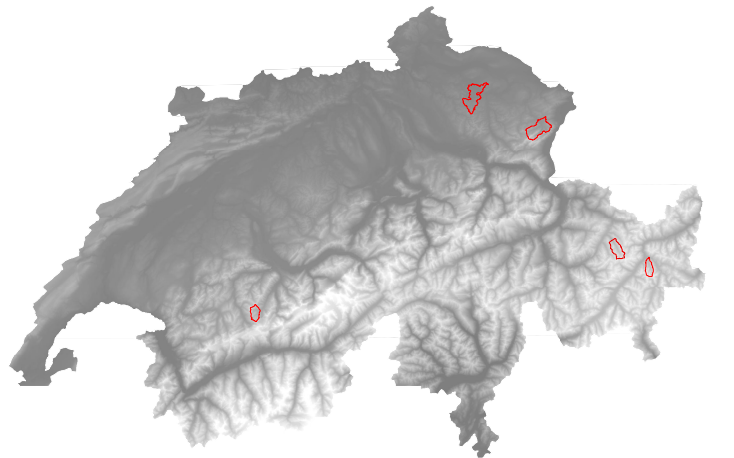


**Professur für Hydrologie
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg**

Claudius Fleischer

Zeitstabilität der Parameter des HBV Modells in Bezug auf klimatische Veränderungen



Masterarbeit unter der Leitung von
Dr. Kerstin Stahl und Prof. Dr. Jan Seibert

Freiburg im Breisgau, 2015

Professur für Hydrologie
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Claudius Fleischer

Zeitstabilität der Parameter des HBV
Modells in Bezug auf klimatische
Veränderungen

Referentin: Dr. Kerstin Stahl
Koreferent: Prof. Dr. Jan Seibert

Freiburg im Breisgau, 2015

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	XII
0.1. Danksagung	XIV
0.2. Zusammenfassung	XV
0.3. Extended summary	XVI
1. Einleitung	1
1.1. zur Kalibrierung hydrologischer Modelle	1
1.2. Zeitstabilität von Modellparametern	2
1.3. Hydrologische Prozesse unter dem Einfluss klimatischer Veränderungen	6
2. Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit	7
3. Untersuchungsgebiete	9
3.1. Landnutzung	9
3.2. Geologie und Pedologie	10
4. Daten	13
4.1. Niederschlag und Temperatur	13
4.2. Abfluss	13
4.3. Weitere Daten der Einzugsgebiete	14
5. Methoden	15
5.1. Berechnung der potentiellen Evaporation	15
5.2. Das HBV Modell	16
5.3. Modellkalibrierung	18
5.4. Grundlegendes Vorgehen	19
5.4.1. Modellsetup	21
5.5. Vergleich unterschiedlicher Kalibrierungsstrategien	21
5.6. Berechnung der Klimaabweichungen	21

5.7. Vergleich Referenz- und Validierungszeitraum	22
5.8. Erstellung der Performance Plots	22
5.9. Berechnung der Abflussfehler	23
5.10. Erstellung der Regime Plots	23
6. Ergebnisse	25
6.1. Anhand des Gesamtzeitraumes kalibrierte Parameter	25
6.2. Vergleich der Modellperformance unterschiedlicher Kalibrierungsstrategien	25
6.3. Einzugsgebietsspezifische Betrachtung	27
6.3.1. Allenbach	27
Kalibrierung	27
Validierung	28
6.3.2. Dischma	34
Kalibrierung	34
Validierung	35
6.3.3. Murg	40
Kalibrierung	40
Validierung	41
6.3.4. Ova da Cluozza	46
Kalibrierung	46
Validierung	47
6.3.5. Sitter	51
Kalibrierung	51
Validierung	52
6.4. Auswirkung weiterer Ansätze zur Berechnung der potentiellen Evaporation	57
6.4.1. Annahme einer konstanten potentiellen Evaporation	57
6.4.2. Für jede Subperiode separat berechnete potentielle Evaporation	58
7. Diskussion	61
7.1. Methodik	61
7.2. Ergebnisse	62
7.2.1. Modellparameter	62
7.2.2. Performance - Verlust	63
7.2.3. Abflussfehler	65
8. Schlussfolgerungen	67

Literatur	68
A. Anhang	75
A.1. verwendete Abkürzungen	75
A.2. Berechnete potentielle Evaporation	75
A.3. Zeitlicher Verlauf der kalibrierten Modellparameter	76
A.4. hydro - klimatische Verhältnisse der Subperioden	79
A.5. Plots der P/Q Verhältnisse der Einzugsgebiete	82
A.6. Durch HBV angepasste potentielle Evaporation	83
A.7. Performance Verluste der abweichenden Evaporationsansätze im Ein- zugsgebiet <i>Murg</i>	84
A.8. Sensitivität einzelner Parameter auf den Performance - Verlust	86
A.9. Implementierung des GSST in R	92

Abbildungsverzeichnis

3.0.1.räumliche Einordnung der Untersuchungsgebiete	10
3.1.1.Landnutzung der Untersuchungsgebiete (nach BAFU (2014), verändert)	11
3.2.1.Geologie der Untersuchungsgebiete (nach BAFU (2014), verändert) . .	11
5.2.1.Struktur des HBV Modells (aus Abebe u. a. (2010), ursprünglich Seibert (2000))	17
5.4.1.Konzept des generalisierten Split-Sample-Tests. Für einen Zeitraum von 20 Jahren ergeben sich 16 Subperioden. Die $n+5$. Subperiode ist unabhängig von der n . Subperiode (rote Striche, links). Die erhaltenen Parametersätze dürfen in der Validierung nur auf unabhängige Subperioden angewandt werden (beispielhaft dargestellt an den Parametersätzen P1 und P8, rechts). RM bezeichnet die Referenzmodellierung.	20
6.3.1.Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Allenbach</i> , sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum	28
6.3.2.Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Allenbach</i> , sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum	29
6.3.3.Performance (PM) Verlust (Absolutwerte im Lindström Measure) der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen im Einzugsgebiet <i>Allenbach</i> . Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlagsabweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen	30
6.3.4.Einfluss der Differenz innerhalb der Parameterwerte von TT und $SFCF$ zwischen Validierungs- und Kalibrierungszeitraum auf den Performance - Verlust im Einzugsgebiet <i>Allenbach</i>	31

6.3.5.	Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Abfluss (ΔQ) in Bezug zu Zeitversatz, Temperatur- und Niederschlagsabweichung sowie Abweichungen weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen im Einzugsgebiet <i>Allenbach</i>	32
6.3.6.	Entwicklung des hydrologischen Regimes über den Untersuchungszeitraum für den gemessenen und den durch unterschiedliche Kalibrierungsstrategien modellierten Abfluss im Einzugsgebiet <i>Allenbach</i>	33
6.3.7.	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Dischma</i> , sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum	34
6.3.8.	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Dischma</i> , sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum	35
6.3.9.	Performance (PM) Verlust (Absolutwerte im Lindström Measure) der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen im Einzugsgebiet <i>Dischma</i> . Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlagsabweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen	36
6.3.10	Einfluss der Differenz innerhalb der Parameterwerte von <i>CFMAX</i> und <i>SFCF</i> zwischen Validierungs- und Kalibrierungszeitraum auf den Performance - Verlust im Einzugsgebiet <i>Dischma</i>	37
6.3.11	Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Abfluss (ΔQ) in Bezug zu Zeitversatz, Temperatur- und Niederschlagsabweichung sowie Abweichungen weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen . . .	38
6.3.12	Entwicklung des hydrologischen Regimes über den Untersuchungszeitraum für den gemessenen und den durch unterschiedliche Kalibrierungsstrategien modellierten Abfluss im Einzugsgebiet <i>Dischma</i>	39
6.3.13	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Murg</i> , sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum	40
6.3.14	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Murg</i> , sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum	41

6.3.15	Performance (PM) Verlust (Absolutwerte im Lindström Measure) der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen im Einzugsgebiet <i>Murg</i> . Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlagsabweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen	42
6.3.16	Einfluss der Differenz innerhalb der Parameterwerte von <i>MAXBAS</i> und <i>TT</i> zwischen Validierungs- und Kalibrierungszeitraum auf den Performance - Verlust im Einzugsgebiet <i>Murg</i>	43
6.3.17	Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Abfluss (ΔQ) in Bezug zu Zeitversatz, Temperatur- und Niederschlagsabweichung sowie Abweichungen weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen im Einzugsgebiet <i>Murg</i>	44
6.3.18	Entwicklung des hydrologischen Regimes über den Untersuchungszeitraum für den gemessenen und den durch unterschiedliche Kalibrierungsstrategien modellierten Abfluss im Einzugsgebiet <i>Murg</i>	45
6.3.19	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Ova da Cluoza</i> , sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum	46
6.3.20	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Ova da Cluoza</i> , sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum	47
6.3.21	Performance (PM) Verlust (Absolutwerte im Lindström Measure) der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen im Einzugsgebiet <i>Ova da Cluoza</i> . Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlagsabweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum	48
6.3.22	Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Abfluss (ΔQ) in Bezug zu Zeitversatz, Temperatur- und Niederschlagsabweichung sowie Abweichungen weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen im Einzugsgebiet <i>Ova da Cluoza</i>	49
6.3.23	Entwicklung des hydrologischen Regimes über den Untersuchungszeitraum für den gemessenen und den durch unterschiedliche Kalibrierungsstrategien modellierten Abfluss im Einzugsgebiet <i>Ova da Cluoza</i>	50

6.3.24	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Sitter</i> , sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum	51
6.3.25	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Sitter</i> , sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum	52
6.3.26	Performance (PM) Verlust (Absolutwerte im Lindström Measure) der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen im Einzugsgebiet <i>Sitter</i> . Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlagsabweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen	53
6.3.27	Einfluss der Differenz innerhalb der Parameterwerte von <i>SFCF</i> und <i>TT</i> zwischen Validierungs- und Kalibrierungszeitraum auf den Performance - Verlust im Einzugsgebiet <i>Sitter</i>	54
6.3.28	Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Abfluss (ΔQ) in Bezug zu Zeitversatz, Temperatur- und Niederschlagsabweichung sowie Abweichungen weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen im Einzugsgebiet <i>Sitter</i>	55
6.3.29	Entwicklung des hydrologischen Regimes über den Untersuchungszeitraum für den gemessenen und den durch unterschiedliche Kalibrierungsstrategien modellierten Abfluss im Einzugsgebiet <i>Sitter</i>	56
6.4.1.	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Murg</i> mit konstanter PET, sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum	57
6.4.2.	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Murg</i> mit konstanter PET, sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum	58
6.4.3.	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Murg</i> mit separat berechneter PET, sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum	59
6.4.4.	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Murg</i> mit separat berechneter PET, sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum	59
A.3.1	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Allenbach</i>	76
A.3.2	Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Dischma</i>	77

A.3.3Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Murg</i>	77
A.3.4Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Ova da Chuoza</i> . . .	78
A.3.5Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet <i>Sitter</i>	78
A.4.1hydro - klimatische Verhältnisse im Einzugsgebiet <i>Allenbach</i>	79
A.4.2hydro - klimatische Verhältnisse im Einzugsgebiet <i>Dischma</i>	80
A.4.3hydro - klimatische Verhältnisse im Einzugsgebiet <i>Murg</i>	80
A.4.4hydro - klimatische Verhältnisse im Einzugsgebiet <i>Ova da Chuoza</i> . . .	81
A.4.5hydro - klimatische Verhältnisse im Einzugsgebiet <i>Sitter</i>	81
A.5.1P/Q Verhältnisse der Untersuchungsgebiete	82
A.6.1Jahreswerte der durch HBV angepassten potentiellen Evaporation aller Einzugsgebiet. Murg star : konstante potentielle Evaporation — Murg var : für jeden Modellierungszeitraum neu berechnete potentielle Eva- poration	83
A.7.1Performance (PM) Verlust der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen bei konstanter potentieller Evaporation. Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlags- abweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwis- chen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen	84
A.7.2Performance (PM) Verlust der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen bei für alle Subperioden separat berechneter poten- tieller Evaporation. Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlagsabweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen	85
A.8.1Performance - Verlust und Abweichungen in den Modellparametern zwis- chen Validierungs- und Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet <i>Allen- bach</i> . Die Färbung der Punkte basiert auf dem Zeitversatz zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum	87
A.8.2Performance - Verlust und Abweichungen in den Modellparametern zwis- chen Validierungs- und Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet <i>Disch- ma</i> . Die Färbung der Punkte basiert auf dem Zeitversatz zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum	88

A.8.3	Performance - Verlust und Abweichungen in den Modellparametern zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet <i>Murg</i> . Die Färbung der Punkte basiert auf dem Zeitversatz zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum	89
A.8.4	Performance - Verlust und Abweichungen in den Modellparametern zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet <i>Ova da Cluozza</i> . Die Färbung der Punkte basiert auf dem Zeitversatz zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum	90
A.8.5	Performance - Verlust und Abweichungen in den Modellparametern zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet <i>Sitter</i> . Die Färbung der Punkte basiert auf dem Zeitversatz zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum	91

Tabellenverzeichnis

3.0.1.Einzugsgebietscharakteristiken der Untersuchungsgebiete (nach BAFU (2014), verändert)	9
3.2.1.Pedologische Größen der Untersuchungsgebiete (nach BAFU (2014), verändert)	12
5.2.1.Übersicht über die Modellparameter, die Parametergrenzen* und deren Beschreibung	18
6.1.1.Anhand des jeweiligen Gesamtzeitraumes kalibrierte Parameter der Einzugsgebiete.	25
6.2.1.Darstellung der Modelleffizienz. (a) mittlere EZG Höhe als <i>Pelev</i> und <i>Telev</i> , (b) Kalibrierung von <i>Pelev</i> und <i>Telev</i> , (c) Modellierung mit an einem fünf Jahreszeitraum kalibrierten Parametersatz sowie mit (d) zeitvariierendem Parametersatz. Modellierungszeitraum Sitter*: 1914-2006, Modellierungszeitraum Sitter: 1951-2006	26
A.1.1Überblick über die verwendeten Abkürzungen.	75
A.2.1Berechnete potentielle Evaporation der Einzugsgebiete.	76

0.1. Danksagung

Bedanken möchte ich mich an erster Stelle bei Frau Dr. Kerstin Stahl für die Bereitstellung dieses interessanten Themas und gute Betreuung.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Jan Seibert für hilfreiche Tipps während der Arbeit.

Außerdem bedanke ich mich bei Daphné Freudiger für die Bereitstellung der GIS Dateien und für die Bereitstellung der aggregierten Messdaten.

Bei Maria Staudinger möchte ich mich für Beispielskripte zur Steuerung von HBV durch R bedanken.

Besonders möchte ich mich bei meiner Familie für die Ermöglichung des Studiums und für die Unterstützung bedanken.

0.2. Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht die Zusammenhänge zwischen kalibrierten Modellparametern und Veränderungen von Temperatur und Niederschlag über lange Zeiträume durch Corons generalisierten split - sample - Test.

Eindeutige Beziehungen in diesem Verhältnis wurden nicht gefunden, für einige Parameter wurden jedoch Trends beobachtet. Diese Trends werden teilweise durch größere Unterschiede in den Modellparametern zwischen Zeiträumen mit sehr ähnlichen hydro - klimatischen Bedingungen überlagert. Die beobachteten Trends spiegeln sich auch im zeitlichen Verlauf der Modellparameter wieder.

Durch eine Untersuchung der Output – Größen des Modells konnten die durch die Parameterübertragung entstehenden Performance – Verluste erklärt werden. So kann eine falsche Einschätzung der Schneebedeckung oder der Grundwasserneubildung je nach Einzugsgebiet eng mit Performance – Verlusten verbunden sein. Die am Lindström Measure berechneten Performance – Verluste sind mit einem Mittelwert von -0.047 Punkten jedoch eher gering.

Die Übertragung von Modellparametern auf Zeiträume mit abweichenden klimatischen Bedingungen kann zu deutlichen Fehlern in den Abflussquantilen des modellierten Abflusses führen, was besonders für hohe und niedrige Abflüsse gilt. Des Weiteren können die modellierten monatlichen Abflusssummen durch ungeeignete Modellparameter beeinflusst werden.

Durch Zeit - variierende Modellparameter konnten in jedem Einzugsgebiet die höchsten Performance Werte erreicht werden.

Stichworte:

Modellparameter, Zeitstabilität, hydrologische Modellierung, Modellrobustheit, HBV

0.3. Extended summary

This study examines the relationships between calibrated HBV model parameters and changes in hydro - climatic conditions over long time series using Corons generalized split sample test.

Clear relationships could not be found, some parameters showed some trends, however. These trends were overlayed by larger differences between model parameters calibrated in almost similar climate conditions. The observed trends are also visible in the temporal behavior of these parameters.

The resulting performance losses could be explained through an investigation of the model outputs. For instance, a wrong estimation of catchment snowcover or groundwater recharge can be strongly related to performance losses, depending on the catchment. These performance losses are rather small with a mean performance loss of -0.047 points in lindström measure for all catchments.

Transfer of model parameters to periods with different climatic conditions can result in distinct errors in discharge quantiles, particularly for high and low flows. Furthermore, monthly discharge sums can be affected by inadequate model parameters.

Time varying parametersets lead to the highest performance values in all catchments.

Keywords:

Parameter timestability, hydrological modeling, hydrological modelrobustness, HBV

1. Einleitung

1.1. zur Kalibrierung hydrologischer Modelle

Einzugsgebiete sind komplexe Systeme mit spezifischen Charakteristiken wie Klima, Topologie, Boden, Vegetation, Neigung, Geologie und Drainage (Li u. a., 2011).

Da eine genaue Kenntnis des hydrologischen Systems oft nicht vorhanden ist, beziehungsweise konzeptuelle Niederschlags - Abfluss Modelle nur vereinfachte Abbilder dieser Systeme sind, müssen diese Modelle mit gemessenen (Abfluss-) Daten kalibriert werden (Coron u. a., 2012). Die Parameter in konzeptuellen Niederschlags - Abfluss Modellen geben die hydrologischen Prozesse auf der Einzugsgebietsskala (bzw. für verschiedene Landnutzungsklassen etc.) wieder, wodurch ebenfalls eine Kalibrierung dieser Modelle erforderlich wird (Seibert, 2000; Gan u. a., 2014).

Werden hydrologische Modelle unter anderen Bedingungen angewendet als unter denen sie kalibriert wurden, ergibt sich die Frage nach der Belastbarkeit der Modelle bzw. der Modellierungsergebnisse (Coron u. a., 2011; Merz u. a., 2011). Auch die Länge des Kalibrierungszeitraumes wirkt sich nach Vaze u. a. (2010) auf diese Belastbarkeit der Ergebnisse aus. Ein zu kurzer oder einseitiger Kalibrierungszeitraum kann zu einem einseitig kalibrierten Modell führen, welches Zeiträume, die dem Modell nicht 'antrainiert' wurden, nur schlecht modellieren kann (Bastola u. a., 2011). Bei der Wahl des Kalibrierungszeitraumes auf eine repräsentative Variabilität der Klimagrößen zu achten, ist eine Möglichkeit diesem Problem zu begegnen (Coron u. a., 2011). Die wenigen (und auch unterschiedlichen) Empfehlungen für die Wahl der Länge dieses Zeitraumes erachten eine minimale Länge von 3 - 20 Jahren für sinnvoll (Brigode u. a., 2013; Vaze u. a., 2010).

Kalibrierte Modellparameter fangen Fehler und Unsicherheiten in der Modellstruktur sowie in den gemessenen Daten auf (wodurch sich diese Fehler in den Modellparametern widerspiegeln) und können sich schon aus diesem Grund in verschiedenen

Kalibrierungszeiträumen unterscheiden (Beven und Binley, 1992; Merz u. a., 2011). Folglich kommt es zu Unsicherheiten im Modellergebnis, da der durch die Kalibrierung angepasste Modellparameter nicht dem physikalisch korrekten Parameterwert für den jeweiligen Prozess im Einzugsgebiet entspricht (Abebe u. a., 2010).

Des Weiteren führen unterschiedliche Zielfunktionen zur Messung der Modellperformance zu unterschiedlichen Parametersätzen (Seibert, 2003; Gan u. a., 2014; Abebe u. a., 2010). Interaktionen zwischen den Modellparametern stellen hier ein zusätzliches Problem dar (Seibert, 2003). Dies führt nach Seibert (2003) zu mehreren Parametersätzen, die den Kalibrierungszeitraum, gemessen an der Modellperformance, gleich gut modellieren können (vergleiche auch Seibert (1997); Li u. a. (2011); Gan u. a. (2014)). Der Begriff der Parameterequifinalität bezeichnet genau dieses Phänomen (Li u. a., 2011); die Parameterwerte sind nicht mehr eindeutig identifizierbar (Gan u. a., 2014). Dies bedeutet jedoch nicht, dass die simulierten Abflüsse, die mit diesen Parametersätzen erzeugt wurden, als solches gleich sein müssen, da sich durch die unterschiedlichen Parametrisierungen die Prozesse innerhalb des Modells unterscheiden können. Werden diese, im Kalibrierungszeitraum gleich guten, Parametersätze nach klimatischen Veränderungen oder Landnutzungsänderungen angewandt, können unterschiedliche Abflussvorhersagen der Fall sein (Uhlenbrook u. a., 1999).

Derzeit besteht großes Interesse, Modellkalibrierungsverfahren robuster zu gestalten und Parameterunsicherheiten besser zu verstehen (vgl. Coron u. a. (2012); Gharari u. a. (2013); Westra u. a. (2014); Gan u. a. (2014)).

1.2. Zeitstabilität von Modellparametern

Merz u. a. (2011) untersuchten die Zeitstabilität von Modellparametern des HBV Modells in 273 Einzugsgebieten in Österreich über einen Zeitraum von 30 Jahren, den sie in fünf - Jahresabschnitte unterteilten. Die Parameter der Schnee- und Bodenfeuchte-Routine zeigten dabei signifikante Zeit-Trends. Diese Trends wurden hydro - klimatischen Veränderungen in den Einzugsgebieten zugeordnet, da die Veränderungen in den Parametern mit Trends von Klima-variablen wie Lufttemperatur und potentieller Evaporation korreliert werden konnten. Auch sind diese Trends in verschiedenen Einzugsgebieten ähnlich, was Kalibrierungsartefakte nach Merz u. a. (2011) unwahrscheinlich werden lässt. Der Parameter für die Abfluss-Generierung, B , verdoppelte

sich im Untersuchungszeitraum, auch der Parameter für die maximale Bodenfeuchtespeicherkapazität, FC, stieg stark an (Merz u. a., 2011). Diese Trends sind nach Merz u. a. (2011) durch die wärmeren Temperaturen und dadurch höhere Evaporation in den jüngeren Jahren bedingt, die zu trockeneren Böden und einer vergrößerten Speicherkapazität für Wasser führen. Der Schneekorrekturfaktor SCF fiel im Laufe der Jahre ab, was Merz u. a. (2011) mit den höheren Temperaturen und dem damit verbundenem geringeren Schneeanteil am Gesamtniederschlag erklären. Veränderungen in den Parametern der Routing Routine konnten nicht eindeutig Veränderungen in den klimatischen Bedingungen zugeordnet werden, was Merz u. a. (2011) durch die größere Abhängigkeit dieser Parameter von der Topographie, dem Flussnetzwerk, der Geologie und dem Bodentyp begründen. Der Unterschied zwischen simuliertem und gemessenem Abfluss wird nach Merz u. a. (2011) mit zunehmendem zeitlichen Abstand zwischen Kalibrierungs- und Validierungszeitraum größer, was besonders für Hoch- und Niedrigabflüsse (Q_5 und Q_{95}) gilt. Die Abflüsse wurden eher überschätzt (unterschätzt), wenn der Kalibrierungszeitraum kühler und trockener (wärmer und nasser) als der Validierungszeitraum war.

Nach Coron u. a. (2012) kann ein Parametersatz, der in unterschiedlichen klimatischen Bedingungen kalibriert und angewandt wird, zu Verlusten in der Modellperformance führen. Coron u. a. (2012) fanden eine Beziehung zwischen den Veränderungen im gemittelten Niederschlag und der Modellperformance, Zusammenhänge zwischen mittlerer potentieller Evaporation sowie der Temperatur und der Modellperformance wurden nicht beobachtet. Dies wird mit der Wasserlimitiertheit der untersuchten Einzugsgebiete in Südost-Australien begründet, die eine höhere Sensitivität der Zielfunktion auf den Niederschlagsinput als auf die Evaporation und die Temperatur bewirkt. Besonders die Fehler in den simulierten Abflussvolumen werden nach Coron u. a. (2012) stark von Veränderungen im Niederschlag beeinflusst. Außerdem überschätzten (unterschätzten) die verwendeten Modelle den Abfluss in der Validierungsperiode, wenn die Kalibrierungsperiode im Vergleich nasser (trockener) war.

Nach Vaze u. a. (2010) nimmt der Verlust in der Modellperformance mit größerer Differenz im Niederschlag zwischen Kalibrierungs- und Validierungszeitraum zu. In die Studie gingen 61 Einzugsgebiete in Südost-Australien ein. Der beobachtete Performance-Verluste wurde größer, wenn kurze Zeiträume für Kalibrierung und Validierung genutzt wurden. Die Ergebnisse der Studie konnten nicht mit Gebietseigenschaften in Verbindung gebracht werden, auch waren keine räumlichen Muster zu erkennen. Modelle, die

über einen Zeitraum von mindestens 20 Jahren kalibriert werden, können nach Vaze u. a. (2010) auf andere Zeiträume übertragen werden, wenn sich der mittlere jährliche Niederschlag in Relation zum Kalibrierungszeitraum nicht um mehr als 15% verringert oder 20 % erhöht. Unter nassen Bedingungen kalibrierte Modelle sind nach Vaze u. a. (2010) nicht für die Anwendung in kurzen, trockenen Zeiträumen geeignet

Nikolova (2013) untersuchte die Robustheit von HBV Modellparametern im Thur Einzugsgebiet in der Schweiz über einen Zeitraum von 29 Jahren. Unter ähnlichen klimatischen Bedingungen kalibrierten Parameter lieferten in der Validierung bessere Performance - Werte als unter gegensätzlichen Bedingungen kalibrierte Parameter. Allerdings konnte durch Nikolova (2013) nur eine geringfügige Verschlechterung der Modellperformance (durchschnittlicher Verlust der Nash - Sutcliffe - Modellgüte von 3%) beobachtet werden, wenn die kalibrierten Parameter auf Zeitabschnitte mit abweichenden klimatischen Bedingungen angewandt wurden. Für die unterschiedlichen Abflussanteile (Q_{95} , Q_{50} und Q_{05}) wurden deutlich größere Fehler in den Modellierungsergebnissen festgestellt, wenn das Modell in klimatisch abweichenden Validierungszeiträumen angewendet wurde (für Q_{05} über 20%).

Unterschiedliche klimatischen Bedingungen zwischen Kalibrierungs- und Validierungszeitraum führen auch nach Brigode u. a. (2013) zu einer Abnahme der Modellperformance. Brigode u. a. (2013) beobachteten keine eindeutigen Auswirkungen der klimatischen Bedingungen während des Kalibrierungszeitraumes auf die Charakteristiken des modellierten Abflusses. Die Kalibrierung über den gesamten Zeitraum (durchschnittlich 20 Jahre) führte nach Brigode u. a. (2013) nicht zu robusteren Modellen als eine Kalibrierung über drei Jahre, was der üblichen Annahme 'je länger der Kalibrierungszeitraum, desto robuster der Parametersatz', wie auch den Ergebnissen von (Vaze u. a., 2010), widerspricht (Brigode u. a., 2013).

Wagener u. a. (2003) zeigte, dass Stürme in trockenen Sommerperioden andere Parametrisierungen benötigen als Stürme in nassen Zeiträumen.

Nach Li u. a. (2011) können unterschiedliche Kalibrierungszeiträume zu signifikanten Verschiebungen in den Verteilungen der Modellparameter führen. Der Transfer von sensitiven Parametern kann zu großen Fehlern in der Modellierung führen, wenn das Modell unter veränderten klimatischen Bedingungen angewendet wird (Li u. a., 2011). Daher sollte ein hydrologisches Modell nach Li u. a. (2011) für die Bedingungen kali-

briert werden, unter denen es zum Einsatz kommt.

Westra u. a. (2014) legen ihre Ergebnisse als starken Beleg für die Nicht-Stationarität von hydrologischen Modellen aus, da sich die modellierten Abflüsse signifikant verbessert haben wenn die Modellparameter über die Zeit variieren konnten. Auch die Ergebnisse von Herman u. a. (2013) deuten auf Abhängigkeiten zwischen den Modellparametern und zeit - variierenden hydro - klimatischen Bedingungen hin.

Niel u. a. (2003) untersuchten 17 Einzugsgebiete in Afrika mit einem nicht flächenverteilten hydrologischen Modell, in denen sich Niederschlag und Abfluss deutlich verändert haben. Veränderungen in diesen Größen führten jedoch nicht zu einer Parameterinstabilität. Lay u. a. (2009), die ein nicht flächenverteiltes hydrologisches Modell in Afrika über einen Zeitraum von etwa 50 Jahren anwendeten, konnten zeigen, dass signifikante Veränderungen im Niederschlags-Abflussverhältnis hier nicht zu signifikanten Veränderungen in den Modellparametern führen. Chiew u. a. (2009) modellierten den Einfluss von Klimaänderungen auf den Abfluss im Südosten Australiens. Die Modellierungsergebnisse waren für einen unabhängigen Testzeitraum nur geringfügig schlechter als für den Kalibrierungszeitraum. Chiew u. a. (2009) schließen daraus, dass ein zufriedenstellend kalibriertes hydrologisches Modell auf Zeiträume mit anderen klimatischen Bedingungen angewendet werden kann. Nach Bastola u. a. (2011) bleiben die kalibrierten Parameterwerte auch für andere Zeiträume akzeptabel, wenn sich der Niederschlag nicht um mehr als 10 % verändert.

Merz u. a. (2011) stellten eine Verbindung zwischen den Modellparametern und hydro - klimatischen Veränderungen her, wohingegen Modellparameter nach Lay u. a. (2009) kein brauchbares Maß für Veränderungen im Einzugsgebiet darstellen.

1.3. Hydrologische Prozesse unter dem Einfluss klimatischer Veränderungen

Nach Zierl und Bugmann (2005), die Modellierungen zum Verhalten hydrologischer Prozesse im Alpenraum im 21. Jahrhundert durchführten, führen besonders in höher gelegenen Einzugsgebieten die Auswirkungen der steigenden Temperaturen auf die Dynamik der Schneedecke zu einer Verschiebung der hydrologischen Regime.

Geringere Lufttemperaturen haben in humiden Klimaten eine geringere Evapotranspiration zur Folge (Tabari und Talaei, 2014). Jedoch hat die Sonnenscheindauer einen etwas größeren Einfluss auf die potentielle Evapotranspiration als die Temperatur, welche an zweiter Stelle steht.

Birsan u. a. (2005) untersuchten Trends im Abfluss in 48 in der Schweiz gelegenen Einzugsgebieten im 20. Jahrhundert. Dabei beobachteten sie fast ausschließlich ansteigende statistisch signifikante Abflusstrends, hauptsächlich verursacht durch einen Anstieg des Abflusses im Winter, jedoch auch aufgrund eines Anstieges der Abflüsse im Frühling und im Herbst. Diese Trends konnten durch Birsan u. a. (2005) mit Einzugsgebietseigenschaften wie mittlerer Einzugsgebietshöhe, Vergletscherung und anstehendes Gestein positiv korreliert und mit der mittleren Bodenmächtigkeit negativ korreliert werden.

2. Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Die Zeitstabilität von Parametern hydrologischer Modelle ist derzeit nicht richtig verstanden.

Ziel dieser Arbeit ist das Identifizieren von Veränderungen in den Modellparametern in unter geringem anthropogenem Einfluss stehenden Einzugsgebieten über lange Zeiträume. Hierbei steht insbesondere die Frage, ob ein systematischer Zusammenhang zwischen den hydro - klimatischen Eingangsgrößen Temperatur und Niederschlag und den kalibrierten Modellparametern besteht, im Vordergrund.

Des Weiteren sollen die Performance - Verluste, die durch die Übertragung von Modellparametern auf unabhängige Modellierungszeiträume entstehen, quantifiziert werden. Gründe für diese Performance - Verluste sollen gefunden werden.

Die Ergebnisse der Arbeit sollen zusätzliche Informationen zur Bestimmung der Modellunsicherheit von Niederschlags- Abflussmodellierungen durch Annahme zeit - konstanter Parametersätze innerhalb des KHR Projektes (Internationale Kommission zur Hydrologie des Rheins) liefern.

3. Untersuchungsgebiete

Als Untersuchungsgebiete wurden fünf in der Schweiz gelegene Einzugsgebiete mit geringem anthropogenen Einfluss gewählt (keine Dämme, keine bedeutenden Wassereutnahmen oder -zuführungen (Staudinger u. a., 2014)). Vier der fünf Einzugsgebiete sind Kopfeinzugsgebiete des Rheins. Das Gebiet *Ova da Cluozza* wurde zusätzlich ausgewählt, da es hoch gelegen ist und über große Flächenanteile anstehendes Gestein aufweist und damit sensibler auf klimatische Veränderungen reagieren sollte (Birsan u. a., 2005). Die Einzugsgebiete sind, wenn überhaupt, nur minimal durch Gletscher beeinflusst (Abbildung 3.1.1). Für alle Einzugsgebiete liegen lange Zeitreihen der mittleren täglichen Abflüsse, sowie der Klimagrößen Temperatur und Niederschlag, vor. Sie unterscheiden sich in ihrer Höhenausdehnung, der Regimetypen, sowie in weiteren Einzugsgebietscharakteristiken wie Geologie und Landnutzung. Die Einzugsgebietsgrößen sind vergleichbar. Eine räumliche Übersicht über die Einzugsgebiete ist in Abbildung 3.0.1 aufgezeigt, Tabelle 3.0.1 gibt eine Charakterisierung der Einzugsgebiete.

Die Untersuchungsgebiete *Dischma* und *Ova da Cluozza* sind die am höchsten gelegenen Einzugsgebiete, *Murg* stellt das am tiefsten gelegene Einzugsgebiet dar.

