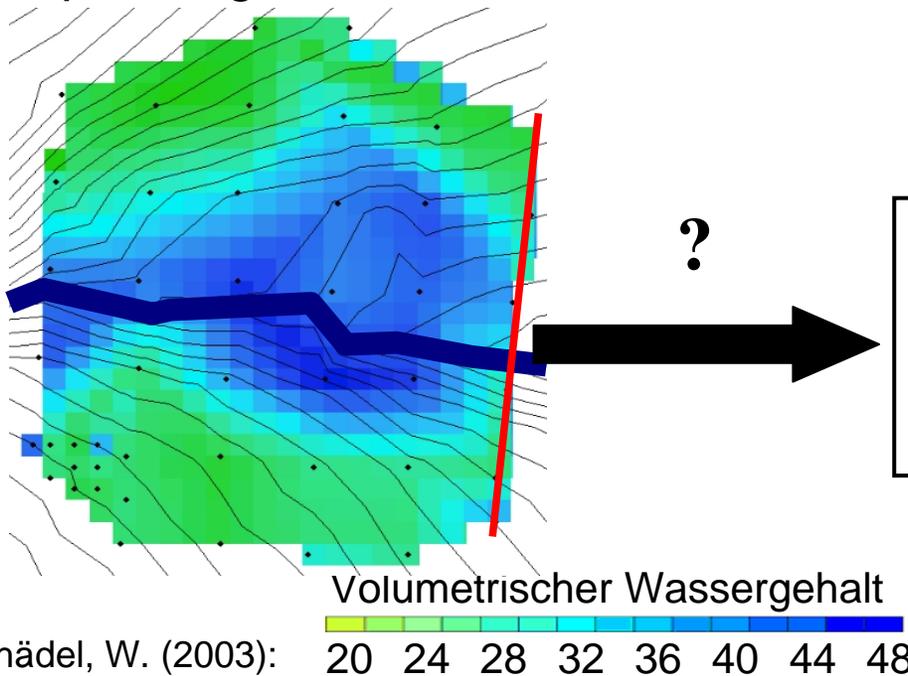
- DWD Flächendeckendes Netz, Link zwischen Niederschlagsintensität & Reflektivität
- Geostatistische **Kombination** von Bodenbeobachtung & Niederschlagsradar
  - Boden Mengeninformation, Radar Variabilität



# OPAQUE: Herangehen

## Raum-zeitliches der Bodenfeuchte

- **Kombination** Spatial TDR- Clustern (Schläger 2005, Becker, 2004 ), Geoelektrik & Satellitenfernerkundung + Hydrologisches Prozessmodell
- Upscaling auf Gebietskala, Assimilation im Vorhersagemodell?



### Vorhersagemodell

- Abstrahierte Prozessabbildung
- Empirische Parameter
- Abstrahierte Zustandgrößen

# OPAQUE: Schwierigkeiten?

## Ablauf der Hochwasservorhersage

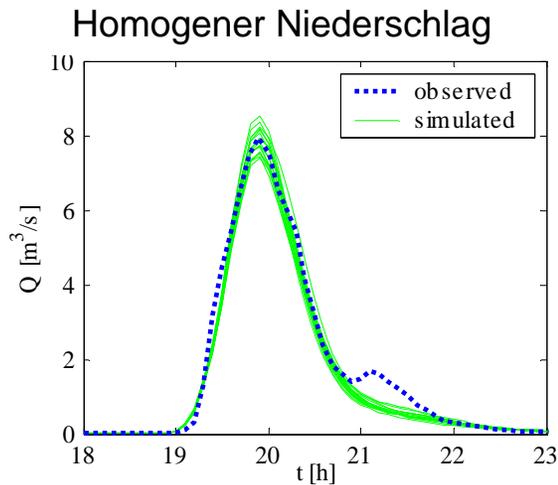
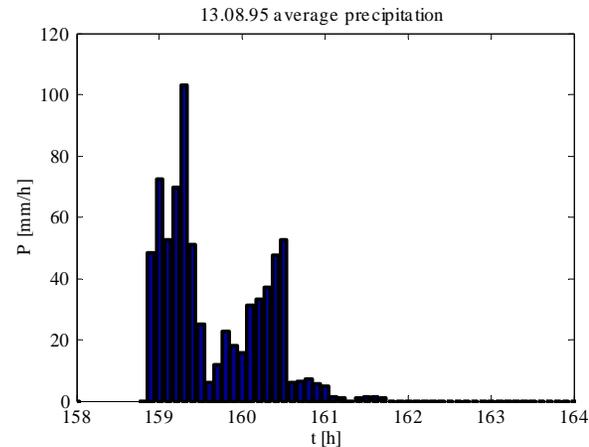
- Simulationsmodus: Parameteranpassung, Beobachtungen letzte 24 h
- Vorhersage auf Basis Niederschlagsvorhersage 6h

## Skalensprung

- Radar nur für den Simulationsmodus (500m)! DWD Vorhersage wesentlich gröber (2.5 km)!
- Downscaling der Vorhersage auf 500m?

# OPAQUE: Schwierigkeiten?

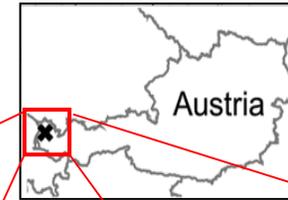
- Verbesserter Input bedeutet nicht notwendig verbesserte Abflussvorhersage, Beispiel (Zehe et al, 2005)
- Umstricken der operationellen Vorhersagemodelle!



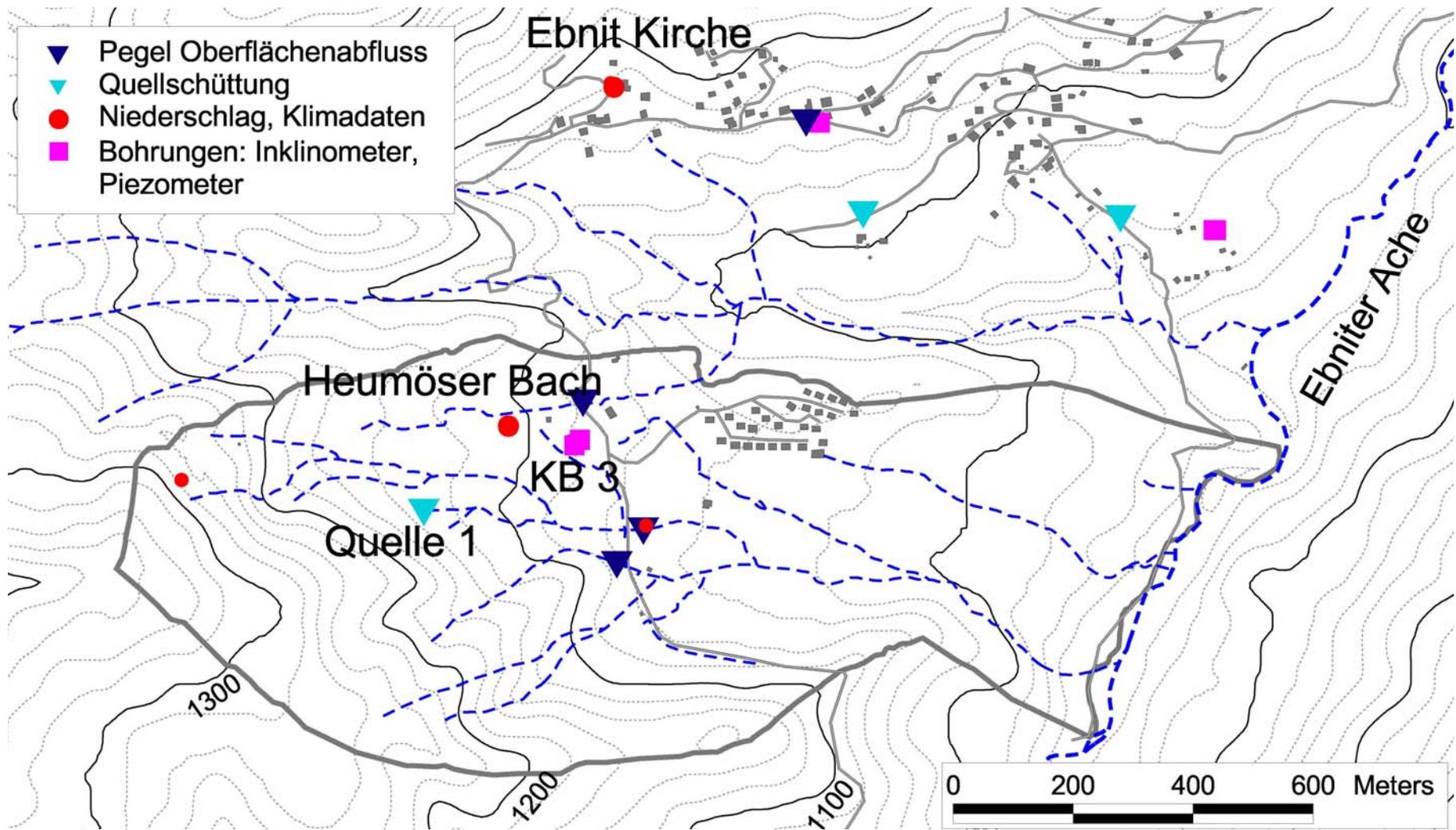
# Modellierung von Großhangbewegungen

## DFG-Forschergruppe FOR 581

- Hydrologie: Geoökologie Uni Potsdam
- Untergrundhydraulik: Hydroinformatik FU Berlin
- Deformation: Mechanik, TU Stuttgart



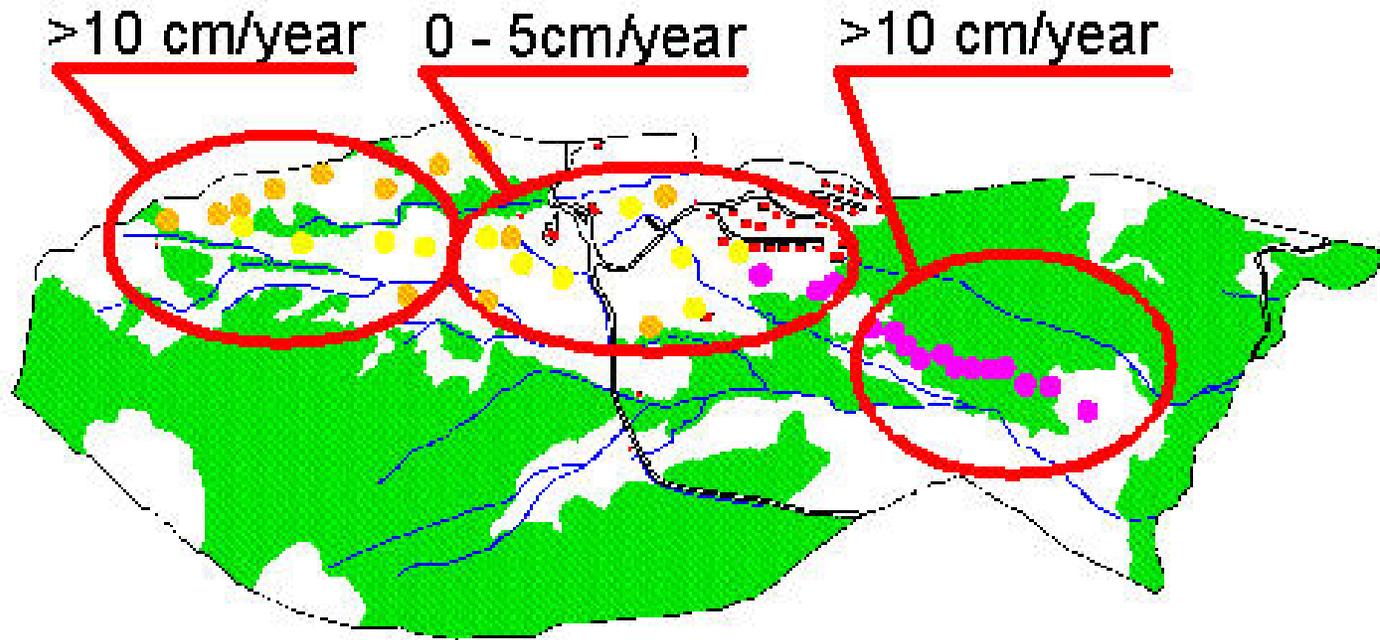
# Heumöser Hang in Kriechbewegung



# Befunde aus Vorläuferprojekten

Kriechbewegung räumlich variabel

- GPS Punkte, Polygonzug
- unkorreliert mit langsamen hydrologischen Signalen
- Messintervall zu grob (3-6 Mon.)



# Indizien für Schwächungszone, Scherband 8m



Piezometer

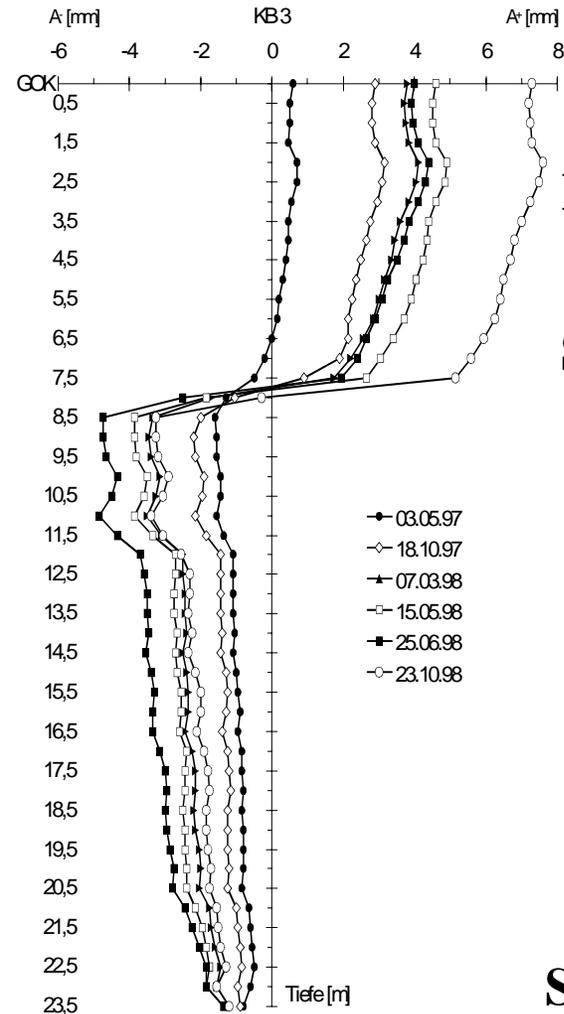
Piezometer

**Hanglehm**  
tonig-mergelig

**Hangschutt**  
locker gelagert,  
grobkörniger

**Grundmoräne**  
Rheingletscher,  
stark verdichtet

Übergang zum  
anstehenden  
Gestein?



**Kriechen ?**

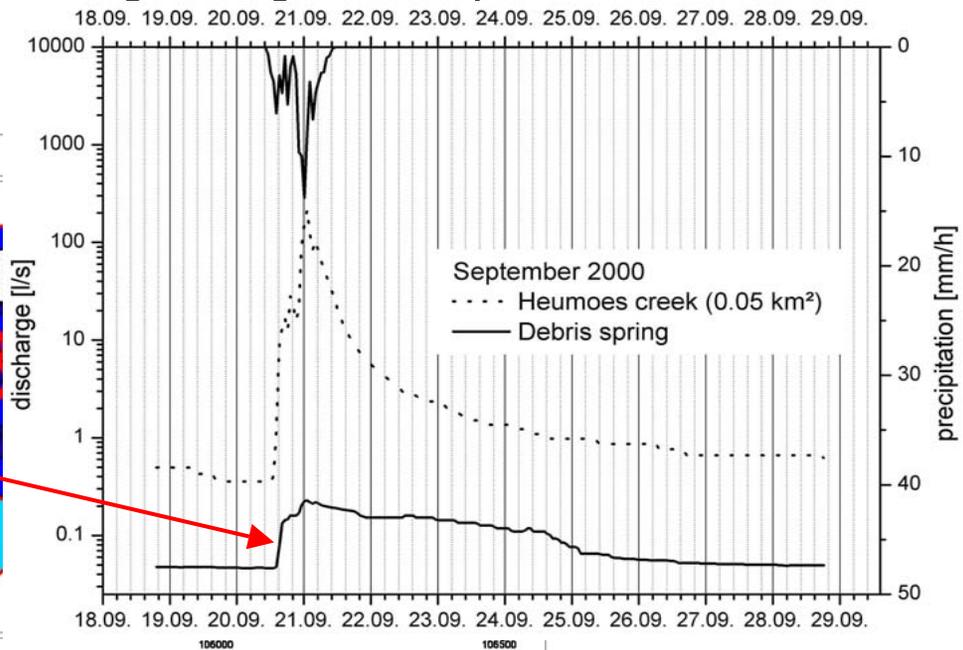
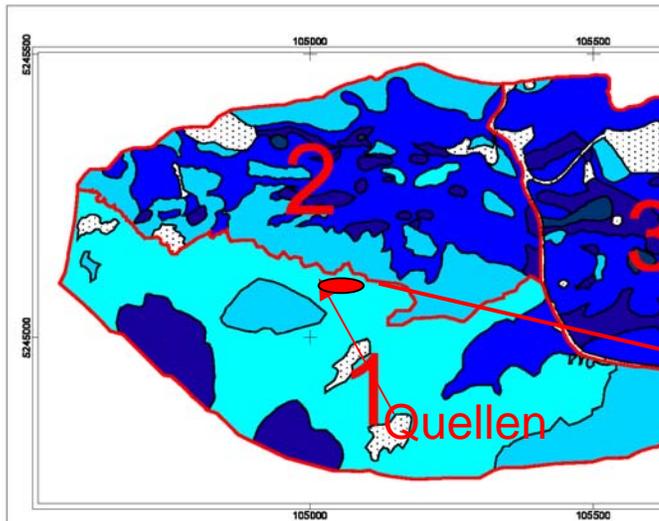
**Scherzone ?**

**Scherzone ???**

# Befunde aus Vorläuferprojekten

## Böden + Hydrologie

- Pseudogleye, stark stauend, Oberflächenabflusswirksam
- Ausnahme Südwest- Teil, flachgründig, makroporös, schnelle Infiltration



### Ökologische Feuchte

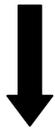
- frisch und mäßig frisch
- mäßig feucht und wechselfeucht
- feucht
- nass
- meist offenes Wasser/  
Moor
- gestört
- Grenzen der Teilgebiete

# Prozesshypothese

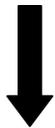
## Arbeitshypothese

(Lindemaier et al., HP 2005)

