

Einführung in die Modellierung

In diesem Semester

R als Werkzeug in der Modellierung

Ökologische Modelle

Hydrologische Modelle

(Ökohydrologische Modelle)

Einführung in die Modellierung

Heute

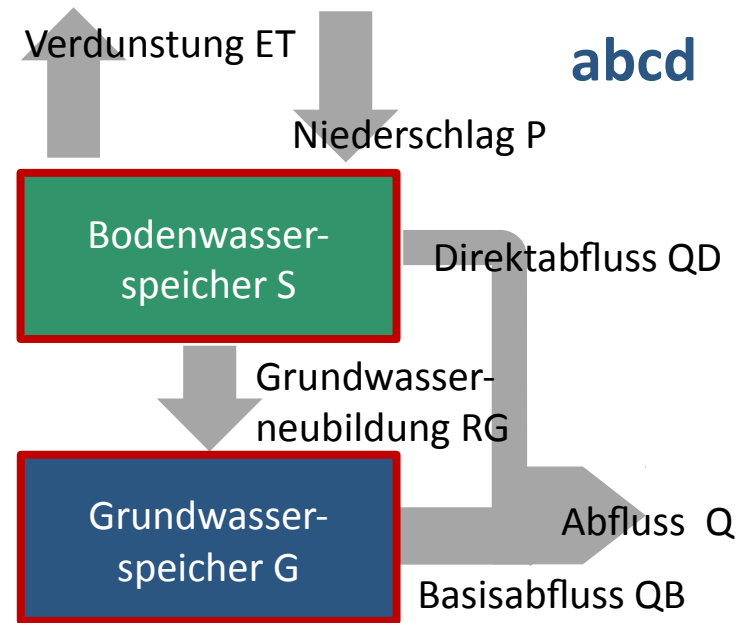
Rekapitulation: abcd

Modelldiagnose, Kalibrierung, Validierung

Die Letzte Aufgabe

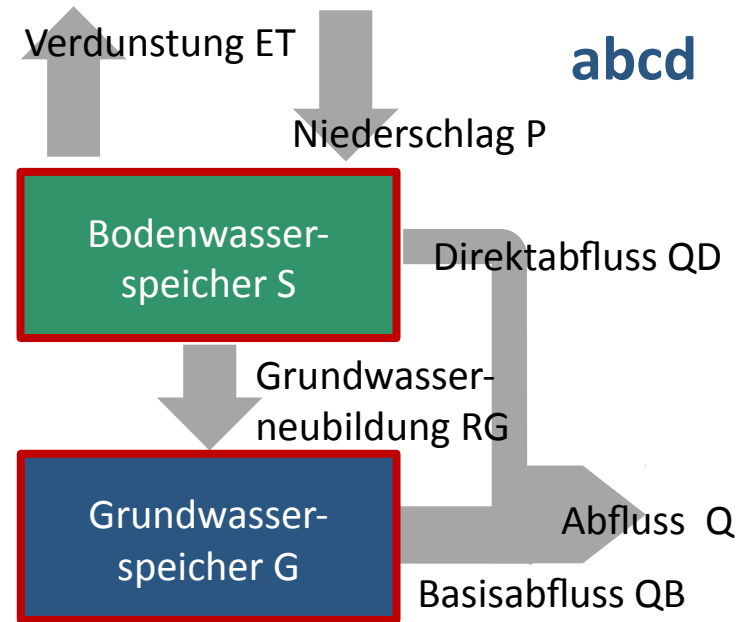


Eigenschaften des *abcd*-Modells



Eigenschaften des *abcd*-Modells

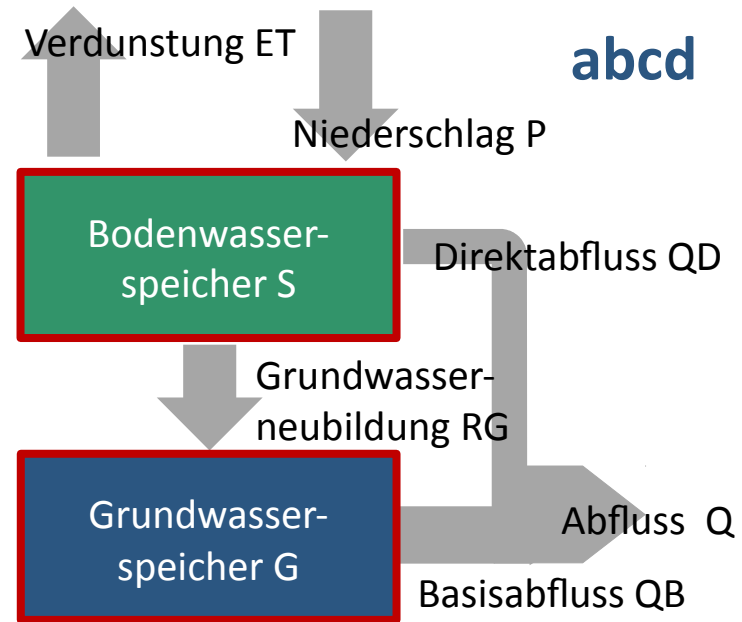
- ✓ Massenerhaltung als Grundprinzip
- ✓ Einfluss der Gebietsfeuchte auf Abflussbildung
- ✓ Abbildung physikalischer Prozesse (hier: Verdunstung)



Eigenschaften des *abcd*-Modells

- ✓ Massenerhaltung als Grundprinzip
- ✓ Einfluss der Gebietsfeuchte auf Abflussbildung
- ✓ Abbildung physikalischer Prozesse (hier: Verdunstung)

Parameter des *abcd*-Modells

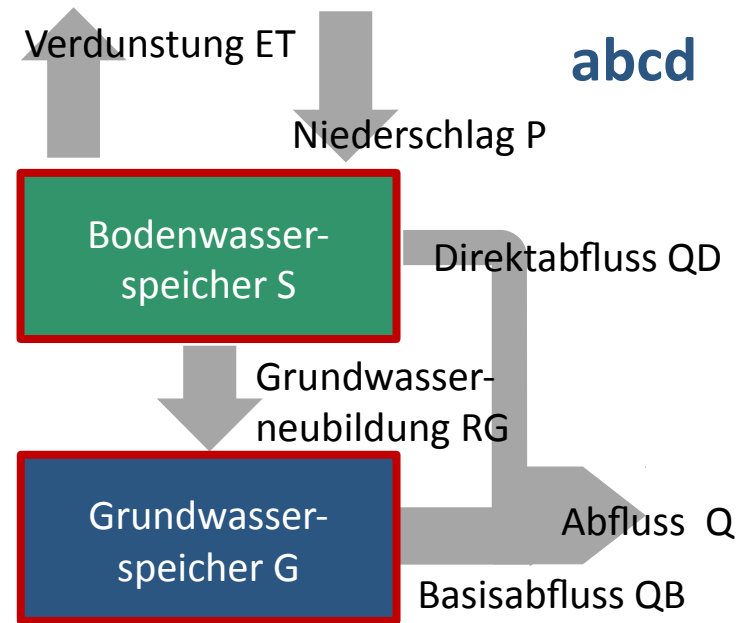


Eigenschaften des *abcd*-Modells

- ✓ Massenerhaltung als Grundprinzip
- ✓ Einfluss der Gebietsfeuchte auf Abflussbildung
- ✓ Abbildung physikalischer Prozesse (hier: Verdunstung)

Parameter des *abcd*-Modells

- Neigung zur Direktabflussbildung
- Effektive Speicherkapazität des Bodens
- Aufteilung zwischen GW-Neubildung und Direktabfluss
- Rezessionskonstante für Basisabfluss



Was ist ein „gutes“ Modell?

abc

abcd

Was ist ein „gutes“ Modell?

