




GEO 511 Masterarbeit

Die Verwendung phänologischer Daten zur Verbesserung hydrologischer Modelle während Trockenperioden



Fabian Ringli
09-724-113

Abgabedatum: 30.01.2015

Abteilung Hydrologie und Klima (H2K)
Geographisches Institut
Universität Zürich

Betreuung:
Dr. Tracy Ewen
Dr. Maria Staudinger

Fakultätsmitglied:
Prof. Dr. Jan Seibert

Zusammenfassung

Trockenperioden sind ein in vielerlei Hinsicht relevantes Problem und dürften im Rahmen des Klimawandels zukünftig häufiger auftreten. Dabei spielt eine mögliche Vorhersage solcher Ereignisse eine bedeutende Rolle. Als mögliche Instrumente würden sich dazu hydrologische Modelle eignen, die jedoch oft auf grosse Abflussmengen ausgerichtet sind und Niedrigabflussperioden nur ungenügend abbilden. Ein Grund dafür dürfte sein, dass die Modellkalibrierung meist keine saisonalen Unterschiede berücksichtigt, obschon sich etwa das Rezessionsverhalten und insbesondere die Evapotranspiration in Zusammenhang mit der Ausbildung des Blätterdachs zwischen Sommer und Winter stark unterscheiden dürften. Diese Arbeit geht der Frage nach, ob ein Miteinbezug der Saisonalität die Modellierung solcher Trockenperioden verbessern kann. Dabei wird auch untersucht, ob es Unterschiede zwischen einer fixen Jahreszeitendefinition und einer flexiblen Festlegung durch Miteinbezug phänologischer Daten gibt. Unterschiede zwischen Gebieten mit nadelwerfender und Laubvegetation sowie zu einem Vergleichsstandort ohne saisonale Vegetation interessierten ebenfalls. Die Modellierungsversuche wurden an fünf kleineren bis mittleren Einzugsgebieten in der Schweiz durchgeführt. Verwendet wurde dazu das konzeptuelle HBV-Modell. Dabei wurden Daten zu Blattausbildung und Blattfall in den Modellierungsprozess miteinbezogen und anschliessend die Modellgüte detailliert auf saisonale Regelmässigkeiten sowie Zusammenhänge zur Abflussmenge hin untersucht. Es hat sich gezeigt, dass verschiedene Modellparameter bei einer separaten Winter- und Sommerkalibrierung effektiv unterschiedliche Werte annehmen. Im Hinblick auf die Modellgüte ergaben sich Verbesserungen durch die phänologische Kalibrierung während des Winters und tendenziell gegen Ende des Sommers, was mit dem entsprechenden Rezessionsverhalten in Verbindung gebracht werden kann. Während den Phasen der Vegetationsentwicklung ergab sich keine Verbesserung. Dafür konnte klar aufgezeigt werden, dass eine Berücksichtigung der Saisonalität im Modellierungsprozess dazu führt, dass Trockenperioden praktisch durchwegs besser erfasst werden, wenngleich sich diese Verbesserungen nach wie vor auf eher bescheidenem Niveau bewegen. Bestätigt hat sich auch, dass diese Effekte vor allem in Gebieten mit Laubgehölz auftreten, während im Einzugsgebiet mit nadelwerfender Lärche nur geringe, beim laublosen Gebiet gar keine Auswirkungen festzustellen waren.

Inhalt

Abbildungen.....	1
Tabellen.....	3
1. Einleitung.....	4
1.1. Definition Trockenheit	4
1.2. Trockenheit und Klimawandel.....	6
1.3. Trockenheit in der hydrologischen Forschung und hydrologische Modelle	7
1.4. Abflussbildung und Saisonalität.....	9
1.5. Saisonalität in hydrologischen Modellen	11
2. Fragestellungen.....	12
3. Vorgehen.....	14
3.1. Methodik allgemein.....	14
3.2. HBV-Modell	14
3.3. Benötigte Inputdaten.....	18
3.3.1. PTQ-File	18
3.3.2. Evaporation-File.....	19
3.3.3. T_mean-File	20
3.3.4. Elevation-File.....	20
3.4. Einbezug der Phänologie.....	21
3.5. Auswahl der Einzugsgebiete.....	25
3.5.1. Auswahlkriterien.....	25
3.5.2. Überblick über die gewählten Einzugsgebiete	28
3.6. Modellkalibrierung.....	31
3.6.1. GAP-Optimierung	31
3.6.2. Wahl der Modellstruktur	33
3.6.3. Parameter-Wahl.....	33
3.6.4. Modellgüte.....	35
3.6.5. Anpassungsversuche Evapotranspirationswerte	36
3.6.6. Variabilität der Modellgüte.....	37
3.7. Definition Trockenperioden	37
4. Resultate	39
4.1. Allgemeine Modellgüte.....	39
4.2. Parameterausprägung	40
4.2.1. Schnee-Routine.....	43
4.2.2. Boden-Routine.....	43
4.2.3. Grundwasser-Routine.....	44
4.2.4. Abfluss-Routine.....	44
4.2.5. Höhenabhängige Parameter.....	45

4.3.	Aktuelle Evapotranspiration.....	45
4.4.	Modellgüte.....	46
4.4.1.	Allgemeine Bemerkungen	46
4.4.2.	FMARE.....	48
4.4.3.	LogReff.....	52
4.4.4.	Reff.....	52
4.5.	Vergleich der Modellergebnisse.....	53
4.5.1.	Mentue	54
4.5.2.	Ergolz.....	60
4.5.3.	Rom.....	65
4.5.4.	Allenbach.....	71
4.6.	Breggia	75
5.	Diskussion.....	77
5.1.	Unterschiede Modellausprägung	77
5.2.	Modellgüte gesamt.....	78
5.3.	Saisonale Muster.....	79
5.4.	Unterschiede in Zusammenhang mit der Abflussmenge.....	81
5.5.	Unterschiede phänologische/ hydrologische Kalibrierung.....	83
5.6.	Regionale Unterschiede.....	83
5.7.	Unsicherheiten.....	84
6.	Fazit und Ausblick.....	86
	Literatur.....	88
	Persönliche Erklärung.....	91

Abbildungen

Abb. 1: Durchschnittliche tägliche Niederschlags-, Abfluss- und Evapotranspirationen pro Monat am Beispiel der Mentue für den Zeitraum 1975-2013.....	10
Abb. 2: Vereinfachter Aufbau des HBV-Modells.	15
Abb. 3: Aufbau der Grundwasser-Routine und Einfluss der Rezessionsparameter auf die Rezessionskurve.....	17
Abb. 4: Beispiel eines Gitterdatensatzes.	19
Abb. 5: Erstellung des Elevation-Files am Beispiel der Breggia. Erstellung der Höhenstufen und Berechnung der prozentualen Anteile für das Elevation-File.	21
Abb. 6: Prozentualer Anteil der Buche an der Gesamtstammanzahl, aggregiert nach Wirtschaftsregionen.	23
Abb. 7: Daten der Blattausbildung der Buche an den phänologischen Messstationen Dornach und Liestal.	24
Abb. 8: Phänologischer und Hydrologischer Sommer- und Winterbeginn in Liestal.	24
Abb. 9: Karstvorkommen in der Schweiz	27
Abb. 10: Detailkarten der gewählten Einzugsgebiete	30
Abb. 11: Übersicht über die gewählten Einzugsgebiete.	31
Abb. 12: Erreichte Modellgüte aller 100 GAP-Durchläufe je Einzugsgebiet.	39
Abb. 13: Überblick über die verschiedenen Kalibrierungen der Modell-Parameter bei der Mentue.	41
Abb. 14: Überblick über die verschiedenen Kalibrierungen der Modell-Parameter bei der Ergolz.	42
Abb. 15: Überblick über die verschiedenen Kalibrierungen der Modell-Parameter beim Rom. ...	42
Abb. 16: Überblick über die verschiedenen Kalibrierungen der Modell-Parameter beim Allenbach.	43
Abb. 17: Durchschnittliche Werte der aktuellen Evapotranspiration (AET) pro Jahr.....	46
Abb. 18: Vergleich der täglich berechneten Modellgüte von gewichteter Zielfunktion, FMARE und Lindström-Mass am Beispiel der phänologischen Kalibrierung der Mentue 1976.....	47
Abb. 19: Täglich berechnete FMARE-Werte und Abfluss in der Mentue bei Standardkalibrierung.	48
Abb. 20: Täglich berechnete FMARE-Werte und Abfluss in der Mentue bei hydrologischer Kalibrierung.....	48
Abb. 21: Täglich berechnete FMARE-Werte und Abfluss in der Mentue bei phänologischer Kalibrierung.....	49
Abb. 22: Täglich berechnete FMARE-Werte und Abfluss in der Ergolz bei phänologischer Kalibrierung.....	50
Abb. 23: Täglich berechnete FMARE-Werte und Abfluss im Rom bei phänologischer Kalibrierung.....	50
Abb. 24: Täglich berechnete FMARE-Werte und Abfluss im Allenbach bei phänologischer Kalibrierung.....	51
Abb. 25: Täglich berechnete LogReff-Werte und Abfluss in der Mentue bei Standardkalibrierung.	52
Abb. 26: Täglich berechnete Reff-Werte und Abfluss in der Mentue bei Standardkalibrierung. ..	53
Abb. 27: Überblick über die jeweils beste Kalibrierung für die Mentue.....	54

Abb. 28: Prozentuale Häufigkeit für die beste Modellgüte der verschiedenen Kalibrierungsarten bei der Mentue.	54
Abb. 29: FMARE und Abfluss in der Mentue im Winter 2007.	56
Abb. 30: FMARE und Abfluss in der Mentue im Frühling 2002.	56
Abb. 31: FMARE und Abfluss in der Mentue während der Trockenperiode 1989.	57
Abb. 32: FMARE und Abfluss in der Mentue während der Trockenperiode 2009.	58
Abb. 33: Überblick über die jeweils beste Kalibrierung für die Ergolz.	60
Abb. 34: Prozentuale Häufigkeit für die beste Modellgüte der verschiedenen Kalibrierungsarten bei der Ergolz.	60
Abb. 35: FMARE und Abfluss in der Ergolz im November und Dezember 2005.	62
Abb. 36: FMARE und Abfluss in der Ergolz im Mai 1992 und im Oktober 1999.	62
Abb. 37: FMARE und Abfluss in der Ergolz während der Trockenperiode im Sommer 2003.	63
Abb. 38: FMARE und Abfluss in der Ergolz während der Trockenperiode im Frühling 2011.	63
Abb. 39: FMARE und Abfluss in der Ergolz während der Trockenperiode im Sommer 1992.	64
Abb. 40: Überblick über die jeweils beste Kalibrierung für den Rom.	65
Abb. 41: Prozentuale Häufigkeit für die beste Modellgüte der verschiedenen Kalibrierungsarten beim Rom.	66
Abb. 42: FMARE und Abfluss im Rom im Winter 2012.	67
Abb. 43: FMARE und Abfluss im Rom im Frühling 2004.	67
Abb. 44: FMARE und Abfluss im Rom im Herbst 2009.	68
Abb. 45: FMARE und Abfluss im Rom im Herbst 2003.	69
Abb. 46: Überblick über die jeweils beste Kalibrierung für den Allenbach.	71
Abb. 47: Prozentuale Häufigkeit für die beste Modellgüte der verschiedenen Kalibrierungsarten beim Allenbach.	71
Abb. 48: FMARE und Abfluss im Allenbach im Frühling 2000.	73
Abb. 49: FMARE und Abfluss im Allenbach im Winter 1976.	73
Abb. 50: FMARE und Abfluss im Allenbach im Frühling 2005.	74
Abb. 51: FMARE und Abfluss im Allenbach im Sommer 2003.	74

Tabellen

Tab. 1: Durchschnittliche jährliche Wasserbilanz der Schweiz 1901-2000.	9
Tab. 2: Überblick über die Charakteristika der ausgewählten Einzugsgebiete.	29
Tab. 3: Gewählte Parameter-Grenzwerte für die GAP-Optimierung.....	33
Tab. 4: Grenzwerte für die verschiedenen Abflusskategorien in den Einzugsgebieten.	38
Tab. 5: Differenzen der FMARE-Werte in Abhängigkeit von Kalibrierungsart und Abflussmenge bei der Mentue..	55
Tab. 6: Differenzen der FMARE-Werte bei der Mentue, nur über die Perioden gerechnet, in denen die phänologische (Differenzen P-N und P-H), bzw. die hydrologische (Differenz H-N) Kalibrierung bessere Resultate liefert als die jeweils andere Kalibrierungsart.	59
Tab. 7: Differenzen der FMARE-Werte in Abhängigkeit von Kalibrierungsart und Abflussmenge bei der Ergolz.....	61
Tab. 8: Differenzen der FMARE-Werte bei der Ergolz, nur über die Perioden gerechnet, in denen die phänologische (Differenzen P-N und P-H), bzw. die hydrologische (Differenz H-N) Kalibrierung bessere Resultate liefert als die jeweils andere Kalibrierungsart.	65
Tab. 9: Differenzen der FMARE-Werte in Abhängigkeit von Kalibrierungsart und Abflussmenge beim Rom.	66
Tab. 10: Differenzen der FMARE-Werte beim Rom, nur über die Perioden gerechnet, in denen die phänologische (Differenzen P-N und P-H), bzw. die hydrologische (Differenz H-N) Kalibrierung bessere Resultate liefert als die jeweils andere Kalibrierungsart.	70
Tab. 11: Differenzen der FMARE-Werte in Abhängigkeit von Kalibrierungsart und Abflussmenge beim Allenbach.....	72
Tab. 12: Differenzen der FMARE-Werte beim Allenbach, nur über die Perioden gerechnet, in denen die phänologische (Differenzen P-N und P-H), bzw. die hydrologische (Differenz H-N) Kalibrierung bessere Resultate liefert als die jeweils andere Kalibrierungsart.	75

1. Einleitung

Trockenperioden, wie sie in der Schweiz etwa im Sommer 2003 oder Frühling 2011 auftraten, sind noch in bester Erinnerung. Niederschlag blieb lange aus, die Temperaturen waren vor allem 2003 sehr hoch, die Gewässer wiesen ausserordentlich geringe Wasserstände auf, die Fauna, Flora und auch der Mensch wurden massgeblich durch diese Ereignisse beeinflusst und beeinträchtigt. Im Rahmen des Klimawandels ist davon auszugehen, dass solche Perioden in unseren Regionen zukünftig häufiger auftreten werden (CH2011, 2011: 48). Dabei stellt sich natürlich die Frage nach einer möglichen Vorhersagbarkeit solcher Ereignisse. Aus hydrologischer Sicht stehen dabei insbesondere die geringen Abflussmengen in Fliessgewässern im Vordergrund.

Diese Arbeit soll an dieser Stelle ansetzen und einen Beitrag zur Verbesserung solcher Vorhersagen von Niedrigwasserperioden leisten. Dazu ist es aber vorerst notwendig etwas genauer auf die ganze Thematik einzugehen.

1.1. Definition Trockenheit

Eine allgemein gültige und allumfassende Definition von Trockenheit existiert in der heutigen Fachliteratur nicht (Hisdal & Tallaksen, 2000). Verschiedene Autoren haben jedoch schon versucht, einen Überblick über die unterschiedlichen Beschreibungen und Herangehensweisen an das Phänomen Trockenheit zu erstellen. Mishra & Singh (2010) erwähnen u.a. folgende Definitionen, die teilweise von Organisationen wie den Vereinten Nationen oder der Welternährungsorganisation (FAO) stammen: „anhaltender, ausgedehnter Mangel an Niederschlag“, „Jahre, in denen das Getreide aufgrund von Feuchtigkeitsdefiziten zu Grunde geht“ oder „kleinster täglicher Abfluss während eines Jahres“. Diese stark unterschiedlichen Beschreibungen machen deutlich, wie komplex das Phänomen und wie vielfältig die Auswirkungen von Trockenheit sein können.

Aspekte, die bei der Behandlung von Trockenheit regelmässig erwähnt werden, sind eine räumlich und zeitlich beschränkte Ausdehnung (dies im Gegensatz zur Aridität, die entsprechend den klimatischen Bedingungen dauerhaft ist (Mishra & Singh, 2010: 1)), ein aussergewöhnlich tiefes Wasserangebot (sei dies im Boden, in Gewässern, für Pflanzen oder in Form von ausbleibendem Niederschlag), die Natürlichkeit eines solchen Wasserdefizits (d.h. nicht aufgrund eines künstlichen Wassermanagements) sowie das grundsätzlich global mögliche Auftreten (Hisdal & Tallaksen, 2000; Tallaksen & Van Lanen, 2004; Mishra & Singh, 2010).

Verbreitet ist eine Einteilung der unterschiedlichen Definitionen in mehrere Klassen, welche sich gegenseitig beeinflussen, bzw. voneinander abhängen (Hisdal & Tallaksen, 2000; Tallaksen & Van Lanen, 2004: 5-7; Mishra & Singh, 2010: 206):

- Die meteorologische Trockenheit beinhaltet das Ausbleiben, bzw. ein unterdurchschnittliches Auftreten von Niederschlag und behandelt somit die klimatischen und meteorolo-

gischen Aspekte der Trockenheit. Die meteorologische Trockenheit ist oft Ursache oder Mitgrund für die anderen Trockenheitstypen.

- Unter hydrologischer Trockenheit versteht man ein Wasserdefizit in über- und unterirdischen Gewässerabflüssen. Sichtbar wird dies etwa durch tiefe Gewässerstände. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Niedrigabflussperioden. Mögliche Ursachen dafür sind geringer Niederschlag (meteorologische Trockenheit), hohe Verdunstungsraten oder Speicherung des Niederschlags (z.B. als Schnee), so dass er nicht zum Abfluss kommt. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften von Oberflächen- und Grundwasserabflüssen schlagen Mishra & Singh (2010: 206) vor, die Grundwasser-Trockenheit als eigenständige Kategorie zu führen.
- Die landwirtschaftliche Trockenheit umfasst die Auswirkungen von meteorologischer und/oder hydrologischer Trockenheit auf Böden und Pflanzen. Ist die Bodenfeuchte und die damit zusammenhängende Wasserverfügbarkeit für Pflanzen zu gering, hat dies Schäden oder das Eingehen der Pflanzen zur Folge.
- Unter dem Begriff sozio-ökonomische Trockenheit wird ein Wassermangel für Mensch und Wirtschaft zusammengefasst. Eine solche Trockenheit liegt dann vor, wenn das Wasserangebot die für Trinkwasser- und Produktionsbedarf benötigte Nachfrage nicht mehr decken kann.

Diese Übersicht verdeutlicht, dass für eine allumfassende Betrachtung des Begriffs „Trockenheit“ unterschiedlichste Aspekte berücksichtigt werden müssen, die oft miteinander verknüpft sind und gegenseitig voneinander abhängen. Somit umfasst eine solche Behandlung auch diverse Fachrichtungen und Disziplinen. Im Bereich der Hydrologie ist in erster Linie die hydrologische Trockenheit, also ein unterdurchschnittliches Wasserangebot von Oberflächen- und Grundwasser, von Bedeutung. Deshalb werde ich mich auch in der vorliegenden Arbeit ausschliesslich mit diesem Aspekt der Trockenheit beschäftigen. Hinzu kommt, dass das Beratende Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC) vorgeschlagen hat, das Unterschreiten einer bestimmten Abflussmenge in den kleineren Mittellandflüssen als allgemeinen Trockenheitsindikator für die Schweiz zu verwenden (OcCC, 2000: 11).

Aufgrund der schwierigen Mess- und Modellierbarkeit von Grundwasserströmen werde ich mich nicht spezifisch mit diesem Aspekt befassen, sondern mich auf geringe Abflüsse von Oberflächengewässern beschränken. Natürlich fliesst das Grundwasser aber indirekt dennoch in meine Betrachtungen mit ein, da es ja auch teilweise zu Oberflächenabflüssen beiträgt (Davie, 2008: 82). Wie erwähnt ist im Zusammenhang mit hydrologischer Trockenheit oft auch von Niedrigabflussperioden die Rede. Diese beiden Begriffe werden im Folgenden synonym behandelt, obwohl Niedrigabflussperioden normalerweise saisonal bedingt sind (z.B. aufgrund von Speicherung des

Niederschlags als Schnee) und regelmässig auftreten, während hydrologische Trockenheit etwa durch ausbleibenden Niederschlag und somit durch ein aussergewöhnliches Ereignis verursacht wird (Smakhtin, 2001: 147). Hauptgrund dafür ist, dass oft auch schwierig zu differenzieren ist, ob eine Periode mit geringem Abfluss saisonal oder durch aussergewöhnliche Umstände bedingt ist. Niedrige Abflüsse im Winter können ja beispielsweise auch damit zusammenhängen, dass in diesem Gebiet im Winter einfach grundsätzlich weniger Niederschlag fällt.

1.2. Trockenheit und Klimawandel

Hydrologische Trockenperioden sind aufgrund ihrer zahlreichen möglichen Auswirkungen sehr relevant. Führen Gewässer unterdurchschnittliche Wassermengen, kann dies sowohl ökologische als auch ökonomische Folgen haben. Aus ökologischer Sicht sind etwa Einflüsse auf die Fauna und Flora in und ausserhalb der Gewässer, die von Nährstoffen, Wasserangebot und -temperatur abhängig sind, oder auf die Bodenerosion denkbar. Auf der ökonomischen Seite stehen Bereiche wie Energiewirtschaft, landwirtschaftliche Produktion, Trinkwasserversorgung oder Probleme bei Tourismus und Verkehr im Einflussbereich von Trockenperioden. Auch gesundheitliche Folgen, etwa wegen Problemen mit Trinkwasserfassungen oder Kläranlagen sind möglich (OcCC, 2000; Mishra & Singh, 2010).

Im Rahmen des Klimawandels ist davon auszugehen, dass sich die Häufigkeit und Intensität von Trockenperioden verändern wird. Der IPCC geht gemäss dem Klimareport von 2007 davon aus, dass Trockenperioden in Zukunft häufiger auftreten werden. Insbesondere in kontinentalen Gebieten niedriger und mittlerer Breiten sei eine Zunahme an Sommertrockenheiten zu erwarten. Die Landfläche, die von Trockenheit betroffen ist, dürfte bis 2090 um den Faktor 10 bis 30 zunehmen, die Anzahl von Trockenperioden mit einer Wiederkehrdauer von 100 Jahren sowie die durchschnittliche Dauer einer Trockenperiode dürfte um das Zwei- bis Sechsfache ansteigen. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass diese Zunahme alle der obengenannten Aspekte von Trockenheit betrifft (IPCC, 2007: 186-187). Dai (2010) hat sich mit verschiedensten Studien zum Thema Trockenheit befasst und kommt zu ähnlichen Schlüssen. Er weist zudem darauf hin, dass bereits seit den 1970er-Jahren eine Zunahme an Trockenperioden zu verzeichnen sei.

Als Ursachen für die zu erwartende Entwicklung werden erhöhte Temperaturen und verringerter Niederschlag (insbesondere im Sommer) genannt. Damit zusammen hängen eine höhere Evapotranspiration, eine grössere Nachfrage nach Bodenfeuchte und Veränderungen in der globalen Zirkulation. Auch der menschliche Einfluss, beispielsweise durch eine veränderte Landnutzung, werden erwähnt (IPCC, 2007; Dai, 2010).

Auch in der Schweiz ist in den kommenden Jahren und Jahrzehnten mit einer Zunahme von Trockenperioden, wie sie beispielsweise im Sommer 2003 und Frühling 2011 auftraten, zu rech-

nen. Es wird davon ausgegangen, dass die mittleren Jahrestemperaturen bis Ende des 21. Jahrhunderts um bis zu 4.8°C ansteigen könnten, während der Niederschlag im Sommer je nach Szenario um 8 bis 28 Prozent abnehmen könnte (CH2011, 2011: 7). Es wird festgehalten, dass eine Zunahme von Sommertrockenperioden zu erwarten ist. Als Gründe dafür werden erhöhte Evapotranspiration, frühere Schneeschmelze und ein früherer Vegetationsbeginn erwähnt (CH2011, 2011: 48). Auch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) geht davon aus, dass vermehrt Gewässer ein Abflussregime aufweisen werden, das von einem ausgeprägten Abflussminimum im Spätsommer geprägt sein dürfte (BAFU, 2012: 46).

1.3. Trockenheit in der hydrologischen Forschung und hydrologische Modelle

Die erwartete Zunahme solcher Trockenperioden und die diversen, teilweise äusserst bedeutsamen Auswirkungen solcher Phasen, machen es notwendig, Trockenheit genau zu verstehen und lassen natürlich auch die Frage nach einer möglichen Vorhersagbarkeit aufkommen.

