

LARSIM-Schulung im Rahmen des Internationalen LARSIM-Anwenderworkshops 2018:

Kalibrierung und Diagnose von Berechnungsergebnissen der LARSIM-Wasserhaushaltsmodelle

Dr.-Ing. Kai Gerlinger

HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft

März 2018

Auftraggeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde

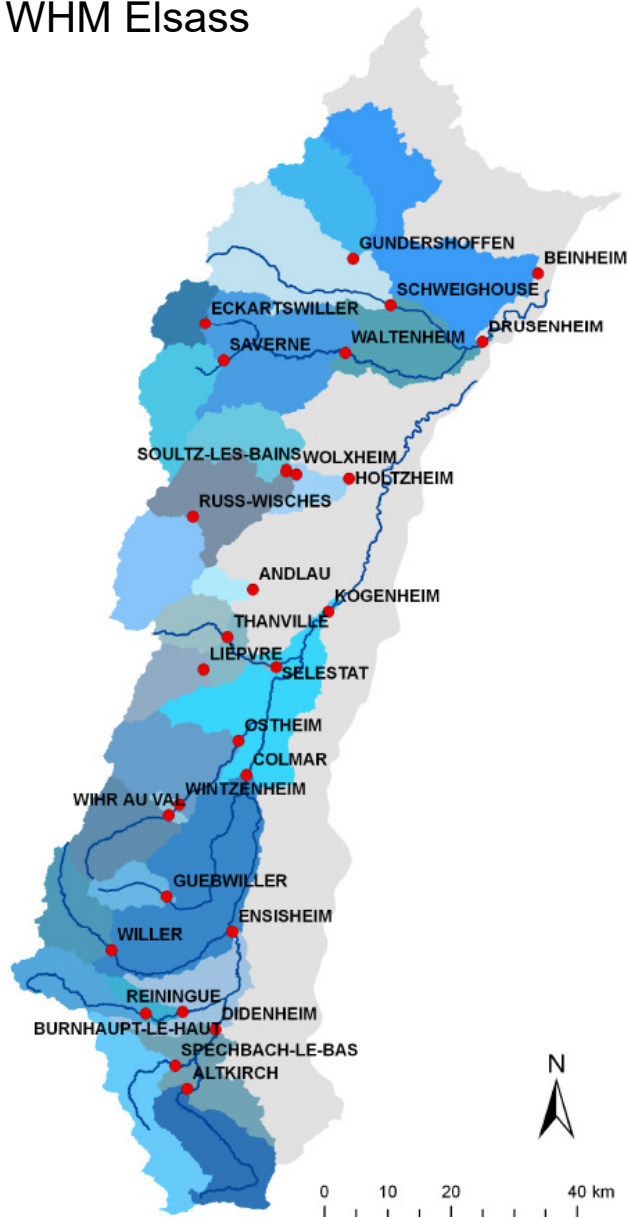


Inhalt

1. Grundlagen der Kalibrierung
2. Kalibrierungsstrategien:
 - Manuelle Kalibrierung
 - Automatische Kalibrierung
3. Gütekriterien zur Diagnose der Simulationsqualität
4. Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung
5. Beispiel für eine automatische Kalibrierung
6. Diagnose-Werkzeuge
7. Zusammenfassung
8. Interaktive Rechenbeispiele
9. Diskussion

Motivation

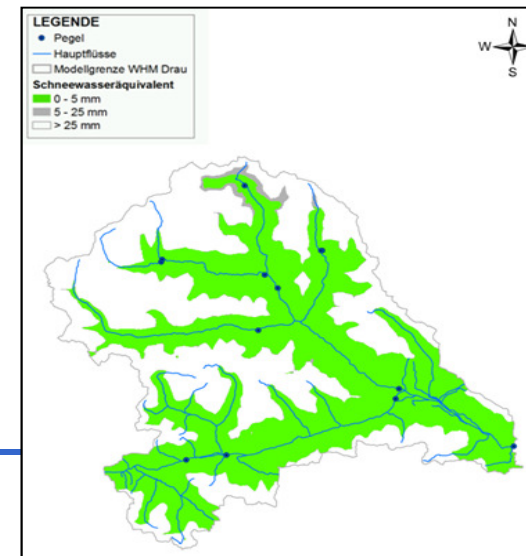
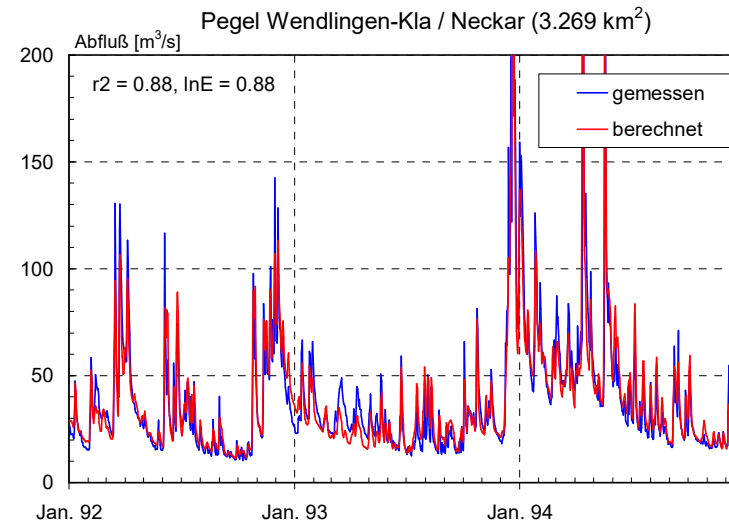
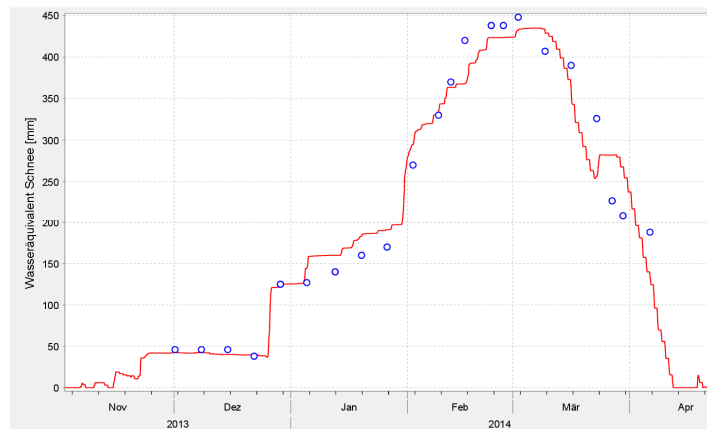
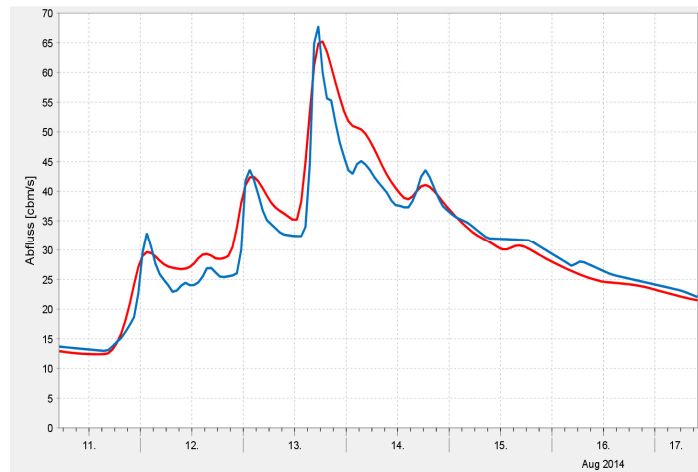
WHM Elsass



- Die Modelle stellen eine vereinfachte Abbildung der hydrologischen Gegebenheiten im Einzugsgebiet dar.
- Um die Modelle auf die Gegebenheiten anzupassen, sind Modellparameter erforderlich.
- Modellparameter, die direkt aus Messwerten (z.B. bodenphysikalischen Größen) abgeleitet werden und die eine wirklich physikalisch basierte Modellierung ermöglichen, stehen in der Regel nicht für größere Einzugsgebiete in hoher Auflösung zur Verfügung.
- Die Modellparameter werden für jedes (Zwischen)-Einzugsgebiet eines Pegels einheitlich festgelegt.

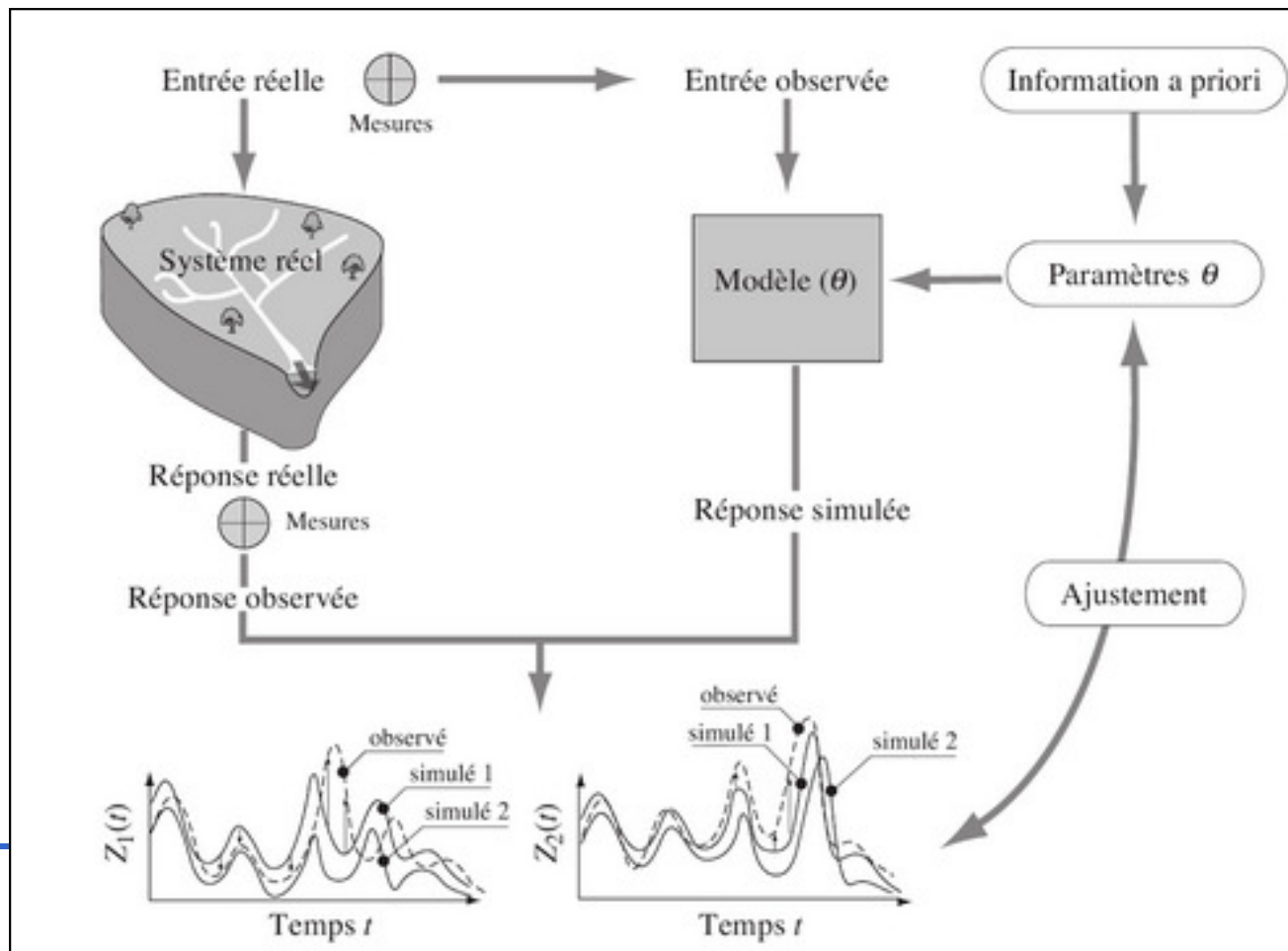
Grundlagen der Kalibrierung

- Kalibrierung: Anpassung der Modellparameter unter Verwendung gemessener Daten aus verschiedenen Quellen



Grundlagen der Kalibrierung

- Die Modellparameter erlauben summarisch, die verschiedenen Prozesse zu regeln, die zur Abflussentstehung beitragen.
- Während der Kalibrierung sind die Modellparameter so anzupassen, dass das beste Ergebnis hinsichtlich vorzugegebener Gütekriterien erreicht wird.