- Infiltration/Makroporen

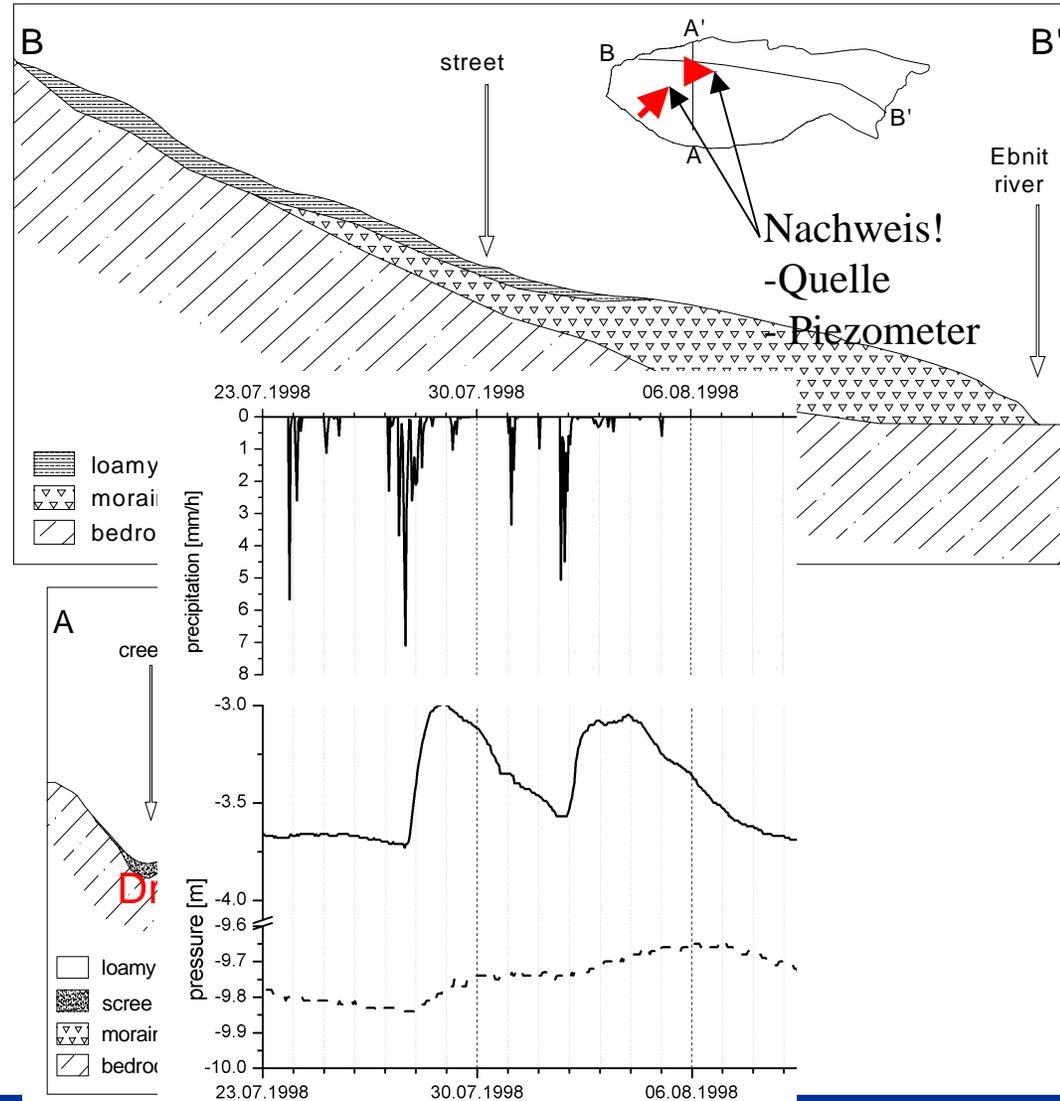


- Drucksystem, Schwellenwert



- Auftrieb/Kriechen

- Rutschkörper ca. 8m

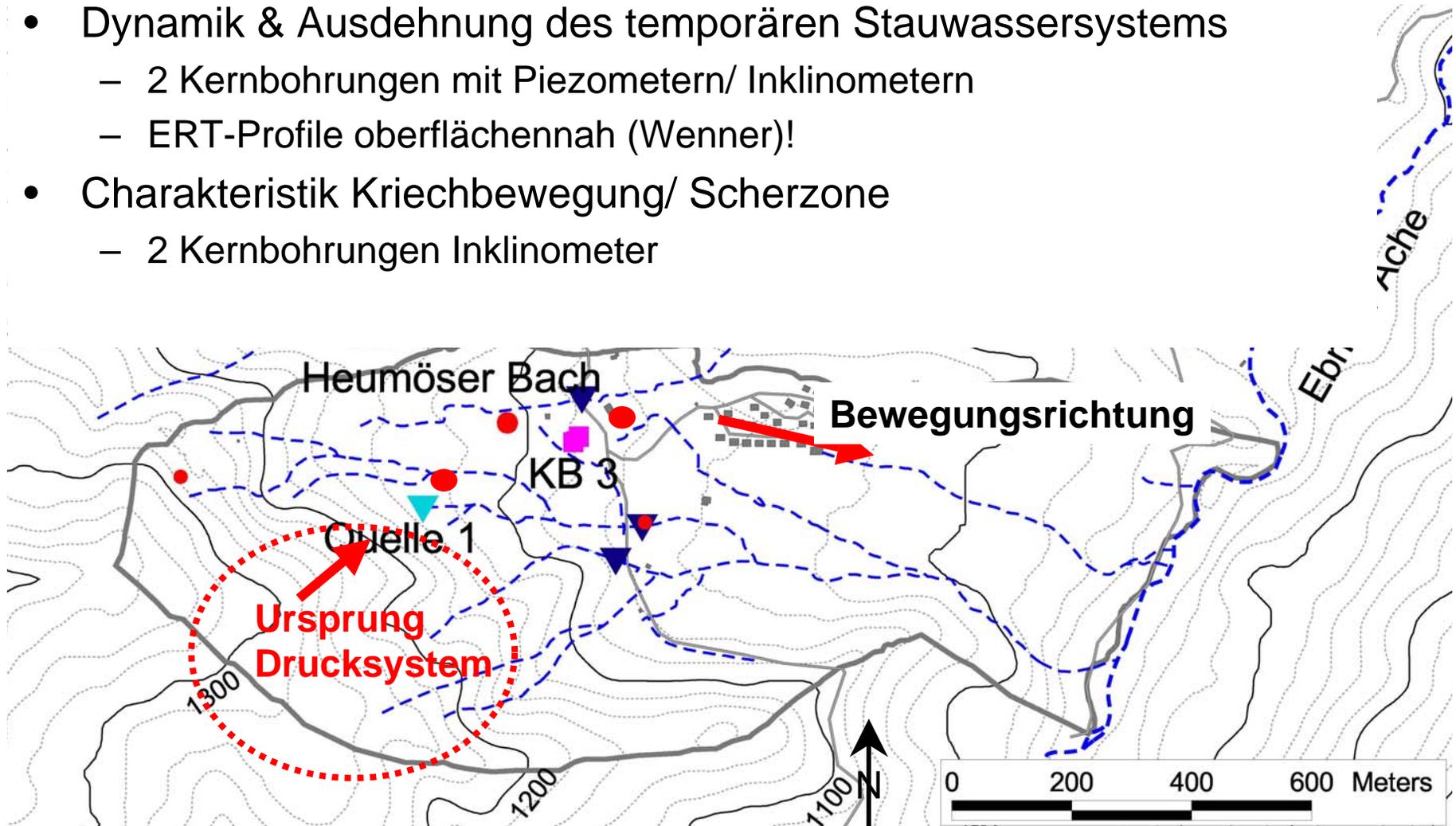


# Zielsetzung innerhalb der Forschergruppe

- Weitere Prozessaufklärung/ Prüfen der Prozesshypothese
  - Dynamik und Ausdehnung Drucksystems
  - Raum-zeitliches Muster Infiltration & Bodenfeuchte
  - Zeitskale/Charakteristik der Kriechbewegung
  - Mächtigkeit Rutschkörper?
- Schätzung von Parameterfeldern für Modellierung
  - Bodenhydraulik, Makroporen,
  - Geometrie Schwächungszone,
  - Schichtung ...

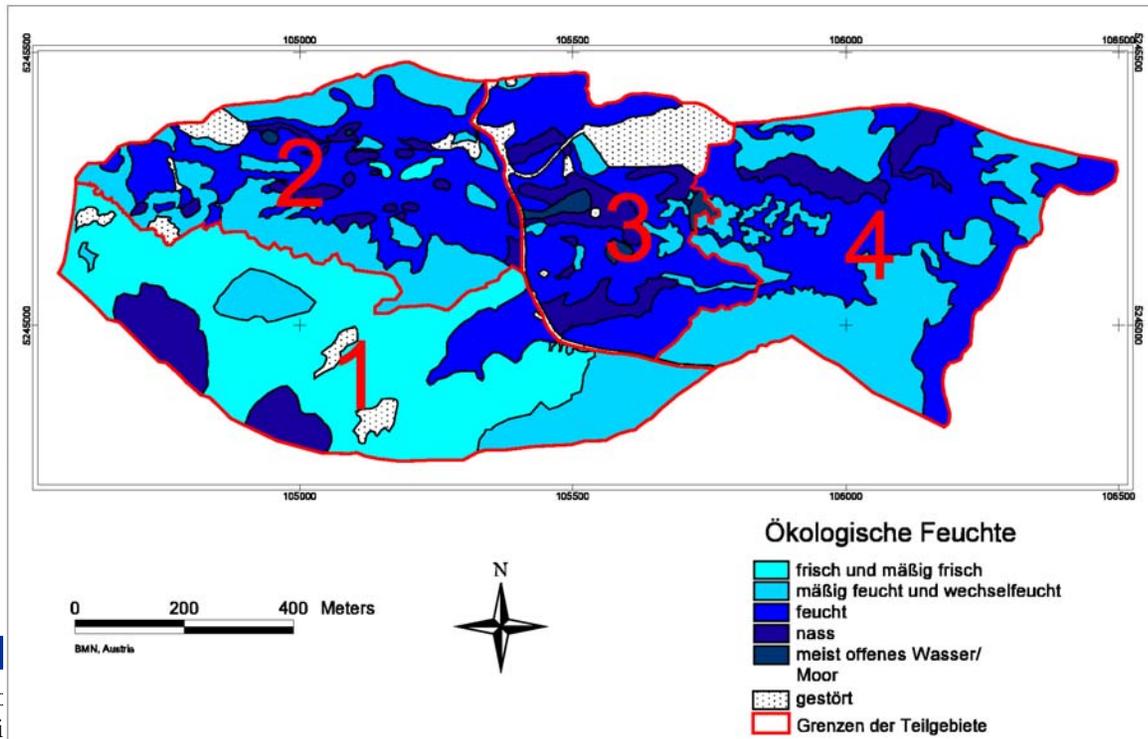
# Untersuchungsprogramm: Prozessaufklärung

- Dynamik & Ausdehnung des temporären Stauwassersystems
  - 2 Kernbohrungen mit Piezometern/ Inklinometern
  - ERT-Profile oberflächennah (Wenner)!
- Charakteristik Kriechbewegung/ Scherzone
  - 2 Kernbohrungen Inklinometer



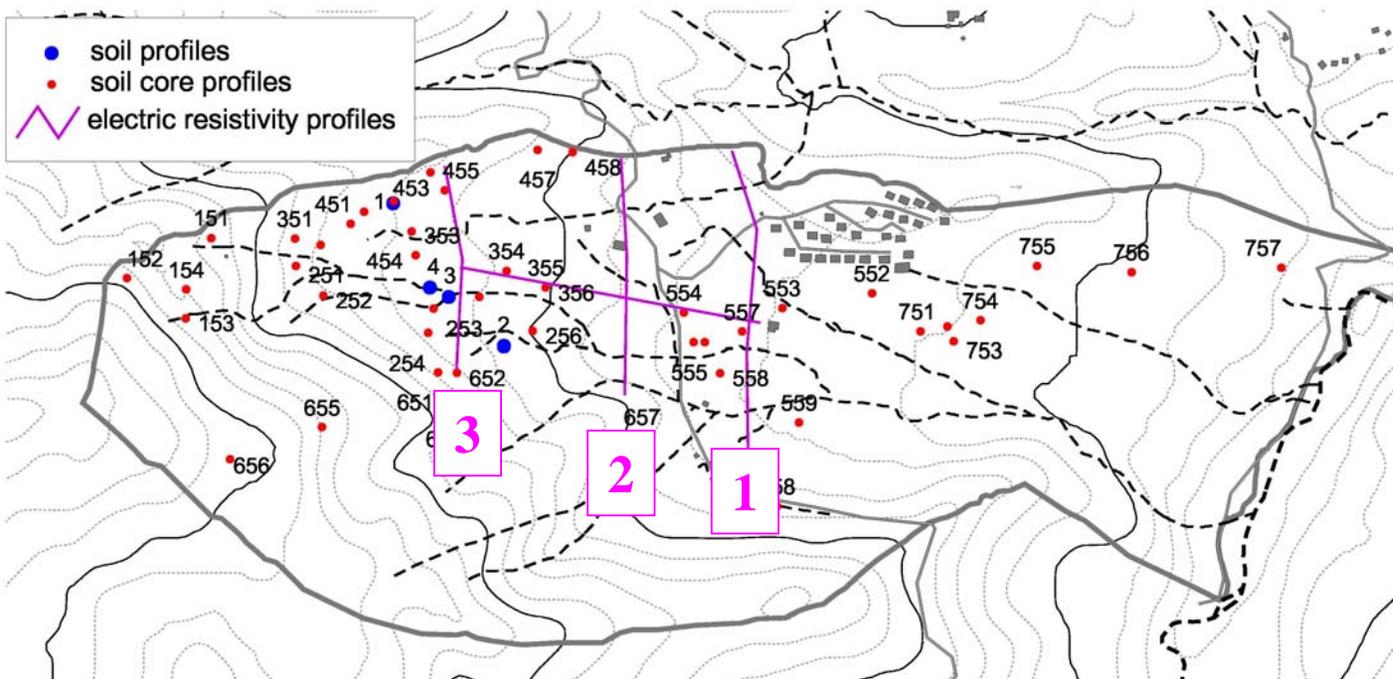
# Untersuchungsprogramm: Prozessaufklärung

- Raum-zeitliches Muster Infiltration & Bodenfeuchte
  - 2 Spatial TDR-Cluster Dynamik des Feuchteprofils an 80 Punkten (Schläger et al., 2005 HESS; Becker 2004)
  - ERT-Profile (hilfreich für Signalinversion)
- Sampling hinreichend dicht für geostatistische Auswertung
  - ERT als Drift?, Ökologische Feuchte als Zusatzinformation



# Untersuchungsprogramm: Parameterschätzung

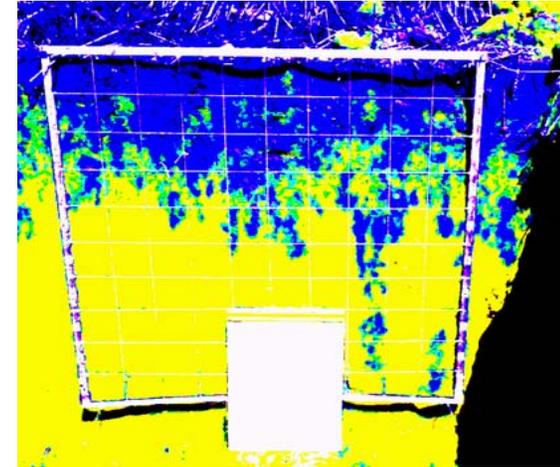
- Bodenhydraulische Parameter (8 Praktikanten)
  - Permeametermessungen (Bohrstockeinschläge), 2 Schürfe
  - ERT oberflächlich
- Räumliche Geometrie der Übergangsszone zwischen Hanglehm und Moräne
  - 15-20 Rammkernsondierungen, ERT
- Schätzung Parameterfelder mittels geostatistischer Methoden



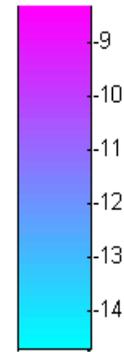
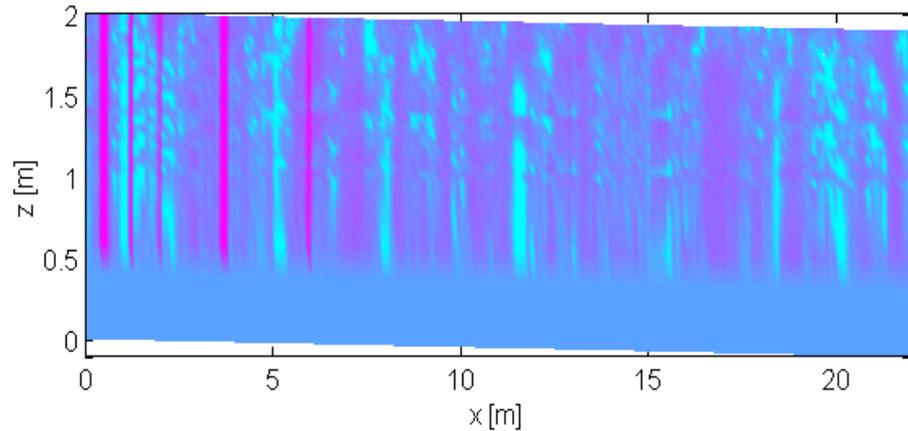
# Problematik: Stofftransport

Musik spielt auf kleinen Skalen (1 m)

- Heterogenität/Nichtlineare Dynamik
  - Präferentielle Fließwege,
  - Instationär Umlagerungen (Pflügen/ Fauna)
- Hohe Gradienten
  - Mikrobieller Aktivität, Nährstoffgehalt & Belüftung
  - Ton & Humusgehalt...
- Lebensdauer reaktiver Stoffe ändert stark tiefenabhängig
  - Klein Oberboden,
  - Hoch in Unterboden
- Kritisch sind kleine Verweilzeiten!