Allgemein kann gesagt werden, dass im Gebiet der Trockenheit trotz ausgeprägter Forschung in den letzten Jahren und Jahrzehnten immer noch diverse Lücken bestehen. So stuft denn der Bericht „Szenarien zur Klimaänderung in der Schweiz“ das wissenschaftliche Verständnis auf einer fünfstufigen Skala nur als mittel ein (CH2011, 2011: 49). Mishra & Singh (2010) stellen fest, dass zwar einige Forschung im Gebiet der hydrologischen Trockenheit betrieben wird, dass aber immer noch grosse Lücken bestehen. Mögliches Potenzial orten sie etwa im Bereich Grundwasser, bei der Auswahl sogenannter Trockenheits-Indizes, die es erlauben die Auswirkungen und Parameter einer Trockenheit festzustellen und zu quantifizieren, oder bei der Behandlung von historischen Trockenheits-Ereignissen. Zudem stellen sie fest, dass bei der Definition von Trockenheit mittels Grenzwerten oft zu wenig auf die Saisonalität geachtet wird und dass Trockenheit zwar auf nationaler und regionaler Ebene immer besser erforscht ist, dass aber das Verständnis für lokale Prozesse oft noch fehlt. Auch Smakhtin (2001), der eine Übersicht über die Erforschung der Niedrigwasser-Hydrologie erstellt hat, kommt zu ähnlichen Schlüssen. Es fehle trotz erheblichem Forschungsaufwand an Verständnis für gewisse Mechanismen und auch er propagiert, den Fokus auf zeitlich und räumlich kleinere Skalen zu legen.

Ein Instrument, das auf dieser kleinskaligeren, lokalen Ebene ansetzen kann und zudem dem allgemeinen Verständnis von Trockenheit sowie möglichen Analysen, Monitoring und allfälligen Vorhersagen dienen kann, ist das hydrologische Modell.

Hydrologische Modelle erlauben es, da anzusetzen, wo die Möglichkeiten und Reichweiten von Messungen aufhören. Sie ermöglichen es, gewisse hydrologische Prozesse zu simulieren und verständlich zu machen, die durch reine Messungen nicht erfasst werden können (Beven, 2012, 1-2). Es gibt eine Vielzahl von Varianten hydrologischer Modelle. Während die einen die Prozesse in abstrakter Weise darstellen (sogenannte Black-Box-Modelle), versuchen andere die Realität möglichst genau wiederzugeben. Hydrologische Modelle können „lumped“ („geklumpt“) oder „distributed“ („verteilt“) sein, d.h. ein Einzugsgebiet als Einheit oder Zusammensetzung vieler kleiner Stücke mit unterschiedlichen Eigenschaften ansehen. Die Modellresultate können deterministisch oder stochastisch sein, d.h. es gibt genau ein Resultat oder mehrere mögliche Szenarien (Beven, 2012, 16-17).

Der Modellierungsprozess funktioniert aber bei den unterschiedlichsten Modellvarianten ähnlich. Nachdem der Modellaufbau („perceptual model“) und die entsprechende mathematische Umsetzung („conceptual model“) definiert sind, kann eine Kalibrierung vorgenommen werden. Dazu sind sowohl für die Inputdaten (z.B. Niederschlag, Temperatur), als auch für die Outputdaten (Abfluss) Messwerte nötig. So können die Modellparameter so lange angepasst werden bis die Outputdaten des Modells die beobachteten Messwerte möglichst genau abbilden. Ist dies der Fall, kann vereinfacht gesagt werden, dass das Modell funktioniert, was es wiederum möglich macht, das Modell für räumliche und zeitliche Extrapolationen zu verwenden und so auch Voraussagen zu treffen (Beven, 2012, 3-6). Somit dürften hydrologische Modelle auch ein Potenzial in Bezug auf die Modellierung und Vorhersage aktueller und zukünftiger Niedrigabfluss- und Trockenperioden aufweisen.

Allerdings ist es so, dass hydrologische Modelle traditionell eher darauf ausgerichtet sind, Abflussspitzen zu modellieren. Dies ist vor allem im Zusammenhang mit Hochwasserereignissen von Bedeutung. Niedrigabflussperioden werden deshalb oft weniger gut durch solche Modelle abgebildet (Staudinger et al., 2011: 6834).

Mishra & Singh (2011) befassten sich mit verschiedensten Modellen in Bezug auf Trockenheit. Dabei untersuchten sie solche zur Vorhersage von Trockenperioden, einfache hydrologische Modelle oder auch sehr komplexe globale Klimamodelle. Sie kamen zum Schluss, dass im Bereich der Modellierung von Trockenheit zwar einige Fortschritte erzielt wurden, aber immer noch Vieles zu tun bleibt. Auch Dai (2010: 57) spricht von grossen Schwierigkeiten bei der Simulation von Trockenheit mit heute gebräuchlichen Modellen.

An dieser Stelle soll nun mit dieser Arbeit angesetzt werden. Ziel ist es, ein hydrologisches Modell in Bezug auf die Abbildung von Trockenheit zu verbessern. Konkret soll dies am HBV-Modell umgesetzt werden, das in Kapitel 3.2. genauer eingeführt wird. Um einen möglichen An-

satzpunkt zu eruieren, ist es vorerst notwendig, die Abflussbildung eines Oberflächengewässers etwas genauer unter die Lupe zu nehmen und zu verstehen, wie diese im hydrologischen Modell abgebildet wird oder wo eben gerade noch Mängel bestehen.

1.4. Abflussbildung und Saisonalität

Der Prozess der Abflussbildung wird beispielsweise in Davie (2008) erläutert und kann am einfachsten mit der Wasserbilanzgleichung erklärt werden:

$$P - Q - ET - \Delta S = 0 \quad (1)$$

P: Niederschlag, **Q:** Abfluss, **ET:** Evapotranspiration, **ΔS :** Speicheränderung

Stellt man diese Gleichung um, ergibt sich:

$$Q = P - ET - \Delta S \quad (2)$$

Dabei gehören zum Abfluss sowohl ober- als auch unterirdische Abflüsse. Betrachtet man, wie ich in dieser Arbeit, hauptsächlich den Oberflächenabfluss, so ergibt sich aber auch für diesen dieselbe Zusammensetzung.

Der Niederschlag kann in unterschiedlichen Formen, etwa als Regen, Schnee oder Raureif auftreten. Der Begriff Evapotranspiration beinhaltet mehrere Prozesse, nämlich die Verdunstung (Evaporation) von Gewässer-, Boden- und Pflanzenoberflächen, die Interzeption, also den Rückhalt von Niederschlag durch die Pflanzenschicht, sowie die Transpiration, also die Wasserabgabe durch Spaltöffnungen der Pflanzen. Unter den Begriff Speicheränderung fällt etwa die Wasserspeicherung im Boden, in Gletschern oder in der Schneedecke (Davie, 2008: 10-11).

Mengenmässig sieht die Wasserbilanzgleichung der gesamten Schweiz durchschnittlich wie folgt aus (vgl. Tab. 1):

Tab. 1: Durchschnittliche jährliche Wasserbilanz der Schweiz 1901-2000 (Quelle: BAFU, 2012: 45).

Input	Output
1431 mm/Jahr Niederschlag	1299 mm/Jahr Abfluss
318 mm/Jahr Zufluss aus dem Ausland	464 mm/Jahr Evapotranspiration
14 mm/Jahr Speicheränderung	

Grob gesagt wird also vom Niederschlag und den Zuflüssen aus dem Ausland rund ein Viertel verdunstet, während drei Viertel zum Abfluss gelangen.

Die drei wichtigsten beteiligten Grössen Niederschlag, Evapotranspiration und Abfluss, wie auch die prozentualen Anteile dieser Faktoren an der Wasserbilanzgleichung zeigen in Abhängigkeit vom Einzugsgebiet saisonal mehr oder weniger starke Schwankungen (vgl. Abb. 1). Da die Evapotranspiration im Gegensatz zu Niederschlag und Abfluss sehr schwierig messbar ist, wurde sie für das folgende Beispiel vereinfacht als die Differenz aus Niederschlag und Abfluss berechnet.

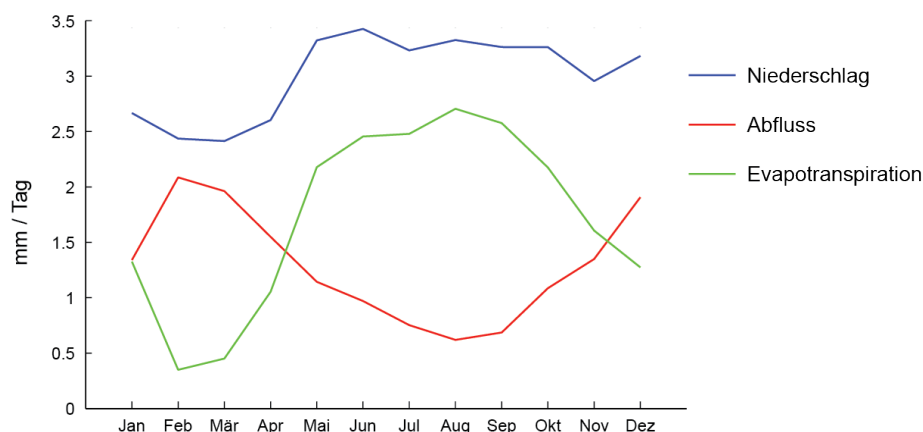


Abb. 1: Durchschnittliche tägliche Niederschlags-, Abfluss- und Evapotranspirationsmengen pro Monat am Beispiel der Mentue für den Zeitraum 1975-2013.

Diese saisonale Verteilung hängt natürlich stark von der geographischen und topographischen Lage des entsprechenden Einzugsgebietes ab, weshalb die Abflussregimes der Schweizer Gewässer entsprechend nach sogenannten Regimetypen klassifiziert werden (Weingartner & Aschwenden, 1992). Während die saisonalen Unterschiede beim Parameter Niederschlag aufgrund des Schneefalls im Winter und des Regens im Sommer naheliegender erscheinen, dürfte beim Parameter Evapotranspiration die Vegetation (nebst der Temperatur und der vorhandenen verdunstbaren Feuchte) einen wesentlichen Einfluss haben. Insbesondere die Interzeption mit anschließender Evaporation von der Blattoberfläche und die Transpiration sind unmittelbar vom Vegetationsstand abhängig. Czirkowsky & Fitzjarrald (2004) konnten bei einer Untersuchung in den USA denn auch einen klaren Zusammenhang zwischen der Blattausbildung im Frühling und dem Evapotranspirationswert (vereinfacht berechnet wie im obigen Beispiel) aufzeigen. Auch für weitere Faktoren konnten sie einen Zusammenhang mit dem Vegetationsstand erkennen, so für das Rezessionsverhalten (genauer für die Zeit, die ein Gewässer benötigt, um nach einem Niederschlagsereignis wieder die vorherige Abflusshöhe zu erreichen) und die Amplituden des täglichen Abflusses. Dass sich das Rezessionsverhalten, also die Art des Abflussrückgangs nach einer Abflussspitze, zwischen Sommer- und Winterhalbjahr unterscheidet wurde auch von anderen Autoren festgestellt (z.B. Tallaksen (1995); Smakhtin (2001)).

Betrachtet man nochmals die obige Wasserbilanzgleichung stellt man zudem fest, dass während Trockenperioden der Niederschlag ja häufig tief ist. Gleichzeitig ist es, wie am Beispiel des Som-

mers 2003 zu sehen, gleichzeitig oft sehr warm, was eine erhöhte Evapotranspiration zur Folge hat. Dies führt dazu, dass gerade während solchen Phasen hydrologischer Trockenheit der Term der Evapotranspiration, der wiederum stark von der Vegetation abhängt, deutlich an Einfluss auf die gesamte Wasserbilanzgleichung gewinnt.

1.5. Saisonalität in hydrologischen Modellen

Wagner et al. (2003) stellen fest, dass oft das Problem besteht, dass ein hydrologisches Modell zwar gute Ergebnisse liefert, die entsprechenden Parameterkalibrierungen und der Modellaufbau aber nicht realistisch sind. Seibert & McDonnell (2001) plädieren aus ähnlichen Gründen dafür, dass auch sogenannte weiche Daten für den Modellierungsprozess verwendet werden sollen. Damit meinen sie etwa qualitatives Zusatzwissen über das Einzugsgebiet oder die ablaufenden Prozesse. Die in den vorangehenden Kapiteln gemachten Feststellungen entsprechen solchem Zusatzwissen. So hat sich gezeigt, dass sich die Abflusscharakteristika saisonal unterscheiden. Aus den Inputdaten der hydrologischen Modelle wird aber diese Eigenschaft nicht erkennbar, was dazu führt, dass eine solche saisonale Differenzierung beim Kalibrierungsprozess oft nicht umgesetzt wird. Als Beispiel sei hier wiederum das HBV-Modell erwähnt. Die Kalibrierung der Parameter erfolgt hier standardmässig ohne eine saisonale Differenzierung. Die Parameter werden also so eingestellt, dass sie die Abflusskurve über das ganze Jahr gesehen möglichst gut abbilden sollen. Aus den oben genannten Gründen muss aber angenommen werden, dass sich die Ausprägung dieser Parameter aufgrund der Saisonalität der Vegetation oder des Rezessionsverhaltens zwischen Sommer und Winter unterscheidet. Das HBV-Modell erlaubt eine solche Unterscheidung grundsätzlich, allerdings können nur fixe Daten verwendet werden, wobei da näherliegenderweise oft die Definition des sogenannten hydrologischen Jahres verwendet wird. Diese Definition wird ja nach Land und Fachbereich etwas anders gehandhabt. Ich definiere für diese Arbeit das hydrologische Winterhalbjahr als die Zeit zwischen dem 1. Oktober und dem 30. April, das hydrologische Sommerhalbjahr entsprechend als die Periode vom 1. Mai bis 30. September. Allerdings hat sich gezeigt, dass die Vegetation einen wesentlichen Einfluss auf die Abflussbildung haben dürfte. Dabei hält sich die Ausbildung des Blätterdachs aber kaum an die soeben gemachte Definition. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die Daten von Blattausbildung und Blattfall von Jahr zu Jahr deutlich schwanken. Diese phänologischen Daten werden vielerorts seit langer Zeit registriert und für verschiedenste Forschungszwecke verwendet (Menzel et al., 2001; MeteoSchweiz, 2014). Somit liegt der Schluss nahe, dass solche Daten auch verwendet werden könnten, um eine realistischere Parameterkalibrierung in hydrologischen Modellen und damit auch eine Verbesserung derselben zu erreichen.

2. Fragestellungen

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Phänologie einen beachtlichen Einfluss auf die Abflussbildung von vor allem kleineren und mittleren Gewässern hat. Dabei steht vor allem die Evapotranspiration im Vordergrund, die wiederum besonders dann zum Tragen kommt, wenn wenig Niederschlag fällt, also in Trockenperioden.

Gleichzeitig wird der Phänologie bei der hydrologischen Modellierung oft keine oder eine zu geringe Beachtung geschenkt. So werden Modellkalibrierungen meist fürs ganze Jahr durchgeführt, eine saisonale Unterscheidung findet nicht statt. Dies führt mich zu meiner übergeordneten Fragestellung:

Können hydrologische Modellierungen verbessert werden, indem phänologische Daten in den Modellierungsprozess miteinbezogen werden?

Konkret soll diese Frage am Beispiel des HBV-Modells untersucht werden (siehe auch Kapitel 3.2.).

Fragen, die in Zusammenhang mit meiner Fragestellung interessieren, sind:

- Äussern sich die erwarteten saisonalen Unterschiede in einer unterschiedlichen Ausprägung der Modellparameter zwischen Winter und Sommer?
- Führt der Einbezug phänologischer Daten zu einer Verbesserung der Modellgüte? Wenn ja, in welchen Phasen? Sind Muster über mehrere Jahre erkennbar? In welchen Situationen sind keine Verbesserungen feststellbar?
- Macht es einen Unterschied, ob die Saisonalität auf variierenden phänologischen Daten beruht oder dem fixen hydrologischen Jahr entspricht?
- Wie unterscheidet sich der Einfluss der phänologischen Daten zwischen verschiedenen Regionen, für verschiedene Baumarten und entsprechend dem Waldanteil in einem Einzugsgebiet?

Bei der Untersuchung dieser Fragestellungen gehe ich von folgenden Hypothesen aus:

- Aufgrund verschiedener Faktoren unterscheidet sich das Abflussverhalten zwischen Sommer und Winter, was sich etwa im Rezessionsverhalten äussert. Deshalb dürften auch verschiedene Modellparameter bei einer saisonalen Kalibrierung auch entsprechende Unterschiede aufweisen.

- Die Berücksichtigung der Phänophasen führt zu einer Verbesserung der Modellgüte, insbesondere während sommerlichen Trockenperioden. Auch während den niederschlagsärmeren Wintern dürfte eine Verbesserung erreicht werden. Mögliche Veränderungen können auch rund um die Daten der Blattausbildung und des Laubfalls erkennbar sein. Keine Verbesserung wird in Niederschlagsphasen zu erreichen sein, insbesondere wenn diese lang anhaltend und stark sind.
- Aufgrund des grösseren Einflusses der Evapotranspiration fällt die Verbesserung der Modellgüte deutlicher aus, je höher der Wald- und insbesondere der Laubholzanteil in einem Einzugsgebiet ist.

3. Vorgehen

3.1. Methodik allgemein

Wie in der Einleitung erwähnt, dienen hydrologische Modelle dazu, Vorhersagen von zukünftigem Abflussverhalten zu modellieren. Damit das Modell zu diesem Schritt fähig ist, muss es zuerst in geeigneter Weise eingestellt („kalibriert“) werden und anschliessend validiert und verifiziert werden. Das heisst es muss getestet werden, ob das Modell mit der verwendeten Kalibrierung effektiv das zeigt, was man möchte und dies auch in korrekter Weise tut. Das Modell sollte brauchbar sein, es soll die effektiven, realen Werte natürlich so gut als möglich abbilden (Beven, 2012: 5). Ist dies der Fall, können schliesslich Vorhersagen getroffen werden, wobei man zwischen den beiden Methoden „Forecasting“ und „Hindcasting“ unterscheidet. Bei ersterer handelt es sich um die eigentliche Vorhersage, d.h. das Modell wird aufgrund vorhandener Daten kalibriert und das Verhalten wird anschliessend in die Zukunft extrapoliert. Das „Hindcasting“ funktioniert grundsätzlich gleich. Allerdings tut man so, als ob beobachtete Werte nur bis zu einem gewissen Zeitpunkt in der Vergangenheit vorhanden wären, kalibriert das Modell auf dieser Basis und projiziert das Modellverhalten auf die folgenden Jahre. Da sich auch diese Jahre in der Vergangenheit befinden, liegen gleichzeitig beobachtete Abflusswerte vor, die es erlauben zu überprüfen wie gut die Extrapolation funktioniert (Beven & Young, 2013).

Ich werde mich in meiner Arbeit auf den ersten Teil dieses Modellierungsprozesses, die Modellkalibrierung, beschränken. D.h. ich werde das Modell aufgrund vorhandener Daten einstellen und dann näher auf die simulierten Daten eingehen. Dabei werde ich untersuchen, wie sich das Modell bei unterschiedlichen Kalibrierungen verhält und insbesondere, ob es sich beim Miteinbezug von phänologischen Daten in den Kalibrierungsprozess verbessern lässt. Die anschliessende Modellevaluation wird sich darauf beschränken, die simulierten Werte mit den beobachteten zu vergleichen. Auf weitergehende Validierungen mit Zuhilfenahme von zusätzlichen Messwerten oder anderen Evaluationsmethoden muss aus zeitlichen Gründen verzichtet werden. Das Thema soll aber im Diskussionsteil nochmals kurz erläutert werden. Ebenfalls verzichtet wird auf die eigentliche Vorhersage. Das bedeutet, dass lediglich vorhandene, gemessene Daten verwendet werden und keine Projektionen von simulierten Werten in die Zukunft gemacht werden. Auch dies würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

3.2. HBV-Modell

Für meine Arbeit soll das HBV-Modell verwendet werden. HBV steht dabei für „Hydrologiska Byråns Vattenavdelning“, die Abteilung am Schwedischen Meteorologischen und Hydrologischen Institut, wo das Modell in den 1970er-Jahren entwickelt wurde (Lindström et al., 1997;

Seibert & Vis, 2012). Es wird dabei die Version „HBV-light“ benutzt, die als einfach zu bedienende Version des HBV-Modells für Entwicklung und Forschung realisiert wurde (Seibert, 2005: 3).

Beim HBV-Modell, das schon bei unterschiedlichsten hydrologischen Forschungsprojekten zum Einsatz kam (Seibert & Vis, 2009), gehört zu den klassischen Niederschlags-Abfluss-Modellen. Das heisst das Modell simuliert auf Basis von Niederschlags- (und anderen) Daten den Abfluss von Fliessgewässern. Es handelt sich um ein konzeptuelles Modell, was bedeutet, dass es zwar im Gegensatz zu sogenannten Black-Box-Modellen verschiedene Prozesse, die zur Abflussbildung beitragen, separat modelliert, dies aber gleichzeitig in einer abstrakten Form tut. Damit ist es wesentlich einfacher gehalten als komplexe physische Modelle, welche die Realität möglichst exakt abbilden möchten, dabei aber relativ kompliziert werden. Weiter zählt das HBV-Modell zu den deterministischen Modellen. Ein Inputwert führt also zu genau einem, immer gleichen Output. Schliesslich handelt es sich um ein „teil-verteiltes“ (semi-distributed) Modell, das ein Einzugsgebiet weder als einzelne ganze Einheit, noch als eine Vielzahl von Teilgebieten betrachtet, sondern das Einzugsgebiet grundsätzlich als Einheit versteht, aber gewisse Unterteilungen aufgrund von Höhen- oder Vegetationszonen zulässt. Weiter ist es möglich, unterschiedliche Modellstrukturen auszuwählen. So können Bestandteile und Parameterzusammensetzung den gewünschten Umständen angepasst werden (Lindström et al., 1997; Seibert, 2005; Seibert & Vis, 2012).

Das Modell besteht aus vier verschiedenen Komponenten, sogenannten Routinen, welche wiederum verschiedene Parameter beinhalten (vgl. Abb. 2). Eine Beschreibung dieses Aufbaus liefern etwa Seibert (2005), Seibert & Vis (2012) oder die HBV-Hilfe.

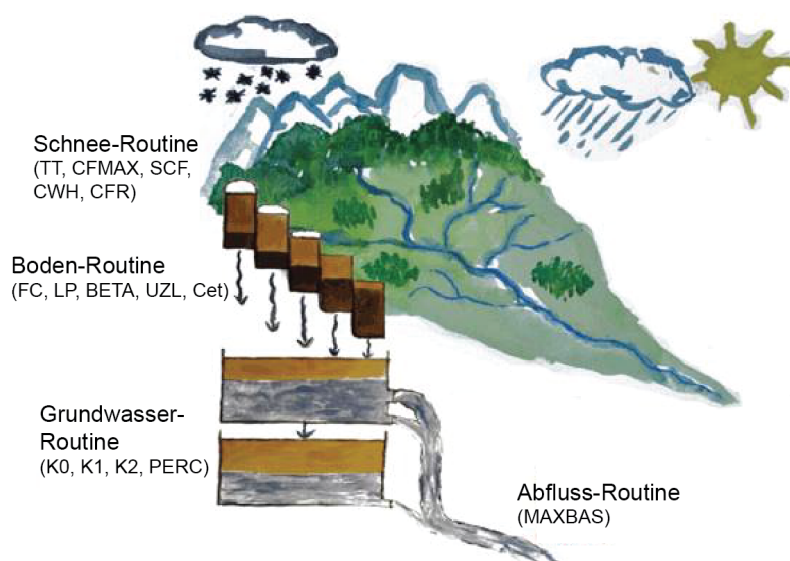


Abb. 2: Vereinfachter Aufbau des HBV-Modells. In Klammern die Parameter der jeweiligen Routine. Quelle: <http://www.geo.uzh.ch/en/units/h2k/services/hbv-model> (abgeändert).

In der Schnee-Routine („Snow Routine“) werden die verschiedenen Prozesse in Zusammenhang mit Schneefall behandelt. Der Parameter T^* legt eine Grenzwert-Temperatur fest, unterhalb derer Niederschlag als Schnee und nicht mehr als Regen fällt. Sämtlicher Schnee-Niederschlag wird mit dem Korrekturfaktor SFCF multipliziert, der Messfehler und Evaporation von der Schnee-Oberfläche kompensieren soll. Der Grad-Tag-Faktor CFMAX modelliert die Schneeschmelze, der Parameter CWH legt fest, bis zu welchem Punkt Schmelzwasser und Niederschlag in der Schneedecke gehalten werden. Der „Refreezing“-Faktor CFR schliesslich gibt an, wie viel flüssiges Wasser beim Unterschreiten der Temperatur T^* wieder gefriert.

