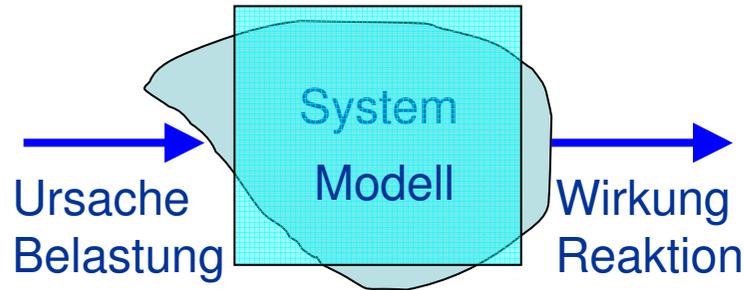




# Grundlagen der Kalibrierung

Prof. Dr.-Ing. M. Uhl  
FH Münster, FB Bauingenieurwesen  
FG Wasserwirtschaft  
Corrensstr. 25, 48149 Münster



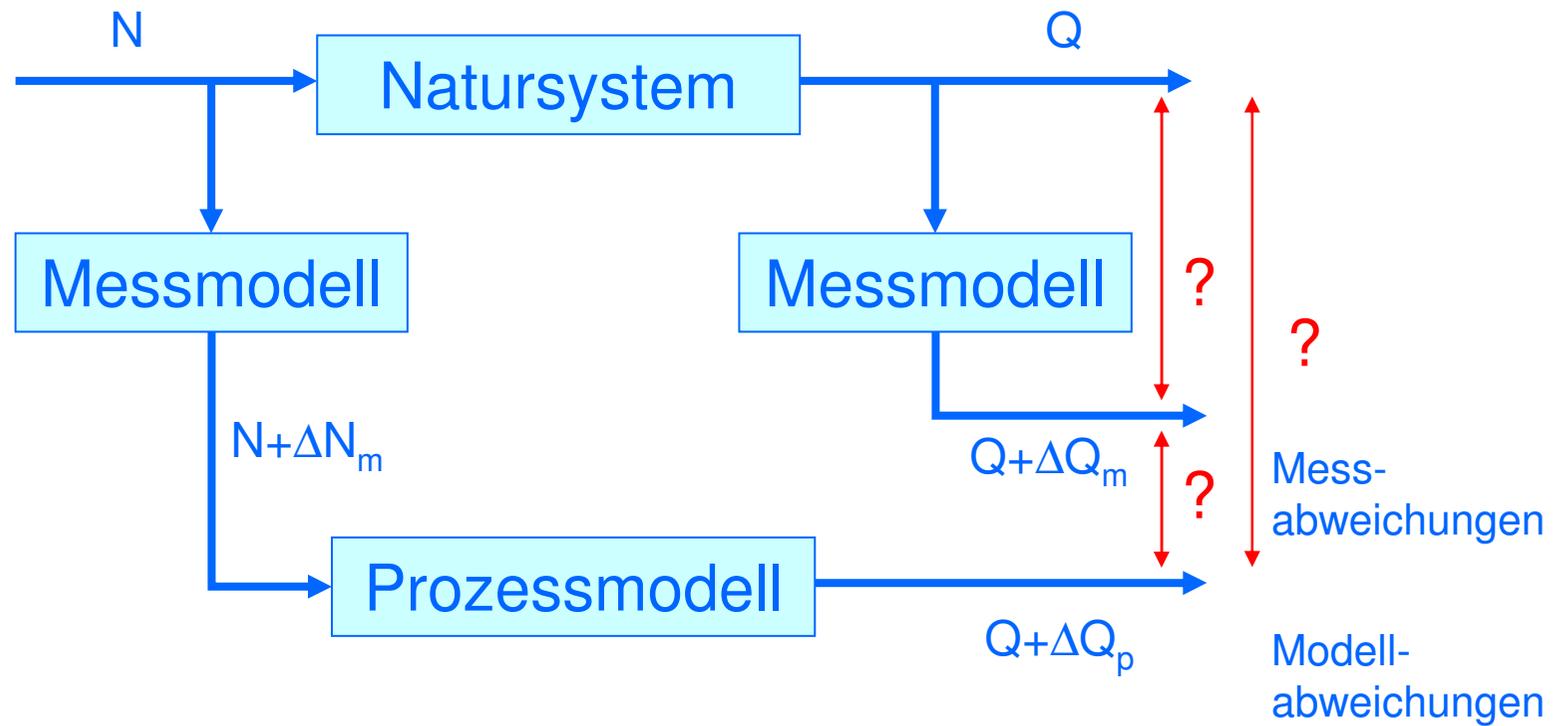
$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