# Simulation des Herbizidtransports

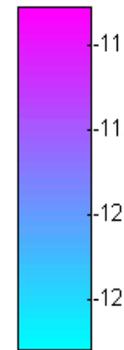
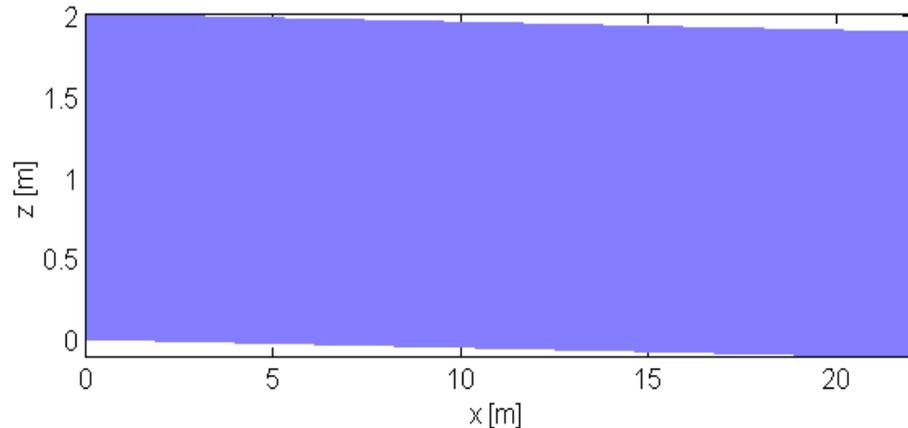


Berechnungsgebiet 400 m<sup>2</sup>, 1m tief

- Applikation von 250 g IPU
- Niederschlag/Klimainput
- Simulationsdauer 150 Tage

heterogenes/homogenes Medium

- Parameter/Makroporosität aus Feldmessungen
- Geostatistisch generiert



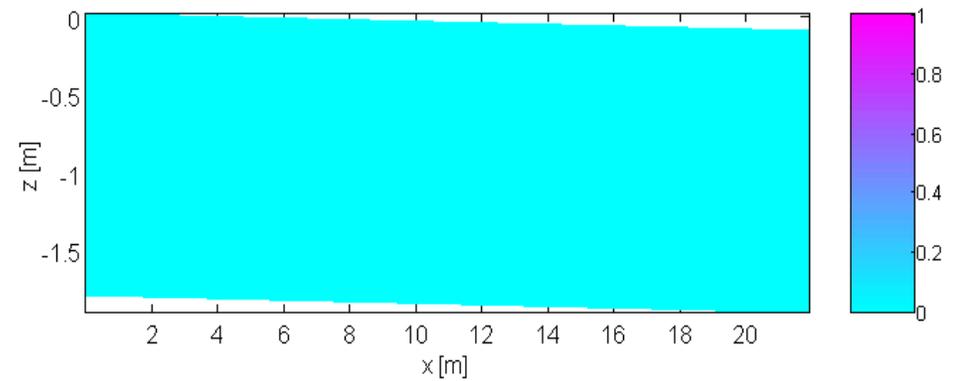
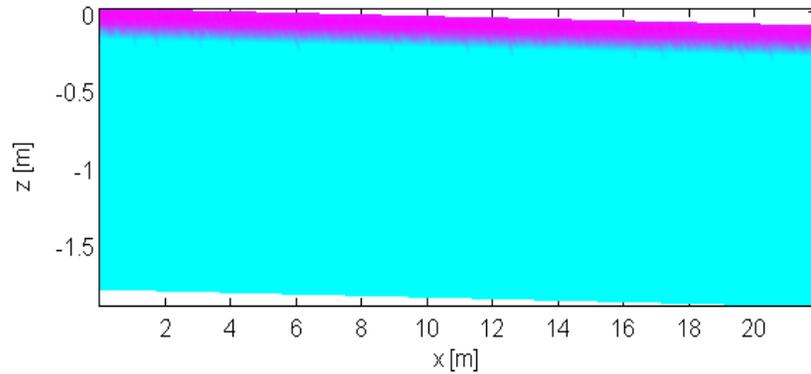
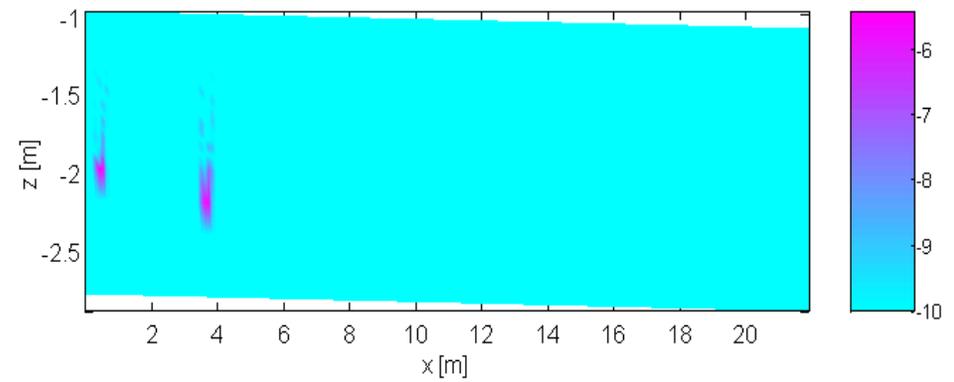
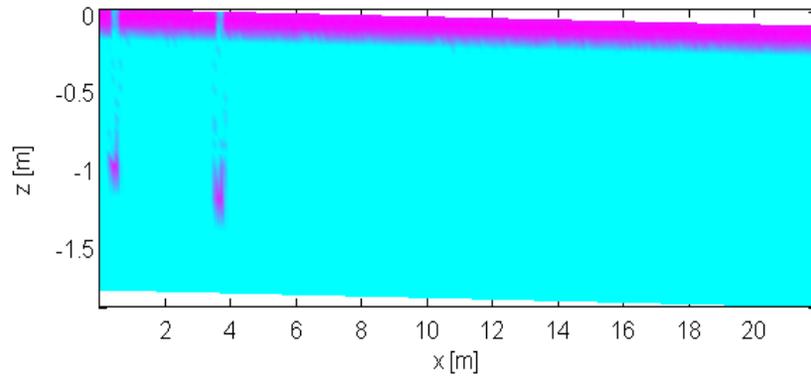
Abbau

- Schnell im Oberboden/Makroporen (15d)
- Langsamer im Unterboden (150d)

Adsorption

- $R=5$

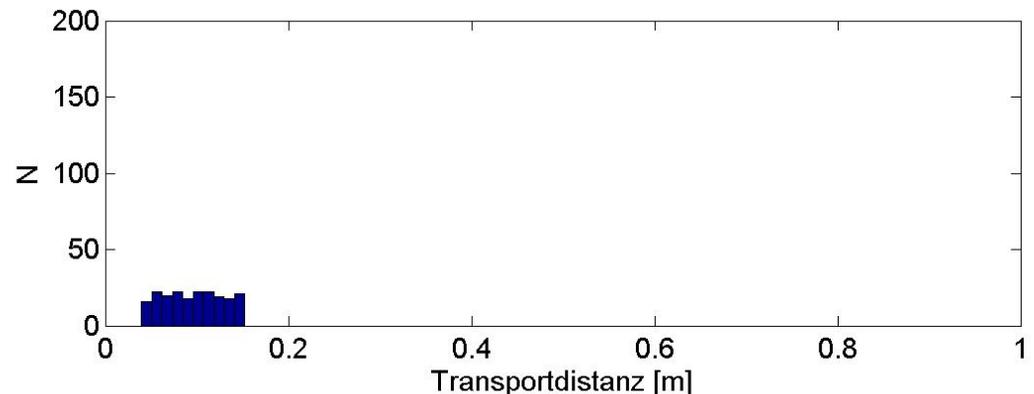
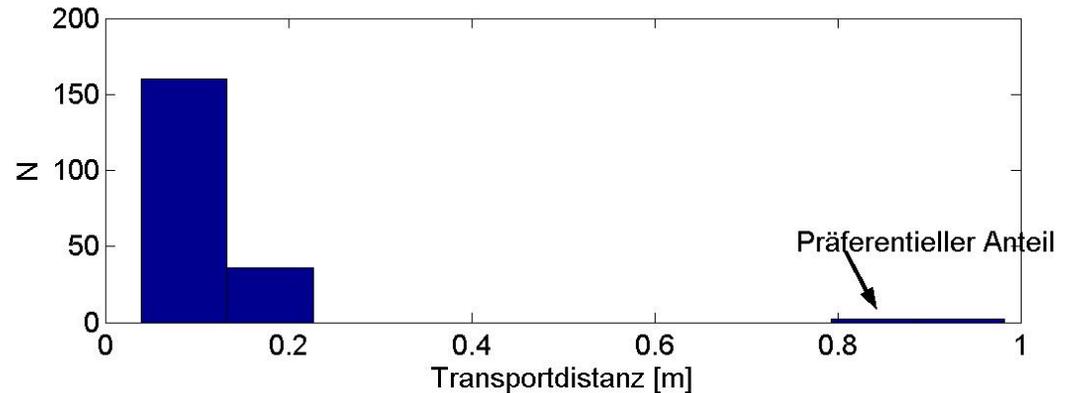
# Log C 1 Tag/ 150 Tagen



# Essenz präferentiellen Transport

## Bimodales Histogramm/Verteilung der Transporttiefe/Verweilzeiten

- Anteil mit kurzer Verweilzeit ist kritisch
- Vorhersage auf Feldskala?

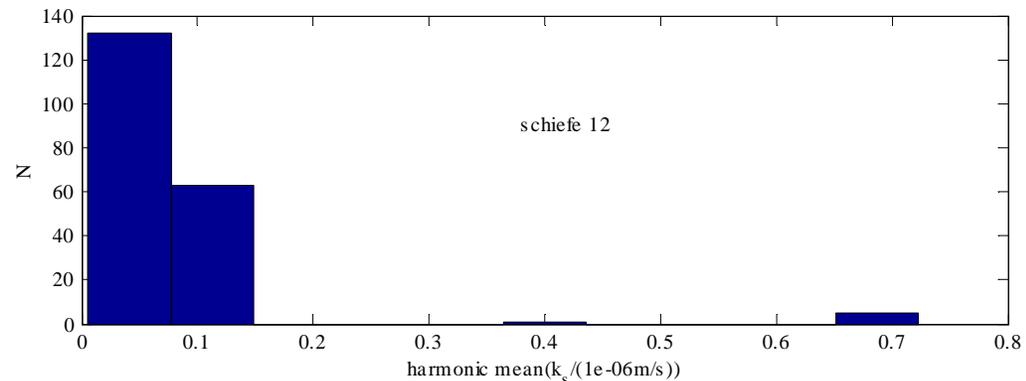
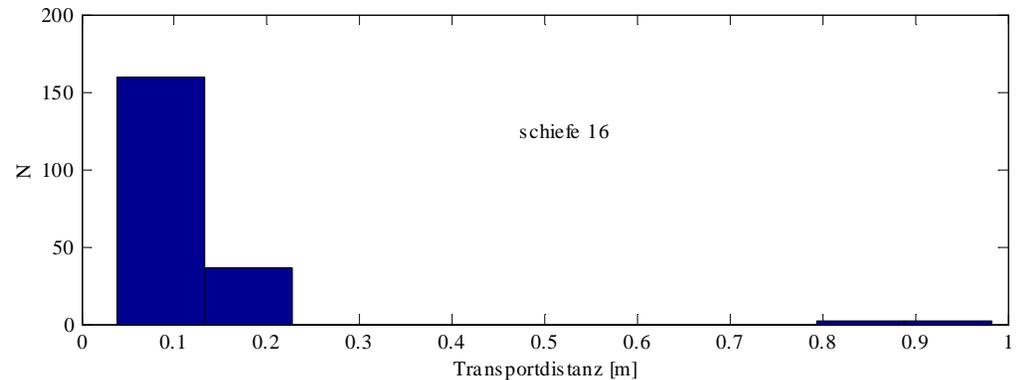


# Essentiell für präferentiellen Transport

Konnektivität (Zusammenhang) gut leitender Strukturen

- Einfaches Maß: Vertikales harmonisches Mittel, Histogramme sehr ähnlich!
- Essentiell: Identifikation Porenraumcharakteristik (Zehe et al., 2004; Vogel et al. 2005)
- Stochastisches Modell
- Nicht wo? Anteil!

$$har_{ks}(x) = \left( \frac{1}{D} \int_0^D \frac{z}{k(x, y, z)} dz \right)^{-1}$$



# Wozu IMAF?

## Gewünscht

- Raum-zeitliche Dynamik Felde z.B. Niederschlag
- Strukturinformation

## Chance

- **Kombination** nicht invasiver Verfahren/Fernerkundung mit lokal genauen Beobachtungen & Modellen & Geostatistik &....
- Plattform für Interdisziplinäre Projekte: Wechselwirkung Biotik/Abitotik
  - Schröder/Zehe DFG Antrag Mosaik-Landschaftsmodell

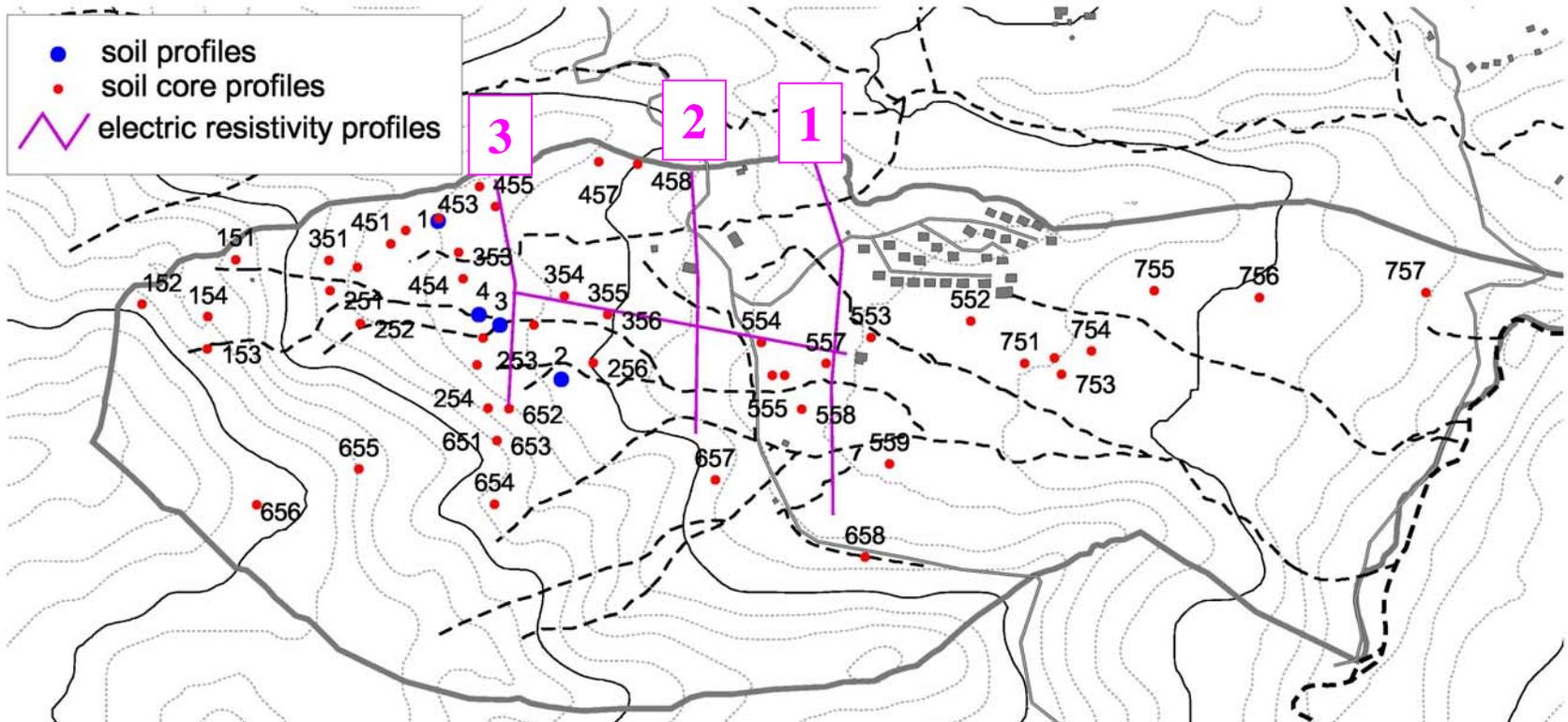
## Unser Beitrag/ Expertise

- Analyse/ Generierung räumlicher Muster, advanced geostatistics!
- Prozess& Landschaftsverständnis
- Prozessmodelle



Vielen Dank

# Erkundungen des Untergrunds



- 49 Bohrstockeinschläge (Horizontierung)
- 4 Schürfen (Durchlässigkeiten)
- erste Informationen über Mineralgehalt / Korngrößen
- geoelektrische Widerstandsmessungen

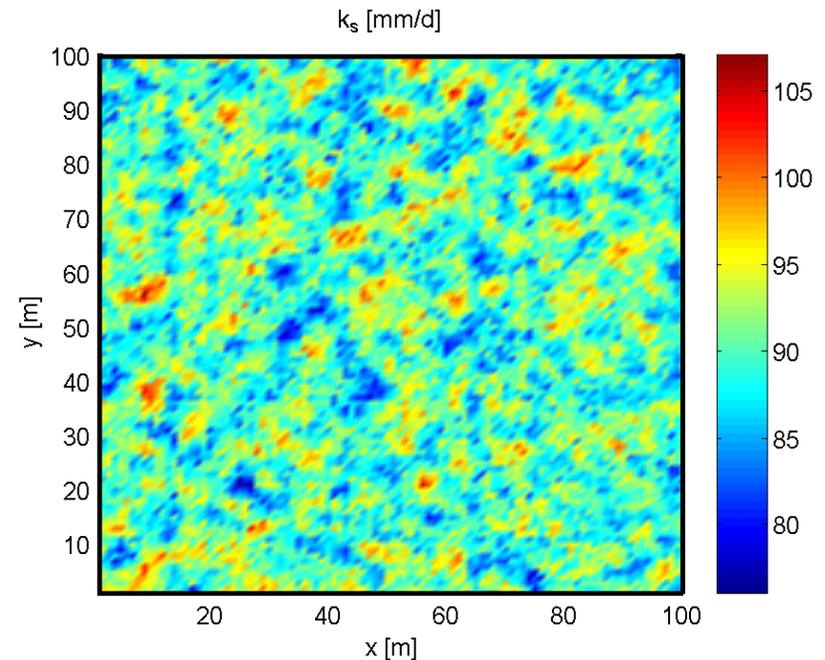
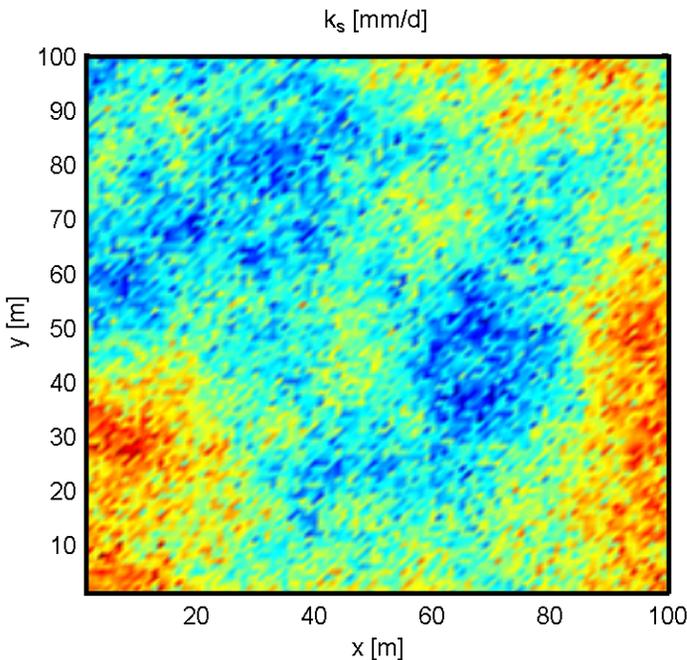
# Upscaling I: Charakterisierung von Struktur

Beispiel:

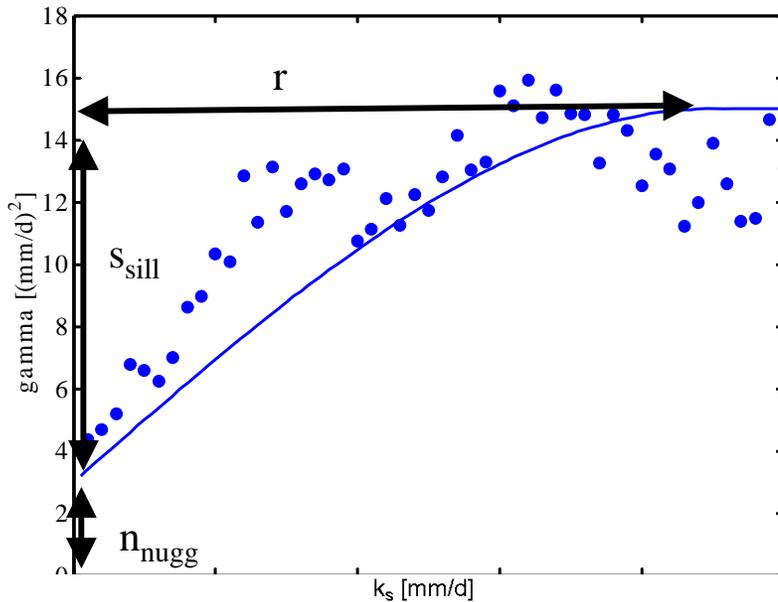
- Verteilung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit  $k_s$  im Raum, **Realisierung** einer räumlichen Zufallsfunktion

Charakterisiert durch

- Erwartungswert  $E(k_s)$ , Varianz  $\text{Var}(k_s)$ , gleich!
- Charakteristische Länge