Das Modell erfüllt einen bestimmten Zweck.

abc

abcd

Was ist ein „gutes“ Modell?

Das Modell erfüllt einen bestimmten Zweck.

z.B. Simulation des Jahresgangs der Gebietswasserbilanz
(zur Ressourcenallokation, Klimafolgenabschätzung, ...)

z.B. Hochwasservorhersage

abc

abcd

Was ist ein „gutes“ Modell?

Das Modell erfüllt einen bestimmten Zweck.

z.B. Simulation des Jahresgangs der Gebietswasserbilanz
(zur Ressourcenallokation, Klimafolgenabschätzung, ...)

z.B. Hochwasservorhersage

abc

abcd



Was ist ein „gutes“ Modell?

Das Modell erfüllt einen bestimmten Zweck.

z.B. Simulation des Jahresgangs der Gebietswasserbilanz
(zur Ressourcenallokation, Klimafolgenabschätzung, ...)

z.B. Hochwasservorhersage

Das Modell hat eine sinnvolle Struktur.

abc

abcd



Was ist ein „gutes“ Modell?

Das Modell erfüllt einen bestimmten Zweck.

z.B. Simulation des Jahresgangs der Gebietswasserbilanz
(zur Ressourcenallokation, Klimafolgenabschätzung, ...)

z.B. Hochwasservorhersage

Das Modell hat eine sinnvolle Struktur.

- Massenerhaltung
- Einfluss der Gebietsfeuchte auf Abflussbildung
- Abbildung physikalischer Prozesse (Verdunstung)

abc



abcd



Was ist ein „gutes“ Modell?

Das Modell erfüllt einen bestimmten Zweck.

z.B. Simulation des Jahresgangs der Gebietswasserbilanz
(zur Ressourcenallokation, Klimafolgenabschätzung, ...)

z.B. Hochwasservorhersage

Das Modell hat eine sinnvolle Struktur.

- Massenerhaltung
- Einfluss der Gebietsfeuchte auf Abflussbildung
- Abbildung physikalischer Prozesse (Verdunstung)

abc

abcd



Was ist ein „gutes“ Modell?

Das Modell erfüllt einen bestimmten Zweck.

z.B. Simulation des Jahresgangs der Gebietswasserbilanz
(zur Ressourcenallokation, Klimafolgenabschätzung, ...)

z.B. Hochwasservorhersage

Das Modell hat eine sinnvolle Struktur.

- Massenerhaltung
- Einfluss der Gebietsfeuchte auf Abflussbildung
- Abbildung physikalischer Prozesse (Verdunstung)

Das Modell ist im Zielgebiet einsetzbar.

abc

abcd



Was ist ein „gutes“ Modell?

Das Modell erfüllt einen bestimmten Zweck.

z.B. Simulation des Jahresgangs der Gebietswasserbilanz
(zur Ressourcenallokation, Klimafolgenabschätzung, ...)

z.B. Hochwasservorhersage

Das Modell hat eine sinnvolle Struktur.

- Massenerhaltung
- Einfluss der Gebietsfeuchte auf Abflussbildung
- Abbildung physikalischer Prozesse (Verdunstung)

Das Modell ist im Zielgebiet einsetzbar.

- Die Daten für den Antrieb des Modells sind vorhanden.
- Die dominanten Prozesse im Zielgebiet werden durch das Modell abgebildet.

abc

abcd



Was ist ein „gutes“ Modell?

Das Modell erfüllt einen bestimmten Zweck.

z.B. Simulation des Jahresgangs der Gebietswasserbilanz
(zur Ressourcenallokation, Klimafolgenabschätzung, ...)

z.B. Hochwasservorhersage

Das Modell hat eine sinnvolle Struktur.

- Massenerhaltung
- Einfluss der Gebietsfeuchte auf Abflussbildung
- Abbildung physikalischer Prozesse (Verdunstung)

Das Modell ist im Zielgebiet einsetzbar.

- Die Daten für den Antrieb des Modells sind vorhanden.
- Die dominanten Prozesse im Zielgebiet werden durch das Modell abgebildet.

abc

abcd



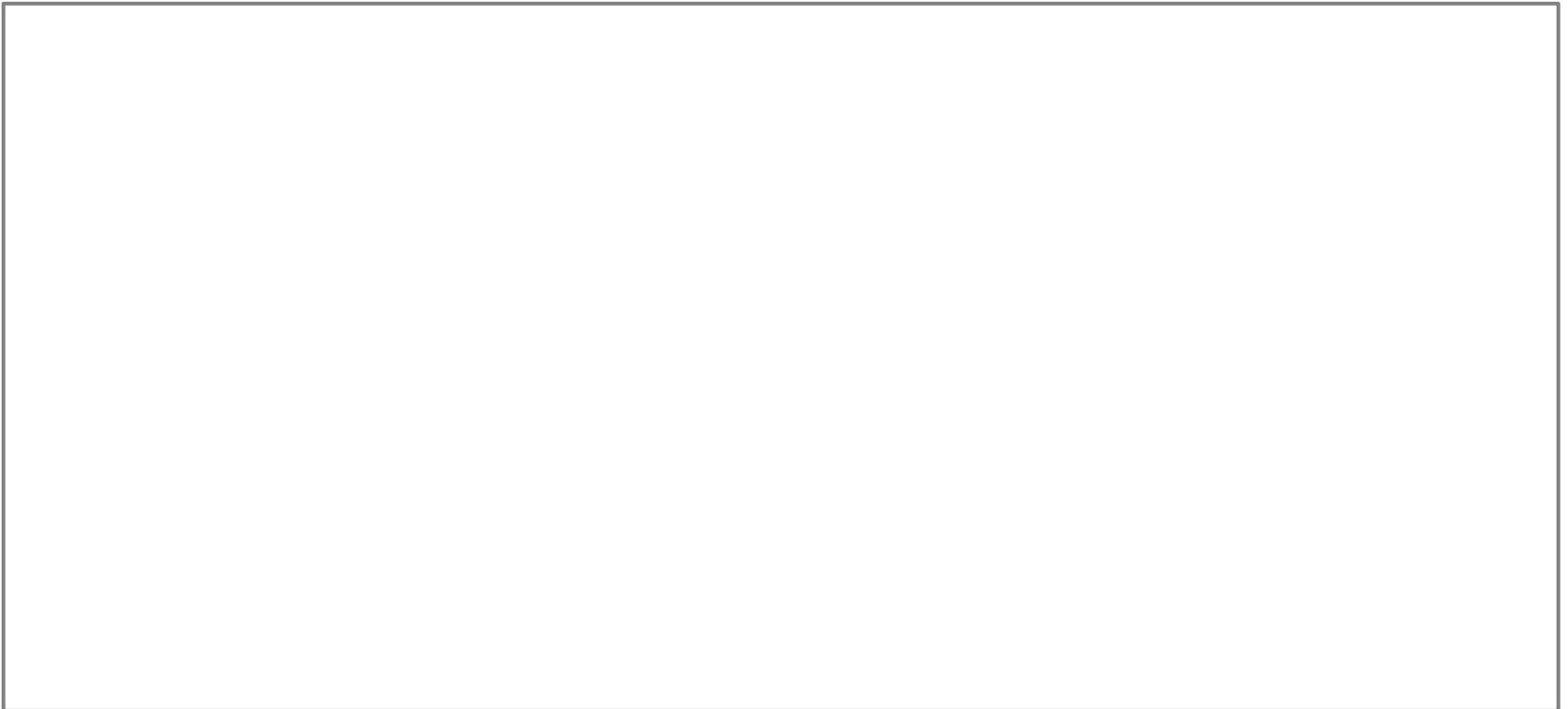
?