Gefallener Niederschlag, in welcher Form auch immer, wird anschliessend gemäss dem Parameter BETA auf die beiden Komponenten Boden-Routine („Soil Routine“) und Grundwasser-Routine („Response Routine“ oder „Groundwater Routine“) aufgeteilt. In der Boden-Routine legt der Parameter FC fest, wie viel Wasser maximal im Boden aufgenommen werden kann, was zusammen mit dem aktuellen Wassergehalt im Boden die oben genannte Aufteilung beeinflusst. Liegt das Verhältnis zwischen dem aktuellen Wassergehalt und FC über dem Grenzwert LP, entspricht die aktuelle Evapotranspiration der potenziellen Evapotranspiration, liegt es unterhalb des Grenzwertes ist die aktuelle Evapotranspiration geringer. Der Parameter C_{et} stellt schliesslich einen Korrekturfaktor dar, der bei der Berechnung der potenziellen Evapotranspiration zum Einsatz kommt. Gemäss HBV-Modell wird er nicht zur Boden-Routine gezählt, sondern gehört zu den „anderen Faktoren“. Da er dennoch einen grossen Bezug zu den Parametern der Boden-Routine hat, wird er in dieser Arbeit zu dieser gezählt.

Die Grundwasser-Routine sieht je nach Wahl der Modellstruktur etwas unterschiedlich aus, besteht aber meistens aus mehreren Grundwasser-Boxen, die übereinander angeordnet sind (vgl. Abb. 3). Bei der Standard-Version fliesst das Wasser zuerst in die obere Grundwasser-Box. Der Parameter PERC legt fest, wie viel davon weiter in die untere Grundwasserbox fliesst. Aus allen diesen Boxen kann Wasser abfliessen. Die Menge des Abflusses wird durch den aktuellen Wasserstand und die drei Rezessionskoeffizienten K_0 , K_1 und K_2 festgelegt. K_0 beschreibt dabei den obersten Teil der oberen Box und damit das Rezessionsverhalten bei Spitzenabflüssen, K_1 den Abfluss der oberen Box bei geringerem Wasserstand und K_2 denjenigen der unteren Grundwasser-Box. Bei Niedrigwasser ist nur die untere Grundwasser-Box gefüllt. Somit wird das Rezessionsverhalten in solchen Perioden einzig durch den Parameter K_2 beschrieben. Wird die Modellstruktur ohne Grenzwert UZL gewählt, wird K_0 durch den Parameter Alpha ersetzt, der einen sogenannten nicht-linearen Koeffizienten darstellt und den Abfluss aus der oberen Grundwasser-Box ebenfalls beeinflusst.

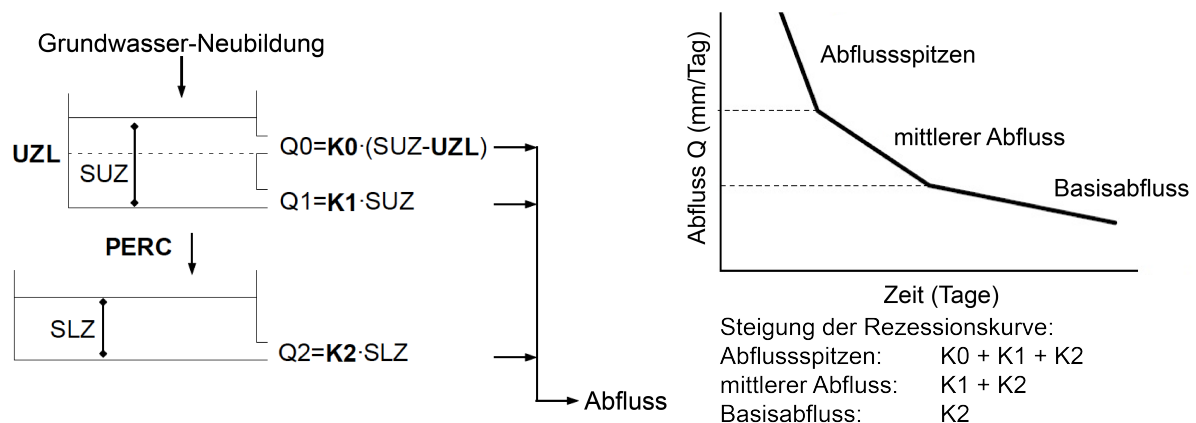


Abb. 3: Aufbau der Grundwasser-Routine (links) und Einfluss der Rezessionsparameter auf die Rezessionskurve (rechts). Quelle: Seibert, 2005: 9 (abgeändert). Q_0 , Q_1 , Q_2 : Teil-Abflüsse aus der jeweiligen Grundwasser-Box; K_0 , K_1 , K_2 : Rezessionsparameter; **PERC**: Perkolation in die unterste Grundwasser-Box; **UZL**: Grenzwert-Parameter; **SUZ**: Speicher in der oberen Grundwasser-Box; **SLZ**: Speicher in der unteren Grundwasser-Box.

Die Abfluss-Routine („Routing-Routine“) besteht nur aus dem Parameter MAXBAS, der einer Gewichtungsfunktion entspricht, die bildlich gesprochen beschreibt, wie viel Zeit ein Wassertropfen vom Auftreffen auf dem Boden bis zum Vorbeikommen an der Abfluss-Messstation benötigt. Die Routine beschreibt also den eigentlichen Weg zur Abflussbildung innerhalb des Einzugsgebietes.

Zusätzlich zu diesen vier Routinen kommen ein paar höhenabhängige Parameter hinzu. PCALT und TCALT beschreiben die Zu- bzw. Abnahme von Niederschlag und Temperatur abhängig von der Meereshöhe. Pelev und Telev schliesslich beschreiben die Meereshöhen, auf denen die Inputdaten zu Niederschlag und Temperatur erfasst wurden. Nötig sind diese Parameter, weil die Inputdaten nur an einer oder ein paar wenigen Messstationen erfasst wurden, das Einzugsgebiet sich aber über grosse Höhenunterschiede erstrecken kann.

Nicht bei allen diesen Parametern ist mit dem Einbezug der Phänologie mit grossen saisonalen Unterschieden zu rechnen. Bei den Parametern der Schnee-Routine wären Schwankungen grundsätzlich denkbar, sind aber wenig relevant, da im Sommerhalbjahr vielerorts kein oder nur noch wenig Schnee fallen und liegen dürfte. Bei der Boden-Routine sind Effekte ebenfalls zu erwarten, insbesondere beim Parameter Cet, der in direktem Zusammenhang mit der Evapotranspiration steht. Unterschiede sollten ebenfalls bei den Rezessionsparametern der Grundwasser-Routine erkennbar sein und dabei hauptsächlich beim Parameter K_2 , der die nicht durch grosse Niederschlagsmengen beeinflussten Rezessionsperioden beschreibt. Saisonale Unterschiede beim Rezessionsverhalten sind, wie in der Einleitung erwähnt, zu erwarten.

Die nun gemachten Erläuterungen machen deutlich, dass es sich beim HBV-Modell nicht um ein physisches Modell handelt. Prozesse wie diejenigen der Grundwasser-Routine werden in einer Weise modelliert, die nicht der Realität entspricht, aber dennoch ihren Zweck erfüllt. Zudem werden gewisse Vereinfachungen gemacht. So kommt beispielsweise kein Oberflächen-Abfluss vor oder der Prozess der Interzeption wird nicht direkt berücksichtigt. Dennoch hat sich das HBV-Modell schon in verschiedenen Studien bewährt (Lindström et al., 1997; Seibert & Vis, 2012).

3.3. Benötigte Inputdaten

Das HBV-Modell benötigt verschiedene Inputdaten, die jeweils in einem genau festgeschriebenen Format vorliegen müssen. Die Anforderungen sind in Seibert (2005) beschrieben.

3.3.1. PTQ-File

Das PTQ-File kann als Basisdatei für das Modellieren bezeichnet werden. Die Buchstaben P, T und Q stehen dabei für Niederschlag, Temperatur und Abfluss. Das File enthält also einerseits die aufgezeichneten Messwerte der Abflusstation, andererseits die Temperatur- und Niederschlagswerte. All diese Werte müssen die gleiche Zeitspanne abdecken und dieselbe (tägliche) Auflösung aufweisen.

Die Tages-Abflusswerte einer Vielzahl von hydrologischen Messstationen in der Schweiz können beim Bundesamt für Umwelt (BAFU) bestellt werden. Anschliessend muss nur noch die zu verwendende Zeitspanne ausgewählt und die Einheit der Abflusswerte von m^3/s in mm/Tag umgerechnet werden.

Die Bereitstellung der Niederschlags- und Temperaturdaten gestaltet sich etwas anspruchsvoller, da im Gegensatz zu den Abflussdaten nicht die Werte an einem spezifischen Punkt, sondern über das ganze Einzugsgebiet gesehen interessieren. Niederschlag und Temperatur variieren vor allem mit der Meereshöhe stark, so dass die Verwendung der Daten einer einzelnen Messstation nicht aussagekräftig wäre. MeteoSchweiz betreibt ein ausgedehntes Messnetz, wo Temperatur und Niederschlag registriert werden. Aus diesen erfassten Daten werden sogenannte Gitterdaten erstellt. Dabei handelt es sich um Daten, die über die gesamte Fläche der Schweiz aus den vorhandenen Messdaten interpoliert werden (MeteoSchweiz, 2015) (vgl. Abb. 4). Diese Daten können als NetCDF-Dateien bezogen werden. Dabei handelt es sich um dreidimensionale Dateien, die einerseits die Messwerte, andererseits sowohl eine räumliche als auch eine zeitliche Dimension aufweisen. Die Extraktion erfolgte mit der Software R. Benötigt wird dabei ein Shapefile, das die Ausdehnung des Einzugsgebietes umfasst. Auf dessen Erstellung wird im Kapitel 3.3.4. eingegangen. Das Shapefile erlaubt es, die benötigte räumliche Ausdehnung aus dem Gesamtdatensatz

auszustanzen. Die entsprechenden Daten können dann in eine Textdatei geschrieben werden. Dabei müssen die Temperatur- und Niederschlagsdaten trotz einem gewissen Informationsverlust wieder übers ganze Einzugsgebiet gemittelt werden, da im HBV-Modell nur eine einzelne Datenreihe verwendet werden kann.

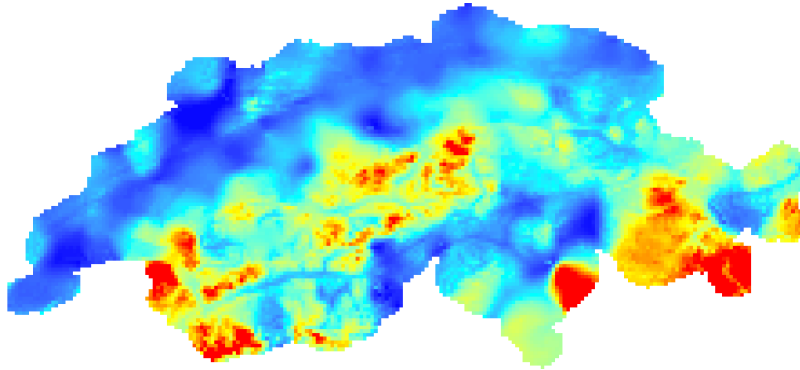


Abb. 4: Beispiel eines Gitterdatensatzes. Dargestellt ist der Niederschlag am 01.01.1961.

3.3.2. Evaporation-File

Dieses File dient dem Einbezug der Evapotranspiration ins Modell. Da diese nicht oder nur mit sehr grossem Aufwand gemessen werden kann, müssen die entsprechenden Werte abgeschätzt, bzw. berechnet werden (Davie, 2008: 43-54). Das File behandelt die potenzielle Evapotranspiration, die unabhängig vom Angebot an verdunstbarem Wasser ist. Benötigt werden zwölf Werte, die jeweils der mittleren monatlichen potenziellen Evapotranspiration über die gesamte behandelte Zeitspanne entsprechen.

Die Möglichkeiten zur Abschätzung dieser Werte sind vielfältig und reichen von der Verwendung einer einfachen Sinuskurve bis hin zu komplexen physischen Modellen (Beven, 2012: 56-60). Je nach dem, welche Daten zur Verfügung stehen, gibt es unterschiedliche Berechnungsansätze (Oudin et al., 2004). Einer der verbreitetsten ist die Gleichung von Penman-Monteith. Allerdings werden für diese Gleichung zahlreiche Parameter benötigt, die mir nicht zur Verfügung standen oder nur unter grossem Aufwand hätten beschafft oder berechnet werden können. Dazu zählen etwa Angaben zu Windgeschwindigkeit, Oberflächenrauigkeit oder Dampfdruck. Hinzu kommt, dass Oudin et al. (2004) bei ihrer Evaluation von 27 verschiedenen Berechnungsansätzen zum Schluss kamen, dass die Resultate solch komplexer Modelle gar nicht unbedingt besser abschneiden als vereinfachtere Ansätze. Sie schlagen die folgende Formel zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration vor, die ich ebenfalls verwenden werde:

$$PE = \frac{R_e T_a + K_2}{\lambda \rho K_1} \text{ wenn } T_a + K_2 > 0 \quad (3)$$

ansonsten: $PE = 0$

PE: Potenzielle Evapotranspiration [mm/Tag], **R_e**: extraterrestrische Strahlung [MJ/m²/Tag] (abhängig vom julianischen Tag und der geografischen Länge und Breite), **T_a**: Tägliche durchschnittliche Lufttemperatur [°C], **λ**: latenter Wärmefluss [2.26 MJ/kg], **ρ**: Dichte von Wasser [1000 kg/m³], **K₁**, **K₂**: Anpassungskonstanten [81°C bzw. 5°C]

Trotz dieser Berechnung sind monatliche Mittelwerte immer noch eine starke Vereinfachung gegenüber der Realität. Das HBV-Modell ermöglicht deshalb noch eine genauere Berechnung, welche die nun ermittelten Monatswerte entsprechend der aktuellen Tagestemperatur korrigiert. Dies geschieht gemäss der folgenden Berechnungsweise:

$$E_{pot}(t) = (1 + Cet(T(t) - T_M))E_{pot,M} \quad (4)$$

dabei gilt: $0 \leq E_{pot}(t) \leq 2E_{pot,M}$

E_{pot}: Potenzielle Evapotranspiration [mm/Tag], **E_{pot,M}**: langfristiger Mittelwert der potenziellen Evapotranspiration [mm/Tag], **T**: Temperatur [°C], **T_M**: langfristiger Mittelwert der Temperatur [°C], **Cet**: Korrekturfaktor [°C⁻¹]

Benötigt wird dazu noch das optionale T_mean-File.

3.3.3. T_mean-File

Bei diesem File handelt es sich um eine Textdatei, welche wie das Evaporation-File zwölf Werte, nämlich die durchschnittliche monatliche Tagestemperatur über die gesamte behandelte Zeitspanne enthält. Die Werte können aus den täglichen Temperaturdaten von MeteoSchweiz (siehe Kapitel 3.3.1.) berechnet werden.

3.3.4. Elevation-File

HBV erlaubt es, die Eigenschaften eines Einzugsgebiets realitätsnaher abzubilden, indem verschiedene Höhenstufen definiert werden. Dabei kann für jede Höhenstufe ein prozentualer Anteil an der Gesamtfläche sowie eine durchschnittliche Höhe angegeben werden, was dann entsprechend ins Modell miteinfließt. Gerade in der gebirgigen Schweiz, wo sich Einzugsgebiete zum Teil über mehrere hundert Höhenmeter erstrecken, macht diese Unterteilung Sinn.

Berechnet wurden die entsprechenden Höhenstufen mit der Software ArcGIS, einem GIS-Programm, das zahlreiche Tools zur Behandlung von hydrologischen Prozessen beinhaltet.

Grundlage für diese Berechnung sind ein digitales Höhenmodell der Schweiz sowie ein Punktdatensatz mit den Standorten der hydrologischen Messstationen des BAFU. In einem ersten Schritt werden mit der Funktion *Fill* allfällige Senken im Höhenmodell aufgefüllt. Dies ist nötig, um im

zweiten Schritt, der Feststellung der Fließrichtung, sinnvolle Resultate zu erhalten. Diese Fließrichtung wird für jedes Pixel des Höhenmodells mittels *Flow Direction*-Tool ermittelt. Aus dieser Fließrichtung kann mit *Flow Accumulation* anschliessend berechnet werden, wo sich das Wasser sammelt und sich somit Fließgewässer bilden. Das Tool *Snap Pour Point* erlaubt es dann diese Gewässer mit den Standorten der hydrologischen Messstationen zu verschneiden. Aus diesem Produkt können schliesslich mit der Funktion *Watershed* die einzelnen Einzugsgebiete extrahiert werden. Nach einer Multiplikation mit dem Höhenmodell und einer Reklassifikation in Höhenstufen von jeweils 100 Metern Höhendifferenz, kann dann wiederum mittels Analyse der Pixelanzahl pro Klasse der prozentuale Anteil einer Höhenstufe an der Gesamtfläche eruiert werden (vgl. Abb. 5). Diese Angaben werden dann ins HBV-Modell eingefügt.

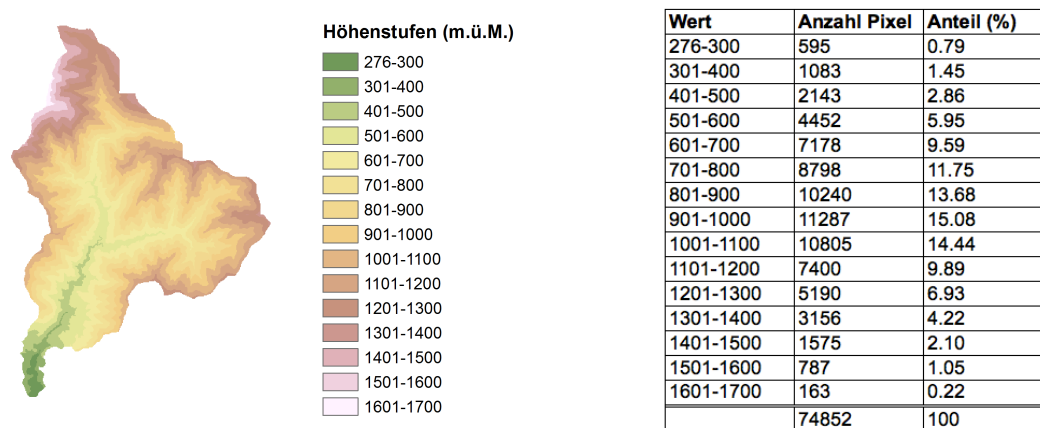


Abb. 5: Erstellung des Elevation-Files am Beispiel der Breggia. Erstellung der Höhenstufen (links) und Berechnung der prozentualen Anteile für das Elevation-File (rechts).

3.4. Einbezug der Phänologie

Da das HBV-Modell nicht darauf ausgelegt ist, phänologische Daten zu verwenden, müssen diese auf indirektem Weg in den Modellierungsprozess eingeführt werden.

Während im Normalfall eine Kalibrierung über die gesamte Zeitspanne der Datenreihen erfolgt und somit keine saisonale Variabilität beinhaltet, ist es möglich bei den Modelleinstellungen eine fixe Zeitspanne anzugeben, auf die sich die Kalibrierung beschränkt. So kann etwa eine Kalibrierung nur für das hydrologische Sommerhalbjahr, also zwischen dem 1. Mai und dem 30. September, durchgeführt werden. Allerdings bleibt diese Zeitspanne über alle Jahre konstant.

Genau dies soll in meinen Untersuchungen ja aber nicht der Fall sein. Die Modellkalibrierung soll flexibel gemäss den jeweiligen Daten von Blattaustrieb und Blattfall erfolgen. Um dies zu erreichen ist ein kleiner Trick notwendig. HBV berechnet die Modellgüte nur für Tage, an denen alle benötigten Inputdaten realistische Werte aufweisen. Genauer gesagt bedeutet das, dass negative Abflusswerte bei der Kalibrierung nicht berücksichtigt werden. Somit können im PTQ-File beispielsweise alle Abflusswerte von Tagen, die im phänologischen Winterhalbjahr liegen auf den

Wert -999 gesetzt werden, was dazu führt, dass die Modellgüte nur für die Tage im phänologischen Sommer berechnet wird.

MeteoSchweiz betreibt seit 1951 ein phänologisches Messnetz, das aus rund 160 Stationen besteht, an denen Beobachter jeweils diverse phänologische Daten von insgesamt 26 Pflanzenarten registrieren (MeteoSchweiz, 2014). Unter anderem wird aufgezeichnet, an welchem Datum die Blätter ausgebildet werden und der Laubfall einsetzt. Diese Daten sollen verwendet werden, um die PTQ-Files so anzupassen, dass für alle Jahre mittels Einsetzen von -999-Werten jeweils ein flexibler Sommer- und Winterbeginn definiert werden kann. Somit ergeben sich schlussendlich zwei verschiedene PTQ-Files, nämlich je eines für den phänologischen Sommer und eines für den Winter ohne Laub an den Bäumen. Dadurch sind auch zwei verschiedene Modellkalibrierungen notwendig, deren Resultate aber schliesslich bei der Resultatanalyse wieder kombiniert werden können. In den Daten des phänologischen Messnetzes kommen immer wieder Lücken vor. Solche Jahre, in denen die Daten von Blattausbildung und/oder Laubfall fehlen, werden für diese Arbeit ignoriert und auch die entsprechenden Abfluss-, Niederschlags- und Temperaturdaten aus den entsprechenden Files gelöscht.

Natürlich kommt es kaum vor, dass die Vegetation eines Einzugsgebietes nur aus einer Baumart besteht. Da unterschiedliche Pflanzenarten aber auch zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit der Blattausbildung beginnen, stellt dies für meine Untersuchungen ein gewisses Problem dar. Wie in den obigen Erläuterungen gesehen, kann lediglich ein Start- und Endtermin der Vegetationsphase definiert werden, eine fließende Zunahme an Blattvegetation ist nicht umsetzbar. Die Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) bietet mit dem Landes-Forst-Inventar (LFI) ein Instrument, das schweizweit Angaben zum Baumbestand enthält. Unter anderem gibt es Daten zu den prozentualen Gesamtstammzahlen der häufigsten Waldbäume der Schweiz (WSL, 2014). Zwar sind diese Daten über grössere Wirtschaftsregionen aggregiert, geben aber dennoch eine gute Grundübersicht (vgl. Abb. 6). Ich werde mich an diesen Daten orientieren und jeweils die phänologischen Daten der Baumart mit dem prozentual häufigsten Vorkommen in dieser Region verwenden.

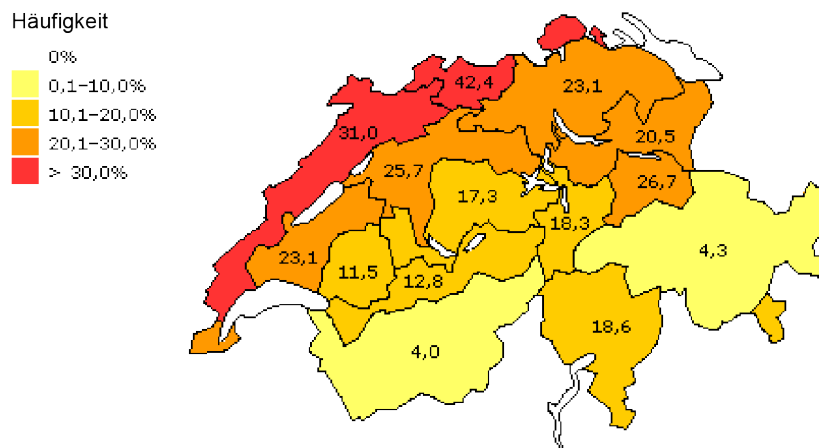


Abb. 6: Prozentualer Anteil der Buche an der Gesamtstammanzahl, aggregiert nach Wirtschaftsregionen. Quelle: <https://www.lfi.ch/resultate/daten/trees/buche2.php>.

Die phänologischen Daten sind von klimatischen Faktoren abhängig. Dabei haben die Temperatur, das Auftreten von Frost und die Schneeschmelze einen zentralen Einfluss auf das Datum der Blattausbildung (Menzel, 2007). Da diese Faktoren auch wesentlich mit der Meereshöhe variieren, ist auch zu dieser ein Zusammenhang zu erwarten. Dennoch werde ich für meine Modellierungen keine Höhenabhängigkeit berücksichtigen, sondern exakt die an der Messstation erhobenen Daten verwenden. Dies hat mehrere Gründe. Erstens ist es nicht möglich unterschiedliche phänologische Termine für ein und dieselbe Modellierung zu verwenden. Selbst wenn die Höhenabhängigkeit berücksichtigt würde, müssten die Daten schlussendlich wieder über das ganze Einzugsgebiet gemittelt werden, womit der Grossteil der Informationen sogleich wieder verloren ginge. In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass die phänologische Messstation bei den von mir gewählten Einzugsgebieten oft schon irgendwo innerhalb des Einzugsgebietes liegt, so dass die dort ermittelten Werte von allfällig berechneten Mittelwerten vermutlich gar nicht allzu verschieden sein dürften. Als weiterer Grund kommt hinzu, dass Daten nicht nur höhenabhängig sind, sondern auch stark von anderen, meist lokalen Parametern beeinflusst werden. Dies bestätigen die oft deutlich verschiedenen phänologischen Termine auch bei nahe beieinander liegenden Messstationen. Selbst auf selber Meereshöhe zeigen benachbarte Stationen häufig grössere Unterschiede (vgl. Abb. 7). Bei einer Berechnung würden somit wohl nur weitere Unsicherheiten oder Fehlerquellen entstehen.