N-A-Modell



- black-box-Modelle
- konzeptionelle Modelle
- physikalisch basierte Modelle

# Abweichungen



## Abweichungen

### Messabweichungen

Unvollkommenheiten von

- Messeinrichtungen
- Messverfahren
- Objekt, Prozess

### Modellabweichungen

Unvollkommenheiten von

- Modell
- Objektdaten
- Prozessdaten
- Prozess

Vermeidung/Elimination von Fehlern

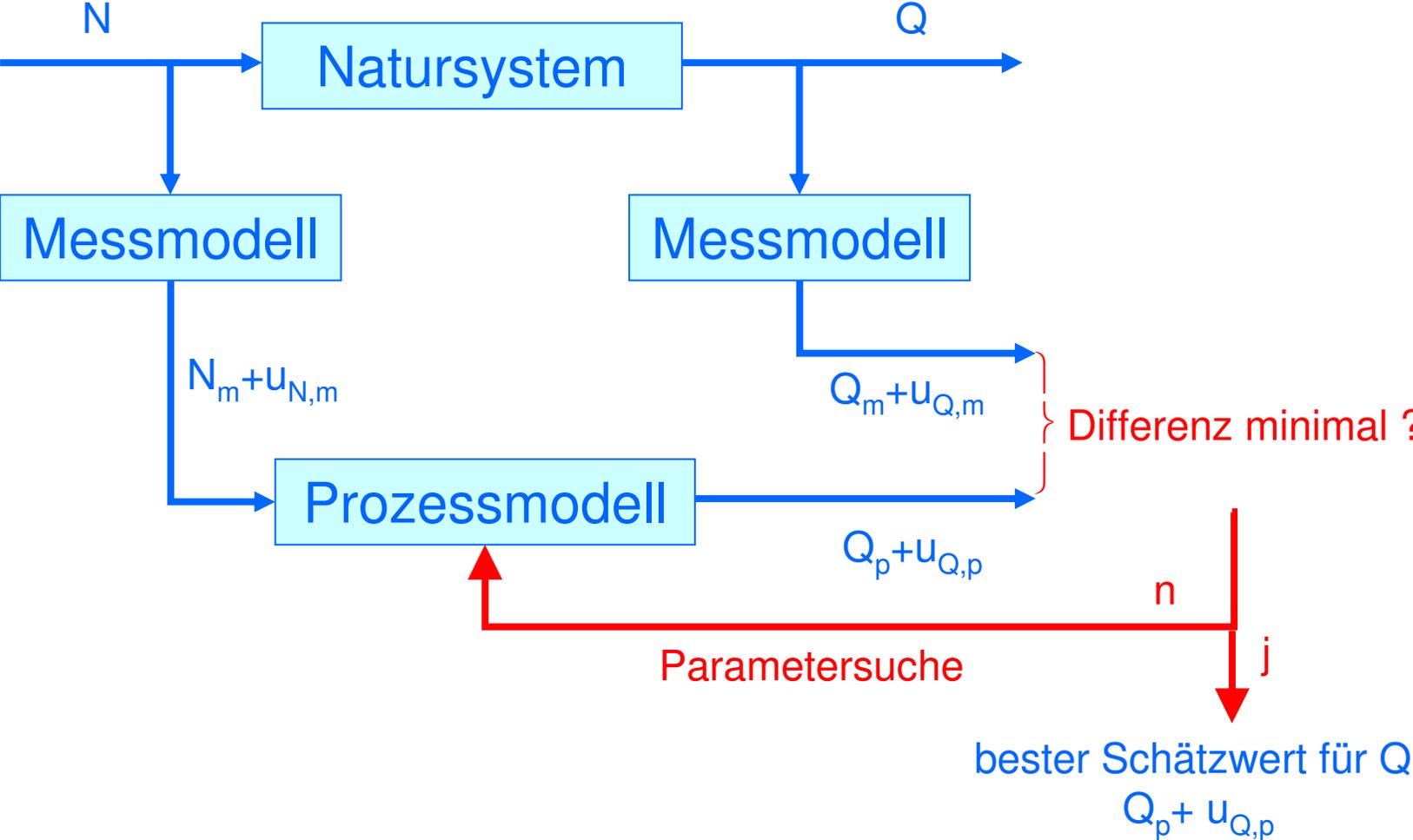
Korrektion systematischer Abweichungen

Quantifizierung zufälliger Abweichungen

Messergebnis  $y$ ,  $u_y$   
Schätzwert der Messgröße  $Y$

Berechnungsergebnis  $y$ ,  $u_y$   
Schätzwert der Prozessgröße  $Y$

# Kalibrierung



- heuristische Verfahren
- Optimierungsverfahren
- probabilistische Verfahren
- genetischen Algorithmen

- Vielzahl und Interdependenz der Parameter
- Abhängigkeit von Zielgrößen
- Existenz lokaler Optima
- mangelnde Formalisierung des heuristischen Wissens über Kalibrierung

- hoher Bearbeitungsaufwand
- hoher Rechenaufwand
- hohe individuelle Bearbeiterinflüsse
- oft suboptimale Ergebnisse

## Einzelwerte

Extrema, Summen, Mittel

$$DY = \frac{y - x}{x}$$

$$-\infty \leq DY \leq +\infty, x \neq 0$$

## Ganglinien

$$R_{\text{eff}} = 1 - \frac{\sum (x_i - y_i)^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2}$$

$$-\infty < R_{\text{eff}} \leq +1$$

$$R_{\text{eff}, w} = 1 - \frac{\sum w(x_i, t)(x_i - y_i)^2}{\sum w(x_i, t)(x_i - \bar{x})^2}$$

# Verifizierung

Methoden	Erläuterung	Ziel der Verifizierung