?

Was ist ein „gutes“ Modell?

Was ist ein „gutes“ Modell?

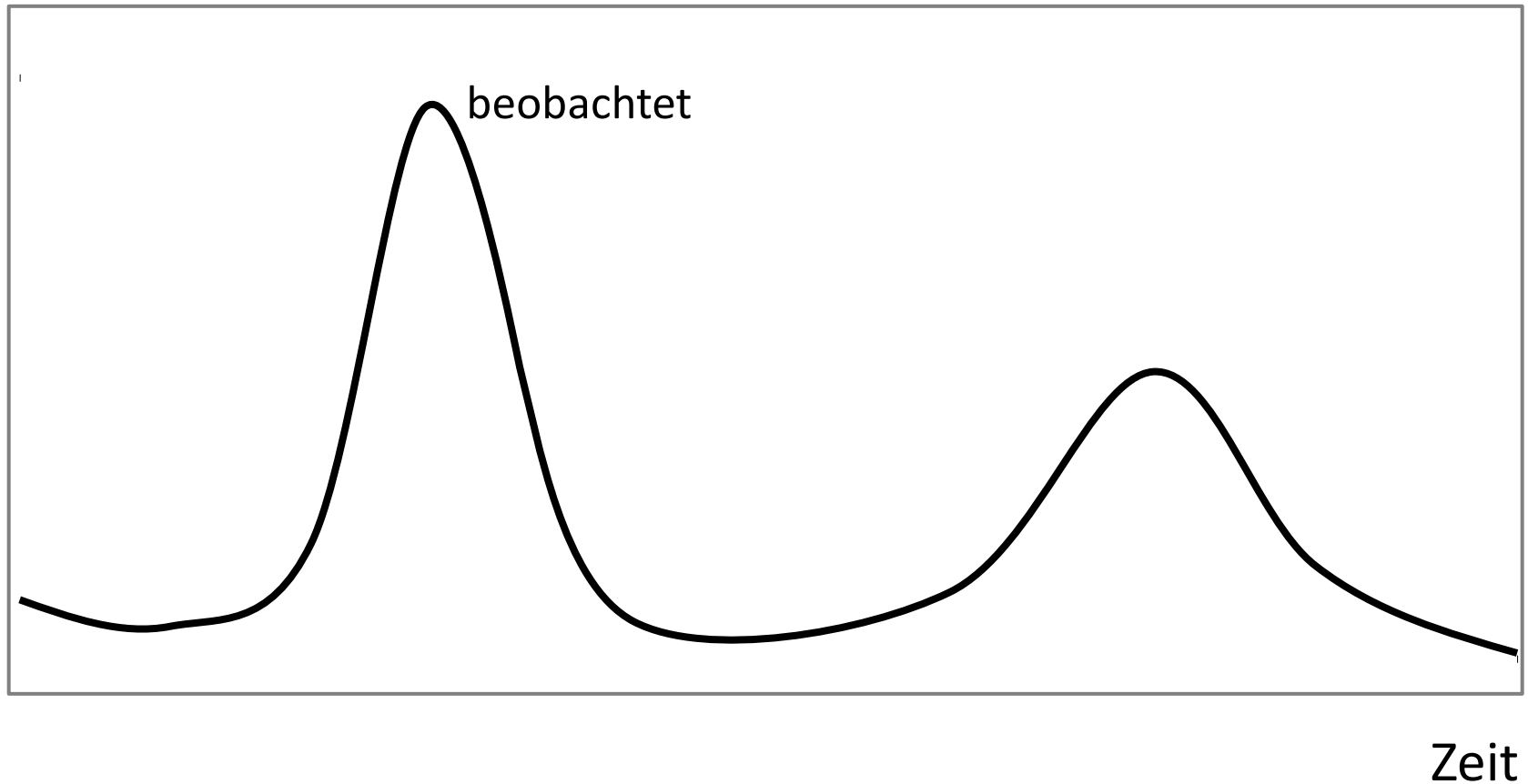
Abfluss



Zeit

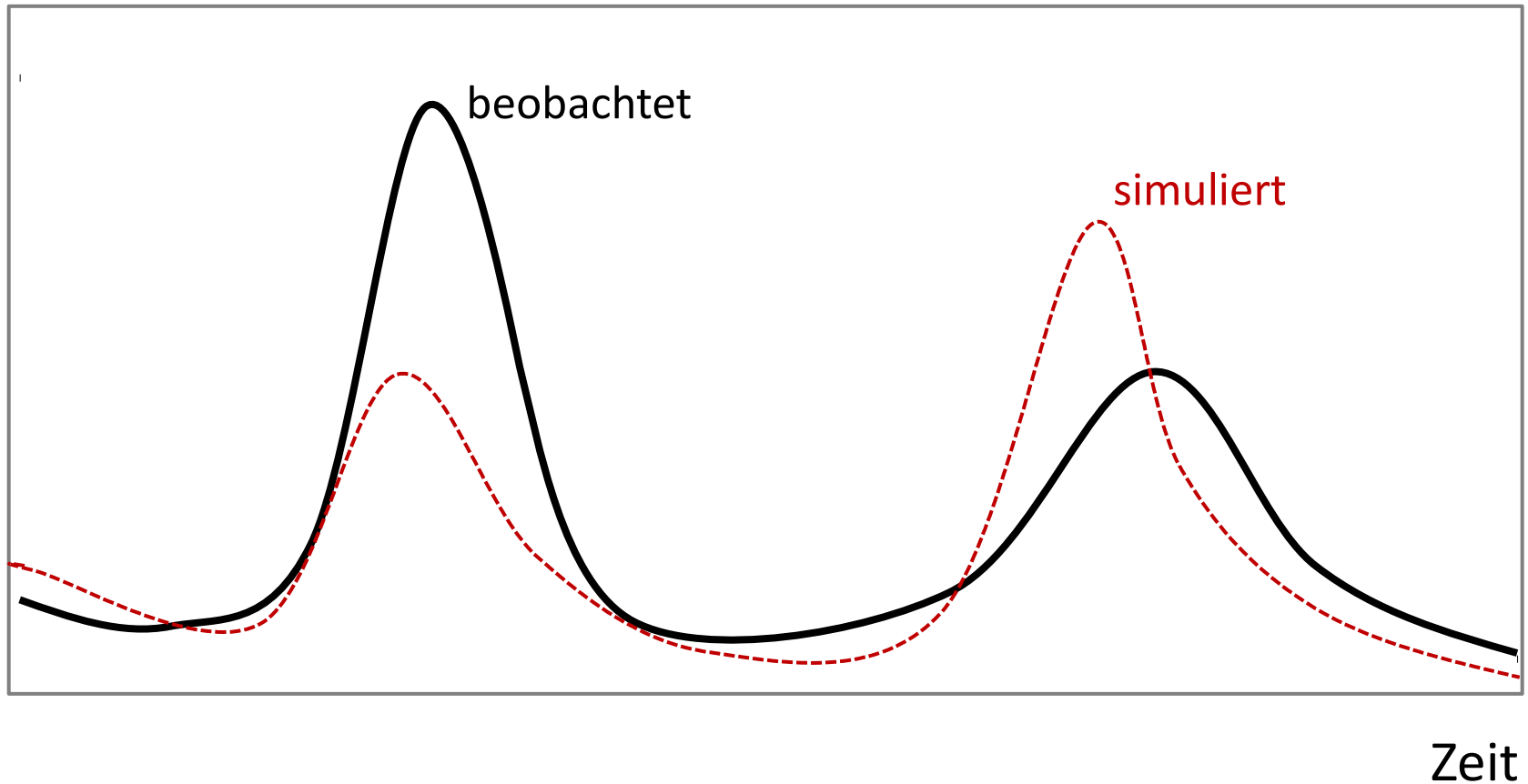
Was ist ein „gutes“ Modell?