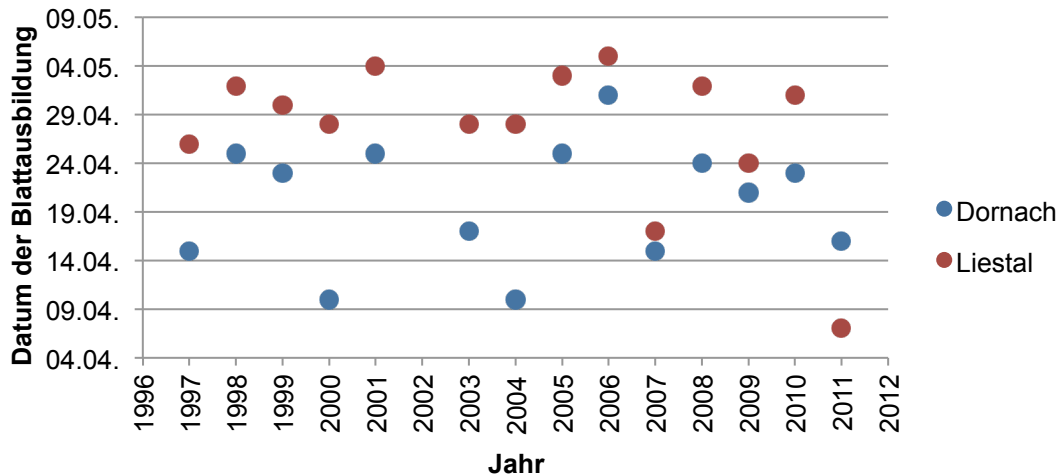


Abb. 7: Daten der Blattausbildung der Buche an den phänologischen Messstationen Dornach und Liestal (300 bzw. 350 m.ü.M., Distanz ca. 9km).

Da ja nebst dem Einbezug der phänologischen Daten auch über das hydrologische Jahr kalibriert werden soll, ist es interessant anzuschauen, inwieweit sich diese beiden saisonalen Definitionen unterscheiden. Abbildung 8 zeigt am Beispiel der phänologischen Daten von Liestal (Einzugsgebiet der Ergolz) wie sich die Daten der Blattausbildung und des Blattfalls bei der Buche von der fixen Datumsdefinition des hydrologischen Jahres unterscheidet. Dabei zeigt sich, dass die Schwankungen der phänologischen Daten über die ganze Zeitspanne gesehen doch um maximal etwa einen Monat variieren. Im Frühling liegen die Daten oft rund um den 1. Mai, der ja den hydrologischen Sommerbeginn definiert. Im Herbst tritt der Blattfall doch deutlich später als am 30. September, der den hydrologischen Winterbeginn kennzeichnet, auf.

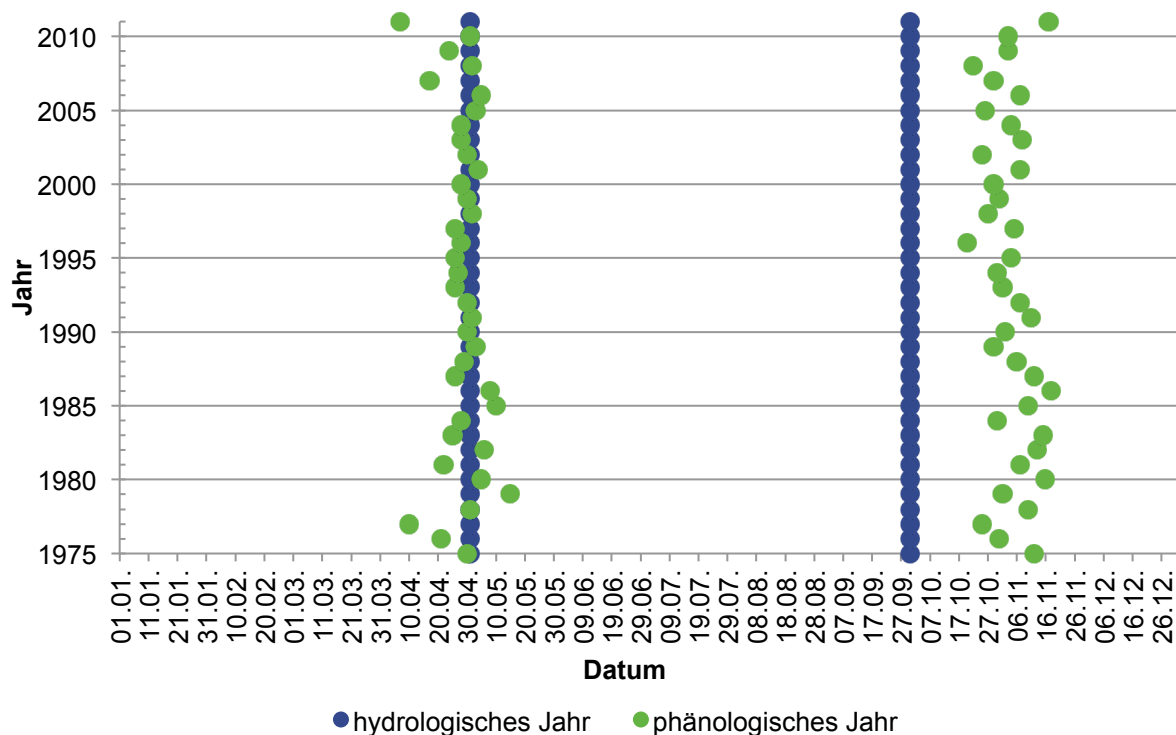


Abb. 8: Phänologischer und Hydrologischer Sommer- und Winterbeginn in Liestal.

3.5. Auswahl der Einzugsgebiete

3.5.1. Auswahlkriterien

Mit dem HBV-Modell können grundsätzliche weltweit Einzugsgebiete modelliert werden. Wichtig ist, dass es sich um abgeschlossene Einzugsgebiete von Fließgewässern handelt und dass die notwendigen Daten verfügbar sind. Für meine Fragestellung spielt die Lage der behandelten Einzugsgebiete keine grosse Rolle. Essenziell ist, dass Vegetation (in Form eines Blätterdachs) vorhanden ist und diese Vegetation jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen ist. Dies ist etwa in einem Gebiet im tropischen Regenwald mit ganzjährigem Blätterdach oder einem immergrünen Nadelwald nicht der Fall. Diese Gebiete zeigen keine Veränderungen, weshalb sich auch keine jahreszeitlich schwankenden Einflüsse der Phänologie auf den Abfluss ergeben dürften.

Wälder mit Laubfall gibt es in der Schweiz zuhauf. Hinzu kommt, dass die grosse klimatische, topografische und geologische und damit auch phänologische Vielfalt der Schweiz auf kleinem Raum verschiedenste Analysen erlaubt. So kann beispielsweise problemlos der Einfluss der Meereshöhe oder verschiedener Baumarten auf den Abfluss untersucht werden. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die gute Verfügbarkeit und Qualität der benötigten Datensätze. Aus diesen Gründen war es naheliegend, sich auf verschiedene Einzugsgebiete in der Schweiz zu konzentrieren.

Die wasserreiche Schweiz verfügt über eine Vielzahl an grösseren und kleineren Fließgewässern. Um für meine Untersuchungen geeignet zu sein, müssen Einzugsgebiete aber diverse Kriterien erfüllen. Am wichtigsten dabei ist wohl die Datenverfügbarkeit. Im HBV-Modell werden Niederschlags-, Temperatur-, Evapotranspirations-, Abfluss- und Höhendaten als Input benötigt. Hinzu kommt die Verfügbarkeit von Daten des phänologischen Messnetzes.

Niederschlags- und Temperaturdaten werden in der Schweiz seit vielen Jahren durch das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) erhoben. Das zugehörige Messnetz ist verhältnismässig dicht. Zudem wird durch die erwähnten Gitterdatensätze die gesamte Schweiz abgedeckt. Die Daten zu Niederschlag und Temperatur sind folglich für die gesamte Schweiz vorhanden und sind kein Kriterium zur Auswahl der Einzugsgebiete.

Daten zur Evapotranspiration werden mangels Messmethoden und Genauigkeit nicht erhoben, und werden aus anderen Daten berechnet (siehe Kapitel 3.3.2.). Auch diese Daten sind also nicht entscheidungsrelevant.

Wichtig sind die Abflussdaten. Diese müssen zur Verwendung im HBV-Modell in täglicher Auflösung vorhanden sein und sollten zur Erhöhung der Modellqualität eine gewisse Zeitspanne abdecken. In der Schweiz betreibt das Bundesamt für Umwelt (BAFU) das Basismessnetz Oberflächengewässer, das an rund 260 Messstellen an Seen und Flüssen den Abfluss registriert

(BAFU, 2014a). Die Daten dieses Messnetzes können beim BAFU bezogen werden. Relevant für die Einzugsgebiets-Auswahl ist also das Vorhandensein einer entsprechenden Messstelle.

Höhendaten sind in Form von Digitalen Höhenmodellen für die ganze Schweiz verfügbar. Für die einzelnen Einzugsgebiete können sie, wie in Kapitel 3.3.4. beschrieben, extrahiert werden.

Unabdingbar für meine Untersuchungen ist natürlich auch das Vorhandensein von Angaben zu Blattausbildung und Blattfall. Relevant für mich ist das Vorhandensein einer solchen Messstation innerhalb oder wenigstens nahe des gewählten Einzugsgebietes. Wichtig ist dabei nicht nur die räumliche, sondern auch die klimatische Nähe. Liegt die Messstation auf 500 m.ü.M., das Einzugsgebiet aber zwischen 1000 und 1500 m.ü.M. ist aufgrund der klimatischen Höhenabhängigkeit davon auszugehen, dass Blattausbildung und -fall gewisse Unterschiede aufweisen. Wie bei den Abflussdaten ist auch bei den phänologischen Daten eine ausreichende zeitliche Abdeckung von Vorteil.

Nebst der Datenverfügbarkeit spielen weitere Faktoren eine Rolle.

So sollte das Einzugsgebiet möglichst grossflächig bewaldet sein. Im Gegensatz zur Grasvegetation zeigt die Laubbedeckung des Waldes jahreszeitliche Unterschiede, womit auch die Evapotranspirationsrate entsprechenden Schwankungen unterworfen sein sollte. Je grösser der Waldanteil ist, desto grösser sollte folglich auch der Einfluss auf die Abflussbildung und damit auch die Aussagekraft meiner Untersuchungen sein. Gebiete mit einem grossen Flächenanteil über der Waldgrenze oder einem grossen Anteil an Landwirtschafts- oder Siedlungsfläche sind somit nach Möglichkeit zu vermeiden.

In diesem Zusammenhang spielt auch die Zusammensetzung des Waldes eine Rolle. Nadelbäume sind, abgesehen von der Lärche, immergrün und dürften deshalb kaum oder keinen jahreszeitlichen Einfluss auf die Evapotranspiration zeigen. Folglich sind für meine Untersuchungen Wälder mit möglichst hohem Laubbaumanteil zu bevorzugen. Das Baumartenvorkommen unterscheidet sich zwischen verschiedenen Regionen der Schweiz stark. Für meine Modellierungen können nicht mehrere Baumarten gleichzeitig verwendet werden. Deshalb sollten mit Vorteil phänologische Daten zur am häufigsten vorkommenden Baumart im entsprechenden Gebiet vorliegen.

Der Abfluss eines Gewässers hängt nicht nur von der Evapotranspiration und dem Niederschlag ab. Eine Rolle spielt beispielsweise auch eine vorhandene Vergletscherung oder grössere Seen im Einzugsgebiet. Sie dienen beide als Niederschlagsspeicher, Vergletscherung führt zudem zu saisonal stark erhöhten bzw. verringerten Abflüssen, während Seen eine puffernde Wirkung haben (Davie, 2008: 11). Da solche Einflüsse den Einfluss der Evapotranspiration auf den Abfluss stark verringern und übertönen können, sind Einzugsgebiete ohne Vergletscherung und grössere Seen auszuwählen.

Viele Gewässer in der Schweiz sind auch durch den Mensch stark beeinflusst. Verbauungen, Kraftwerke, Regulierungseinrichtungen, usw. beeinflussen den Abfluss und führen zu einem unnatürlichen Abflussverhalten. Für meine Untersuchungen ist es notwendig, dass die behandelten Gewässer möglichst unbeeinflusst sind, da den Resultaten ansonsten jegliche Aussagekraft fehlen würde. Bereits ein Blick auf die Abflussganglinien kann darauf hindeuten, dass eine künstliche Beeinflussung vorliegt. So weisen stufenartige Abflusskurven etwa darauf hin, dass das Gewässer künstlich reguliert wird. Zudem betreibt das Bundesamt für Umwelt (BAFU) eine Niedrigwasser-Statistik, die unter anderem auch die Beeinflussung von Fliessgewässern beinhaltet (BAFU, 2010).

Weiter ist davon auszugehen, dass in grösseren Einzugsgebieten mehr Einflüsse auf den Abfluss einwirken, die nicht direkt mit der Evapotranspiration zu tun haben und das Resultat deshalb negativ beeinflussen, bzw. die Aussagekraft schmälern würden. Kleinere Einzugsgebiete sind deshalb zu bevorzugen.

Ein Kriterium von unklarer Wichtigkeit ist der Untergrund eines Einzugsgebiets. Insbesondere allfälliges Karstvorkommen spielt hierbei eine Rolle. Bei Karst handelt es sich um ein sehr komplexes Phänomen, dessen Ausprägung sehr unterschiedlich sein kann. Entsprechend schwierig sind die Erfassung der Abflussprozesse und entsprechende Modellierungen in solchen Gebieten. Oft können nur sogenannte Black-Box-Modelle, die keine detaillierten Kenntnisse über das Abflussverhalten erfordern, den Abfluss in befriedigender Weise simulieren (Jukic & Denic-Jukic, 2009; Tritz et al., 2011). Allerdings gibt es auch Beispiele, bei denen die Modellierung funktioniert. Zudem ist Karst in der Schweiz, insbesondere in den Voralpen und im Jura, wo tendenziell die am dichtesten bewaldeten Gebiete liegen, weit verbreitet (vgl. Abb. 9).

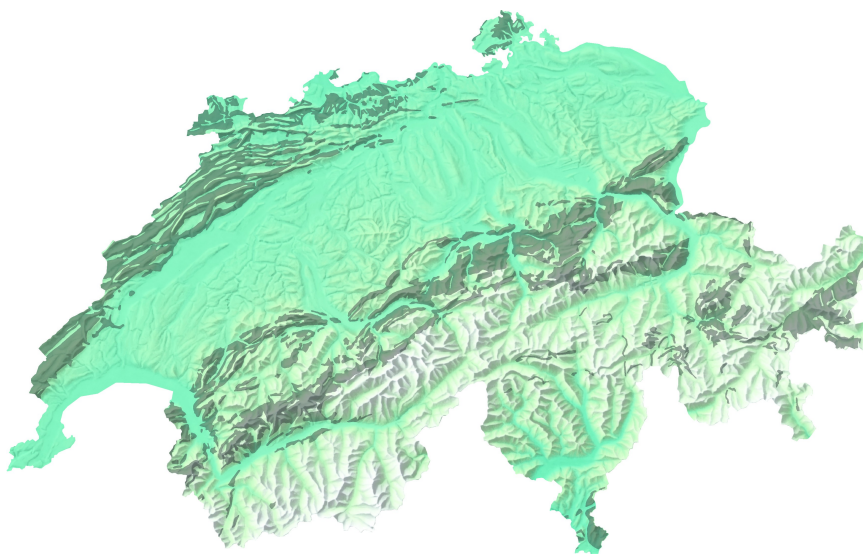


Abb. 9: Karstvorkommen in der Schweiz (dunkelgraue Flächen). Quelle: http://www.carto.net/neumann/cartography/papermaps/switzerland_karst_areas_relief.jpg

Diese beiden Tatsachen führen dazu, dass Karstvorkommen nicht als Ausschlusskriterium für die Auswahl der Einzugsgebiete gelten soll, aber bei der Interpretation und Analyse der Ergebnisse entsprechend berücksichtigt werden soll.

Schliesslich sollte bei der Auswahl der Einzugsgebiete darauf geachtet werden, dass unterschiedliche Gebiete und klimatisch-phänologische Regionen abgedeckt sind, was einen Vergleich ermöglicht und es eventuell vereinfacht, den Einfluss gewisser Parameter abzuschätzen.

Alle diese Faktoren führen zu einer nicht zu unterschätzenden Einschränkung in Bezug auf die Auswahl geeigneter Einzugsgebiete.

3.5.2. Überblick über die gewählten Einzugsgebiete

Aufgrund der oben genannten Faktoren wurden die Fliessgewässer Mentue, Ergolz, Rom, Breggia und Allenbach ausgewählt. Es werden nicht mehr Einzugsgebiete behandelt, da es kaum weitere Flüsse und Bäche gibt in der Schweiz, welche die oben genannten Kriterien in befriedigender Weise erfüllen und zudem auch der zeitliche Aufwand den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde.

Die Mentue wurde ausgewählt, da hier alle benötigten Inputdaten relativ lange verfügbare Zeitreihen aufweisen. Hinzu kommt, dass das Einzugsgebiet relativ tief gelegen ist und somit einen gewissen Prozentsatz Laubvegetation aufweist. Allerdings ist die Waldfläche anteilmässig an der Gesamtfläche nicht allzu hoch.

Die Ergolz weist ähnliche Charakteristika auf wie die Mentue und kann somit gut als Vergleichsstandort dienen. Zu beachten ist hier das Vorkommen von Karst.

Grund für die Auswahl des Rom ist in erster Linie das hohe Lärchenvorkommen in diesem Gebiet. Die Lärche ist einer der wenigen nicht-immergrünen Nadelbäume, d.h. die Nadeln werden im Herbst abgeworfen und treiben im Frühling wieder neu aus. Dieses Einzugsgebiet soll somit einen Vergleich zwischen Laub- und nicht-immergrünem Nadelwald liefern. Im Vergleich mit anderen Lärchenstandorten weist das Einzugsgebiet des Rom weder nennenswerte Vergletscherung, noch Karst, noch ein deutlich künstlich beeinflusstes Abflussverhalten auf.

Das Einzugsgebiet der Breggia ist insofern interessant, dass es sehr grossflächig bewaldet ist und gleichzeitig praktisch nur Laubvegetation aufweist. Somit wäre hier gemäss meinen Hypothesen der grösste Einfluss des Einbezugs phänologischer Daten zu erwarten. Erschwerend kommt auch hier das grosse Karstvorkommen hinzu.

Der Allenbach schliesslich erfüllt die Kriterien nicht und soll als Vergleichsstandort dienen. Es fehlen hier sowohl eine grossflächige Bewaldung wie auch ein nennenswertes Vorkommen von

Laubvegetation. Nichtsdestotrotz gibt es phänologische Daten zu Laubbäumen, was eine phänologische Kalibrierung und damit einen Vergleich mit den anderen Gebieten zulässt.

Tabelle 2 und die Abbildungen 10 und 11 geben einen Überblick über die gewählten Einzugsgebiete.

Tab. 2: Überblick über die Charakteristika der ausgewählten Einzugsgebiete.

	Mentue	Ergolz	Rom	Breggia	Allenbach
Region	Waadtland	Baselland	Südbünden	Südtessin	BE Oberland
Fläche (km²)¹	105	261	129.7	47.4	28.8
Höhe (m.ü.M.)¹	445-927	305-1168	1236-3033	250-1701	1297-2762
Mittlere Höhe (m.ü.M.)¹	679	590	2187	927	1856
Abflussregime-Typ²	pluvial jurasien	pluvial jurasien	nival alpin	pluvio-nival méridional	nival alpin
Bewaldung¹	26.77 %	41.25 % ⁵	24.73 %	72.23 %	13.77 %
Laubholz¹	23 % rein 15 % gemischt	70 % ⁶	3 % rein	100 % rein	0 %
Nadelholz¹	46 % rein 15 % gemischt	30 % ⁶	97 % rein	0 %	75 % rein 25 % gemischt
Verwendete Baumart	Buche	Buche	Lärche	Edelkastanie	Buche
Anteil Baumart³	23.1 %	42.4 %	9.5 %	21 %	12.8 %
Zeitabdeckung Daten	26 Jahre	36 Jahre	15 Jahre	16 Jahre	35 Jahre
Vergletscherung¹	0 %	0 %	0 %	0.12 %	0 %
Seeflächen¹	0 %	0 %	0 %	0 %	0.01 %
Geologie¹	Molasse	Mergel, Kalke (Karst) ⁷	Gneise, Glimmerschiefer, Akrosen, Rhyolite, Dolomite, Kalke	Kieselkalke (Karst)	Flysch, Karbonate, Mergel, Gips, Schiefer, wenig Kalke
Durchlässigkeit¹	gering	k.A. (vermutlich variabel, da z.T. verkarstet)	variabel bis gross	gross	gering bis sehr gering
Beeinflussung des Abflusses⁴	mässig	schwach	schwach	mässig	mässig

¹ Quelle: BAFU (2014b)

² Quelle: Weingartner & Aschwanden (1992)

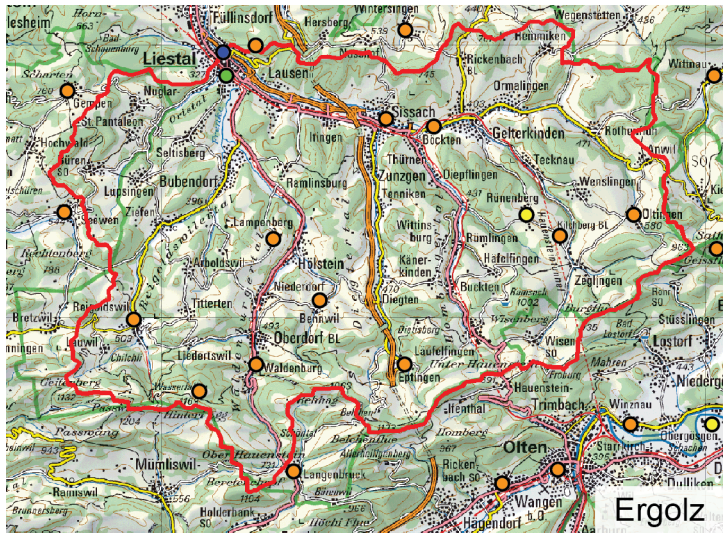
³ Quelle: WSL (2014)

⁴ Quelle: NQStat-Datenbank (BAFU (2010))

⁵ berechnet aus der Bodenbedeckung von Vector200 (swisstopo)

⁶ abgeschätzt nach WSL (2014)

⁷ Quelle: Geologischer Atlas (map.geo.admin.ch)



- Grenze Einzugsgebiet
- Hydrologische Messstation
- Phänologische Messstation
- Messstation Niederschlag & Temperatur*
- Messstation Niederschlag

* weitere Messstationen liegen z.T. ausserhalb der Kartenausschnitte

Masstab 1:275'000 5 km

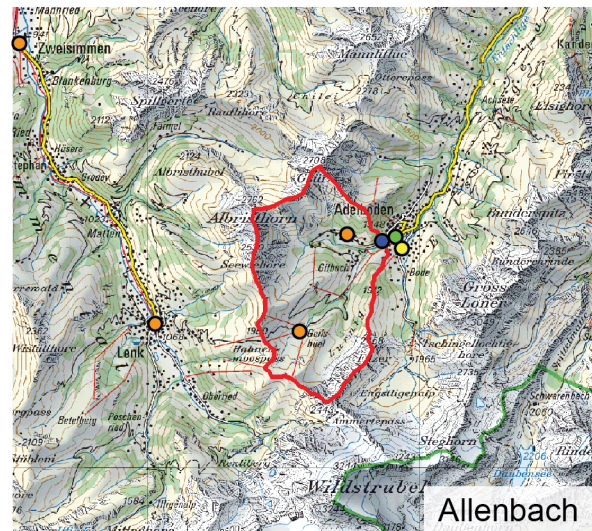
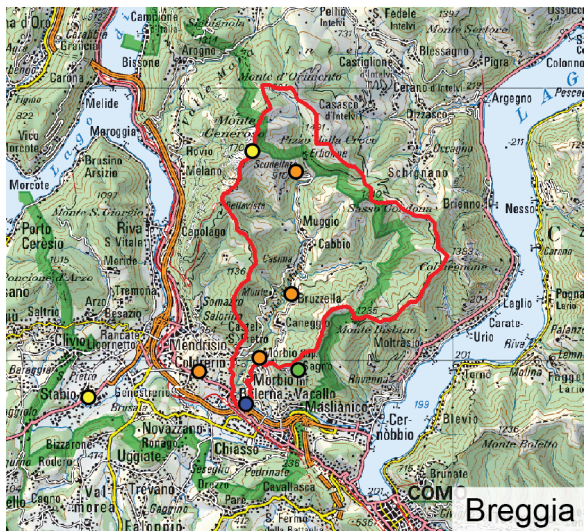
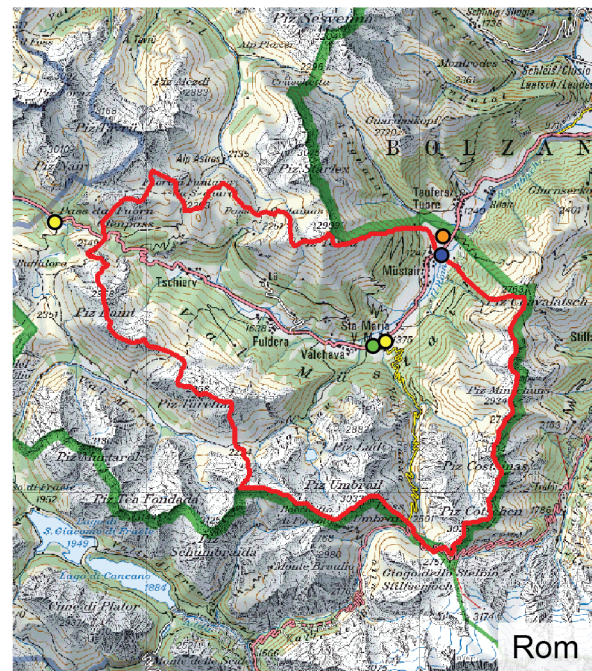
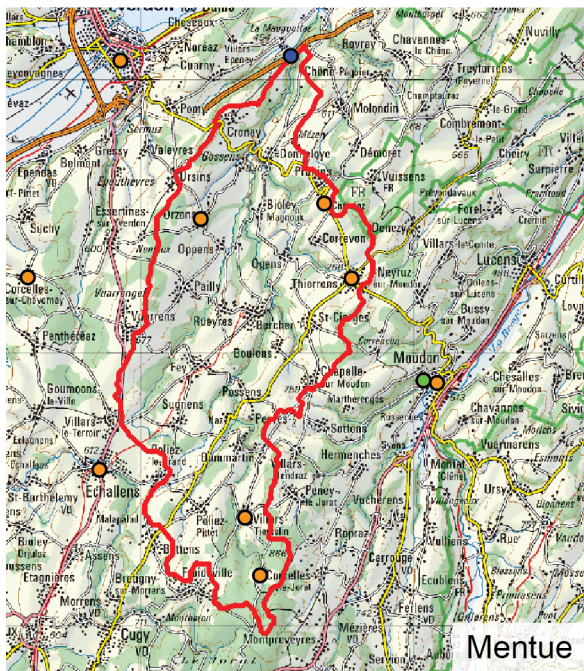


Abb. 10: Detailkarten der gewählten Einzugsgebiete. Quellen: swisstopo (Hintergrundkarte), MeteoSchweiz (meteorologische und phänologische Messstationen), BAFU (hydrologische Messstationen).