blind test	keine Kalibrierung Verwendung von Parametern aus a priori-Informationen (z.B. Messdaten)	Realitätsnähe des unkalibrierten Modells bei Anwendung auf andere Gebiete oder Szenarien
split-sample test	Ereignisse für Kalibrierung und Verifizierung aus unabhängigen, ähnlichen Zeitspannen ähnlicher Charakteristik	Übertragbarkeit des kalibrierten Modells bei homogenen Bedingungen
differenzierter split-sample test	Kalibrierung für Zeitspannen mit bestimmten Bedingungen (klimatisch, Landnutzung); Verifizierung für Zeitspannen mit andersartigen Bedingungen	Übertragbarkeit des kalibrierten Modells auf andersartige Bedingungen
proxy-basin test	Kalibrierung mit Daten eines oder mehrerer Einzugsgebiete + Verifizierung für ein anderes, ähnliches Gebiet Anpassung gebietsspezifischer Parametern erlaubt, keine neue Kalibrierung	Übertragbarkeit des kalibrierten Modells auf andere Einzugsgebiete ähnlicher Charakteristik
proxy-basin differential split-sample test	Kalibrierung mit Daten eines oder mehrerer Einzugsgebiete + Verifizierung für ein anderes, unterschiedliches Gebiet Anpassung von gebietsspezifischen Parametern erlaubt, keine neue Kalibrierung	Übertragbarkeit des kalibrierten Modells auf andere Einzugsgebiete ähnlicher Charakteristik

# Kalibrierung und Unsicherheit

Modell

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

Ergebnis

$$y = f(x_i) \quad \text{mit} \quad u_c(y)$$

## Monte-Carlo-Verfahren

### I. Kalibrierung

1. Ausspielung von Zufallskombinationen der Modellparameter
2. Durchführung der Modellrechnung für jede Parameterkombination
3. Berechnung und Beurteilung der Abweichungsmaße