# Upscaling I: Charakterisierung von Struktur



## Variogramm

- Experimentell

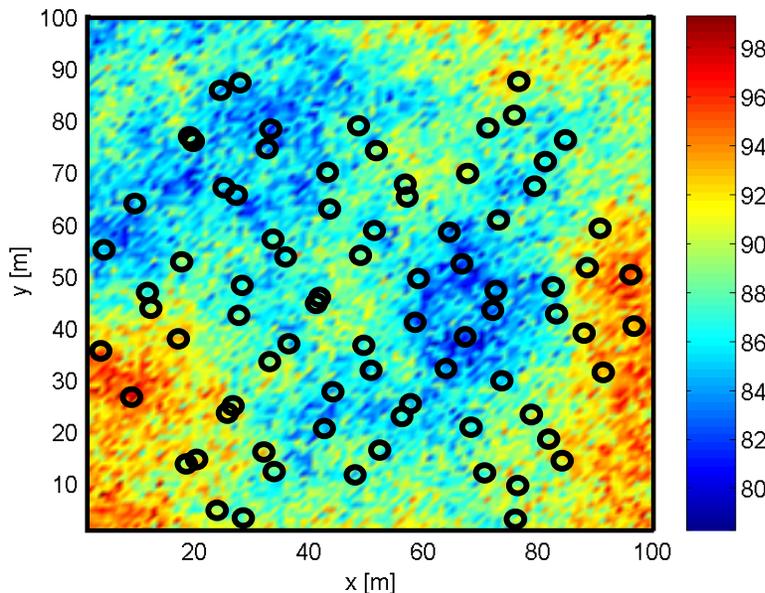
$$\gamma_{\text{exp}}(h) = \frac{1}{M(h)} \frac{1}{2} \sum_{i < j} (k_s(x_i, y_i) - k_s(x_j, y_j))^2$$

$M(h)$ : Anzahl der Punktepaare mit Abstand/lag  $h$

- Theoretisch: Spärlich, Gauß, exponentiell?

$$\gamma_{\text{teo}}(h) = n_{\text{nugg}} + s_{\text{sill}} \left( \frac{3h}{2r} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{r} \right)^3 \right) \text{ wenn } h < r$$

$$\gamma_{\text{teo}}(h) = n_{\text{nugg}} + s_{\text{sill}} \text{ sonst}$$



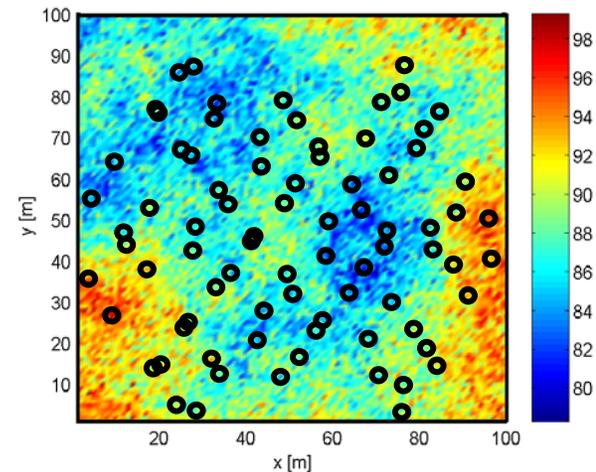
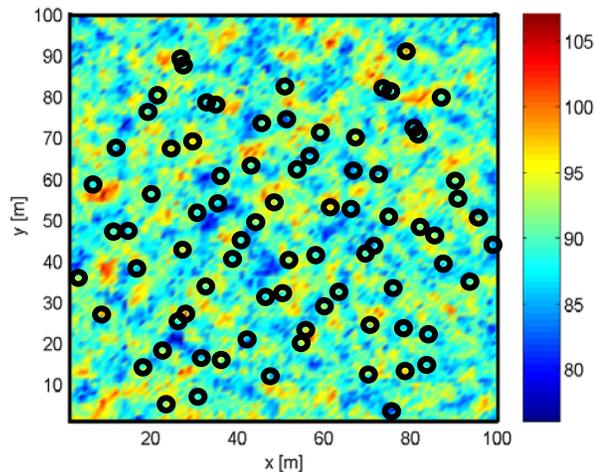
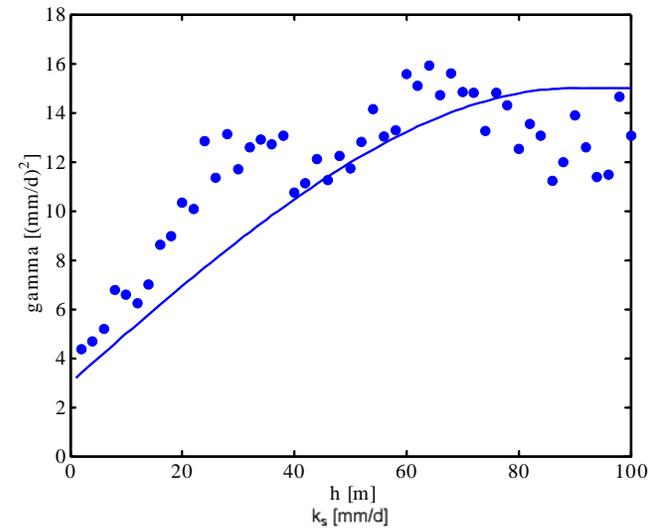
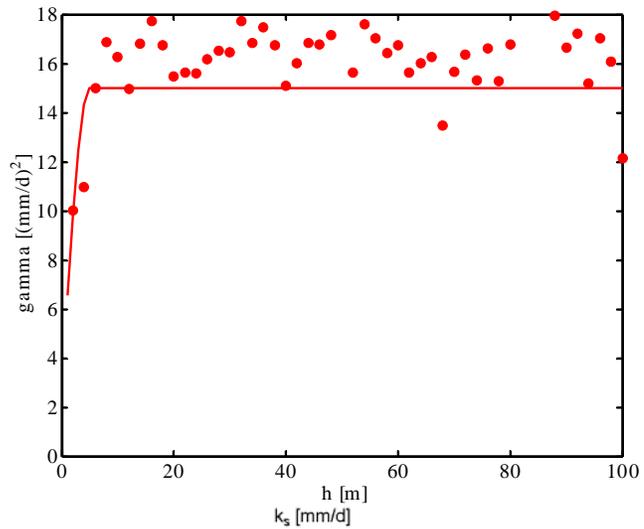
- Range  $r$ : charakteristische Länge
- Nugget  $n$ : Mikrovariabilität
- Sill  $s$ : Räumlich erklärbarer Anteil der Variabilität

$$n_{\text{nugg}} + s_{\text{sill}} = \text{Varianz}(k_s)$$

# Upscaling I: Charakterisierung von Struktur

Beispiel: virtuelle Feldmessung von  $k_s$ , Anpassung eines sphärischen Variograms

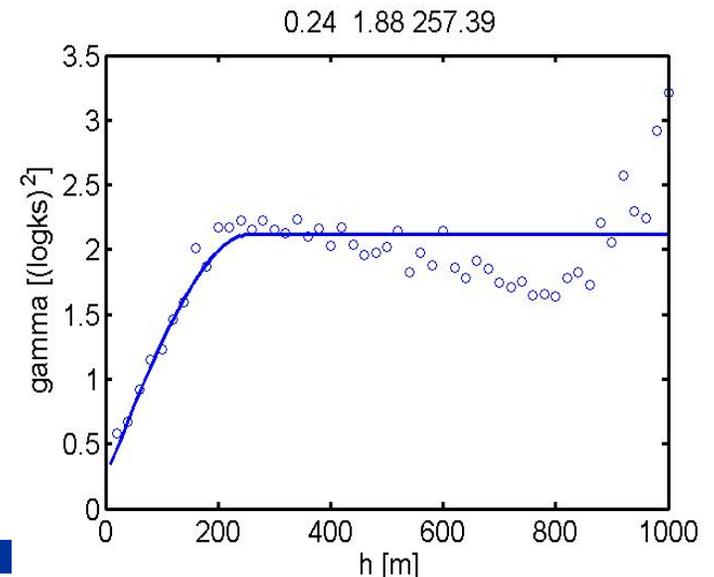
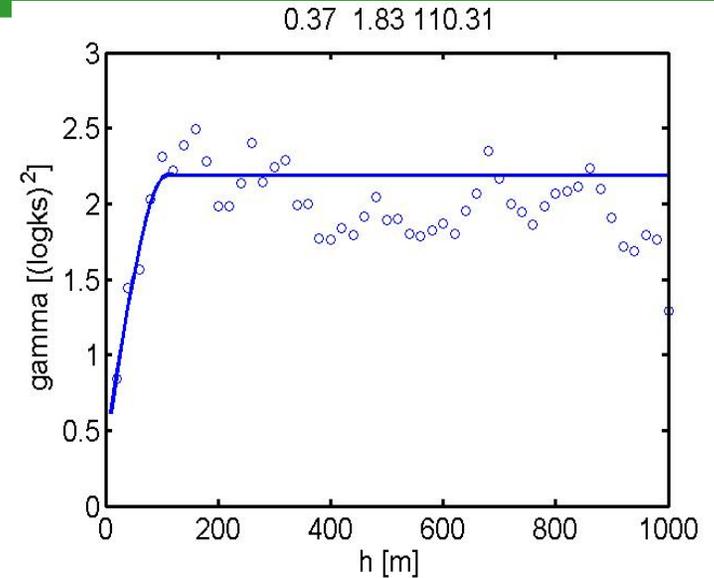
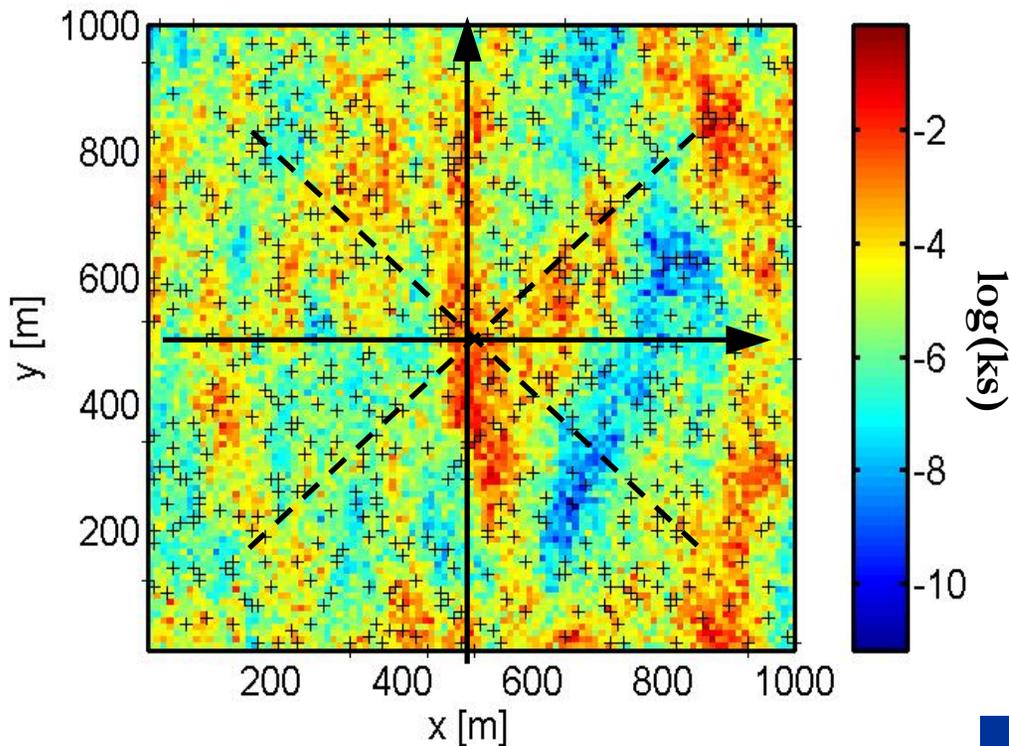
- nugget= 3, sill =12, range = 10m, 90m



# Upscaling I: Charakterisierung von Struktur

## Detektion von Anisotropie

- Richtungsabhängige Variogramme
- Beispiel: Anisotropes, log-normalverteiltes ks-Feld (Turning Band generiert)



# Upscaling II: Interpolation vom Punkt in die Fläche

## Ordinary Kriging OK (BLUE)

- Gegeben N Punktmessungen  $Z$  am Ort  $\mathbf{x}_i$
- Schätzwert der Zufallsvariable  $Z$  am beliebigen Ort  $x$  durch Linearkombination der Messungen

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i)$$

## Fordere

- Erwartungstreue

$$1 = \sum_{i=1}^N \lambda_i$$

- Minimale Schätzvarianz

$$Var(x) = E \left[ \left( Z^*(x) - Z(x) \right)^2 \right] = \min!$$

$$Var(x) = E \left[ \left( Z(x) - \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \right)^2 \right] = \min!$$

# Upscaling II: Interpolation vom Punkt in die Fläche

Satz linearer Gleichungen zur Bestimmung von  $\lambda_i$  und  $\mu$  für jedes  $x$

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_i - x)$$
$$1 = \sum_{i=1}^N \lambda_i$$

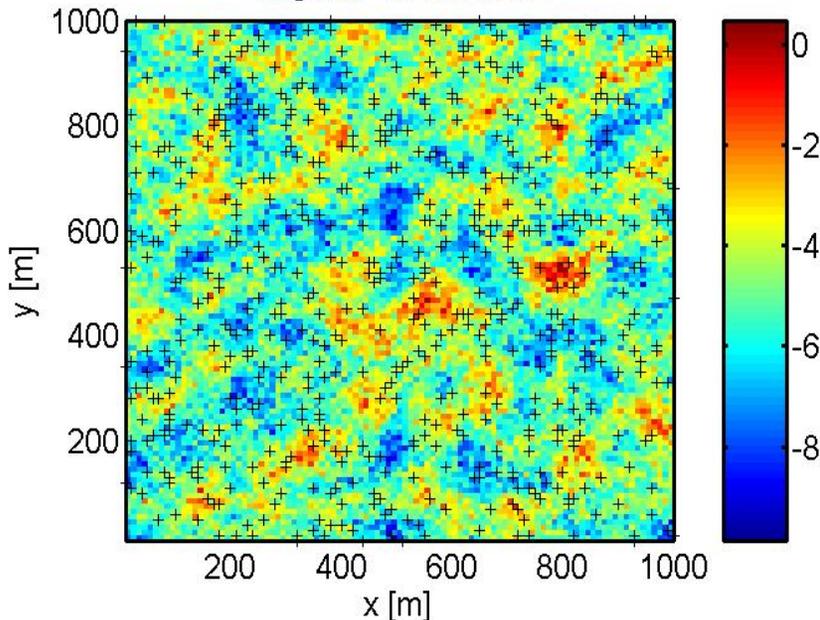
Variogram ist essentiell für Interpolation!!!

# Upscaling II: Beispiel: OK

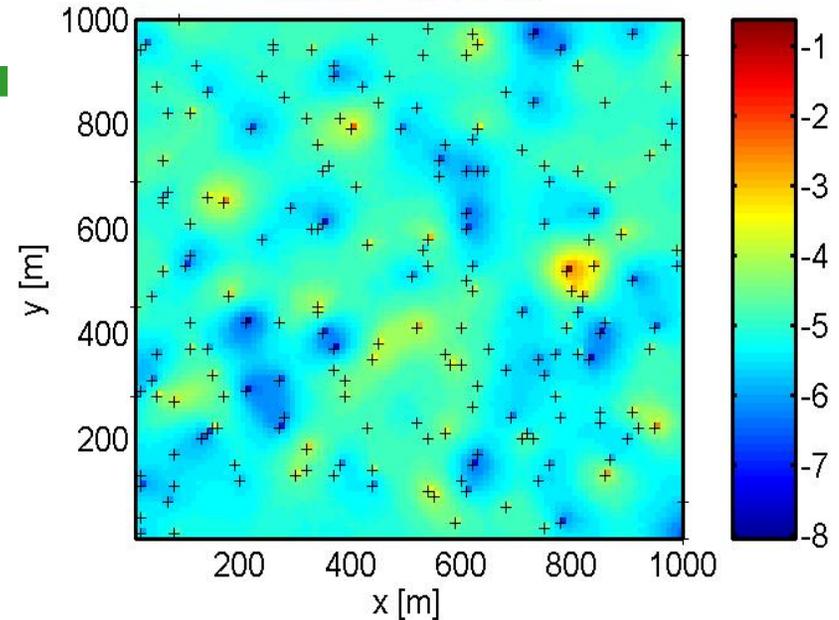
Isotropes, log-normalverteiltes  $k_s$ -Feld

- OK mit 200, 1000 Messpunkten
- Interpolation stark glättend
- Mittelwert dient als Schätzer weit entfernt von Messpunkten

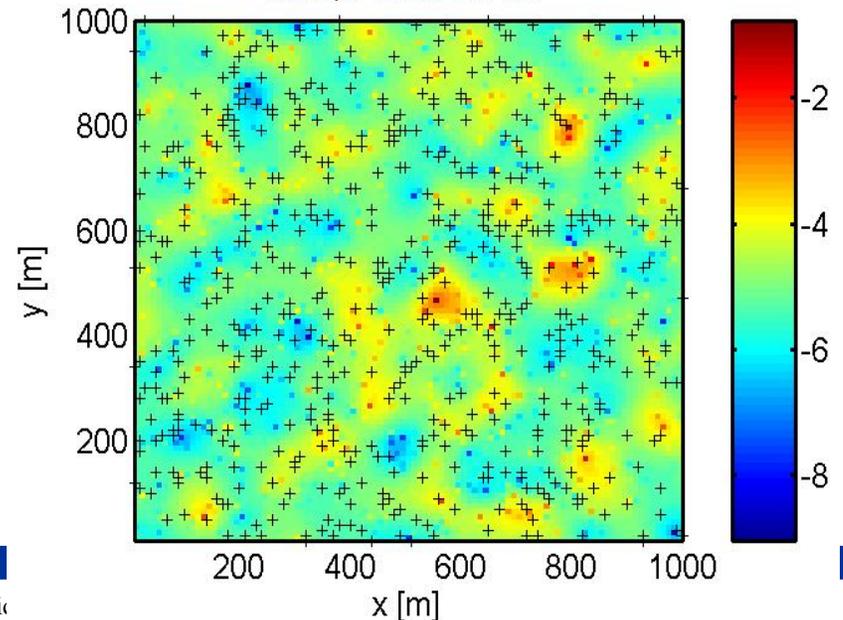
Original. 1.8768415.2



Interp. 0.1886115.2



Interp. 0.3874695.2



# Upscaling II: Interpolation vom Punkt in die Fläche

## Besser Interpolation: External Drift Kriging, **Simple Updating (SUK)**

- Zusätzlich zur Messgröße  $Z$ , liegt flächendeckend die Zusatzinformation  $L$  vor, z.B. Vegetation, Topographischer Index...
- Der Zusammenhang zwischen  $Z$  und  $L$  wird durch konditionierten Mittelwert & Standardabweichung beschrieben