Abb. 11: Übersicht über die gewählten Einzugsgebiete. Quelle Daten Hintergrundkarte: swisstopo (Vector200).

3.6. Modellkalibrierung

Pro Einzugsgebiet werden jeweils fünf Kalibrierungen vorgenommen. Einmal soll standardmässig jeweils über die gesamten Jahre kalibriert werden. Hinzu kommt die Kalibrierung mit den wie oben beschriebenen abgeänderten PTQ-Files unter Einbezug der phänologischen Daten. Aus technischen Gründen sind hier jeweils zwei separate Kalibrierungen für das phänologische Winter- und Sommerhalbjahr notwendig. Zudem soll auch über das hydrologische Jahr, dessen Sommerbeginn und -ende auf den 1. Mai bzw. 30. September definiert sind, kalibriert werden. Dies, um abschätzen zu können, ob effektiv phänologische Daten zu einer verbesserten Modellkalibrierung beigezogen werden müssen oder ob es reicht, eine fixe Jahreszeiten-Unterscheidung vorzunehmen. Auch hier sind zwei separate Kalibrierungen für Winter und Sommer nötig.

3.6.1. GAP-Optimierung

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, eine Modellkalibrierung vorzunehmen. Eine Variante ist das manuelle Einstellen der Parameter und anschliessendes Anpassen der Werte bis sich das Resultat nicht mehr verbessert. Allerdings ist diese Methode sowohl gewissermassen subjektiv, als auch sehr zeitaufwändig (Seibert, 2000). Deshalb steht die automatisierte Kalibrierung für ein objektives Resultat im Vordergrund. Insbesondere die sogenannten genetischen Algorithmen sind dabei weit verbreitet und als „Genetic Algorithm and Powell Optimization“ (kurz GAP-Optimierung) im HBV-Modell implementiert. Wie es der Name sagt, orientieren sie sich an Prin-

zipien der Genetik. In einem ersten Schritt wird zufällig eine festzulegende Anzahl an Parameter-Sets ausgewählt und hinsichtlich der Modellgüte analysiert. Anschliessend werden aus diesen Parameter-Sets durch Rekombination und Selektion neue Parameter-Sets generiert, bis schlussendlich ein globales Maximum erreicht wird (Seibert, 2000). An diesen Schritt angehängt wird im HBV-Modell noch eine Optimierungs-Funktion gemäss Powell, die der Feinabstimmung dient (Seibert, 2000). Im HBV-Modell kann festgelegt werden, wie viele Durchgänge gerechnet werden sollen, in denen die Parameter-Sets jeweils neu zusammengestellt werden. Dabei gilt es zu beachten, dass sich die Rechenzeit mit einer zusätzlichen Anzahl Durchgänge natürlich verlängert. So dauerte ein einzelner Versuch mit 20'000 Durchläufen des genetischen Algorithmus und zusätzlichen 4000 Powell-Durchläufen bereits mehrere Stunden.

Wird dieser Prozess nur ein einziges Mal durchgeführt, gilt es das Problem der „Equifinality“ zu berücksichtigen. Darunter versteht man die Möglichkeit, dass verschiedene Parameter-Sets zu ähnlich guten Resultaten führen können. Dabei heisst das nicht, dass sich diese Parameter-Sets nur geringfügig unterscheiden. Es kommt durchaus vor, dass einzelne Parameter komplett verschiedene Werte annehmen und das Gesamtergebnis dennoch dasselbe ist (Beven, 2006). Somit besteht auch erneut die Gefahr, dass man ein gutes Resultat aus unplausiblen Gründen erreicht. Um die Gefahr dieser „Equifinality“ zu verringern, macht es Sinn den ganzen Kalibrierungsprozess nicht nur ein einziges Mal zu durchlaufen, sondern ihn mehrere Male zu wiederholen und anschliessend aus allen Durchgängen die Optima zu extrahieren. Das HBV-Modell bietet die Möglichkeit, automatisch 100 Kalibrierungs-Durchgänge laufen zu lassen. Mit den oben erwähnten Zahlen und dem Umstand, dass mehrere Einzugsgebiete und dabei wiederum mehrere Perioden zu kalibrieren sind, übersteigt die Rechenzeit so aber ziemlich bald die vorhandenen Kapazitäten für diese Arbeit. Verschiedene persönliche Versuche und solche anderer Mitarbeiter am Geographischen Institut der Universität Zürich haben aber gezeigt, dass auch mit deutlich weniger als 20'000 Durchläufen bereits ansprechende Ergebnisse erzielt werden können. So verändert sich die Modellgüte zu Beginn recht stark, zeigt aber nach rund 5000 Durchläufen keine grossen Verbesserungen mehr. Somit wurden schliesslich für alle Kalibrierungen jeweils 100 Durchgänge à jeweils 5000 Durchläufen des genetischen Algorithmus und 1000 Durchläufen der Powell-Optimierung gerechnet. Somit ergeben sich pro Kalibrierungsperiode 100 Optima, wobei für die anschliessenden Analysen jeweils der Mittelwert der selbigen verwendet werden soll. Somit werden auch allfällige Ausreisser neutralisiert. Die restlichen Einstellungen entsprechen den standardmässigen Werten des HBV-Modells.

In den Modelleinstellungen des HBV-Modells kann noch eine sogenannte Aufwärmperiode („Warm-Up Periode“) definiert werden. Diese wird benötigt, damit sich das Modell „warmlaufen“ kann, genauer gesagt um geeignete Startwerte für die anschliessenden Simulationen festzule-

gen (HBV-Hilfe). Dies ist essenziell, um anschliessend gute und aussagekräftige Simulationen zu erhalten. Ich habe diese Periode jeweils auf ein Jahr definiert. Dieses erste Jahr meiner Datenreihen fliesst in keinerlei Berechnungen und Analysen mit ein.

3.6.2. Wahl der Modellstruktur

Wie erwähnt erlaubt das HBV-Modell die Auswahl zwischen verschiedenen, leicht unterschiedlichen Modellstrukturen. Im Wesentlichen unterscheiden sich diese durch eine unterschiedliche Anzahl oder verschiedene Eigenschaften der Grundwasser-Boxen. Für die ausgewählten Einzugsgebiete wurden im Vorgang zur Kalibrierung Test-Durchläufe durchgeführt, die zeigen sollten, welche Modellstruktur für die jeweiligen Einzugsgebiet am geeignetsten ist. Dabei hat sich herauskristallisiert, dass für die beiden Einzugsgebiete der Mentue und Ergolz die Standardversion die besten Resultate erzielt, während für Rom, Breggia und Allenbach die Modellstruktur ohne UZL, die somit den Parameter Alpha anstelle von K_0 beinhaltet, leicht besser abschneidet.

3.6.3. Parameter-Wahl

Gäbe es bei der GAP-Optimierung keine Einschränkungen in Bezug auf die Parameterwahl, würde die Gefahr bestehen, ein gutes Resultat aus falschen Gründen zu erhalten. Damit meint man, dass die Kalibrierung zwar zu einer äusserst guten Modellgüte führt, allerdings auf Parameterwerten basiert, die aber in der Realität unplausiblen Werten entsprechen. Deshalb ist es im HBV-Modell möglich, vor der GAP-Optimierung bereits gewisse Grenzwerte für die verschiedenen Parameter festzulegen, die für das entsprechende Einzugsgebiet als realistisch angesehen werden. In meinem Fall wurden die standardmässig gewählten Parameter aufgrund persönlicher Erfahrungen und mehrerer Testdurchgänge entsprechend gewählt. Es hat sich gezeigt, dass sich für die beiden tiefer gelegenen Einzugsgebiete von Mentue und Ergolz einerseits und den höher gelegenen von Breggia, Rom und Allenbach andererseits unterschiedliche Grenzwerte eignen. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die gewählten Parameter-Grenzwerte.

Tab. 3: Gewählte Parameter-Grenzwerte für die GAP-Optimierung.

Parameter	Mentue/Ergolz		Rom/Breggia/Allenbach	
	Min	Max	Min	Max
Modellstruktur	Standard		ohne UZL	
TT	-2.5	2.5	-2	2
CFMAX	0.5	6	0.5	8
SFCF	0.5	1.5	0.5	1.3
CFR	0.05	0.05	0.05	0.1
CWH	0.1	0.1	0.01	0.1

FC	100	600	50	800
LP	0.3	1	0.3	1
BETA	1	5	1	8
PERC	0	10	0	10
UZL	0	100		
Alpha			0	1
K0	5E-05	0.9		
K1	5E-05	0.9	0.0.1	0.9
K2	5E-05	0.9	5E-05	0.9
MAXBAS	1	5	1	3
Cet	0	1	0	0.3
PCALT	10	10	0	12
TCALT	0.6	0.6	0.6	0.8
Pelev	M: 734 E: 535	M: 734 E: 535	R: 1484 B: 805 A: 1589	R: 1484 B: 805 A: 1589
Telev	M: 479 E: 615	M: 479 E: 615	R: 1498 B: 1568 A: 1320	R: 1498 B: 1568 A: 1320

M=Mentue, E=Ergolz, R=Rom, B=Breggia, A=Allenbach

Im Falle der beiden Parameter Pelev und Telev ist noch eine Bemerkung notwendig. Ich beziehe die entsprechenden Niederschlags- und Temperaturdaten wie erwähnt aus dem Gitterdatensatz von MeteoSchweiz. Somit entsprechen die Daten zwischen verschiedenen Meteostationen interpolierten Werten, was es nicht ganz einfach macht, den durchschnittlichen Höhenwert eines Einzugsgebiets herauszufiltern, zumal die Interpolation auch die Topographie miteinbezieht. Eine Extraktion eines genauen Mittelwertes ist nicht möglich, so dass ich auf eine leicht vereinfachende Methode zugriff. Die Standorte sämtlicher Messstationen sind bekannt, so dass basierend auf diesem Punktdatensatz sogenannte Thiessen-Polygone erstellt werden konnten. Ein Verschnitt mittels ArcGIS-Software mit der Fläche des Einzugsgebietes ermöglicht es so, den prozentualen Einflussbereich der verschiedenen Stationen zu ermitteln und einen entsprechend gewichteten Mittelwert zu berechnen. Anzumerken ist noch, dass der mir vorliegende Punktdatensatz mit den Messstationen nicht mehr ganz dem aktuellsten Stand entsprach, so dass gewisse Abweichungen möglich sind. Diese dürften sich aber in einem vernachlässigbaren Bereich bewegen.

Schliesslich wurden als Parameter-Grenzwerte exakt diese ermittelten Werte eingesetzt und nicht eine Spannweite definiert. Grund dafür ist, dass sich bei ersten Kalibrierungs-Durchläufen gezeigt hat, dass die Wahl der Höhen-Parameter Pelev und Telev starke Schwankungen zur Folge hat und einen wesentlichen Einfluss auf die anderen Parameter und insbesondere die Modellgüte

aufweist. Die Fixierung dieser Werte birgt zwar ein gewisses Risiko einer fehlerhaften Festlegung des Wertes, reduziert aber den ungewollten Einfluss der Höhenwahl auf das restliche Modell.

3.6.4. Modellgüte

Um festzustellen, wie gut ein Modell die beobachtete Realität abbildet, werden sogenannte Effizienzmasse verwendet. Es gibt eine grosse Anzahl möglicher Masse, die sich für unterschiedliche Zwecke mehr oder weniger eignen. Eines der am häufigsten verwendeten Gütemasse ist die Nash-Sutcliffe-Efficiency (Beven, 2012: 239). Dieses Mass ist unter dem Namen *Reff* auch im HBV-Modell implementiert und wird dort standardmässig zur Überprüfung der Modellgüte verwendet. Es ist gemäss der folgenden Formel aufgebaut:

$$Reff = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (5)$$

Q_{obs} : beobachtete Abflusswerte, Q_{sim} : simulierte Abflusswerte

Allerdings eignen sich wie gesagt nicht alle Masse für den gleichen Zweck. Da die Abflüsse bei der Nash-Sutcliffe-Efficiency quadriert werden, fallen Abflussspitzen bei der Berechnung viel mehr ins Gewicht als Niedrigabflüsse (Beven, 2012: 240). Da ich aber auf letztere fokussieren möchte, müssen andere Gütemasse beigezogen werden.

Pushpalatha et al. (2012) haben verschiedene Gütemasse im Hinblick auf die Modellierung von Niedrigabflüssen analysiert und empfehlen die Nash-Sutcliffe-Efficiency mit invers berechneten Abflüssen zu verwenden. Im HBV-Modell ist diese Möglichkeit nicht vorhanden, es bestehen aber diverse andere Möglichkeiten.

So ist etwa das Mass *FMARE* implementiert (im HBV-Modell als *MARE Measure* bezeichnet). *MARE* steht dabei für „Mean Absolute Relative Error“. Berechnet wird das Mass nach folgender Formel:

$$FMARE = 1 - \frac{1}{n} \sum \frac{|Q_{obs} - Q_{sim}|}{Q_{obs}} \quad (6)$$

Q_{obs} : beobachtete Abflusswerte, Q_{sim} : simulierte Abflusswerte, n : Anzahl Tage

Da hier keine Quadrierungen vorkommen, fallen Abflussspitzen viel weniger ins Gewicht und Niedrigabflussperioden erhalten einen grösseren Einfluss. Erste Modellierungsversuche mit diesem Mass haben gezeigt, dass Niedrigabflussperioden effektiv besser abgebildet werden, allerdings wurden viele Spitzen kaum nicht erfasst.

Obwohl ich mich auf Niedrigabflussperioden konzentrieren möchte, ist es notwendig, dass das Modell insgesamt eine gute Modellgüte aufweist. Ist dies nicht der Fall, muss davon ausgegangen werden, dass gewisse Prozesse (in diesem Fall eben kurzfristige Anstiege des Abflusses) nicht erfasst werden, was die Aussagekraft des gesamten Modells schmälern würde. Hinzu kommt, dass Niedrigabflussperioden ja immer wieder durch kleinere und grössere Abflussspitzen kurzzeitig unterbrochen werden und es macht deshalb Sinn, wenn auch diese wenigstens ansatzweise abgebildet werden.

Das HBV-Modell erlaubt es, eine sogenannte gewichtete Zielfunktion („Weighted Objective Function“) zu definieren, die sich aus mehreren Gütemassen zusammensetzt. Dies soll in meinem Fall genutzt werden. So wurden diverse Tests durchgeführt und dabei beobachtet, wie sich die Abflusskurven mit unterschiedlichen prozentualen Bestandteilen verschiedener Gütemasse verändert. Es hat sich gezeigt, dass ein Miteinbezug des Reff selbst bei einer sehr kleinen Gewichtung rasch zu einer Verbesserung der Spitzen, aber gleichzeitig zu einer Verschlechterung des Niedrigabflusses führt. Ähnlich verhielt sich das Lindström-Mass, das teilweise auf dem Reff basiert und gemäss folgender Formel berechnet wird:

$$\mathit{Lindström} = \mathit{Reff} - 0.1 \frac{|\sum(Q_{obs} - Q_{sim})|}{\sum Q_{obs}} \quad (7)$$

Q_{obs} : beobachtete Abflusswerte, Q_{sim} : simulierte Abflusswerte

Allerdings war hier die Verschlechterung der tiefen Abflüsse etwas weniger stark, so dass für meine Modellierungen schlussendlich eine gewichtete Zielfunktion, die sich zu 20 Prozent aus dem Lindström-Mass und zu 80 Prozent aus dem FMARE-Mass zusammensetzt, definiert wurde.

3.6.5. Anpassungsversuche Evapotranspirationswerte

Trotz dem Einbezug des Lindström-Masses haben erste Modellierungen gezeigt, dass vor allem in langen Trockenperioden die Abflussspitzen teilweise durch das Modell nicht ausreichend erfasst wurden.

Von Seiten der Inputdaten stellt die Evapotranspiration einen relativ grossen Unsicherheitswert dar, da die Werte lediglich auf der Temperatur und ein paar berechneten Monatswerten basieren. Die meisten anderen Inputdaten basieren auf Beobachtungen und sind deshalb kaum anzuzweifeln. In längeren Trockenperioden, wie etwa dem Sommer 2003, ist es oft auch aussergewöhnlich heiss. Dies lässt den Umstand, dass die Simulation der Evapotranspiration in diesen Phasen nicht befriedigend funktioniert, was dann wiederum zur schlechten Abbildung des Abflussverhaltens in diesen Perioden führen könnte, im Bereich des Möglichen erscheinen.

Aus diesem Grund wurden ein paar Test-Modellierungen durchgeführt, bei denen die berechneten durchschnittlichen Monatswerte der Evapotranspiration angepasst wurden. Allerdings führten auch grosse Werteanpassungen zu keiner Veränderung in der Abbildung der Abflussverhältnisse, so dass diese These verworfen werden musste. Stattdessen soll bei der Analyse der Resultate auf diese Modell-Mängel aufmerksam gemacht werden.

3.6.6. Variabilität der Modellgüte

Als Resultat des Kalibrierungsprozesses erhält man Resultat-Files, welche die Modellgüte-Werte über die gesamte Periode beinhalten. Im Hinblick auf meine Fragestellungen ist es aber notwendig, die Modellgüte etwas genauer anzuschauen. Konkret soll gezeigt werden wie sie sich über die Zeit verändert. Dazu wird für die Resultatanalyse die Modellgüte mittels der beobachteten Abflusswerte und der erhaltenen Resultat-Files neu berechnet. Dabei wird ein sogenanntes „Moving Window“ verwendet. Das heisst es wird eine fixe Zeitspanne definiert (in diesem Fall eine Woche), für die das Effizienzmass berechnet wird. Zuerst geschieht dies für die erste Woche der Datenreihe. Anschliessend wird dieses Fenster Schritt für Schritt jeweils um einen Tag verschoben und neu berechnet. So resultiert am Schluss für jeden Tag der gesamten Zeitspanne ein Wert, der jeweils die Modellgüte in den folgenden sieben Tagen angibt. Eine Entwicklung ist so relativ einfach ablesbar.

Da für das hydrologische und phänologische Jahr jeweils eine Winter- und Sommerkalibrierung notwendig ist, entsteht an den Übergängen zwischen Sommer- und Winterhalbjahr jeweils eine Lücke von einer Woche, was aber nicht weiter von Bedeutung ist.

3.7. Definition Trockenperioden

Wie in der Einleitung gesehen, gibt es verschiedene Varianten, Trockenheit zu definieren. Da ich eine allfällige Modell-Verbesserung hauptsächlich im Hinblick auf solche Perioden betrachten möchte, ist es notwendig für diese Arbeit eine Definition solcher Trocken-, bzw. Niedrigabflussperioden vorzunehmen. In der Schweiz gebräuchlich ist dabei der Grenzwert Q_{347} . Dieser entspricht dem Fünf-Prozent-Quantil der Abflussmenge, beschreibt also die Abflussmenge, die nur in fünf Prozent der Fälle unterschritten und somit an 347 Tagen pro Jahr überschritten wird. Berechnet wird der Grenzwert jeweils über zehn Jahre (Aschwanden & Kan, 1999). Problematisch ist dabei natürlich, dass der Wert direkt davon abhängt, welche zehn Jahre man auswählt und sich auch entsprechend verändert. Im Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) sind die Q_{347} -Werte für sämtliche Einzugsgebiete der Schweiz für den Zeitraum 1984-1993 abgeschätzt (Aschwanden & Kan, 1999). Die Datenreihen in meinen Einzugsgebieten decken jedoch eine andere Zeitspanne ab und erstrecken sich meistens auch über deutlich mehr als zehn Jahre. Da

eine sehr exakte und strikte Definition von Trockenperioden für meine Untersuchungen nicht essenziell ist, sondern lediglich einen gewissen Anhaltspunkt für die Interpretation der Resultate liefern soll, habe ich mich für eine stark vereinfachte Berechnungsmethode entschieden. Entspricht die Zeitspanne der Datenreihe maximal 15 Jahren, habe ich aus den beobachteten Abflusswerten selber das 5%-Perzentil (bezeichnet als Q5) berechnet und verwendet. Ist die Zeitspanne grösser, habe ich sie entsprechend unterteilt und das Quantil mehrfach für die unterschiedlichen Zeitspannen à je ungefähr zehn Jahren berechnet. Eine genaue Zusammenstellung der gewählten Werte ist in der Tabelle 4 zu finden. Da mich nicht nur die Trockenheit an sich, sondern allgemein der Zusammenhang zwischen meinen Modellierungen und der Abflussmenge interessiert, habe ich zudem weitere Perzentile (Q35, Q65 und Q95) berechnet.

Zu beachten gilt es auch, dass die Werte übers ganze Jahr berechnet werden. Ein saisonaler Abflussgang ist nicht berücksichtigt. So kann es vorkommen, dass gerade in höher gelegenen Einzugsgebieten, wo im Winter der Niederschlag hauptsächlich als Schnee fällt und nicht direkt zum Abfluss kommt, vor allem die trockenen Winterperioden unter den Schwellenwert fallen. Hisdal & Tallaksen (2000: 12) sind der Meinung, dass es wichtig ist, in solchen Gebieten zwischen Sommer- und Wintertrockenheiten zu unterscheiden. Deshalb habe für die drei nival beeinflussten Einzugsgebiete des Rom, der Breggia und des Allenbachs die Berechnungen der Perzentile einmal für die Winterperiode (November bis April) und einmal für die Sommerperiode (Mai bis Oktober) durchgeführt. Als gilt also bei der Resultatanalyse zu berücksichtigen, dass eine Abflussspitze im Sommer mengenmässig nicht einer Abflussspitze im Winter entspricht.