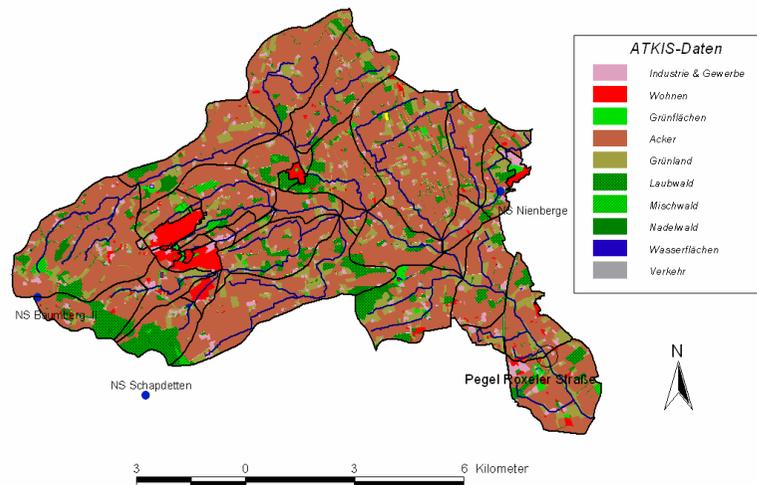
### II. Unsicherheitsschätzung

1. Lösungsmenge von  $n$  Parametern mit guten Anpassungen  
Prämisse: „parameter equifinality“ (GLUE-Verfahren)
2. deskriptive Statistik für deren Berechnungsergebnisse
3. Ermittlung von  $y$  und  $u_c(y)$

gut geeignet für Modelle mit größerer Anzahl freier Parameter

- mathematisch wenig anspruchsvoll
- hoher Rechenaufwand

## Münstersche Aa - Oberlauf



$A_E = 84,9 \text{ km}^2$   
55-187 m üNN  
8 % Versiegelungsanteil  
vorwiegend Landwirtschaft  
38 TEG