$$E[Z(x)|L(x) = l] = m_l$$

$$\text{Var}[Z(x)|L(x) = l] = \text{var}_l$$

- Schätzung Linearkombination aus Krigingschätzer und Zusatzinfo

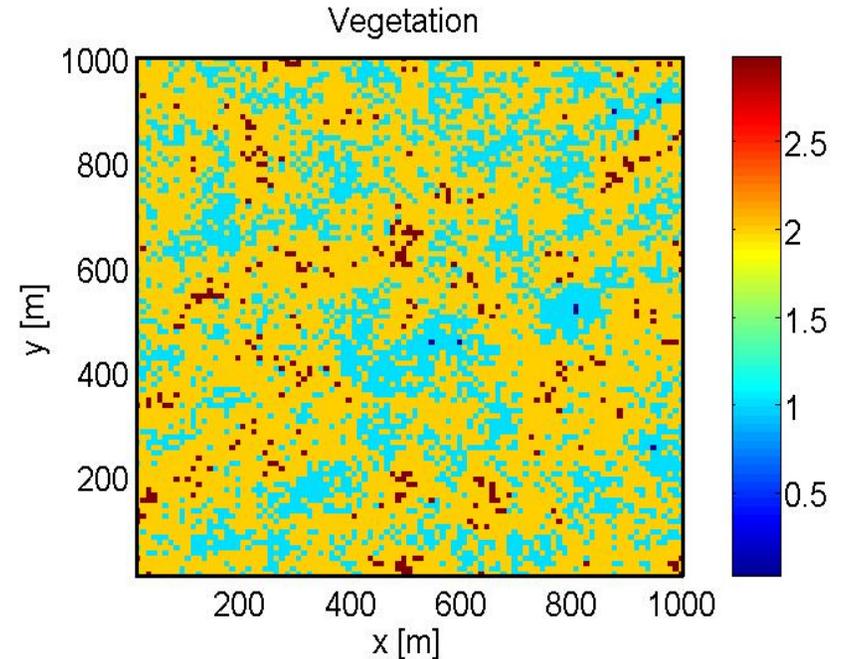
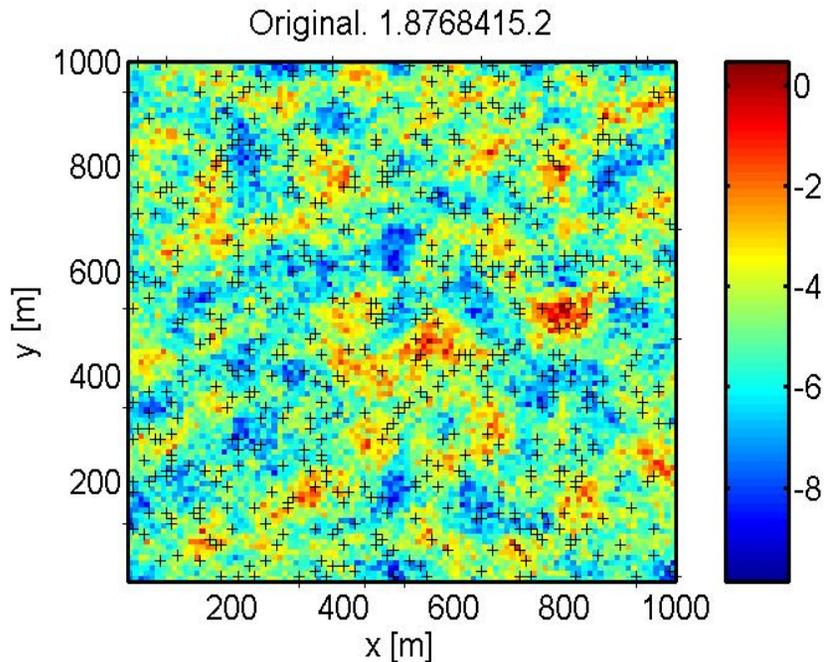
$$Z^*(x) = \lambda_0(m_{L(x)} + \varepsilon_{L(x)}) + \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i)$$

- Minimierung Schätzvarianz liefert lineares GS

# Beispiel: SUK

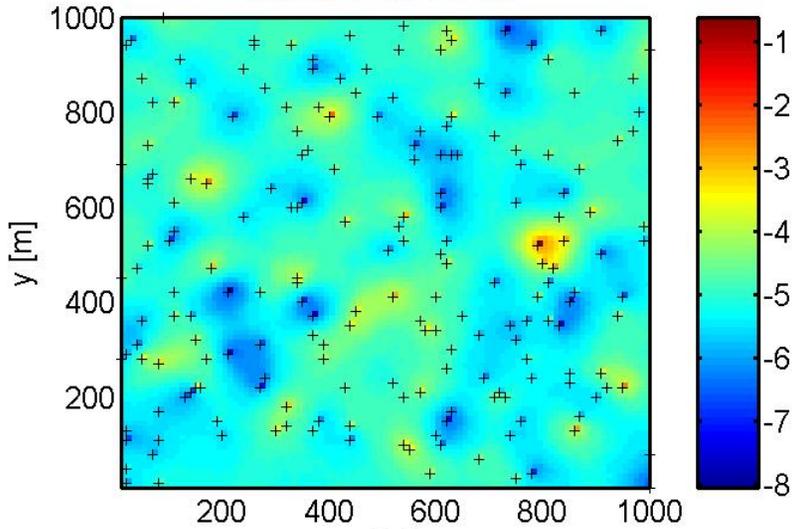
Beispiel: Isotropes, log-normalverteiltes  $k_s$ -Feld,

- Zusatzinformation Vegetation in 3 Klassen
- Interpolation mit 200 Messpunkten, Ok & SUK

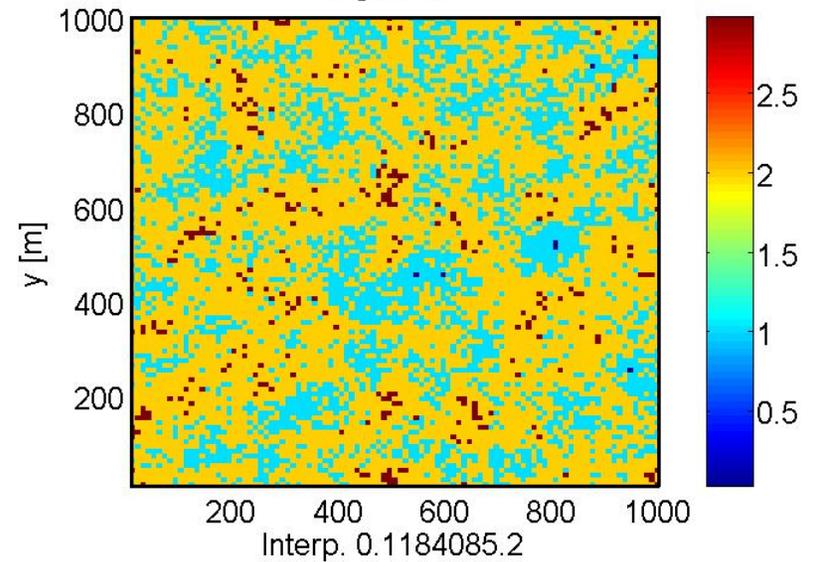


# Beispiel: SUK

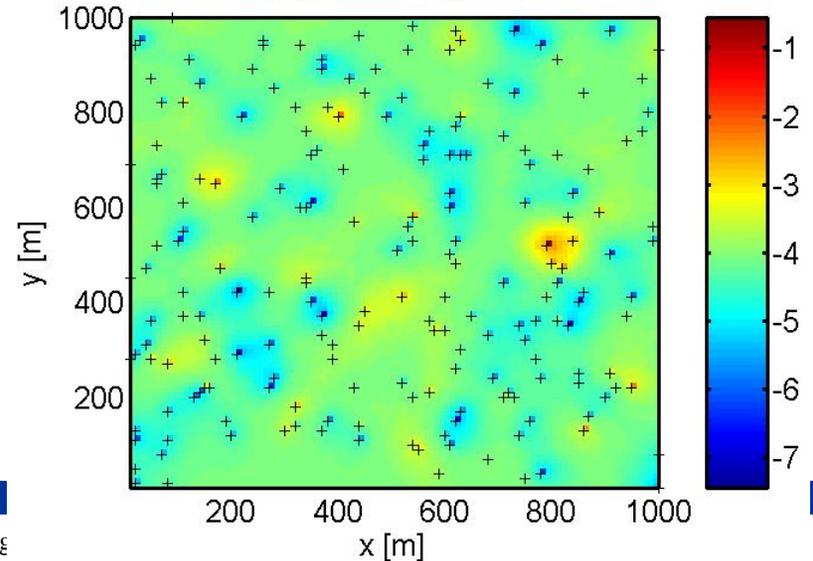
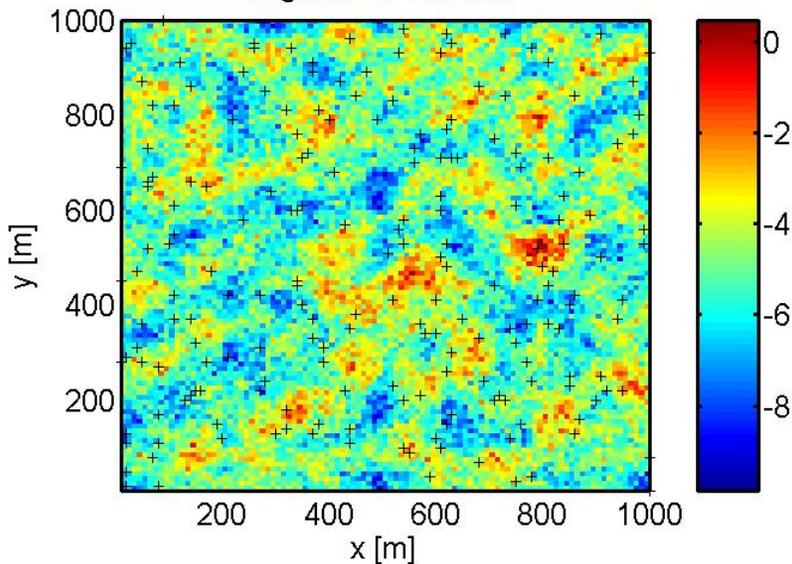
Interp. 0.1886115.2



Vegetation



Original. 1.8768415.2



# Upscaling II: Vom Punkt in die Fläche durch Simulation

Interpolationsverfahren sind stark glätten

- Kritisch für die Modellierung

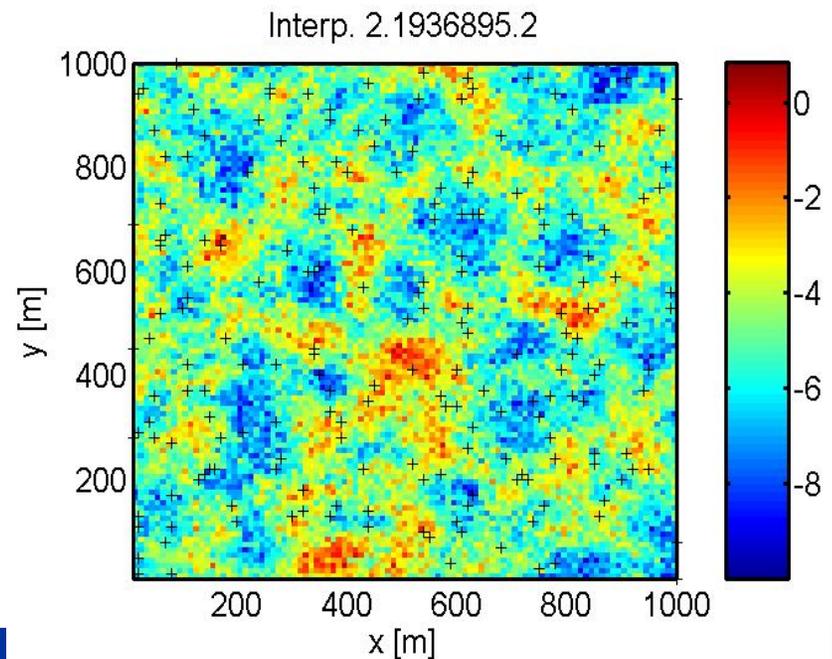
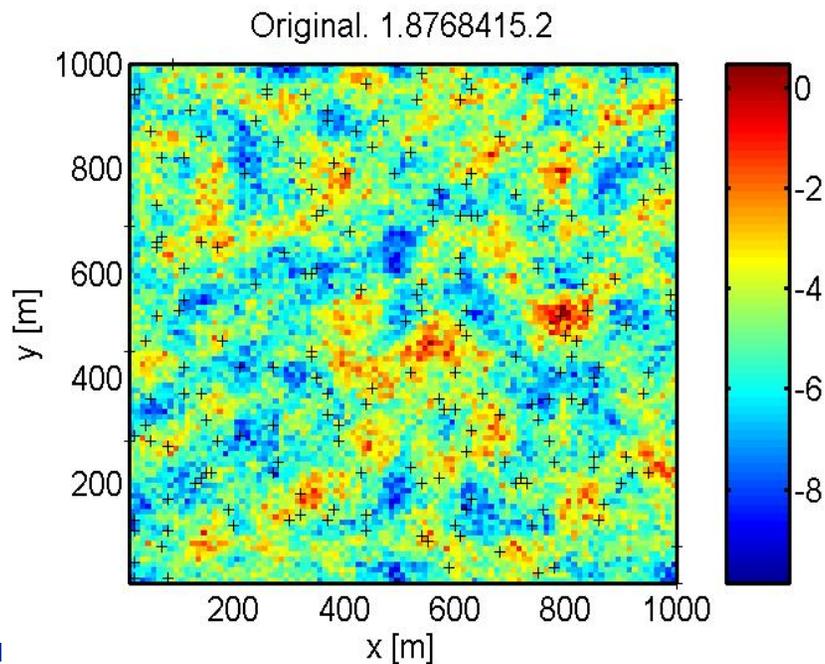
Konditioniertes Turning-Band Verfahren (Bardossy, 2001; Brás & Rodriguez-Iturbe, 1985; Brooker, 1982, Zehe et al, 2005)

- Erhält die Varianz und das Variogramm!
- Reproduziert die Messwerte an den Beobachtungspunkten
- Zusatzinformation kann berücksichtigt werden

**Methode der Wahl**

# Beispiel: Konditionierte Turning Bands

- Isotropes, log-normalverteiltes  $k_s$ -Feld, 200 Messstellen
- Gleicher Mittelwert, Varianz und Variogram wie die Beobachtung,
- Messwerte an den Beobachtungspunkten werden getroffen



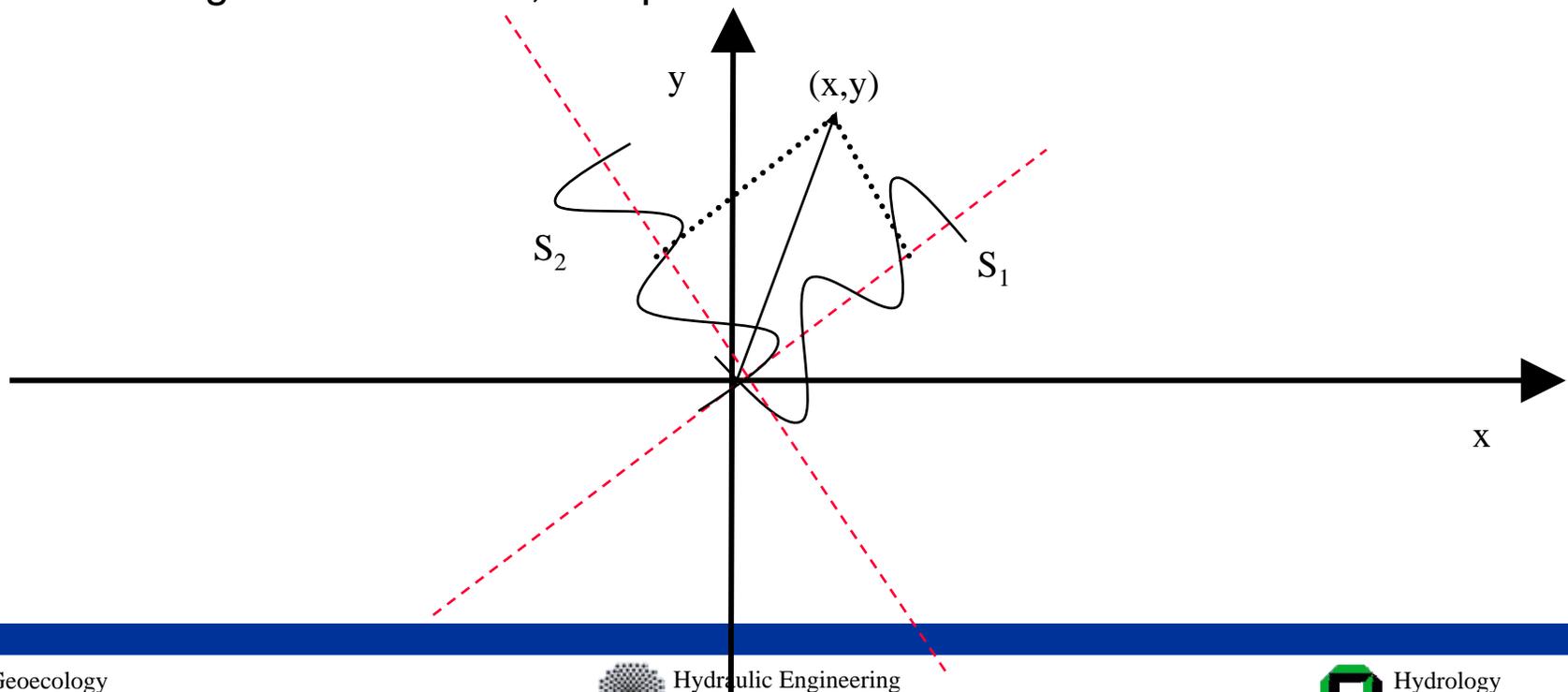
# Upscaling II: Vom Punkt in die Fläche durch Simulation

Turning Band Verfahren: gesucht ist 2d (3d) Feld  $Z(x,y)$

- $Z(x,y)$  mit Mittelwert  $m_{\text{obs}}$ , Varianz  $\text{Var}_{\text{obs}}$  und (Co-)Variogram  $C_{\text{obs}}(h)$ ,  $\gamma_{\text{obs}}(h)$ , welches zur Beobachtung aus  $N$  Punktmessungen passt!