Tab. 4: Grenzwerte für die verschiedenen Abflusskategorien in den Einzugsgebieten (in mm/Tag; S=Sommer, W=Winter; Quelle Q347: Aschwanden & Kan, 1999).

		Mentue		Ergolz			Rom	Breggia	Allenbach		
		1986-2000	2001-2011	1976-1990	1991-2000	2001-2011			1977-1990	1991-2000	2001-2011
Q347		0.6015		0.132			0.566	0.0729	0.75		
Q5	S	0.239	0.188	0.152	0.166	0.138	1.069	0.047	1.170	1.379	1.230
	W						0.594	0.086	0.720	0.780	0.528
Q35	S	0.683	0.522	0.500	0.493	0.469	1.673	0.229	2.520	2.460	2.433
	W						0.793	0.410	1.050	1.260	1.509
Q65	S	1.275	1.011	1.179	1.039	1.019	2.603	0.592	5.783	4.811	4.199
	W						0.994	1.162	1.650	1.950	2.166
Q95	S	4.625	3.802	4.340	3.939	4.159	5.394	5.988	16.28	14.19	12.38
	W						1.900	8.871	5.766	6.120	7.200

4. Resultate

4.1. Allgemeine Modellgüte

Bevor die verschiedenen Kalibrierungsergebnisse detailliert betrachtet werden, soll zuerst ein allgemeiner Überblick über die Ergebnisse verschafft werden. Bereits so können erste Aussagen darüber gemacht werden, wie gut ein Modell die Realität insgesamt abbildet. Die von mir gewählte gewichtete Zielfunktion, wie übrigens auch die meisten anderen im HBV-Modell implementierten Gütemasse, haben ihr Optimum bei einem Wert von 1 und sind nach unten hin offen. Es scheint keine klar festgelegten Grenzwerte zu geben, ab wann eine Modellgüte als akzeptabel oder gut einzustufen ist, jedenfalls habe ich in der Literatur keine entsprechenden Werte gefunden. Erfahrungen von mir und Anderen zeigen aber, dass eine Modellgüte ab ca. 0.5 als akzeptabel, ab ca. 0.8 als sehr gut eingestuft werden kann. Unter diesem Gesichtspunkt sollen die durchgeführten Kalibrierungen vorerst beurteilt werden. Die Boxplots in Abbildung 12 stellen dabei jeweils die besten erreichten Ergebnisse aller 100 GAP-Durchläufe für sämtliche Kalibrierungsperioden und Einzugsgebiete dar. Die blauen Boxen decken dabei 50 Prozent der Ergebnisse ab, also alle Werte, die zwischen dem 25- und dem 75-Prozent-Perzentil liegen. Die schwarzen Linien bilden Werte ab, die ausserhalb dieser Grenzen liegen (maximal die 1.5-fache Distanz vom Median bis zum 25-, bzw. 75-Prozent-Perzentil). Schwarze Punkte stehen für Ausreisser.

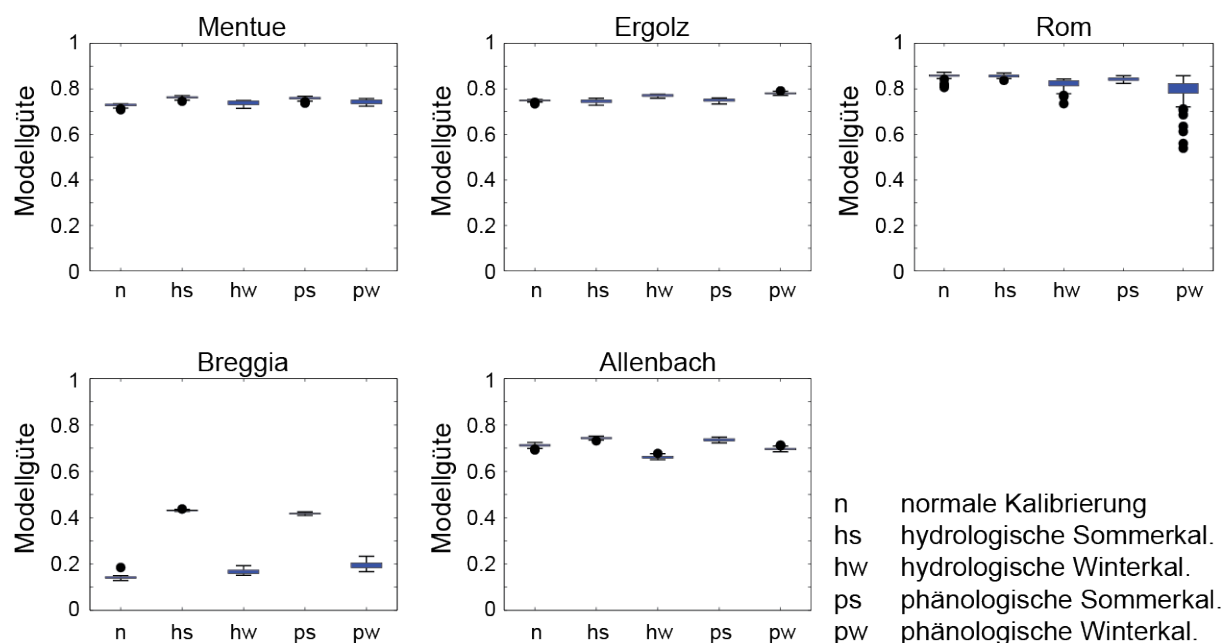


Abb. 12: Erreichte Modellgüte aller 100 GAP-Durchläufe je Einzugsgebiet.

Die allgemeinen Ergebnisse sind mehrheitlich erfreulich. Abgesehen von der Breggia bewegen sich sämtliche Werte zwischen 0.6 und 0.9, womit die Modellgüte als gut bis sogar sehr gut einzustufen ist. Grosse Streuungen sind kaum zu erkennen. Die Modellkalibrierungen lieferten also

relativ stabile Ergebnisse über die 100 Durchgänge gesehen. Einzig bei den beiden Kalibrierungen über das Winterhalbjahr beim Rom ist eine gewisse Variabilität vorhanden. Ebenfalls zeigt sich, dass keine markanten Unterschiede zwischen den jeweiligen Kalibrierungsperioden vorkommen. Die fünf verschiedenen Kalibrierungsarten lieferten meist ähnliche Ergebnisse, was im Hinblick auf einen Vergleich zwischen den Kalibrierungsarten von Vorteil ist.

Eine Ausnahme bildet das Einzugsgebiet der Breggia. Hier liegen die Werte zum Teil deutlich unter 0.5, insbesondere die Werte der Standard- sowie der beiden Winterkalibrierungen erreichen kaum 0.2. Somit muss die Modellgüte als ungenügend betrachtet werden und die Simulation kann in dieser Form nicht für weitere Modellierungen und Analysen verwendet werden. Als Grund für die schlechte Abbildung wird das verbreitete Karstvorkommen im Einzugsgebiet der Breggia vermutet. In Kapitel 4.6. wird noch etwas vertieft auf diese Problematik und mögliche Lösungsansätze eingegangen. Leider konnten trotz Anpassungsversuchen keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht werden, so dass Modellierungen für dieses Einzugsgebiet zwar teilweise durchgeführt wurden, diese aber nicht in meine Detailanalysen und Schlussfolgerungen miteinfließen werden. Ist die Modellgüte derart schlecht, deutet das darauf hin, dass grundlegende Prozesse vom Modell nicht erfasst werden, was eine Interpretation der Ergebnisse sinnlos macht.

Die Suche nach einem Alternativstandort mit ähnlichen Eigenschaften (sehr grossflächige Bewaldung, ausschliesslich Laubbäume) war leider nicht erfolgreich. Solche Gebiete kommen in der Schweiz praktisch ausschliesslich im Tessin vor. Im nördlichen Tessin nimmt aber der Waldanteil rasch ab und der Nadelholz-Anteil zu. Für die wenigen übrigen Einzugsgebiete im Südtessin waren leider keine geeigneten phänologischen Daten verfügbar. Eine Interpolation von weiter entfernten Stationen dürfte aufgrund der grossen Streuungen auf kleinstem Raum (vgl. Kapitel 3.4.) kaum Sinn machen. Somit werden sich meine Detailanalysen auf die verbleibenden vier Standorte beschränken.

4.2. Parameterausprägung

Da zu erwarten ist, dass sich gewisse Parameter zwischen den verschiedenen Kalibrierungsarten unterscheiden, wird im Folgenden auf die Ausprägung der Parameterwerte eingegangen. Insbesondere interessiert, ob es Unterschiede zwischen Winter- und Sommerkalibrierung gibt, was den Nutzen einer saisonalen Kalibrierung unterstreichen würde. Die folgenden Abbildungen 13, 14, 15 und 16 zeigen auf, welche Werte den einzelnen Parametern beim Kalibrierungsprozess zugewiesen wurden. Die blauen Boxen decken dabei 50 Prozent der 100 Kalibrierungsdurchgänge ab, nämlich die Werte, die zwischen dem 25- und dem 75-Prozent-Perzentil liegen. Die rote Linie markiert jeweils den Medianwert, das gelbe Kreuz den Mittelwert. Die blauen Linien zeigen Werte an, die ausserhalb der erwähnten Perzentile liegen. Die grünen Punkte stehen für Ausreisser,

die um mehr als das 1.5-fache vom Medianwert abweichen. Boxplots, bei denen keinerlei Streuung sichtbar ist, behandeln Parameter, deren Werte bei den Kalibrierungseinstellungen fixiert wurden (z.B. Pelev und Telev). Diese sind lediglich der Vollständigkeit halber dargestellt. Häufen sich Parameterausprägungen am oberen oder unteren Rand der Boxplots, kann dies darauf hindeuten, dass mit einer Ausweitung der Parametergrenzen eventuell eine noch bessere Modellgüte erreicht werden könnte. Allerdings wurden die Parametergrenzen ja auch hinsichtlich ihrer Plausibilität gesetzt, so dass eine solche Ausweitung der Grenzen keinen Sinn macht, sondern nur zu unrealistischen Parameterausprägungen führen dürfte.

Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der verschiedenen Kalibrierungsarten wurden statistisch noch auf Signifikanz getestet. Umgesetzt wurde dies mangels Normalverteilung mit dem nicht-parametrischen Wilcoxon-Test (Stahel, 2009: 213). Es hat sich gezeigt, dass sich die Parameterausprägungen zwischen den Kalibrierungsarten grösstenteils signifikant unterscheiden. Kombinationen, bei denen diese Signifikanz nicht vorhanden ist, sind in rot jeweils unterhalb des Boxplots notiert.

Ein erster Blick auf die Grafiken zeigt, dass die Parameter zwischen den verschiedenen Kalibrierungsarten teilweise effektiv stark unterschiedliche Werte annehmen. Ebenfalls gut zu erkennen ist, dass die Werte innerhalb einer Kalibrierungsart regelmässig sehr stark streuen. Ein Vergleich der Mittelwerte ist deshalb trotz statistischer Signifikanz mit Vorsicht zu geniessen. Solch grosse Streuungen verdeutlichen das Problem der „Equifinality“, zeigen sie doch, dass trotz stark unterschiedlicher Parameterausprägungen eine ähnlich gute Modellgüte erreicht werden kann. Ebenfalls zeigt sich die Wichtigkeit der 100-fachen Modellkalibrierung.

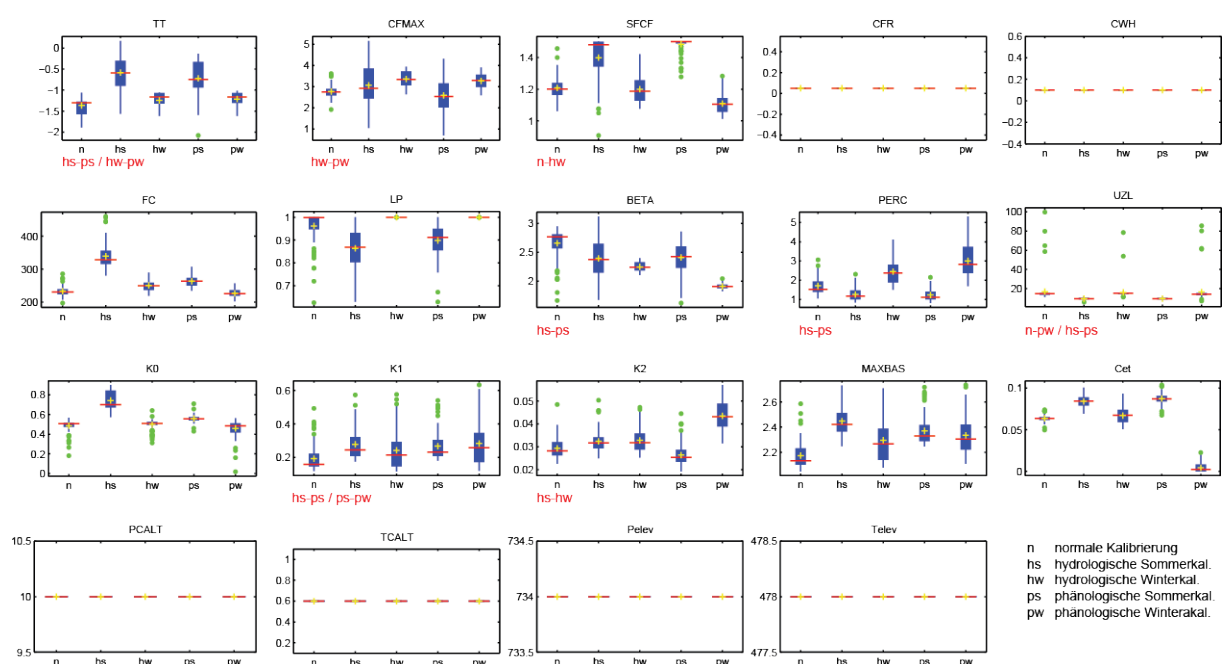


Abb. 13: Überblick über die verschiedenen Kalibrierungen der Modell-Parameter bei der Mentue.

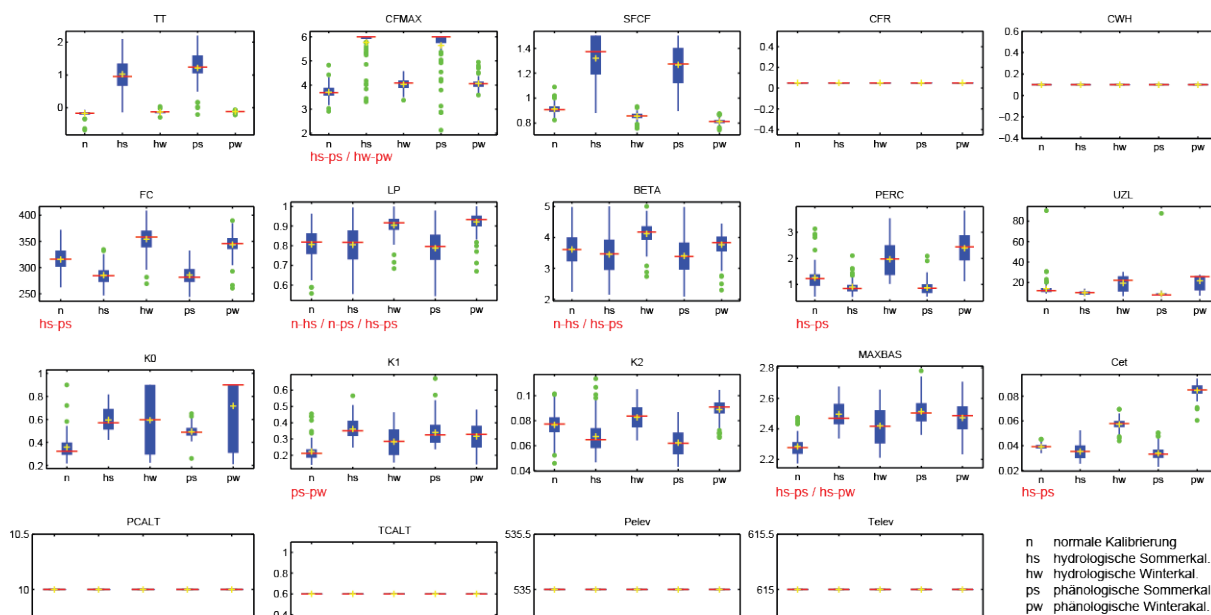


Abb. 14: Überblick über die verschiedenen Kalibrierungen der Modell-Parameter bei der Ergolz.

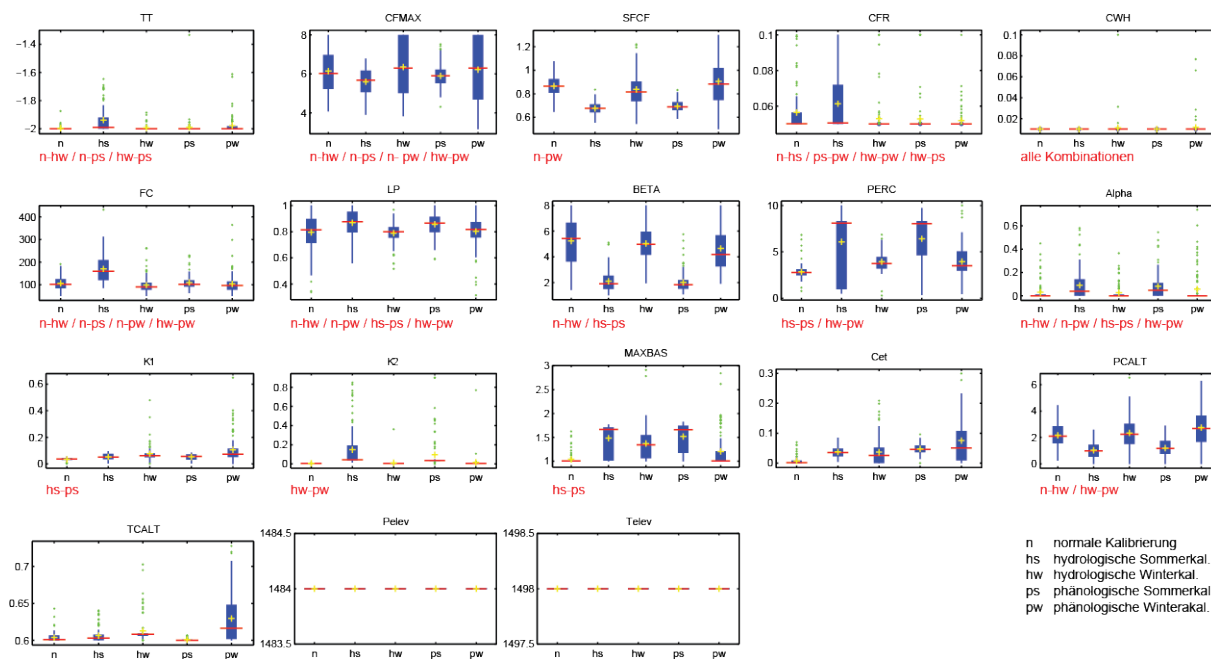


Abb. 15: Überblick über die verschiedenen Kalibrierungen der Modell-Parameter beim Rom.

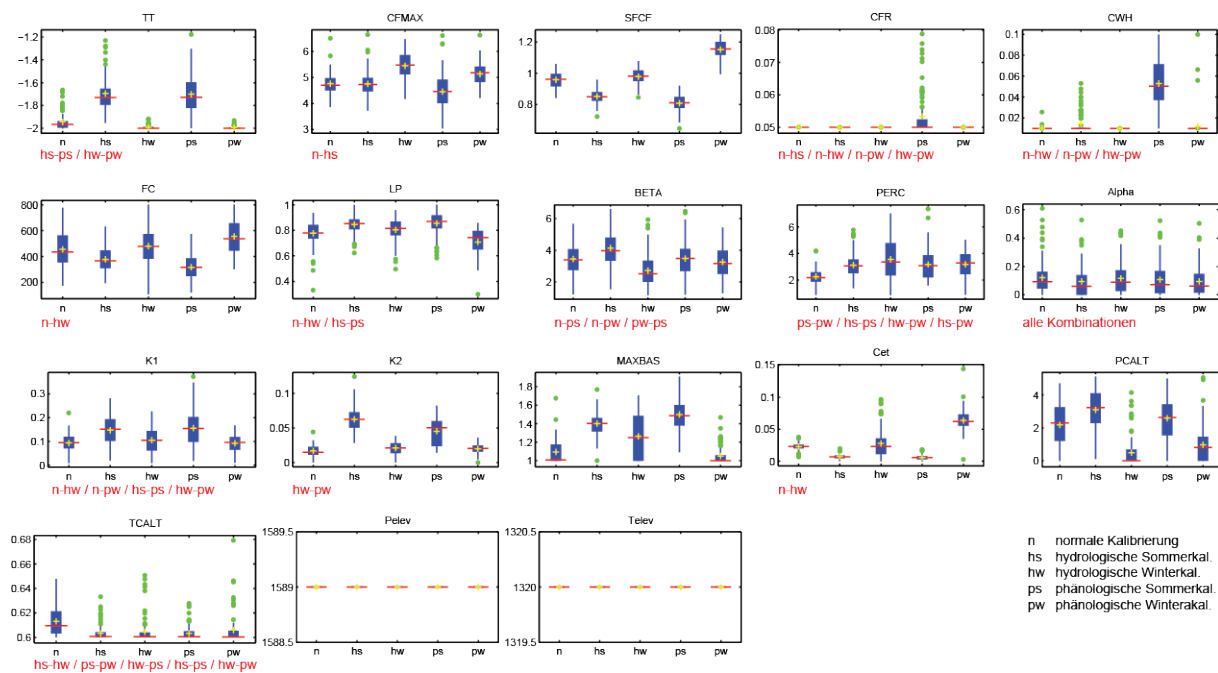


Abb. 16: Überblick über die verschiedenen Kalibrierungen der Modell-Parameter beim Allenbach.

4.2.1. Schnee-Routine

Die Parameter der Schnee-Routine (TT, CFMAX, SFCF, CFR und CWH) sind vor allem bei den tiefer gelegenen Einzugsgebieten der Mentue und Ergolz insofern nicht sehr relevant, da in diesen Gebieten im Sommerhalbjahr kein Schnee fällt. So hat beispielsweise der Parameter TT, der ja festlegt, ab welcher Temperatur Niederschlag als Schnee fällt, im Sommerhalbjahr kaum eine Bedeutung. Etwas aussagekräftiger sind die Parameter beim Rom und Allenbach, in deren Einzugsgebiet durchaus auch im definierten Sommerhalbjahr noch Schnee fallen oder liegen kann.

Die klarsten Unterschiede zwischen Winter- und Sommerkalibrierung zeigen sich beim Parameter SFCF, der ja den Schneefall im Hinblick auf konstante Messfehler und Evaporation von der Schneedecke korrigiert. Da die Evaporation von der Temperatur abhängig ist, erscheinen diese Unterschiede als plausibel.

4.2.2. Boden-Routine

Die Parameter der Boden-Routine (FC, LP, BETA und Cet) sind in Bezug auf meine Untersuchungen weitaus interessanter, da in diesem Bereich saisonale Einflüsse zu erwarten sind.

Gewisse Unterschiede sind bei allen Parametern erkennbar, allerdings ist die Streuung der Werte oft recht gross. Die maximale Wasseraufnahmekapazität im Boden, die durch den Parameter FC abgebildet wird, unterscheidet sich bei der Mentue und der Ergolz relativ klar zwischen den Jahreszeiten, während dies beim Rom und Allenbach nicht der Fall ist. Bei ersteren sind auch die Unterschiede beim Parameter LP, der einen Einfluss auf die aktuelle Evapotranspiration hat, deutlicher. Der Parameter BETA, der die Verteilung des Niederschlags auf Boden- und Grund-

wasser-Routine steuert, zeigt vor allem beim Rom eine klare Saisonalität. Überaus deutlich präsentieren sich teilweise die Unterschiede beim Parameter Cet, der in die Berechnung der potenziellen Evapotranspiration mit einfließt. Besonders gross sind die Differenzen zwischen Sommer und Winter bei der phänologischen Kalibrierung der beiden Einzugsgebiete mit Laubvegetation (Mentue und Ergolz), aber auch beim Allenbach. Beim Rom hingegen ist diese Saisonalität nur schwach ausgeprägt. Allerdings muss hierzu erwähnt werden, dass im Einzugsgebiet des Rom praktisch während des gesamten Winterhalbjahres aufgrund der klimatischen Bedingungen kaum Evapotranspiration stattfindet. Somit ist der erwähnte Parameter in dieser Hinsicht auch nicht relevant.

4.2.3. Grundwasser-Routine

Ebenfalls von Interesse sind die Parameter der Grundwasser-Routine (PERC, Alpha, K0, K1 und K2). Dies, weil aufgrund des unterschiedlichen Rezessions-Verhaltens zwischen Winter und Sommer auch hier Unterschiede zu erwarten sind.