Hingray et al. 2009

Grundlagen der Kalibrierung

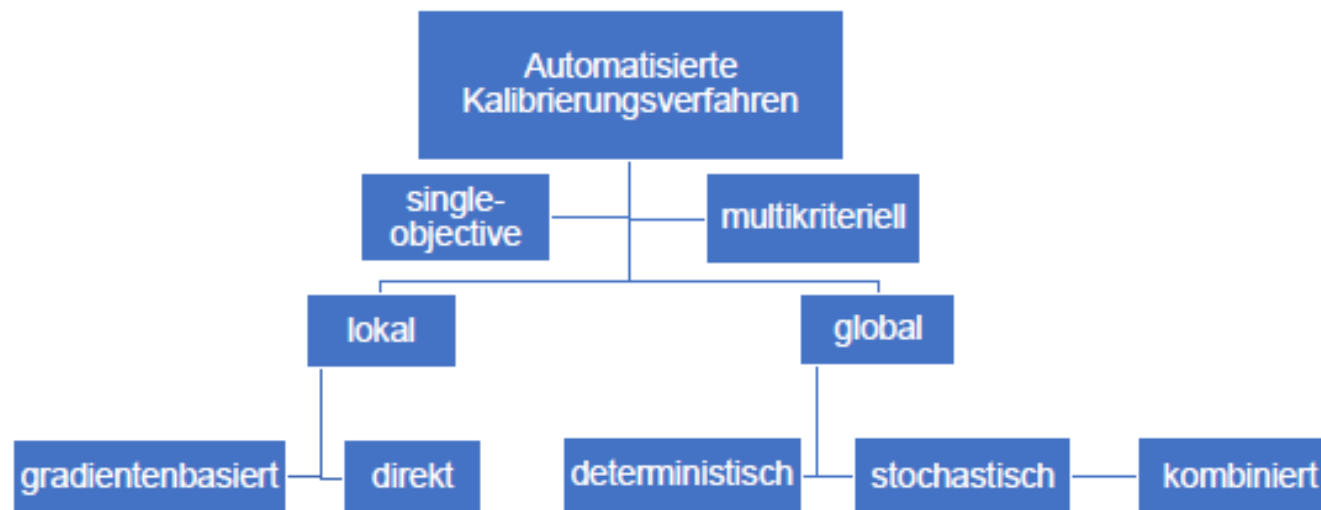
- Im Vorfeld der Kalibrierung sind mehrere Entscheidungen notwendig, die in Abhängigkeit des Modellzwecks getroffen werden müssen:
 - Festlegung des Berechnungs-Zeitschritts (die Werte der Modellparameter des Tageswertmodells unterscheiden sich von den Werten des Stundenwertmodells)
 - Auswahl der Daten, an denen die Kalibrierung des Modells erfolgt
 - Auswahl der zu kalibrierenden Parameter und Definition des Wertebereichs der Parameter
 - Spezifikation von Gütekriterien und Zielfunktionen
 - Auswahl einer Optimierungsstrategie
 - Auswahl einer Strategie zur Validierung und Unsicherheitsanalyse

Kalibrierungsstrategien

- Manuelle Kalibrierung:
 - Die Wahl der Modellparameter erfolgt interaktiv durch den Hydrologen durch seine Erfahrung
 - Dabei werden visuelle Vergleiche und die Ergebnisse mehrerer Zielfunktionen/Gütekriterien verwendet
 - Die manuelle Kalibrierung ist aufwendig (in Abhängigkeit von der Anzahl der Modellparameter, der Länge der Zeitreihe und der Vorgabe der zu beachtenden Gütekriterien)

Kalibrierungsstrategien

- Automatische Kalibrierung:
 - Die Wahl der Modellparameter erfolgt durch einen Algorithmus mit der Vorgabe einer bzw. mehrerer Zielfunktionen und zahlreichen Iterationsläufen
 - Durch die Zielfunktionsvorgaben ist die endgültig getroffene Wahl der Modellparameter nachvollziehbar
 - In der Literatur sind verschiedene Verfahren beschrieben (z.B. Monte Carlo Simulationen, Shuffled-Complex-Evolution,...)



Deubler 2017

Gütekriterien

- Zur Diagnose der Güte der Simulationen werden statistische Maßzahlen (Gütekriterien) eingesetzt.
- Diese sollen folgenden Vorgaben erfüllen:
 - Objektiv
 - Schnell / einfach / klar interpretierbar
 - Integral (Fehlerart, Zeitbereich, Abflussbereich)
- In LARSIM werden folgende Gütekriterien berechnet:
 - Bestimmtheitsmaß r^2
 - Nash-Sutcliffe Effizienz
 - Nash-Sutcliffe-Effizienz der logarithmierten Abflüsse
 - Bilanz

Gütekriterien

Ergebnisse der Untersuchung von Gütekriterien (für LfU Rheinland-Pfalz 2014):

Bestimmtheitsmaß – r^2

$$r^2 = \left(\frac{\sum (mes_i - \overline{mes}) \cdot (sim_i - \overline{sim})}{\sqrt{\sum (mes_i - \overline{mes})^2} \cdot \sqrt{\sum (sim_i - \overline{sim})^2}} \right)^2$$

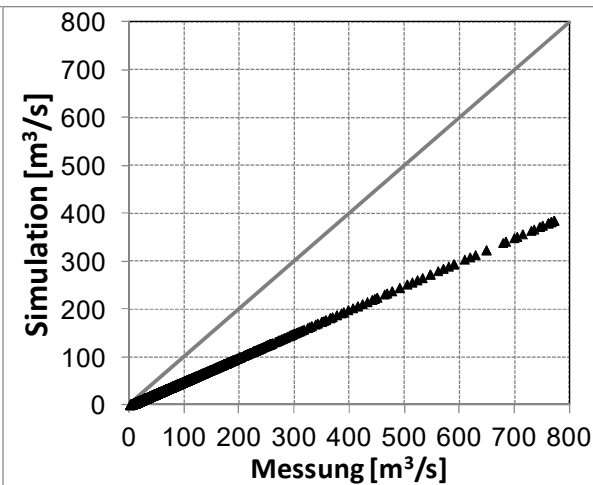
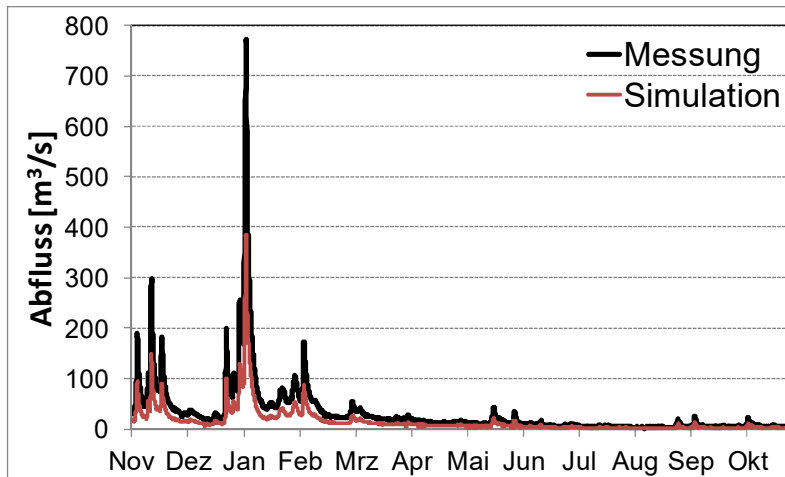
- Kovarianz von Messung und Simulation
- Anteil der durch linearen Zusammenhang erklärten Varianz
- Wertebereich: 0 ... 1
mit: 1 = perfekte Übereinstimmung

Hauptprobleme:

- Systematische Fehler nicht berücksichtigt
(Steigung, Achsenabschnitt der Regression)
- Überbewertung großer Werte

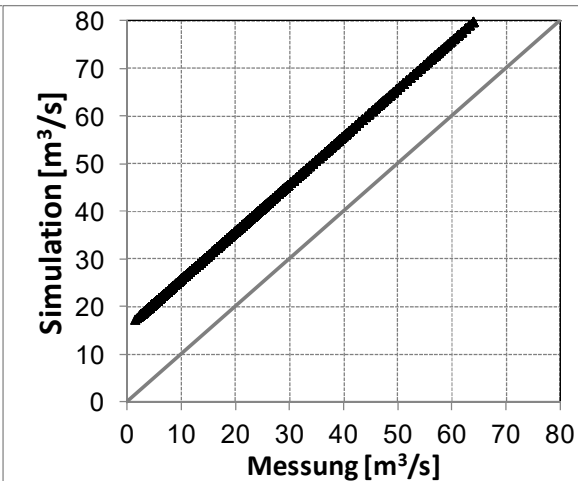
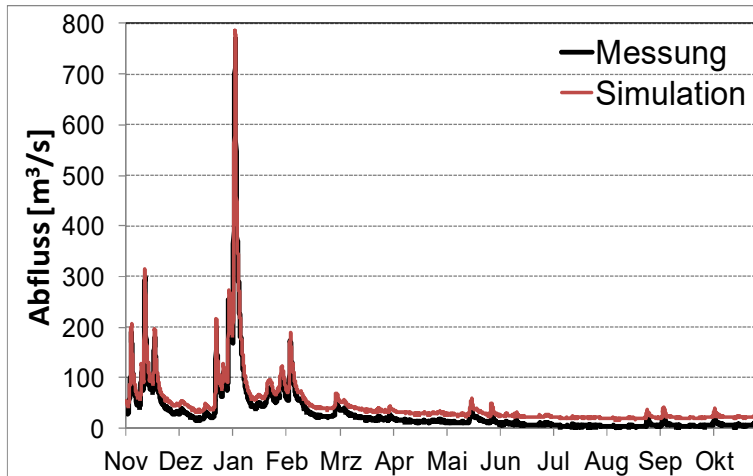
Gütekriterien

**Simulation =
0,5 x Messung**



$$r^2 = 1,0$$

**Simulation =
Messung + 0,5 MQ**



$$r^2 = 1,0$$

⇒ r^2 erfasst keine systematischen Fehler

Nash-Sutcliffe-Effizienz – NSE

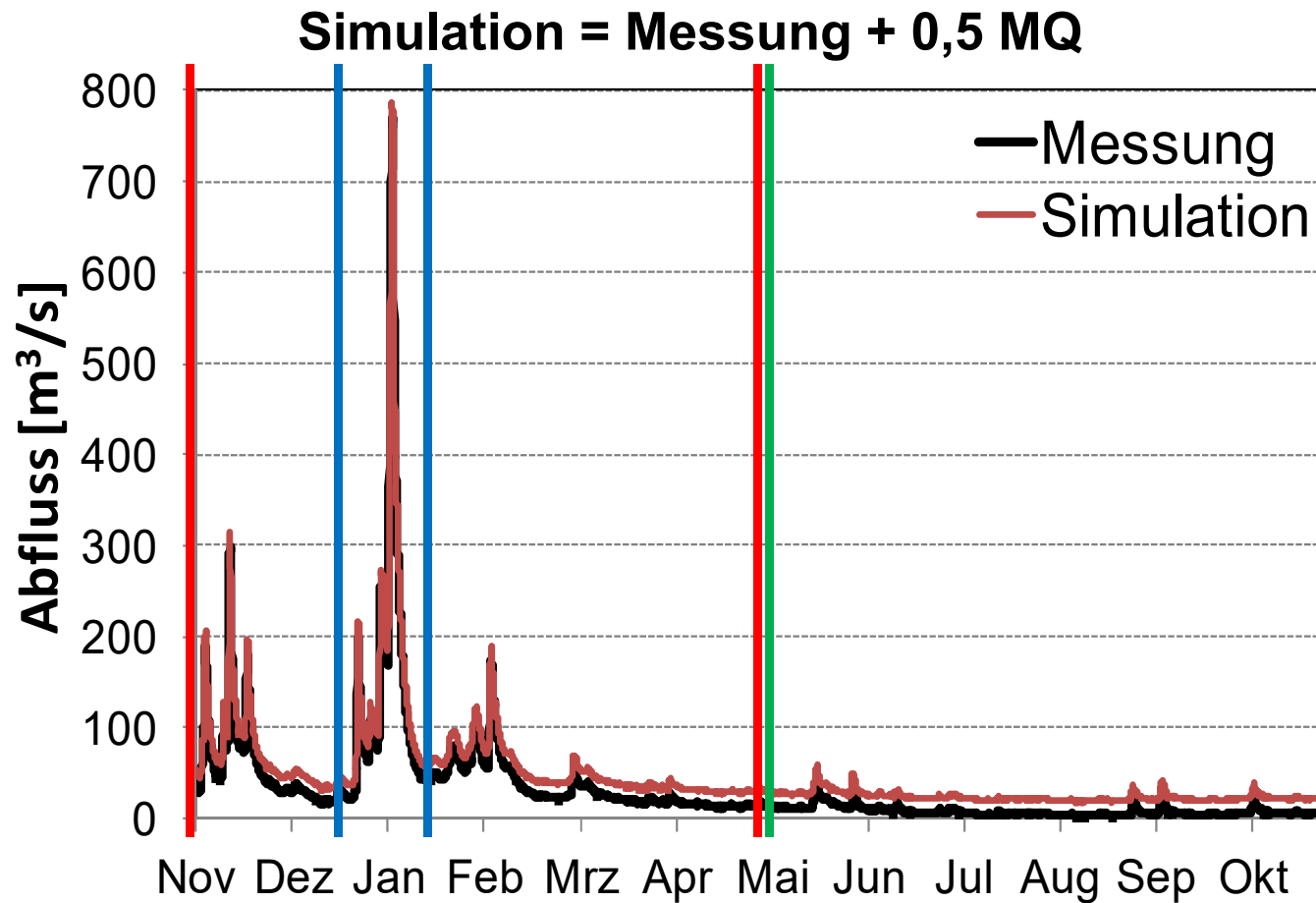
$$NSE = 1 - \frac{\sum (sim_i - mes_i)^2}{\sum (\overline{mes} - mes_i)^2}$$

- Verhältnis quadrierte Abweichungen zur Varianz der Messungen
- Mittelwert der Messungen fungiert als Benchmark
- Wertebereich: $-\infty \dots 1$
 - < 0: schlechter als Mittelwert
 - 1: perfekte Übereinstimmung

Hauptprobleme:

- Starke Gewichtung großer Werte (ungeeignet für Niedrigwasser)
- Geringe Sensitivität gegenüber systematischen Fehlern (Bilanz)
- Extreme Abhängigkeit von der Varianz (Dynamik, Zeitdauer)

Gütekriterien



Gesamtjahr:
NSE = 0,93

Hyd. Winter:
NSE = 0,96

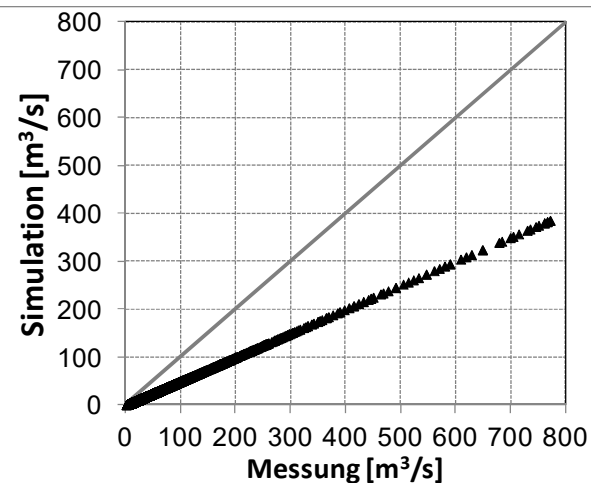
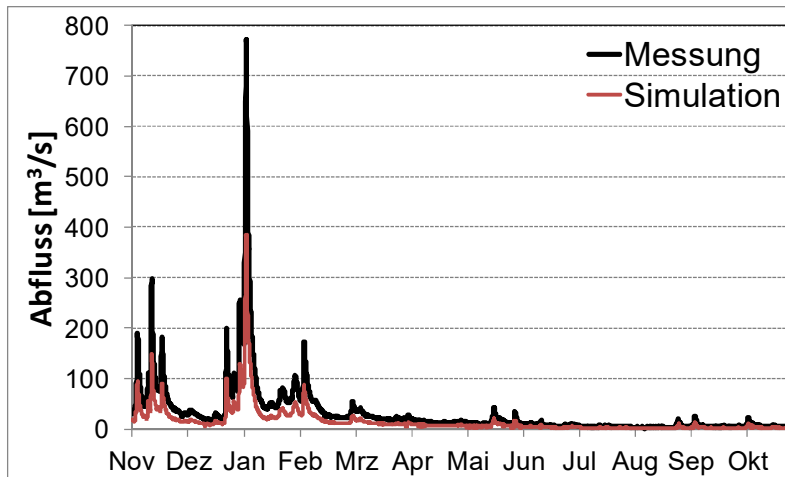
Hyd. Sommer:
NSE = -8,59