Idee

- Generiere 1d stochastischen Prozess  $S_i$  mit bekannter Kovarianzfunktion  $C_1(h)$ ,  $\gamma_1(h)$  und Varianz  $\text{Var}_{\text{obs}}$  und Mittelwert 0 entlang von  $M$  Banden, Beispiel  $M=2$

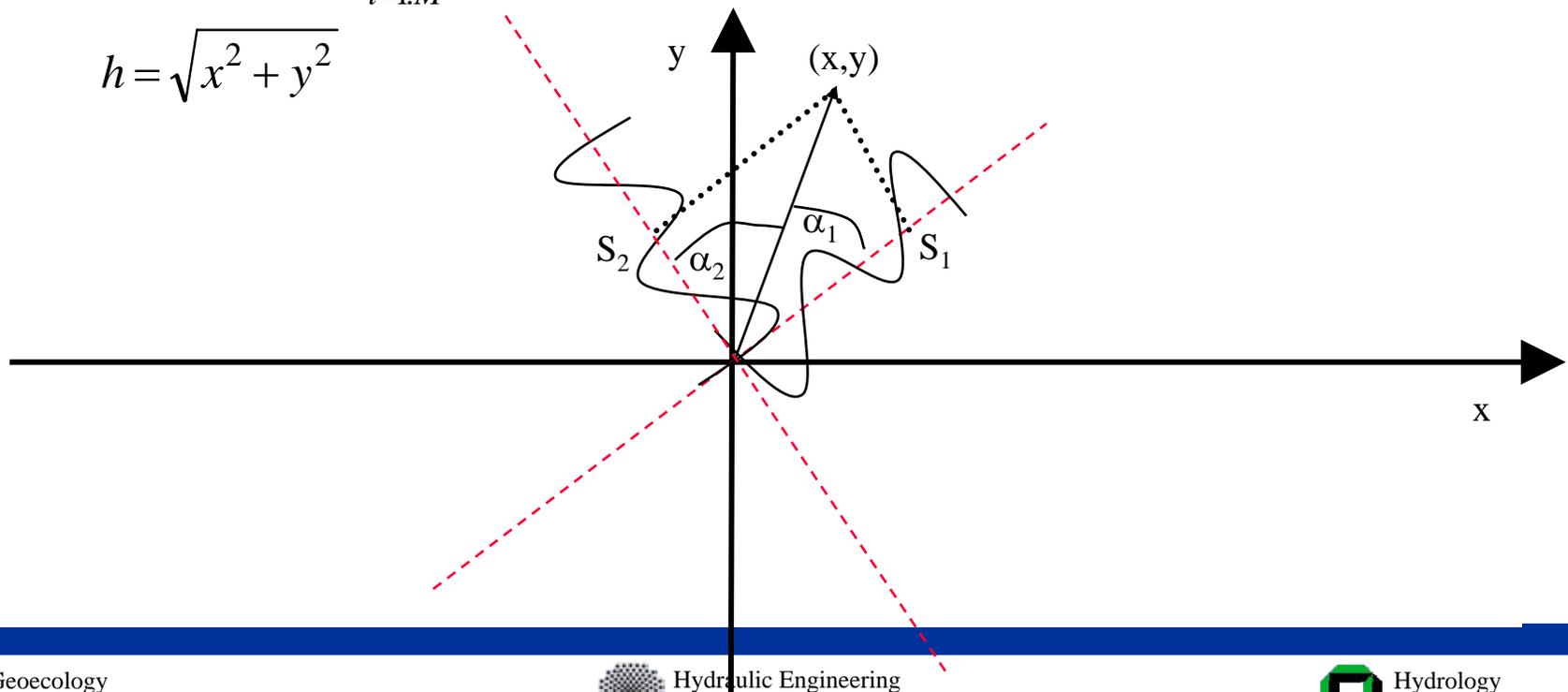


# Upscaling II: Vom Punkt in die Fläche durch Simulation

- Projiziere Ortsvektor  $(x,y)$  des interessierenden Punktes auf die Strahlen  $h \cos(\alpha_i)$ ,  $h \cos(\alpha_i)$  ist Skalarprodukt der Ortsvektors  $(x,y)$  mit dem Einheitsvektor in Richtung des iten Strahls  $\mathbf{e}_i$
- $Z(x,y)$  ist Linearkombination der Werte  $S_i$  and den projizierten Punkten

$$Z(x, y) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{i=1:M} S_i (h \cos(\alpha_i)),$$

$$h = \sqrt{x^2 + y^2}$$



# Upscaling II: Vom Punkt in die Fläche durch Simulation

- Vorgehen wähle Variogrammodell und Nugget, Sill und Range des zu simulierenden Feldes. Wähle Anzahl der Banden M
  - Sphärisch, exponentiell
- Löse Integralgleichung für jeden lag  $h$  in der Simulationsdomäne (Linke Seite bekannt)

$$\gamma_2(h) = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha=0}^{2\pi} \gamma_1(h \cos(\alpha)) d\alpha$$

$$\mathbf{v} = (x_1 - x_2, y_1 - y_2)$$

- Geht auch 3D!

# Upscaling II: Vom Punkt in die Fläche durch Simulation

## Konditionierung

- Generiere Feld mit Turning Bands auf gewünschtem Raster  
 $Z^*(x,y)$ ,  $k_s(x,y)$
- Berechne Differenz aus der generierten und der beobachteten Werte an den Messorten

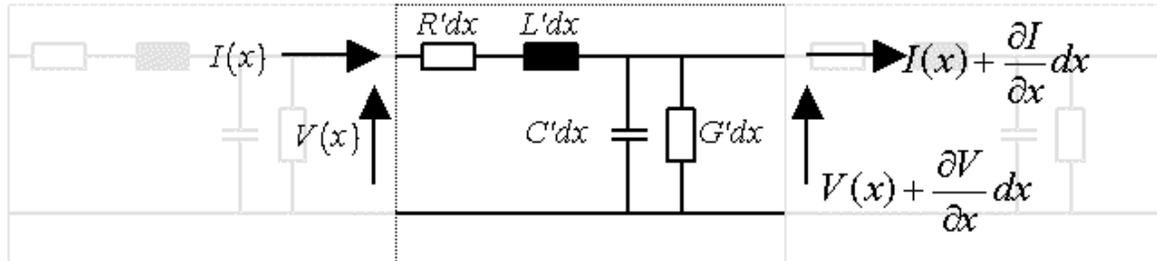
$$D(x_i, y_i) = Z_{obs}(x_i, y_i) - Z^*(x_i, y_i)$$

- Schätze Variogramm der Residuen
- Interpoliere Differenzen mittels z.B. mittels Ordinary Kriging oder SUK auf dem gleichen Raster
- Bilde Summe aus  $D(x,y)$  und  $Z^*(x,y)$ : Reproduziert Messwerte, da Kriging ein exakter interpolator ist!
- Zusatzinformation kann berücksichtigt werden

# Untersuchungsprogramm: STDR

- TDR Signal Spannungsverlauf über die Zeit,
- Form ist Fingerabdruck des Dielektrizitätsprofils
- Inversion des TDR Signals (Schläger et al., 2005 HESS; Becker 2004)
  - Vorwärtsproblem mit Telegraphengleichung
  - $R'$ ,  $L'$  konstant,  $G'(x)$ ,  $C'(x)$  sind Funktion der Bodenfeuchte und der elektrischen Leitfähigkeit

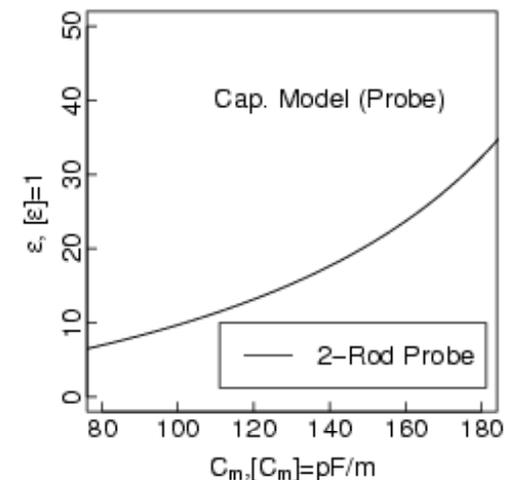
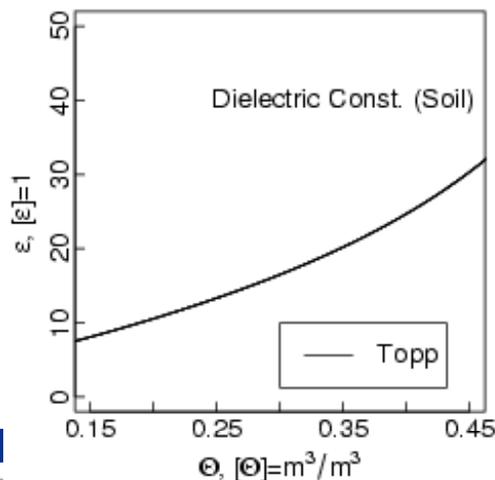
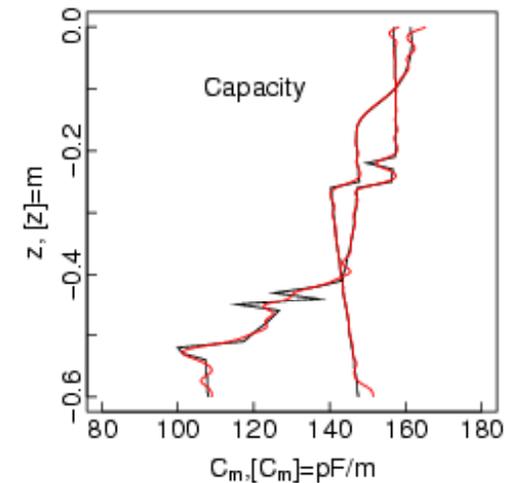
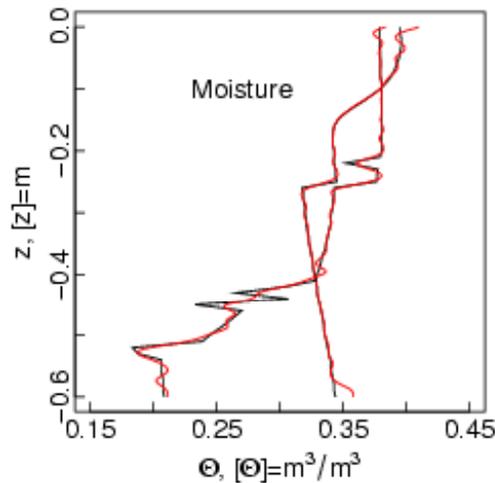
$$LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + LG \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \ln(L) \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = 0$$



# Untersuchungsprogramm: STDR

- Inversion des TDR Signals  
(Schläger et al., 2005 HESS; Becker 2004)
  - Vorwärtsproblem mit Telegraphengleichung
  - Optimierte C und G

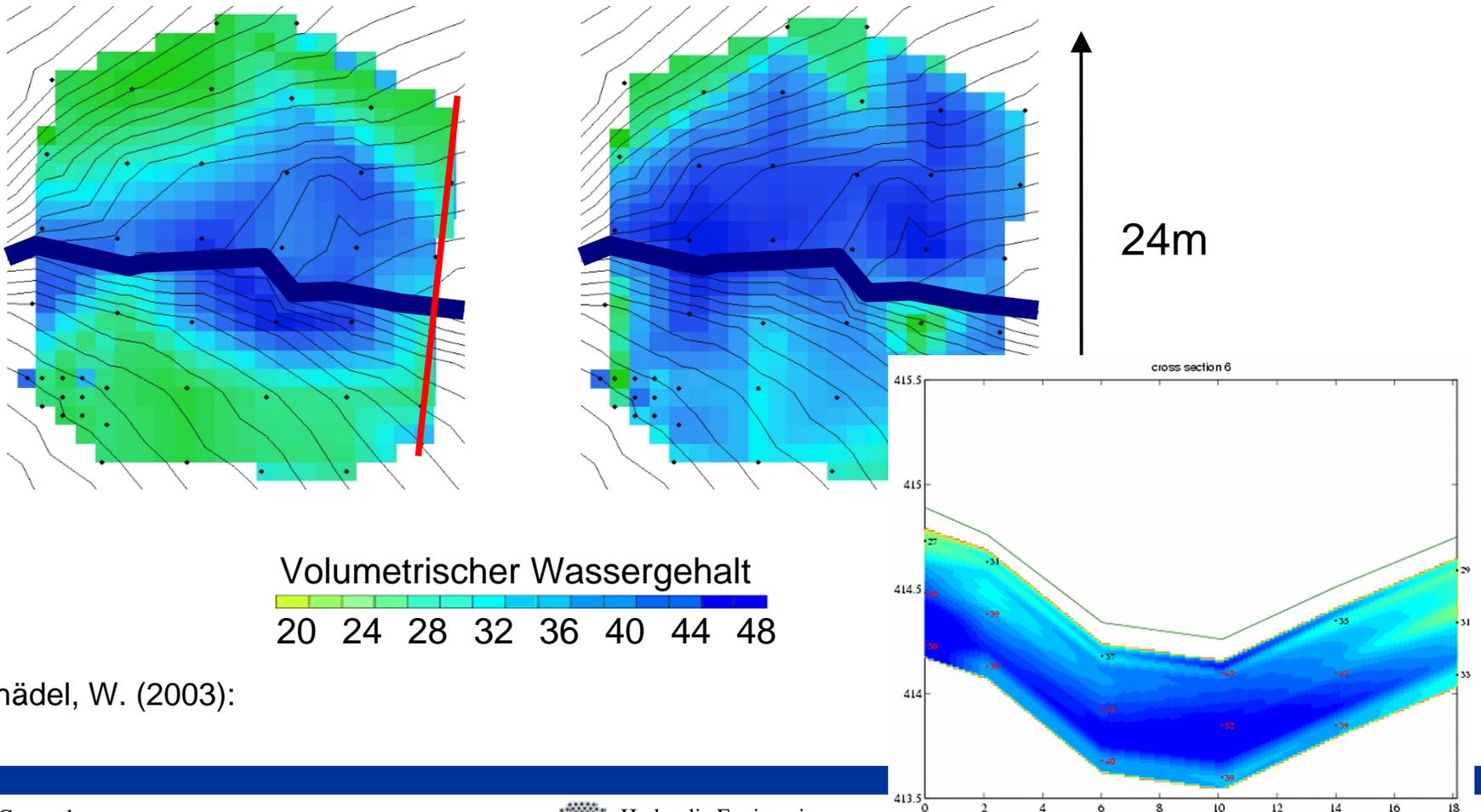
$$\|U_{obs}(t) - U^*(t)\| < \varepsilon$$



# Untersuchungsprogramm: STDR

40 Sonden + Multiplexer + Sampling TDR

- Räumliches Bild der Bodenfeuchtedynamik (auf in der Tiefe)



(Schädel, W. (2003):

# Upscaling I: Charakterisierung von Struktur

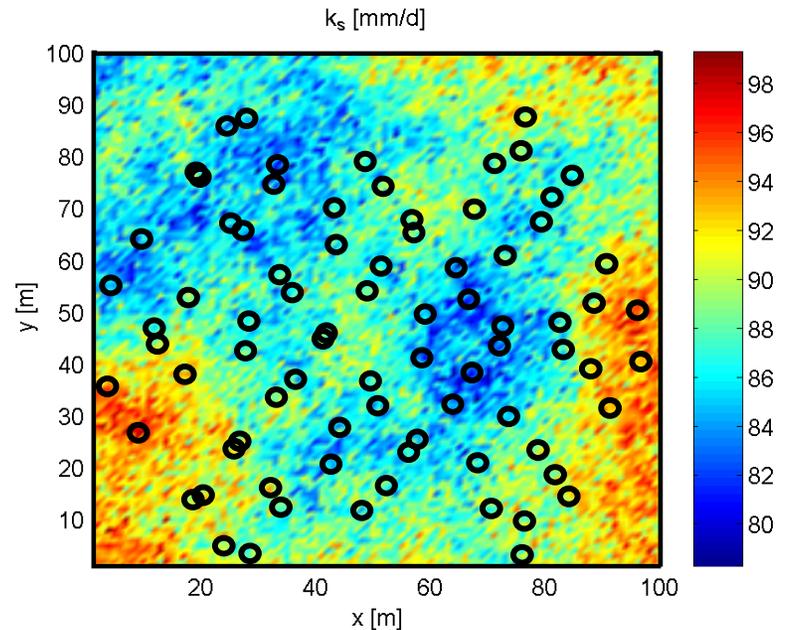
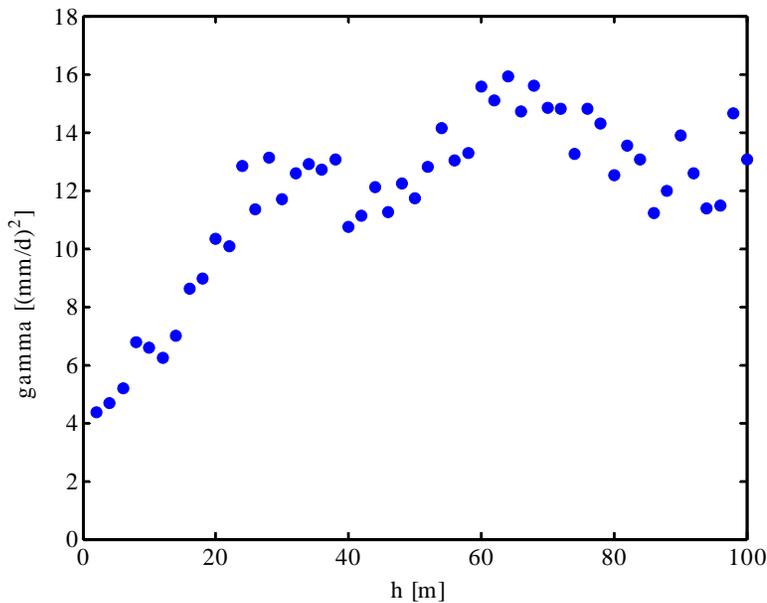
## Charakteristische Länge

- Intrinsisches Zufallsfeld
- Experimentelles Variogramm
- $M(h) > 30$

$$\gamma(h) = \frac{1}{M(h)} \frac{1}{2} \sum_{i < j} (k_s(x_i, y_i) - k_s(x_j, y_j))^2$$

$M(h)$ : Anzahl der Punktepaare mit Abstand/lag  $h$

$$h = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$



# Upscaling II: Interpolation vom Punkt in die Fläche

„Bessere“ Interpolationsverfahren

- Linearer Zusammenhang zwischen Messgröße und einer Zusatzvariablen Y z.B. Temperatur & Höhe, Bodenfeuchte & Topographischem Index...

$$E[Z|Y] = a + bY(x)$$

External Drift Kriging (EDK)

- Lineare Schätzung, fordere Erwartungstreue für alle a,b

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i)$$

- Minimiere Schätzvarianz, wie bei OK, Y muss bekannt sein!