Beim Parameter PERC scheint es einen Unterschied zwischen den beiden tieferliegenden Einzugsgebieten, die mit einer UZL-Unterteilung kalibriert wurden, und den höher liegenden Gebieten ohne UZL-Unterteilung zu geben. Während bei Ersteren saisonale Unterschiede bei der Kalibrierung deutlich feststellbar sind, sind solche bei Letzteren weniger klar. Ausserdem streuen die Werte vor allem beim Rom sehr stark.

Bei den Rezessionsparametern K0, K1 und K2 zeigt sich mehr oder weniger das erwartete Bild. Der Parameter K1, der die Rezessionskurve bei mittleren Abflüssen beschreibt, zeigen sich kaum deutliche saisonale Unterschiede. Im Gegenzug zeigt K2, der die Abflüsse während Niedrigabflussperioden, wenn die Evapotranspiration einen grösseren Einfluss als die Niederschläge auf die Abflüsse haben dürfte, beschreibt, eine klare Saisonalität. Besonders deutlich ist dies bei der phänologischen Kalibrierung bei Mentue und Ergolz zu erkennen. Beim Rom scheinen kaum Unterschiede vorzukommen. Allerdings bewegen sich hier die Werte einfach generell auf sehr tiefem Niveau. Statistisch signifikant sind die Unterschiede dennoch. Etwas unklar sind die Parameterausprägungen bei K0, der die Rezessionskurve bei Abflussspitzen beschreibt.

4.2.4. Abfluss-Routine

Diese Routine besteht nur aus dem Parameter MAXBAS, der zwar bei allen Einzugsgebieten Schwankungen, aber keine klaren Muster zeigt. Oft ist hier auch die Streuung der Werte recht hoch.

4.2.5. Höhenabhängige Parameter

Eine Spannweite an möglichen Parameterwerten wurde hier nur für die beiden Parameter PCALT und TCALT in den höheren Einzugsgebieten definiert. Während PCALT, also die Höhenkorrektur des Niederschlags, gewisse Unterschiede zwischen Sommer- und Winterkalibrierung zeigt, ist dies bei der Temperatur (TCALT) nicht der Fall.

Die Höhenangaben der Niederschlags- und Temperaturmessungen wurde fixiert, was bei der Kalibrierung keinerlei Spielraum erlaubte.

4.3. Aktuelle Evapotranspiration

Nebst der Ausprägung der Modellparameter gibt es auch andere Aspekte, bei denen erwartet werden kann, dass eine Saisonalität erkennbar ist. Dazu gehört die aktuelle Evapotranspiration, die vom HBV-Modell auf täglicher Basis gemäss der folgenden Formel berechnet wird:

$$E_{act} = E_{pot} \min \left(\frac{SM(t)}{FC \cdot LP}, 1 \right) \quad (8)$$

E_{act} : aktuelle Evapotranspiration, E_{pot} : potenzielle Evapotranspiration, SM : Wassergehalt in der Boden-Routine

Aufgrund der direkten Beeinflussung durch die Vegetation wären auch hier Unterschiede zu erwarten, je nachdem, ob das Modell saisonal kalibriert wurde oder nicht. Dass sich dabei die Summen der Evapotranspirationswerte zwischen Winter- und Sommerhalbjahr unterscheiden ist keine Frage, interessanter ist zu sehen, ob sich etwa die Summe der Werte während des Sommers zwischen den verschiedenen Kalibrierungsarten unterscheidet. Abbildung 17 zeigt diese Summen. Aus rechnerisch-technischen Gründen wurden die Sommerwerte jeweils zwischen dem spätesten Datum der Blattausbildung und dem Ende des hydrologischen Sommerhalbjahres, die Winterwerte zwischen dem spätesten Blattfall und der frühesten Blattausbildung berechnet.

Es zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen den Kalibrierungsarten sehr gering ausfallen. Während bei der Mentue noch eine leichte Unterschätzung der Standardkalibrierung während des Sommers und eine leichte Überschätzung während des Winters erkennbar ist, zeigen sich bei der Ergolz nur minimale Differenzen. Beim Rom und dem Allenbach scheint die Standardkalibrierung die aktuelle Evapotranspiration während des Sommers sogar etwas zu überschätzen.

Trotz dieser undeutlichen Resultate bedeutet das nicht schon vorweg, dass auch die Abflussimulationen kaum Unterschiede zeigen werden. Die aktuelle Evapotranspiration wird nämlich durch das HBV-Modell zwar berechnet und ausgegeben, fliesst aber im Gegensatz zum natürlichen Wasserkreislauf nicht direkt in die Berechnung des Abflusses mit ein.

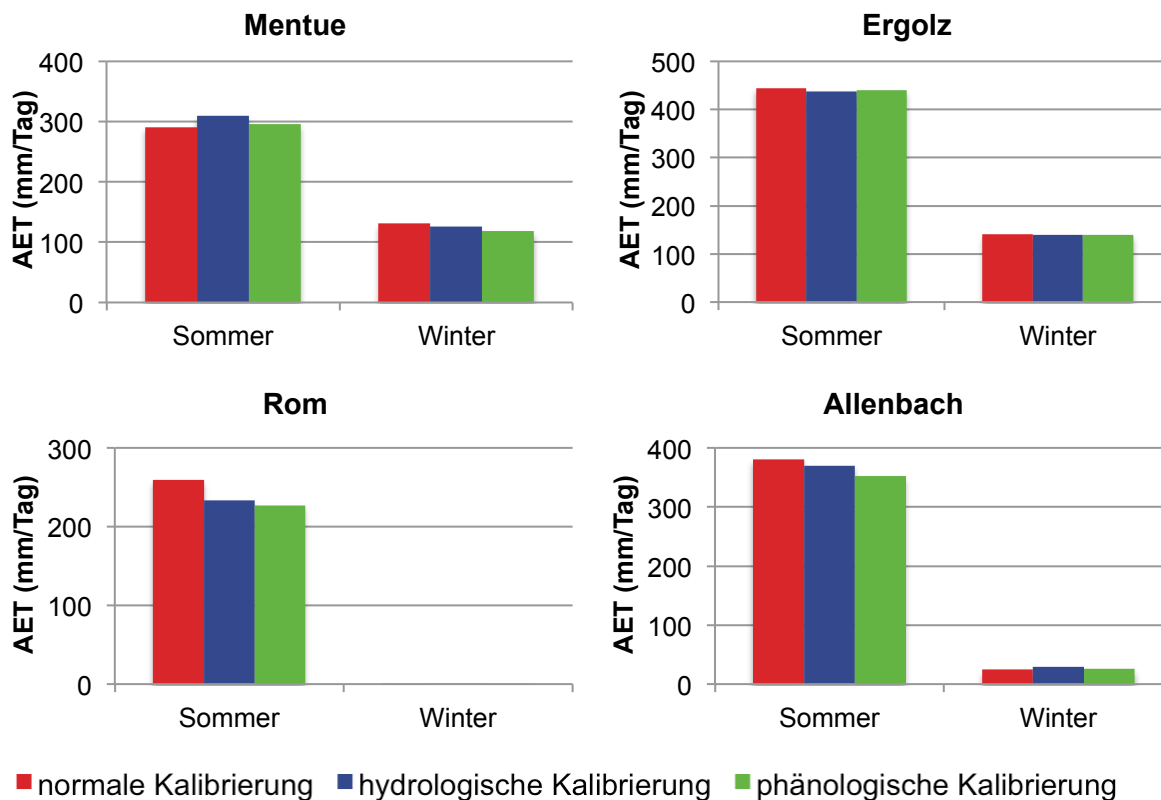


Abb. 17: Durchschnittliche Werte der aktuellen Evapotranspiration (AET) pro Jahr.

4.4. Modellgüte

4.4.1. Allgemeine Bemerkungen

Nun soll ein detaillierter Blick auf die erzielte Modellgüte geworfen werden. Dafür kommt nun die in Kapitel 3.6.6. erwähnte Methode zum Einsatz, die es erlaubt die Modellgüte für jeden einzelnen Tag (jeweils über eine Woche gerechnet) zu betrachten, was es wiederum ermöglicht, allfällige zeitliche Muster zu erkennen.

Bei einer ersten Betrachtung dieser Tageswerte der gewählten Zielfunktion zeigt sich am Beispiel der Mentue, dass es erwartungsgemäss grosse Schwankungen gibt. Dabei gilt es aber zwischen den einzelnen Bestandteilen der Funktion zu differenzieren. Die Zielfunktion wurde ja so definiert, dass sie sich zu 20 Prozent aus dem Lindström-Mass und zu 80 Prozent aus dem FMARE-Mass zusammensetzt. Betrachtet man diese beiden Funktionen nun einzeln, zeigt sich, dass die Streuung beim Lindström-Mass um ein Vielfaches grösser ist, als beim FMARE-Mass (vgl. Abb. 18). Am Beispiel der Mentue (normale Kalibrierung) schwankt das Lindström-Mass zwischen -21'872.151 und 0.995, das FMARE-Mass nur zwischen -1.587 und 0.993.

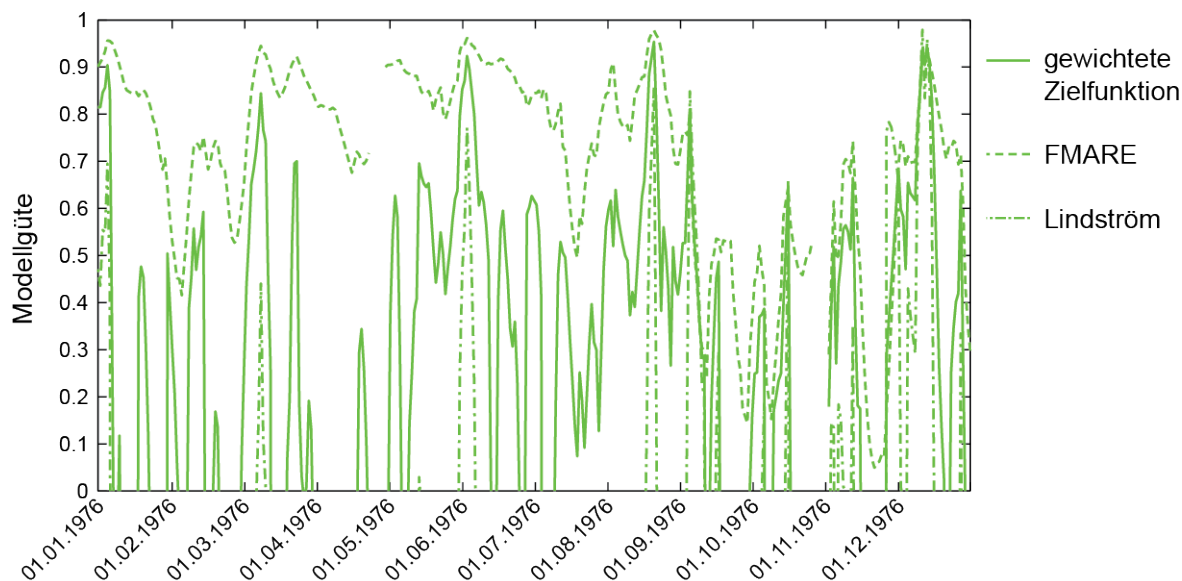


Abb. 18: Vergleich der täglich berechneten Modellgüte von gewichteter Zielfunktion, FMARE und Lindström-Mass am Beispiel der phänologischen Kalibrierung der Mentue 1976.

Die Gründe für dieses Verhalten sind in den dem Lindström-Mass zu Grunde liegenden Formeln zu finden:

$$Reff = 1 - \frac{\sum(Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (9)$$

$$Lindström = Reff - 0.1 \frac{|\sum(Q_{obs} - Q_{sim})|}{\sum Q_{obs}} \quad (10)$$

Zu beachten gilt es vor allem den Term des Reff-Masses. Dabei ist insbesondere der Mittelwert der beobachteten Werte ($\overline{Q_{obs}}$) relevant. Sind die beobachteten und die simulierten Werte sehr unterschiedlich und variieren die beobachteten Werte gleichzeitig sehr wenig, führt dies zu einem grossen Wert im Zähler und gleichzeitig zu einem sehr kleinen Wert im Nenner, so dass der Wert des gesamten Terms praktisch ins „Bodenlose“ stürzen kann.

Berechnet man jetzt die Effizienzmasse wie in meinem Fall nur über eine Zeitspanne von einer Woche, passiert es oft, dass die beobachteten Werte über diese sieben Tage kaum variieren, die simulierten Werte aber gleichzeitig konstant von den beobachteten abweichen, was dann zu den extrem tiefen Werten beim Lindström-Mass führen kann. Dabei muss das nicht heissen, dass die Modellgüte an diesen Daten extrem schlecht ist. Die schlechten Werte sind hauptsächlich rechnerisch bedingt und bereits kleinere Parallelverschiebungen der beiden Kurven können zu einem schlechten Wert führen. Obwohl das Lindström-Mass nur 20 Prozent zur gewichteten Funktion beiträgt, führen derart tiefe Werte natürlich auch zu einer beträchtlichen Beeinflussung der Gesamtfunktion.

Um eine bessere Detailanalyse vornehmen zu können und weil mich so oder so in erster Linie die Niedrigabflüsse interessieren, die am besten durch das FMARE-Mass abgebildet werden, kon-

zentriere ich mich vorerst auf dieses Mass und werde nicht die gewichtete Zielfunktion analysieren. Dies steht nicht im Widerspruch dazu, dass die Kalibrierung mittels dieser Funktion vorgenommen wurde, da ja über die Gesamtperiode durchaus gute Resultate erzielt werden konnten.

4.4.2. FMARE

In erster Linie interessiert natürlich, wie sich FMARE bei der phänologischen Kalibrierung über die Zeit verhält (vgl. Abb. 21). Zum Vergleich sollen aber auch die normale und hydrologische Kalibrierung betrachtet werden (vgl. Abb. 19 und 20). Zudem ist ein Vergleich zwischen den verschiedenen Einzugsgebieten spannend, um zu sehen, ob es gewisse Parallelen und/oder Unterschiede gibt.

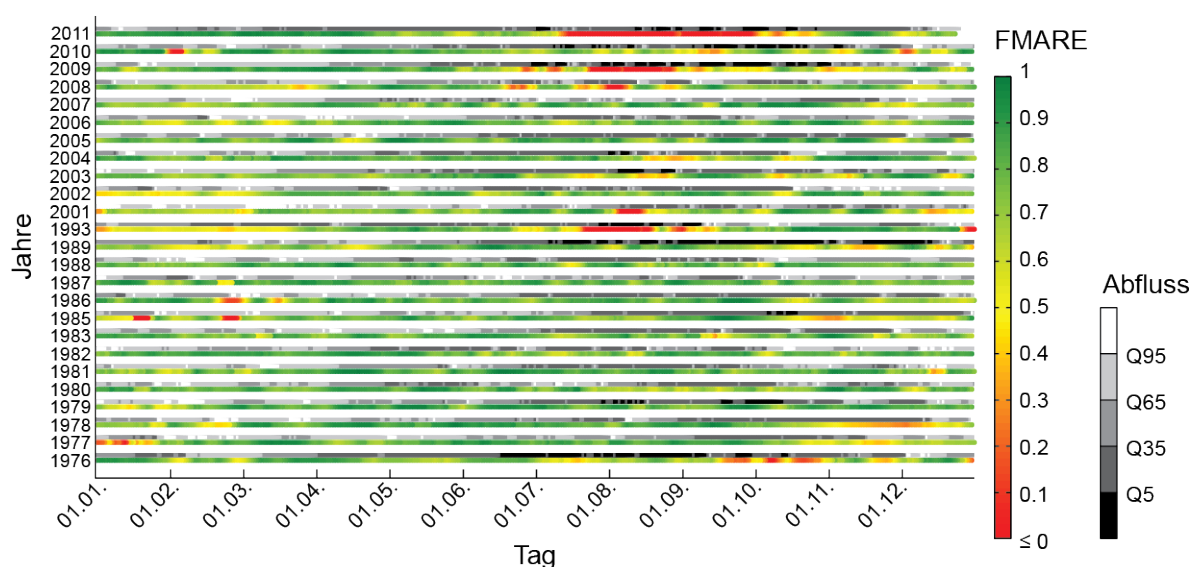


Abb. 19: Täglich berechnete FMARE-Werte und Abfluss in der Mentue bei Standardkalibrierung.

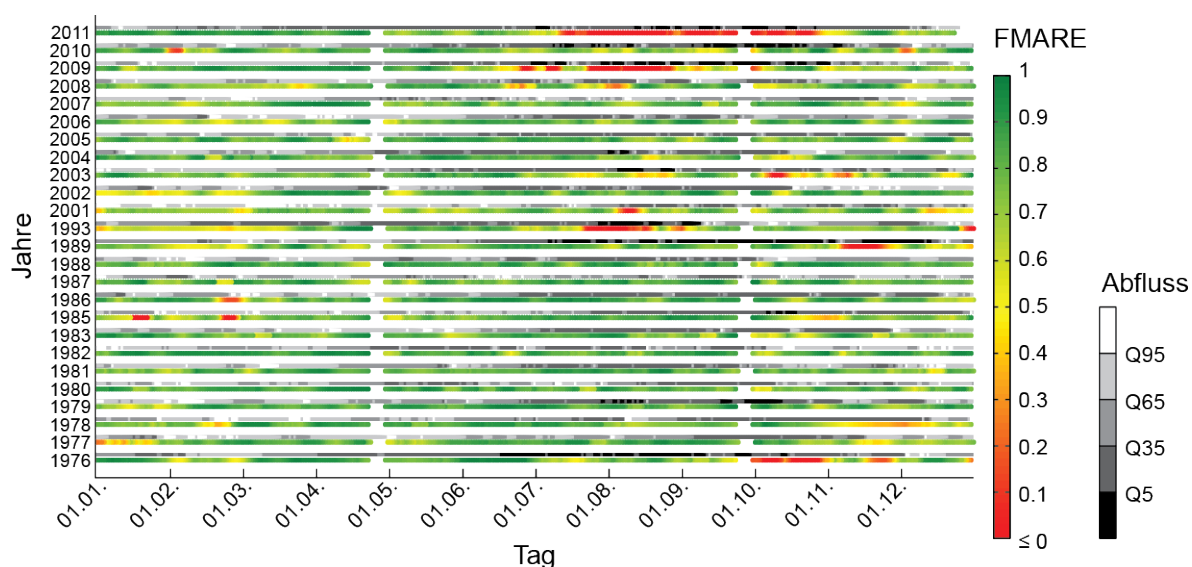


Abb. 20: Täglich berechnete FMARE-Werte und Abfluss in der Mentue bei hydrologischer Kalibrierung.

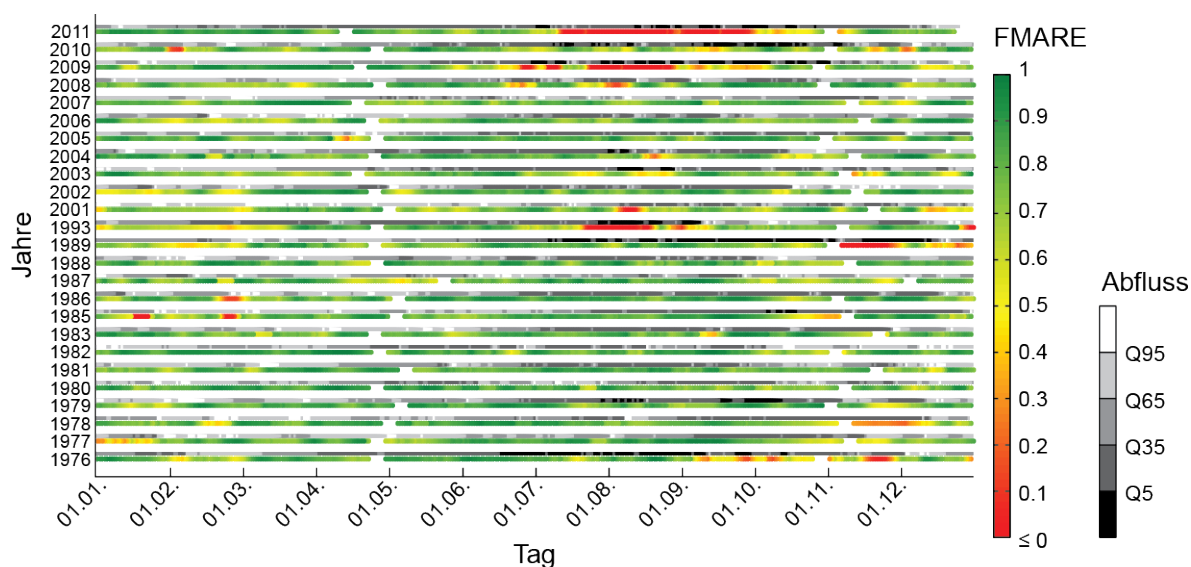


Abb. 21: Täglich berechnete FMARE-Werte und Abfluss in der Mentue bei phänologischer Kalibrierung.

Gut erkennbar ist, dass sich FMARE bei allen drei Kalibrierungsarten praktisch identisch verhält. Zwar verändern sich die Werte geringfügig, der grundsätzliche Verlauf bleibt aber bei allen drei Grafiken gleich. Besonders schlechte und gute Phasen decken sich meist. Generell ist zu sagen, dass FMARE über weite Strecken sehr gute Resultate aufweist.

Saisonale Muster zu erkennen, fällt eher schwer. Tendenziell scheint es, dass mittelmässige Werte (gelb) eher im hydrologischen Winterhalbjahr und seltener im Sommerhalbjahr auftreten. Bei der phänologischen Kalibrierung sind solche Werte oft auch unmittelbar vor dem phänologischen Winterbeginn zu erkennen. Gut zu sehen sind ein paar wenige längere Phasen mit sehr schlechten FMARE-Werten. Betrachtet man zusätzlich die Abflussmengen, wird schnell klar, dass sich diese Phasen meist mit Perioden, die einen sehr geringen Abfluss aufweisen, decken. Der Umkehrschluss gilt allerdings nicht. So gibt es auch Trockenperioden, in denen FMARE durchaus akzeptable Werte annimmt, so zum Beispiel 1976 oder 1989. Ein klarer Zusammenhang zwischen der Abflussmenge und den besten FMARE-Werten kann nicht erkannt werden.

Aufgrund des ähnlichen Verhaltens der FMARE-Werte für die verschiedenen Kalibrierungsarten wird für die restlichen Einzugsgebiete (Abb. 22, 23 und 24) nur noch auf die phänologische Kalibrierung eingegangen.

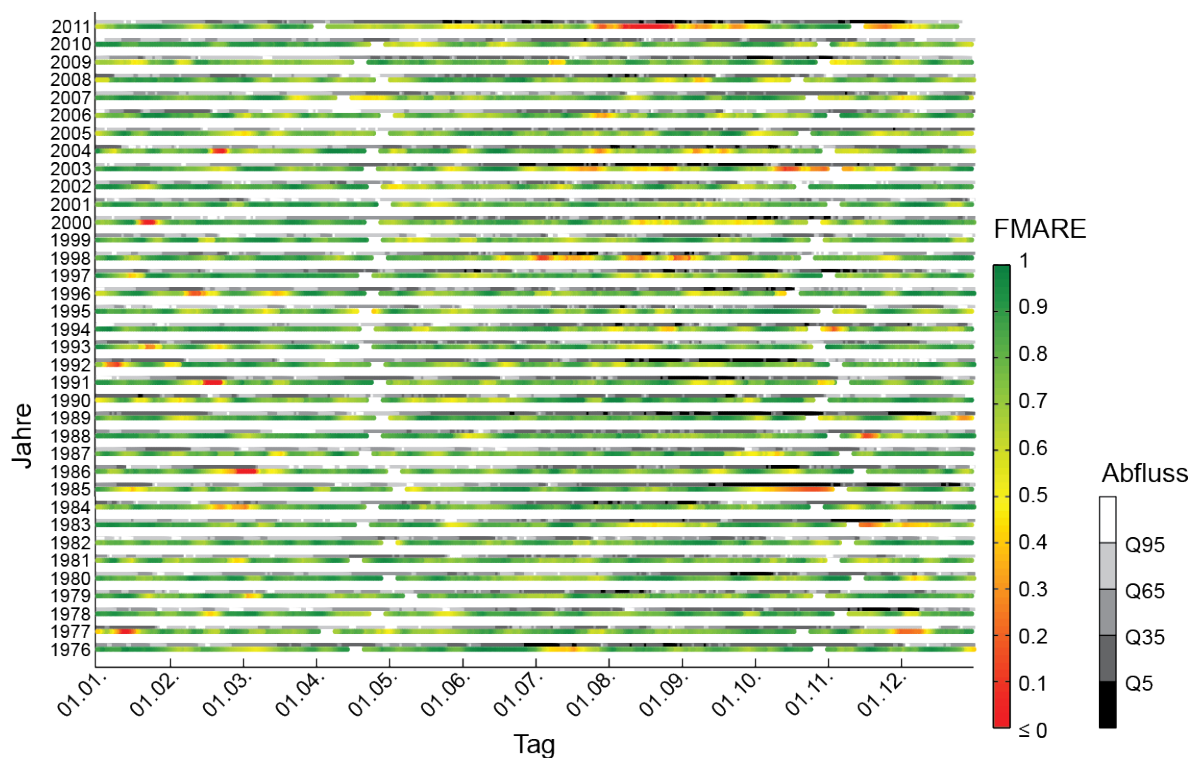


Abb. 22: Täglich berechnete FMARE-Werte und Abfluss in der Ergolz bei phänologischer Kalibrierung.