Tabelle 3.0.1.: Einzugsgebietscharakteristiken der Untersuchungsgebiete (nach BAFU (2014), verändert)

<i>EZG</i>	<i>Fläche [km²]</i>	<i>max. Höhe [m]</i>	<i>min. Höhe [m]</i>	<i>mittlere Höhe [m]</i>	<i>Regimetyp</i>
Allenbach	28.8	2762	1297	1856	nival
Dischma	43.3	3146	1668	2327	glazio-nival
Murg	78	1035	465	650	pluvial
Ova da Cluozza	26.9	3165	1508	2368	glazio-nival
Sitter	74.2	2501	769	1252	nival

3.1. Landnutzung

Die Landnutzungen der Untersuchungsgebiete ist in Abbildung 3.1.1 dargestellt. Die Daten beruhen auf Informationen des Bundesamtes für Umwelt (BAFU, 2014). Der Waldanteil variiert zwischen 2.38 % für das *Dischma* Einzugsgebiet und 33.45 % für

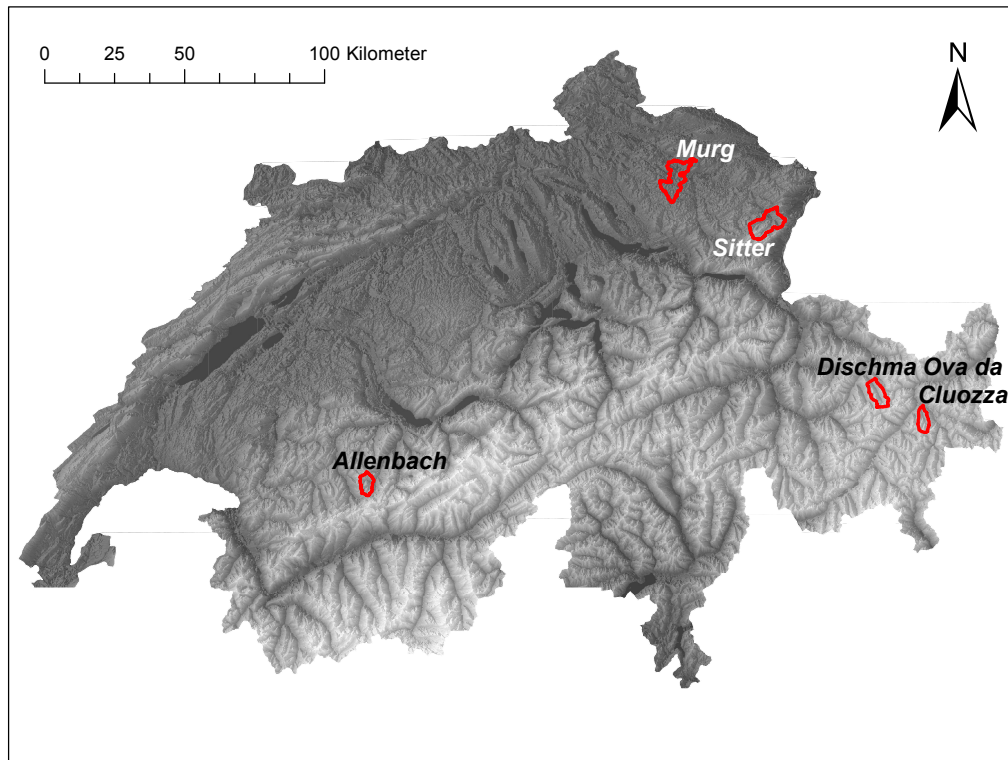


Abbildung 3.0.1.: räumliche Einordnung der Untersuchungsgebiete

das Einzugsgebiet *Murg*, auch der Anteil der vegetationslosen Flächen variiert zwischen den Einzugsgebieten stark (0.24 % für *Murg* und 66.91 % für *Ova Da Cluozza*). Wasserkörper und Siedlungsflächen machen in allen Untersuchungsgebieten nur einen geringen Teil an der Gesamtfläche aus. Hierbei besitzt das Einzugsgebiet *Murg* den größten Anteil an Siedlungsflächen (9.68 %). Die Gebiete *Ova da Cluozza* und *Dischma* sind die einzigen, die Gletscher beinhalten (2.23 % und 2.06 % Flächenanteil).

3.2. Geologie und Pedologie

Auch die Daten zu Geologie und Pedologie der Einzugsgebiete beruhen auf Informationen des Bundesamtes für Umwelt (BAFU, 2014). In den Einzugsgebieten *Ova da Cluozza* und *Sitter* treten Gesteine mit Tendenz zur Verkarstung auf. Zu einem geringen Teil ist dies auch im Einzugsgebiet *Allenbach* der Fall. Daher ist besonders für das Einzugsgebiet *Ova da Cluozza* von hohen Fließgeschwindigkeiten auszugehen. Die Gesteine im *Allenbach* Einzugsgebiet weisen hohe Tongehalte auf, was zu einer geringen Durchlässigkeit führt. Im Einzugsgebiet *Dischma* sind beide Talflanken von mächtigen Moränen bedeckt, die große Mengen Wasser speichern können. Auch das Einzugsge-

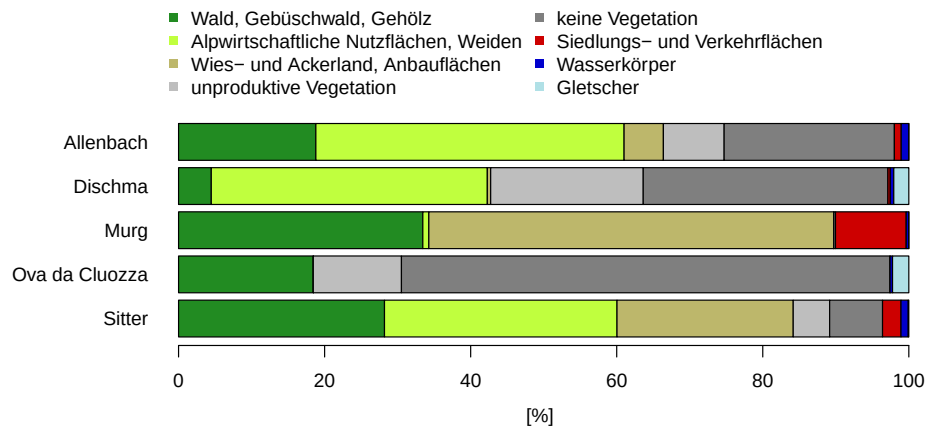


Abbildung 3.1.1.: Landnutzung der Untersuchungsgebiete (nach BAFU (2014), verändert)

biet *Murg* ist im unteren Teil von Moränen und fluvioglazialen Schottern bedeckt. Die Geologie der Untersuchungsgebiete ist in Abbildung 3.2.1 dargestellt.

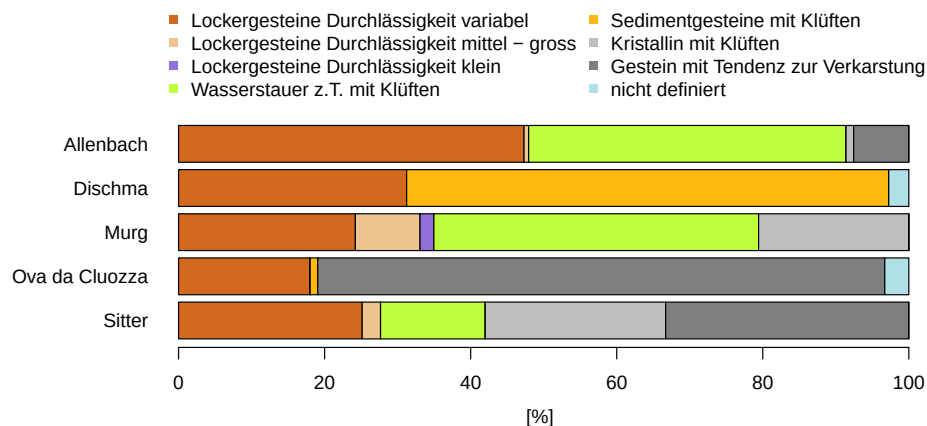


Abbildung 3.2.1.: Geologie der Untersuchungsgebiete (nach BAFU (2014), verändert)

Tabelle 3.2.1 gibt die pedologischen Eigenschaften der Einzugsgebiete wieder. Dabei ist zu beachten, dass zum Teil große Gebietsanteile nicht definiert sind.

Tabelle 3.2.1.: Pedologische Größen der Untersuchungsgebiete (nach BAFU (2014), verändert)

<i>EZG</i>	<i>mittleres Wasserspeicher- vermögen [mm]</i>	<i>mittlere Durchlässigkeit [cm/s]</i>	<i>dominierende Bodentypen</i>	<i>nicht definiert [%]</i>
Allenbach	35.1	2.0E-03	Regosol, Gleysol	21.4
Dischma	17.8	4.3E-02	Lithosol, Ranker	41.6
Murg	69.4	2.9E-03	Cambisol, Regosol	0.7
Ova da Cluozza	16.9	5.1E-03	Lithosol, Rendzina	65.7
Sitter	40.9	3.6E-03	Regosol, Lithosol	6.9

4. Daten

4.1. Niederschlag und Temperatur

Die Niederschlags- und Temperaturdaten stammen aus dem DWD / BfG - HYRAS - PRE - Datensatz (Rauthe u. a., 2013). Dabei handelt es sich um einen gridbasierten Rasterdatensatz mit einer räumlichen Auflösung von 1 km^2 und einer zeitlichen Auflösung von einem Tag. Die Messdaten reichen von 1951 bis 2006 und wurden innerhalb des KHR Projektes (internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes) mittels Analogtagen bis ins Jahr 1901 rekonstruiert (Stahl u. a., 2013). Die Anzahl der Messstationen war über den Zeitraum jedoch nicht konstant, in der Schweiz verdreifachte sich deren Anzahl im Jahr 1961 (Rauthe u. a., 2013). Aufgrund dieser Verdreifachung der Messstationen kann eine höhere Qualität der Temperatur- und Niederschlagsdaten ab diesem Jahr angenommen werden.

An der Universität Freiburg wurden aus den gridbasierten Daten bereits pro Einzugsgebiet Tagesmittelwerte gebildet.

4.2. Abfluss

Durch das Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU, 2014) wurden die Abflussdaten in täglicher Auflösung bereitgestellt. Die Länge der Abflusszeitreihen ist nicht einheitlich, für die meisten Einzugsgebiete sind Daten über einen Zeitraum von etwa 50 - 60 Jahren vorhanden. Für die Modellierung mit HBV wurden die Abflussdaten jeweils von $\frac{\text{m}^3}{\text{sec}}$ in $\frac{\text{mm}}{\text{d}}$ umgerechnet. Das Einzugsgebiet *Sitter* ist aufgrund der Länge der Abflusszeitreihe das einzige Untersuchungsgebiet, für das Analogtage vor 1951 verwendet wurden.

4.3. Weitere Daten der Einzugsgebiete

Ebenfalls durch das Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU, 2014) wurde die Landnutzung der Schweiz als Shapefile sowie Shapefiles mit den Einzugsgebietsflächen der Untersuchungsgebiete bereitgestellt. Als digitales Höhenmodell wurde das DHM25 des Bundesamtes für Landestopographie verwendet. Aus diesen Informationen wurden mit ArcGIS die Einzugsgebiete für das HBV Modell erstellt.

5. Methoden

5.1. Berechnung der potentiellen Evaporation

Die potentielle Evaporation wurde über das angepasste PE Modell nach Oudin u. a. (2005) berechnet (Gleichung 5.1.1). Dieses Verfahren ist ein einfacher, temperaturbasierter Ansatz, der nach Oudin u. a. (2005) jedoch genauso gute Werte für Niederschlags - Abfluss - Modellierungen wie ein detaillierterer Ansatz (beispielsweise nach Penman) liefert. Für die Modellierung mit HBV wurden jeweils Monatsmittelwerte gebildet. Die für die Berechnung benötigte extraterrestrische Strahlung wurde nach den Vorgaben der FAO berechnet (FAO, 2014). Die so errechneten Werte sind etwas höher als die reellen Verdunstungshöhen nach HAdeS (2014) (Hydrologischer Atlas der Schweiz) und stimmen gut mit Literaturwerten überein (vgl. Gurtz u. a. (2003); Seeger (2013); Menzel (1999)). Eine Übersicht über die potentiellen Verdunstungswerte ist im Anhang (A.2.1) aufgelistet.

$$PE = \frac{R_e}{\lambda * \rho} * \frac{T_a + K2}{K1} \quad (5.1.1)$$

mit :

PE = potentielle Evaporation [$\frac{mm}{Tag}$]

R_e = extraterrestrische Strahlung [$\frac{MJ}{cm^2 * Tag}$]

λ = latenter Wärmefluss [$\frac{MJ}{kg}$]

ρ = Dichte des Wassers [$\frac{kg}{L}$]

T_a = Tagesmitteltemperatur [$^{\circ}C$]

und :

$$R_e = \frac{24 * 60}{\pi} * G_{SC} * d_r [\omega_s * \sin(\varphi) * \sin(\delta) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \sin(\omega_s)] \quad (5.1.2)$$

mit :

G_{SC} = Solarkonstante [$\frac{MJ}{m^2 * Jahr}$]

d_r = inverser relativer Abstand Erde-Sonne [rad]

δ = Neigung der Sonne [rad]

φ = Breitengrad [rad]

J = Tag im Jahr [–]

ω_s = Sonnenwinkel [rad]

Die Solarkonstante G_{SC} beträgt $0.0820 [\frac{MJ}{m^2 * Jahr}]$. Der inverse relative Abstand Erde-Sonne d_r wurde durch $1 + 0.033 * \cos(\frac{2 * \pi}{365} * J)$ berechnet, die Neigung der Sonne δ durch $0.409 * \sin(\frac{2 * \pi}{365} * J - 1.39)$ und der Sonnenwinkel ω_s durch $\arccos(-\tan(\varphi) * \tan(\delta))$. Der latente Wärmefluss wurde auf $2.45 \frac{MJ}{kg}$ festgesetzt (vgl. Oudin u. a. (2005)).

5.2. Das HBV Modell

Das HBV Modell (Bergström, 1976) ist ein halb - flächenverteiltes konzeptionelles Niederschlags - Abfluss Modell, das am *Swedish Meteorological and Hydrological Institute* (SMHI) entwickelt wurde. Mittlerweile existiert es in verschiedenen Versionen und wurde weit verbreitet angewandt (Seibert und Vis, 2012). Es wurde als fähig empfunden, den Abfluss in verschiedenen Klimazonen zu simulieren (Seibert, 2000). Die hier verwendete HBV-light Version wurde an der Universität Zürich entwickelt (Seibert und Vis, 2012). Die folgenden Äußerungen zum HBV Modell beruhen auf Informationen aus Seibert und Vis (2012) und Seibert (2005).

Das Modell kann in verschiedene Höhen- und Vegetationszonen sowie in verschiedene Untereinzugsgebiete unterteilt werden. Der Niederschlag findet als Schnee oder als Regen in das Modell Eingang, je nachdem ob die Tagesmitteltemperatur über oder unter dem Schwellenwert TT [$^{\circ}C$] liegt. Schneefall wird mit dem Korrekturfaktor $SFCF$ [–] multipliziert, um systematische Fehler in der Schneefallmessung zu kompensieren und um Evaporation von der Schneedecke zu simulieren. Schmelz- und Regenwasser wird in der Schneedecke gehalten, bis es einen bestimmten Anteil CWH [–] des Schnee-Wasser Äquivalents des Schnees überschreitet. Schneeschmelze findet in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur und dem Parameter $CFMAX$ [$\frac{mm}{^{\circ}C}$] statt. Fällt die Tagesmitteltemperatur unter TT , kann flüssiges Wasser in der Schneedecke in Abhängigkeit des Parameters CFR [–] erneut gefrieren. Regen und Schneeschmelze werden in Abhängigkeit des Wassergehaltes der Bodenbox, deren maximaler Füllmenge FC [mm] und des Parameters $Beta$ in ebendiese Bodenbox oder in die obere Grundwasserbox geführt. Die reelle Evaporation wird über eine lineare Gleichung, bestehend aus der potentiellen

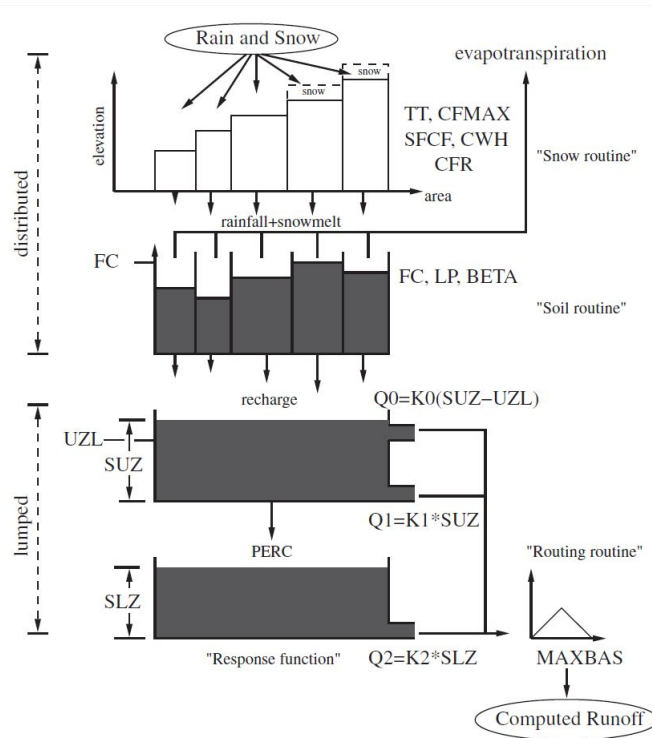


Abbildung 5.2.1.: Struktur des HBV Modells (aus Abebe u. a. (2010), ursprünglich Seibert (2000))

Evaporation, dem verfügbaren Wasser in der Bodenbox SM [mm] und den Parametern FC [mm] und LP [–], berechnet. Sie gleicht der potentiellen Evaporation, wenn $\frac{SM}{FC} > LP$. Die potentielle Evaporation kann in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur und dem Korrekturfaktor Cet [$^{\circ}C^{-1}$] variieren. $PERC$ [mm] definiert die maximale Perkulation von der oberen in die untere Grundwasserbox. Der modellierte Abfluss [mm/d] entstammt ausschließlich den Grundwasserboxen. Er wird in Abhängigkeit des Schwellenwertes UZL [mm] sowie der Parameter $K0$ [–], $K1$ [–] und $K2$ [–] berechnet. Anschließend wird der Abfluss [$\frac{mm}{Tag}$] über den Gewichtungsparmeter $MAXBAS$ [Tag] transformiert.

Veränderungen der Niederschlagsmenge und der Temperatur mit der Höhe werden durch die Parameter $PCALT$ [$\frac{\%}{100m}$] und $TCALT$ [$\frac{^{\circ}C}{100m}$] berechnet. Die Höhe, auf der Niederschlag und Temperatur gemessen werden, werden durch die Parameter $Pelev$ [m] und $Telev$ [m], angegeben.

Für eine genauere Modellbeschreibung sowie zur Ansicht der dem Modell zugrunde liegenden Gleichungen wird an Seibert und Vis (2012) verwiesen.

Tabelle 5.2.1.: Übersicht über die Modellparameter, die Parametergrenzen* und deren Beschreibung

<i>Parameter</i>	<i>Einheit</i>	<i>Parametergrenzen*</i>	<i>Beschreibung</i>
TT	[°C]	-2 - 2.5	Schwellenwerttemperatur
CFMAX	[$\frac{mm}{°C}$]	0.5 - 10	Tag-Grad Faktor
SFCF	[—]	0.5 - 1.7	Schneefallkorrekturfaktor
CFR	[—]	0.05 - 0.05	Gefrierkoeffizient
CWH	[—]	0.1 - 0.1	Anteil des Wasseräquivalents der Schneedecke
FC	[mm]	100 - 900	Maximale Bodenfeuchte
LP	[—]	0.3 - 1	Schwellenwert für Reduktion der aktuellen Verdunstung
BETA	[—]	1 - 8	Aufteilung von Regen und Schneeschmelze in GWN oder Bodenfeuchte
PERC	[mm]	0 - 16	Perkulation
UZL	[mm]	0 - 120	Schwellenwert für K0 Abfluss
K0	[—]	0.1 - 0.6	Rezessionskoeffizient für hohe Abflüsse
K1	[—]	0.01 - 0.5	Rezessionskoeffizient für mittlere Abflüsse
K2	[—]	5E-05 - 0.15	Rezessionskoeffizient für Basisabfluss
MAXBAS	[Tage]	1 - 6	Abflustransformation
Cet	[°C ⁻¹]	0 - 0.3	Korrekturfaktor für pot. Evaporation
TCalt	[$\frac{°C}{100m}$]	-2 - 12	Temperaturzunahme mit Höhe
PCalt	[$\frac{\%}{100m}$]	0.1 - 1.7	Niederschlagszunahme mit Höhe
Telev	[m]	800 - 2400	Höhe der Temperaturmessung
Pelev	[m]	800 - 2400	Höhe der Niederschlagsmessung

* beispielhaft dargestellt für das Einzugsgebiet Sitter

5.3. Modellkalibrierung

Das HBV Modell wurde durch den generischen Algorithmus GAP kalibriert. Für jede Kalibrierung wurden jeweils 2000 Modellläufe verwendet. Die in der Methode enthaltene Powell Optimierung zur Suche des lokalen Optimums wurde nicht verwendet, da diese besonders bei schlecht definierten Parametern und auf Plateaus ein Wegdriften der Parameterwerte begünstigt. GAP ist eine globale Methode zur Optimierung der Parameterwerte. Durch Auswahl und Rekombination werden, anhand einer Zielfunktion, bessere Parameterwerte gesucht (Seibert, 2000). Ein innerhalb festgesetzter Grenzen zufällig ausgewählter Parametersatz dient hierbei als Startpunkt (Seibert und Vis, 2012). Die Kalibrierung wurde jeweils 25 mal durchgeführt, um einen Wertebereich der kalibrierten Modellparameter zu erhalten. Als Zielfunktion für die GAP Kalibrierung wurde das Lindström Measure (Gleichung 5.3.1 (Lindström, 1997)) verwendet, welches eine Kombination aus der Nash-Sutcliffe Modellgüte (Nash und Sutcliffe, 1970) und

dem Abfluss-Volumen-Fehler darstellt. Dadurch wird der Empfehlung von Abebe u. a. (2010) gefolgt, wonach das HBV Modell durch eine Kombination mehrerer Zielfunktionen, die unterschiedliche Aspekte der Einzugsgebietsreaktion einbeziehen, kalibriert werden sollte.

$$LM = R_{eff} - 0.1 * VE \quad (5.3.1)$$

wobei

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - Q_{sim}^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (5.3.2)$$

und

$$VE = \frac{|\sum (Q_{obs} - Q_{sim})|}{\sum (Q_{obs})} \quad (5.3.3)$$

mit

Q_{obs} = beobachteter Abfluss

Q_{sim} = modellierter Abfluss

$\overline{Q_{obs}}$ = gemittelter gemessener Abfluss

5.4. Grundlegendes Vorgehen

Das grundlegende Vorgehen entspricht einer Kombination aus der beschriebenen GAP-Kalibrierung und dem generalisierten Split-Sample-Test (GSST) von Coron u. a. (2012). Durch die Verwendung des GSST können alle möglichen Kombinationen der Kalibrierungs- und Validierungszeiträume getestet werden, was zu mehr Ergebnissen und somit zu einer größeren Robustheit dieser Ergebnisse führt. Der zur Verfügung stehende Gesamtzeitraum wurde in Subperioden mit einer Länge von jeweils fünf Jahren unterteilt, die jeweils zur Kalibrierung dienten. Nach jeder Kalibrierung wurden die Subperioden um ein Jahr verschoben (Abbildung 5.4.1). Validiert wurde das Modell, indem mit dem besten Parametersatz der 25 Kalibrierungen einer jeden Subperiode die übrigen, unabhängigen, Subperioden modelliert wurden. Zusätzlich wurde eine Referenzmodellierung (RM) durchgeführt. Der GSST wurde in der Programmiersprache R implementiert, das HBV - Modell wurde folglich über R gesteuert.

Jedes Einzugsgebiet wurde in einem ersten Schritt für den kompletten zur Verfügung stehenden Zeitraum per GAP-Optimierung kalibriert. Dadurch wurden zum einen die Parametergrenzen für jedes Einzugsgebiet individuell festgelegt, zum anderen lieferte

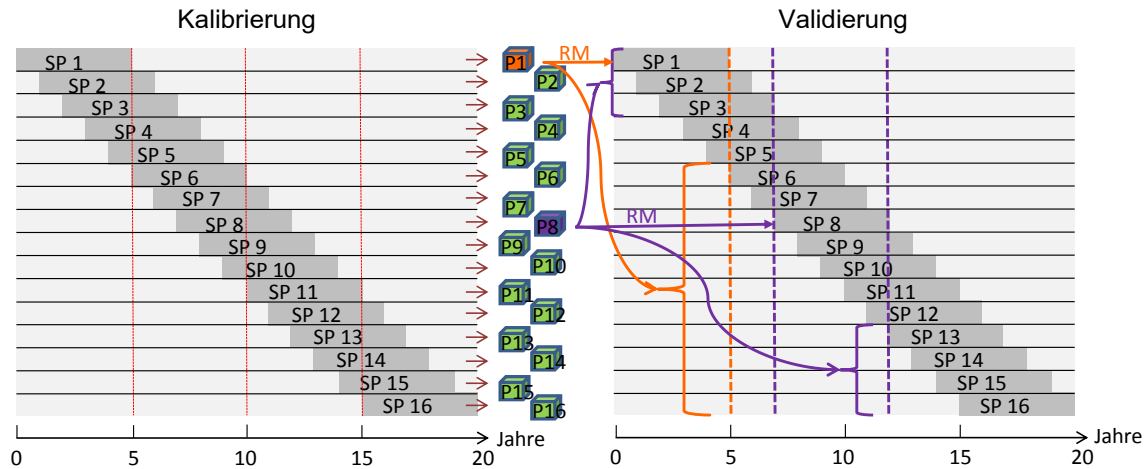


Abbildung 5.4.1.: Konzept des generalisierten Split-Sample-Tests. Für einen Zeitraum von 20 Jahren ergeben sich 16 Subperioden. Die $n+5$. Subperiode ist unabhängig von der n . Subperiode (rote Striche, links). Die erhaltenen Parametersätze dürfen in der Validierung nur auf unabhängige Subperioden angewandt werden (beispielhaft dargestellt an den Parametersätzen P1 und P8, rechts). RM bezeichnet die Referenzmodellierung.

dies Werte für die Parameter $PCALT$, $TCALT$, $Pelev$ und $Telev$, die in den folgenden Modellierungen der einzelnen Subperioden als konstant angenommen wurden. Hierdurch wird verhindert, dass diese Parameter Reaktionen der übrigen Modellparameter auf hydro - klimatische Veränderungen abfangen bzw. verhindern.

Für die Parameter $Pelev$ und $Telev$ könnten auch jeweils die mittleren Einzugsgebiets Höhen verwendet werden, da die Temperatur- und Niederschlagsdaten aus einem rasterbasierten Datensatz stammen. Jedoch kann durch die Kalibrierung dieser Parameter die Niederschlagsmenge angepasst werden. Dies ist durchaus sinnvoll, da die Niederschlagsmenge durch den HYRAS Datensatz für manche Einzugsgebiete unterschätzt wird.

Da in den Alpen die Dynamik der Schneedecke und die hydrologischen Regime am stärksten durch klimatische Veränderungen betroffen sind, wird insbesondere die modellierte Schneebedeckung untersucht.

5.4.1. Modellsetup

Für jedes Einzugsgebiet wurde eine Landnutzungs-kategorie verwendet um die Modellierungen in Abhängigkeit möglichst weniger Parameter durchführen zu können, was die Equifinalität im Modell verringert. Des Weiteren wurden alle Einzugsgebiete in Höhenstufen von jeweils 100 m unterteilt. Eine Aufwärmphase von drei Jahren geht jeder Modellierung voraus. Außerdem wurden die Modellierungen nach dem hydrologischen Jahr der Schweiz durchgeführt, was eine bessere Schließung der Wasserbilanz ermöglicht. Die potentielle Evaporation kann sich in Abhängigkeit der Tagesmitteltemperatur anpassen, da in wärmeren Zeiträumen mit einer größeren Verdunstung zu rechnen ist. 'Distributed SUZ Box Calculations' wurde als Modellstruktur verwendet, außerdem wurde das Basis - Modell verwendet (keine Gletscher, keine Expositionen).

5.5. Vergleich unterschiedlicher Kalibrierungsstrategien

Die Modellperformance unterschiedlicher Kalibrierungsstrategien wurde verglichen. Für Kalibrierungsstrategie I diente der Gesamtzeitraum als Kalibrierungszeitraum. Der Parametersatz für Kalibrierungsstrategie II wurde anhand des rezentesten fünf - Jahreszeitraumes kalibriert.

Für Kalibrierungsstrategie III wurde der Parametersatz jeweils an den fünf Jahren kalibriert, die gerade modelliert werden. Nach fünf Jahren Modelllaufzeit wird der Parametersatz folglich ausgetauscht und ist somit zeit - variierend.

5.6. Berechnung der Klimaabweichungen

Für die Auswertung der Entwicklung der kalibrierten Modellparameter wurden die Abweichungen von Temperatur und Niederschlag der Subperioden vom jeweiligen Gesamtzeitraum durch Gleichungen 5.6.1 und 5.6.2 berechnet.

$$\Delta T_{Subperiode} = \overline{T}_{Subperiode} [^{\circ}C] - \overline{T}_{Gesamtzeitraum} [^{\circ}C] \quad (5.6.1)$$

$$\Delta P_{Subperiode} = \left(\frac{\overline{P}_{Subperiode} [mm]}{\overline{P}_{Gesamtzeitraum} [mm]} - 1 \right) * 100 [\%] \quad (5.6.2)$$

Die Klimaabweichungen für die Auswertung der Validierungsergebnisse wurden dem entsprechend berechnet (Gleichung 5.6.3 und 5.6.4).

$$\Delta T_{Validierungszeitraum} = \bar{T}_{Validierungszeitraum}[^{\circ}C] - \bar{T}_{Referenzzeitraum}[^{\circ}C] \quad (5.6.3)$$

$$\Delta P_{Validierungszeitraum} = \left(\frac{\bar{P}_{Validierungszeitraum}[mm]}{\bar{P}_{Referenzzeitraum}[mm]} - 1 \right) * 100[\%] \quad (5.6.4)$$

5.7. Vergleich Referenz- und Validierungszeitraum

Der Verlust der Modellperformance (ΔPM) zwischen Referenz- und Validierungszeitraum wurde wie folgt berechnet (Gleichung 5.7.1).

$$\Delta PM = PM_{Validierung} - PM_{Referenz}[-] \quad (5.7.1)$$

wobei sich $PM_{Validierung}$ und $PM_{Referenz}$ jeweils auf den gleichen Modellierungszeitraum beziehen, der eben mit unterschiedlichen Parametersätzen modelliert wurde. Beispielsweise wurde der Zeitraum 1960-1965 mit den für diesen Zeitraum kalibrierten Parametern modelliert (Referenz) sowie mit den für die übrigen Zeiträume kalibrierten Parametern modelliert (jeweils Validierung).

Die Unterschiede weiterer Modelloutputs (ΔMO) wurden nach Gleichung 5.7.2 berechnet, die somit jeweils in Bezug zur Referenzmodellierung stehen. Ein solcher Unterschied im Modelloutput kann beispielsweise die modellierten Schneebedeckung im Einzugsgebiet sein.

$$\Delta MO = \left(\frac{MO_{Validierung}}{MO_{Referenz}} - 1 \right) * 100[\%] \quad (5.7.2)$$

Die Differenz innerhalb der Parameterwerte (ΔP) zwischen Validierungszeitraum und Kalibrierungszeitraum wurde durch Gleichung 5.7.3 berechnet.

$$\Delta P = P_{Validierung} - P_{Referenz} \quad (5.7.3)$$

5.8. Erstellung der Performance Plots

Der Performance Verlust (ΔPM) zwischen Validierungs- und Kalibrierungszeitraum wurde gegen

(i) den Zeitversatz zwischen Validierungs- und Kalibrierungszeitraum,

- (ii) die Abweichungen in den klimatischen Bedingungen und
- (iii) die Unterschiede im Modelloutput (ΔMO)

zwischen Validierung und Kalibrierung aufgetragen.

Die Datenpunkte wurden farblich nach dem Zeitversatz zwischen Validierungs- und Kalibrierungszeitraum codiert, sodass sie in den einzelnen Grafiken besser nachzuverfolgen sind.

Mit der `loess()` Funktion wurde eine geglättete Kurve durch die erhaltenen Datenpunkte gelegt. Die Histogramme geben die Häufigkeit der Modellierungen im jeweiligen Abschnitt wieder. Die Referenzmodellierungen (RM) sind in Schwarz dargestellt. In die Berechnung der `loess()` Kurve, sowie in die Berechnung der Histogramme gehen die Referenzmodellierungen nicht ein.

5.9. Berechnung der Abflussfehler

Für die Berechnung der Abflussfehler wurden die folgenden Abflussquantile des modellierten und beobachteten Abflusses berechnet:

Q_{95} , d.h. der Abfluss, der zu 95% der Zeit überschritten wird

Q_{50} , d.h. der Abfluss, der zu 50% der Zeit überschritten wird

Q_{05} , d.h. der Abfluss, der zu 05% der Zeit überschritten wird

Die Abweichungen der jeweiligen Abflussquantile wurden durch Gleichung 5.9.1 berechnet.

$$\Delta Q_{quantil} = \frac{Q_{quantil,modelliert} - Q_{quantil,gemessen}}{Q_{quantil,gemessen}} * 100[\%] \quad (5.9.1)$$

Durch die `loess()` Funktion in R wurde eine geglättete Kurve der erhaltenen Datenpunkte erstellt. Auch für die Abbildungen zum Abflussfehler wurden Histogramme erstellt. Diese können zur Beurteilung der Robustheit der `loess()` Kurve verwendet werden.

5.10. Erstellung der Regime Plots

Um die Entwicklung der hydrologischen Regime der Untersuchungsgebiete darzustellen, wurden die Abflussdaten des zur Verfügung stehenden Gesamtzeitraumes jedes Untersuchungsgebietes in drei gleich lange Abschnitte aufgeteilt und die Monatsmittelwerte jedes Abschnittes gebildet. Dies wurde mit den gemessenen Abflussdaten und

mit den modellierten Abflussdaten der Kalibrierungsstrategien I - III durchgeführt. Dadurch kann beurteilt werden, ob das Modell die Entwicklung der hydrologischen Regime durch die jeweilige Kalibrierungsstrategie wiedergeben kann.

6. Ergebnisse

6.1. Anhand des Gesamtzeitraumes kalibrierte Parameter

Eine Übersicht über die anhand des Gesamtzeitraumes kalibrierten Parameter $Pelev$, $Telev$, $Pcalt$, $Tcalt$ ist in Tabelle A.1.1 gegeben. Auffallend ist der sehr niedrige Wert für $Pelev$ im *Dischma* Einzugsgebiet (338 m Differenz zur mittleren Einzugsgebietshöhe). Dies ist durch die starke Unterschätzung der Niederschlagsmenge in diesem Einzugsgebiet verursacht. Das Modell erhöht die Wassermenge, da der Niederschlag mit der Höhe zunimmt.

Tabelle 6.1.1.: Anhand des jeweiligen Gesamtzeitraumes kalibrierte Parameter der Einzugsgebiete.

<i>EZG</i>	<i>mittlere EZG Höhe [m]</i>	<i>Pelev [m]</i>	<i>Telev [m]</i>	<i>Pcalt [$\frac{\%}{100m}$]</i>	<i>Tcalt [$\frac{^{\circ}C}{100m}$]</i>
Allenbach	1856	1948.845	1763.676	3.954374	0.5103604
Dischma	2372	2033.516	2376.815	7.27329	1.034362
Murg	650	705.5896	653.4923	13.58557	1.356602
Ova da Cluozza	2368	2173.513	2439.723	9.136	0.9070678
Sitter	1252	1162.464	1286.577	8.432222	0.5017749

6.2. Vergleich der Modellperformance unterschiedlicher Kalibrierungsstrategien

Kalibriert wurden die Modelle in Tabelle 6.2.1 für die Fälle (a) und (b) am Gesamtzeitraum (Kalibrierungsstrategie I), für den Fall (c) anhand der jeweils rezentesten Subperiode (Kalibrierungsstrategie II) und für den Fall (d) anhand eines variierenden Parametersatzes innerhalb der GSST Struktur (Kalibrierungsstrategie III). Für die Fälle (c) und (d) wurden jeweils die kalibrierten Werte für $Pelev$ und $Telev$ als konstant angenommen. Die angegebene Modellperformance bezieht sich auf den Ge-

samtzeitraum.