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu_1 + \mu_2 Y(x) = \gamma(x_i - x)$$

$$1 = \sum_{i=1}^N \lambda_i$$

$$Y(x) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Y(x_i)$$

# Upscaling II: Interpolation vom Punkt in die Fläche

## Simple Updating (SUK)

- Minimiere Schätzvarianz, wie bei OK

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = (1 - \lambda_0) \gamma(x_i - x)$$

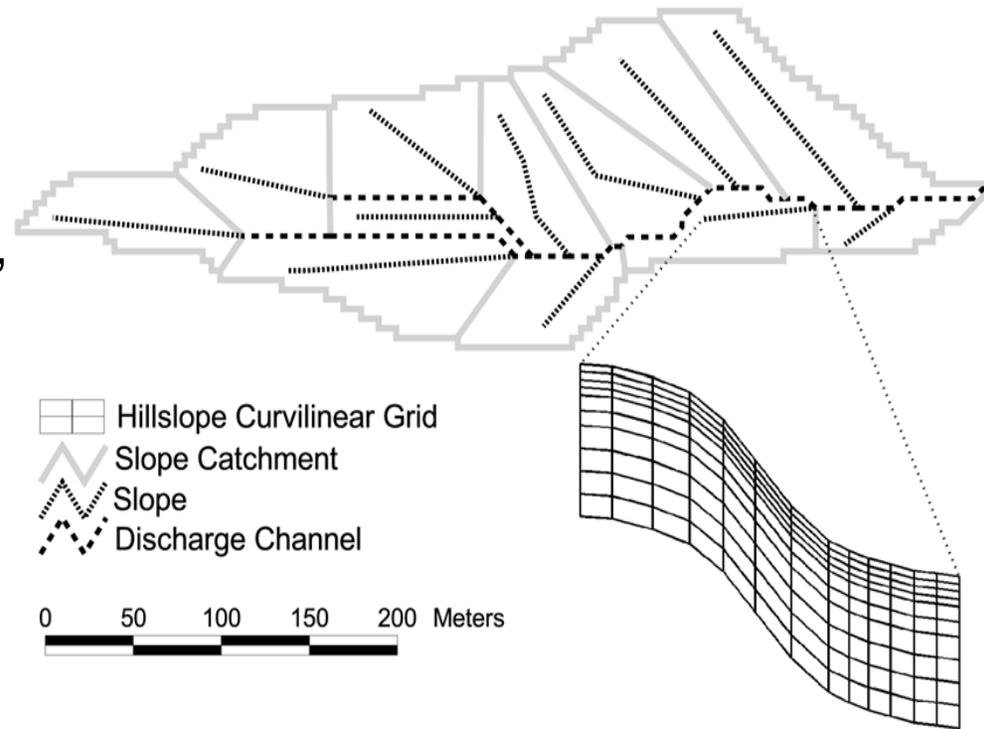
$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma(x - x_j) + \mu = \lambda_0 \text{var}_l$$

$$1 = \sum_{i=1}^N \lambda_i$$

# Niederschlag-Abflussmodellierung

Einzugsgebiet des Heumöser  
Hangs CATFLOW

- ET: SVAT
- Abfluss: 1D Diffusions-Welle
- Bodenwasser: 2D Richardsgl.,  
natürliche Koordinaten
  - Gesättigt/ ungesättigt
- Stofftransport: 2D Particle  
Tracking
- Makroporenfluss:  
Schwellenwertansatz,  
stochastisch generiert

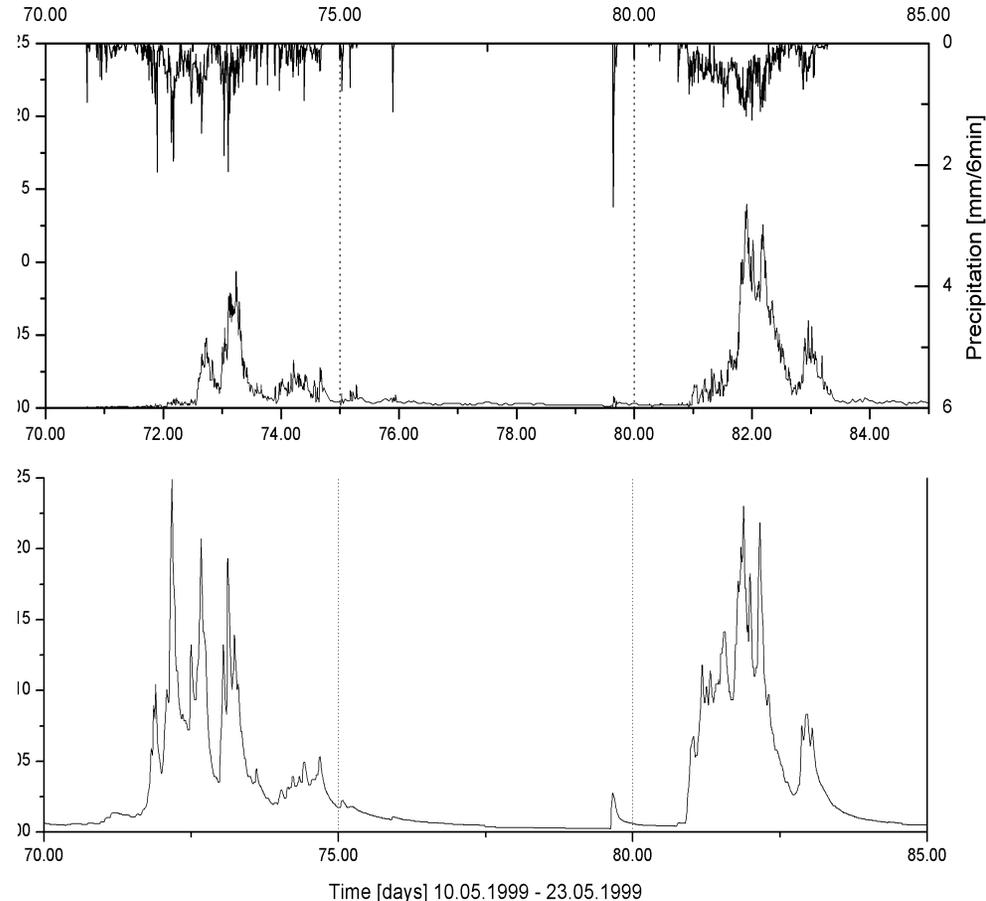


# Niederschlag-Abflussmodellierung

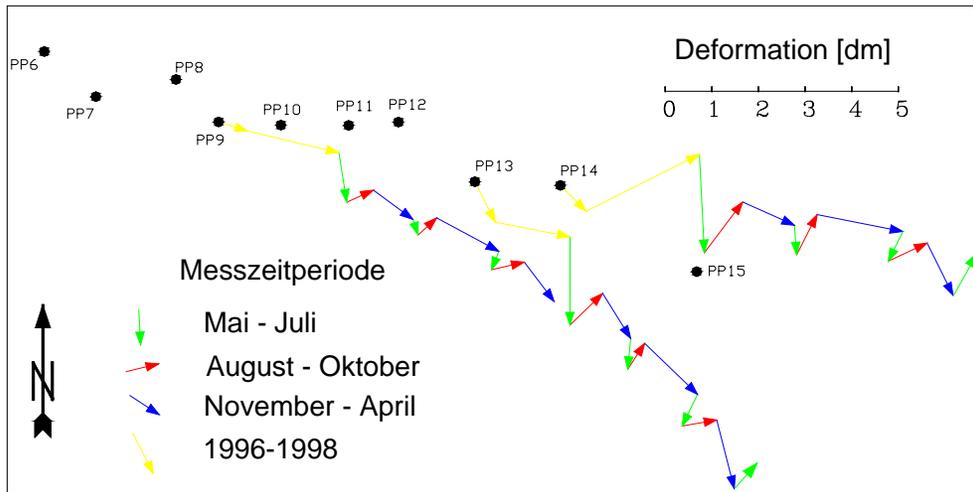
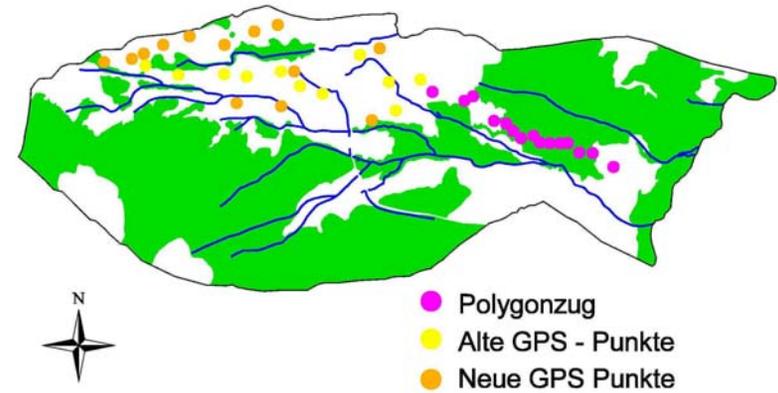
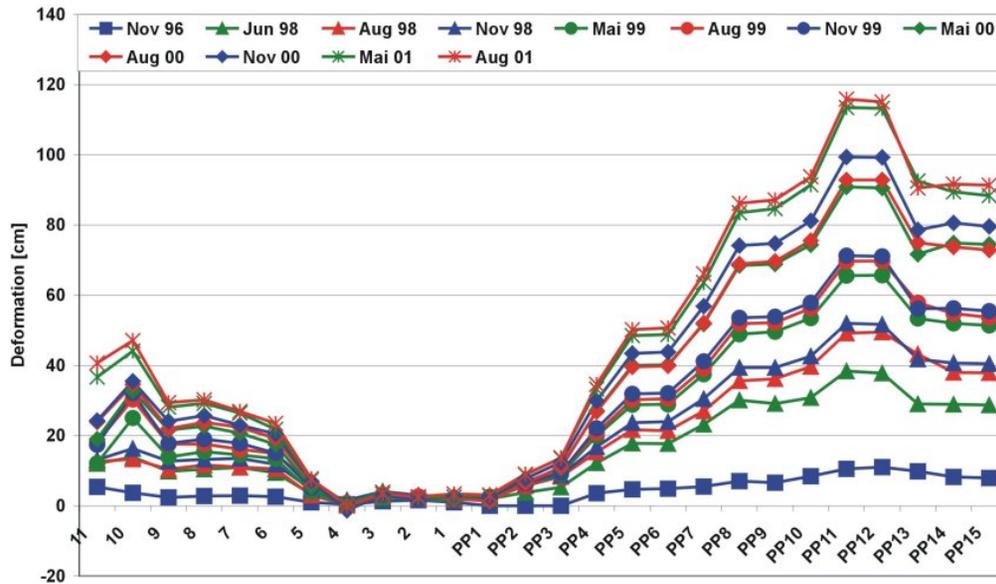
Einzugsgebiet des Heumöser

Hangs CATFLOW

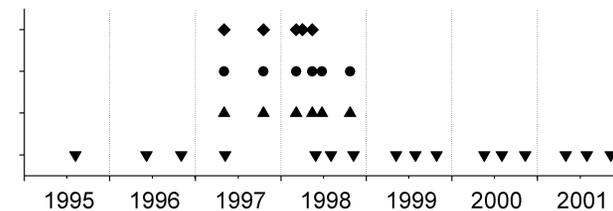
- Reproduktion der Abflussdynamik
- Unsicherheit der Abflussdaten, Sediment ändert W-Q Beziehung
- Schneemodul für kontinuierliche Simulation!



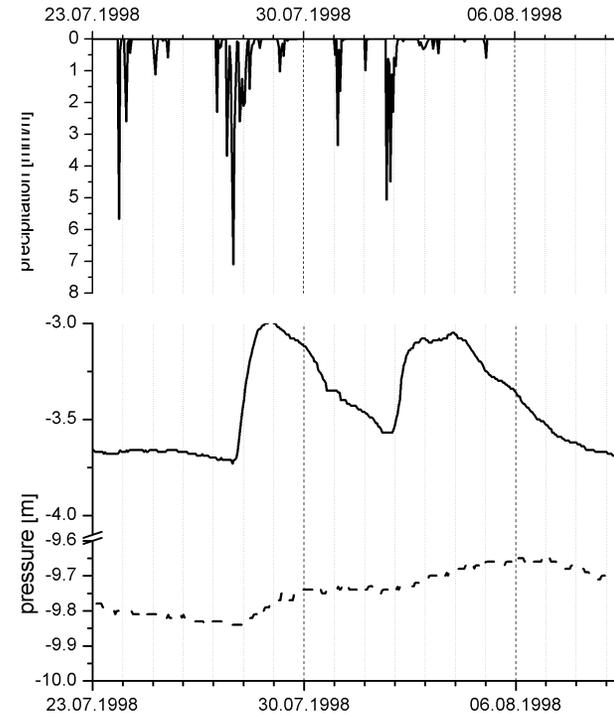
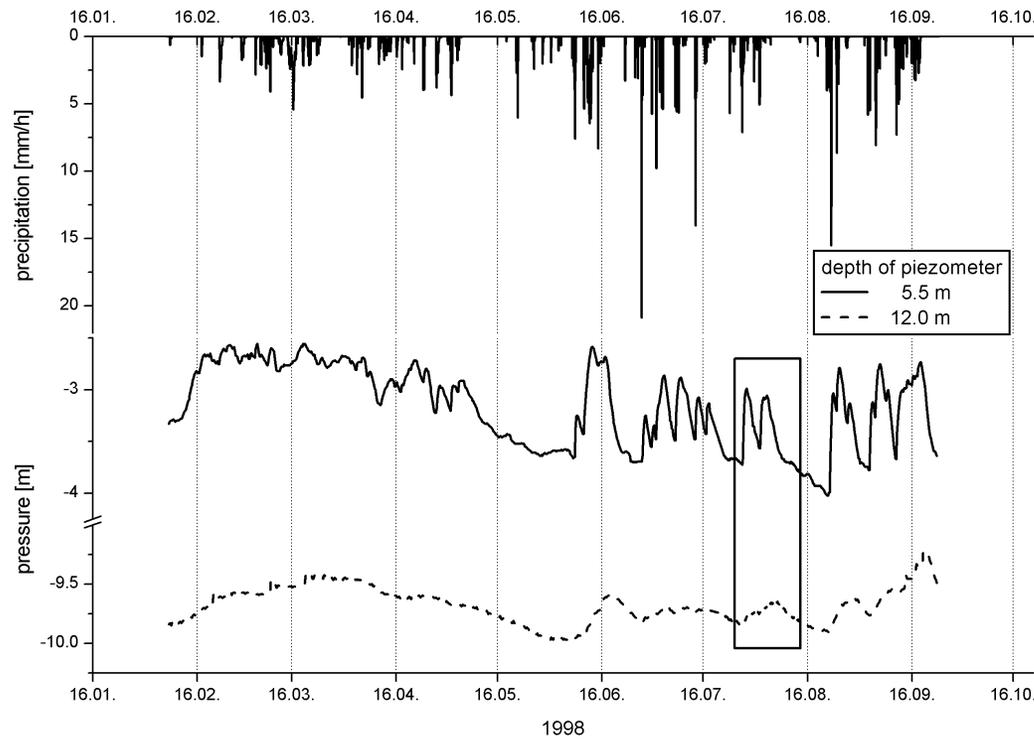
# Oberflächennahe Bewegungsmessungen



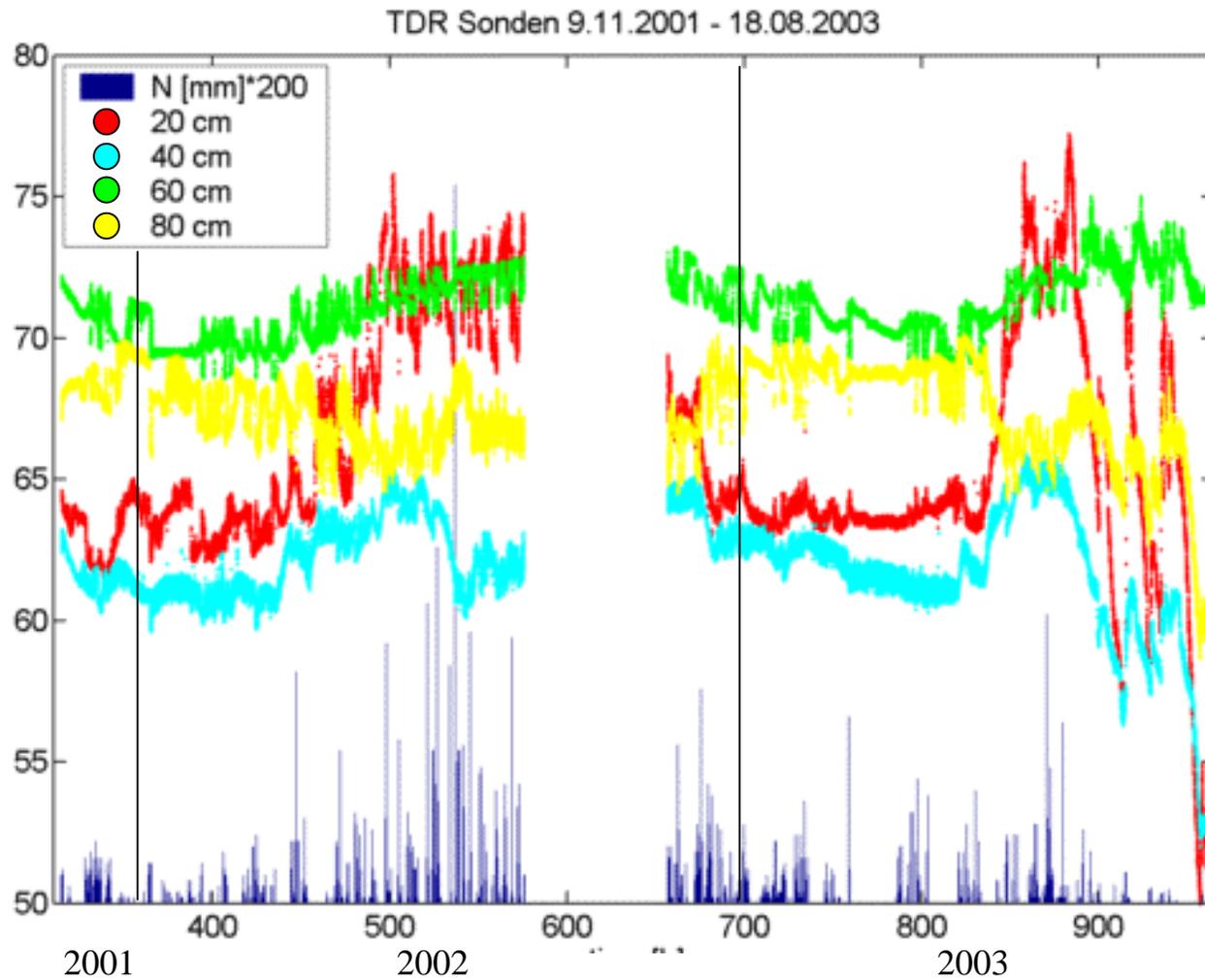
borehole KB 1  
borehole KB 2  
borehole KB 3  
GPS campaign



# Piezometer KB 3



# Bodenfeuchte mittels TDR



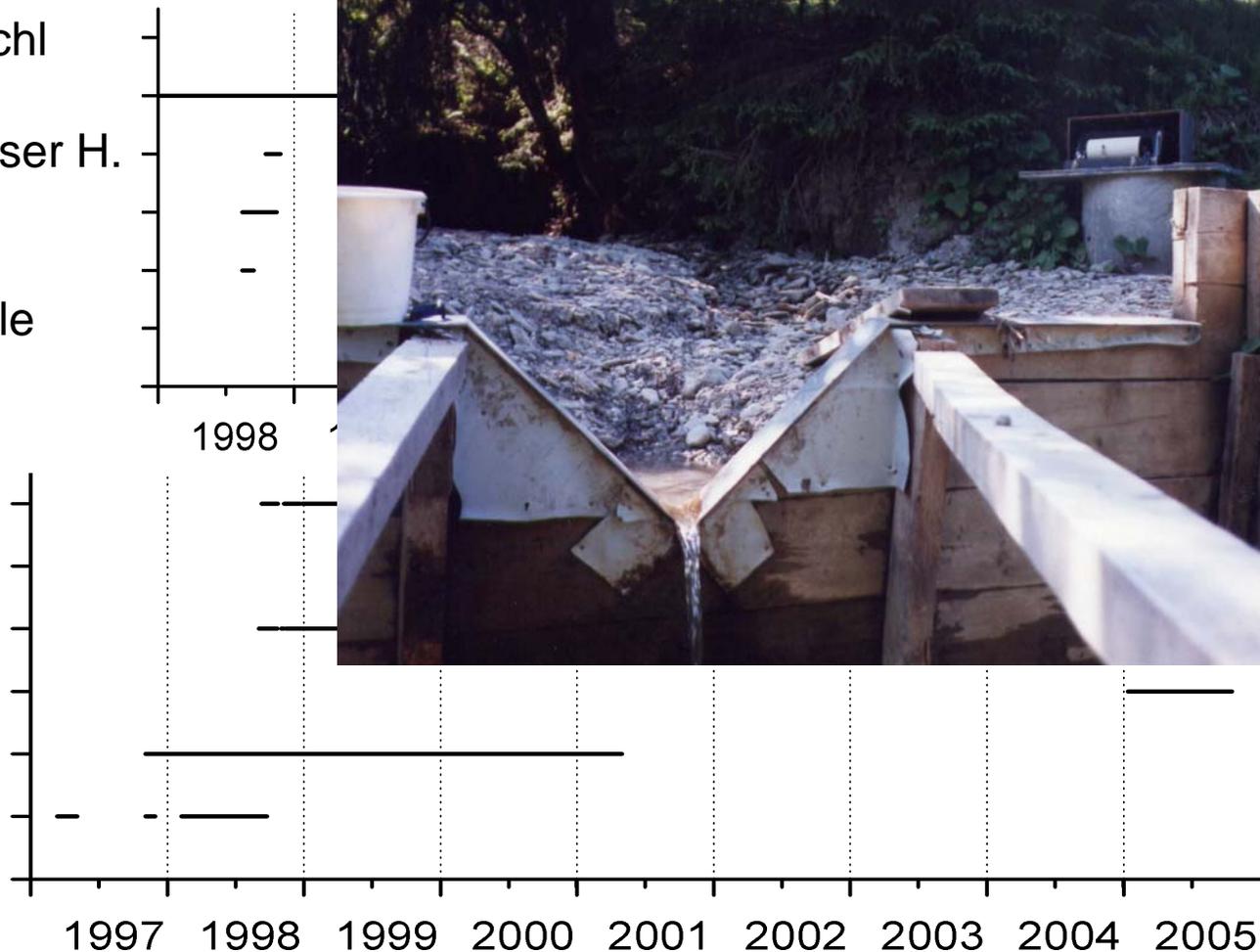
# Niederschlag / Klima

Klima / Niederschl  
 Ebnit Kirche  
 Klima/ NHeumöser H.  
 N-Schreiber  
 N-Schreiber  
 Klima Hochälpele