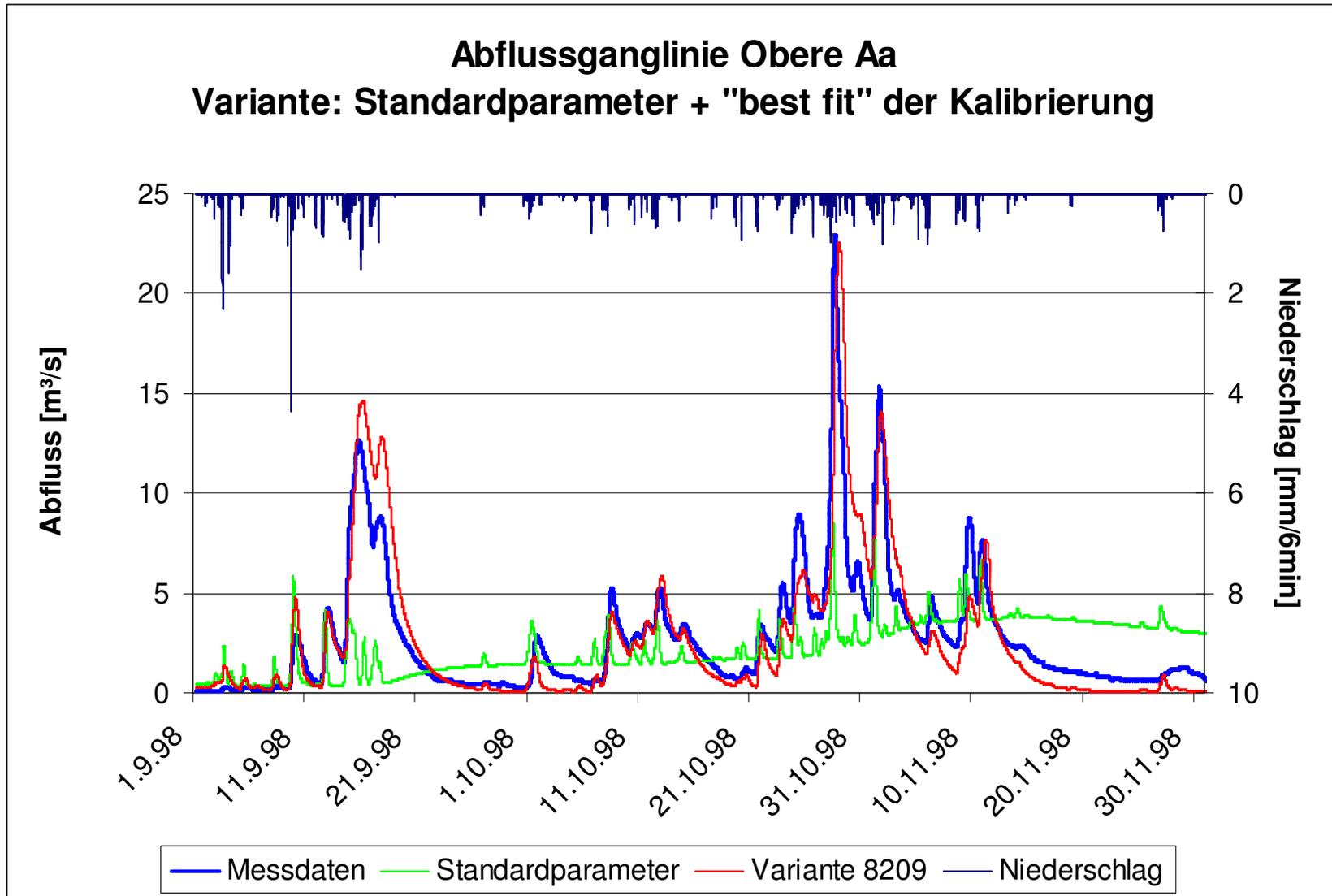
Parabraunerde aus Geschiebelehm  
Gley-Podsol aus sandigen Flussablagerungen  
Braunerde aus Mergelgesteinen und kalkhaltigen Schottern  
Pseudogley aus Geschiebedecksand über Geschiebelehm