Durch zeit - variierende Parametersätze konnten die besten Performance - Werte erreicht werden. Die Verbesserung gegenüber der Modellierung mit über den Gesamtzeitraum kalibrierten Parametern ist jedoch gering; sie beträgt im Mittel 0.02 Punkte im Lindström Measure, was 2.3 % entspricht. Die Modellierung mit dem an *einem* fünf Jahreszeitraum kalibrierten Parametersatz führte zu den jeweils schlechtesten Ergebnissen. Durch die Kalibrierung von *Pelev* und *Telev* konnte die Modellperformance im Vergleich zur Modellierung mit der Annahme, dass *Pelev* und *Telev* der mittleren Einzugsgebietshöhe entsprechen, für drei der fünf Untersuchungsgebiete verbessert werden.

Die beiden nivalen Einzugsgebiete *Dischma* und *Ova da Cluoza* erreichten aufgrund der mit ihrer Höhe verbundenen ausgeprägten Saisonalität die höchsten Performance - Werte (vgl. auch Seeger (2013)). Im Jahr 2000 führte im *Dischma* Einzugsgebiet sehr viel Niederschlag zu relativ wenig Abfluss (vgl. A.5.1), was sich in der Modellierung durch schlechte Zielfunktionswerte der dieses Jahr beinhaltenden Subperioden bemerkbar machte. Daher wurden die betroffenen Subperioden (1996-2001) nicht zur Auswertung verwendet. Das Einzugsgebiet *Sitter*, für das Analogtage vor 1951 verwendet wurden, erreichte eine schlechte Modellperformance. Der Grund hierfür sind sehr schlechte Performance - Werte im Zeitraum 1914-1951. Für die Auswertung der Ergebnisse im *Sitter* Einzugsgebiet wurden daher nur Modellierungen ab 1951 verwendet.

Tabelle 6.2.1.: Darstellung der Modelleffizienz. (a) mittlere EZG Höhe als *Pelev* und *Telev*, (b) Kalibrierung von *Pelev* und *Telev*, (c) Modellierung mit an einem fünf Jahreszeitraum kalibrierten Parametersatz sowie mit (d) zeitvariierendem Parametersatz. Modellierungszeitraum Sitter*: 1914-2006, Modellierungszeitraum Sitter: 1951-2006

<i>EZG</i>	Kalibrierung am Gesamtzeitraum		Kalibrierung an Subperioden	
	(a)	(b)	(c)	(d)
Allenbach	0.808	0.806	0.778	0.834
Dischma	0.866	0.888	0.876	0.908
Murg	0.836	0.846	0.811	0.867
Ova da Cluoza	0.864	0.873	0.868	0.891
Sitter*	0.640	0.638	0.621	0.675
Sitter	0.777	0.778	0.750	0.789

6.3. Einzugsgebietsspezifische Betrachtung

In diesem Kapitel wird für alle Einzugsgebiete getrennt auf die kalibrierten Modellparameter, die Performance - Verluste, die Abflussfehler sowie auf die Entwicklung der hydrologischen Regime eingegangen.

Die Abbildungen zu den kalibrierten Modellparameterwerten zeigen dabei die jeweils 25 kalibrierten Parameter einer jeden Subperiode als Boxplots. Der dunkelrote Punkt zeigt den Parametersatz mit der höchsten Modellperformance, der später für die Validierung genutzt wurde.

Der zeitliche Verlauf der kalibrierten Modellparameter ist im Anhang (Abbildungen A.3.1 bis A.3.5) aufgeführt.

Die Zusammenhänge der Modellparameter mit den Mittelwerten der Sommer- und Winterniederschläge und -temperaturen, sowie mit der Varianz der fünf- Jahresmittel der Subperioden wurden überprüft, dabei konnten jedoch keine deutlicheren Abhängigkeiten als mit dem Mittelwert der Subperioden festgestellt werden.

Auffallend ist in jedem Einzugsgebiet ein Abfallen der Modellperformance beim Verlassen des Kalibrierungszeitraumes.

Der Performance - Verlust der Validierungszeiträume beträgt über alle Einzugsgebiete gemittelt -0.043 Punkte im Lindström Measure, beziehungsweise -5.8 %.

Die Performance - Werte und die Performance - Verluste sind jeweils als Absolutwerten im Lindström Measure angegeben.

6.3.1. Allenbach

Kalibrierung

Modelleffizienz Die jeweils besten Performance - Werte der 25 Kalibrierungen bewegen sich zwischen 0.728 und 0.901. Tiefere Temperaturen führen, wie auch höhere Niederschlagsmengen, im Mittel zu einer besseren Modellperformance.

Schneeroutine Der Parameter TT nimmt im Mittel mit zunehmenden Temperaturen etwas höhere Werte ein. Die höchsten TT Werte wurden jedoch für relativ kühle Zeiträume kalibriert. Daher kann die Temperatur die kalibrierten TT Werte nicht eindeutig erklären. Höhere Temperaturen führen im Mittel auch zu etwas höheren $SFCF$ Werten.

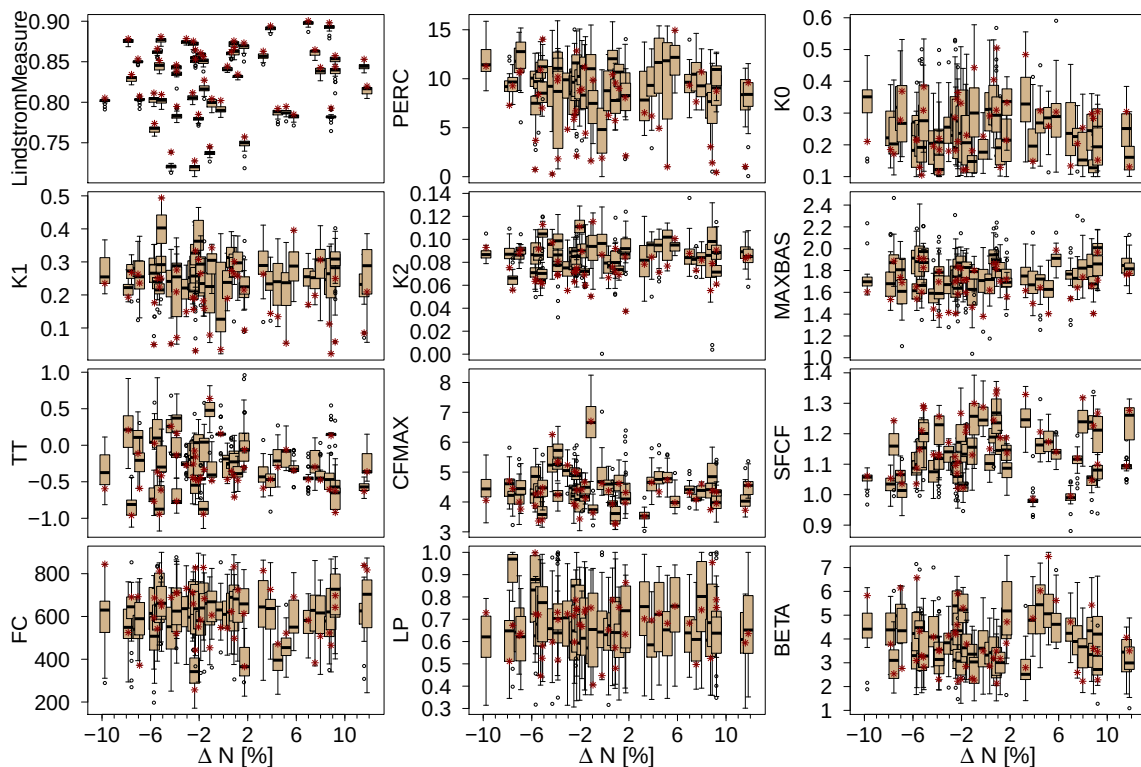


Abbildung 6.3.1.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Allenbach*, sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum

Bodenroutine Für *FC* wurden in warmen Zeiträumen eher niedrigere Werte kalibriert. In warmen Subperioden werden zudem die *Beta* - Werte im Mittel etwas höher.

Routing Routine und response function Der Parameter *K0* nimmt in wärmeren Subperioden tendenziell höhere Werte an als in kalten Zeiträumen, der Niederschlag hat auf *K0* wenig Einfluss. Höhere Temperaturen führen auch zu etwas höheren *K1* Werten

Validierung

Performance Verlust Mit zunehmendem zeitlichen Abstand zwischen Referenzmodellierung und Validierung ist ein größer werdender Performance Verlust zu beobachten. Im Mittel beträgt dieser Performance - Verlust -0.069 und kann in Einzelfällen -0.352 Punkte betragen. Sehr große Verluste in der Modellperformance sind jedoch auch mit geringem zeitlichem Abstand möglich.

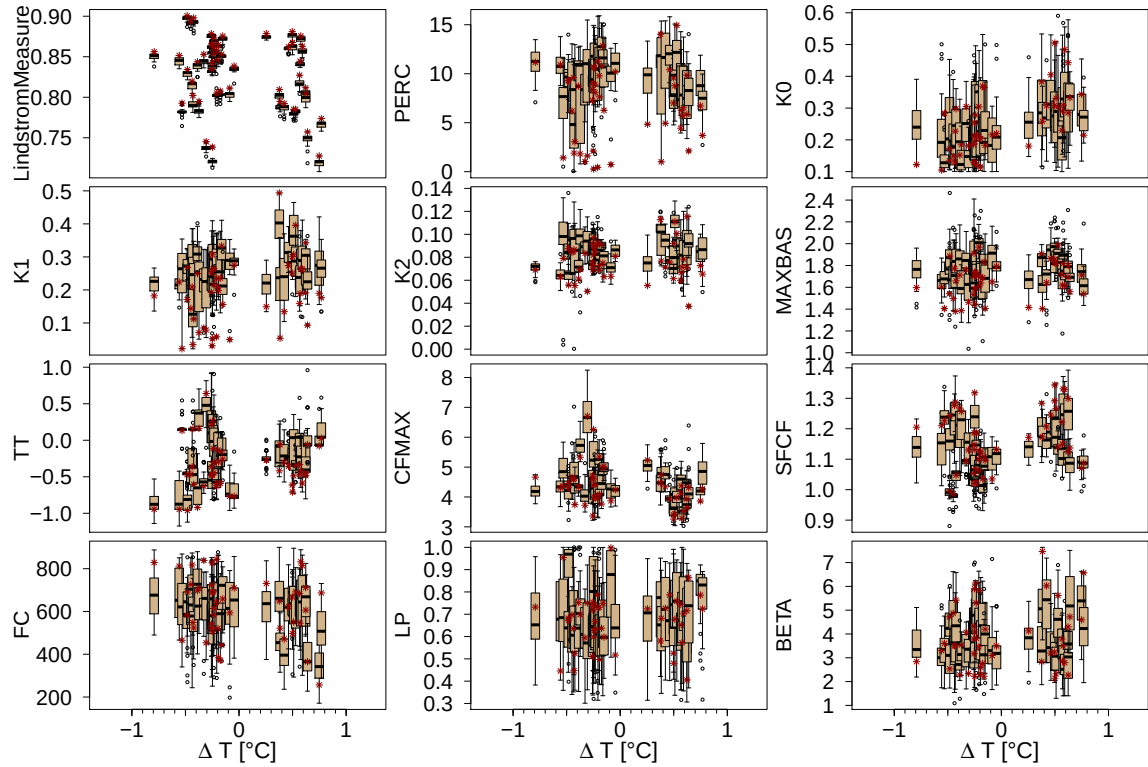


Abbildung 6.3.2.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Allenbach*, sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum

Die Niederschlagsanomalie zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum hat auf den Performance Verlust keinerlei Einfluss. Validierungszeiträume mit einem positiven Zeitversatz zum Referenzzeitraum (d.h. der Validierungszeitraum liegt näher an der Gegenwart als der Referenzzeitraum, rote Punkte) weisen eine positive Temperaturabweichung auf. Ein klarer Zusammenhang zwischen Temperaturabweichung und Modellperformance ist jedoch nicht zu erkennen. Sehr große Performance - Verluste sind vor allem bei geringer Temperaturabweichung modelliert worden.

Eine deutlicher Zusammenhang zwischen dem Verlust an Modellperformance und dem Unterschied in der modellierten Schneebedeckung, beziehungsweise im Anteil des Schnees am Gesamtabfluss, zwischen Referenzmodellierung und Validierung ist zu beobachten. Über- oder unterschätzt das Modell die Schneebedeckung im Einzugsgebiet in Bezug zum Referenzzeitraum, ist ein deutlicher Performance - Verlust die Folge. Dabei ist der Performance - Verlust größer, wenn das Modell die Schneebedeckung im Validierungszeitraum überschätzt. Dies hängt vermutlich mit der verwendeten Zielfunktion zusammen, die sensibler auf hohe Abflüsse reagiert. Hervorgerufen wird diese

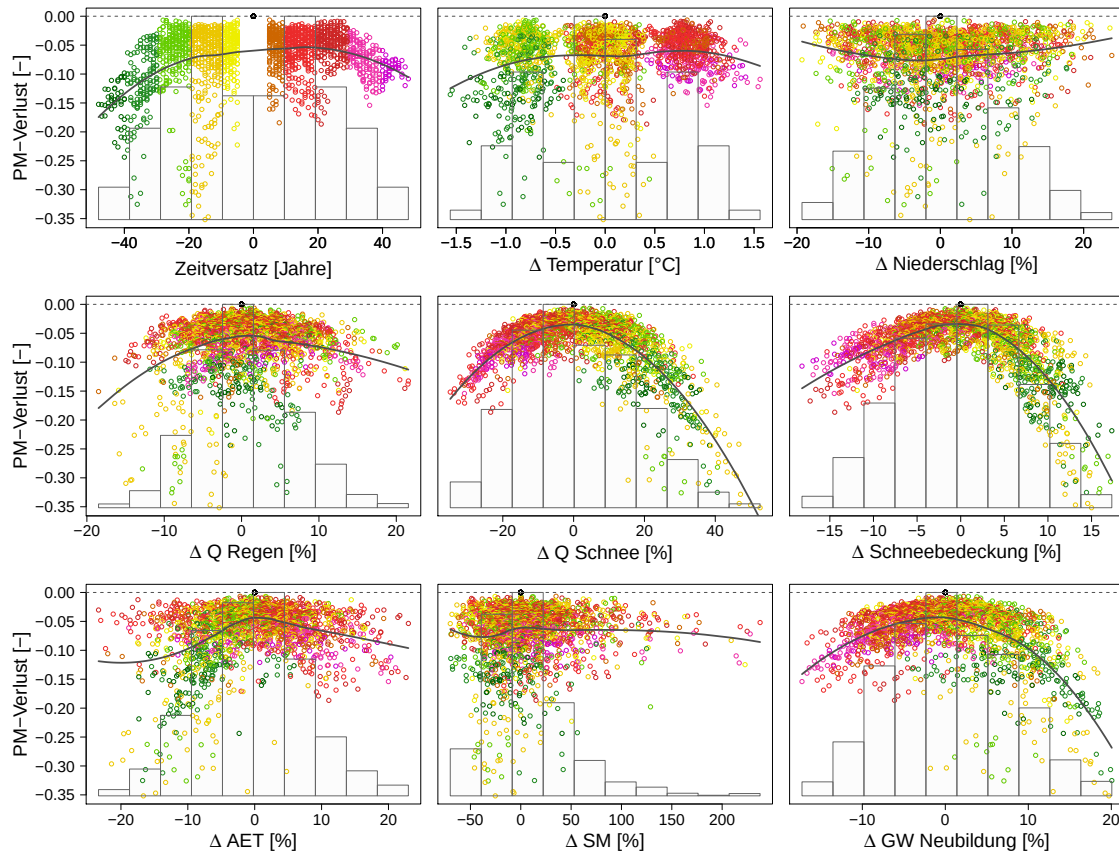


Abbildung 6.3.3.: Performance (PM) Verlust (Absolutwerte im Lindström Measure) der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen im Einzugsgebiet *Allenbach*. Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlagsabweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen

Überschätzung der Schneebedeckung durch Modelle, die hohe TT Werte verbunden mit hohen $SFCF$ Werten (d.h. in diesen Modellen fällt viel Schnee, und die Schneemenge wird stark nach oben korrigiert) auf Zeiträume anwenden, für die niedrige TT und niedrige $SFCF$ Werte (d.h. es fällt wenig Schnee und die Schneemenge wird nur gering nach oben korrigiert) kalibriert wurden.

Die Modellstabilität im *Allenbach* Einzugsgebiet wird daher vor allem dem Zusammenspiel der Parameter TT und $SFCF$ zugeschrieben (vgl. Abbildung 6.3.4). Ist die Abweichung im Parameterwert in Abbildung 6.3.4 positiv, so ist der Parameterwert, der für die Modellierung genutzt wurde, höher als der für diesen Zeitraum eigentlich kalibrierte Parameterwert. Ein interessantes Ergebnis ist, dass ein zu hoher TT Wert verbunden mit einem zu niedrigen $SFCF$ Wert nicht zu großen Performance - Verlusten

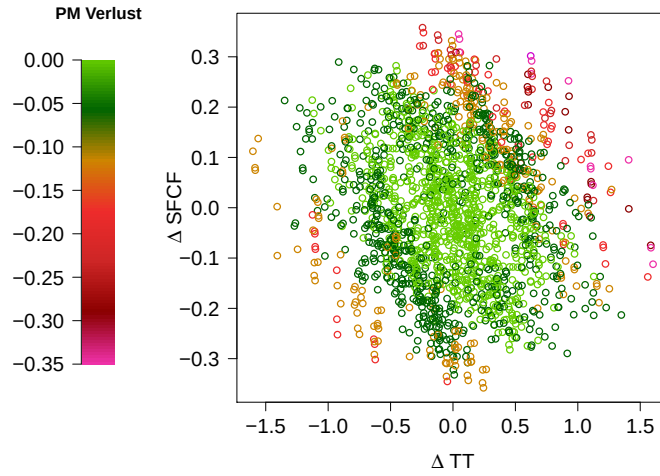


Abbildung 6.3.4.: Einfluss der Differenz innerhalb der Parameterwerte von TT und $SFCF$ zwischen Validierungs- und Kalibrierungszeitraum auf den Performance - Verlust im Einzugsgebiet *Allenbach*

führt, sofern einer der beiden Werte nicht extrem abweicht.

Abflussfehler Q_{50} wird durch das Modell generell zu hoch eingeschätzt (Abbildung 6.3.6). Mit zunehmend positiver Temperaturabweichung zwischen Referenz- und Validierungszeitraum (kalt nach warm Parametertransfer) werden hohe Abflüsse (Q_{05}) durch das Modell unterschätzt, bei negativer Temperaturabweichung (warm zu kalt Transfer) werden diese überschätzt. Niedrige Abflüsse (Q_{95}) verhalten sich genau umgekehrt. Das bedeutet ein für kältere (wärmere) Zeiträume kalibriertes Modell führt eher zu einer Unterschätzung (Überschätzung) von Q_{05} und zu einer Überschätzung (Unterschätzung) von Q_{95} , Q_{50} und Q_{Gesamt} . Die Niederschlagsmenge hat nur sehr geringen Einfluss auf die Abflussanteile.

Modelle, die zu einer Überschätzung der Schneebedeckung im Einzugsgebiet führen, führen auch zu einer Überschätzung des Q_{05} Quantils und gleichzeitig zu einer Unterschätzung der übrigen Abflussanteile sowie des Gesamtabflusses. Diese Modelle sind meist in kälteren Zeiträumen kalibriert worden (vgl. Abbildung 6.3.4). Überschätzt das Modell die Grundwasserneubildung, überschätzt es Q_{05} , Q_{50} und Q_{Gesamt} .

Entwicklung des hydrologischen Regimes Die Entwicklung der hydrologischen Regime ist in Abbildung 6.3.6 dargestellt. In den Messdaten ist eine Erhöhung des Peaks im Mai und eine Absenkung des Abflusses in den übrigen Sommermonaten mit zuneh-

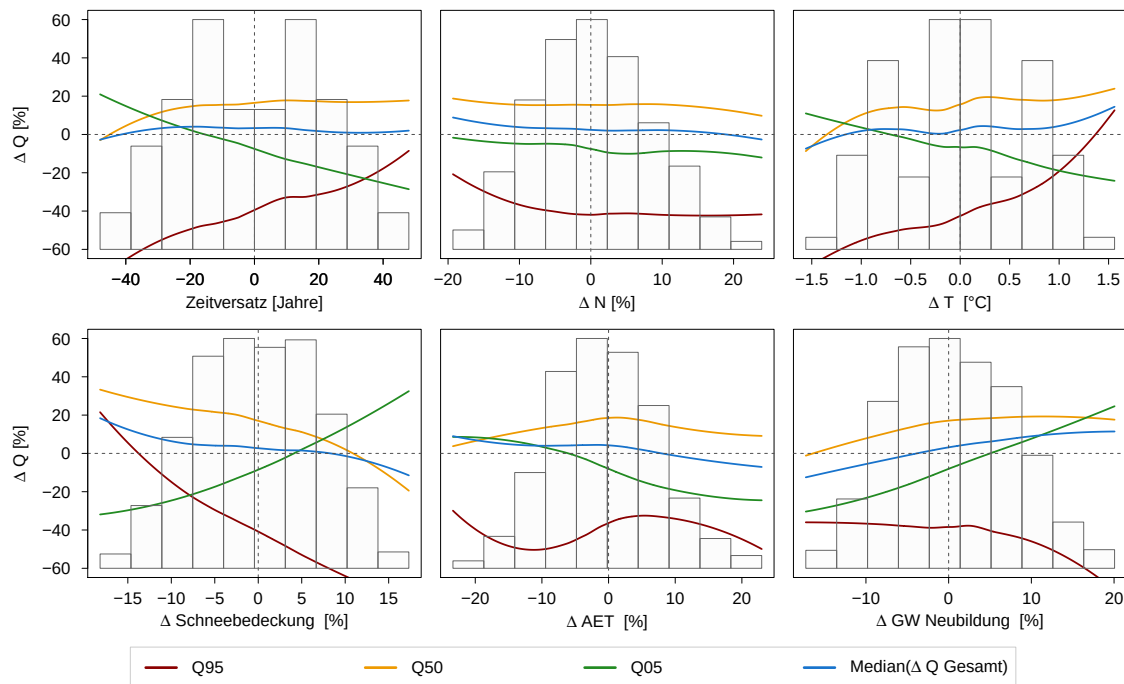


Abbildung 6.3.5.: Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Abfluss (ΔQ) in Bezug zu Zeitversatz, Temperatur- und Niederschlagsabweichung sowie Abweichungen weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen im Einzugsgebiet *Allenbach*

mend rezenten Jahren zu erkennen. Diese Entwicklung wird am besten durch die zeit - variierenden Parameter (Q GSST) wiedergegeben. Das schlechteste Ergebnis wird erreicht, wenn das Modell an der rezentesten fünf Jahresperiode kalibriert wird (Q SP). Das Modell führt, je weiter es in die Vergangenheit angewendet wird, zu einer zunehmenden Überschätzung des Abflusspeaks im Mai und Juni. Dieses Ergebnis steht gut mit den übrigen Ergebnissen in Einklang (Schneebedeckung wird überschätzt, hohe Abflüsse werden überschätzt), da in diesen Monaten vor allem Schneeschmelzereignisse zu großen Abflüssen führen. In den rezentesten 18 Jahren unterschätzt dieses Modell den Abfluss im Frühjahr.

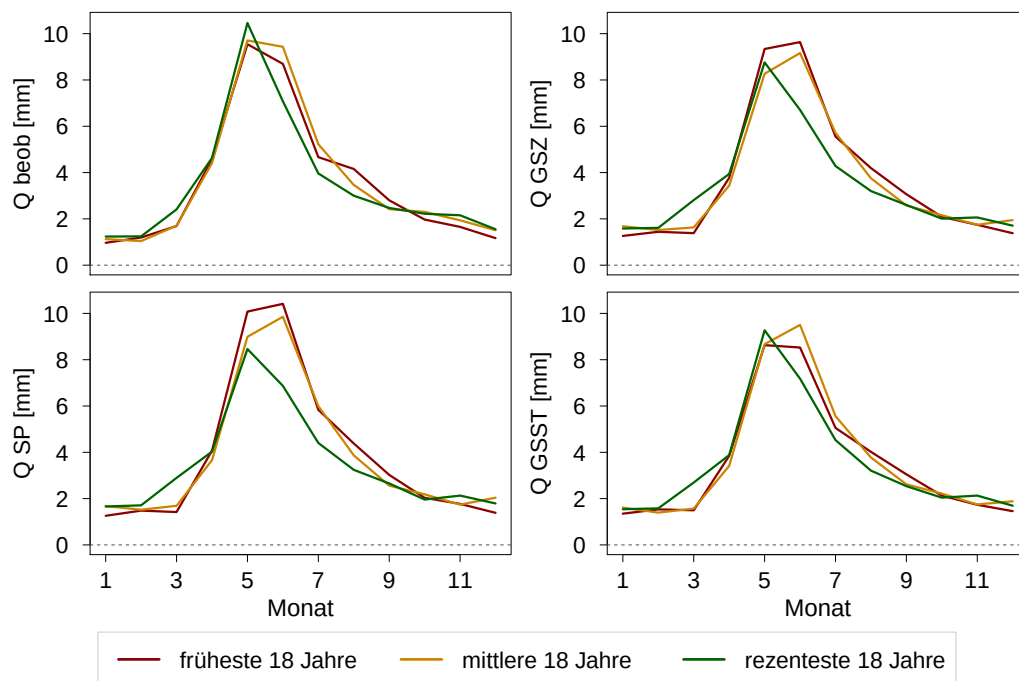


Abbildung 6.3.6.: Entwicklung des hydrologischen Regimes über den Untersuchungszeitraum für den gemessenen und den durch unterschiedliche Kalibrierungsstrategien modellierten Abfluss im Einzugsgebiet *Allenbach*

6.3.2. Dischma

Kalibrierung

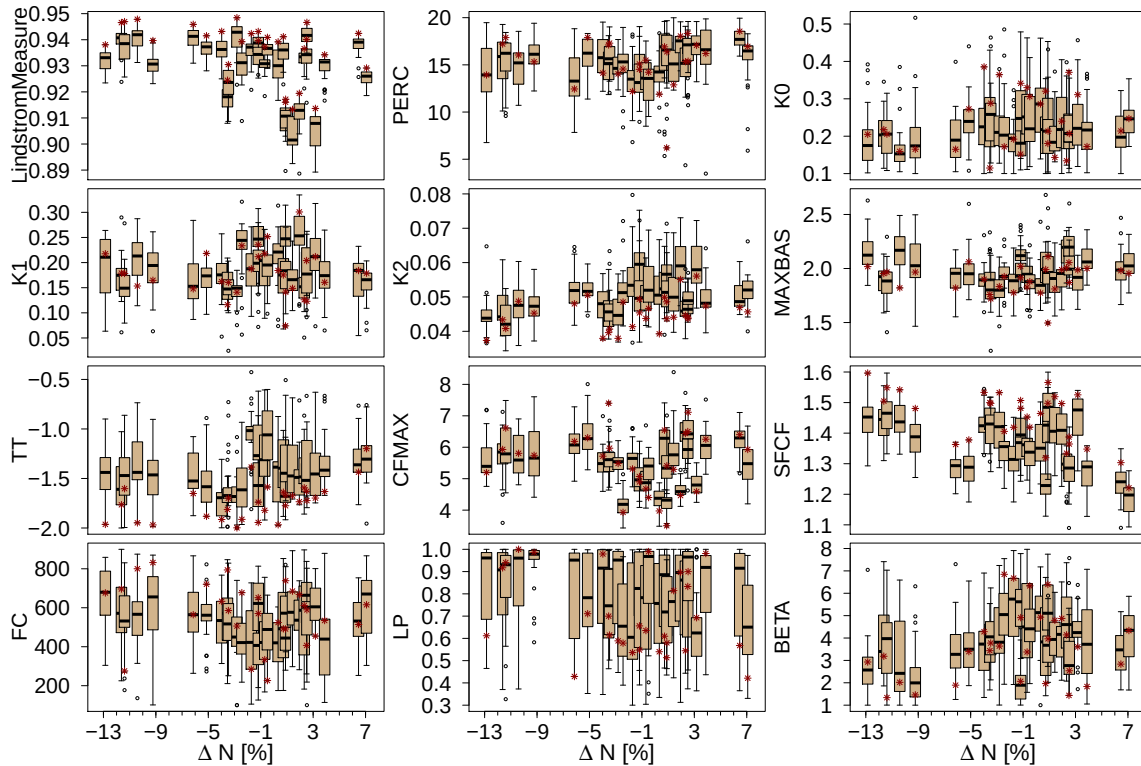


Abbildung 6.3.7.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Dischma*, sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum

Modelleffizienz Im *Dischma* Einzugsgebiet werden generell sehr hohe Zielfunktionswerte erreicht. Die Modellperformance schwankt zwischen 0.914 und 0.949. Der Einfluss des Niederschlages, wie auch der der Temperatur, ist nicht eindeutig. Bei sehr geringen Temperaturen wurden jedoch etwas schlechtere Performance - Werte erreicht.

Schneeroutine Generell versucht das Modell durch sehr hohe *SFCF* Werte die zu geringen Niederschlagsmengen auszugleichen. Mit zunehmenden Temperaturen und mit zunehmenden Niederschlägen werden die Parameterwerte für *SFCF* geringer. Auch im zeitlichen Verlauf ist eine abfallende Tendenz dieses Parameters zu beobachten (Abbildung A.3.2). In den jüngeren Jahren werden die Niederschlagsmengen im *Dischma* Einzugsgebiet größer, die Abflussmengen dagegen geringer (siehe Abbildung A.4.2).

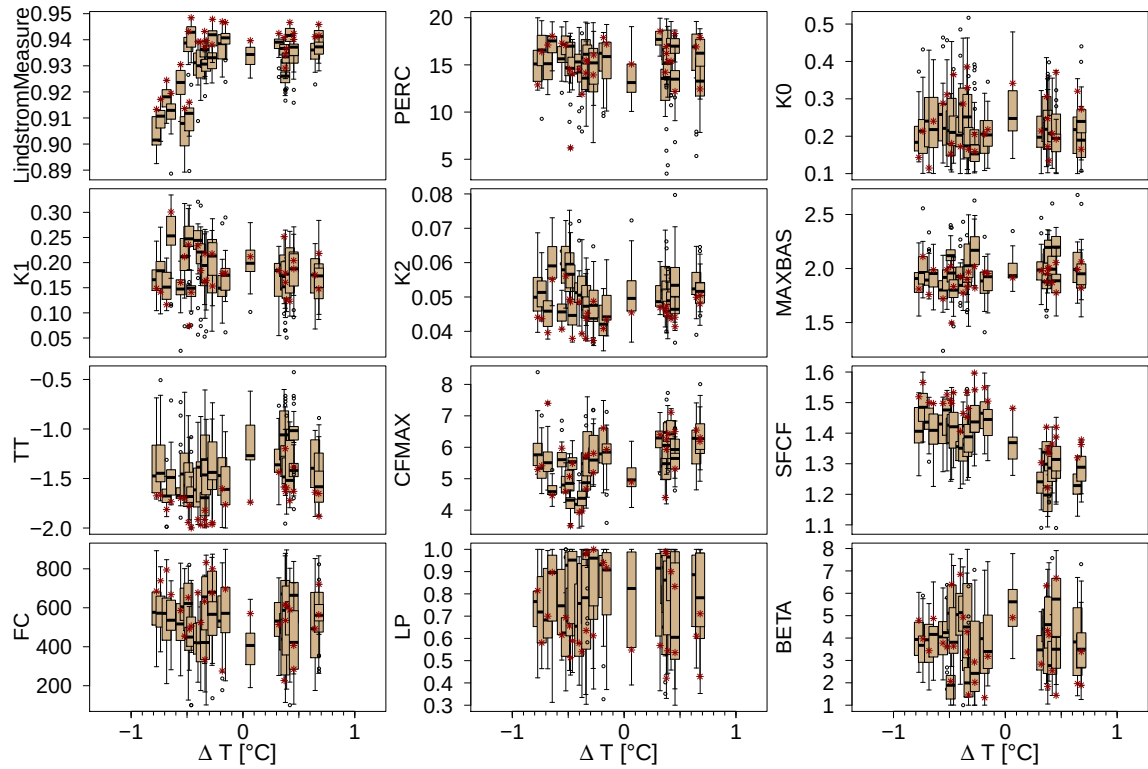


Abbildung 6.3.8.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Dischma*, sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum

Dies bedeutet, dass die Niederschlagsmenge, die ohnehin unterschätzt wird, immer weniger nach oben korrigiert werden muss.

Für den Parameter *CFMAX* wurden für höhere Temperaturen höhere Werte kalibriert, wodurch die Schneeschmelze erhöht wird.

Weder die Parameter die **Bodenroutine**, noch die Parameter der **Routing Routine und response function** zeigen Sensitivitäten auf Niederschlagsänderungen oder Temperaturänderungen.

Validierung

Performance Verlust Der Performance Verlust im *Dischma* Einzugsgebiet beträgt im Mittel -0.026 bei einem Maximalwert von -0.094.