## Abfluss

Heumöser Bach  
 HB Digital  
 Quelle 1  
 Quelle 1 Digital  
 Piezometer Kb 2  
 Piezometer Kb 3



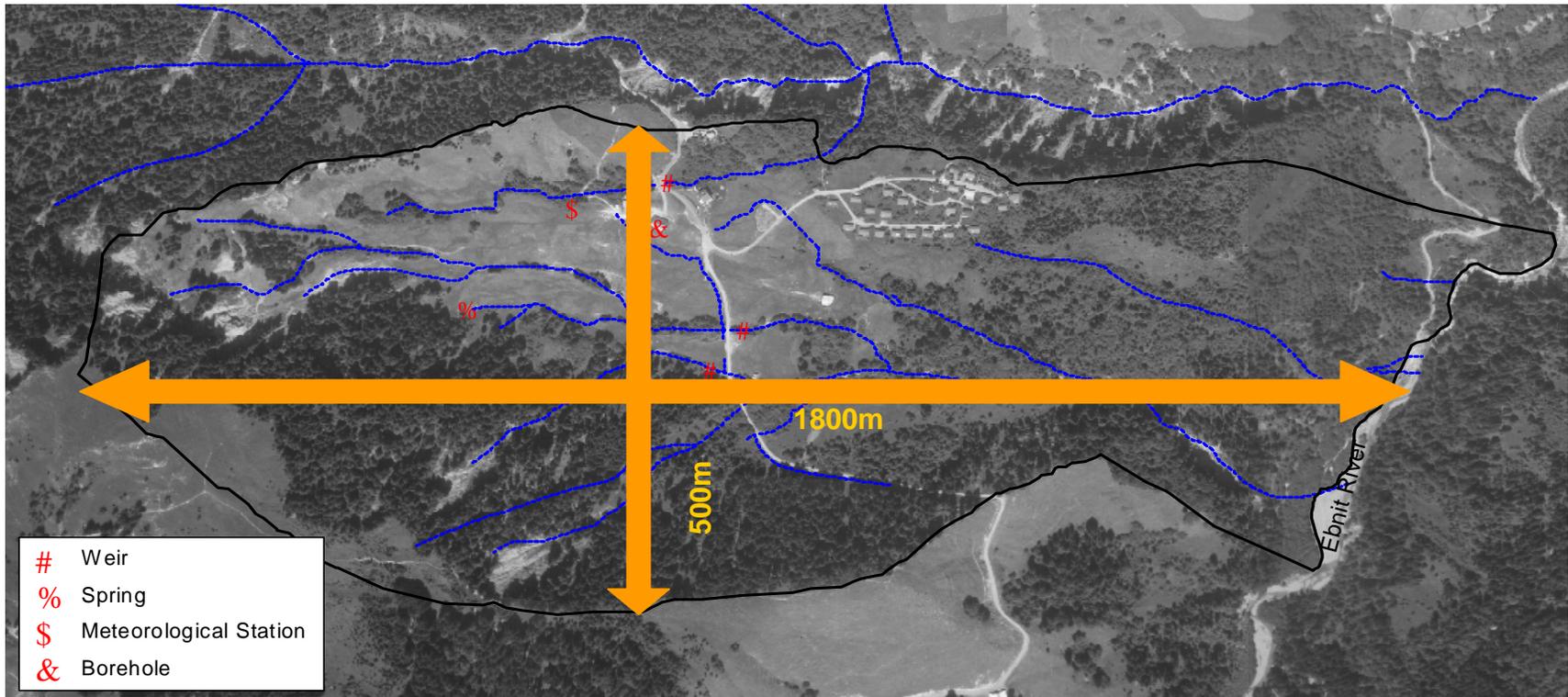
# Digitales Geländemodell aus Laserscan Befliegung

höhere Auflösung: 1 m<sup>2</sup>  
bessere Erkennung der Fließwege  
kleinräumige Rutschungen

# Heumöser Hang

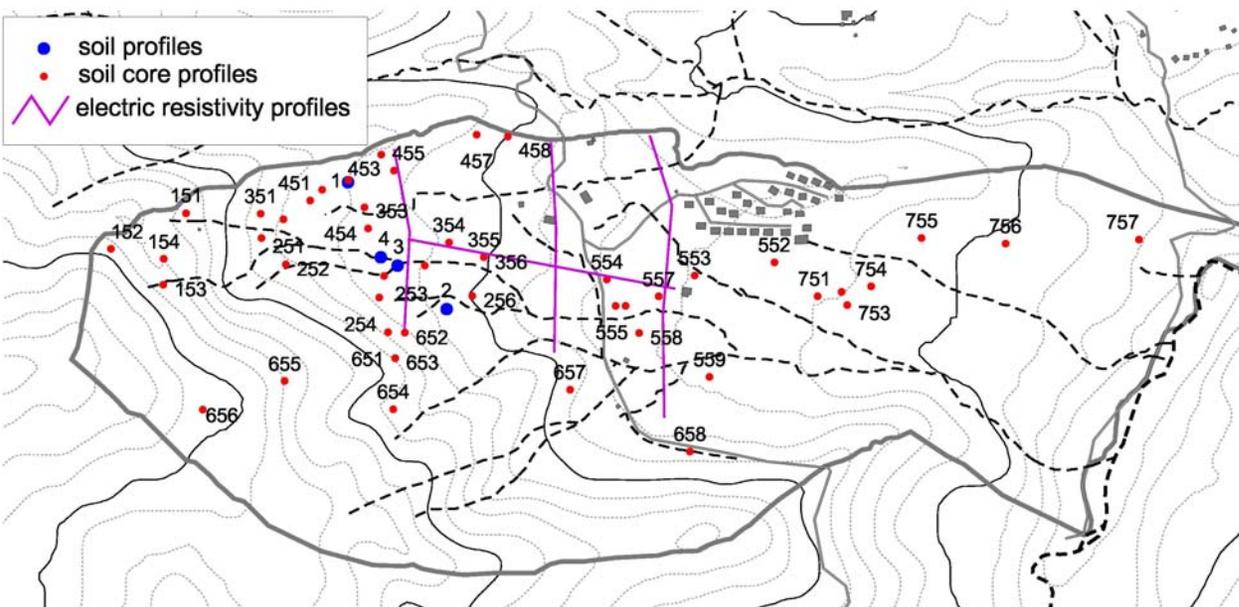
## Großhang in Kriechbewegung

- Entwässert durch 3 Bäche (Pegel)
- Quellen im Südwestteil

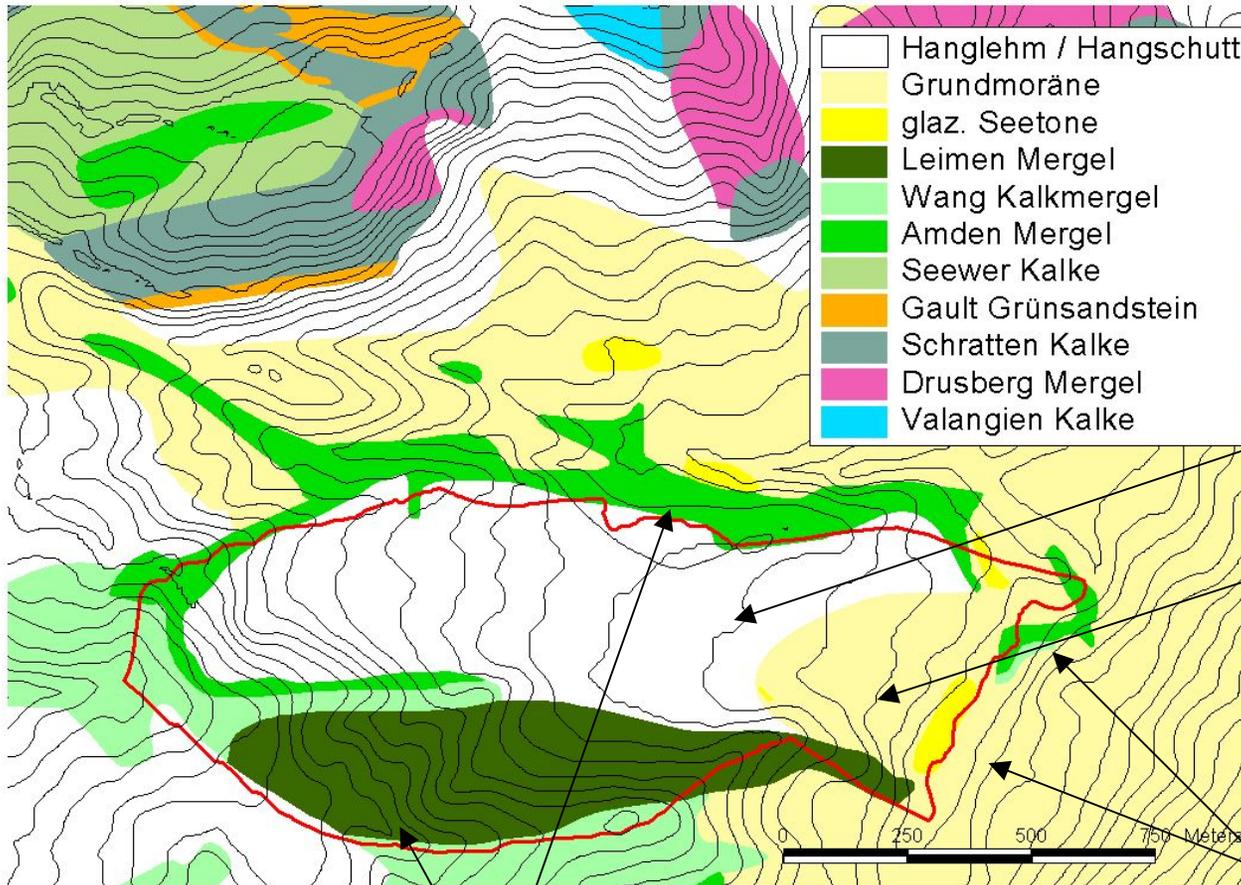


# Untersuchungsprogramm: Parameterschätzung

- Räumliche Geometrie der Übergangsszone zwischen Hanglehm und Moräne
  - 15-20 Rammkernsondierungen
  - ERT oberflächlich
- Schätzung der Tiefe mittels geostatistischer Methoden
  - Material für Messung geotechnische Parameter, räumliche Muster



# Geologie



Lockergestein:  
Hanglem/ Hangschutt

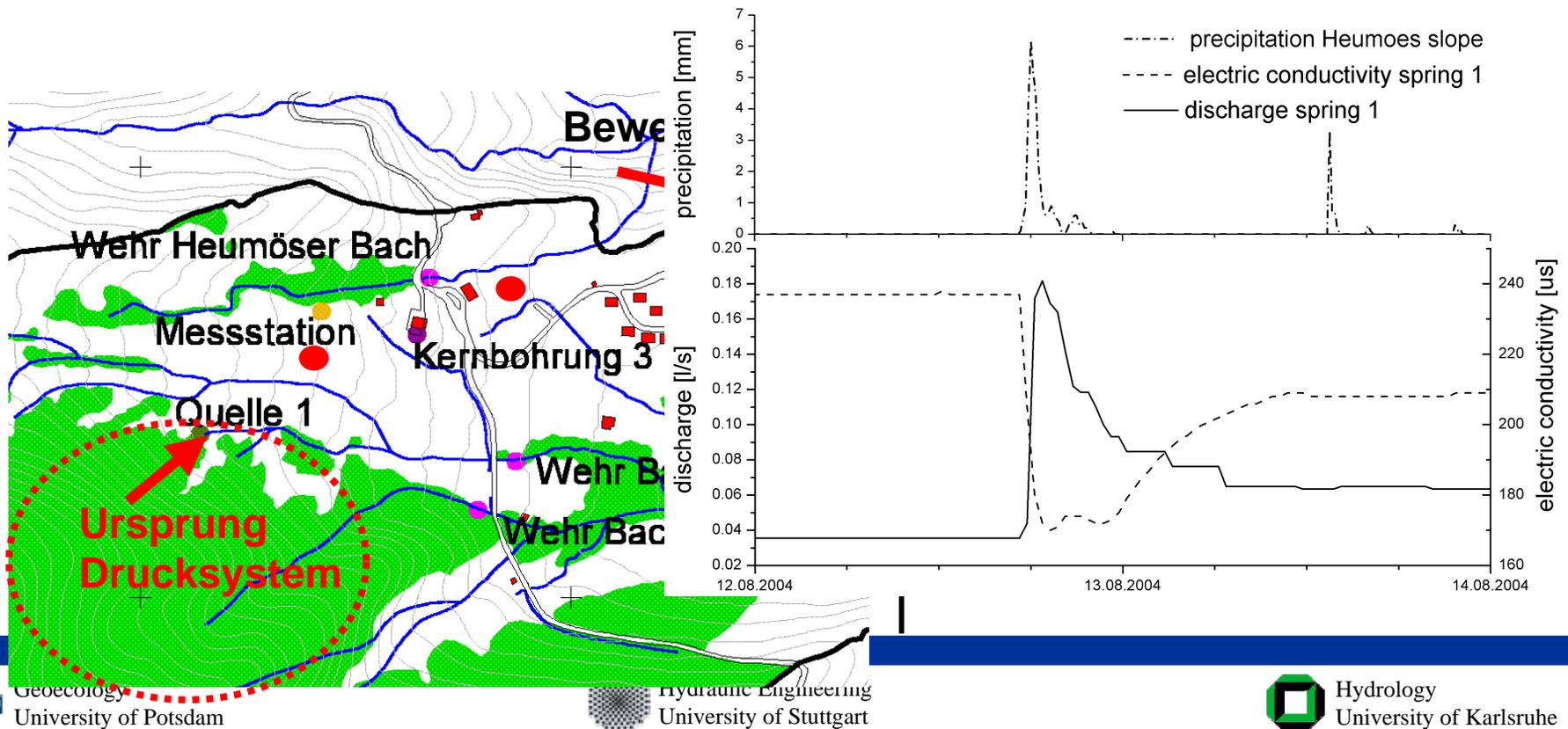
Lockergestein:  
Moräne/ Seetone

Ebniter Ache,  
Wegnahme Widerlager

Festgestein: Mergel

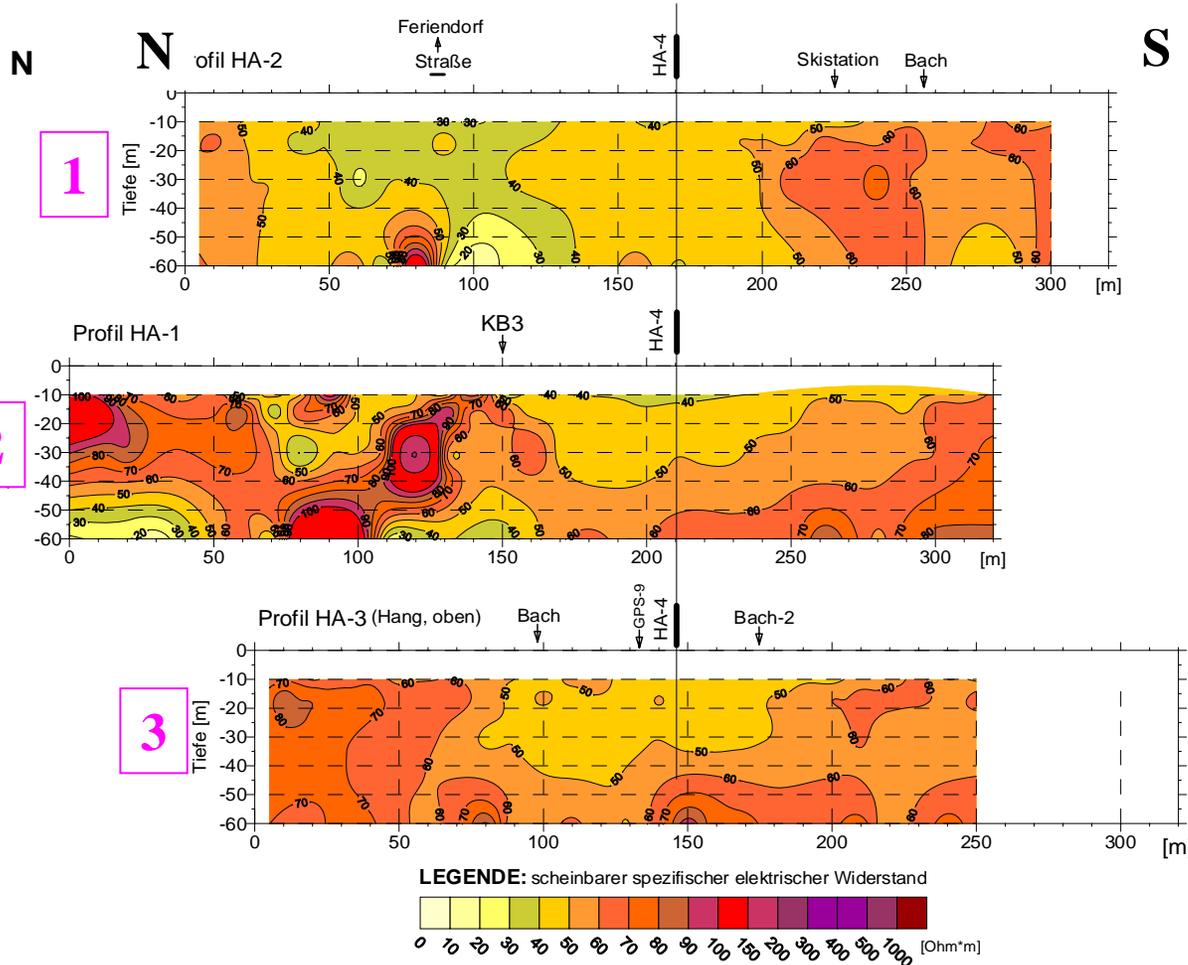
# Untersuchungsprogramm: Prozessaufklärung

- Raum-zeitliches Muster von Infiltration/Abfluss
  - Abfluss 2 Pegel & Quelle
  - Elektr. Leitfähigkeiten Quelle, Pegel, Bohrungen
  - Tracerversuche im Südwestteil (Ursprung des Drucksystems)
  - ERT-Profile im Südwestteil



# Geoelektrische Widerstandsmessungen (2001)

Elektromagnetische Untersuchungen in Ebnit  
02.-04. Juli 2001



**S** - tieferer Untergrund

- obere 10 m: noch keine Aufklärung!

Bei Sättigung:

- hoher Widerstand: Festgestein?
- geringer Widerstand: Lockergestein?