Abfluss



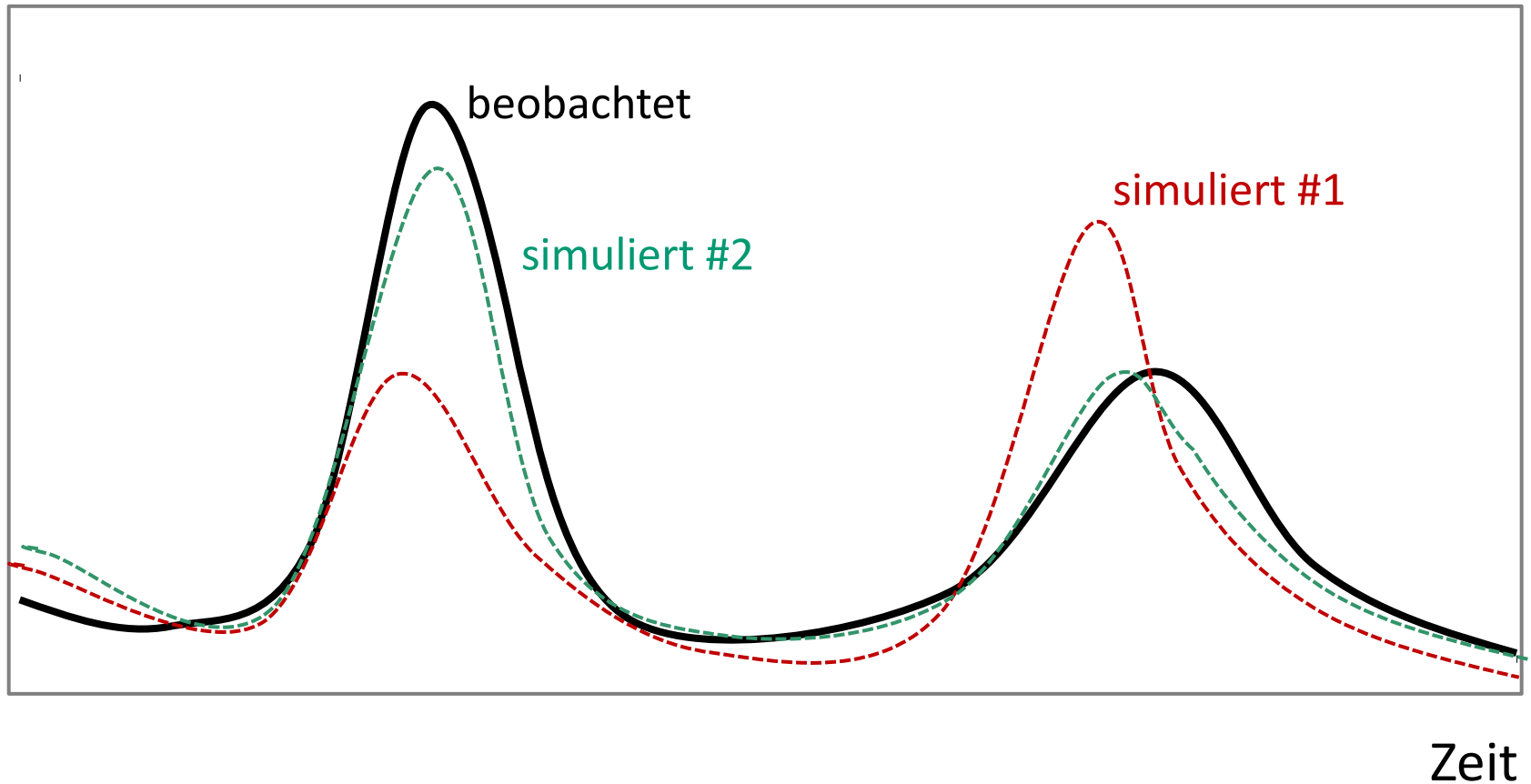
Was ist ein „gutes“ Modell?

Abfluss



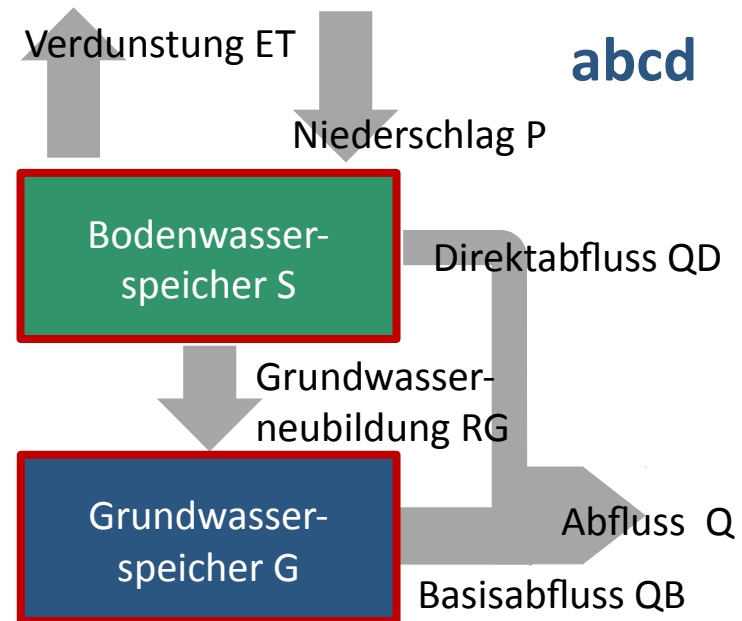
Was ist ein „besseres“ Modell?

Abfluss



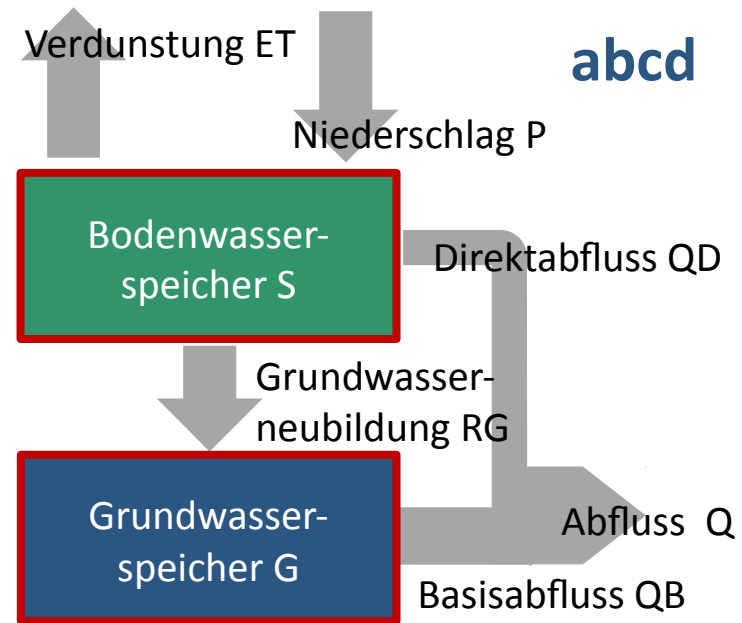
Parameter des abcd-Modells

- a. Neigung zur Direktabflussbildung
- b. Effektive Speicherkapazität des Bodens
- c. Aufteilung zwischen GW-Neubildung und Direktabfluss
- d. Rezessionskonstante für Basisabfluss



Parameter des abcd-Modells

- a. Neigung zur Direktabflussbildung
- b. Effektive Speicherkapazität des Bodens
- c. Aufteilung zwischen GW-Neubildung und Direktabfluss
- d. Rezessionskonstante für Basisabfluss



Kann man die Parameter im Feld messen?