Am stärksten ist der Verlust der Modellperformance mit der Abweichung der Grundwasserneubildung zwischen Referenz- und Validierungszeitraum verbunden (Abbildung 6.3.4). Modelle, bei denen der Kalibrierungszeitraum kälter als der Validierungszeit-

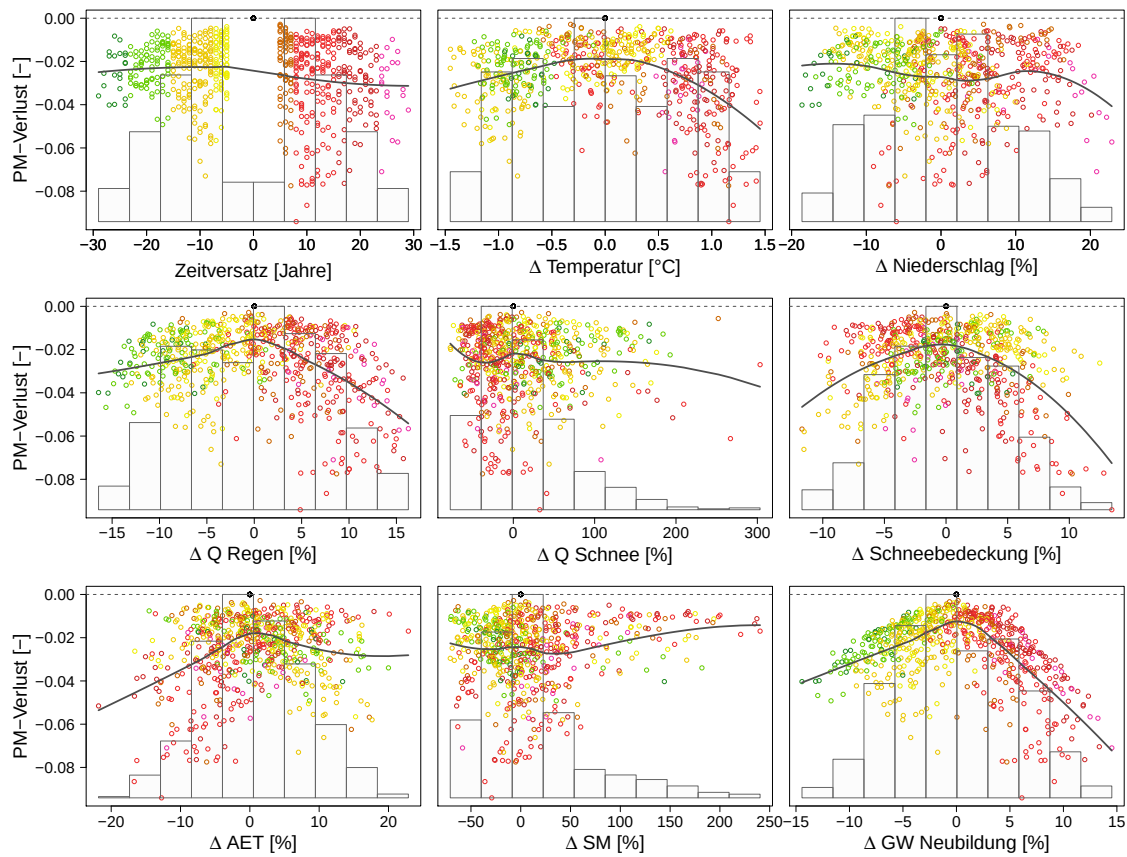


Abbildung 6.3.9.: Performance (PM) Verlust (Absolutwerte im Lindström Measure) der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen im Einzugsgebiet *Dischma*. Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlagsabweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen

raum ist, haben in der Regel höhere *SFCF* Werte. Dadurch wird die Niederschlagsmenge nach oben korrigiert, was in diesen Modellen zu einer Überschätzung der Grundwasserneubildung in Relation zur Referenzmodellierung führt. Des Weiteren hat eine Überschätzung der Grundwasserneubildung einen größeren Performance - Verlust zur Folge als eine Unterschätzung der Grundwasserneubildung. Grund hierfür ist vermutlich die gewählte Zielfunktion, die sensibler auf hohe Abflüsse reagiert. Die Abweichung der Grundwasserneubildung kann den Performance - Verlust jedoch nicht eindeutig erklären. Der Parameter *CFMAX* hat ebenfalls Einfluss auf den Performance Verlust, wodurch der Verlust an Modellperformance im *Dischma* Einzugsgebiet dem Zusammenspiel der Parameter *CFMAX* und *SFCF* zugeschrieben werden kann (vgl. Abbildung 6.3.10).

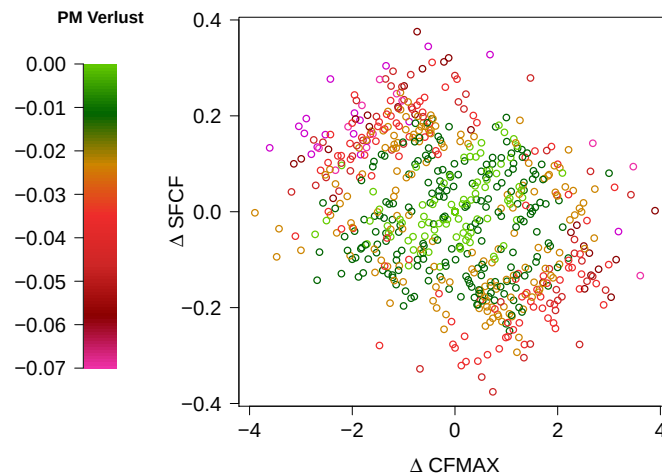


Abbildung 6.3.10.: Einfluss der Differenz innerhalb der Parameterwerte von *CFMAX* und *SFCF* zwischen Validierungs- und Kalibrierungszeitraum auf den Performance - Verlust im Einzugsgebiet *Dischma*

Abflussfehler Die Entwicklung der Abflussfehler ist konsistent mit den übrigen Ergebnissen im *Dischma* Einzugsgebiet. Ist der Anwendungszeitraum der Modelle zeitlich gesehen nach dem Kalibrierungszeitraum, überschätzt das Modell alle Abflussanteile, da durch die höheren *SFCF* Werte mehr Wasser erzeugt wird (Abbildung 6.3.11). Gegen die Abweichung in der Grundwasserneubildung aufgetragen ist diese Entwicklung noch deutlicher.

Entwicklung des hydrologischen Regimes Weder der am Gesamtzeitraum kalibrierten Parametersatz, noch der an der rezentesten Subperiode kalibrierte Parametersatz kann den Rückgang des Abflusses in den Monaten Juli und August in den rezentesten 12 Jahren simulieren. Der zeit-variiierende Ansatz nähert sich den beobachteten Daten in diesen Monaten wesentlich besser an. Eventuell ist dies die Auswirkung der früheren Schneeschmelze in den wärmeren Jahren, die aufgrund der höheren *CFMAX* Werte nur durch den zeit - variiierenden Parametersatz wiedergegeben werden kann (für die rezenteste Subperiode wurde ein moderater *CFMAX* Wert kalibriert). Der dem Abfluss QSP zugrundeliegende Parametersatz weist zudem einen hohen *TT* Wert auf, was zu mehr Schneefall und zu einer späteren Schneeschmelze führt.

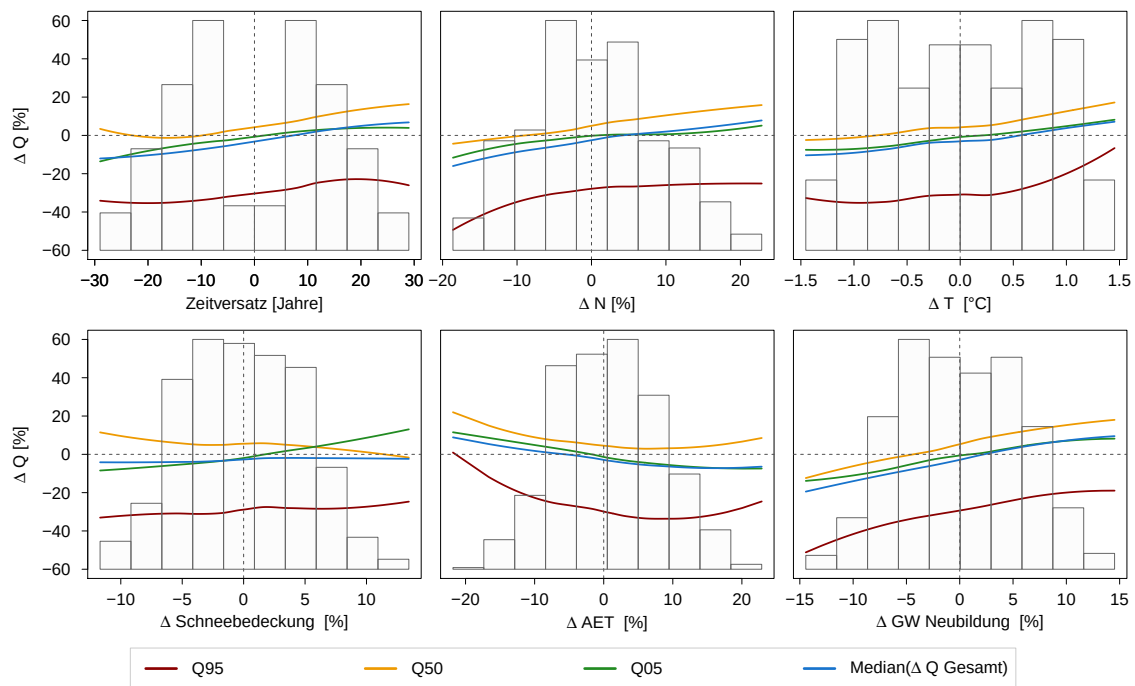


Abbildung 6.3.11.: Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Abfluss (ΔQ) in Bezug zu Zeitversatz, Temperatur- und Niederschlagsabweichung sowie Abweichungen weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen

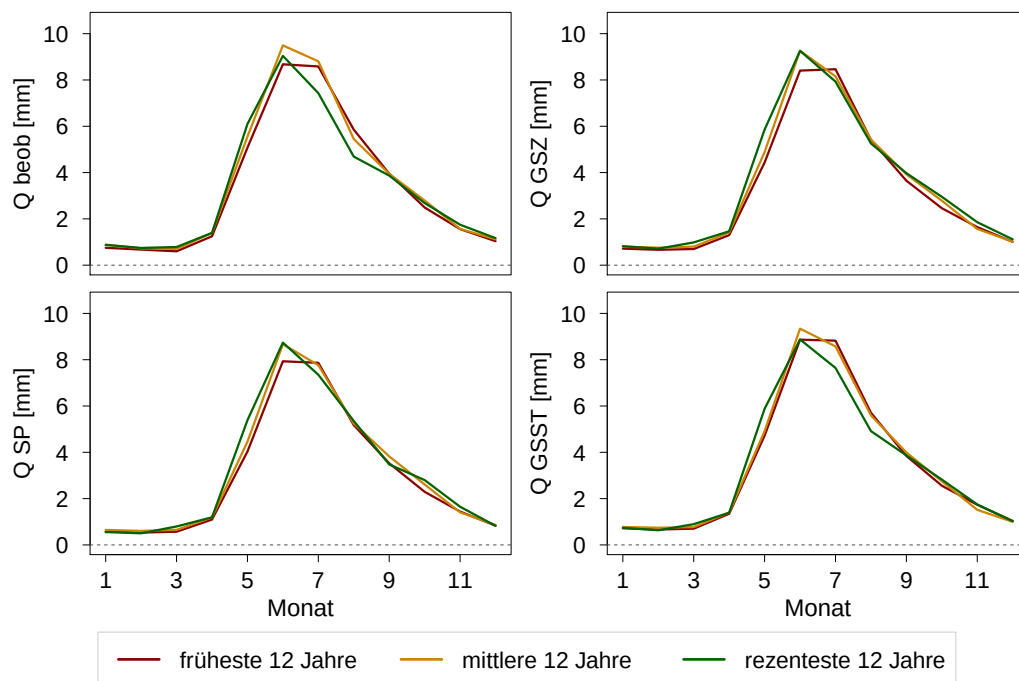


Abbildung 6.3.12.: Entwicklung des hydrologischen Regimes über den Untersuchungszeitraum für den gemessenen und den durch unterschiedliche Kalibrierungsstrategien modellierten Abfluss im Einzugsgebiet *Dischma*

6.3.3. Murg

Kalibrierung

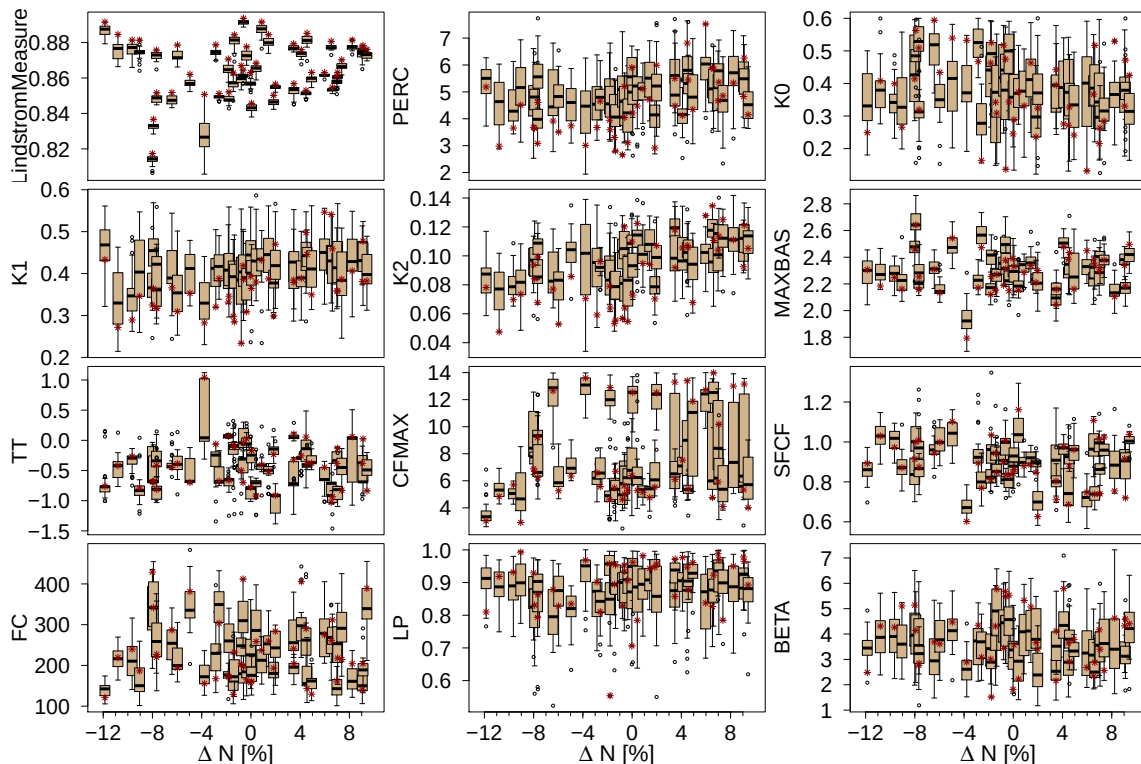


Abbildung 6.3.13.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Murg*, sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum

Modellperformance Die Spannweite der Performance - Werte der Subperioden liegt zwischen 0.818 und 0.894, wobei die höchsten Performance - Werte bei tiefen Temperaturen erreicht wurden. In nassen Subperioden wurden keine schlechten Performance - Werte kalibriert.

Schneeroutine Der Parameter *TT* unterliegt weder einem Trend mit dem Niederschlag noch mit der Temperatur. Die *TT* - Werte für die Subperioden mit dem Beginn 01.10. 1997 - 01.10.2001 (insbesondere die rezenteste Subperiode dem Beginn 01.10.2001, vgl. Abbildung A.3.3 im Anhang), die das heiße und trockene Jahr 2003 enthalten, sind vergleichsweise hoch. In diesen Zeiträumen ist zudem der Parameter *SFCF* relativ gering. Die Werte für den Parameter *SFCF* werden mit zunehmender Temperatur im Mittel etwas geringer.

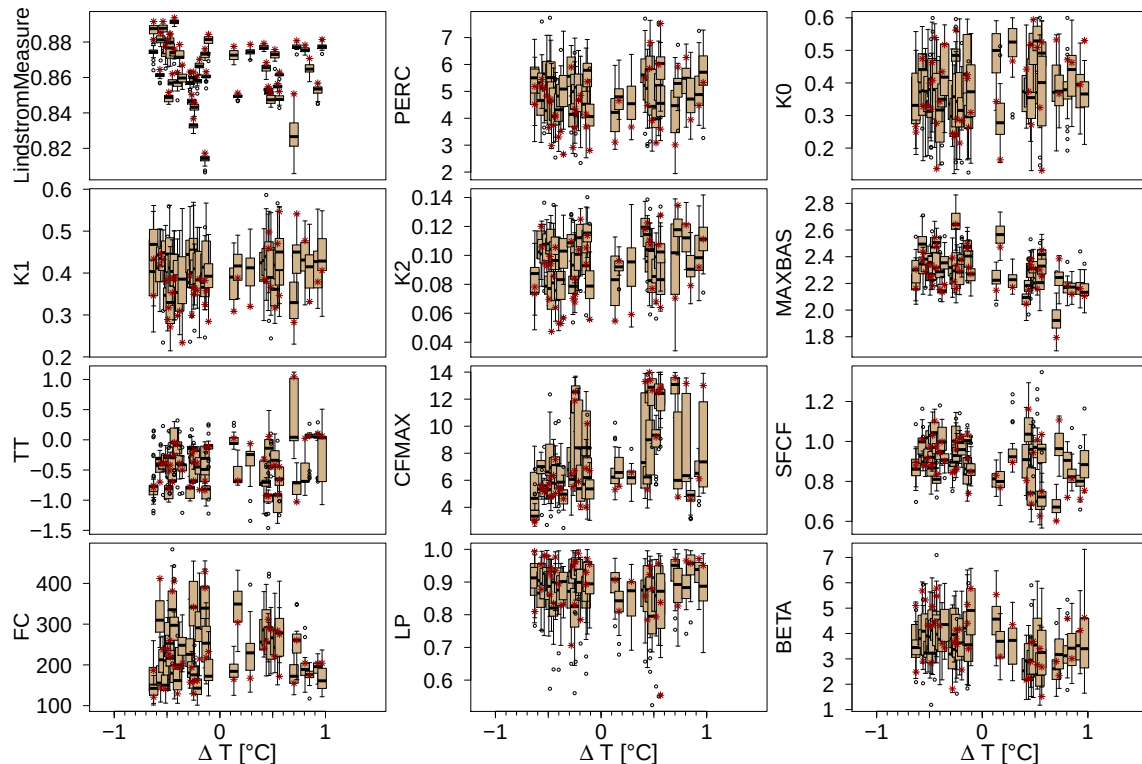


Abbildung 6.3.14.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Murg*, sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum

Bodenroutine Höhere Temperaturen führen zu leicht tieferen *Beta* Werten. In den Subperioden, die das Jahr 2003 enthalten, ist auch der Parameter *FC* niedrig.

Routing Routine und response function Die Parameterwerte für *K2* steigen mit zunehmenden Niederschlagswerten an, ebenso wurden für hohe Temperaturen etwas höhere *K2* Werte kalibriert. Für den Parameter *MAXBAS* wurden bei höheren Temperaturen etwas niedrigere Werte kalibriert.

Validierung

Performance Verlust Der Performance Verlust im Einzugsgebiet *Murg* ist am engsten mit der Abweichung der aktuellen Evaporation zwischen Referenz- und Validierungszeitraum verbunden. Weder mit der Temperaturabweichung noch mit der Niederschlagsabweichung kann eine systematischer Performance - Verlust festgestellt werden. Die größten Performance - Verluste sind jedoch bei positiven Temperaturabweichung modelliert worden. Einige (vor allem unter wärmeren Bedingungen angewendete) Mo-

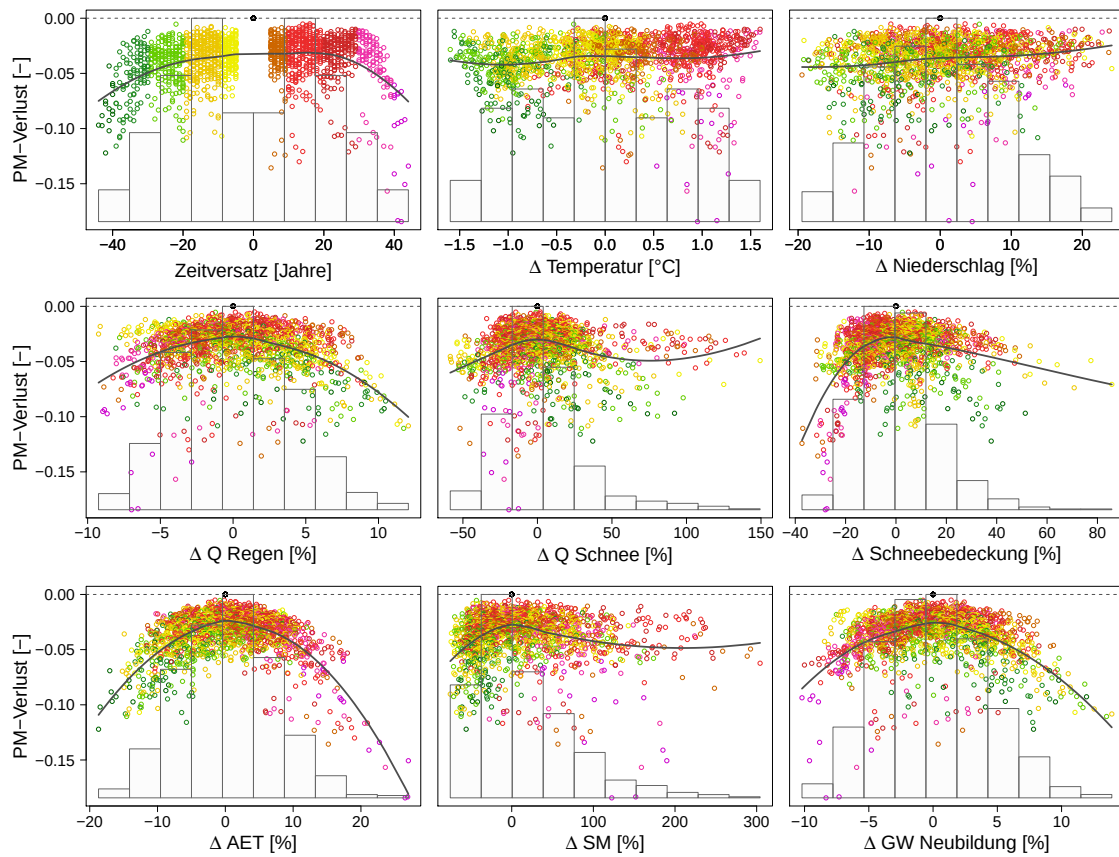


Abbildung 6.3.15.: Performance (PM) Verlust (Absolutwerte im Lindström Measure) der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen im Einzugsgebiet *Murg*. Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlagsabweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen

delle überschätzen die aktuelle Evaporation in Bezug zur Referenzmodellierung, einige (unter kälteren Bedingungen angewendete) Modelle unterschätzen die Evaporation in Bezug zur Referenzmodellierung. Eine starke Unter- oder Überschätzung der aktuellen Evaporation führt zu verminderter Modellperformance. Allerdings unterliegen nur sehr wenige Validierungen einem Performance - Verlust von unter -0.1 Punkten. Im Mittel beträgt dieser -0.037 bei einem Maximum von -0.184.

Tiefe *SFCF* Werte sind im Einzugsgebiet *Murg* negativ und führen, vor allem im Zusammenspiel mit hohen *TT* Werten, zu einer Verringerung der Wassermenge. Werden Parametersätze mit niedrigerem *TT* Wert (d.h. Niederschlag fällt eher als Regen) und höherem *SFCF* sowie hohem *MAXBAS* Wert auf eine Subperiode, für die hohe *TT*, niedrige *SFCF*- und *MAXBAS* Werte kalibriert wurden, angewendet, unterschätzt das

Modell die Schneebedeckung und es überschätzt die Evaporation. Außerdem wird die Grundwasserneubildung unterschätzt. In diesen Modellen ist mehr Wasser vorhanden, was möglicherweise der Grund für die Überschätzung der Evaporation ist. Insgesamt ist der Verlust an Modellperformance jedoch am besten durch das Zusammenspiel der Parameter *MAXBAS* und *TT* zu erklären (Abbildung 6.3.16). *MAXBAS* dominiert den Performance Verlust.

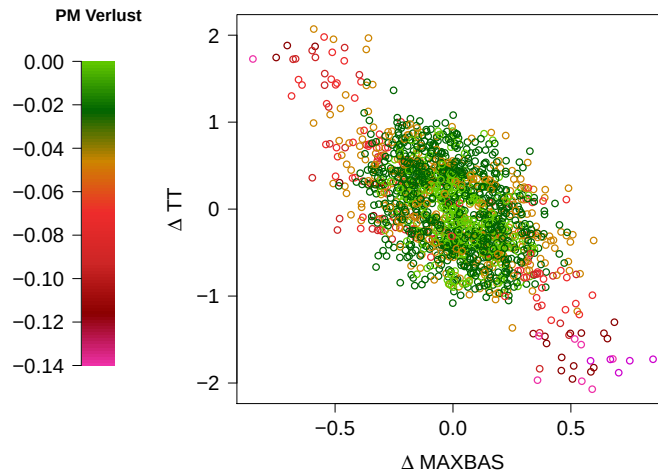


Abbildung 6.3.16.: Einfluss der Differenz innerhalb der Parameterwerte von *MAXBAS* und *TT* zwischen Validierungs- und Kalibrierungszeitraum auf den Performance - Verlust im Einzugsgebiet *Murg*

Abflussfehler Werden Modelle in die Vergangenheit (Zukunft) angewandt, wird der Gesamtabfluss und Q_{50} zunehmend überschätzt (unterschätzt). Auch Q_{05} zeigt, in schwächerem Maße, diese Tendenz. Überschätzt das Modell die aktuelle Evaporation im Vergleich zur Referenzmodellierung, unterschätzt das Modell zunehmend den Gesamtabfluss, Q_{50} und Q_{05} . Außerdem wird bei starker Überschätzung der Evaporation (die Modellierungen, die zu den größten Performance - Verlusten führen) zusätzlich das Q_{05} Quantil stark unterschätzt. Eine Überschätzung (Unterschätzung) der Schneebedeckung des Einzugsgebietes führt zu einer Überschätzung (Unterschätzung) des Q_{05} Quantils. Mit zunehmender Überschätzung der Grundwasserneubildung überschätzt das Modell die den Gesamtabfluss, Q_{05} und Q_{50} . Auf die Niederschlags- und Temperaturdaten zeigen die Abflussanteile, mit Ausnahme von Q_{95} für ΔN , keine eindeutigen Abhängigkeiten.

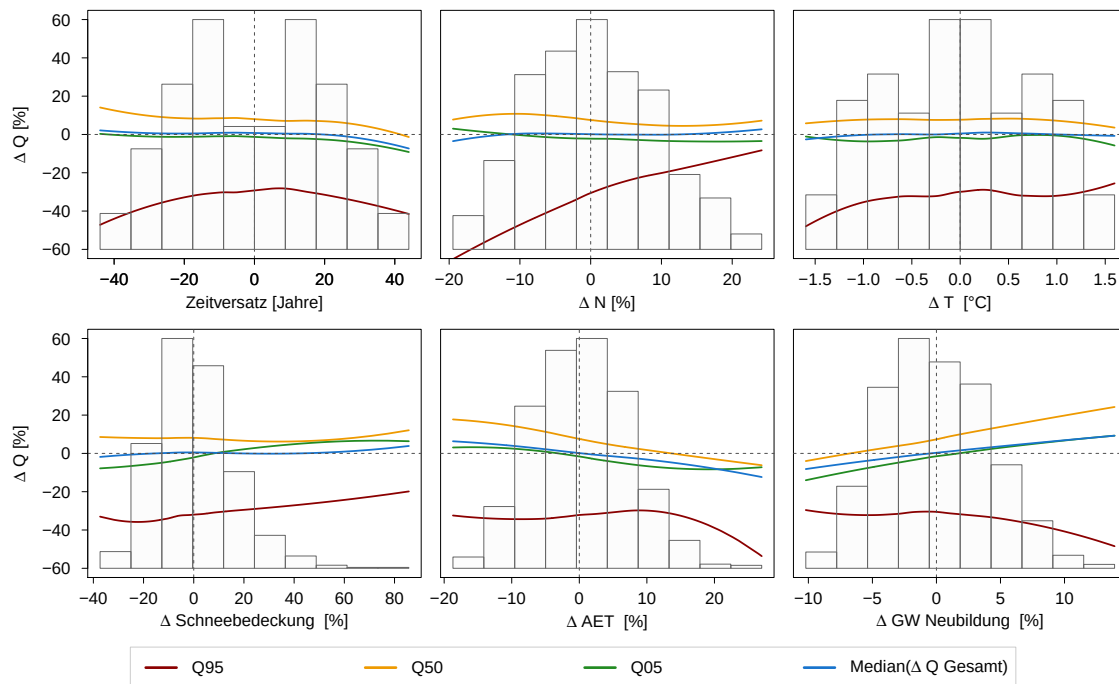


Abbildung 6.3.17.: Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Abfluss (ΔQ) in Bezug zu Zeitversatz, Temperatur- und Niederschlagsabweichung sowie Abweichungen weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen im Einzugsgebiet *Murg*

Entwicklung des hydrologischen Regimes Der zeit-variierende Parametersatz bildet die frühen Abflüsse im Jahr, bei der die Schneeschmelze eine Rolle spielt, am Besten ab 6.3.18. Das an dem rezentesten fünf - Jahreszeitraum kalibrierte Modell (für das ein sehr hoher *TT* Wert, ein niedriger *SFCF* Wert sowie ein niedriger *MAXBAS* Wert kalibriert wurden) unterschätzt die Variabilität innerhalb der Abflussregime stark. Das Modell erzeugt bis in relativ hohe Temperaturbereiche Schnee und korrigiert die Schneemenge stark nach unten. Dadurch ist im Winter weniger Wasser vorhanden, was vermutlich zu dem flachen Abflusspeak im Februar und März führt. Der tiefe *MAXBAS* Wert führt zudem zu einem schnellen routing des die Grundwasserboxen verlassenden Wassers.

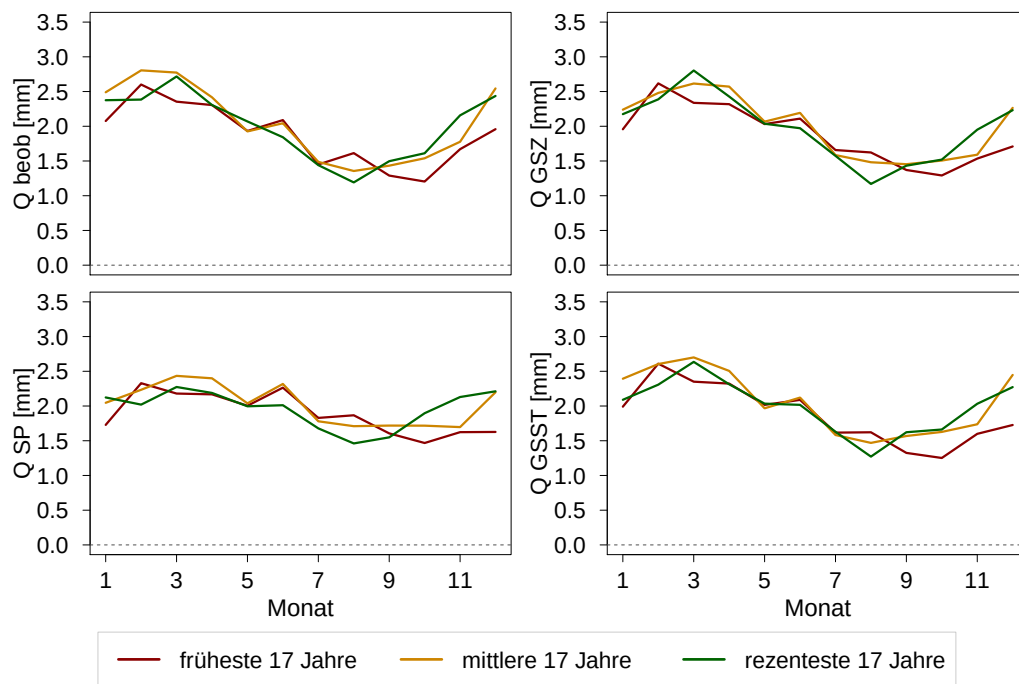


Abbildung 6.3.18.: Entwicklung des hydrologischen Regimes über den Untersuchungszeitraum für den gemessenen und den durch unterschiedliche Kalibrierungsstrategien modellierten Abfluss im Einzugsgebiet *Murg*

6.3.4. Ova da Cluozza

Kalibrierung

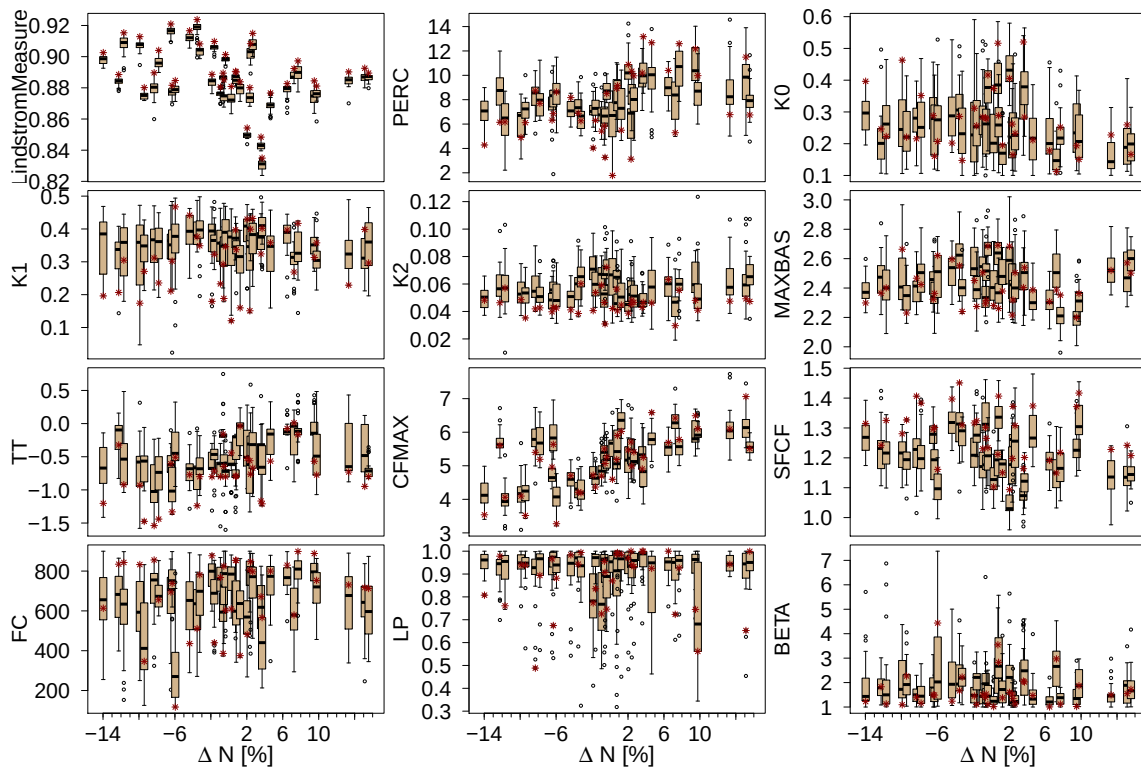


Abbildung 6.3.19.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Ova da Cluozza*, sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum

Modelleffizienz Die Performance - Werte der fünf - Jahreszeiträume bewegen sich zwischen 0.837 und 0.926. Nassere Subperioden erreichen etwas bessere Performance - Werte als trockene.

Schneeroutine Die Parameter TT und $SFCF$ weisen keine eindeutigen Trends auf. $CFMAX$ steigt mit zunehmenden Niederschlägen etwas an. Auch werden für höhere Temperaturen im Mittel leicht höhere $CFMAX$ Werte kalibriert.

Bodenroutine Auffallend sind die sehr niedrigen kalibrierten $Beta$ Werte. Ein großer Teil des Wassers wird dadurch zu Grundwasserneubildung, ein relativ geringer Teil geht in die Bodenbox. Dies lässt sich mit den hohen Fließgeschwindigkeiten und dem geringen mittleren Wasserspeichervermögen im Einzugsgebiet *Ova da Cluozza* erklären.