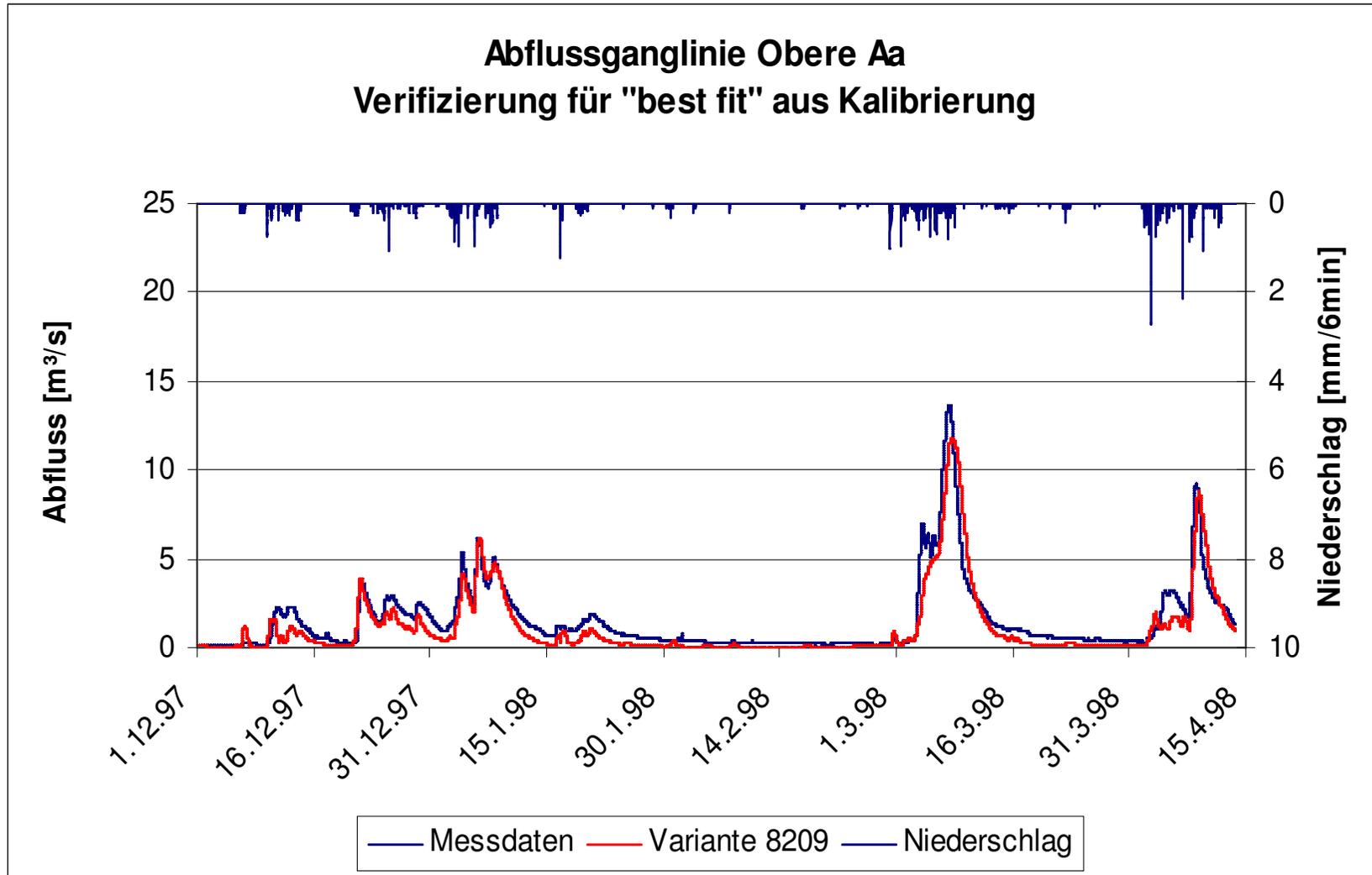
<b>Anzahl "sehr guter" Kalibrierungsergebnisse</b>			
Kalibrierungszeitspanne: 01.09.1998 - 01.12.1998 1624 Rechenläufe			
$R_{\text{eff}}$	DV	DHQ	Anzahl
$\geq 0,75$	-	-	144
-	$\leq 5\%$	-	79
-	-	$\leq 5\%$	155
$\geq 0,75$	$\leq 5\%$		8
$\geq 0,75$		$\leq 5\%$	49
	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	2
$\geq 0,75$	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	1

„best set“

„best fit“

- retob      Retentionskonstante Oberflächenabfluss von natürlichen Flächen
- retint     Retentionskonstante Interflow
- retbas     Retentionskonstante Basisabfluss
- retvorb    Retentionskonstante Oberflächenabfluss von versiegelten Flächen
- exf        kf-Wert
- fk         Feldkapazität
- inf        maximale Infiltration
- flg        Fließgeschwindigkeit