HW-Ereignis:
NSE = 0,99

- ⇒ NSE extrem abhängig von Varianz der Messungen (Dynamik)
- ⇒ Stationäre Zeiten werden generell schlechter bewertet

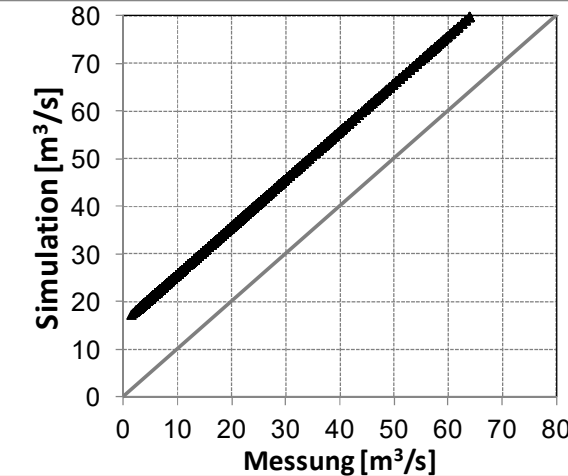
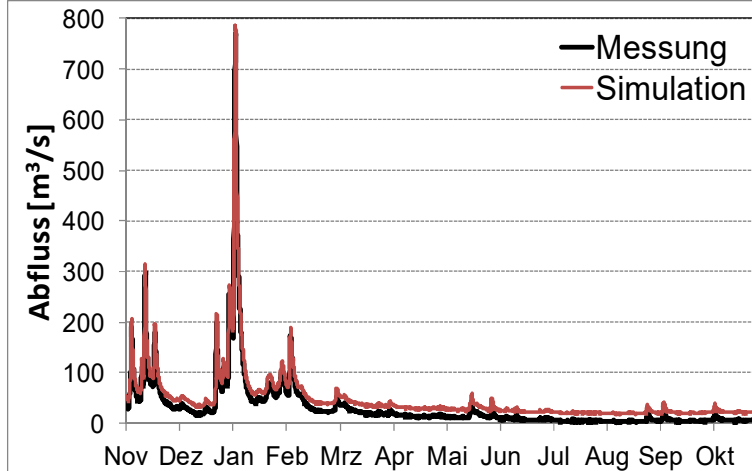
Gütekriterien

**Simulation =
0,5 x Messung**



NSE = 0,68
Bilanz = 0,5

**Simulation =
Messung + 0,5 MQ**



NSE = 0,93
Bilanz = 1,5

- ⇒ NSE zeigt geringe Sensitivität für systematische Fehler
- ⇒ Kombination mit Bilanz erforderlich

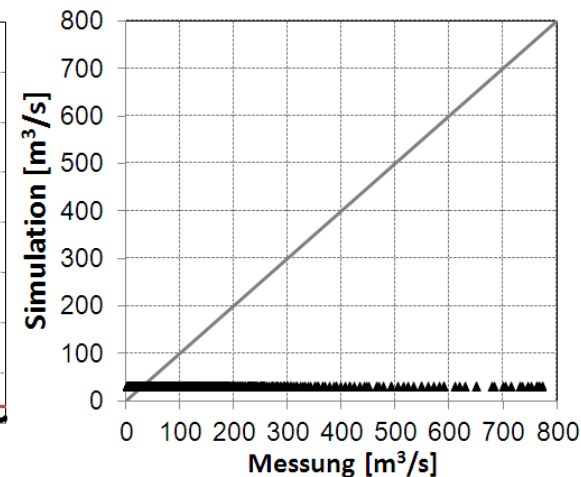
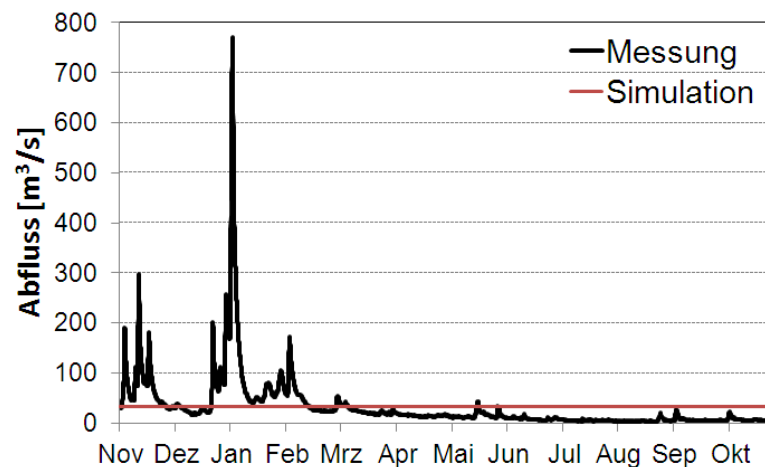
Gütekriterien

NSE nicht sensitiv gegenüber systematischen Fehlern

⇒ zusätzlich Betrachtung der Bilanz

$$Bilanz = \frac{\sum sim_i}{\sum mes_i}$$

Simulation =
Mittelwert (mes)



Bilanz = 1,0
NSE = 0,0

⇒ Unabhängig von Dynamik
⇒ nur als zusätzliches Maß sinnvoll

Gütekriterien

NSE zu starke Gewichtung hoher Werte

⇒ Logarithmische Transformation der Abflüsse (logNSE)

$$\logNSE = 1 - \frac{\sum (lg(sim_i) - lg(mes_i))^2}{\sum (lg(\overline{mes}) - lg(mes_i))^2}$$

⇒ Stärkere Gewichtung geringer Werte (Niedrigwasser)

⇒ Sensitiver gegenüber systematischen Fehlern

- ⇒ logNSE extrem abhängig von Varianz (Dynamik, Zeitbereich)
- ⇒ Schlechtere Bewertung von stationären Abflüssen
- ⇒ Schwer interpretierbar

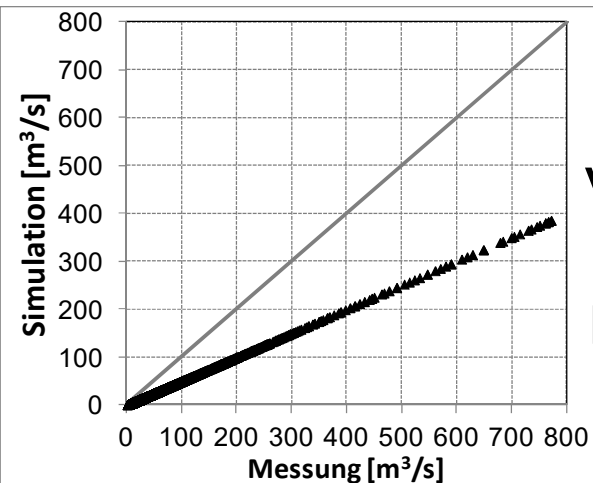
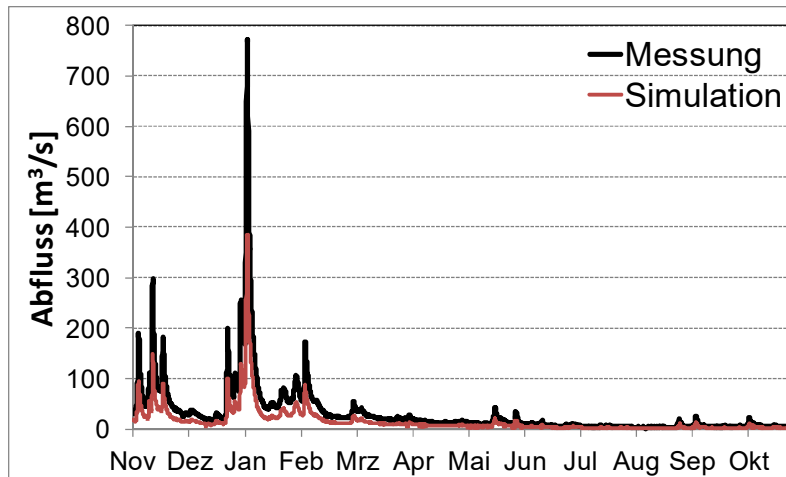
Volumen-Effizienz VE:

$$VE = 1 - \frac{\sum |Q_{sim} - Q_{gem}|}{\sum Q_{gem}}$$

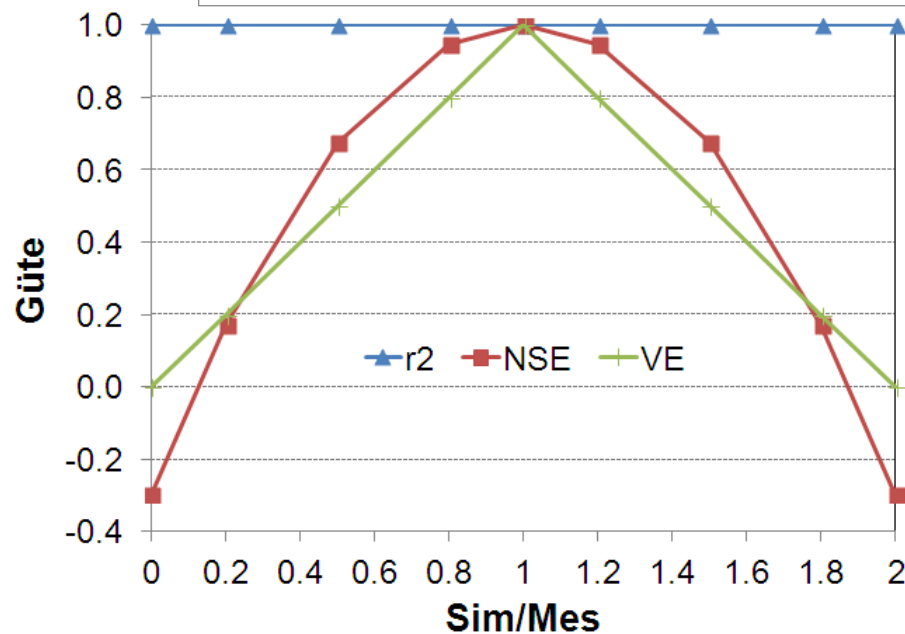
- Verhältnis Abweichungen zu Messungen (relativer Fehler)
- Gleiche Gewichtung jedes Wertepaars
- Anteil des zum richtigen Zeitpunkt simulierten Abflusses (bei korrekter Bilanz)
- Wertebereich: $-\infty \dots 1$
1: perfekte Übereinstimmung

Gütekriterien

Simulation =
0,5 x Messung

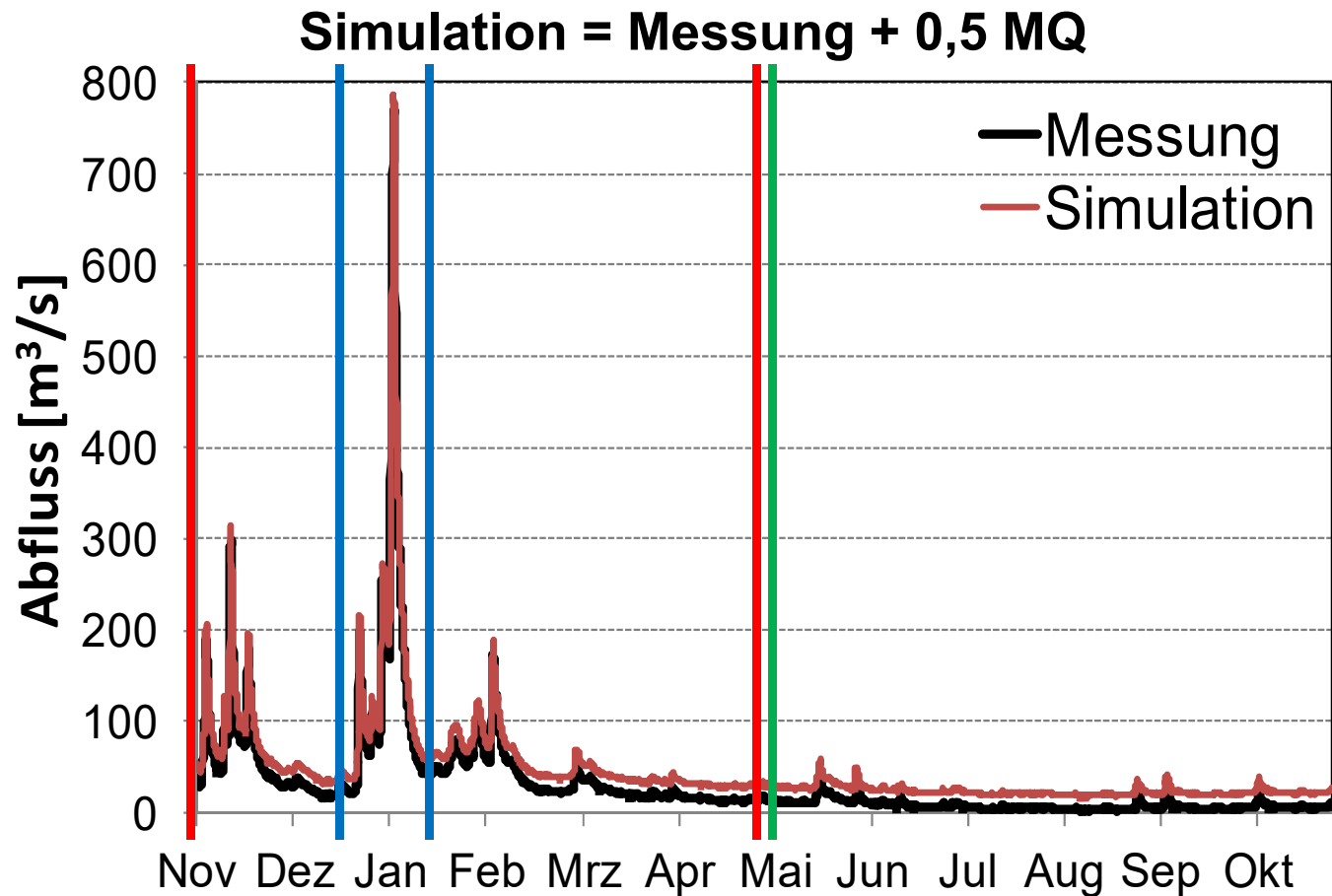


$VE = 0,50$
 $r^2 = 1,0$
 $NSE = 0,68$



- ⇒ VE erfasst systematische Fehler adäquat
- ⇒ Sensitiv für kleine systematische Fehler
- ⇒ Lineare Abhängigkeit von der Bilanz