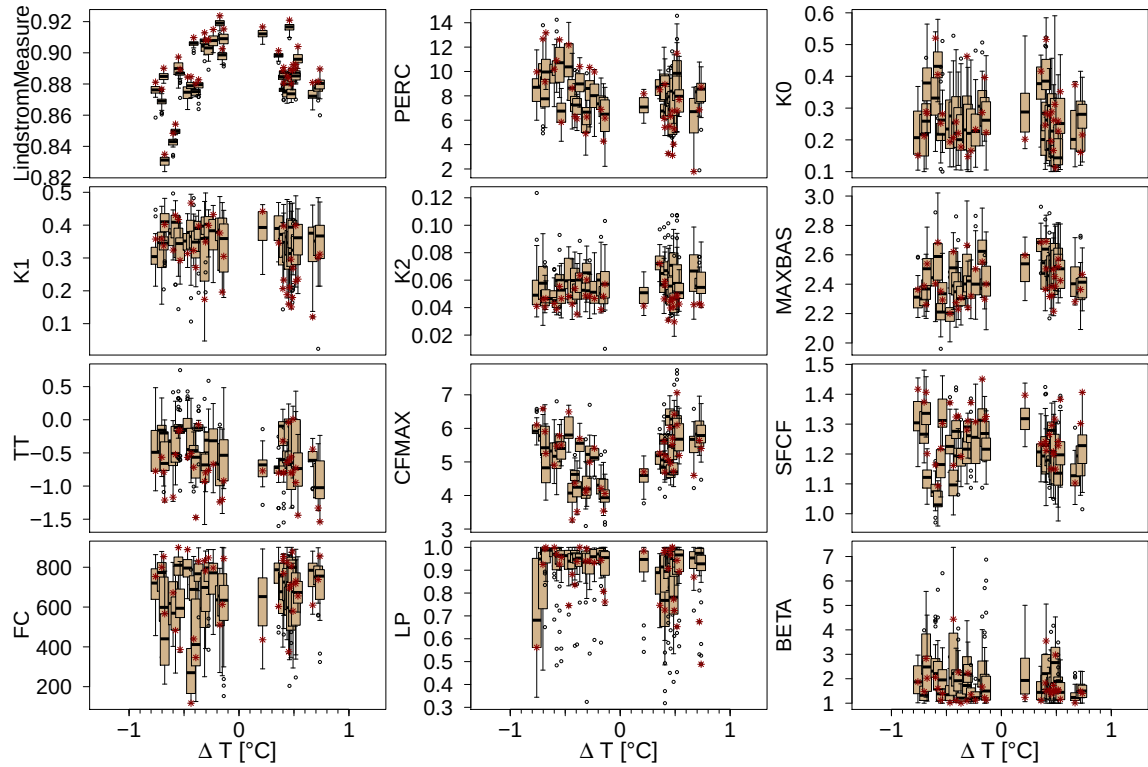


Abbildung 6.3.20.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Ova da Cluoza*, sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum

Routing Routine und response function *Perc* nimmt mit zunehmenden Niederschlägen und für tiefe Temperaturen leicht höhere Werte ein. In den übrigen Parametern sind keine Trends erkennbar.

Validierung

Performance Verlust Im Einzugsgebiet *Ova da Cluoza* ist der Performance Verlust, der durch die Übertragung von Modellparametern entsteht, sehr gering (Abbildung 6.3.21). Im Mittel beträgt dieser -0.039, bei einem Maximalwert von -0.126. Die Performance - Verluste können weder durch die Abweichung in der Schneebedeckung zwischen Referenzmodellierung und Validierung, noch durch die Abweichung in der Grundwasserneubildung eindeutig erklärt werden.

Der Parameter *CFMAX* reagiert am sensitivsten auf den Performance Verlust und wird für die größten Performance Verluste im Einzugsgebiet *Ova da Cluoza* verantwortlich gemacht. Weitere Parameter, die Sensitivitäten auf Performance - Verluste zeigen, sind *SFCF*, *FC* und *Beta* (vgl. Abbildung A.8.4). Die gering mächtigen Böden

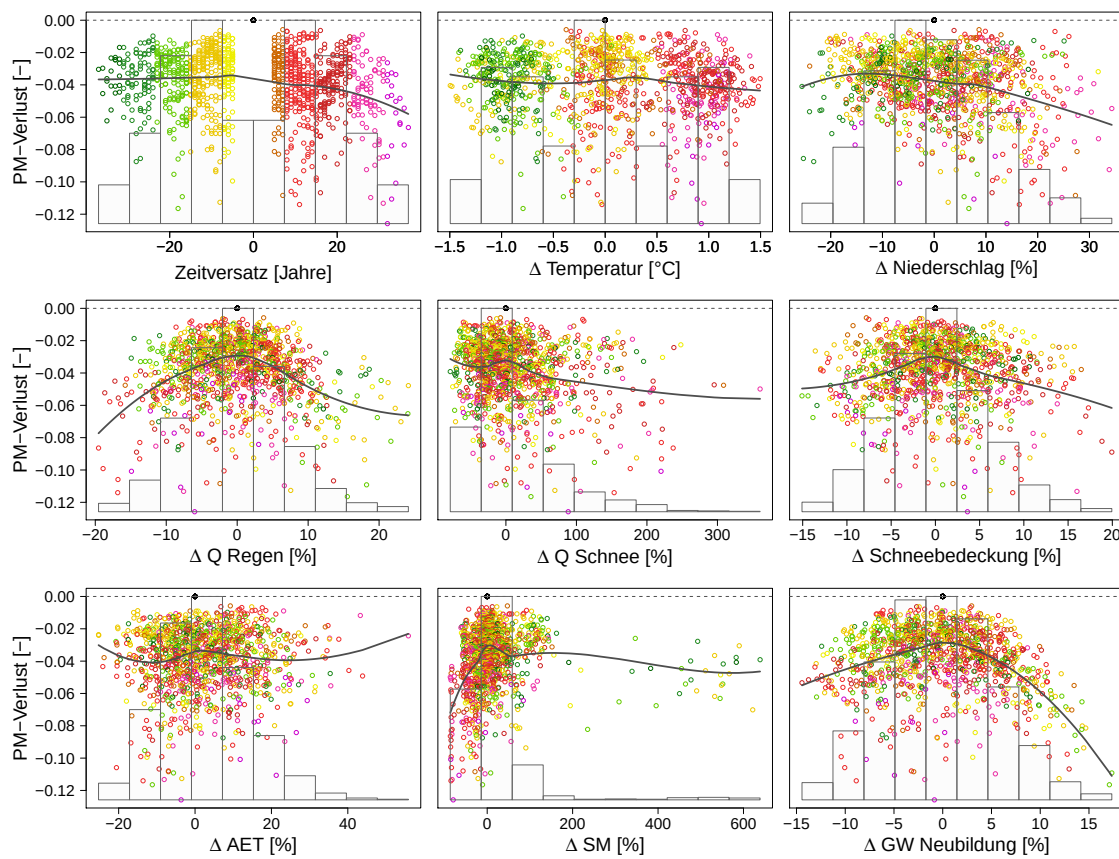


Abbildung 6.3.21.: Performance (PM) Verlust (Absolutwerte im Lindström Measure) der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen im Einzugsgebiet *Ova da Cluozza*. Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlagsabweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum

sowie das anstehende Gestein führen folglich nicht zu einer Verstärkung der Parameterinstabilität (beziehungsweise des Performance Verlustes) in diesem Einzugsgebiet.

Abflussfehler Die hohen Abflüsse werden durch das Modell sehr gut abgebildet, dagegen wird das Q_{95} Quantil stark unterschätzt (Abbildung 6.3.22). Eine Überschätzung (Unterschätzung) der Grundwasserneubildung führt zu einer zunehmenden Überschätzung (Unterschätzung) von Q_{05} , Q_{50} und Q_{Gesamt} . Außerdem führt eine Überschätzung (Unterschätzung) der Schneebedeckung zu einer leichten Überschätzung (Unterschätzung) von Q_{05} .

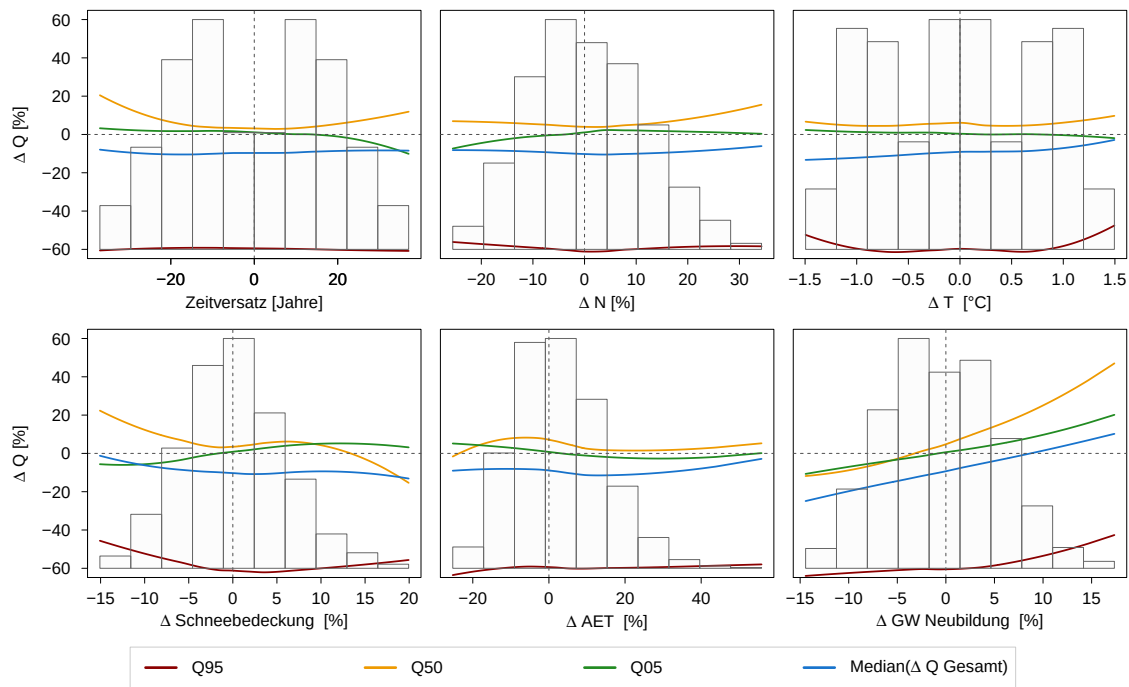


Abbildung 6.3.22.: Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Abfluss (ΔQ) in Bezug zu Zeitversatz, Temperatur- und Niederschlagsabweichung sowie Abweichungen weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen im Einzugsgebiet *Ova da Cluoza*

Entwicklung des hydrologischen Regimes Alle Kalibrierungsansätze können die Entwicklung des hydrologische Regimes zufriedenstellend wiedergeben. Der am Gesamtzeitraum kalibrierte Parametersatz bildet den Rückgang der Sommerabflüsse in den rezentesten 15 Jahren jedoch am schlechtesten ab. Ein möglicher Grund hierfür ist ein für diesen Zeitraum zu niedriger *CFMAX* Wert.

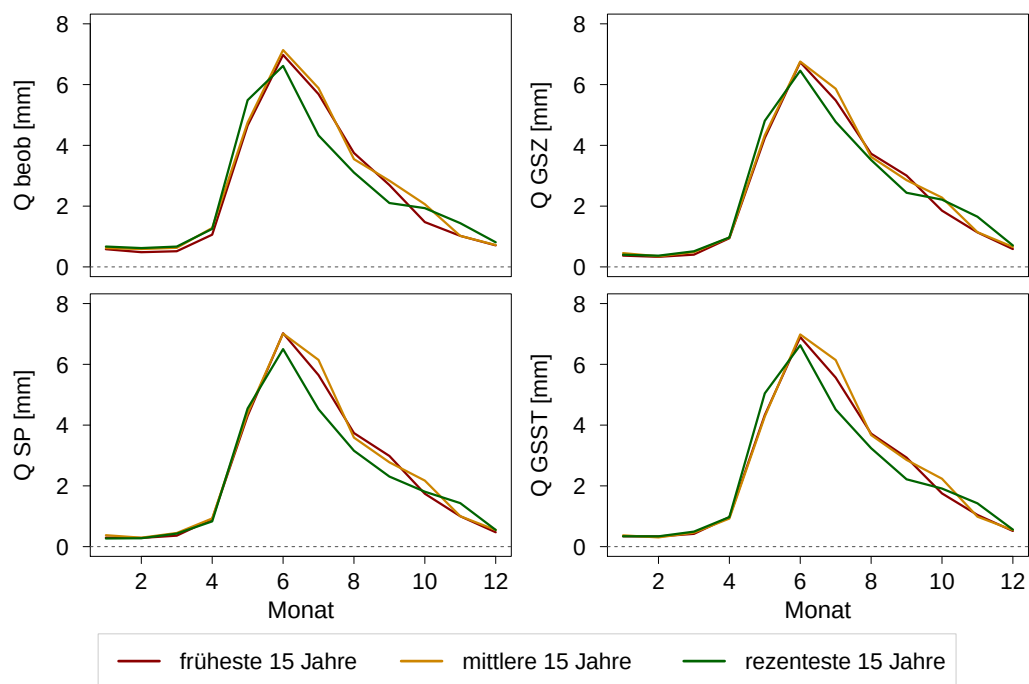


Abbildung 6.3.23.: Entwicklung des hydrologischen Regimes über den Untersuchungszeitraum für den gemessenen und den durch unterschiedliche Kalibrierungsstrategien modellierten Abfluss im Einzugsgebiet *Ova da Cluozza*

6.3.5. Sitter

Kalibrierung

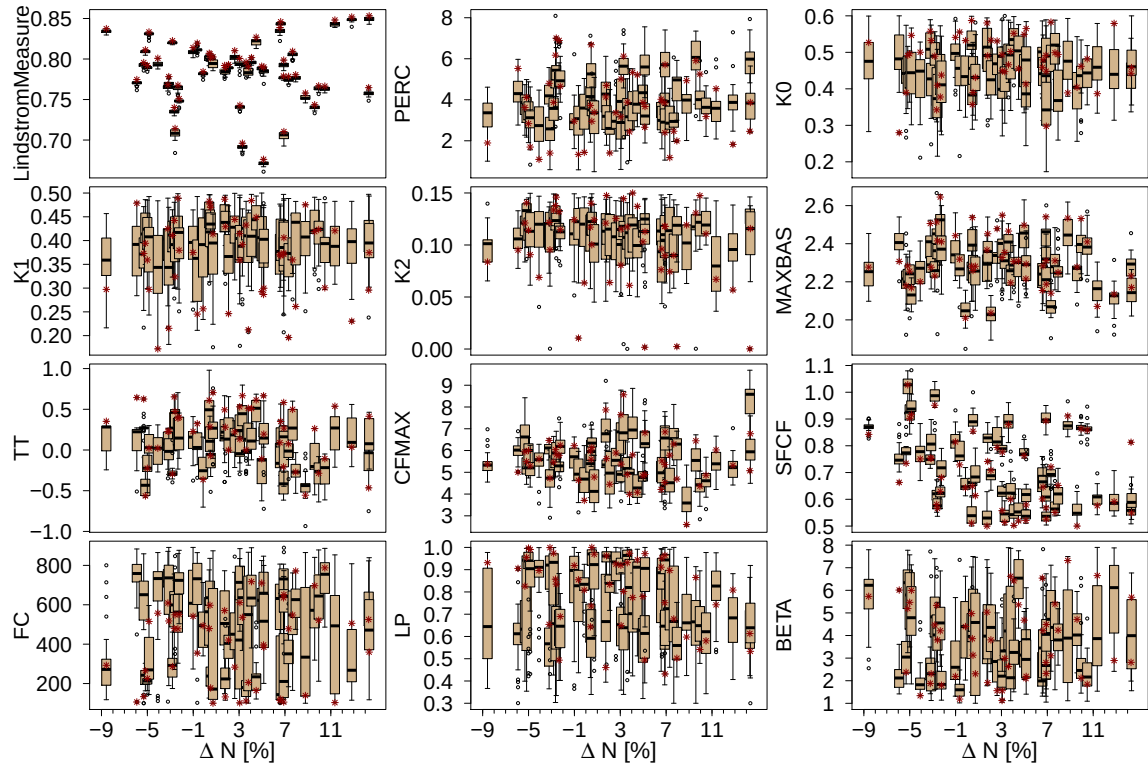


Abbildung 6.3.24.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Sitter*, sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum

Modelleffizienz Die Performance Werte der einzelnen Subperioden reichen von 0.683 bis 0.855. Warme Subperioden erreichten im Schnitt höhere Performance Werte. Ein Zusammenhang zwischen der Modellperformance und der Niederschlagsabweichung ist nicht zu erkennen.

Schneeroutine Die Spannweite der kalibrierten *SFCF* Werte ist in Anbetracht der hohen Sensitivität dieses Parameters (beziehungsweise der Enge der Boxplots) sehr groß. Mit zunehmenden Niederschlägen werden die Werte tendenziell etwas geringer. Ein Zusammenhang von *SFCF* mit dem Mittelwert der Temperatur ist nicht eindeutig. Für höhere Temperaturen wurden im Mittel leicht höhere *TT* Werte kalibriert.

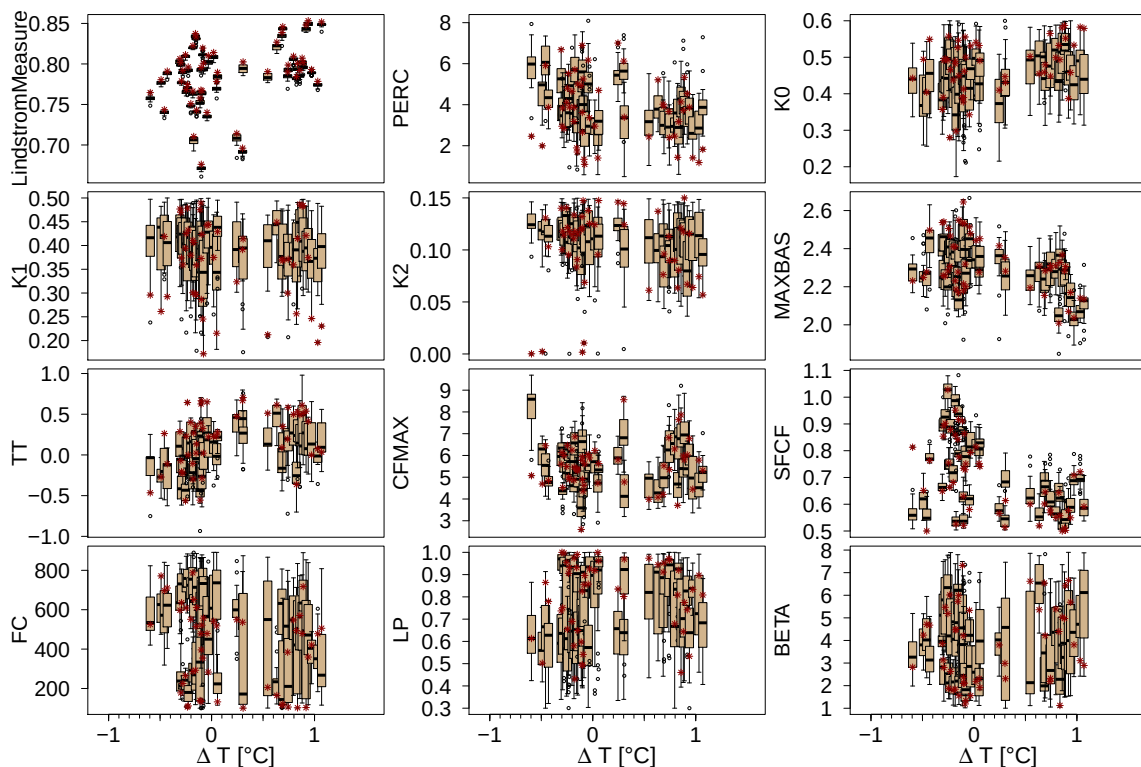


Abbildung 6.3.25.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Sitter*, sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum

Bodenroutine Zusammenhänge zwischen Parametern der Bodenroutine und Abweichungen in Niederschlag oder Temperatur sind nicht zu erkennen.

Routing Routine und response function Die Werte des Parameters *MAXBAS* werden mit ansteigenden Temperaturen kleiner. Auch der Parameter *K0* nimmt mit wärmeren Temperaturen etwas höhere Werte ein. *Perc* nimmt dagegen mit zunehmenden Temperaturen im Mittel leicht ab.

Validierung

Performance Verlust Der mittlere Performance Verlust beträgt -0.044, bei einem maximalen Performance - Verlust von -0.204. Die höchsten Performance - Verluste entstehen bei der Übertragung von Parametersätzen mit hohen *SFCF* Werte auf Zeiträume, für die tiefe *SFCF* Werte kalibriert wurden und umgekehrt. Werden Parametersätze mit hohen (tiefen) *SFCF* Werte auf Zeiträume, für die niedrige *SFCF* Werte kalibriert wurden angewendet, überschätzt (unterschätzt) das Modell die Grundwasserneubil-

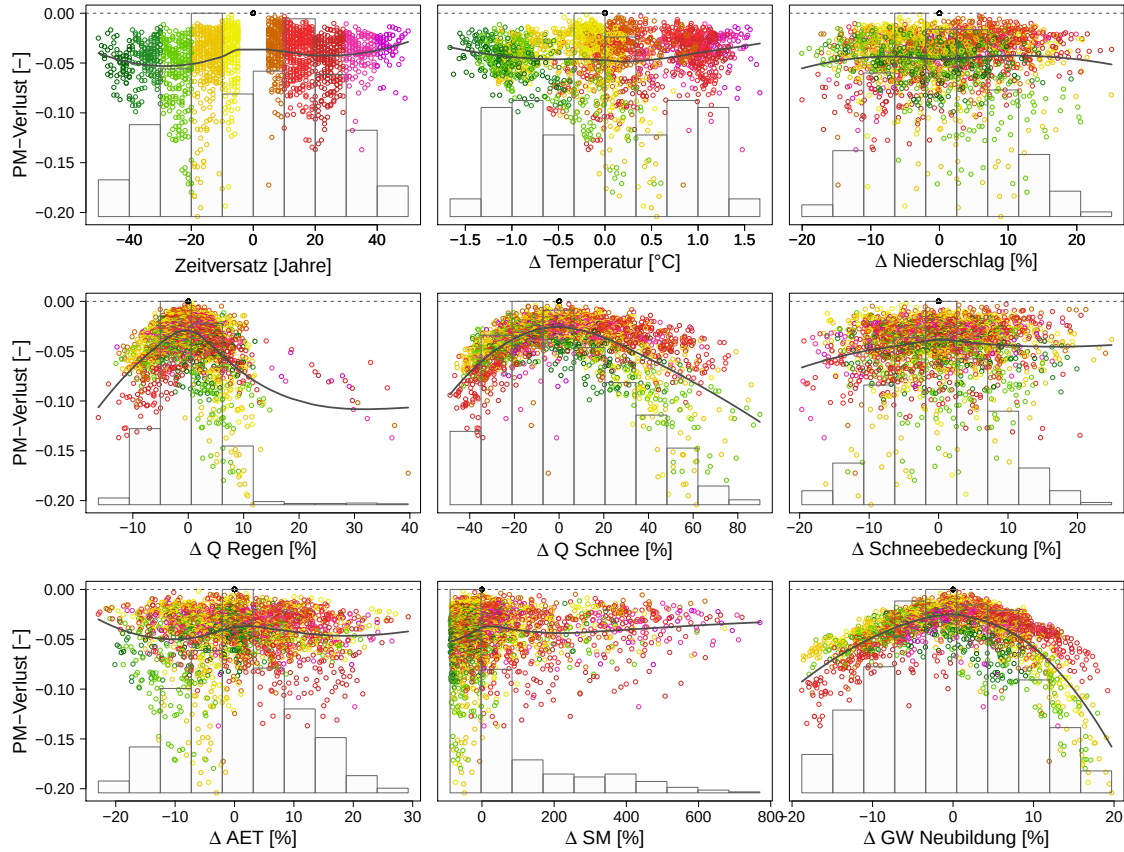


Abbildung 6.3.26.: Performance (PM) Verlust (Absolutwerte im Lindström Measure) der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen im Einzugsgebiet *Sitter*. Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlagsabweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen

Abbildung 6.3.27 zeigt den dominierenden Einfluss von *SFCF* auf den Performance - Verlust. Die Schneebedeckung im Einzugsgebiet hat keinen Einfluss auf den Performance - Verlust. Für den Parameter *TT* wurden jedoch auch keine extremen Werte kalibriert.

Abflussfehler Modelle mit zu hohen *SFCF* Werten korrigieren die Niederschlagsmenge nach oben. Diese zu hohen Niederschlagsmengen führen in Validierungszeiträumen zu einer Überschätzung des Gesamtabflusses, sowie von Q_{50} und Q_{05} ; Modelle mit zu geringen *SFCF* Werten führen dagegen zu einer Unterschätzung des Gesamtabflusses, sowie von Q_{50} und Q_{05} (Abbildung 6.3.29).

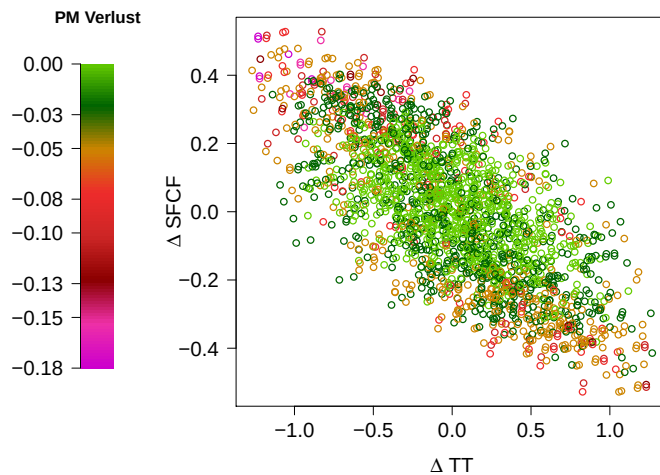


Abbildung 6.3.27.: Einfluss der Differenz innerhalb der Parameterwerte von $SFCF$ und TT zwischen Validierungs- und Kalibrierungszeitraum auf den Performance - Verlust im Einzugsgebiet *Sitter*

Entwicklung des hydrologischen Regimes Das hydrologische Regime ist durch zunehmend höhere Winterabflüsse in den jüngeren Jahren sowie durch einen Rückgang des Abflusses in den Sommermonaten gekennzeichnet. Diese Entwicklung wird durch alle Modelle wiedergegeben, wobei QSP das schlechteste Ergebnis erreicht. Der dem modellierten Abfluss QSP zugrunde liegende Parametersatz zeichnet sich durch einen tiefen $MAXBAS$ und einen moderaten $SFCF$ Wert aus (rezentester Parametersatz in Abbildung A.3.5).

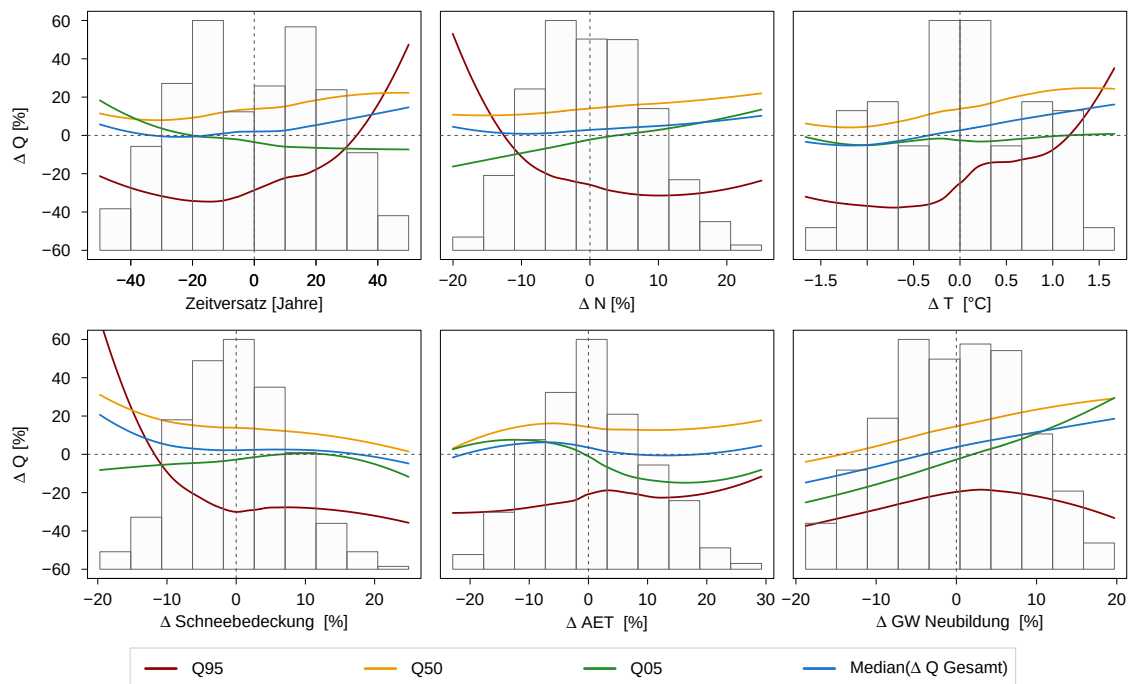


Abbildung 6.3.28.: Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Abfluss (ΔQ) in Bezug zu Zeitversatz, Temperatur- und Niederschlagsabweichung sowie Abweichungen weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen im Einzugsgebiet *Sitter*

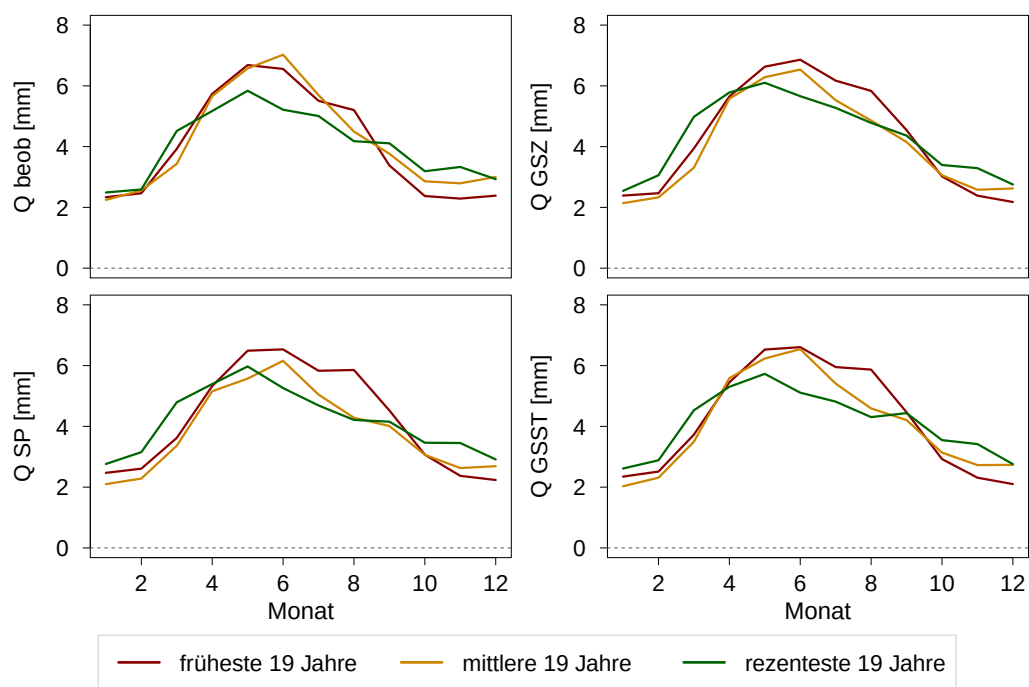


Abbildung 6.3.29.: Entwicklung des hydrologischen Regimes über den Untersuchungszeitraum für den gemessenen und den durch unterschiedliche Kalibrierungsstrategien modellierten Abfluss im Einzugsgebiet *Sitter*

6.4. Auswirkung weiterer Ansätze zur Berechnung der potentiellen Evaporation

Für das am tiefsten gelegene Einzugsgebiet *Murg* wurden die Auswirkung einer konstanten potentiellen Evaporation sowie einer für jeden Modellierungszeitraum separat berechneten potentiellen Evaporation auf die kalibrierten Modellparameter getestet.

6.4.1. Annahme einer konstanten potentiellen Evaporation

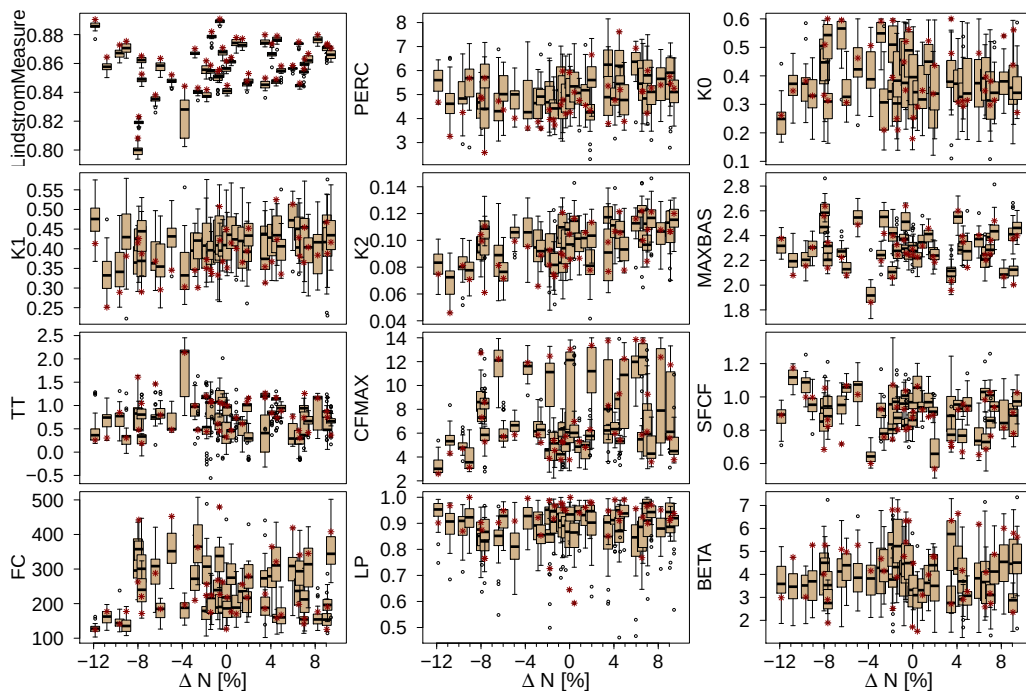


Abbildung 6.4.1.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Murg* mit konstanter PET, sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum

Die Kalibrierung mit einer konstanten potentiellen Evaporation führte nicht zu veränderten Trends der kalibrierten Modellparameter (Abbildungen 6.4.1 und 6.4.2).

Weder ein deutlicherer Anstieg der Parameter *FC* und *Beta* noch ein stärkerer Rückgang des Parameters *SFCF* mit ansteigenden Temperaturen ist zu beobachten. Die kalibrierten *TT* Werte sind generell höher als bei der Kalibrierung mit anpassbarer potentieller Evaporation (vgl. Abbildung 6.3.14). Dieser Ansatz führt zu einer leicht schlechteren Modellperformance, die Modellperformance der Subperioden erreicht im Mittel 0.861 Punkte (im Vergleich zu 0.868 für die Modellierung mit anpassbarer po-

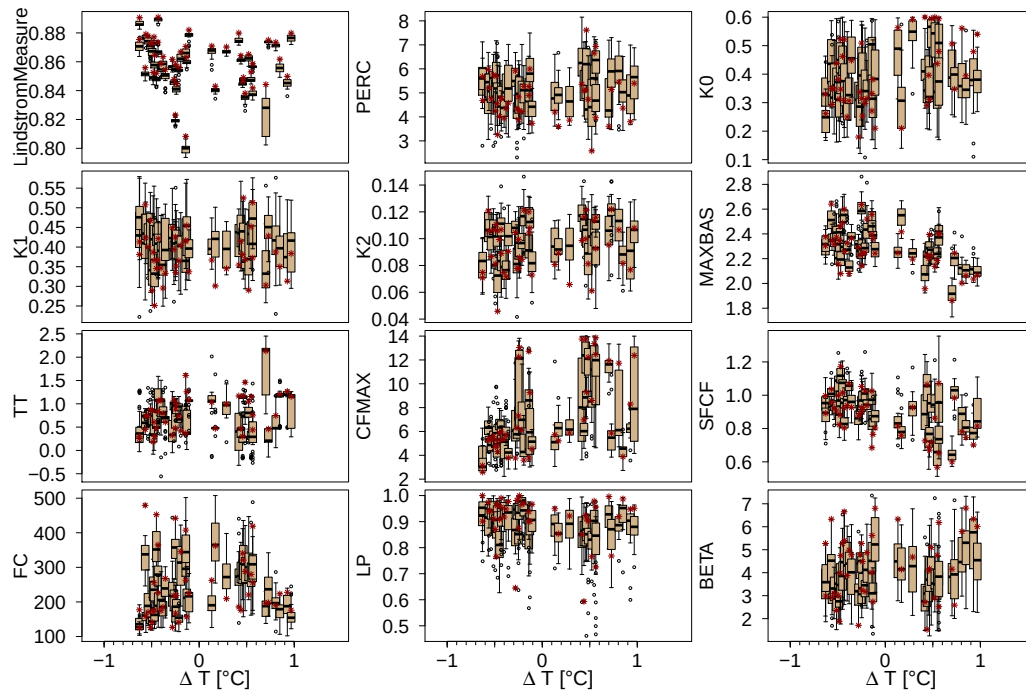


Abbildung 6.4.2.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Murg* mit konstanter PET, sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum

tentieller Evaporation).