Modellkalibrierung

Modellkalibrierung

Parameter des abcd-Modells sind alle „konzeptionell“

Modellkalibrierung

Parameter des abcd-Modells sind alle „konzeptionell“

- Physikalisch interpretierbar, aber nicht direkt messbar

Modellkalibrierung

Parameter des abcd-Modells sind alle „konzeptionell“

- Physikalisch interpretierbar, aber nicht direkt messbar
- Wie kann ich dann aber die Parameterwerte wählen?

Modellkalibrierung

Parameter des abcd-Modells sind alle „konzeptionell“

- Physikalisch interpretierbar, aber nicht direkt messbar
- Wie kann ich dann aber die Parameterwerte wählen?

Suche eine Kombination von Parametern (`param`),
so dass Beobachtung und Simulation
möglichst gut übereinstimmen.

Modellkalibrierung

Parameter des abcd-Modells sind alle „konzeptionell“

- Physikalisch interpretierbar, aber nicht direkt messbar
- Wie kann ich dann aber die Parameterwerte wählen?

Suche eine Kombination von Parametern (`param`),
so dass **Beobachtung** und **Simulation**
möglichst gut **übereinstimmen**.

Modellkalibrierung

Parameter des abcd-Modells sind alle „konzeptionell“

- Physikalisch interpretierbar, aber nicht direkt messbar
- Wie kann ich dann aber die Parameterwerte wählen?

Suche eine Kombination von Parametern (`param`),
so dass **Beobachtung** und **Simulation**
möglichst gut **übereinstimmen**.

Beobachtung : gemessener Abfluss `obs` am Gebietsauslass

Modellkalibrierung

Parameter des abcd-Modells sind alle „konzeptionell“

- Physikalisch interpretierbar, aber nicht direkt messbar
- Wie kann ich dann aber die Parameterwerte wählen?

Suche eine Kombination von Parametern (param),
so dass **Beobachtung** und **Simulation**
möglichst gut **übereinstimmen**.

Beobachtung : gemessener Abfluss obs am Gebietsauslass

Simulation : simulierter Abfluss $\text{sim}(\text{param})$ am Gebietsauslass

Modellkalibrierung

Parameter des abcd-Modells sind alle „konzeptionell“

- Physikalisch interpretierbar, aber nicht direkt messbar
- Wie kann ich dann aber die Parameterwerte wählen?

Suche eine Kombination von Parametern ($param$),
so dass **Beobachtung** und **Simulation**
möglichst gut **übereinstimmen**.

Beobachtung : gemessener Abfluss obs am Gebietsauslass

Simulation : simulierter Abfluss $sim(param)$ am Gebietsauslass

Übereinstimmung : ein quantitatives Fehlermaß/Gütemaß $x(obs, sim(param))$

Modellkalibrierung

Parameter des abcd-Modells sind alle „konzeptionell“

- Physikalisch interpretierbar, aber nicht direkt messbar
- Wie kann ich dann aber die Parameterwerte wählen?

Suche eine Kombination von Parametern (param),
so dass **Beobachtung** und **Simulation**
möglichst gut **übereinstimmen**.

Beobachtung : gemessener Abfluss obs am Gebietsauslass

Simulation : simulierter Abfluss $\text{sim}(\text{param})$ am Gebietsauslass

Übereinstimmung : ein quantitatives Fehlermaß/Gütemaß $x(\text{obs}, \text{sim}(\text{param}))$

Suche : Suchalgorithmus, der $x(\text{param})$ maximiert /minimiert

Modellkalibrierung

Parameter des abcd-Modells sind alle „konzeptionell“

- Physikalisch interpretierbar, aber nicht direkt messbar
- Wie kann ich dann aber die Parameterwerte wählen?

Suche eine Kombination von Parametern (param),
so dass **Beobachtung** und **Simulation**
möglichst gut **übereinstimmen**.

Beobachtung : gemessener Abfluss obs am Gebietsauslass

Simulation : simulierter Abfluss $\text{sim}(\text{param})$ am Gebietsauslass

Übereinstimmung : ein quantitatives Fehlermaß/Gütemaß $x(\text{obs}, \text{sim}(\text{param}))$

Suche : Suchalgorithmus, der $x(\text{param})$ maximiert /minimiert

Modellkalibrierung

Maße für Übereinstimmung / Fehler / Güte

- unendliche Vielfalt
- objektives Maß für **Deine** Anforderung an das Modell

Modellkalibrierung

Maße für Übereinstimmung / Fehler / Güte

- unendliche Vielfalt
- objektives Maß für **Deine** Anforderung an das Modell

Beispiele (in R-Schreibweise)

Modellkalibrierung

Maße für Übereinstimmung / Fehler / Güte

- unendliche Vielfalt
- objektives Maß für **Deine** Anforderung an das Modell

Beispiele (in R-Schreibweise)

- `obs` sei ein Vektor mit Beobachtungen
- `sim` sei ein Vektor mit Simulationsergebnissen

Modellkalibrierung

Maße für Übereinstimmung / Fehler / Güte

- unendliche Vielfalt
- objektives Maß für **Deine** Anforderung an das Modell

Beispiele (in R-Schreibweise)

- `obs` sei ein Vektor mit Beobachtungen
- `sim` sei ein Vektor mit Simulationsergebnissen

Sum of Squared Errors $SSE = \text{sum}((\text{obs} - \text{sim})^2)$

Root Mean Squared Error $RMSE = \text{sqrt}(\text{mean}((\text{obs} - \text{sim})^2))$

Nash-Sutcliffe Effizienz $NSE = 1 - SSE / \text{sum}((\text{obs} - \text{mean}(\text{obs}))^2)$

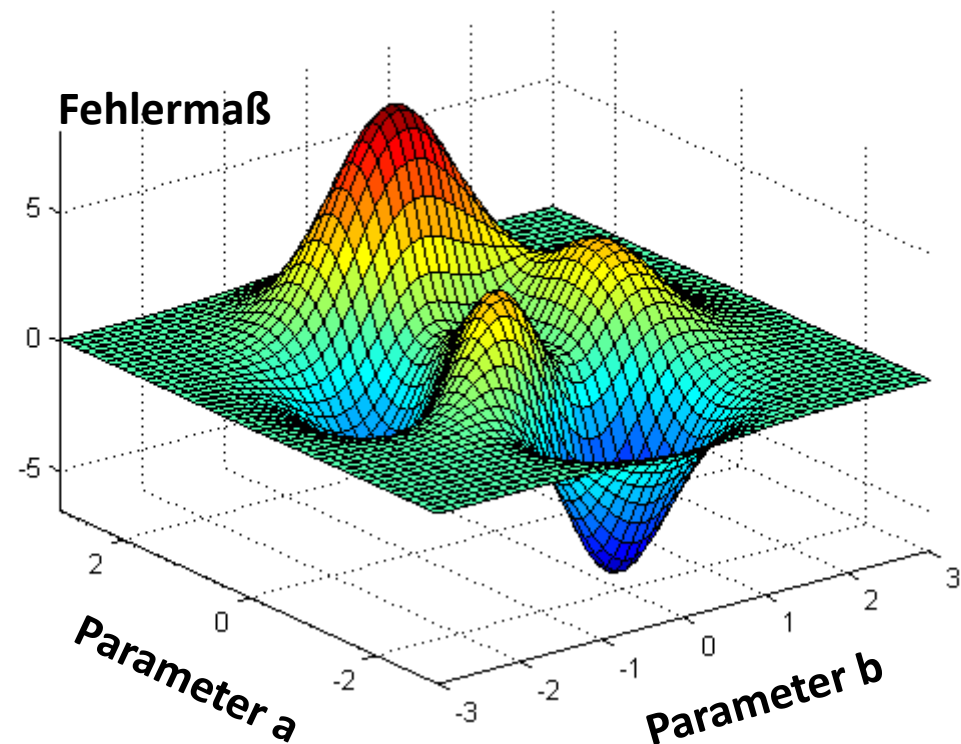
Mean Error $ME = \text{mean}(\text{obs} - \text{sim})$