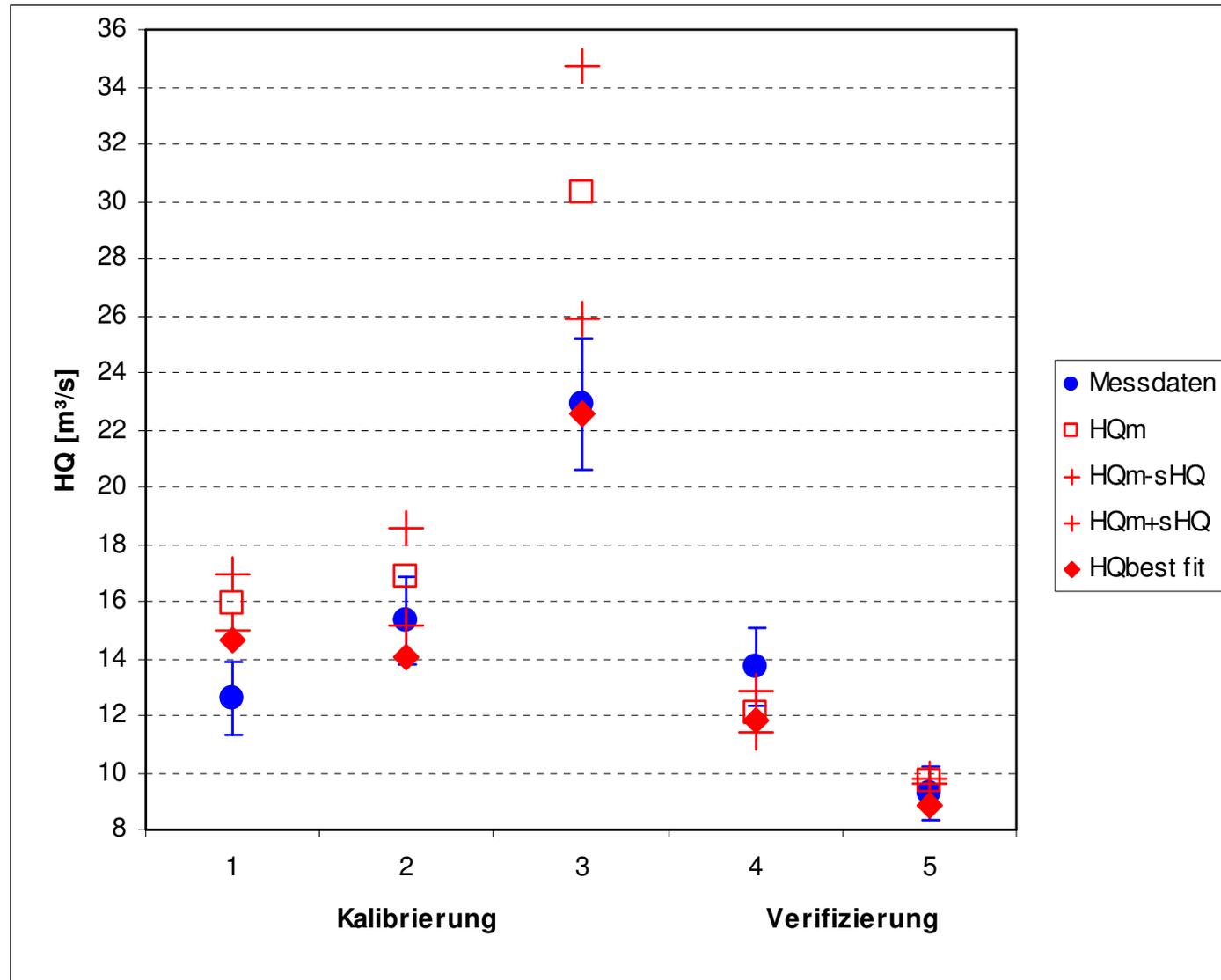
# Beispiel

Kalibrierung 01.09.1998 - 01.12.1998				Abweichungsmaße		
Variante	HQ	MQ	V	R <sub>eff</sub>	DV	DHQ
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	Mio. m <sup>3</sup>	-	%	%
8209	22,58	2,62	20,59	0,75	4,1	1,5
391	27,75	2,69	21,18	0,83	1,3	21,0
8801	27,79	2,75	21,58	0,83	0,6	21,2
8577	27,84	2,79	21,95	0,82	2,3	21,4
98	33,05	2,72	21,40	0,77	0,3	44,1
322	33,62	2,84	22,36	0,76	4,2	46,6
215	34,82	2,76	21,72	0,75	1,2	51,8
855	34,98	2,81	22,11	0,75	3,0	52,6
Mittel	30,30		21,61			
Stabw	4,5		0,56			
Varkoeff	0,15		0,03			

} „best fit“

} „best set“

# Beispiel



- Formalisierung des Fachwissens zur Modellkalibrierung
- Entwicklung eines Zielgrößen- und Bewertungskanons für unterschiedliche Planungsaufgaben
- Untersuchung, Eignungsbewertung und Adaption numerischer Verfahren zur Parametersuche
- Entwicklung eines Kalibrierungstools durch Integration von Wissensbasis + numerischen Parametersuchverfahren