6.4.2. Für jede Subperiode separat berechnete potentielle Evaporation

Auch durch eine für jede Subperiode neu berechnete potentielle Evaporation ändert sich an den Trends der Modellparameter wenig.

Der Parameter *SFCF* ist weniger sensitiv auf das Modellierungsergebnis (weitere Boxplots in den Abbildungen 6.4.3 und 6.4.4), zudem sind die kalibrierten Werte generell höher. Die kalibrierten *TT* Werte sind etwas tiefer als die bei der Annahme einer konstanten potentiellen Evaporation. Außerdem sind die *FC* Werte höher, weisen jedoch keinen Aufwärts- oder Abwärtstrend auf. Die Werte des Parameters *Beta* sind generell tiefer und besser definiert, ein deutlicherer Trend ist jedoch auch in diesem Parameter nicht vorhanden. Auffallend sind die deutlich tieferen *LP* Werte. Zudem erreicht die Zielfunktion im Mittel nur 0.777 Punkte.

6.4. AUSWIRKUNG WEITERER ANSÄTZE ZUR BERECHNUNG DER POTENTIELLEN EVAPORATION

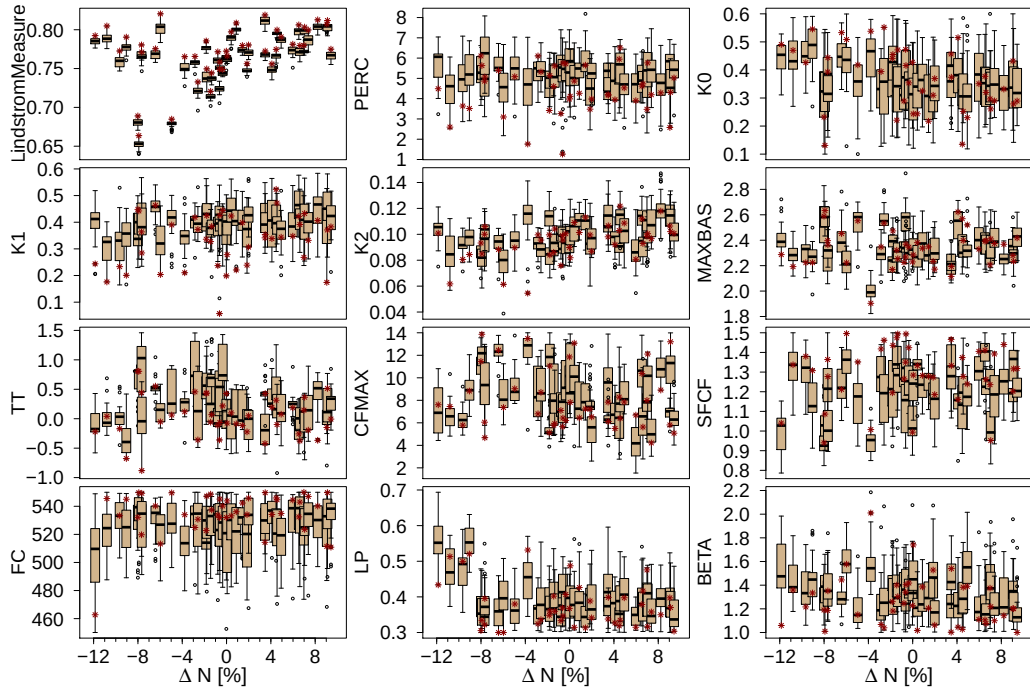


Abbildung 6.4.3.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Murg* mit separat berechneter PET, sortiert nach der Niederschlagsabweichung ΔN der Subperioden vom Gesamtzeitraum

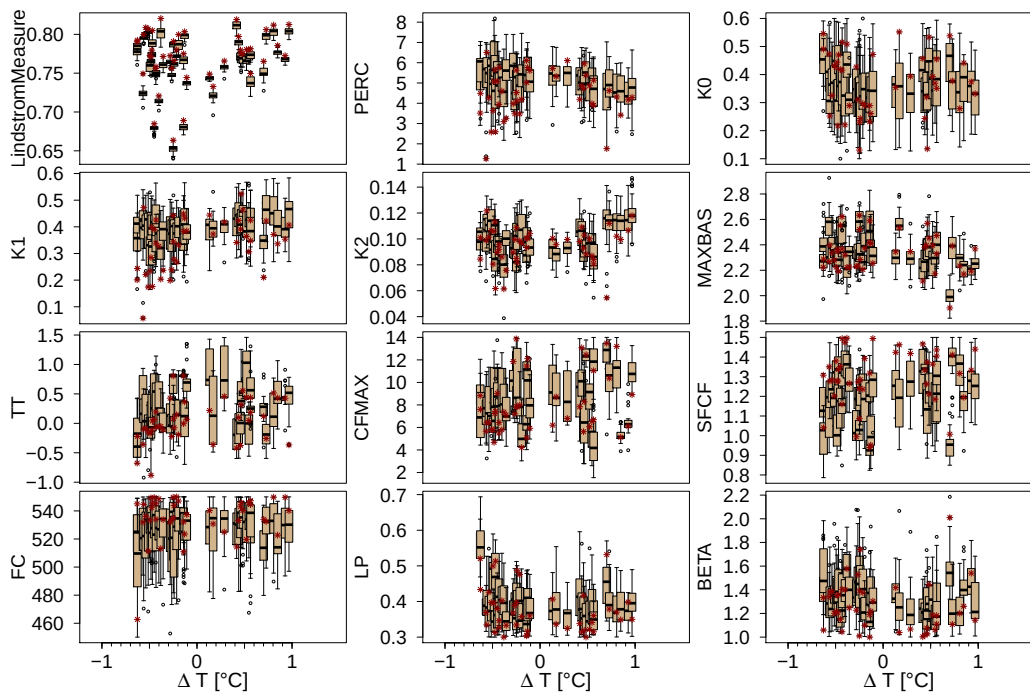


Abbildung 6.4.4.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Murg* mit separat berechneter PET, sortiert nach der Temperaturabweichung ΔT der Subperioden vom Gesamtzeitraum

7. Diskussion

7.1. Methodik

Aufgrund der Abhängigkeiten der überlappenden Subperioden konnten keine statistischen Tests auf die Ergebnisse angewendet werden (Coron u. a., 2012). Durch die Vielzahl von Modellierungen wurde jedoch die maximale Anzahl an unterschiedlichen klimatischen Bedingungen erreicht, was zu robusteren Ergebnissen führte.

Die Länge der Kalibrierungszeiträume von fünf Jahren ist sehr kurz (Vaze u. a., 2010) und wird in der Praxis kaum angewendet werden. Die Unterschiede in den klimatischen Bedingungen der Modellierungszeiträume konnten so jedoch vergrößert werden.

Das Lindström Measure zur Messung der Modelleffizienz reagiert auf hohe Abflüsse sensitiver als auf niedrige Abflüsse. Eine Auswirkung davon ist die starke Unterschätzung von Q_{95} . Außerdem führt es zu einem größeren Performance - Verlust, wenn Abflüsse durch das Modell überschätzt werden. Diese Zielfunktion wurde dennoch verwendet, da sie auch die Abflussvolumen berücksichtigt, was zu einer verbesserten Wasserbilanz führt (Lindström, 1997). Sie berücksichtigt somit zwei unterschiedliche Aspekte des Abflusses, was nach Abebe u. a. (2010) wichtig für eine Zielfunktion ist. Dennoch wäre ein Vergleich der in dieser Arbeit beobachteten Ergebnisse mit durch weitere Zielfunktionen gemessenen Performance - Verluste interessant.

Jede Subperiode wurde durch 25 Kalibrierungen mit je 2000 Modelldurchläufen kalibriert. Dies stellt einen Kompromiss aus Rechenaufwand und Berücksichtigung der Equifinalität dar.

Herman u. a. (2013) beobachteten signifikante Unterschiede in den sensitiven Parametern zwischen unterschiedlichen Niederschlags - Abfluss - Modellen, auch wenn diese Modelle gleiche Prozessgleichungen verwendeten. Da in dieser Arbeit nur ein Niederschlags - Abfluss - Modell verwendet wurde, konnte ein Vergleich zwischen Modellen

nicht angestellt werden.

Poulin u. a. (2011) ordneten die Unsicherheiten, die sich durch die verwendete Modellstruktur ergeben größer ein als Unsicherheiten, die sich aus der Equifinalität der Modellparameter ergeben. Diese Parameterunsicherheit verhielt sich unter verschiedenen klimatischen Bedingungen ähnlich. Daraus schlossen Poulin u. a. (2011), dass Modellparameter den Abfluss auch unter veränderten klimatischen Bedingungen simulieren können. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen jedoch, dass sich die Bereiche, in denen sich equifinale Modellparametersätze bewegen, in unterschiedlichen Kalibrierungszeiträumen durchaus verschieben können. Diese Verschiebung geht jedoch nicht klar mit Veränderungen in Temperatur oder Niederschlag einher. Der Einfluss verschiedener Modellstrukturen konnte in dieser Arbeit nicht untersucht werden, da nur eine Modellstruktur verwendet wurde.

7.2. Ergebnisse

7.2.1. Modellparameter

Je enger die Boxplots der 25 kalibrierten Parameterwerte sind, desto besser definiert ist dieser Parameter. Die Boxplots sind für die meisten Parameter relativ weit, auch die Unterschiede der Boxplots zwischen ähnlichen hydro - klimatischen Bedingungen sind oft größer als ein durch hydro - klimatische Unterschiede hervorgerufener Trend.

Es lassen sich Zusammenhänge zwischen der mittleren Einzugsgebietshöhe und den kritischen (d.h. für den Performance - Verlust hauptsächlich verantwortlichen) Modellparametern finden. Für die nivalen Einzugsgebiete (*Allenbach* und *Sitter*) sind *TT* und *SFCF*, für die glazio-nivalen Einzugsgebiete (*Dischma* und *Ova da Cluozza*) *CFMAX* und *SFCF* diese kritischen Parameter. Im Einzugsgebiet *Ova da Cluozza* spielen neben dem dominanten Parameter *CFMAX* jedoch auch die Parameter *FC* und *Beta* eine Rolle für den Performance - Verlust. Für das pluviale Einzugsgebiet *Murg* spielt der Parameter *MAXBAS* die dominierende Rolle für den Performance - Verlust. Diese Zusammenhänge sollten jedoch an weiteren Einzugsgebieten überprüft werden. Vaze u. a. (2010) und Coron u. a. (2012) beobachteten keine räumlichen Muster.

Die Entwicklung der Modellparameter ist nicht mit den Ergebnissen von (Merz u. a., 2011) zu vergleichen. In einigen Einzugsgebieten zeigten beispielsweise auch Parameter

der Routing Routine und der 'responce function' leichte Sensitivitäten auf klimatische Veränderungen. Ein Anstieg des Parameters FC , beziehungsweise ein Abfall des Parameters $SFCF$ (abgesehen vom Einzugsgebiet *Dischma*) konnte nicht beobachtet werden. Die niedrigeren $SFCF$ Werte im *Dischma* Einzugsgebiet mit zunehmend jüngeren Jahren sind vor allem dem Anstieg des P/Q Verhältnisses zuzuschreiben. Für sehr warme Subperioden wurden teilweise überdurchschnittlich tiefe FC Werte kalibriert. Auch der Parameter $Beta$ zeigt keine verallgemeinerbar steigende Tendenz.

Im Einzugsgebiet *Murg* steigt der Parameter $K2$ mit zunehmenden Niederschlägen an, was auch durch Nikolova (2013) im Einzugsgebiet *Thur* beobachtet wurde. In den weiteren in dieser Arbeit untersuchten Einzugsgebieten konnte jedoch kein Anstieg von $K2$ mit steigenden Niederschlägen festgestellt werden. In den Einzugsgebieten *Sitter* und *Allenbach* führen höhere Temperaturen zu etwas höheren $K0$ Werten. Höhere $K0$ Werte wurden in wärmeren und trockeren Zeiträumen auch durch Nikolova (2013) beobachtet. In wärmeren Subperioden trägt in diesen Einzugsgebieten schneller 'Oberflächen-' Abfluss vermehrt zum Gesamtabfluss bei. In den beiden tiefsten Einzugsgebieten *Murg* und *Sitter* wurden mit zunehmenden Temperaturen niedrigere $MAXBAS$ Werte kalibriert. Kleinere $MAXBAS$ Werte führen zu einem schnelleren Routing des die Grundwasserboxen verlassenden Wassers.

Die Ergebnisse deuten auf einen Zusammenhang zwischen den Subperioden und den Modellparametern hin, der nicht durch den Mittelwert von Temperatur- und Niederschlagswerten abgebildet werden kann.

7.2.2. Performance - Verlust

Die Mittelwerte aus den klimatischen Rahmenbedingungen der einzelnen Subperioden können auch den Performance - Verlust der Modelle nicht erklären. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Brigode u. a. (2013) überein. Eventuell besteht ein nicht-linearer Zusammenhang zwischen der Auswirkung extremer Ereignisse oder Jahre (beziehungsweise Sommer oder Winter) auf den Mittelwert der klimatischen Bedingungen und die Modellparameter. Auch Coron u. a. (2012) bemerkten eine gewisse "Unabhängigkeit" des Performance - Verlustes, und damit auch der kalibrierten Modellparameter von den mittleren klimatischen Bedingungen der modellierten Zeiträume, da auch zwischen ähnlichen klimatischen Rahmenbedingungen (gemessen an den Mittelwerten) Performance - Verluste von 18% - 20% beobachtet wurden.

Daten zu Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung oder relativer Luftfeuchte, die Einfluss auf die Evaporation (Tabari und Talaei, 2014) und damit auch auf die Modellparameter haben, wurden innerhalb dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Diese weiteren Einflussfaktoren stumpfen möglicherweise den Einfluss der Temperatur auf die Modellparameter ab. Eventuell kann der Zusammenhang zwischen Modellparametern und Kalibrierungszeitraum besser erklärt werden, wenn zusätzliche Daten wie eben Windgeschwindigkeit oder Sonneneinstrahlung berücksichtigt werden.

Die durch Coron u. a. (2012) beobachteten Performance - Verluste wurden größer, je deutlicher die klimatischen Bedingungen zwischen Kalibrierungs- und Validierungszeitraum abwichen. Ein solcher Zusammenhang ist in den Ergebnissen dieser Arbeit nicht vorhanden.

Ein direkterer Einfluss des Niederschlages (in wasserlimitierten Einzugsgebieten) als der Temperatur (in energielimitierten Einzugsgebieten) auf die Modellparameter ist denkbar. Coron u. a. (2012) beobachteten in wasserlimitierten Einzugsgebieten größere Performance - Verluste als jene in dieser Arbeit. Er zog die Parallele zu Oudin u. a. (2006), der zeigte, dass fehlerhafte Niederschlagsdaten größere Auswirkungen auf die Modelleffizienz haben als fehlerhafte Evaporationsdaten. Die Ergebnisse dieser Arbeit widersprechen dem nicht, da die Performance - Verluste eher gering sind. Womöglich sind wasserlimitierte Einzugsgebiete stärker durch Parameterinstabilität betroffen als energielimitierte Einzugsgebiete.

Ein langer Kalibrierungszeitraum führt zu mehr Variabilität innerhalb dieses Zeitraumes und relativiert den Einfluss einzelner extremer Jahre oder Ereignisse. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Kalibrierungszeitraum von fünf Jahren zu kurz ist, wenn er nicht innerhalb eines zeit - variierenden Ansatzes verwendet wird. Dies widerspricht der Empfehlung für die Länge des Kalibrierungszeitraumes von Brigode u. a. (2013) und unterstützt die entsprechende Empfehlung von Vaze u. a. (2010).

Der mittlere Performance - Verlust der Validierungszeiträume von -0.043 Punkten ist quantitativ vergleichbar mit den beobachteten Performance - Verlusten von Nikolova (2013).

Die Parameter *SFCF* und *TT* sind für die größten Performance - Verluste verantwortlich. Allerdings ist die Abhängigkeit der Parameter von Niederschlag und Temperatur eines Zeitraumes nicht eindeutig. Große Performance Verluste traten im Verhältnis

zur Gesamtzahl an Validierungen in einer sehr geringen Anzahl auf.

Eventuell lässt sich der Performance - Verlust am besten mit der Abweichung in der Grundwasserneubildung erklären, wenn der Parameter *SFCF* für den Performance - Verlust hauptsächlich verantwortlich ist, beziehungsweise mit der Abweichung in der Schneebedeckung, wenn der Parameter *TT* hauptsächlich für den Performance - Verlust verantwortlich ist (vgl. die Ergebnisse von *Allenbach*, *Dischma* und *Sitter*). Diese Behauptung sollte jedoch an weiteren Einzugsgebieten geprüft werden.

Im Einzugsgebiet *Murg* ist der Performance - Verlust eng mit einer abweichenden Einschätzung der aktuellen Verdunstung verbunden, zeigt jedoch keine Abhängigkeit von der Abweichung in der Temperatur zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum. Eine Erklärung hierfür ist, dass in die Berechnung der aktuellen Verdunstung neben der Tagesmitteltemperatur drei Modellparameter (*Cet*, *LP*, *FC*) sowie der Wassergehalt der HBV Bodenbox (*SM*) eingehen und den Einfluss der Temperatur auf die aktuelle Verdunstung abstumpfen können. Hinzu kommt, dass diese Parameter keine eindeutigen Abhängigkeiten vom Temperaturmittelwert des Modellierungszeitraumes zu haben scheinen.

Coron u. a. (2012) konnten (wie auch Vaze u. a. (2010) und Li u. a. (2011); alle Studien wurden in Australien durchgeführt) einen größeren Performance - Verlust beobachten, wenn der Kalibrierungszeitraum nasser als der Validierungszeitraum ist. Dies konnte in den hier untersuchten energielimitierten Einzugsgebieten nicht festgestellt werden.

7.2.3. Abflussfehler

Die zu keinem Zeitpunkt korrekte Zusammensetzung des Gesamtabflusses aus Q_{95} , Q_{50} und Q_{05} durch das Modell zeigt die Schwierigkeit des Modells, den Abfluss richtig wiedergeben zu können.

Durch die Darstellung der Abflussfehler anhand einer geglätteten Kurve konnte ein tendenzielles Über - oder Unterschätzen des gemessenen Abflusses durch das Modell aufgezeigt werden. Einzelne Modellierungen können zu größeren Abflussfehlern führen. Um die Lesbarkeit der Abbildungen zu gewährleisten, wurden die einzelnen Datenpunkte jedoch nicht geplottet. Die Robustheit dieser Kurve kann an den Histogrammen (den eingehenden Modellierungen pro Abschnitt) abgelesen werden.

Die Entwicklung der Abflussfehler ist zwischen den Einzugsgebieten verschieden stark ausgeprägt. In jedem Einzugsgebiet führt eine Überschätzung der Schneebedeckung zu einer Überschätzung des Q_{05} Quantils. Eine Überschätzung der Grundwasserneubildung führte in jedem Einzugsgebiet zu einer Überschätzung von Q_{05} , Q_{50} und Q_{Gesamt} .

In den Einzugsgebieten *Allenbach* und *Sitter* wird das Q_{50} Abflussquantil generell um 20 % überschätzt. Das Q_{95} Abflussquantil unterliegt im Einzugsgebiet *Ova da Cluozza* einer Unterschätzung von bis zu 60 %. Aufgrund der verwendeten Zielfunktion wird das Q_{05} Quantil am genauesten durch das Modell wiedergegeben.

Durch die Übertragung von Modellparametern auf unabhängige Zeiträume findet eine deutliche Veränderung (in manchen Fällen auch eine gegenläufige Entwicklung) der Größe der Abflussquantile statt.

(Nikolova, 2013) beobachtete ähnlich große Fehler in den Abflussquantilen im *Thur* Einzugsgebiet. Die durch Coron u. a. (2012) gemessenen Fehler im Median des Gesamtabflusses sind größer (bis >30% Abweichung) als der Mittelwert der in dieser Arbeit beobachteten Fehler (bis 20% Abweichung).

Nicht repräsentative Modellparameter können zu deutlichen Abflussfehlern führen, was besonders für hohe und niedrige Abflüsse gilt.

8. Schlussfolgerungen

Der Einfluss des Mittelwertes von Temperatur und Niederschlag auf die Modellparameter ist nicht eindeutig. Für einige Parameter gibt es zwar Tendenzen, diese werden jedoch durch die große Variabilität der kalibrierten Modellparameter zwischen Subperioden mit ähnlichen klimatischen Rahmenbedingungen überlagert.

Der mittlere Performance - Verlust der untersuchten (energielimitierten) Einzugsgebiete ist gering (-5.8 %). Das Verlassen des Kalibrierungszeitraumes führte jedoch in jedem Untersuchungsgebiet zu einem Abfall der Modellperformance.

Der Performance - Verlust ist mit Prozessen innerhalb des Modells erklärbar, jedoch nicht mit den Temperatur- und Niederschlagsabweichungen der einzelnen Subperioden. Die modell - internen Prozesse, die zu dem Performance - Verlust führen, sind je Einzugsgebiet verschieden.

Die glazio-nivalen Einzugsgebiete wiesen andere für den Performance - Verlust hauptsächlich verantwortliche Parameter auf als die nivalen Einzugsgebiete und das pluviale Einzugsgebiet.

Die Parameter TT und $SFCF$ sind für die quantitativ größten Performance - Verluste verantwortlich.

Durch einen nicht repräsentativen Parametersatz kann es zu großen Fehlern in den Monatssummen des modellierten Abflusses, wie auch in den Abflussquantilen, kommen.

Ein Kalibrierungszeitraum von fünf Jahren ist zu kurz und führte zu deutlich schlechteren Performance Werten im Validierungszeitraum. Wird das Modell am Gesamtzeitraum kalibriert, ist der Performance - Verlust gegenüber dem zeit-variierenden Kalibrierungsansatz vertretbar. Dennoch konnten mit zeit-variierenden Parametersätzen bei jedem Einzugsgebiet die besten Performance Werte erreicht werden.

Literaturverzeichnis

- [Abebe u. a. 2010] ABEBE, N. A. ; OGDEN, F. L. ; PRADHAN, A. R.: Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rainfall–runoff model: Implications for parameter estimation. In: *Journal of Hydrology* 389 (2010), S. 301–310
- [BAFU 2014] BAFU: *Bundesamt für Umwelt, Thema Hydrologische Grundlagen und Daten*. URL; <http://www.hydrodaten.admin.ch/de/>, abgerufen am 26.08.2014. 2014
- [Bastola u. a. 2011] BASTOLA, S. ; MURPHY, C. ; SWEENEY, J.: Evaluation of the transferability of hydrological model parameters for simulations under changed climatic conditions. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 8 (2011), S. 5891–5915
- [Bergström 1976] BERGSTRÖM, S.: Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. In: *Bulletin Series A* 52 (1976), S. 134 pp.. – Department of Water Resources Engineering, Lund Institute of Technology, University of Lund
- [Beven und Binley 1992] BEVEN, K. ; BINLEY, A.: The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. In: *HYDROLOGICAL PROCESSES* 6 (1992), S. 279–298
- [Birsan u. a. 2005] BIRSAN, M.-V. ; MOLNAR, P. ; BURLANDO, P. ; PFAUNDLER, M.: Streamflow trends in Switzerland. In: *Journal of Hydrology* 314 (2005), S. 312–329. – doi:10.1016/j.jhydrol.2005.06.008
- [Brigode u. a. 2013] BRIGODE, P. ; OUDIN, L. ; PERRIN, C.: Hydrological model parameter instability: A source of additional uncertainty in estimating the hydrological impacts of climate change? In: *Journal of Hydrology* 476 (2013), S. 410–425
- [Chiew u. a. 2009] CHIEW, F. H. S. ; TENG, J. ; VAZE, J. ; POST, D. A. ; PERRAUD, J. M. ; KIRONO, D. G. C. ; VINEY, N. R.: Estimating climate change impact on runoff across southeast Australia: Method, results, and implications of the modeling method. In: *Water Resour. Res.* 45 (2009). – W10414, doi:10.1029/2008WR007338

- [Coron u. a. 2011] CORON, L. ; ANDRÉASSIAN, V. ; BOURQUI, M. ; PERRIN, C.: Pathologies of hydrological models used in changing climatic conditions: a review. In: *IAHS Publ.* 344 (2011). – Hydro-climatology: Variability and change (Proceedings of symposium J-H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011)
- [Coron u. a. 2012] CORON, L. ; ANDRÉASSIAN, V. ; PERRIN, C. ; LERAT, J. ; VAZE, J. ; BOURQUI, M. ; ; HENDRICKX, F.: Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. In: *WATER RESOURCES RESEARCH* 48 (2012). – W05552, doi:10.1029/2011WR011721
- [FAO 2014] FAO: *Food and Agriculture Organization of the United Nations. Natural Resources and Environment Department.* URL; <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e07.htm>, abgerufen am 04.09.2014. 2014
- [Gan u. a. 2014] GAN, Y. ; DUAN, Q. ; GONG, W. ; TONG, C. ; SUN, Y. ; CHU, W. ; YE, A. ; MIAO, C. ; DI, Z.: A comprehensive evaluation of various sensitivity analysis methods: A case study with a hydrological model. In: *Environmental Modelling Software* 51 (2014), S. 269–285
- [Gharari u. a. 2013] GHARARI, S. ; HRACHOWITZ, M. ; FENICIA, F. ; SAVENIJE, H. H. G.: An approach to identify time consistent model parameters: sub-period calibration. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci* 17 (2013), S. 149–161. – doi:10.5194/hess-17-149-2013
- [Gurtz u. a. 2003] GURTZ, J. ; ZAPPA, M. ; JASPER, K. ; LANG, H. ; VERBUNT, M. ; BADOUX, A. ; VITVAR, T.: A comparative study in modelling runoff and its components in two mountainous catchments. In: *Hydrol. Process.* 17 (2003), S. 297–311. – DOI: 10.1002/hyp.1125
- [HAdeS 2014] HADES: *Hydrologischer Atlas der Schweiz.* URL; <http://www.hades.unibe.ch/de/products/datenportal/downloads/geodaten>, abgerufen am 10.09.2014. 2014
- [Herman u. a. 2013] HERMAN, J. D. ; REED, P. M. ; WAGENER, T.: Time-varying sensitivity analysis clarifies the effects of watershed model formulation on model behavior. In: *Water Resour. Res.* 49 (2013), S. 1400–1414. – doi:10.1002/wrcr.20124
- [Lay u. a. 2009] LAY, M. L. ; GALLE, S. ; SAULNIER, G. M. ; BRAUD, I.: Exploring the relationship between hydroclimatic stationarity and rainfall-runoff model parameter

- stability: A case study in West Africa. In: *Water Resour. Res.* 43 (2009). – W07420, doi:10.1029/2006WR005257
- [Li u. a. 2011] LI, C. Z. ; ZHANG, L. ; WANG, H. ; ZHANG, Y. Q. ; YU, F. L. ; YAN, D. H.: The transferability of hydrological models under nonstationary climatic conditions. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 8 (2011), S. 8701–8736. – doi:10.5194/hessd-8-8701-2011
- [Lindström 1997] LINDSTRÖM, G.: A Simple Automatic Calibration Routine for the HBV Model. In: *Nord. Hydrol.* 28 (1997), S. 153–168
- [Menzel 1999] MENZEL, L.: Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN. (1999). – <https://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr54.pdf>
- [Merz u. a. 2011] MERZ, R. ; PARAJKA, J. ; BLÖSCHL, G.: Time stability of catchment model parameters: Implications for climate impact analyses. In: *WATER RESOURCES RESEARCH* 47 (2011)
- [Nash und Sutcliffe 1970] NASH, J. E. ; SUTCLIFFE, J. V.: River flow forecasting through conceptual models part I - A Discussion of Principles. In: *Journal of Hydrology* (1970)
- [Niel u. a. 2003] NIEL, H. ; PATUREL, J.-E. ; SERVAT, E.: Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability. In: *Journal of Hydrology* 278 (2003), S. 213–230
- [Nikolova 2013] NIKOLOVA, S.: *On the robustness of HBV hydrological model calibration under contrasted climate conditions*, Brandenburg University of Technology University of Zurich, Diplomarbeit, 2013
- [Oudin u. a. 2005] OUDIN, L. ; HERVIEU, Frédéric ; MICHEL, Claude ; PERRIN, Charles ; ANDRÉASSIAN, Vazken ; ANCTIL, Francois ; LOUMAGNE, Cécile: Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? Part 2 — Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. In: *Journal of Hydrology* 303 (2005), S. 290–306. – doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.026
- [Oudin u. a. 2006] OUDIN, Ludovic ; PERRIN, Charles ; MATHEVET, Thibault ; ANDRÉASSIAN, Vazken ; MICHEL, Claude: Impact of biased and randomly corrupted

- inputs on the efficiency and the parameters of watershed models. In: *Journal of Hydrology* 320 (2006), Nr. 1-2, S. 62–83. – ISSN 00221694
- [Poulin u. a. 2011] POULIN, Annie ; BRISSETTE, Francois ; LECONTE, Robert ; ARSENAULT, Richard ; MALO, Jean-Stephane: Uncertainty of hydrological modelling in climate change impact studies in a Canadian, snow-dominated river basin. In: *Journal of Hydrology* 409 (2011), Nr. 3-4, S. 626–636. – ISSN 00221694
- [Rauthe u. a. 2013] RAUTHE, M. ; STEINER, H. ; RIEDIGER, U. ; MAZURKIEWICZ, A. ; GRATZKI, A.: A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). In: *Meteorologische Zeitschrift* 22 (2013), Nr. 3, S. 235–256
- [Seeger 2013] SEEGER, S.: *Transit times and storage properties of mesoscale catchments in Switzerland*, Universität Freiburg, Institute for Hydrology, Diplomarbeit, 2013
- [Seibert 1997] SEIBERT, J.: Estimation of Parameter Uncertainty in the HBV Model. In: *Nordic Hydrology* 28 (4/5) (1997), S. 247–262
- [Seibert 2000] SEIBERT, J.: Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a generic algorithm. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 4(2) (2000), S. 215–224
- [Seibert 2003] SEIBERT, J.: Reliability of Model Predictions Outside Calibration Conditions. In: *Nordic Hydrology* 34 (5) (2003), S. 477–492
- [Seibert 2005] SEIBERT, J.: HBV-light version 2 User's Manual. (2005). – Stockholm University, Department of physical geography and quaternary geology
- [Seibert und Vis 2012] SEIBERT, J. ; VIS, M. J. P.: Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16 (2012), S. 3315–3325. – doi:10.5194/hess-16-3315-2012
- [Stahl u. a. 2013] STAHL, K. ; WEILER, M. ; SEIBERT, J. ; GERLINGER, K. ; STEINBRICH, A. ; FREUDIGER, D. ; FINGER, D. ; HOHMANN, C. ; BÖHM, M.: Abflusssanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels. In: *ASG Rhein Zwischenbericht Dez 2012-Dez 2013* (2013)

- [Staudinger u. a. 2014] STAUDINGER, M. ; WEILER, M. ; SEIBERT, J.: Quantifying sensitivity to droughts – an experimental modeling approach. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 11 (2014), S. 7659–7688
- [Tabari und Talaei 2014] TABARI, H. ; TALAEE, P. H.: Sensitivity of evapotranspiration to climatic change in different climates. In: *Global and Planetary Change* 115 (2014), S. 16–23. – <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.01.006>
- [Uhlenbrook u. a. 1999] UHLENBROOK, S. ; SEIBERT, J. ; LEIBUNDGUT, C. ; RODHE, A.: Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure. In: *Hydrological Sciences Journal* 44:5 (1999), S. 779–797. – DOI: 10.1080/02626669909492273
- [Vaze u. a. 2010] VAZE, J. ; POST, D. A. ; CHIEW, F.H.S. ; PERRAUD, J.-M. ; VINEY, N.R. ; TENG, J.: Climate non-stationarity – Validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. In: *Journal of Hydrology* 394 (2010), S. 447–457
- [Wagener u. a. 2003] WAGENER, T. ; MCINTYRE, N. ; LEES, M. J. ; WHEATER, H. S. ; GUPTA, H. V.: Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: Dynamic identifiability analysis. In: *Hydrol. Process.* 17 (2003), S. 455–476
- [Westra u. a. 2014] WESTRA, S. ; THYER, M. ; LEONARD, M. ; KAVETSKI, D. ; LAMBERT, M.: A strategy for diagnosing and interpreting hydrological model nonstationarity. In: *Water Resour. Res.* 50 (2014), S. 5090–5113. – doi:10.1002/2013WR014719
- [Zierl und Bugmann 2005] ZIERL, B. ; BUGMANN, H.: Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments. In: *WATER RESOURCES RESEARCH* 41 (2005), S. W02028. – doi:10.1029/2004WR003447

A. Anhang

A.1. verwendete Abkürzungen

Tabelle A.1.1.: Überblick über die verwendeten Abkürzungen.

50% Quantil des Abflusses	[mm]	Q_{50}
95% Quantil des Abflusses	[mm]	Q_{95}
05% Quantil des Abflusses	[mm]	Q_{05}
aktuelle Verdunstung	[mm]	AET
beobachteter Abfluss	[mm]	Q beob
Breitengrad	[rad]	φ
Dichte des Wassers	$[\frac{kg}{L}]$	ρ
extraterrestrische Strahlung	$[\frac{MJ}{cm^2 * Tag}]$	R_e
Grundwasserneubildung	[mm]	GWN
generalisierter Split Sample Test		GSST
inverser relativer Abstand Sonne Erde	[rad]	d_r
latenter Wärmefluss	$[\frac{MJ}{kg}]$	λ
modellierter Abfluss, Parametersatz wurde am Gesamtzeitraum kalibriert	[mm]	Q GSZ
modellierter Abfluss, Parametersatz wurde an der rezentesten Subperiode kalibriert	[mm]	Q SP
modellierter Abfluss, Parametersatz ist zeit-varierend	[mm]	Q GSST
potentielle Evaporation	$\frac{mm}{Tag}$	PE
Solarkonstante	$[\frac{MJ}{m^2 * Jahr}]$	G_{SC}
Sonnenwinkel	[rad]	ω_s
Tag im Jahr	[-]	J
Tagesmitteltemperatur	[°C]	T_a
Unterschiede im Modelloutput	[-]	ΔMO
Unterschiede in der Modellperformance	[-]	ΔPM
Wassergehalt in der HBV Bodenbox	[mm]	SM

A.2. Berechnete potentielle Evaporation

Für das Einzugsgebiet *Murg* wurden die höchsten potentielle Evaporation berechnet, das Einzugsgebiet *Dischma* weist die niedrigste berechnete potentielle Evaporation auf

A.2.1. Allgemein sind die errechneten Jahressummen der potentiellen Evapotranspiration realistisch (vgl. Gurtz u. a. (2003); Seeger (2013); Menzel (1999)).