Modellkalibrierung

Suchverfahren und -algorithmen

- Ausprobieren
- Rohe Gewalt (Brute Force)
- „Intelligente“ Suchalgorithmen

Beispielhafte Oberfläche einer Zielfunktion
mit zwei Modellparametern a und b



Modellvalidierung

Modellvalidierung

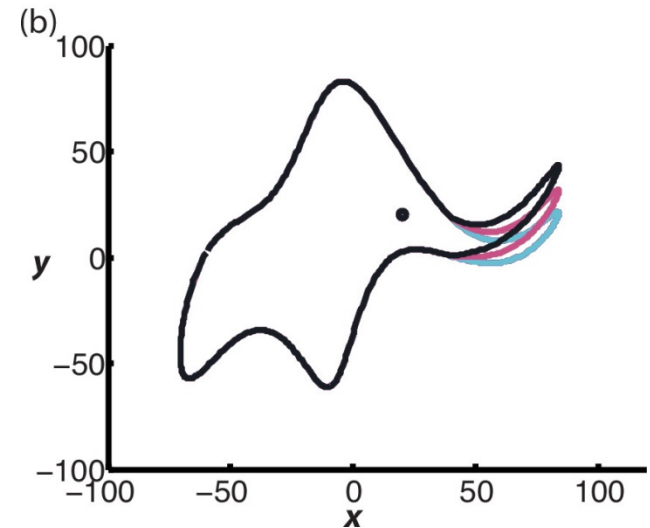
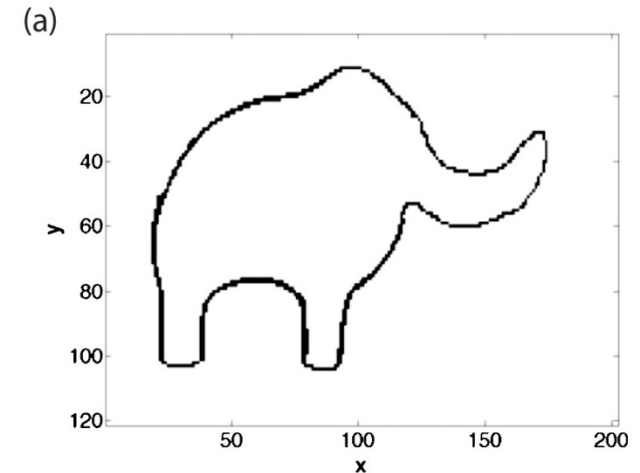
“With four parameters I can fit an elephant,
and with five I can make him wiggle his trunk.”

John von Neumann, Mathematiker

Modellvalidierung

“With four parameters I can fit an elephant,
and with five I can make him wiggle his trunk.”

John von Neumann, Mathematiker



Mayer et al. (2010), Amer. J. Phys.

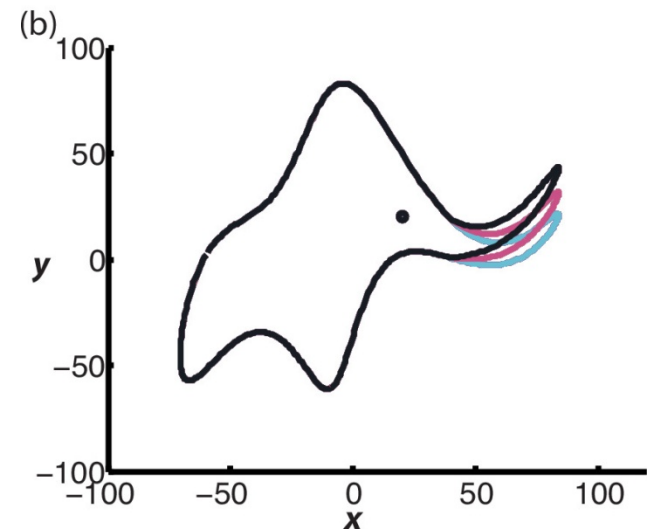
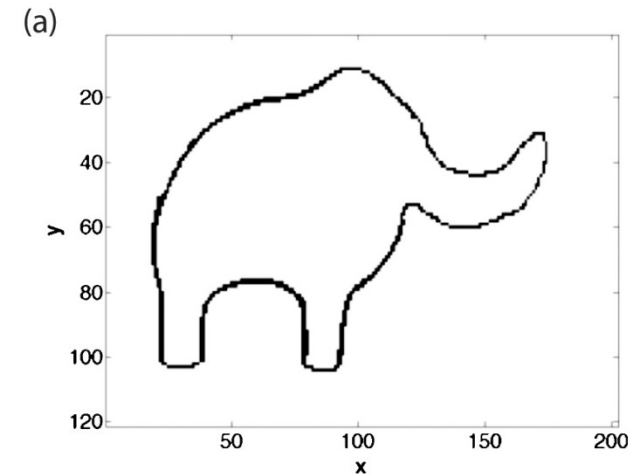
Modellvalidierung

“With four parameters I can fit an elephant,
and with five I can make him wiggle his trunk.”

John von Neumann, Mathematiker

Mit anderen Worten

Wie kann ich beurteilen, dass mein kalibriertes
Modell auch außerhalb der verwendeten
Beobachtungen funktioniert?



Mayer et al. (2010), Amer. J. Phys.

Modellvalidierung

Split Sampling

Modellvalidierung

Split Sampling

- Kalibriere das Modell an einer Teilmenge der Beobachtungen;
- überprüfe anhand der verbleibenden Teilmenge die Güte des Modells.

Modellvalidierung

Split Sampling

- Kalibriere das Modell an einer Teilmenge der Beobachtungen;
- überprüfe anhand der verbleibenden Teilmenge die Güte des Modells.

Zeitreihe beobachteter Abflüsse am Pegel



Modellvalidierung

Split Sampling

- Kalibriere das Modell an einer Teilmenge der Beobachtungen;
- überprüfe anhand der verbleibenden Teilmenge die Güte des Modells.

Zeitreihe beobachteter Abflüsse am Pegel



Modellvalidierung

Split Sampling

- Kalibriere das Modell an einer Teilmenge der Beobachtungen;
- überprüfe anhand der verbleibenden Teilmenge die Güte des Modells.

Zeitreihe beobachteter Abflüsse am Pegel



Modellvalidierung

Split Sampling

- Kalibriere das Modell an einer Teilmenge der Beobachtungen;
- überprüfe anhand der verbleibenden Teilmenge die Güte des Modells.

Zeitreihe beobachteter Abflüsse am Pegel



Finde die beste Kombination
von a, b, c und d

Modellvalidierung

Split Sampling

- Kalibriere das Modell an einer Teilmenge der Beobachtungen;
- überprüfe anhand der verbleibenden Teilmenge die Güte des Modells.