Gütekriterien



⇒ VE ist unabhängig von der Dynamik (Varianz)
⇒ Alle Werte werden gleich stark gewichtet

Gesamtjahr:

VE = 0,5

NSE = 0,93

Hyd. Winter:

VE = 0,5

NSE = 0,96

Hyd. Sommer:

VE = 0,5

NSE = -8,59

HW-Ereignis:

VE = 0,5

NSE = 0,99

Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

- Manuelle Kalibrierung bei HYDRON:
 - Plausibilisierung der meteorologischen Daten und der Abflüsse
 - Visueller Vergleich zwischen Messung und Simulation
 - Verwendung von NSE in Kombination mit logNSE, Bilanz, Volumen-Effizienz (da jedes Gütekriterium spezifische Vor- und Nachteile hat)
 - Betrachtung der Abflusskomponenten (Basisabfluss, Interflow, schneller und langsamer Direktabfluss)
 - Getrennte Betrachtung von Abflussbereichen
 - Schwerpunkt auf die ansteigenden Abflüsse vor Hochwasserereignissen
 - Verwendung der gesamten Kalibrierzeitreihe sowie systematische Untersuchungen einzelner Hochwasserereignisse (bei Stundenwertmodellen)
 - Einheitlicher Modellparametersatz für die gesamte Zeitreihe

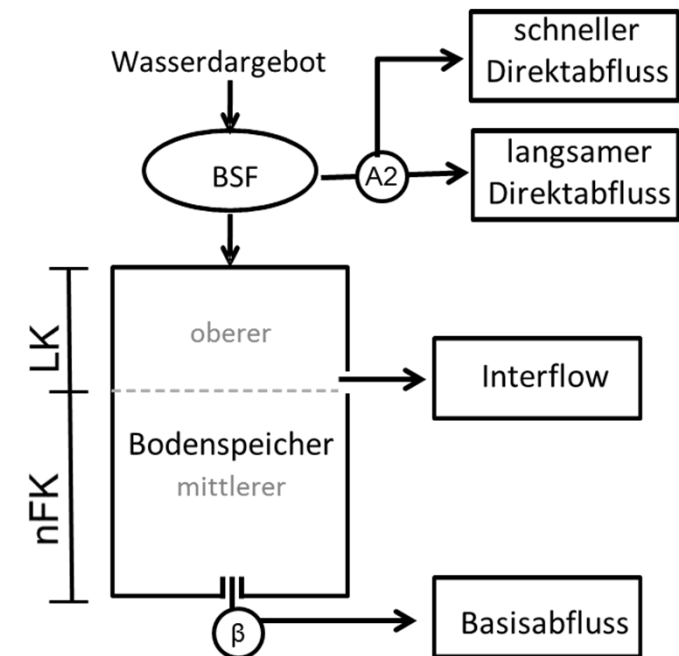
Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

- Manuelle Kalibrierung bei HYDRON:
 - Verringerung der Problematik der Äquifinalität durch manuelle, multikriterielle Anpassung der Modellparameter bei der Kalibrierung
 - Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung entsprechend LARSIM-Kalibrieranleitung 2016
 - Ggf. Berücksichtigung weiterer Zielgrößen (z.B. regionalisierte Werte des Base-Flow-Index aus dem Wasser- und Boden-Atlas Baden-Württemberg, hydrologische Kennwerte (MNQ, MQ))

Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

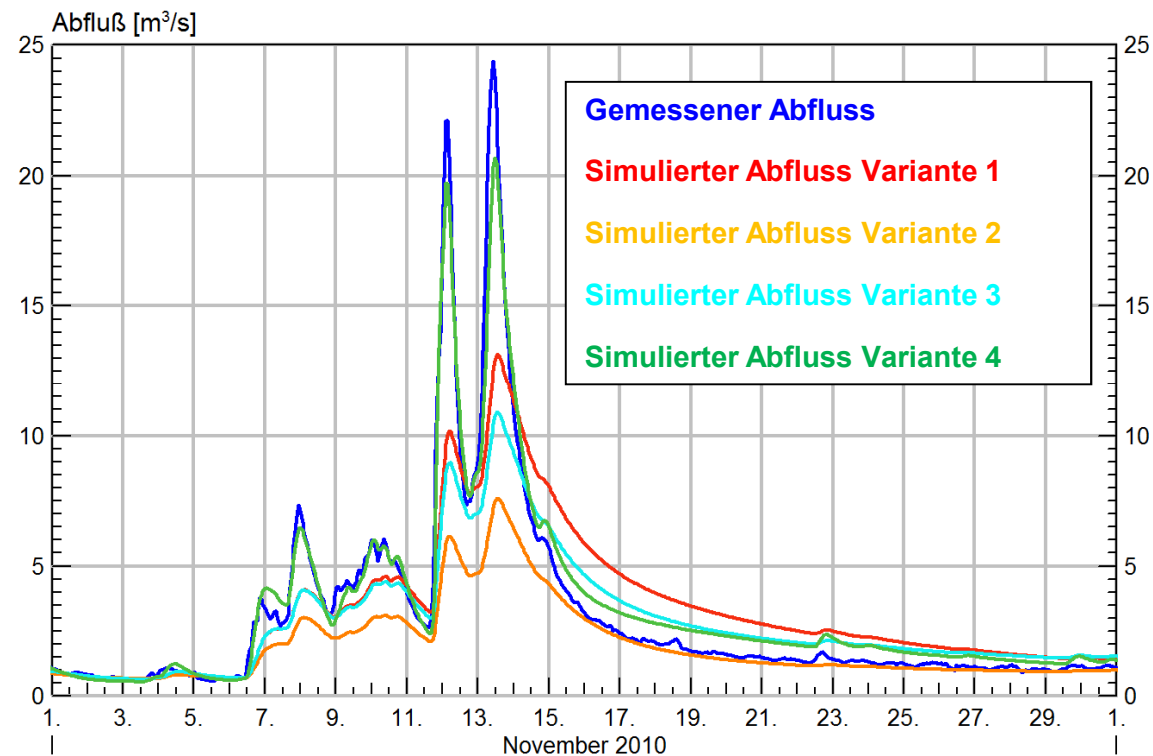
- Anzupassende Modellparameter in LARSIM: 12 Parameter + ggf. 3 Schnee-parameter

	Parameter	Bezeichnung / Funktion
Allg.	KG	Korrekturfaktor für den Gebietsniederschlag
	(KWD)	Korrekturfaktor für das Wasserdargebot
Niedrigw.	beta	Drainageindex für die Tiefenversickerung (in den Basisabflussspeicher)
	fbas-fak	Faktor für die Zunahme der Tiefenversickerung im Grobporenbereich
	EQB	Eichgröße für die Rückhaltekonzante des Basisabflussspeichers
Mittelw.	r_dmax	Index für die laterale Drainage zum Interflowspeicher im Grobporenbereich
	(r_dmin)	Index für die laterale Drainage zum Interflowspeicher bis zur Feldkapazität
	EQI	Eichgröße für die Rückhaltekonzante des Interflowspeichers
Hochwasser	BSF	Exponent der Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion zur Anpassung des Direktabflussanteils in Abhängigkeit der Bodenspeicherfüllung
	A2	Schwellenwert, ab dem der Direktabfluss dem schnellen Direktabflussspeicher zugeordnet wird
	EQD	Eichgröße für die Rückhaltekonzante des langsamen Direktabflussspeichers
	EQD2	Eichgröße für die Rückhaltekonzante des schnellen Direktabflussspeichers
	EKM	Kalibrierfaktor für den Rauigkeitsbeiwert im Hauptbett
	EKL / EKR	Kalibrierfaktoren für die Rauigkeitsbeiwerte auf den Vorländern
Schnee	Tmit_Sr	Mittlere Temperatur des Übergangsbereichs von Schneefall zu Regen
	(Tspann_Sr)	Temperaturspannweite des Übergangsbereichs von Schneefall zu Regen
	Abso	Absorptionskoeffizient der Schneedecke für kurzwellige Strahlung
	(A0)	Windunabhängiger Koeffizient für Wärmeaustausch an der Schneegrenze
	(A1)	Windabhängiger Koeffizient für Wärmeaustausch an der Schneegrenze
	SRet	Koeffizient für die Retention flüssigen Wassers in der Schneedecke



Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

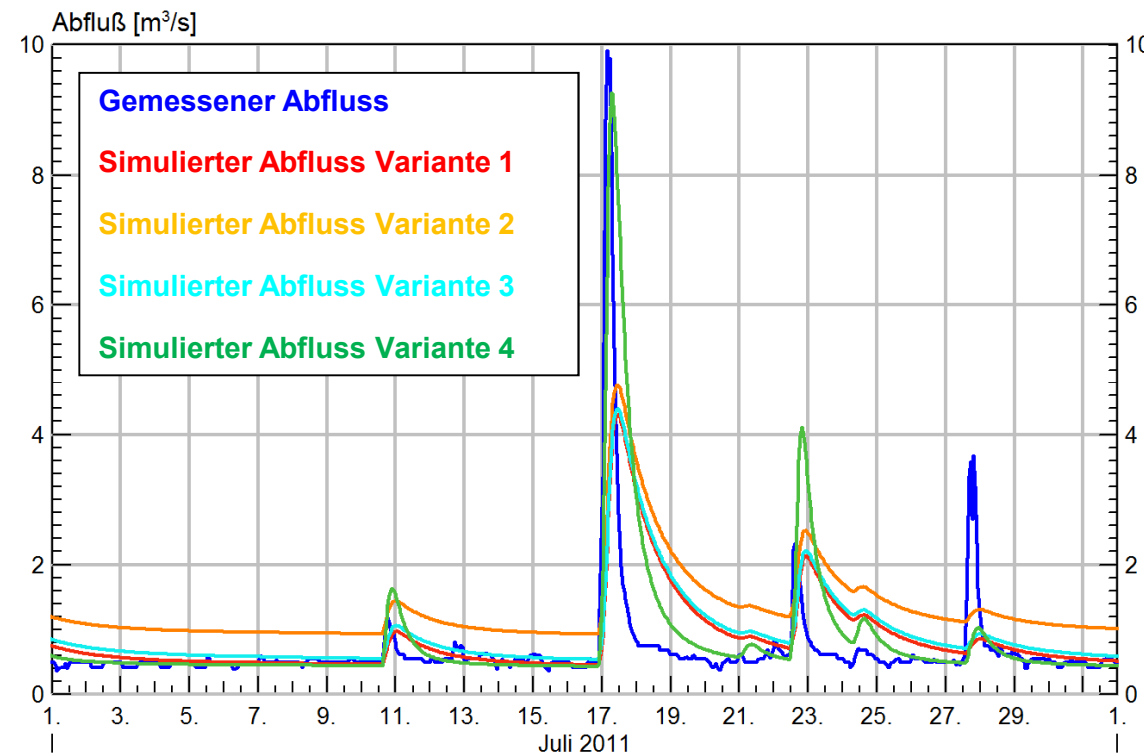
- Wirkung der Modellparameter in LARSIM:



Pegel	N°	beta	EQB	Dmax	EQI	EQD	EQD2	A2
Longlaville	1	0,0065	30 000	2,0	1 000	300	250	1,5
	2	0,07	80 000	2,0	1 000	300	250	1,5
	3	0,0065	30 000	8,0	5 000	300	250	1,5
	4	0,0065	30 000	2,0	1 000	100	50	1,0

Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

- Wirkung der Modellparameter in LARSIM:



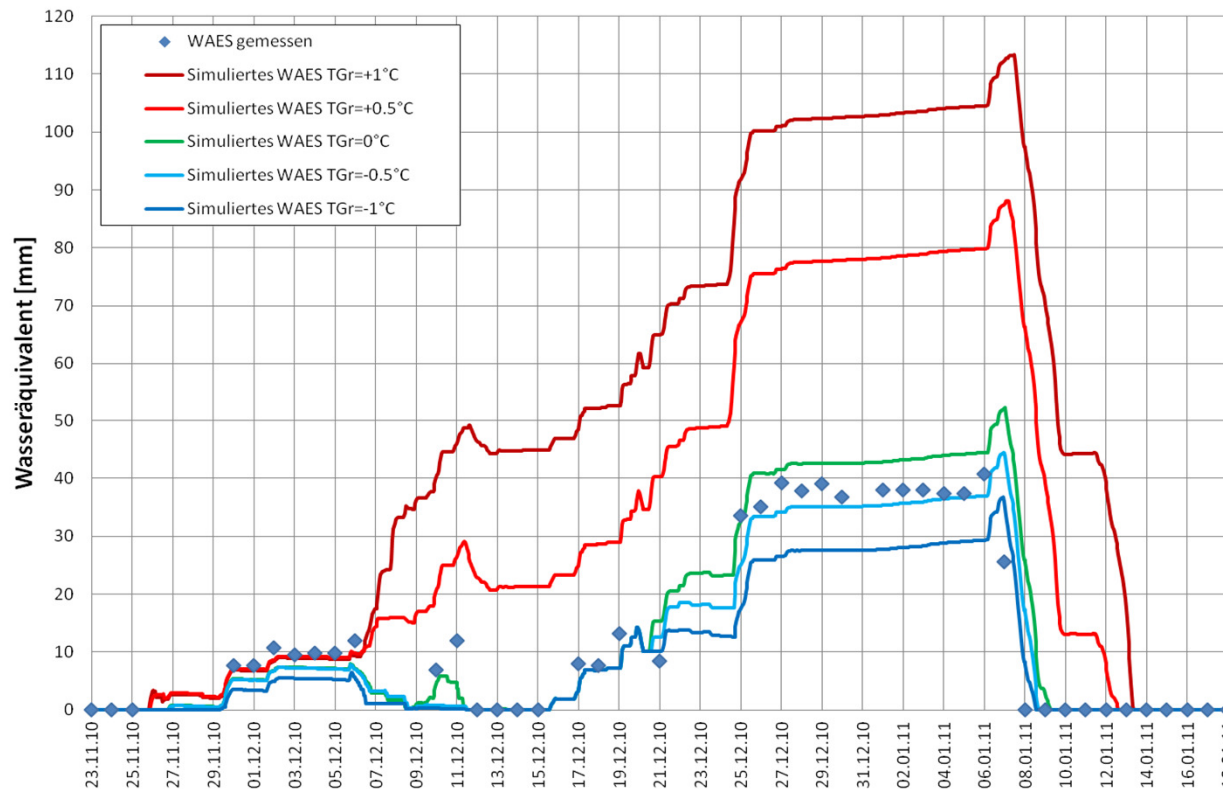
Pegel	N°	beta	EQB	Dmax	EQI	EQD	EQD2	A2
Longlaville	1	0,0065	30 000	2,0	1 000	300	250	1,5
	2	0,07	80 000	2,0	1 000	300	250	1,5
	3	0,0065	30 000	8,0	5 000	300	250	1,5
	4	0,0065	30 000	2,0	1 000	100	50	1,0

Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

- Start der Kalibrierung: Annahmen mittlerer Modellparameter (oder aus vergleichbarem Gebiet)
- Ermittlung der Anfangsbedingungen (gemessene Startabflüsse oder Simulation eines Einschwingjahrs)
- Verwendung simulierter Zulaufganglinien, um die Abflusskomponenten berechnen zu können (keine gemessenen Zulaufganglinien, erst bei der Feinjustierung und bei HW-Ereignissen)
- Grobe Anpassung des Modells:
 - Bilanzanpassung unter Veränderung von β , $f_{bas-fak}$ und r_{dmax} (im geringeren Maße BSF)
 - Korrektur des Gebietsniederschlags über KG ($0,9 < KG < 1,1$ (ohne Niederschlagskorrektur auch KG bis 1,2))

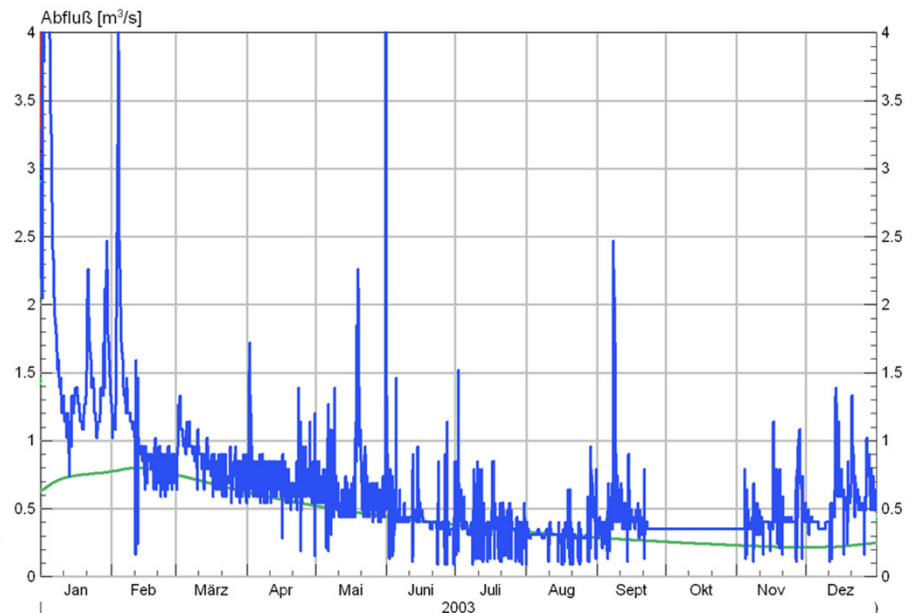
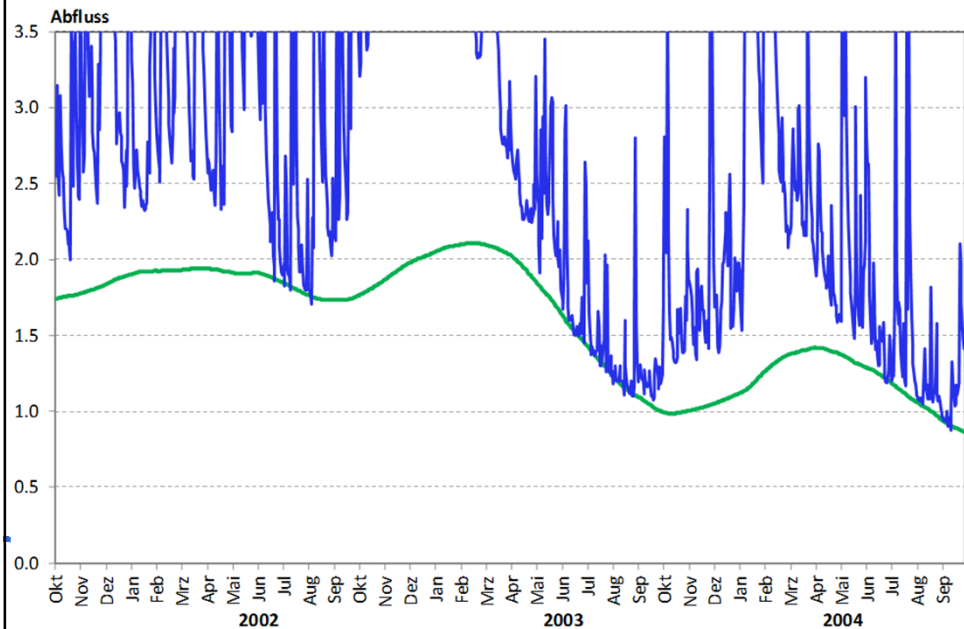
Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

- Optionale Anpassung des Schneemoduls (bei starkem Schneeeinfluss):
 - Anhand schneebeeinflusster Abflüsse oder Punktmessungen des Schneewasser-Äquivalents
 - Anpassung der Schneeparameter in der Reihenfolge ihrer Sensitivität: Tmit_Sr, Sret und dann Abso. Tspann_Sr sowie A0 und A1 zumeist nur geringe Auswirkungen.



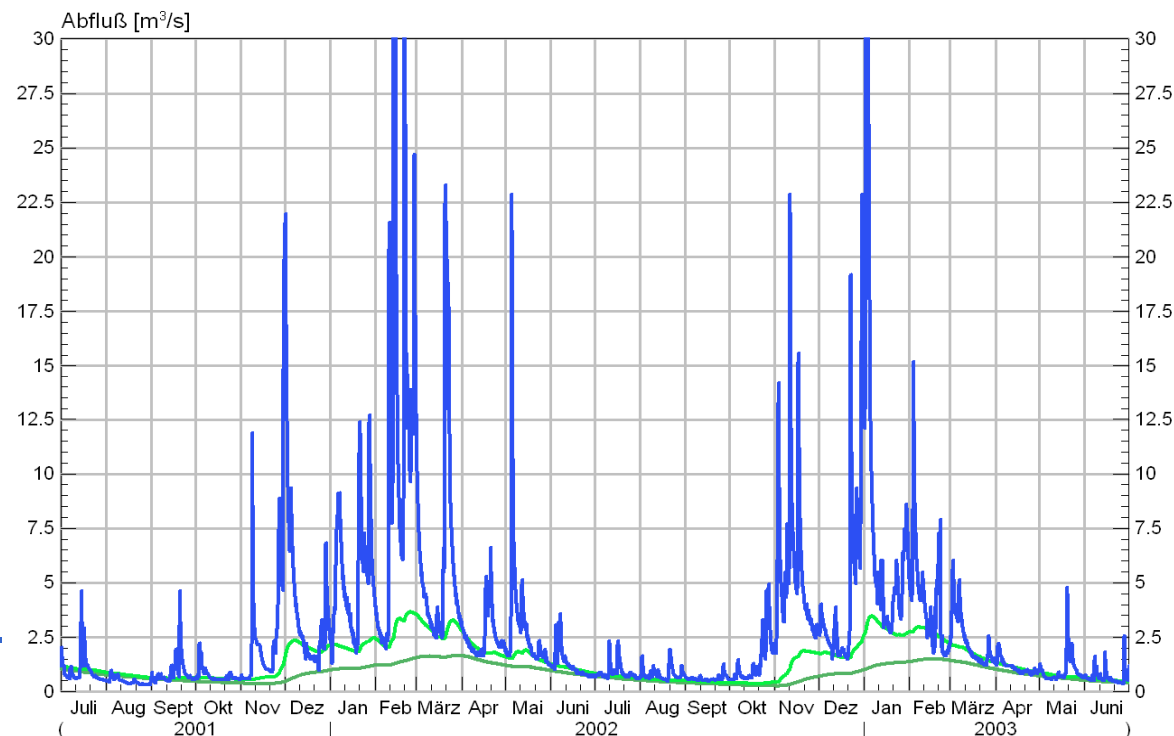
Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

- Anpassung im Niedrigwasserbereich (Basisabfluss):
 - Ziel: korrekte Wiedergabe des Auslaufverhaltens in Trockenzeiten sowie der Unterschiede zwischen nassen und trockenen Jahren
 - Anpassung von beta und fbas-fak (fbas-fak insbesondere bei hoher Bodenfeuchte relevant)
 - Anpassung von EQB (Rückhaltekonzstante des Gebietsspeichers für Basisabfluss) für die zeitliche Dynamik des Basisabflusses



Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

- Anpassung im Mittelwasserbereich (Interflow):
 - Ziel: Interflow soll in der nassen Jahreszeit, wenn der Abfluss über mehrere Tage bis Wochen erhöht ist, deutlich am Abflussgeschehen beteiligt sein.
 - Anpassung von r_{dmax} (evtl. auch r_{dmin})
 - Anpassung von EQI (Rückhaltekonzstante des Gebietsspeichers für Interflow) für die zeitliche Dynamik des Interflows

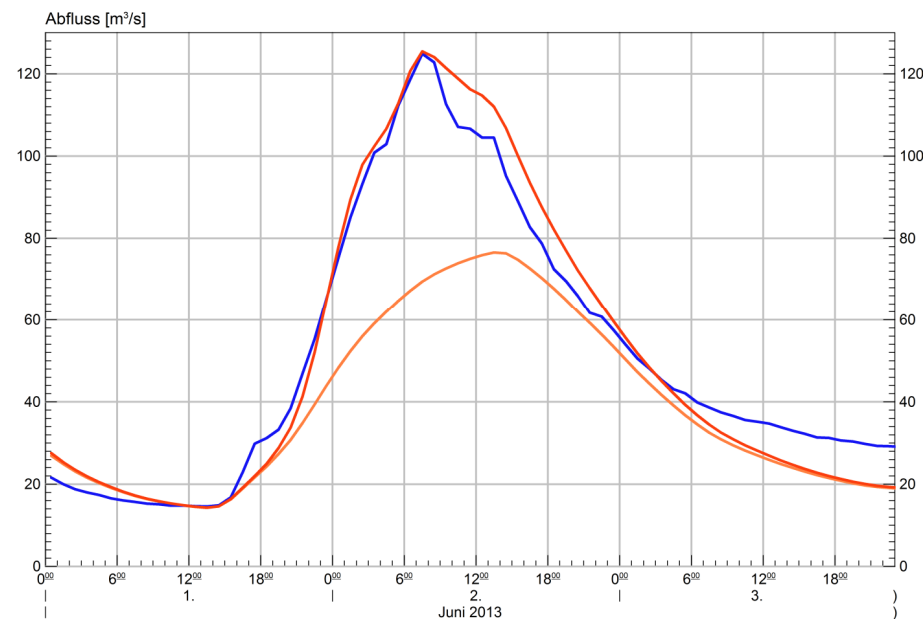


Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

- Anpassung im Hochwasserbereich (langsamer und schneller Direktabfluss):
 - Ziel: gute Wiedergabe der HW-Anstiege und der HW-Scheitel
- Grobanpassung:
 - Bei hohem BSF entsteht mehr Hochwasser (evtl. Nachjustieren von β , r_{dmax} und KG erforderlich)
 - Anpassung von EQD und EDQ2 (Rückhaltekonzstante des Gebiets-speichers für langsamen und schnellen Direktabfluss) mit Schwellenwert A2 (schneller Direktabfluss möglichst nur bei höheren HW)

Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

- Anpassung im Hochwasserbereich (langsamer und schneller Direktabfluss):
 - Ziel: gute Wiedergabe der HW-Anstiege und der HW-Scheitel
 - Detailoptimierung anhand ausgewählter Hochwasser (6 bis 10):
 - Verwendung der operationellen Nachführungsrouinen (Wasserdargebot-Nachführung)
 - Insbesondere A2 und EQD2 sind sorgsam zu wählen
 - Spezifische Auswertung für alle ausgewählten Hochwasser



Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

- Optimierung des Wellenablaufs:
 - Ziel: Minimierung des zeitlichen Versatzes zwischen Messung und Simulation
 - Bereits bei Optimierung der Gebietsreaktion zu minimieren
 - Anpassung der Multiplikationsfaktoren der Stricklerbeiwerte EKM, EKL und EKR für das Gerinne
 - Falls erforderlich: Anpassung der Gerinneparameter in der Systemdatei <tape12> oder Integration externer dV/dQ -Beziehungen

Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

- Abschluss der Kalibrierung:
 - Aufgrund der implizierten gegenseitigen Abhängigkeit der Modellparameter ist ggf. eine Nach-/Feinjustierung der Parameter erforderlich
 - Durchführung der Berechnung auch mit gemessenen Zulaufganglinien (also mit gemessenen Abflüssen der Oberliegerpegel)
 - Kontrolle der Qualität über alle Abflussbereiche
 - Kontrolle der Modellparameter gegenüber den Modellparametern angrenzender Pegel

Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

- Diagnose und Dokumentation der Güte der Kalibrierung pro Pegel:
 - Jahresweise Gütemaße:

Zeitraum	Gütemaße					
	Lag sim [h]	R ² [-]	NSE [-]	NSE ln(Q) [-]	Bilanz [-] sim/gem	VE [-]
01.11.2005 - 31.10.2006	2	0.90	0.90	0.82	0.93	0.84
01.11.2006 - 31.10.2007	-1	0.90	0.90	0.79	0.97	0.83
01.11.2007 - 31.10.2008	1	0.92	0.92	0.94	1.07	0.84
01.11.2008 - 31.10.2009	3	0.90	0.88	0.90	1.05	0.83
01.11.2009 - 31.10.2010	-1	0.79	0.71	0.83	1.21	0.74
01.11.2010 - 31.10.2011	-2	0.94	0.94	0.92	1.10	0.82
01.11.2011 - 31.10.2012	1	0.92	0.92	0.87	0.91	0.80
01.11.2012 - 31.10.2013	0	0.96	0.95	0.94	0.95	0.88
01.11.2013 - 31.10.2014	0	0.83	0.83	0.71	0.89	0.82
01.11.2014 - 31.10.2015	1	0.92	0.90	0.91	0.92	0.84
Mittelwert	0.4	0.90	0.88	0.86	1.00	0.82

- Hochwasserspezifische Gütemaße:

Datum Scheitel	Gesamt ereignis				Hochwasserscheitel				
	NSE	VE	Lag [h]	WD- Faktor	Lag sim/gem [h]	Scheitel gem [m³/s]	Scheitel sim [m³/s]	Abs. Abw. sim – gem [m³/s]	Rel. Abw. sim – gem [%]
05.01.2003	0,96	0,92	0	1,08	-1	87,0	63,6	-23,4	-26,9
15.08.2006	0,91	0,89	+2	1,30	+2	72,3	66,4	-5,9	-8,2
07.07.2007	0,98	0,94	-1	0,99	-2	251,0	237,5	-13,5	-5,4
08.12.2010	0,87	0,90	-3	1,09	-1	182,0	195,0	+13,0	+7,1
17.12.2011	0,95	0,92	0	1,21	-1	132,0	128,5	-3,5	-2,7
01.06.2013	0,83	0,90	-2	0,95	0	48,9	47,8	+1,1	+2,2
11.11.2013	0,97	0,95	+1	0,97	+1	130,0	122,2	-7,8	-6,0

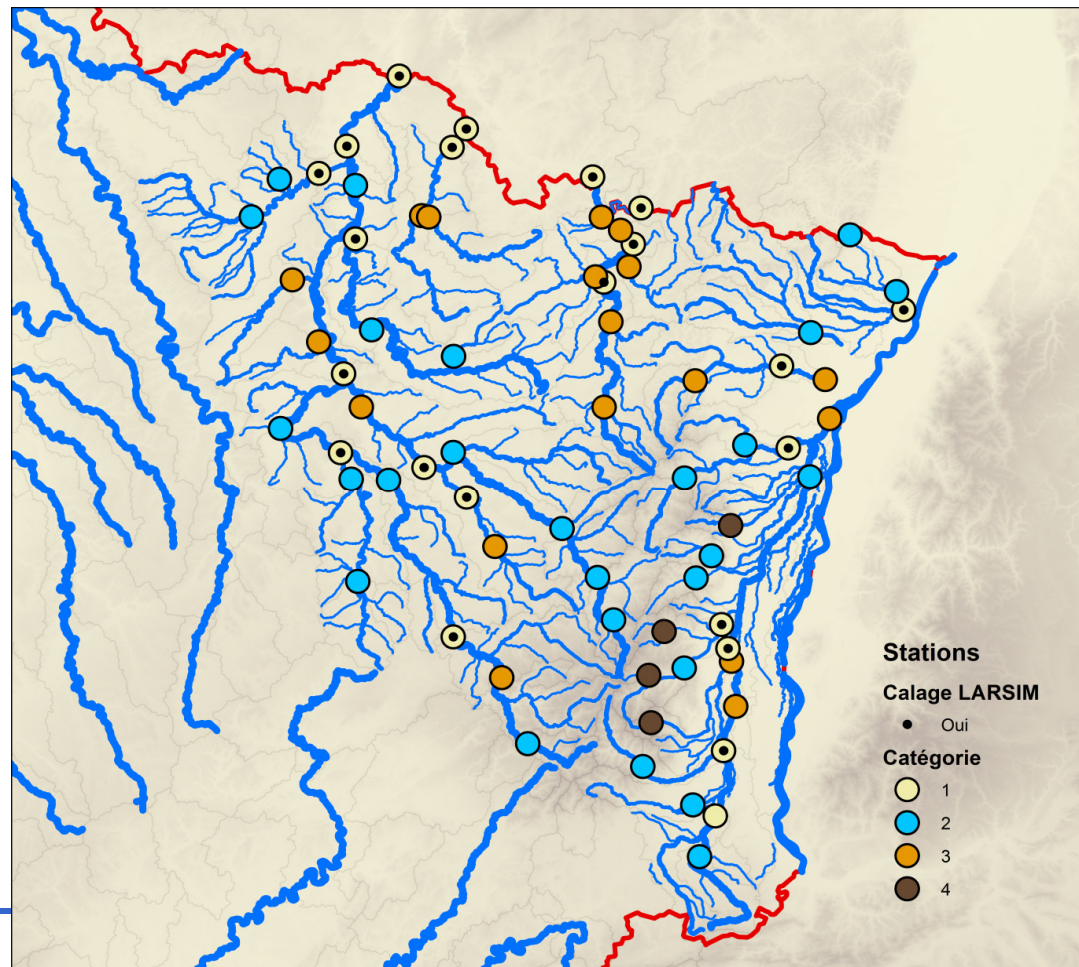
Vorgehen bei der manuellen Kalibrierung

- Resultat der Kalibrierung: <tape35>

TGB;	GMD;	EQB;	EQI;	EQD;	EQD2;	A2;	EKM;	EKL;	EKR;	BSF;	beta;	Dmin;	Dmax;	KG;	TGr;	StQB;	StQI;
761;	NOIR;	20000.;	3000.;	550.;	330.;	1.70;	0.9;	0.9;	0.9;	0.30;	0.0116;	0.5;	3.0;	1.04;	0.0;	12.0;	14.0;
1461;	EPIN;	32000.;	2000.;	1500.;	300.;	1.50;	0.8;	0.8;	0.8;	0.30;	0.0116;	0.3;	0.5;	1.00;	0.0;	12.0;	14.0;
2356;	TONN;	30000.;	1700.;	450.;	120.;	1.20;	0.8;	0.9;	0.9;	0.10;	0.0111;	0.0;	0.8;	1.00;	0.0;	12.0;	14.0;
2885;	MIRE;	28000.;	1100.;	400.;	30.;	2.00;	0.6;	0.6;	0.6;	0.25;	0.0050;	0.0;	0.5;	0.91;	0.0;	1.70;	2.00;
3553;	AUT2;	15000.;	800.;	400.;	150.;	0.80;	0.7;	1.0;	1.0;	0.30;	0.0038;	0.0;	0.30;	1.01;	0.5;	1.70;	2.00;
3559;	PULL;	30000.;	900.;	500.;	400.;	2.00;	1.0;	0.5;	0.5;	0.25;	0.0038;	0.0;	0.33;	0.95;	0.0;	1.70;	2.00;
3660;	PONT;	25000.;	1400.;	500.;	200.;	1.50;	0.9;	0.9;	0.9;	0.30;	0.0010;	0.0;	2.0;	1.00;	0.0;	3.0;	1.0;
3978;	TOUL;	35000.;	2500.;	1000.;	200.;	1.50;	1.7;	1.7;	1.7;	0.25;	0.0200;	0.0;	0.8;	1.00;	0.0;	13.0;	17.0;
4872;	SDIE;	40000.;	3800.;	700.;	500.;	2.30;	1.4;	1.2;	1.2;	0.22;	0.0145;	0.0;	1.75;	0.97;	0.0;	1.70;	2.00;
5533;	BACC;	50000.;	2500.;	1800.;	220.;	1.50;	0.5;	0.5;	0.5;	0.40;	0.0141;	0.1;	0.3;	1.00;	0.0;	1.70;	2.00;
6391;	LUNV;	25000.;	850.;	440.;	240.;	1.70;	0.5;	0.5;	0.5;	0.34;	0.0070;	0.0;	0.60;	0.95;	0.0;	8.50;	0.70;
6779;	ROVI;	50000.;	2500.;	450.;	250.;	1.70;	1.2;	1.0;	1.0;	0.32;	0.0075;	0.0;	0.5;	0.96;	0.0;	8.50;	0.70;
7001;	GERB;	40000.;	1000.;	200.;	130.;	2.00;	1.0;	1.0;	1.0;	0.30;	0.0100;	0.0;	0.8;	0.95;	0.0;	8.50;	0.70;
7154;	DAME;	70000.;	14000.;	800.;	300.;	3.00;	0.7;	0.7;	0.7;	0.20;	0.0120;	0.0;	1.5;	1.00;	0.0;	7.00;	9.00;
8072;	CUST;	50000.;	3000.;	1000.;	160.;	1.50;	1.2;	1.2;	1.2;	0.30;	0.0030;	0.1;	1.0;	1.00;	0.0;	25.0;	40.0;
9372;	UCK1;	50000.;	1200.;	120.;	30.;	1.0;	1.5;	1.0;	1.0;	0.20;	0.0030;	0.0;	2.0;	1.00;	0.0;	3.00;	5.00;
10488;	NOME;	45000.;	1300.;	1100.;	250.;	3.00;	1.1;	1.1;	1.1;	0.20;	0.0042;	0.0;	0.22;	1.00;	0.0;	2.00;	4.00;
10893;	METS;	40000.;	1200.;	1000.;	300.;	4.50;	1.0;	1.0;	1.0;	0.20;	0.0030;	3.0;	0.17;	1.00;	0.0;	2.00;	4.00;
11240;	UCK2;	50000.;	1200.;	120.;	30.;	1.0;	1.5;	1.0;	1.0;	0.20;	0.0030;	0.0;	2.0;	1.00;	0.0;	3.00;	5.00;
12655;	ROSS;	30000.;	1200.;	400.;	200.;	2.00;	0.4;	0.5;	0.5;	0.25;	0.0033;	2.1;	0.3;	1.00;	0.0;	3.00;	5.00;
12717;	UCKA;	50000.;	1200.;	120.;	30.;	1.0;	1.5;	1.0;	1.0;	0.20;	0.0030;	0.0;	2.0;	1.00;	0.0;	3.00;	5.00;
13585;	PERL;	50000.;	1200.;	180.;	50.;	1.0;	1.0;	1.0;	1.0;	0.35;	0.0030;	0.0;	2.0;	1.00;	0.0;	3.00;	5.00;

Automatische Kalibrierung

- Beispiel für eine automatische Kalibrierung mit LARSIM: Projekt MOSARH21 (IRSTEA/HYDRON im Auftrag der Agence de l'Eau Rhin-Meuse)
- Projektgebiet: Französisches Rheineinzugsgebiet
- Tageswerte



Automatische Kalibrierung

- Auswahl von 7 Modellparametern für die automatische Kalibrierung
- Verwendung der manuell ermittelten Werte für die 7 Modellparameter als Startwerte
- Weitere Modellparameter auf die manuell ermittelten Werte gesetzt
- Vergleich der Ergebnisse mit der manuellen Kalibrierung an ausgewählten Pegeln

Automatische Kalibrierung

- Zielfunktion für die automatische Kalibrierung: Kling-Gupta-Effizienz (KGE)

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

r: Korrelation zwischen simulierten und gemessenen Abfluss

α : Verhältnis zwischen den Standardabweichungen der simulierten und gemessenen Abflüsse

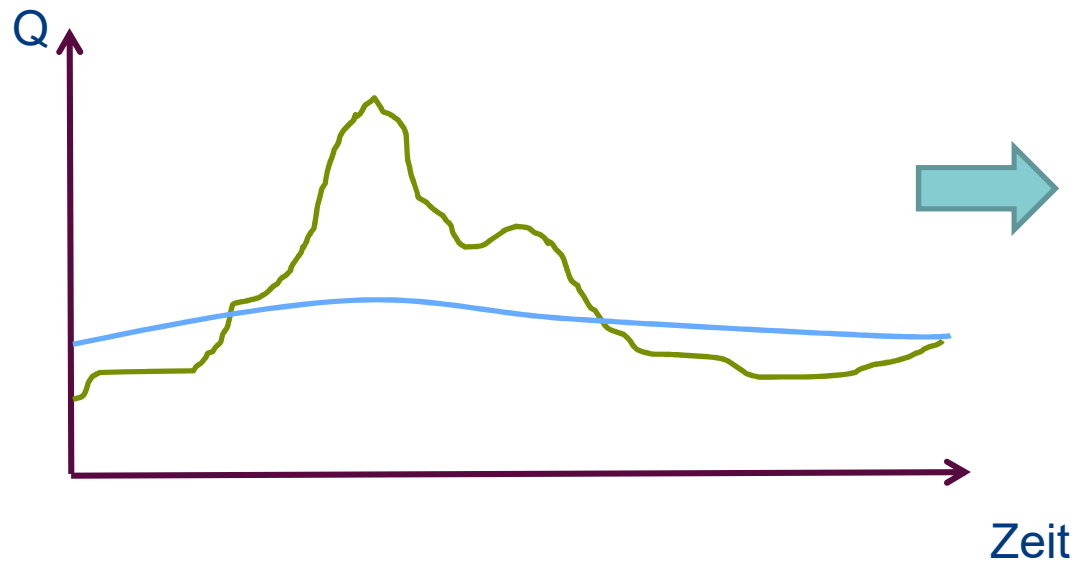
β : Verhältnis zwischen den durchschnittlichen simulierten und gemessenen Abflüsse

- Optimale Übereinstimmung: Wert 1
- Weiterentwicklung der Nash-Sutcliffe-Effizienz
- Vorteil im Vergleich zum NSE: neben den Abflussspitzen wird auch das simulierte Abflussvolumen in Betrachtung gezogen

Automatische Kalibrierung

- Sequentielles Vorgehen bei der automatischen Kalibrierung (durch IRSTEA):