Tabelle A.2.1.: Berechnete potentielle Evaporation der Einzugsgebiete.

<i>EZG</i>	<i>potentielle Evaporation [mm/Jahr]</i>
Allenbach	345
Dischma	250
Murg	583
Ova da Chuoza	268
Sitter	463

A.3. Zeitlicher Verlauf der kalibrierten Modellparameter

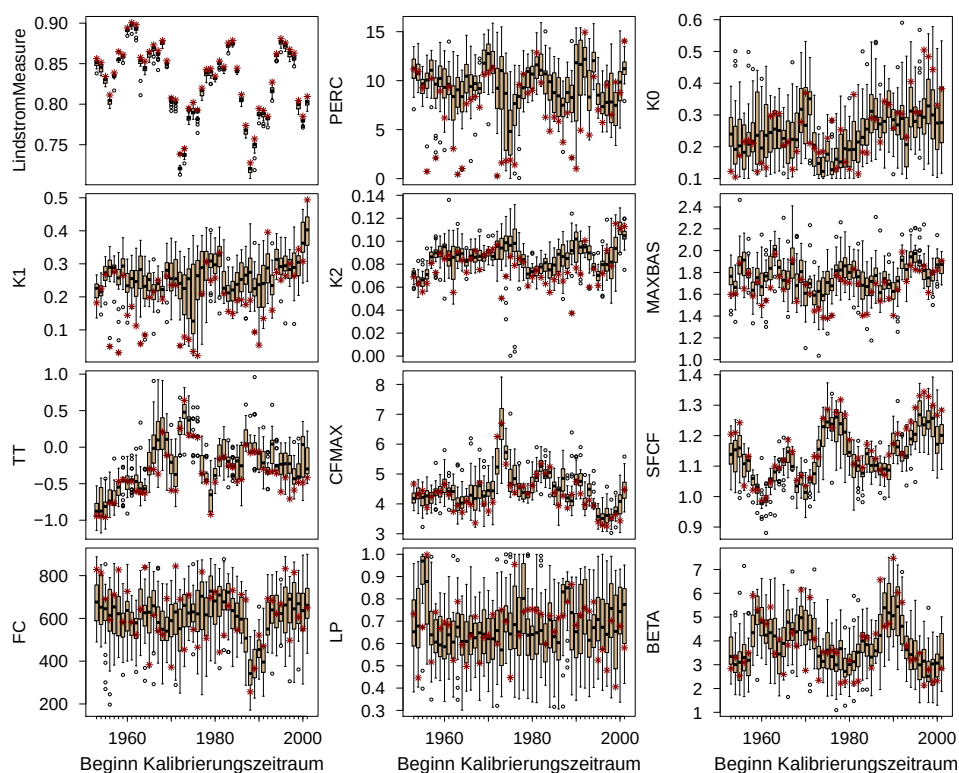


Abbildung A.3.1.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Allenbach*

A.3. ZEITLICHER VERLAUF DER KALIBRIERTEN MODELLPARAMETER

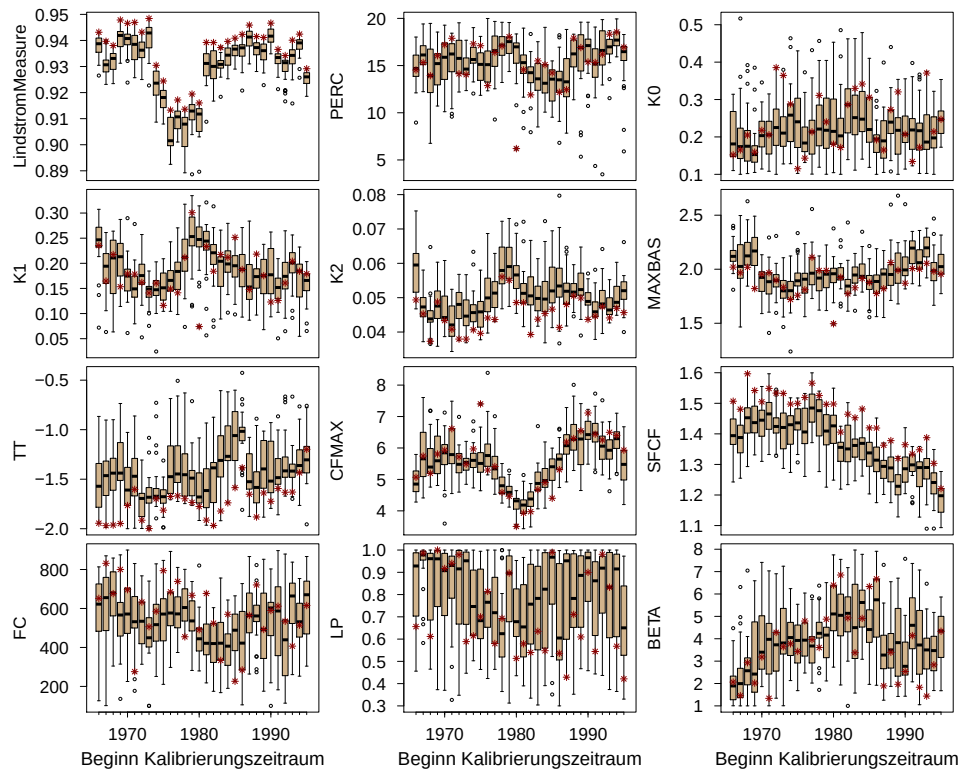


Abbildung A.3.2.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Dischma*

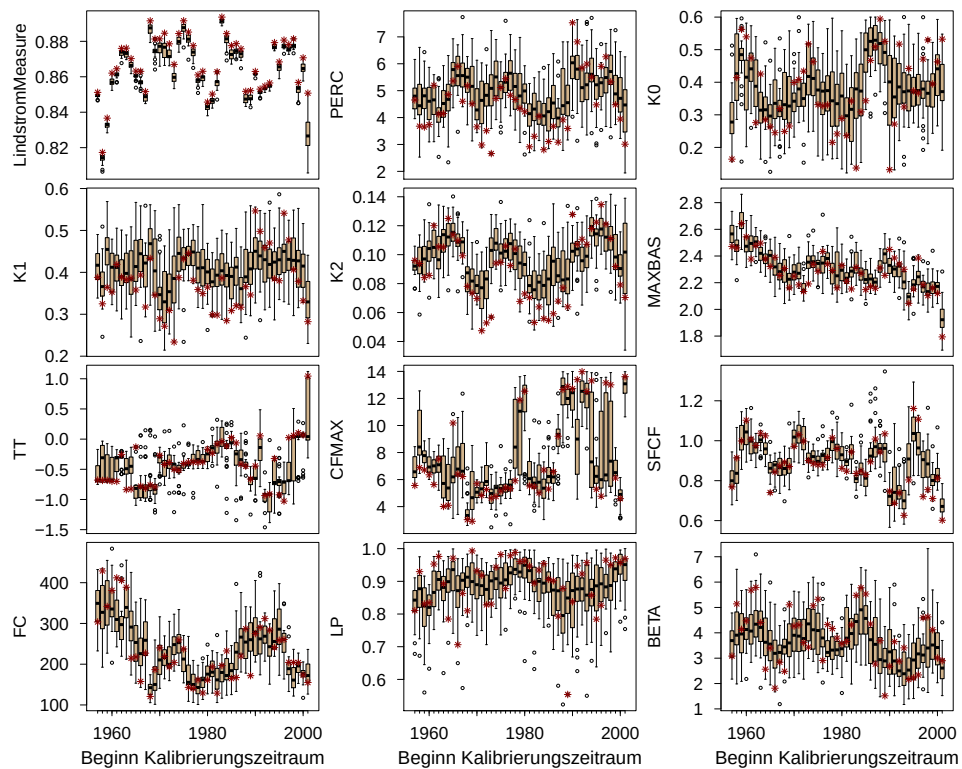


Abbildung A.3.3.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Murg*

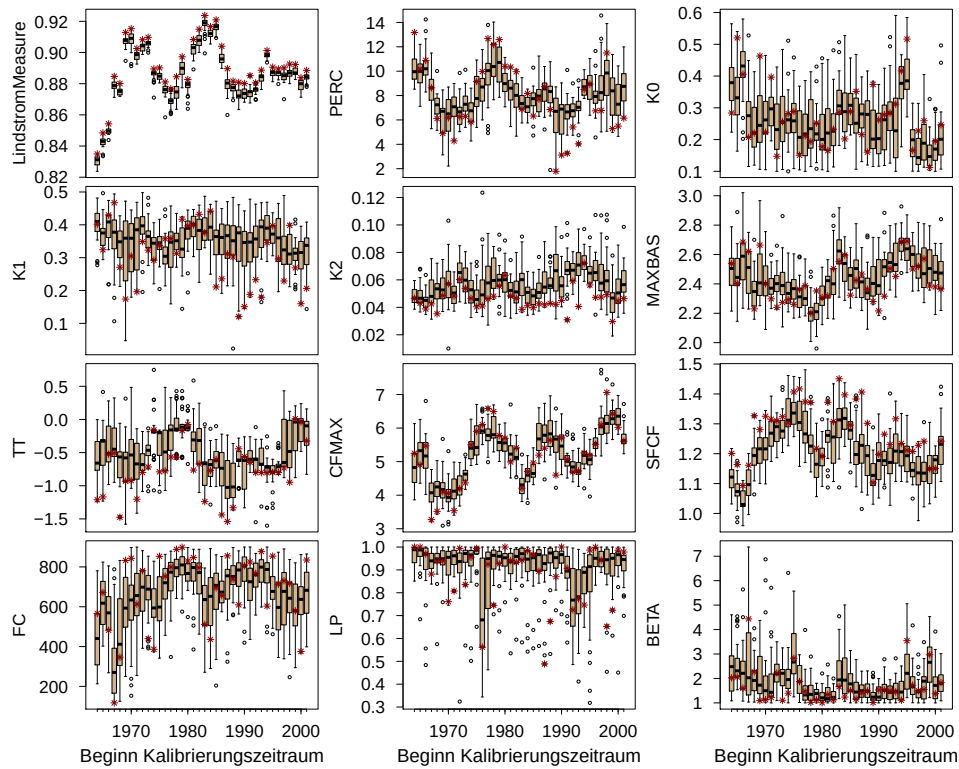


Abbildung A.3.4.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Ova da Cluoza*

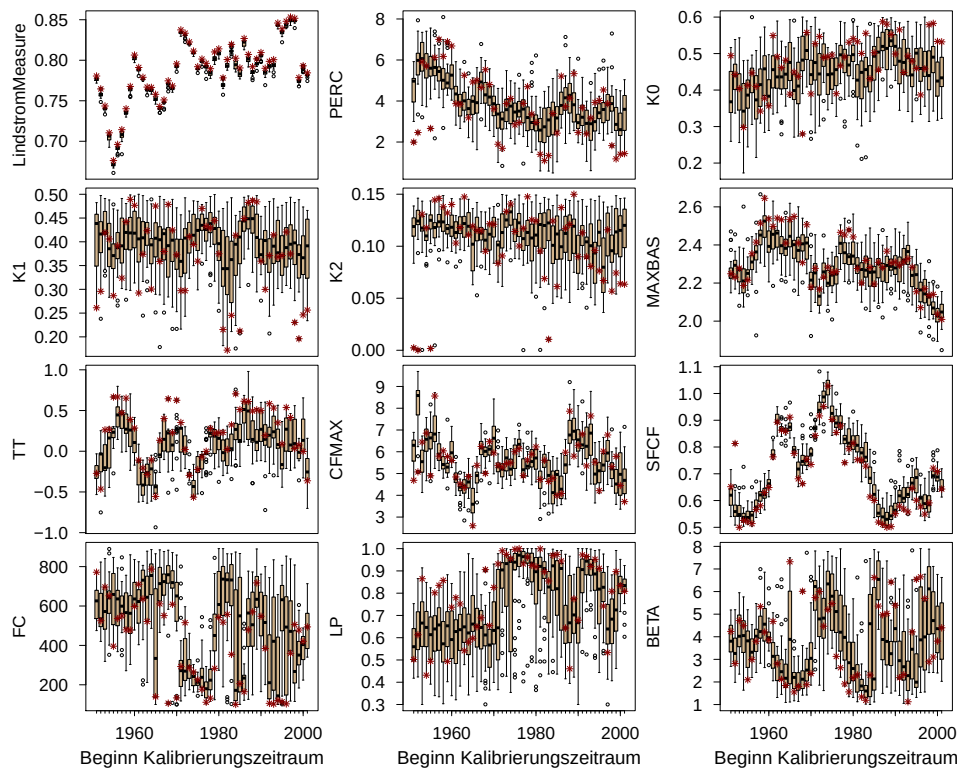


Abbildung A.3.5.: Kalibrierte Parameterwerte für das Einzugsgebiet *Sitter*

A.4. hydro - klimatische Verhältnisse der Subperioden

Dargestellt sind jeweils links die fünf- Jahresmittelwerte der Temperatur-, Niederschlags- und Abflussdaten mit linearem Trend (grau), sowie die Werte der Winter- und Sommermonate der fünf- Jahreszeiträume (mitte und rechts) mit linearem Trend (grau).

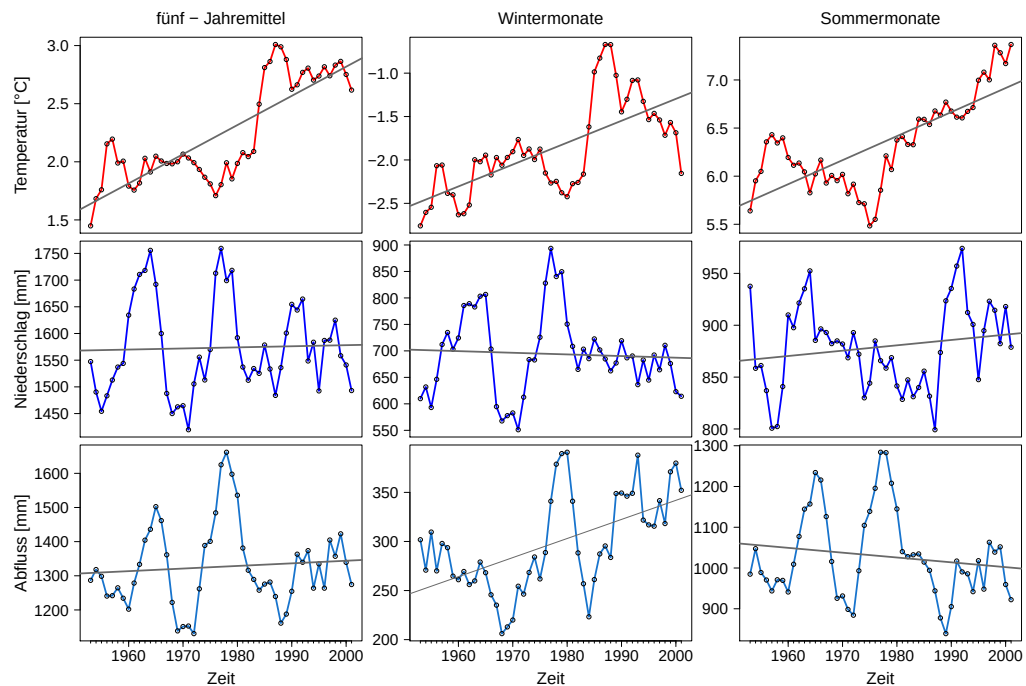


Abbildung A.4.1.: hydro - klimatische Verhältnisse im Einzugsgebiet *Allenbach*

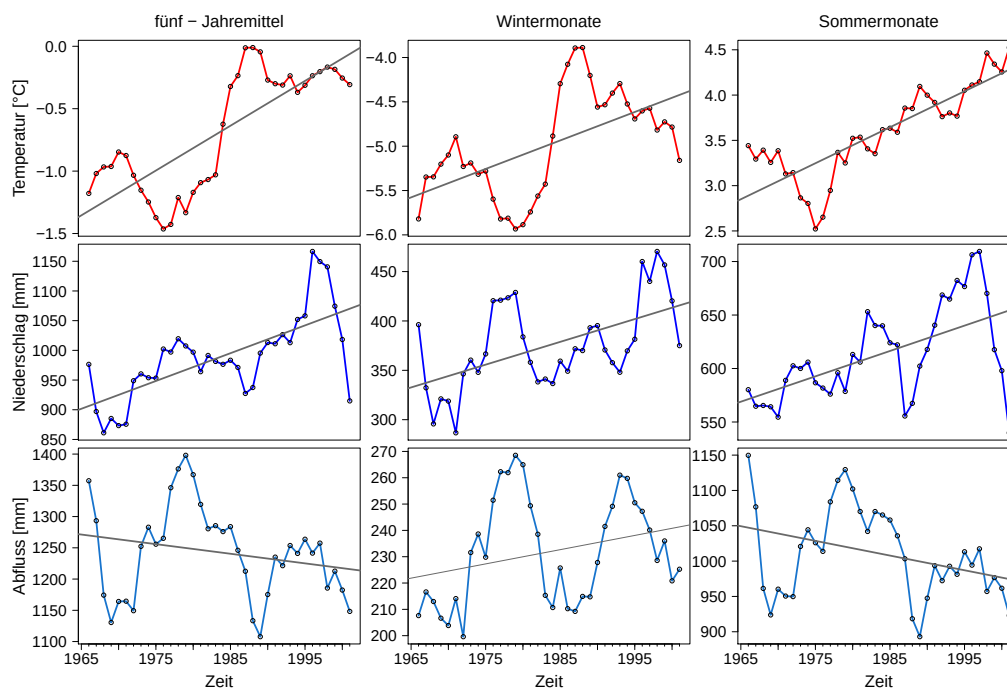


Abbildung A.4.2.: hydro - klimatische Verhältnisse im Einzugsgebiet *Dischma*

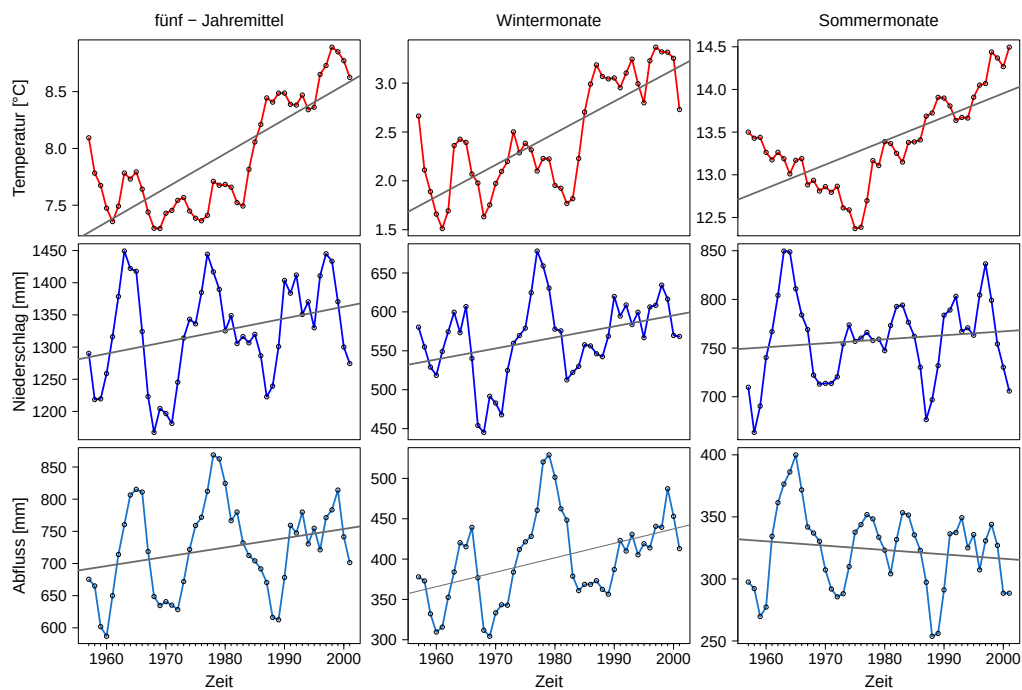


Abbildung A.4.3.: hydro - klimatische Verhältnisse im Einzugsgebiet *Murg*

A.4. HYDRO - KLIMATISCHE VERHÄLTNISSE DER SUBPERIODEN

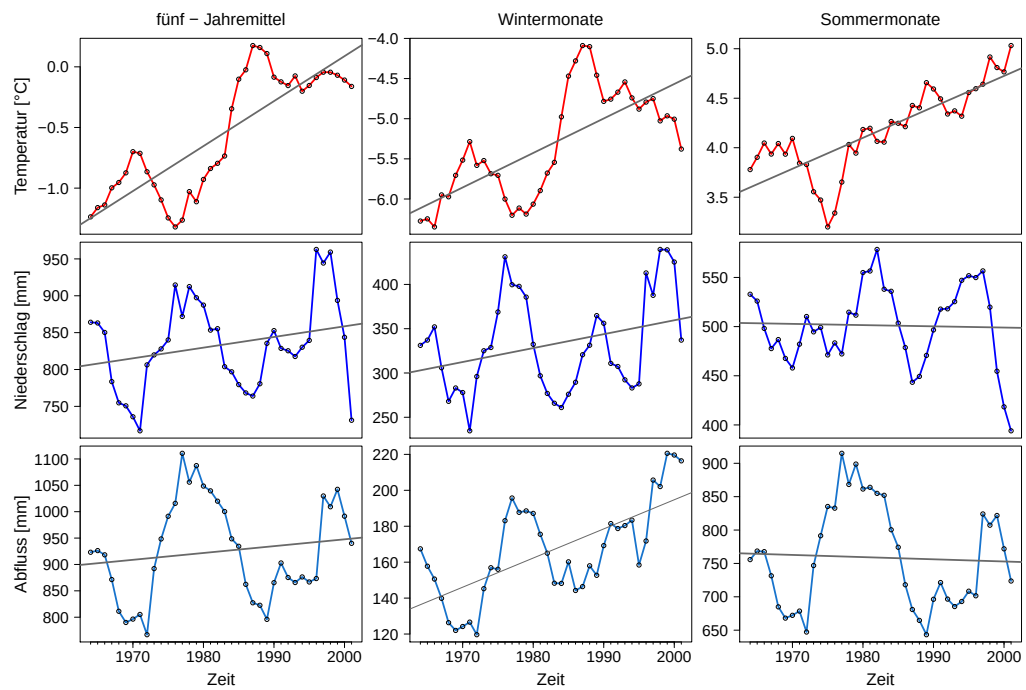


Abbildung A.4.4.: hydro - klimatische Verhältnisse im Einzugsgebiet *Ova da Cluozza*

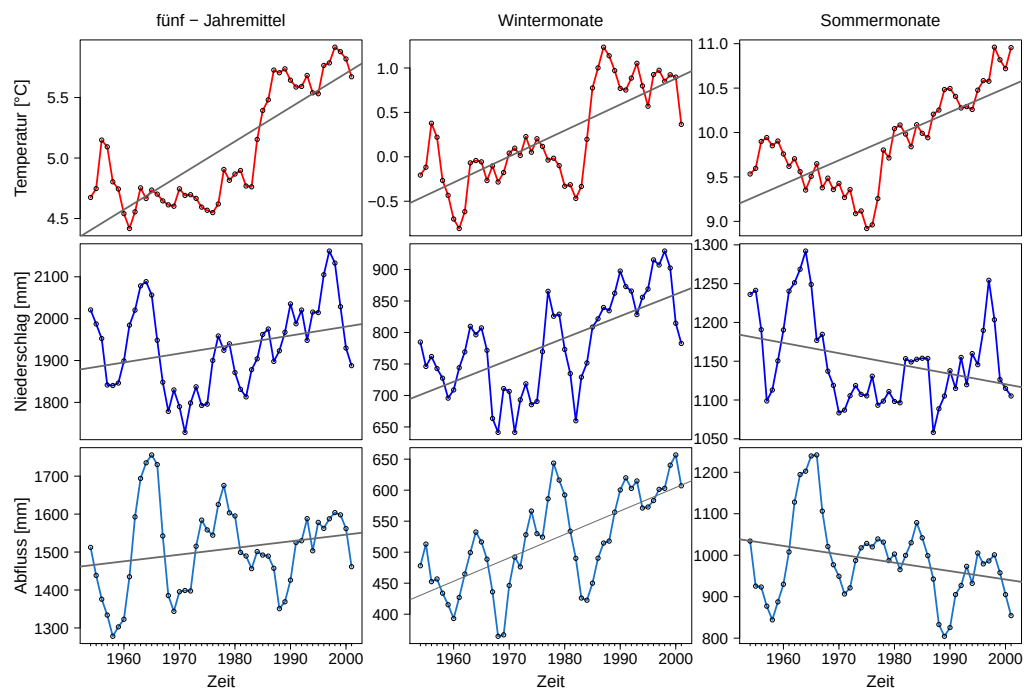


Abbildung A.4.5.: hydro - klimatische Verhältnisse im Einzugsgebiet *Sitter*

A.5. Plots der P/Q Verhältnisse der Einzugsgebiete

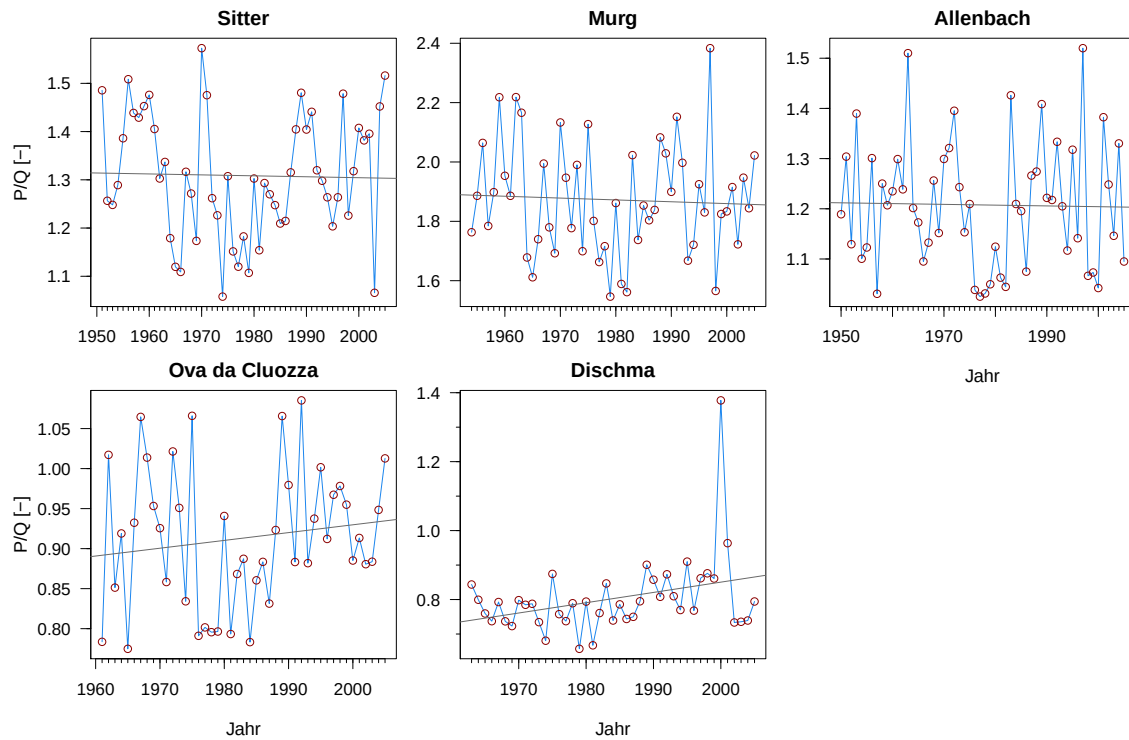


Abbildung A.5.1.: P/Q Verhältnisse der Untersuchungsgebiete

A.6. Durch HBV angepasste potentielle Evaporation

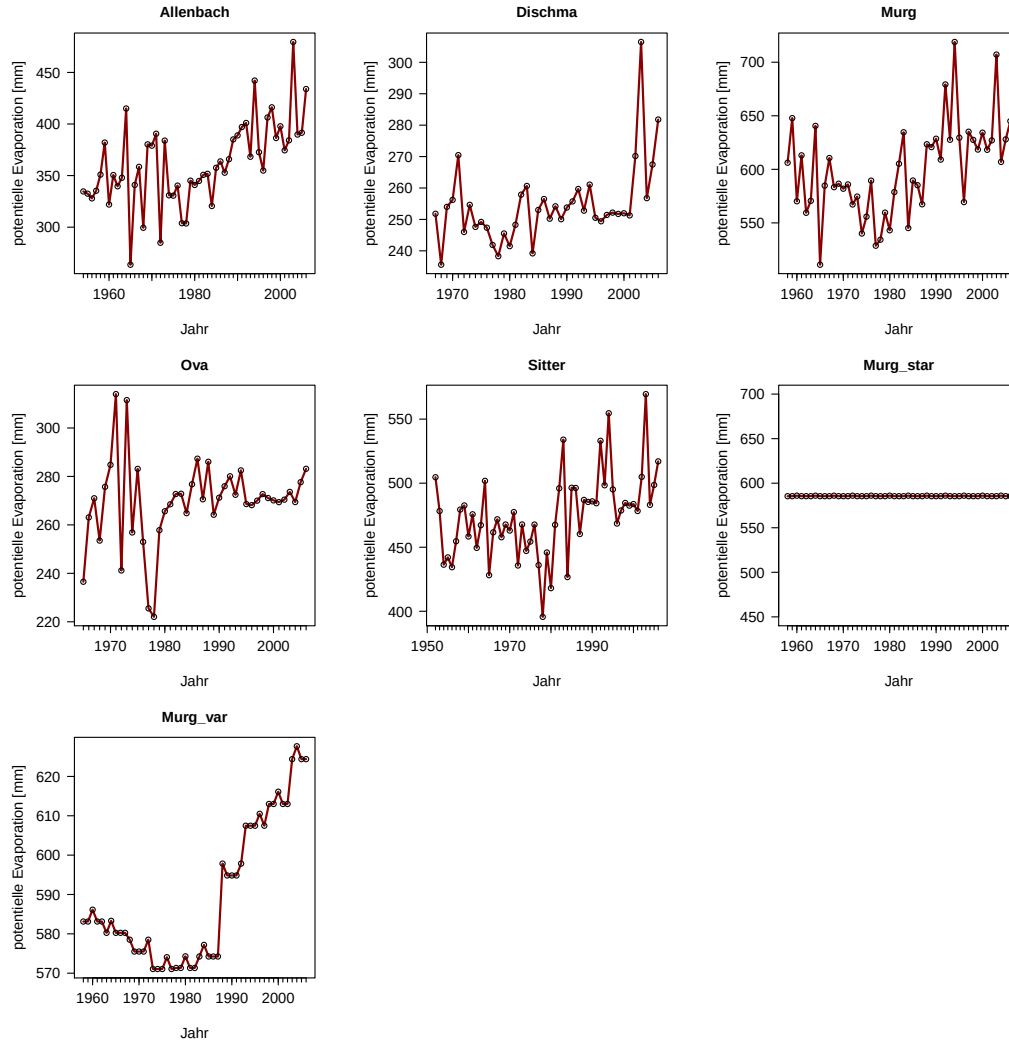


Abbildung A.6.1.: Jahreswerte der durch HBV angepassten potentiellen Evaporation aller Einzugsgebiet. Murg star : konstante potentielle Evaporation
— Murg var : für jeden Modellierungszeitraum neu berechnete potentielle Evaporation

A.7. Performance Verluste der abweichenden Evaporationsansätze im Einzugsgebiet Murg

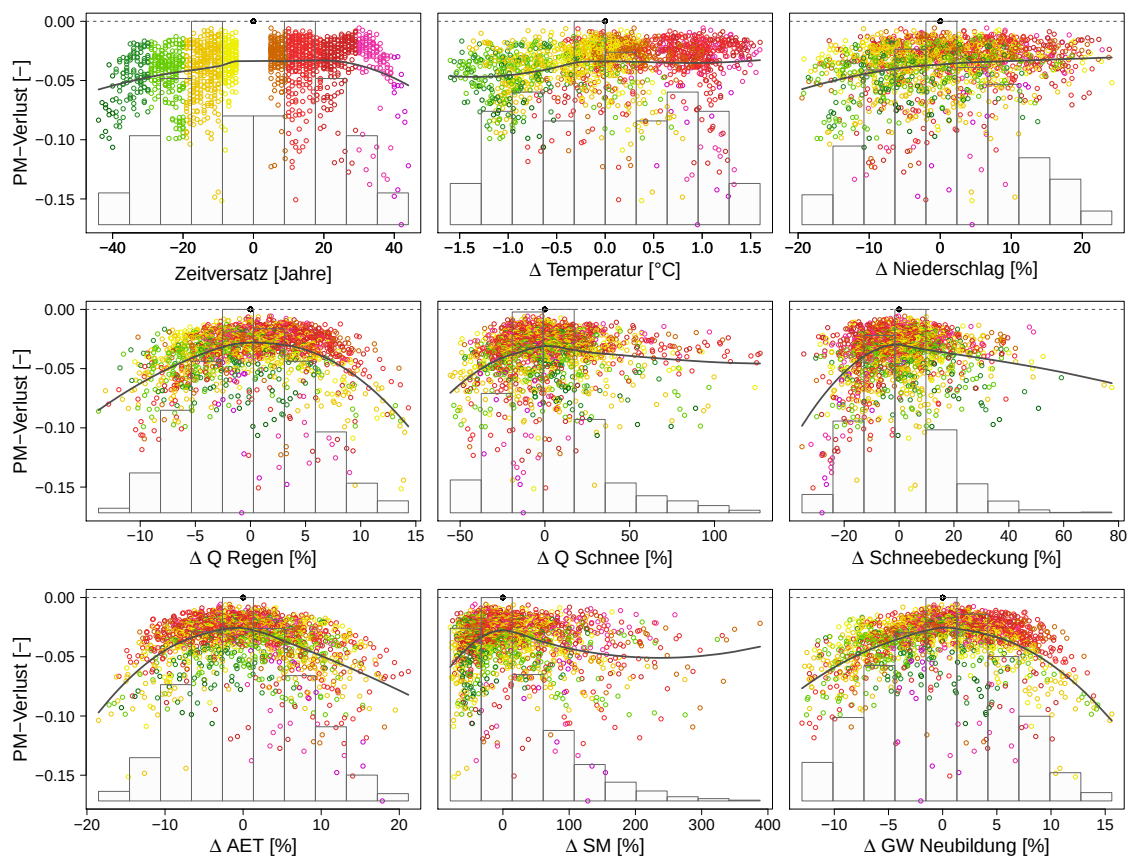


Abbildung A.7.1.: Performance (PM) Verlust der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen bei konstanter potentieller Evaporation. Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlagsabweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen

A.7. PERFORMANCE VERLUSTE DER ABWEICHENDEN EVAPORATIONSANSÄTZE IM EINZUGSGEBIET *MURG*

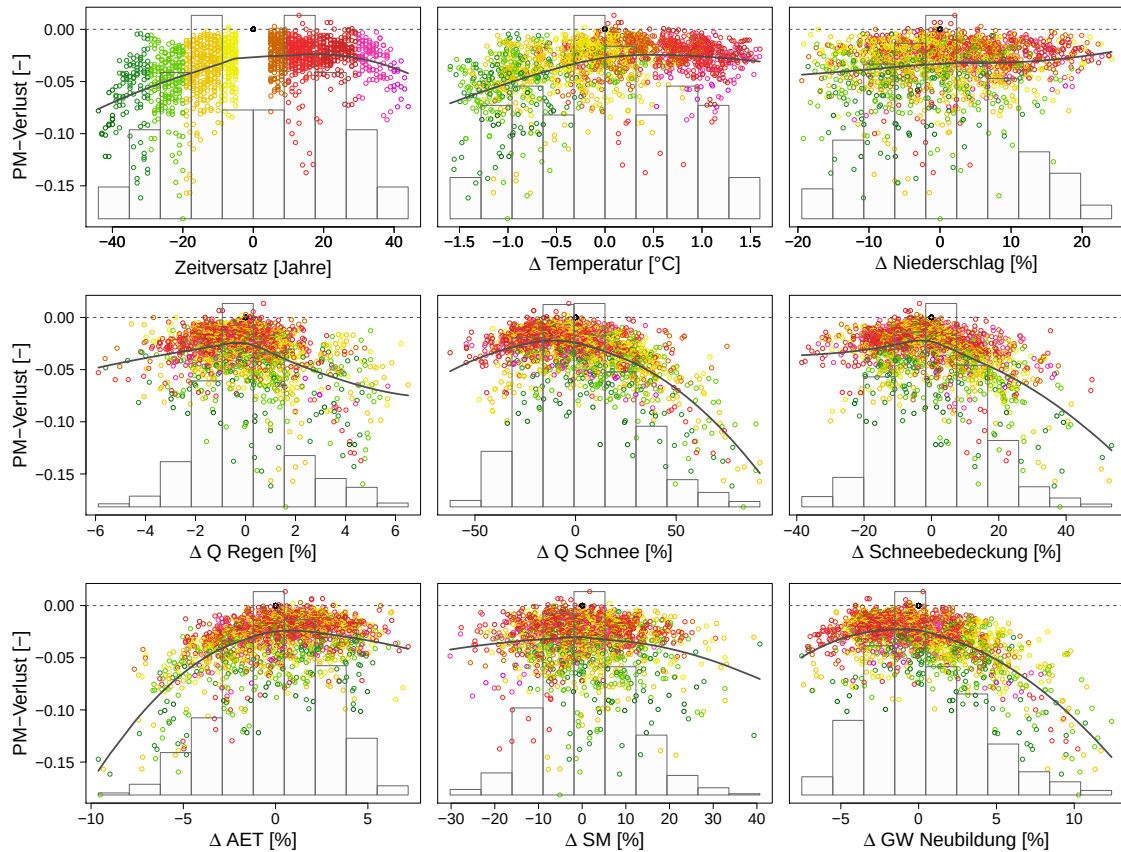


Abbildung A.7.2.: Performance (PM) Verlust der Validierungszeiträume in Bezug zu den Referenzzeiträumen bei für alle Subperioden separat berechneter potentieller Evaporation. Der PM Verlust ist dargestellt gegen Zeitversatz, Temperatur und Niederschlagsabweichung sowie gegen die Abweichung weiterer Modelloutputs zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum mit Häufigkeit der eingehenden Modellierungen

A.8. Sensitivität einzelner Parameter auf den Performance - Verlust

A.8. SENSITIVITÄT EINZELNER PARAMETER AUF DEN PERFORMANCE - VERLUST

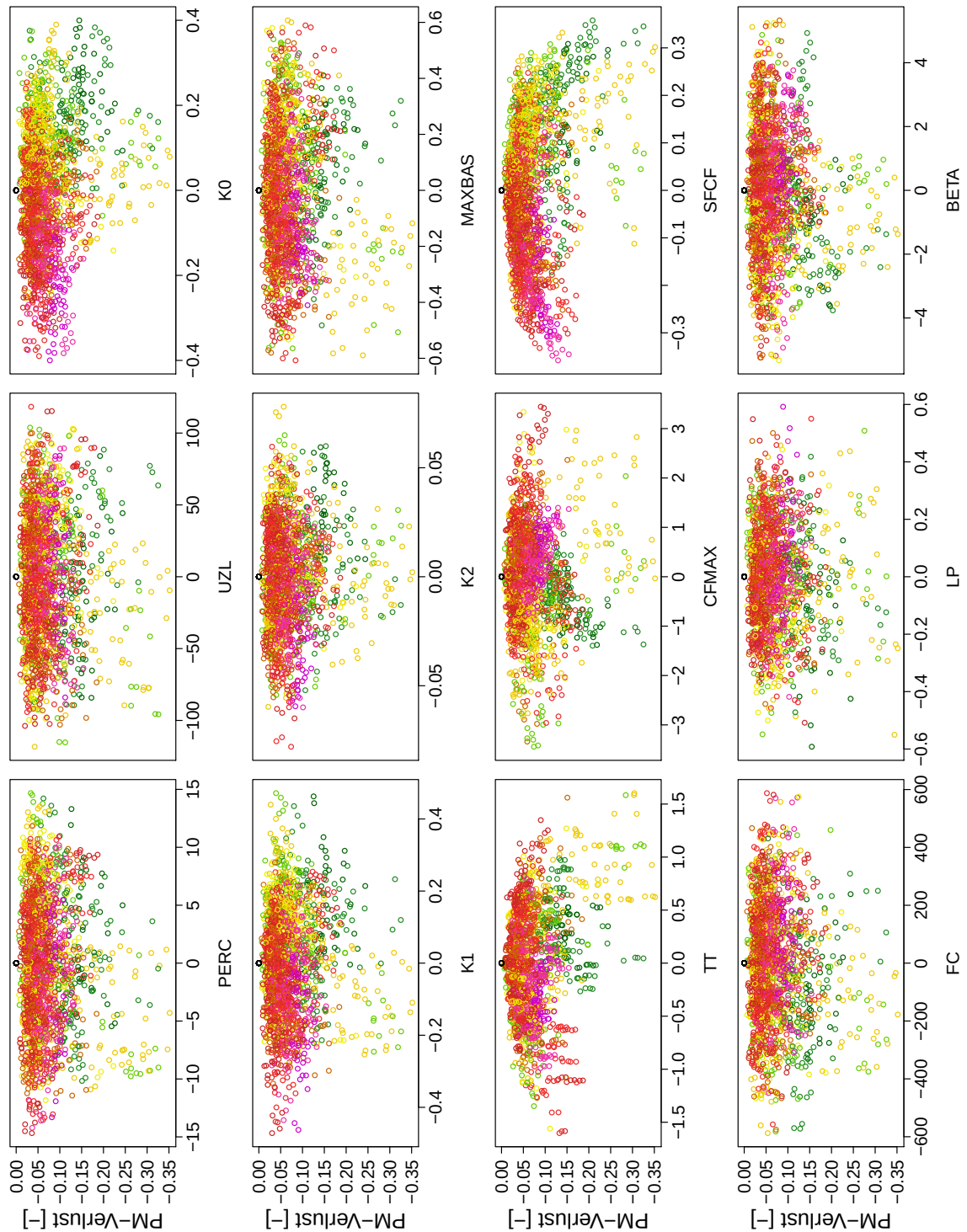


Abbildung A.8.1.: Performance - Verlust und Abweichungen in den Modellparametern zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet *Allenbach*. Die Färbung der Punkte basiert auf dem Zeitversatz zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum

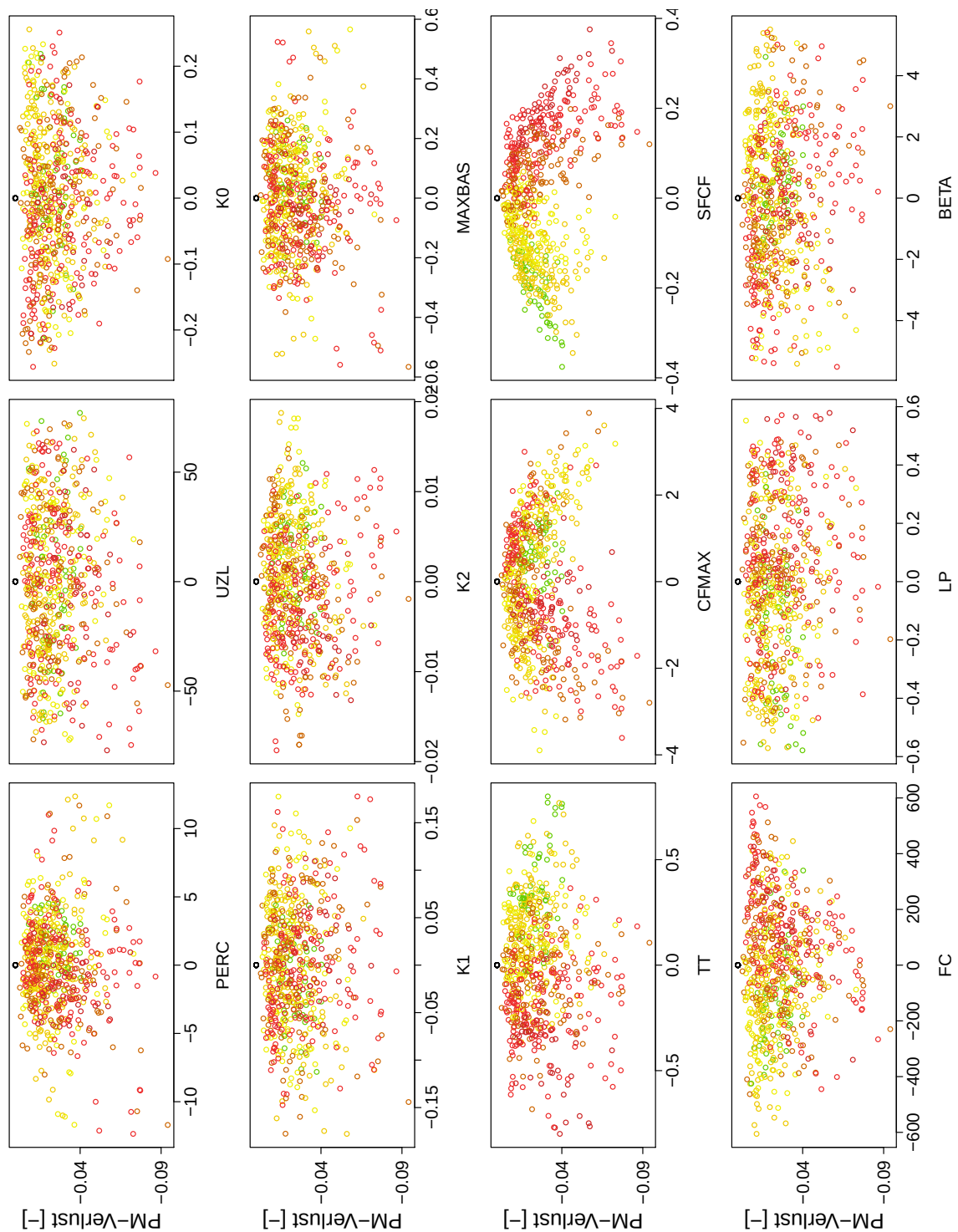


Abbildung A.8.2.: Performance - Verlust und Abweichungen in den Modellparametern zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet *Dischma*. Die Färbung der Punkte basiert auf dem Zeitversatz zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum

A.8. SENSITIVITÄT EINZELNER PARAMETER AUF DEN PERFORMANCE - VERLUST

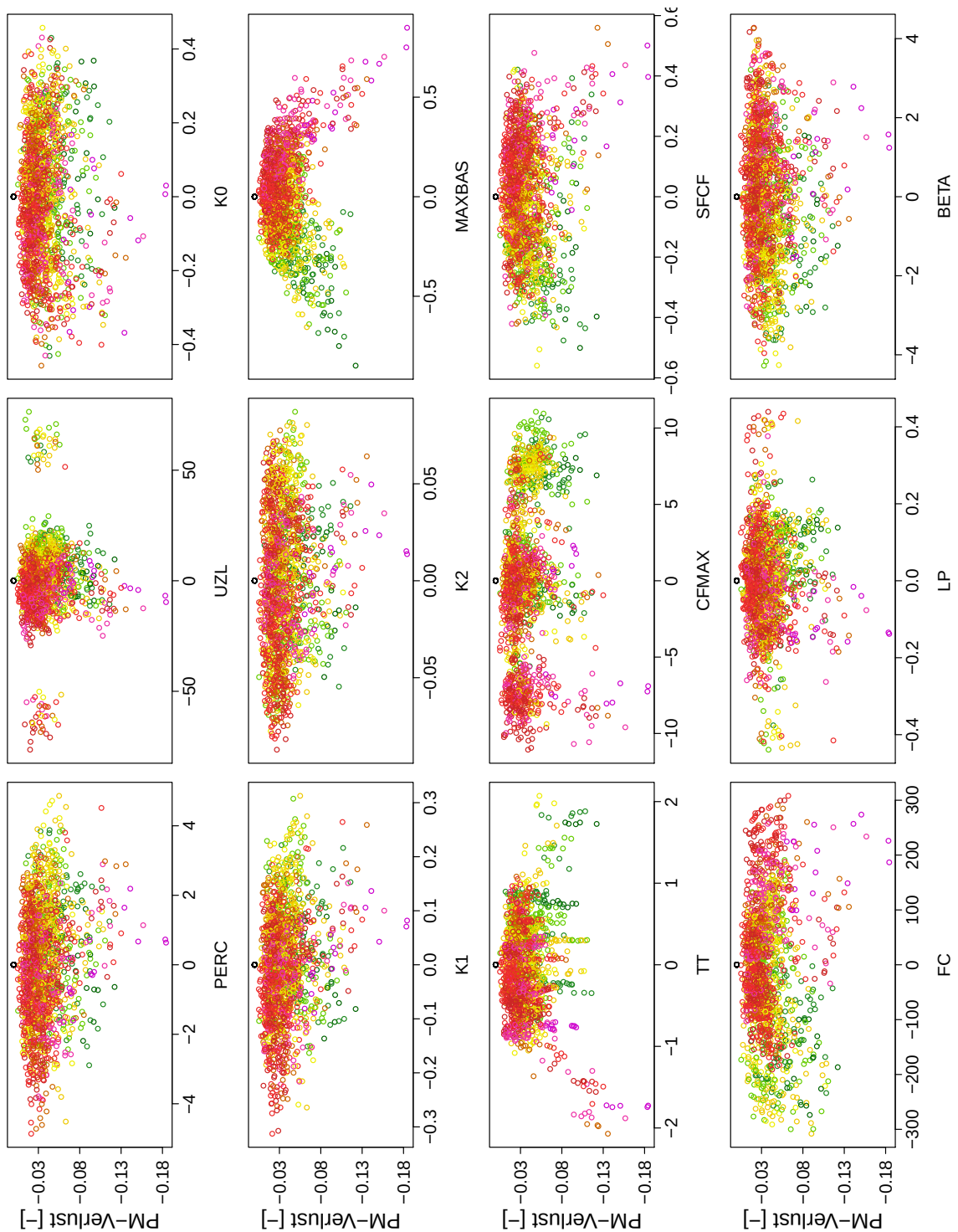


Abbildung A.8.3.: Performance - Verlust und Abweichungen in den Modellparametern zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet *Murg*. Die Färbung der Punkte basiert auf dem Zeitversatz zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum

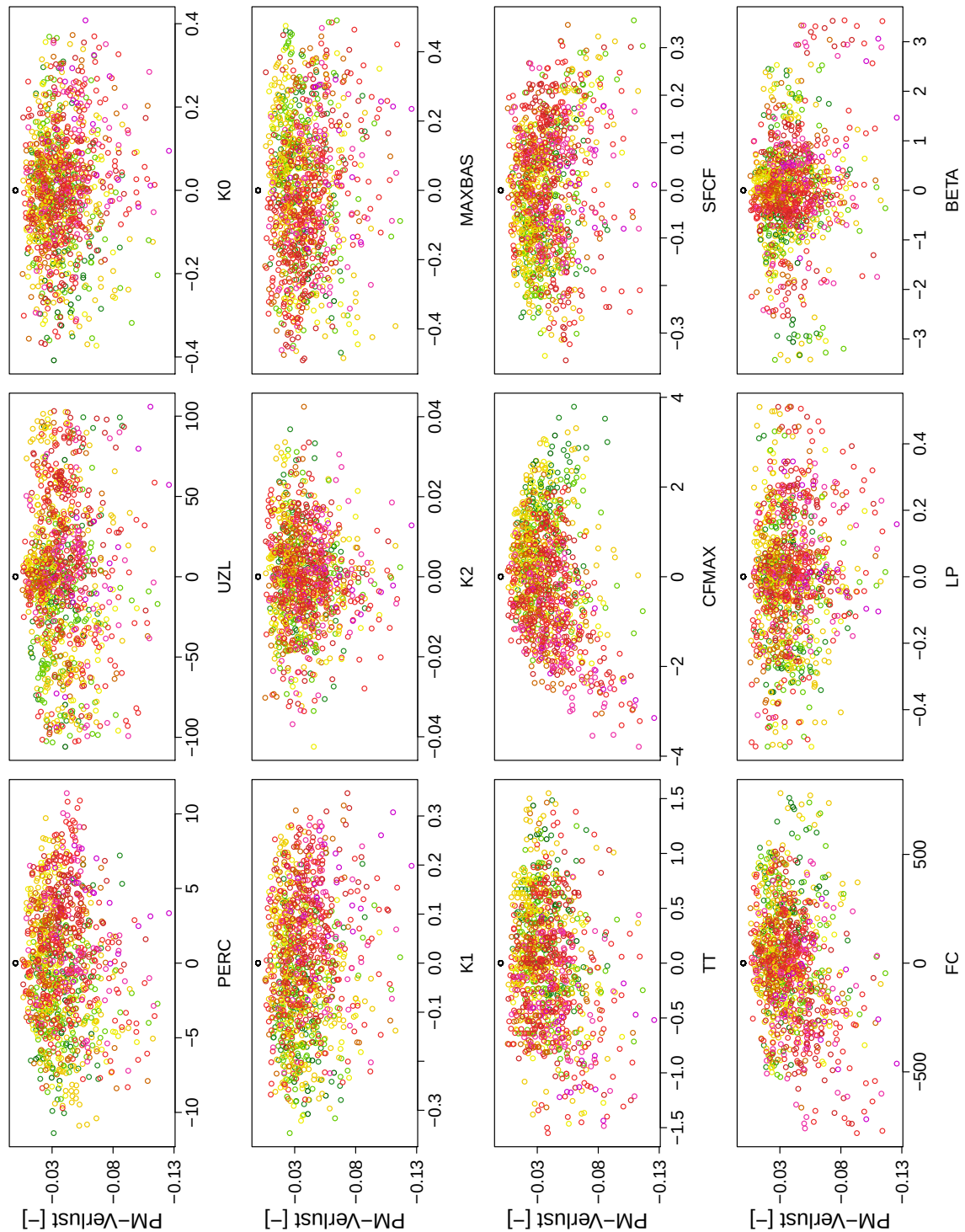


Abbildung A.8.4.: Performance - Verlust und Abweichungen in den Modellparametern zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet *Ova da Cluozza*. Die Färbung der Punkte basiert auf dem Zeitversatz zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum

A.8. SENSITIVITÄT EINZELNER PARAMETER AUF DEN PERFORMANCE - VERLUST

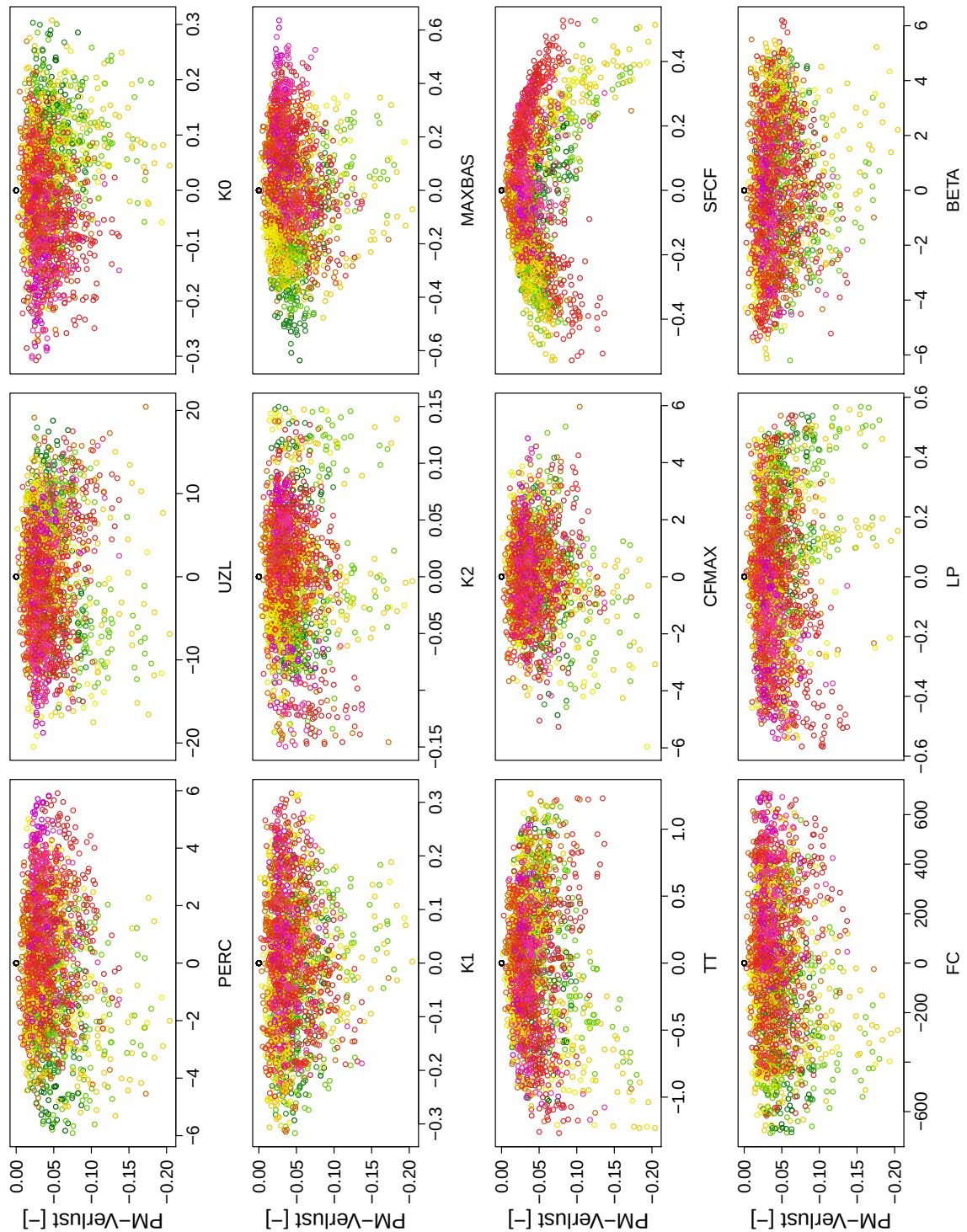


Abbildung A.8.5.: Performance - Verlust und Abweichungen in den Modellparametern zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum für das Einzugsgebiet *Sitter*. Die Färbung der Punkte basiert auf dem Zeitversatz zwischen Validierungs- und Referenzzeitraum

A.9. Implementierung des GSST in R

```

1 #-----
2 # Steuerung von HBV durch R:
3 #
4 # -Implementierung des GSST
5 #
6 # Claudius Fleischer, 2014
7 #-----
8
9 require(XML)
10
11 ##### Eingabe #####
12
13 cliApp <- "C:/.../HBV-light-CLI.exe" # Pfad zur HBV-light-CLI.exe
14
15 EZG <- "D:/.../" # Pfad zum Einzugsgebiet
16
17 run_number <- 2 # GAP-Run (Eingabe nur fuer benchmarking benoetigt)
18
19 warming <- 3 # Laenge der WarminUp Zeit [Jahre]
20 shift <- 1 # Zeitshift zwischen den Subperioden [Jahre]
21 window <- 5 # Groesse des Zeitfensters [Jahre]
22
23 pm_val.gap <- 6 # Zielfunktion. 6: Lindstroem Measure
24
25 gapsFile <- "/gaps:GAP_file.xml" # GAP-Parameter Grenzen
26
27 ##### Ende Eingabe #####
28
29 PTQ <- read.table(paste(EZG, "data/PTQ.txt", sep = ""), sep = "\t", dec = ".")
30 warmingUp <- if(as.numeric(substr(PTQ[2,1], 5,6)) < 10) {as.numeric(paste(substr(PTQ[2,1], 1,4), "10", "01", sep = ""))} else
31   if(as.numeric(substr(PTQ[2,1], 5,6)) >= 10) {as.numeric(paste(substr(PTQ[2,1], 1,4), "10", "01", sep = ""))+10000}
32 setwd(paste(EZG, "Results/", sep = ""))
33
34 shift <- shift*10000
35 window <- window*10000
36 warming <- warming*10000
37
38 starts <- warmingUp+30000
39 ends <- starts+50000-1001+930
40
41
42 #-----
43 # GAP Run (GSST)
44 #-----
45
46 # Zwischenvariablen initialisieren
47 warmingUpsave <- NULL
48 startssave <- NULL
49 endssave <- NULL
50
51 modelruns <- (20070930-(ends))/10000
52
53 warmingUp <- warmingUp-shift;
54 starts <- starts-shift;
55 ends <- ends-shift;
56
57 t1 <- Sys.time()
58 for (i in 1:modelruns)
59 {
60   warmingUp <- warmingUp+shift
61   starts <- starts+shift
62   ends <- ends+shift
63   cat(i,"/", modelruns, ":", starts, "\n \n")
64   #Change model settings
65   warmingUpCommand <- paste("/WarmingUp:", warmingUp, sep="")
66   startCommand <- paste("/Start:", starts, sep="")
67   endCommand <- paste("/End:", ends, sep="")
68   catchment <- EZG #path to catchment

```

A.9. IMPLEMENTIERUNG DES GSST IN R

```

69 #   evapFile <- paste("/evap:evap_2126_", substr(warmingUp,1,4), "_month_oudin.txt", sep = "")
70 #   tmeanFile <- paste("/tmean:t_mean2126_", substr(warmingUp,1,4), ".txt", sep = "")
71 ptqFile <- "/ptq:PTQ.txt"
72 gapsFile <- gapsFile
73 command <- paste(shQuote(cliApp), "Settings", catchment, warmingUpCommand, startCommand,
74   endCommand, ptqFile, gapsFile, sep=" ")
75 system(command, intern=T)
76
77 # GAP-Run durchfuehren
78 resultFolder <- paste(catchment, "results", sep = "") #path to result folder
79
80 command <- paste(shQuote(cliApp), "Run", catchment, "GAPRun", resultFolder, ptqFile, gapsFile,
81   sep=" ")
82 system(command)
83
84 file.rename(from = paste(resultFolder, "/GA_best1.txt", sep = ""),
85   to = paste(resultFolder, "/GA_best1_", starts, ".txt", sep = ""))
86
87 file.rename(from = paste(resultFolder, "/GAP_Parameter_", seq(1,25), ".xml", sep = ""), #seq
88   (1,100)
89   to = paste(resultFolder, "/GAP_Parameter_", seq(1,25), "_", starts, ".xml", sep = ""))
90
91 # Zwischenvariablen definieren
92 warmingUpsave <- rbind(warmingUpsave, warmingUp)
93 startssave <- rbind(startssave, starts)
94 endssave <- rbind(endssave, ends)
95 if(i == modelruns) {cat("Finished with a "); Sys.time()-t1}
96 }
97
98 # Zwischenvariablen in .txt file schreiben
99 vars <- cbind(warmingUpsave, startssave, endssave)
100 write.table(vars, file = paste(EZG, "ablage/StartVars_GAP.txt", sep = ""),
101   row.names = FALSE, col.names = c("WarmingUps", "Starts", "Ends"))
102
103 #####
104 # GSST benchmarking
105 # !header einlesen!
106 #####
107
108 vars <- read.table(paste(EZG, "ablage/GAP/GAP-", run_number, "/StartVars_GAP.txt", sep = ""), header
109   = TRUE)
110 vars[1,2]
111 vars[length(vars[,1]),3]
112 startssave <- vars[,2]
113 outersect <- function(x, y) # Gegenteil von intersect()
114 {
115   sort(c(setdiff(x, y),
116     setdiff(y, x)))
117 }
118
119 # Namen der GAP files
120 files_mc <- paste(EZG, "ablage/GAP/GAP-", run_number, "/results/GA_best1_", startssave, ".txt", sep
121   = "")
122 t2 <- Sys.time()
123
124 for (j in 1:length(files_mc))
125 {
126   # Bestes Parameterset aus GAP Simulationen raussuchen
127   # -----
128
129   # Inputfile
130   file_mc <- files_mc[j]
131
132   data <- read.csv(file_mc, sep = "\t", dec = ".")
133   data <- cbind(data, Fit = data$Reff*data$VolumeError)
134
135   namen <- names(data)
136
137   pm <- pm_val.gap # fuer GAP
138   namen[pm]

```



```

137 maxNSE <- max(data[,namen[pm]])
138 bestRun <- which(data[,namen[pm]] == maxNSE)
139 bestSet <- data[bestRun,]
140
141 # XML Parameter-File mit Parametern des besten GAP austauschen
142 #-----
143
144 bestSet
145 #   names(bestSet) <- c("No","PERC","UZL", "K0","K1","K2","MAXBAS", "PCALT", "TCALT", "Pelev",
146 #                       "TeleV","TT","CFMAX","SFCF","CFR", "CWH", "FC","LP","BETA")
147 names(bestSet) <- c("Runs.done","Reff","LogReff", "FlowWeightedReff","VolumeError","
148                   LindstromMeasure", "PeakReff",
149                   "MAREMeasure", "SpearmanRank", "ReffQObsSample", "SnowCoverRMSE",
150                   "Weighted_Obj_Function","PERC","UZL","K0","K1", "K2", "MAXBAS", "Cet",
151                   "PCALT","TCALT",
152                   "Pelev", "TeleV", "TT", "CFMAX", "SFCF", "CFR", "CWH", "FC", "LP", "BETA", "
153                   Fit")
154
155 set_1 <- c("PERC","UZL", "K0","K1","K2","MAXBAS", "Cet", "PCALT", "TCALT", "Pelev","TeleV")
156 set_2 <- c("TT","CFMAX","SFCF","CFR", "CWH", "FC","LP","BETA")
157
158 value_set1 <- bestSet[,set_1]
159 value_set2 <- bestSet[,set_2]
160
161 old <- xmlTreeParse(paste(EZG, "data/Parameter.xml", sep = ""))
162 root <- xmlRoot(old)
163
164 for(p in 1:length(set_1)){xmlValue(root[[1]][[set_1[p]]])<-bestSet[set_1[p]]}
165 for(p in 1:length(set_2)){xmlValue(root[[2]][[1]][[set_2[p]]])<-bestSet[set_2[p]]}
166 for(p in 1:length(set_1)){xmlValue(root[[3]][[1]][[set_1[p]]])<-bestSet[set_1[p]]}
167 for(p in 1:length(set_2)){xmlValue(root[[3]][[2]][[1]][[set_2[p]]])<-bestSet[set_2[p]]}
168
169 neu <- root
170 rm(old)
171 rm(root)
172
173 saveXML(neu,paste(EZG, "data/Parameter_neu", startssave[j], ".xml", sep = "")) # Parameter.xml
174 fuer SingleRun speichern
175
176 #-----
177 # Single Run (GSST)
178 #-----
179
180 vars[1,2]
181 vars[length(vars[,1]),3]
182 sequenz <- seq(vars[1,2],vars[length(vars[,1]),2], by = shift)
183 cutter <- seq(startssave[j]-(window-10000), startssave[j]+(window-10000), by = shift) #
184 abhaengige SP ausschneiden
185 cutter <- cutter[!cutter<vars[1,2] & !cutter>vars[length(vars[,1]),2]]
186 sequenz <- outersect(sequenz,cutter)
187 sequenz <- sort(c(sequenz, startssave[j])) # Referenzmodellierung einfuegen
188 filenames <- NULL
189
190 # Single Run fuer unabhaengige Validierungszeitraeume und Referenzzeitraum (GSST benchmarking)
191 for (k in sequenz)
192 {
193   warmingUpsingle <- k - warming;
194   startssingle <- k
195   endssingle <- k + window-1001+930
196   cat("\n", rep(" ", 20), "\n", "warming up:", "\t \t \t \t", warmingUpsingle,"\n",
197       "start Simulation:", "\t", startssingle, "\n", "end simulation:", "\t \t ",
198       endssingle, "\n", rep(" ", 20), "\n")
199
200   #Change model settings
201   warmingUpCommand <- paste("/WarmingUp:", warmingUpsingle, sep="")
202   startCommand <- paste("/Start:", startssingle, sep="")
203   endCommand <- paste("/End:", endssingle, sep="")
204   catchment <- EZG #path to catchment
205   #   evapFile <- paste("/evap:evap_2126_", substr(warmingUpsingle,1,4), "_month_oudin.txt",
206   #   sep = "")
207   #   tmeanFile <- paste("/tmean:t_mean2126_", substr(warmingUpsingle,1,4), "_month_oudin.txt
208   #   ", sep = "")
209   ptqFile <- "/ptq:PTQ.txt"

```

A.9. IMPLEMENTIERUNG DES GSST IN R

```

203     pFile <- paste("/p:Parameter_neu", startssave[j], ".xml", sep = "")
204     command <- paste(shQuote(cliApp), "Settings", catchment, warmingUpCommand, startCommand,
205                     endCommand, ptqFile, pFile, sep=" ");
206     system(command, intern=T)
207
208     # Single Run
209     resultFolder <- paste(catchment, "results", sep = "") #path to result folder
210
211     command <- paste(shQuote(cliApp), "Run", catchment, "SingleRun", resultFolder, ptqFile,
212                     pFile, sep=" ")
213     system(command)
214
215     #resultFile nach Run umbenennen
216     file.rename(from = paste(resultFolder, "/Results.txt", sep = ""), to = paste(resultFolder,
217                                         "/Results_", startssave[j], "_", startssingle, ".txt", sep = ""))
218     file.rename(from = paste(resultFolder, "/Summary.txt", sep = ""), to = paste(resultFolder,
219                                         "/Summary_", startssave[j], "_", startssingle, ".txt", sep = ""))
220     filenames <- cbind( filenames, startssingle)
221 }
222
223 files <- dir(pattern = "*.txt")
224 result_files <- files[substr(files, 1, 7) == "Results"]
225 summary_files <- files[substr(files, 1, 7) == "Summary"]
226
227 dir.create(paste(EZG, "ablage/GAP/GAP_", run_number, "/benchmark", sep = ""))
228 file.copy(from = c(result_files, summary_files), to = c(paste(EZG, "ablage/GAP/GAP_", run_number, "/
229                     benchmark/", result_files, sep = ""),
230                     paste(EZG, "ablage/GAP/GAP_", run_number, "/benchmark/", summary_files, sep = "")),
231           overwrite = FALSE)
232 file.remove(result_files, summary_files)
233
234 cat("Finished with a "); Sys.time()-t2

```

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Ort, Datum

Unterschrift