Zeitreihe beobachteter Abflüsse am Pegel



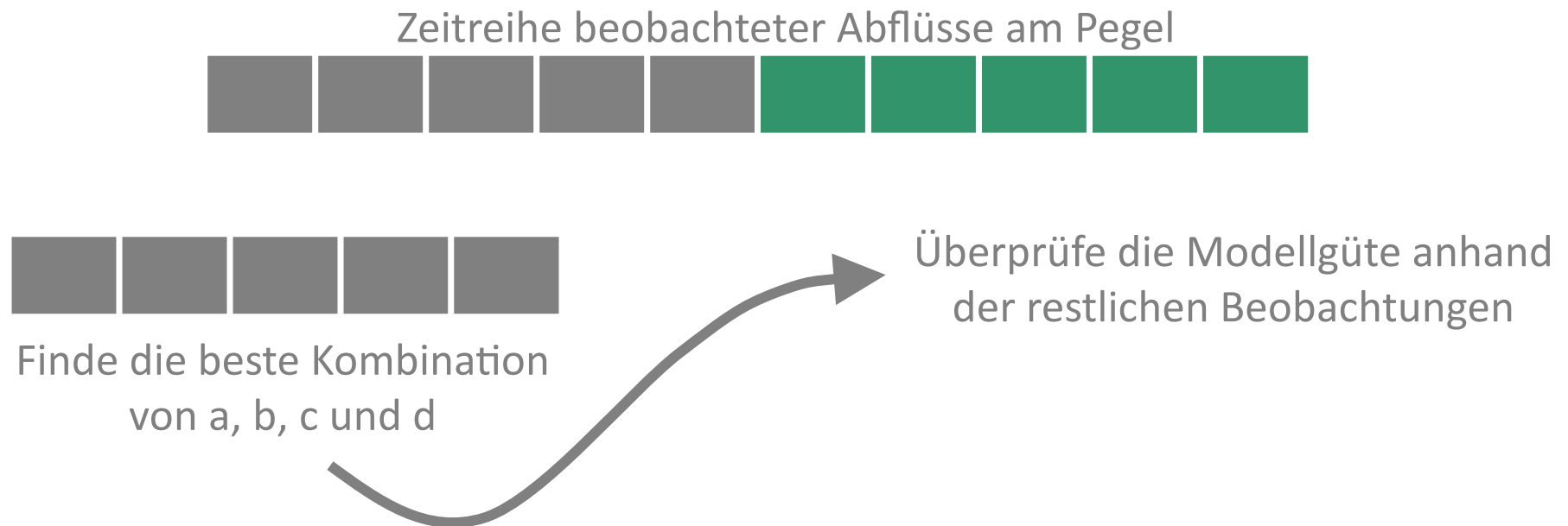
Finde die beste Kombination
von a, b, c und d



Modellvalidierung

Split Sampling

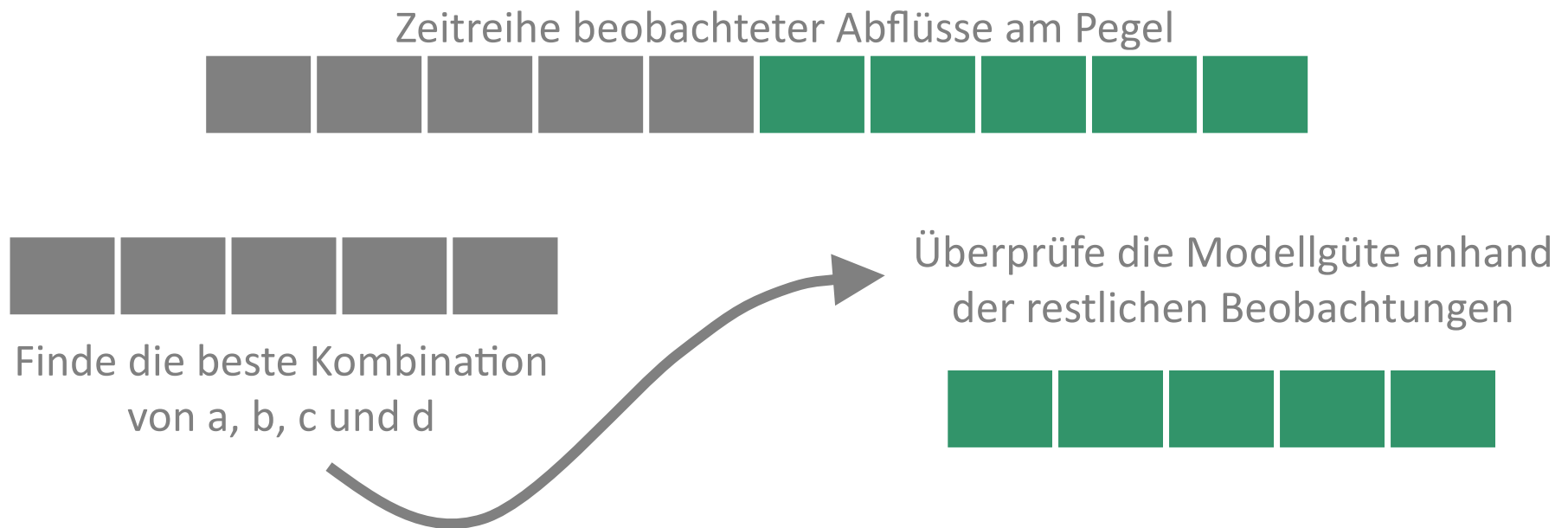
- Kalibriere das Modell an einer Teilmenge der Beobachtungen;
- überprüfe anhand der verbleibenden Teilmenge die Güte des Modells.