Anpassung des Gebietsniederschlags



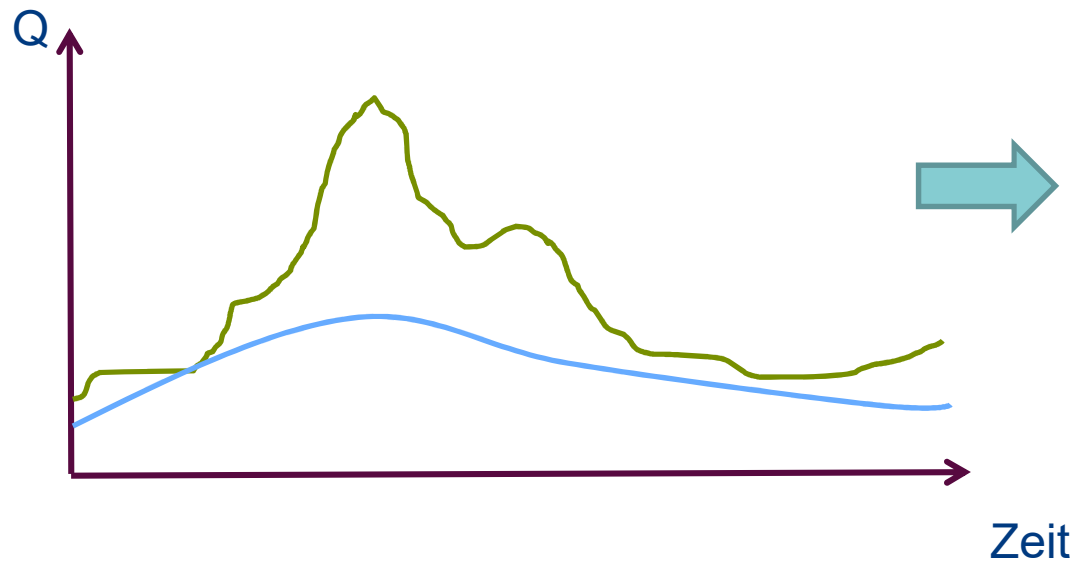
Kriterium: $\frac{\sum Q_{sim}}{\sum Q_{obs}}$

Parameter : KG

Automatische Kalibrierung

- Sequentielles Vorgehen bei der automatischen Kalibrierung (durch IRSTEa):

Anpassung des Basisabflusses



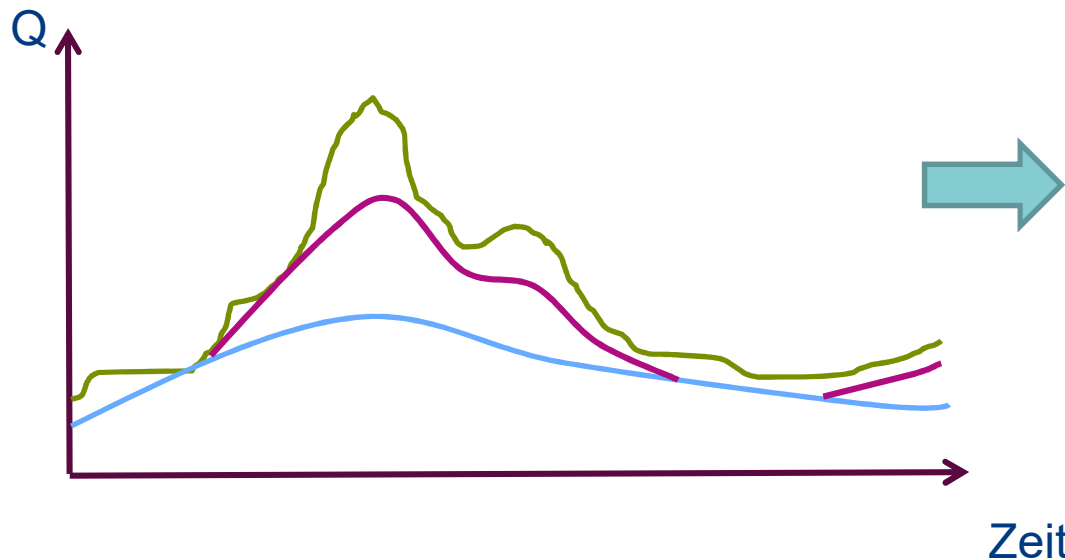
Kriterium: $KGE(\log(Q))$
Verwendung der logarithmierten Abflüsse

Parameter: Beta und EQB

Automatische Kalibrierung

- Sequentielles Vorgehen bei der automatischen Kalibrierung (durch IRSTEa):

Anpassung des Interflows



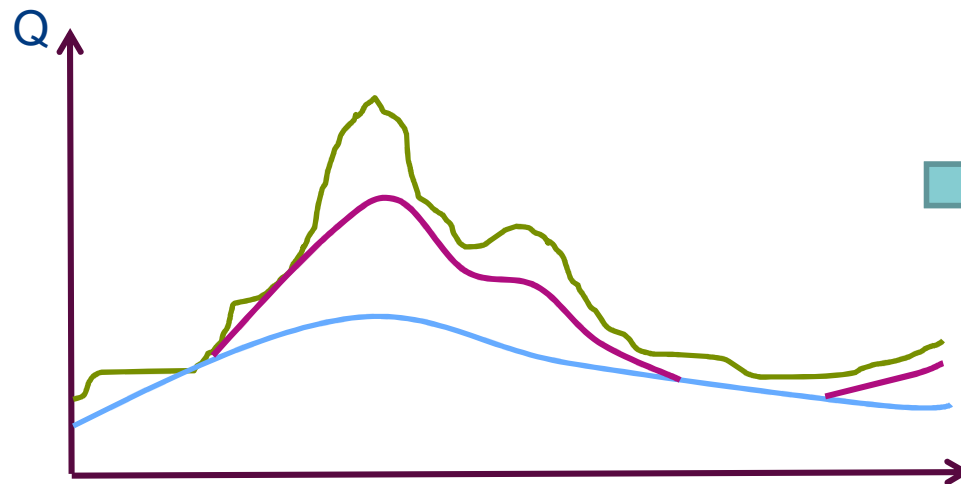
Kriterium: $KGE(\sqrt{Q})$
Verwendung der Wurzel
der Abflüsse

Parameter: D_{max} und EQI

Automatische Kalibrierung

- Sequentielles Vorgehen bei der automatischen Kalibrierung (durch IRSTEA):

Anpassung des Direktabflusses



Kriterium: $KGE(Q)$
Verwendung der Abflüsse



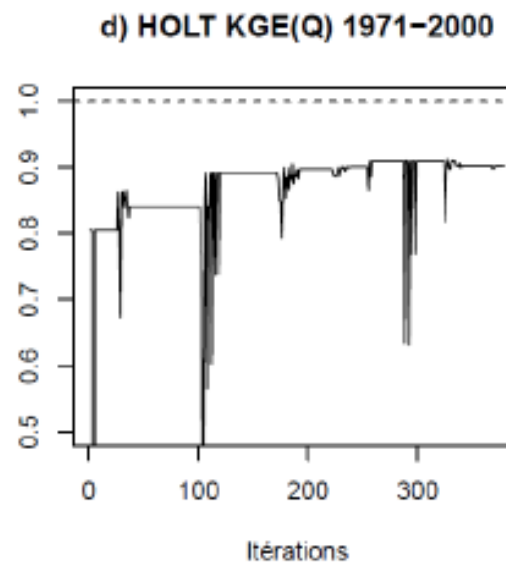
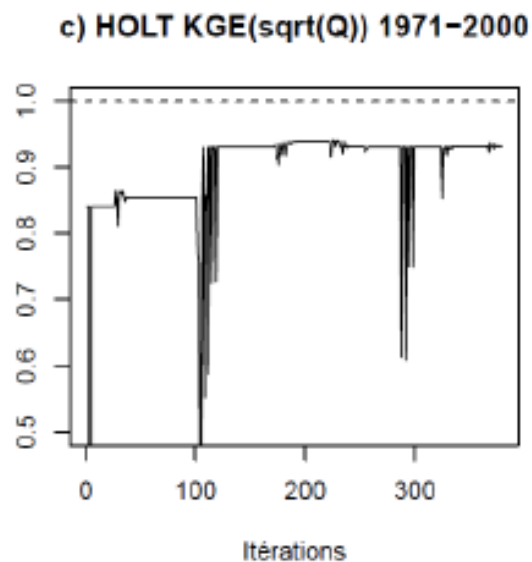
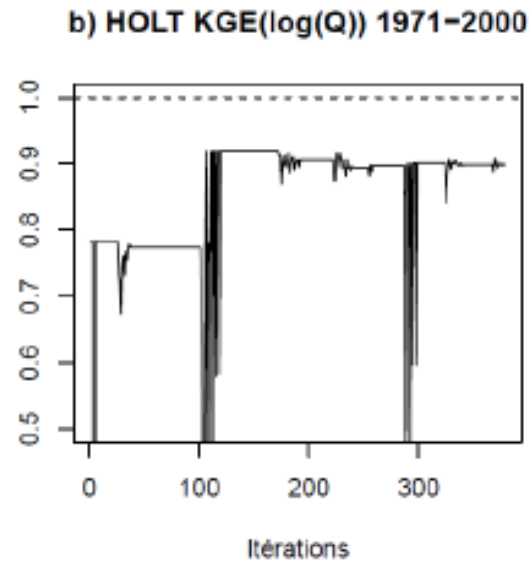
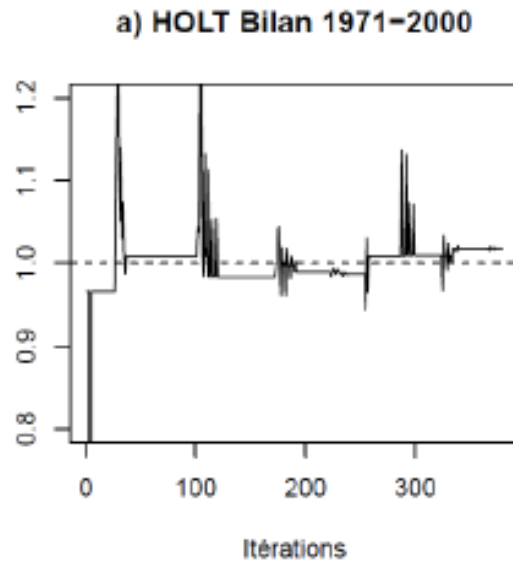
Parameter: EQD und EQD2

Automatische Kalibrierung

- Aufgrund der internen Abhängigkeiten der Modellparameter wird die sequentielle automatische Kalibrierung mehrmals wiederholt
- Kalibrierungsverfahren: nach Perrin (2000)
- Problem bei der automatischen Kalibrierung: Rechenzeiten, Abbildung der Abflusskomponenten

Automatische Kalibrierung

- Beispiel: Ergebnisse der Iterationen (Pegel Holtzheim/Bruche):



Verbesserung der Gütemaße in Abhängigkeit von der Anzahl der Iterationsschritte

Automatische Kalibrierung

- Beispiel: Ergebnisse der Kalibrierung (Pegel Epinal/Mosel):

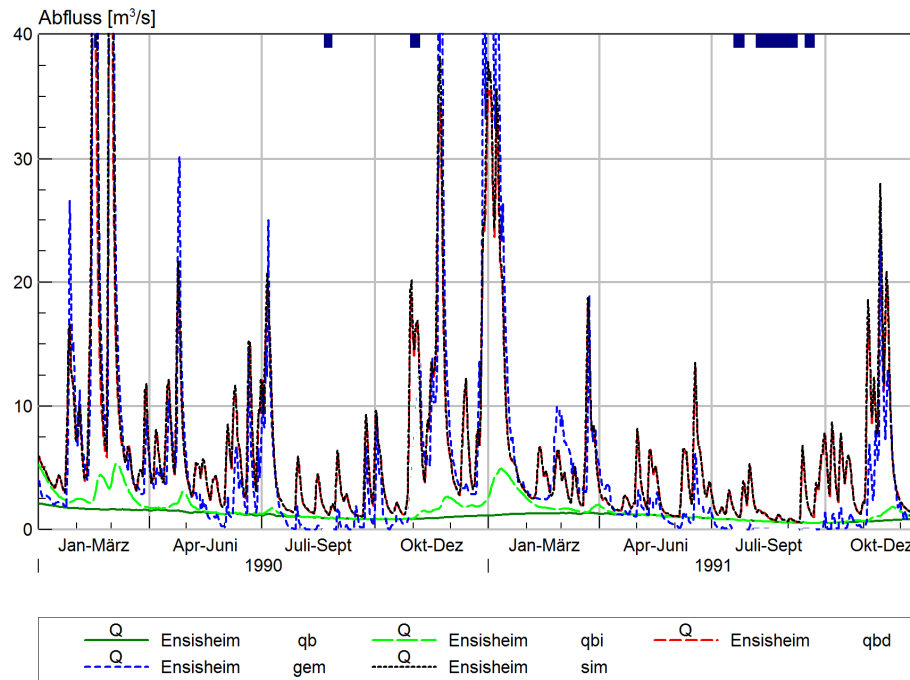
Vergleich der manuell und automatisch ermittelten Modellparameter und der erzielten Gütemaße:

Période calage	Param.	KG	BETA	EQB	Dmax	EQI	EQD	EQD2		Période éval.	Bilan	KGE Q	KGE log Q
-	Manuelle	1	0,012	40000	2	12000	1200	300			1,08	0,89	0,94
1971-1975	Automatique	0,98	0,021	18697	1,9	13748	1645	674		1981-1990	1,06	0,86	0,91
1976-1980	Automatique	0,96	0,012	26825	3,3	12000	1200	541			1,02	0,90	0,95

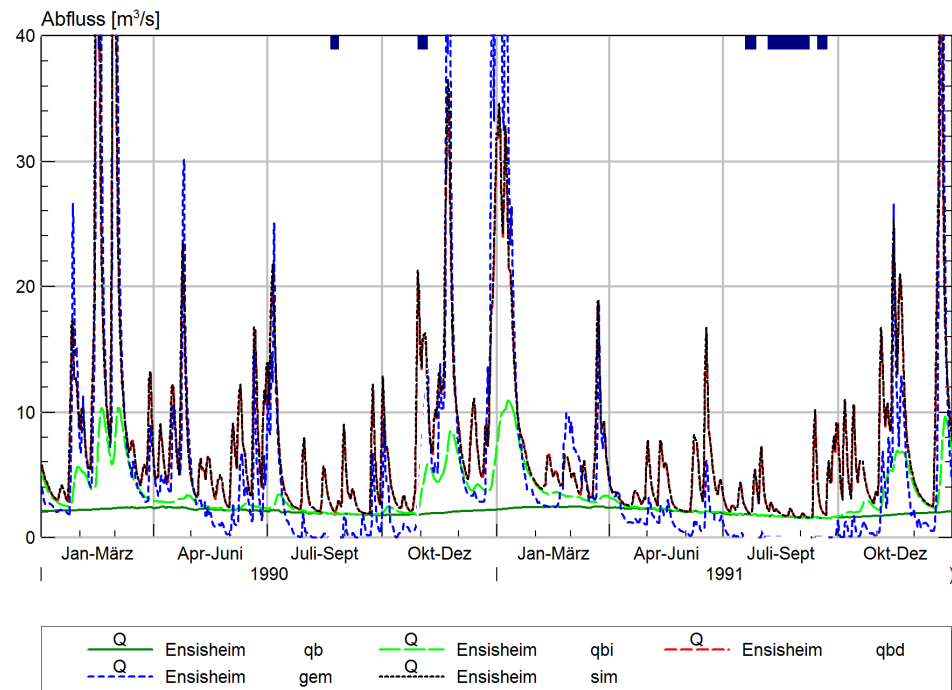
Automatische Kalibrierung

- Beispiel: Ergebnisse der Kalibrierung (Pegel Ensisheim/III):

automatisch:



manuell:



Abflusskomponentenaufteilung entspricht bei der automatischen Kalibrierung weniger der hydrologischen Modellvorstellung

Diagnose-Werkzeuge

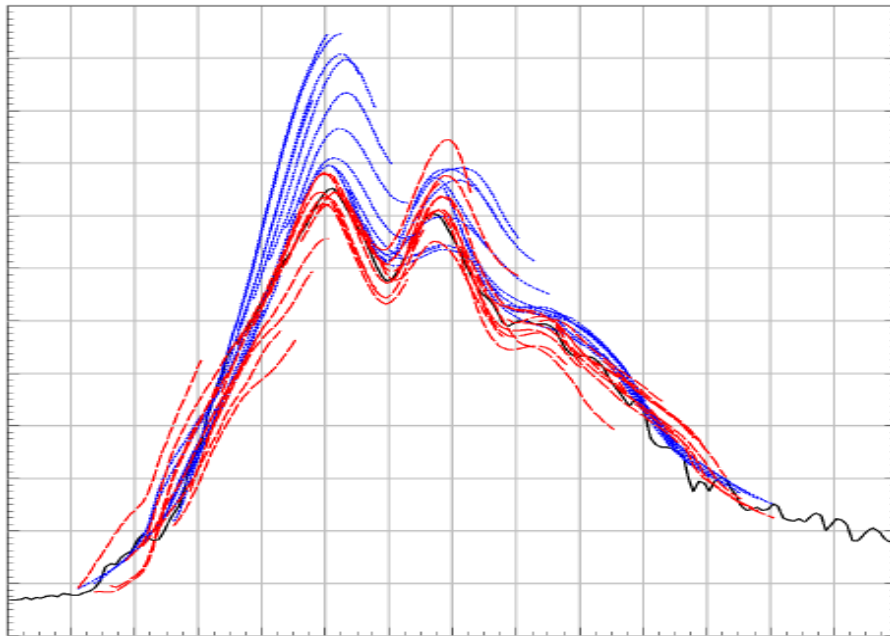
Möglichkeiten zur Kontrolle der Simulationsgüte:

- Visueller Vergleich (Abflussganglinien, Schneemessstationen, Satelliten-
daten,...)
- Gütekriterien (jahresweise, HW-Ereignisse,...)

Diagnose-Werkzeuge

Möglichkeiten zur Kontrolle der Simulationsgüte:

- Statistische Auswertung der berechneten Vorhersagen (Programm Profound)



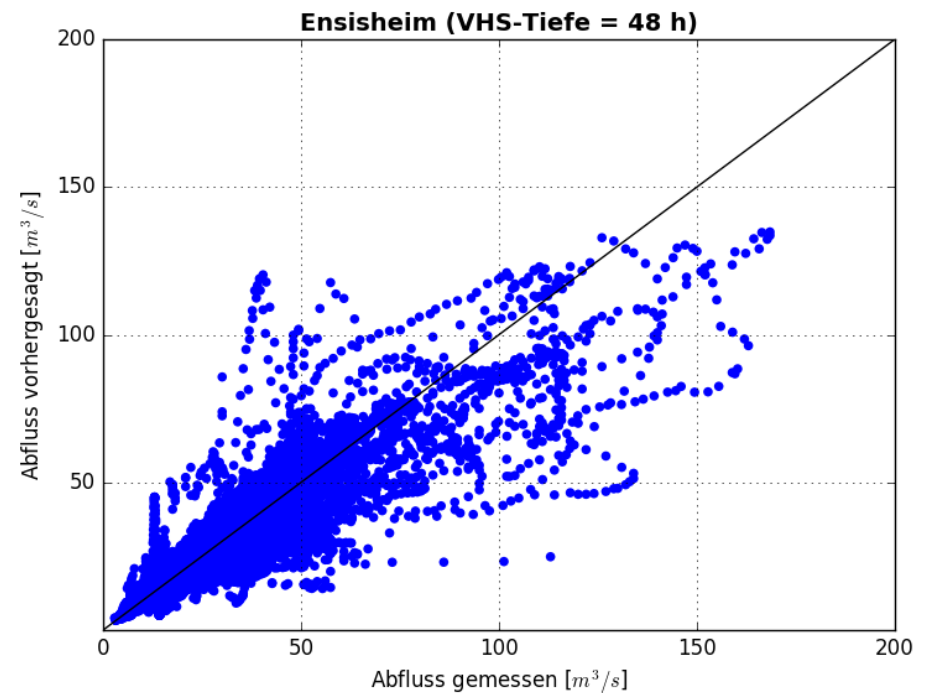
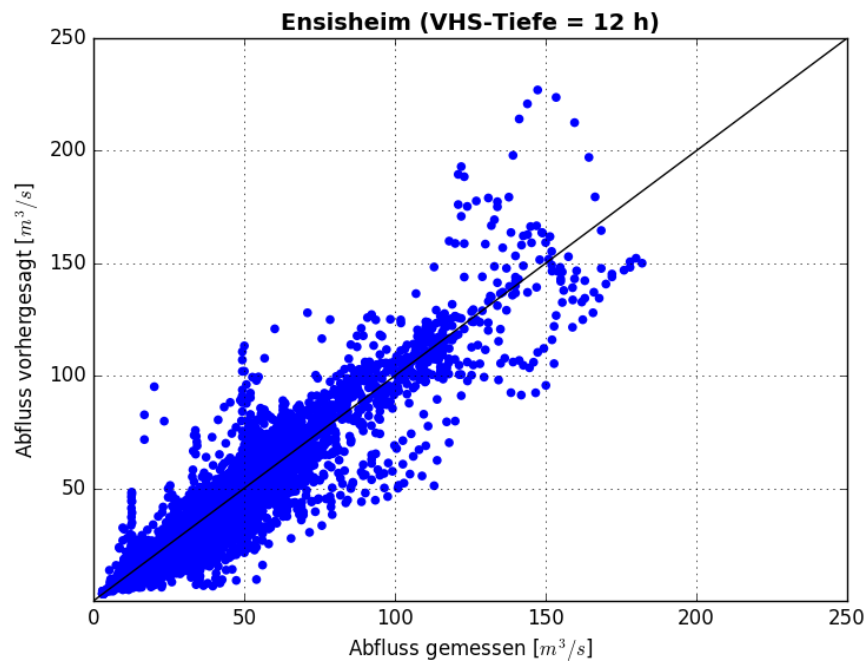
- Quantitative Bewertung von Vorhersagen
- Abfluss und Wasserstände
- In Abhängigkeit der Vorhersagetiefen
- Unterscheidung verschiedener hydrologischer Situationen (Fälle)

		Mess. $\geq$ Grenze	Mess. $<$ Grenze
VHS $\geq$ Grenze	VHS $\geq$ Grenze	Hit 73	False Alarm 39
	VHS $<$ Grenze	Miss 6	Correct Negative 18162

Diagnose-Werkzeuge

Möglichkeiten zur Kontrolle der Simulationsgüte:

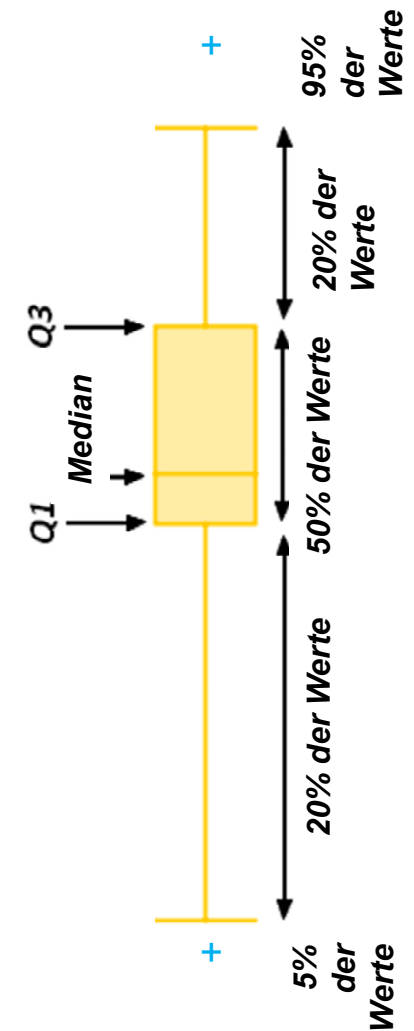
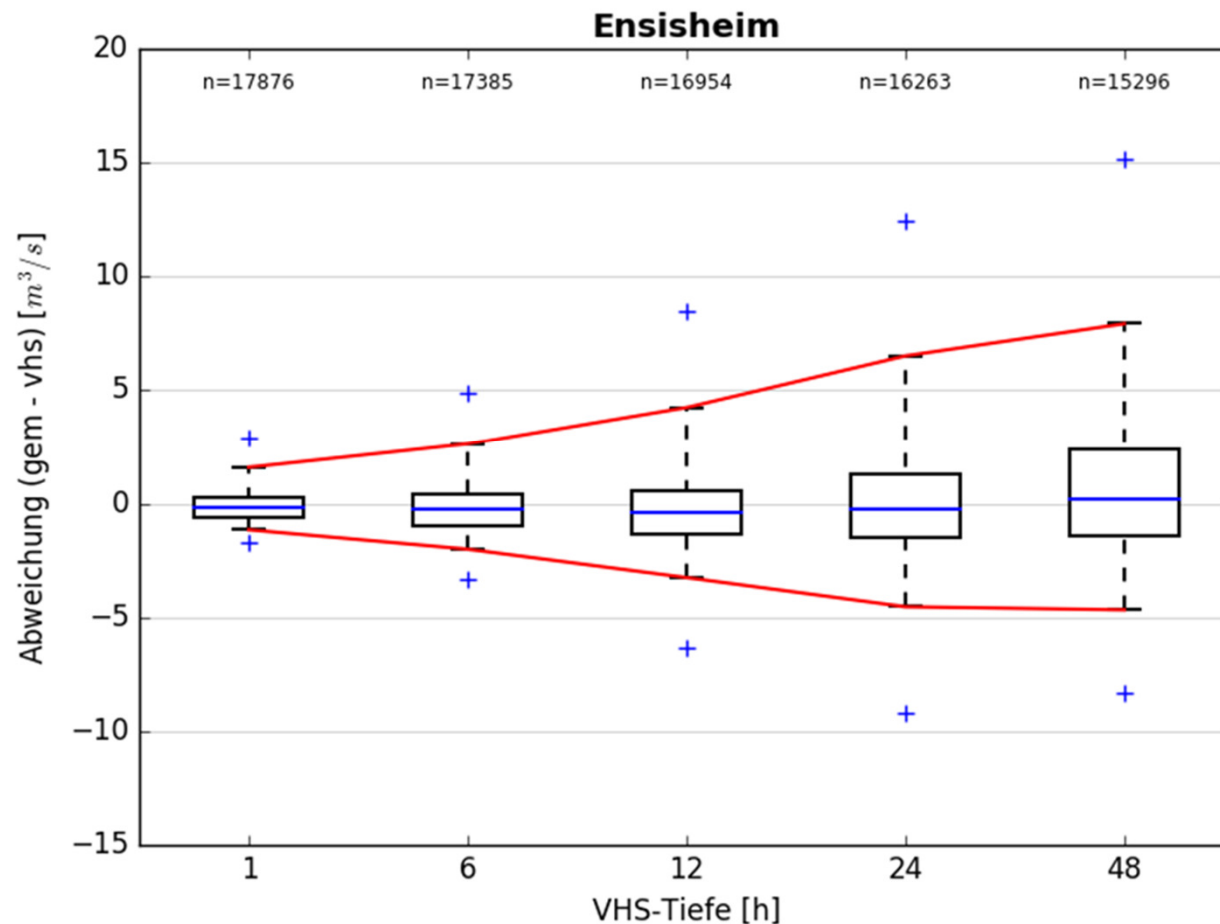
- Statistische Auswertung der berechneten Vorhersagen (Programm Profound)



Diagnose-Werkzeuge

Möglichkeiten zur Kontrolle der Simulationsgüte:

- Statistische Auswertung der berechneten Vorhersagen (Programm Profound)



Zusammenfassung

- Die Kalibrierungsstrategie hängt von den Zielen des Modells und den verfügbaren Messdaten ab
- Anzupassende Modellparameter in LARSIM: 12 Parameter + ggf. 3 Schneeparametern je Pegel, zeitlich konstant, unterschiedlich für Tages- oder Stundenmodell
- Manuelle Kalibrierung: visueller Vergleich und Optimierung der Gütemaße, neben Abfluss ggf. weitere Datensätze zum Vergleich, abflusskomponentenspezifische Parameterwahl, gesonderte Untersuchung der Hochwasser
- Automatische Kalibrierung: multikriterielle Zielfunktion erforderlich, rechenaufwendig
- Jedes Gütekriterium (NSE, Bilanz, VE, KGE) hat seine eigene Aussagekraft
- Diagnoseprogramm Profound zur Bewertung der Vorhersagen

Literatur

- Deubler, M. (2017): Der Shuffled-Complex-Evolution-Algorithmus (SCE-UA)
Anwendung für die Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells LARSIM am Beispiel
des Einzugsgebiets Oberer Main. Bachelorarbeit TUM München
- Hingray, B., Picouet, C., Musy, A. (2009): Hydrologie 2: Une science pour l'ingénieur.
Science et ingénierie de l'environnement, Presses Polytechniques et Universitaires
Romandes, Lausanne, Switzerland.
- Perrin, C. (2000): Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers
d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble, 530 pp.