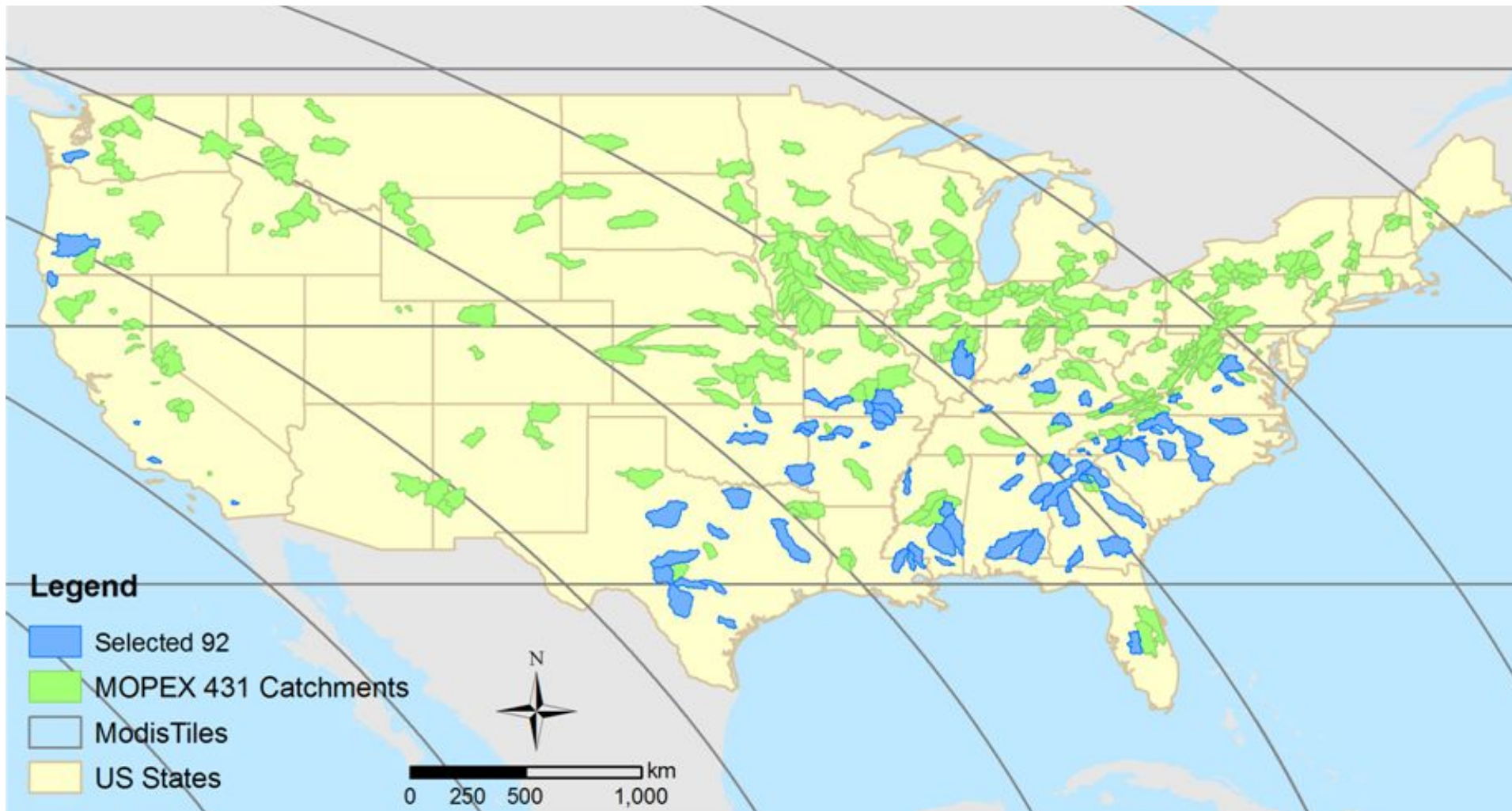
Modellvalidierung

Split Sampling

- Kalibriere das Modell an einer Teilmenge der Beobachtungen;
- überprüfe anhand der verbleibenden Teilmenge die Güte des Modells.

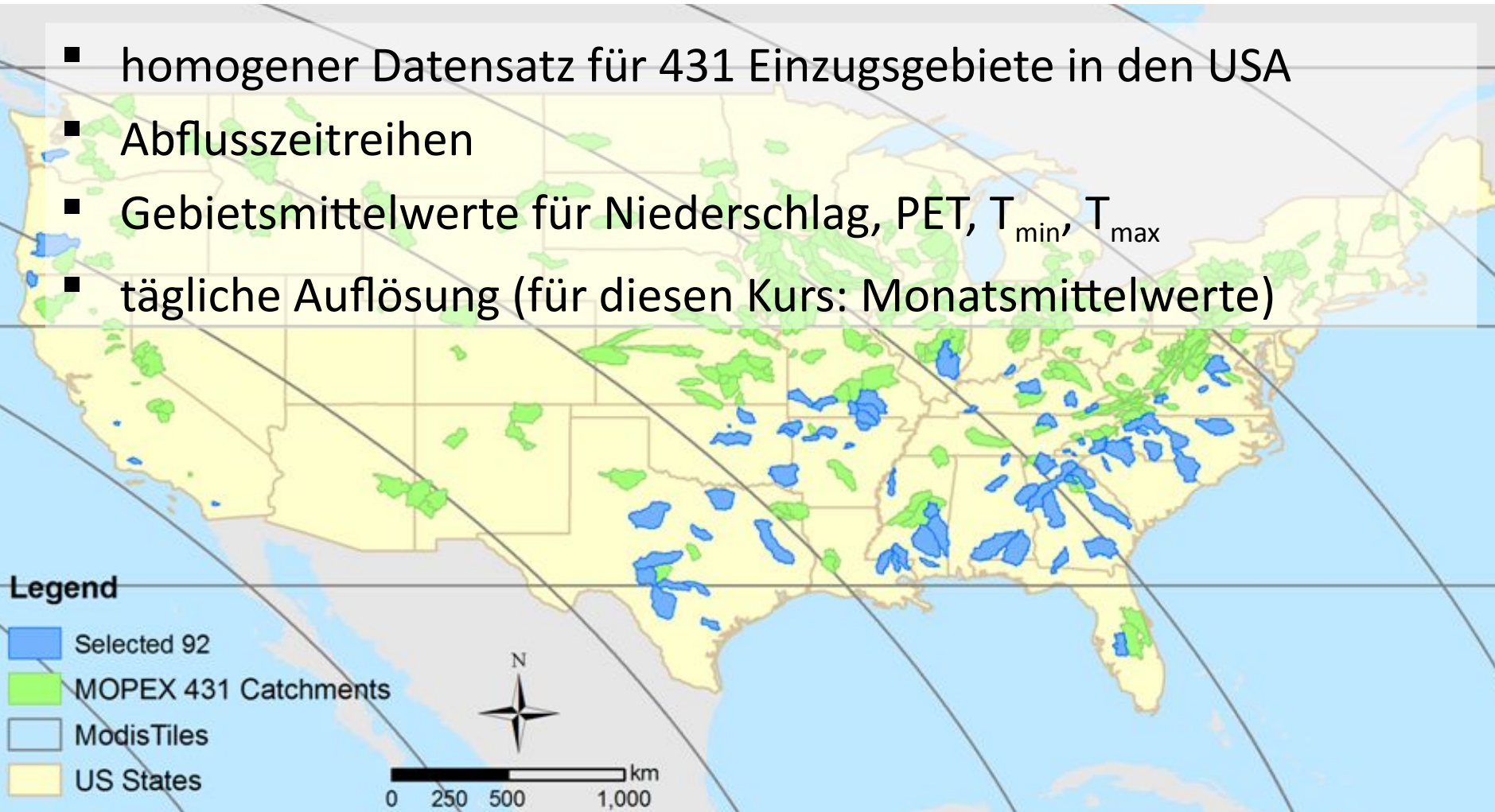


MOPEX: **M**odel **P**arameter **E**stimation **E**xperiment



MOPEX: **MO**dell **P**arameter **E**stimation **EX**periment

- homogener Datensatz für 431 Einzugsgebiete in den USA
- Abflusszeitreihen
- Gebietsmittelwerte für Niederschlag, PET, T_{\min} , T_{\max}
- tägliche Auflösung (für diesen Kurs: Monatsmittelwerte)



MOPEX: **MO**dell **P**arameter **E**stimation **EX**periment

- homogener Datensatz für 431 Einzugsgebiete in den USA
- Abflusszeitreihen
- Gebietsmittelwerte für Niederschlag, PET, T_{\min} , T_{\max}
- tägliche Auflösung (für diesen Kurs: Monatsmittelwerte)

Download der Daten und Metadaten:

https://hydrology.nws.noaa.gov/pub/gcip/mopex/US_Data/

Legend

-  Selected 92
-  MOPEX 431 Catchments
-  ModisTiles
-  US States



MOPEX: **MO**dell **P**arameter **E**stimation **EX**periment

- homogener Datensatz für 431 Einzugsgebiete in den USA
- Abflusszeitreihen
- Gebietsmittelwerte für Niederschlag, PET, T_{\min} , T_{\max}
- tägliche Auflösung (für diesen Kurs: Monatsmittelwerte)

Download der Daten und Metadaten:

https://hydrology.nws.noaa.gov/pub/gcip/mopex/US_Data/

Legend

Selected 92

MOPEX 431 Catchments

Tiles

US States



Bearbeite die Aufgaben in diagnose.R.

0 250 500 1,000 km