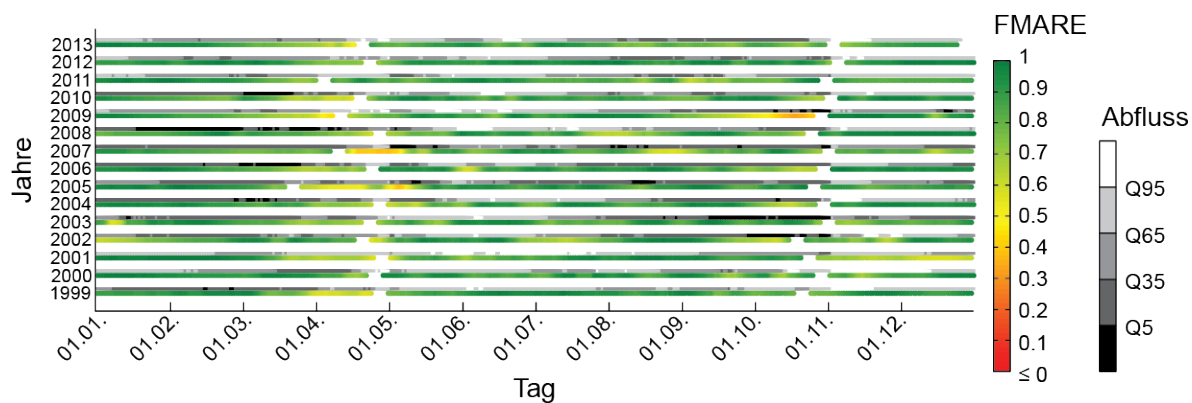


Abb. 23: Täglich berechnete FMARE-Werte und Abfluss im Rom bei phänologischer Kalibrierung.

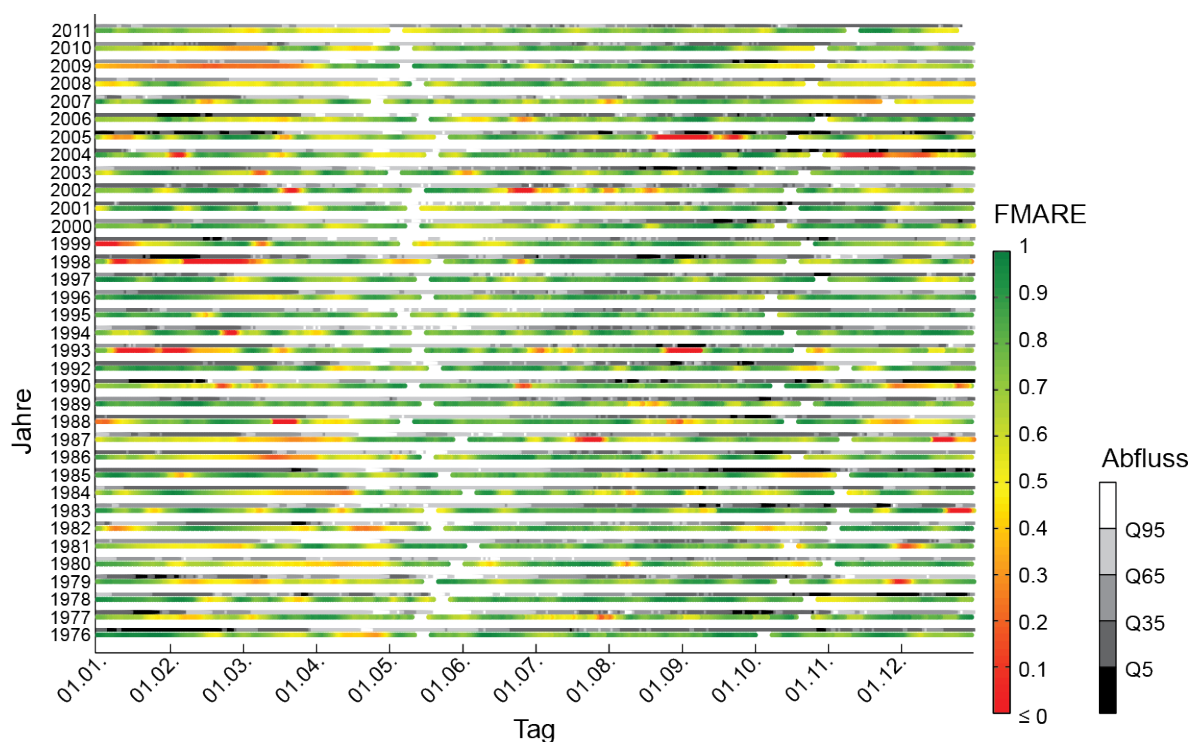


Abb. 24: Täglich berechnete FMARE-Werte und Abfluss im Allenbach bei phänologischer Kalibrierung.

Das Bild der Mentue bestätigt sich im Wesentlichen auch bei der Ergolz. FMARE weist grösstenteils gute bis sehr gute Werte auf. Erneut sind regelmässige saisonale Muster kaum auszumachen und wiederum decken sich die schlechtesten Zeitspannen mit Niedrigabflussperioden. Auch hier sind aber Trockenperioden mit ansprechenden FMARE-Werten zu erkennen, so beispielsweise 1989, 1992 und teilweise auch 2003.

Das erwähnte Muster zeichnet sich auch beim Rom ab, wobei es hier anzumerken gilt, dass bei diesem Einzugsgebiet die FMARE-Werte praktisch durchs Band sehr gut sind und nur sehr wenige Perioden vorkommen, wo der Wert überhaupt unter 0.7 fällt. Auffallend ist hier die Häufung von etwas weniger guten Werten rund um den Sommerbeginn. Bemerkenswert ist hier auch, dass dies auch bei der normalen Kalibrierung (nicht abgebildet) der Fall ist, wo keine Trennung zwischen Winter- und Sommerhalbjahr vorkommt, allerdings in weitaus geringerem Mass. Ebenfalls zu erkennen ist dieser Umstand unmittelbar vor dem Winterbeginn.

Beim Allenbach zeigt sich ein sehr heterogenes Bild. FMARE ist hier grossen Schwankungen unterworfen. Es gibt deutlich mehr Perioden mit schlechteren Werten, als bei den vorhergehenden Einzugsgebieten. Erneut liegen sehr schlechte Werte meist in Trockenperioden, mit einer Ausnahme 1993. Auffallend ist aber, dass auch im Winterhalbjahr, wenn der Abfluss generell tiefer ist, einige Zeitspannen mit schlechten FMARE-Werten vorkommen.

4.4.3. LogReff

Um die nun gemachten Beobachtungen zu bestätigen, wäre es interessant, einen Vergleich mit einem anderen Gütemass zu tätigen, das ebenfalls niedrige Abflüsse beschreibt. Dabei steht insbesondere das Mass LogReff im Vordergrund, das ebenfalls im HBV-Modell implementiert ist und im Gegensatz zum normalen Reff auch eher auf die Niedrigabflüsse sensibel ist (Pushpalatha et al., 2012). Ein Versuch der Berechnung am Beispiel der Mentue zeigt aber die selbe Problematik, die auch beim Lindström-Mass auftritt. Da in der Formel des LogReff der Mittelwert der beobachteten Abflusswerte vorkommt, führt dies zu grösstenteils massiv schlechten Ergebnissen, wenn das Mass nur über eine Woche berechnet wird (vgl. Abb. 25). Somit hat die Betrachtung dieses Masses keine Aussagekraft im Vergleich mit dem FMARE-Mass und kann nicht für eine Bestätigung hinzugezogen werden. Leider liegt kein anderes Mass vor, das sowohl Niedrigabflüsse gut beschreibt, als auch gänzlich auf den Miteinbezug des Reff's verzichtet.

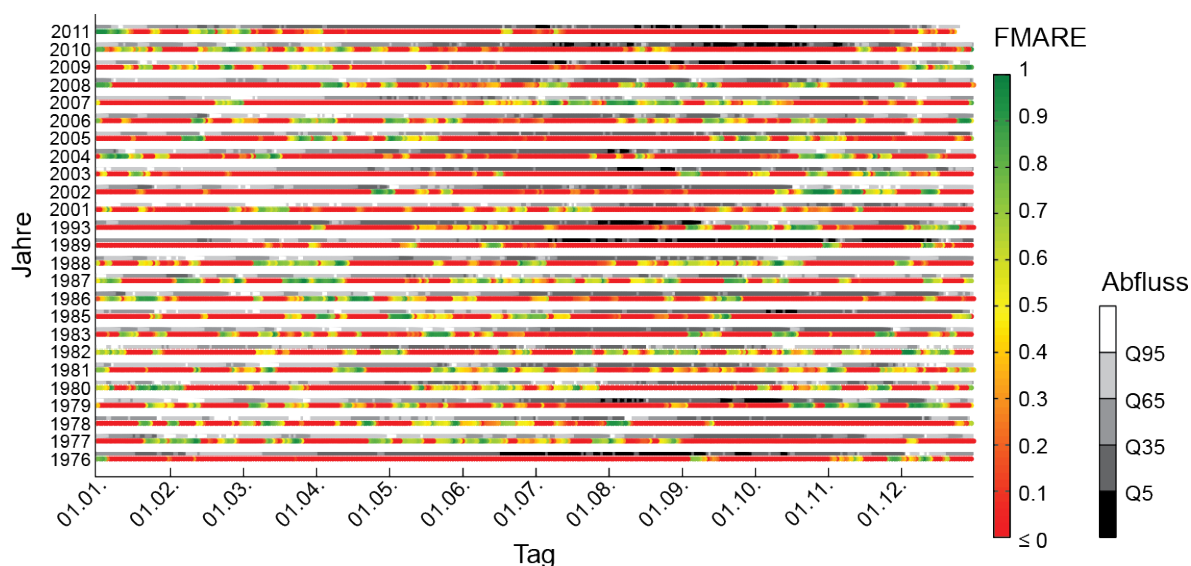


Abb. 25: Täglich berechnete LogReff-Werte und Abfluss in der Mentue bei Standardkalibrierung.

4.4.4. Reff

Ebenfalls spannend wäre es, auch ein Mass zu betrachten, das nicht auf Niedrigabflüsse ausgerichtet ist. Dabei wäre ja davon auszugehen, dass die besten Resultate in Phasen mit Spitzenabfluss erreicht werden, obwohl natürlich kein perfektes Resultat erwartet werden darf, da das Modell ja nicht in diesem Hinblick kalibriert wurde. Hier bietet sich das im HBV-Modell standardmässig verwendete Gütemass Reff an. Allerdings ist auch hier, gemäss der schon beschriebenen Problematik, mit grösstenteils sehr schlechten Resultaten zu rechnen, was sich beim Blick auf Abbildung 26, die wiederum die Werte für die Mentue abbildet, bestätigt. Nichtsdestotrotz zeigt sich, dass sich die wenigen kurzen Phasen, in denen Reff gute bis sehr gute Werte aufweist, doch recht gut mit den höchsten Abflüssen decken. Meist sind sie wenige Tage vor einem solchen Er-

ereignis zu erkennen, was darauf beruhen dürfte, dass das Mass ja immer über die kommenden sieben Tage berechnet wurde.

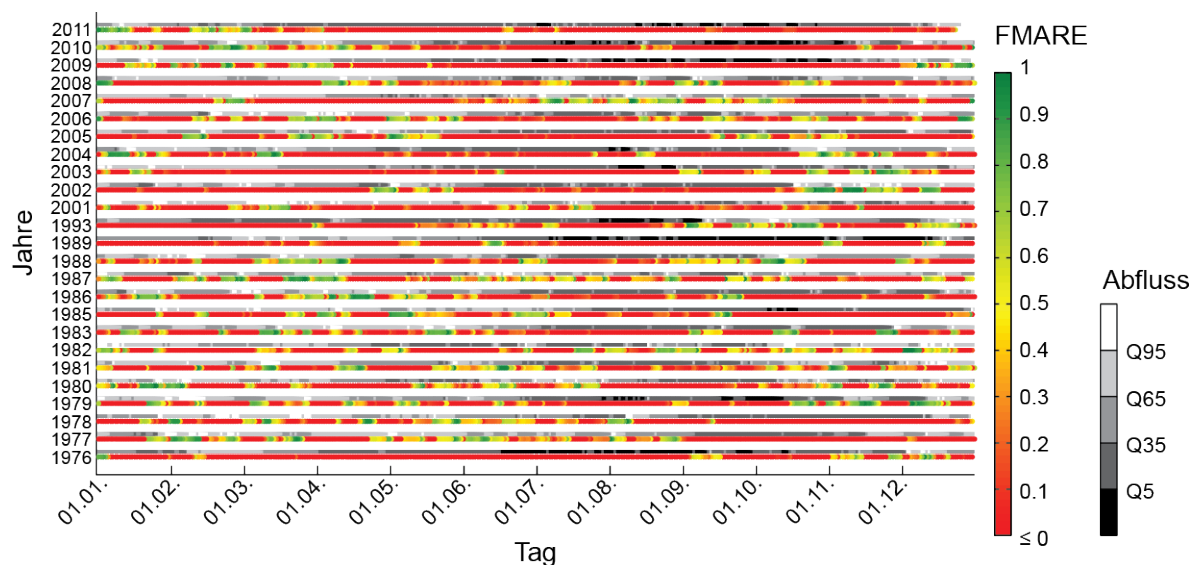


Abb. 26: Täglich berechnete RefF-Werte und Abfluss in der Mentue bei Standardkalibrierung.

4.5. Vergleich der Modellergebnisse

Nun soll ein detaillierter Blick auf die Modellergebnisse geworfen werden. Dabei interessiert, wann welche Kalibrierungsart am besten abschneidet, welche saisonalen Unterschiede es gibt und wann und wie stark sich die modellierten Abflusskurven voneinander unterscheiden. Aus den erwähnten Gründen beschränken sich diese Ergebnisse auf die Behandlung des FMARE-Masses. Die folgenden Grafiken basieren erneut auf den täglichen Berechnungen dieses Gütemasses (jeweils über eine Woche gerechnet). Sie zeigen nun, zu welchem Zeitpunkt welche Kalibrierungsart am besten abschneidet.

Auf eine statistische Behandlung dieser Ergebnisse wird im Kommenden verzichtet. So würde zwar beispielsweise die Frage, ob eine Kalibrierungsart signifikant besser abschneidet als eine andere, interessieren. Allerdings würde sich eine statistische Umsetzung dieser Frage als sehr schwierig gestalten und würde zudem zu Aussagen ohne grossen Mehrwert führen. Um eine Signifikanz zu eruieren, müssen bestimmte statistische Masse miteinander verglichen werden. Gängige Beispiele dafür sind etwa Varianzen oder der Mittelwert (Stahel, 2009: 265ff). In Anbetracht der behandelten Datenreihen, macht dies aber wenig Sinn. Eine Reduzierung der täglichen Werte über mehrere Jahre auf den Mittelwert würde einer derart massiven Vereinfachung entsprechen, dass die Resultate keinerlei Aussagekraft im Hinblick auf meine Fragestellung mehr hätten. Ein Versuch des statistischen Vergleichs an den Daten der Mentue hat denn auch gezeigt, dass aufgrund der grossen Variabilität der Daten immer ein signifikanter Unterschied zwischen den Kalibrierungsarten besteht. Hinzu kommt, dass eine solche statistische Auswertung keine Aussage

darüber zulässt, ob eine Datenreihe besser als die andere ist, sondern nur darüber, ob sie sich unterscheiden.

4.5.1. Mentue

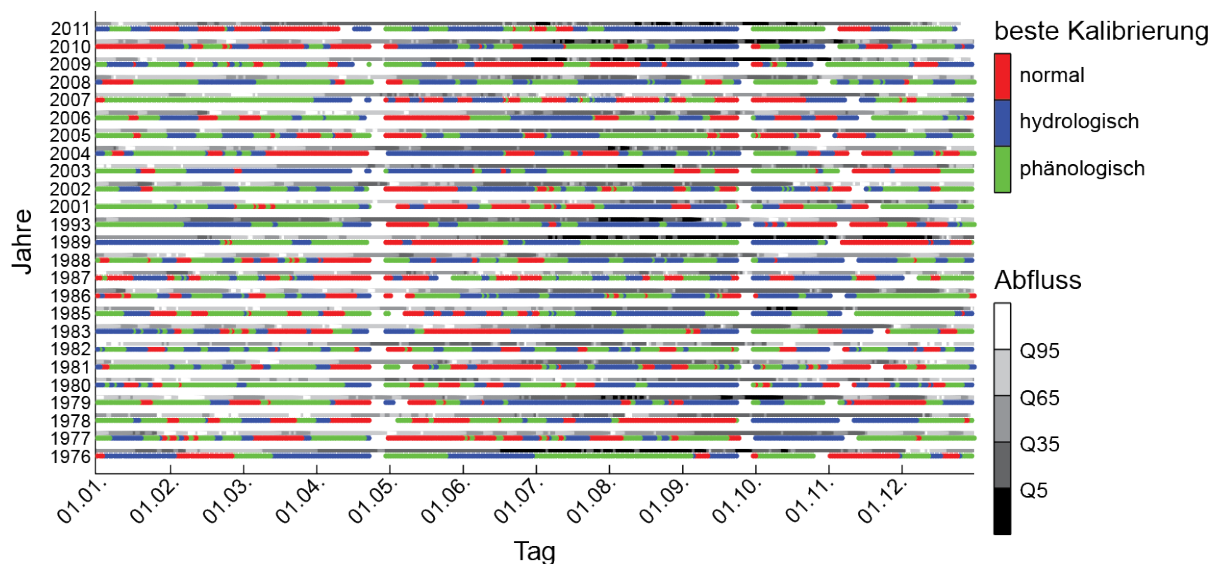


Abb. 27: Überblick über die jeweils beste Kalibrierung für die Mentue.

Ein erster Blick auf die Abbildung 27 zeigt, dass über die gesamte Datenreihe gesehen mehrheitlich nicht die Standardkalibrierung, sondern die hydrologische oder phänologische am besten abschneidet. Die prozentualen Häufigkeiten (vgl. Abb. 28, Spalte „gesamt“) bestätigen dies. So weist die normale Kalibrierung nur in rund einem Viertel der Fälle die besten Werte auf. Die restlichen Tage verteilen sich etwa gleichmässig auf die hydrologische und phänologische Kalibrierung.

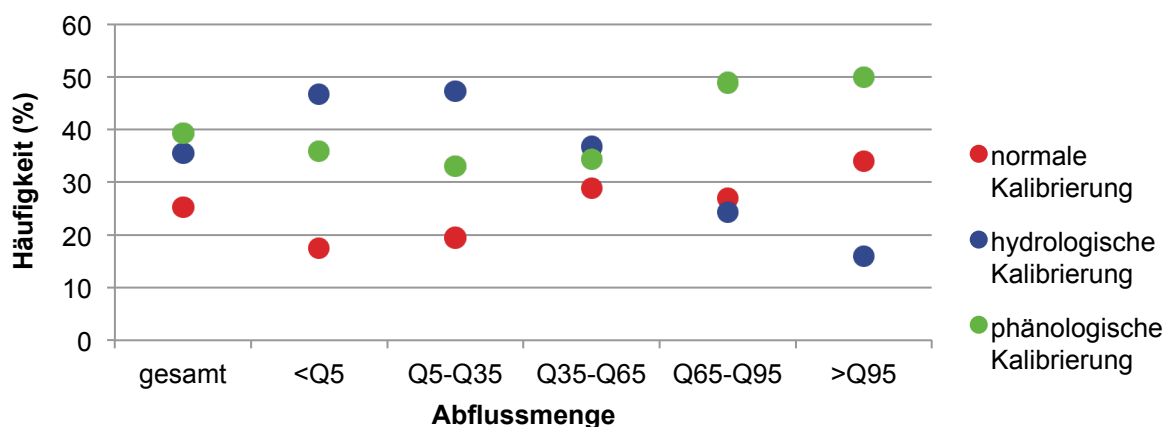


Abb. 28: Prozentuale Häufigkeit für die beste Modellgüte der verschiedenen Kalibrierungsarten bei der Mentue.

Tabelle 5 zeigt auf, wie sich verschiedene Kalibrierungsarten im Vergleich zueinander verhalten. Betrachtet werden dabei die Kombinationen phänologische (P) gegenüber normaler (N) und hydrologischer (H) Kalibrierung sowie hydrologische gegenüber normaler Kalibrierung. Dabei wur-

den jeweils die durchschnittlichen Differenzen der FMARE-Werte berechnet. Ein Wert von 0.020 in der ersten Zelle bedeutet also, dass die phänologische Kalibrierung gegenüber der Standardkalibrierung durchschnittlich einen um 0.020 bessern täglichen FMARE-Wert aufweist. Negative Werte stehen entsprechend für schlechteres Abschneiden.

Erneut muss gesagt werden, dass ein Durchschnittswert einer massiven Vereinfachung entspricht. Die Aussagekraft dieses Werts ist erneut beschränkt, was sich aber durch die zusätzliche Auflistung von Maximal- und Minimalwerten sowie der Standardabweichung als Streuungsmass immerhin etwas entschärfen lässt. Dennoch sollen die Tabellen die Aufzeigung gewisser Muster ermöglichen. Erwähnenswert ist noch, dass die durchschnittlichen Differenzen zwar auf den ersten Blick sehr gering erscheinen, was aber erneut auf die starke Vereinfachung riesiger Datenreihen, die zudem starken Schwankungen unterliegen, zurückzuführen ist. Oft sind diese Schwankungen deutlich grösser als die Differenz zwischen den verschiedenen Abflusskurven. Ein detaillierter Blick auf gewisse Abschnitte der Abflusskurven (vgl. folgende Grafiken) zeigt aber, dass durchaus auch grössere Unterschiede auftreten.

Tab. 5: Differenzen der FMARE-Werte in Abhängigkeit von Kalibrierungsart und Abflussmenge bei der Mentue. Rot = geringste Differenz pro Kombination, Grün = grösste Differenz pro Kombination.

Abflussmenge	Differenz	Durchschnitt	Minimum	Maximum	Standardabweichung
Gesamt	P – N	0.020	-1.239	0.399	0.117
	P – H	-0.002	-0.767	0.727	0.092
	H – N	0.021	-0.486	0.464	0.102
< Q5	P – N	0.005	-1.153	0.280	0.185
	P – H	-0.030	-0.679	0.483	0.136
	H – N	0.036	-0.475	0.367	0.148
Q5 – Q35	P – N	0.033	-1.239	0.390	0.125
	P – H	0.001	-0.767	0.727	0.119
	H – N	0.029	-0.486	0.464	0.123
Q35 – Q65	P – N	0.009	-0.557	0.399	0.111
	P – H	-0.009	-0.366	0.624	0.077
	H – N	0.016	-0.407	0.376	0.094
Q65 – Q95	P – N	0.024	-0.384	0.356	0.104
	P – H	0.005	-0.370	0.478	0.066
	H – N	0.019	-0.355	0.335	0.079
> Q95	P – N	0.011	-0.254	0.191	0.073
	P – H	0.010	-0.258	0.125	0.047
	H – N	0.001	-0.270	0.296	0.064

Zu sehen ist, dass gesamthaft betrachtet sowohl die hydrologische, als auch die phänologische Kalibrierung durchschnittlich leicht bessere Werte aufweisen als die normale Kalibrierung. Der Unterschied zwischen der hydrologischen und der phänologischen ist sehr gering, wobei die hydrologische im Schnitt ganz leicht besser abschneidet.

Betrachtet man die Verteilung in der Abbildung 27 etwas genauer, kann man gewisse Regelmäßigkeiten feststellen. So ist die phänologische Kalibrierung vor allem gegen Ende der Jahre fast durchwegs am besten, ebenfalls gehäuft scheint dies in den Monaten anfangs Jahr vor dem Einsetzen des hydrologischen und phänologischen Sommerhalbjahres (Lücken) der Fall zu sein. Hingegen ist in den Frühlingsmonaten unmittelbar nach dem hydrologischen und phänologischen Sommerbeginn oft die normale und teilweise die hydrologische Kalibrierung besser, während die phänologische nur für vereinzelte kurze Zeitspannen die Spitzenposition einnimmt. Die Abbildungen 29 und 30 zeigen jeweils den Verlauf der FMARE-Werte sowie die Abflussganglinien eines typischen Beispiels eines Wintermonats mit bester phänologischer Kalibrierung beziehungsweise einer Periode nach Beginn des phänologischen Sommers.

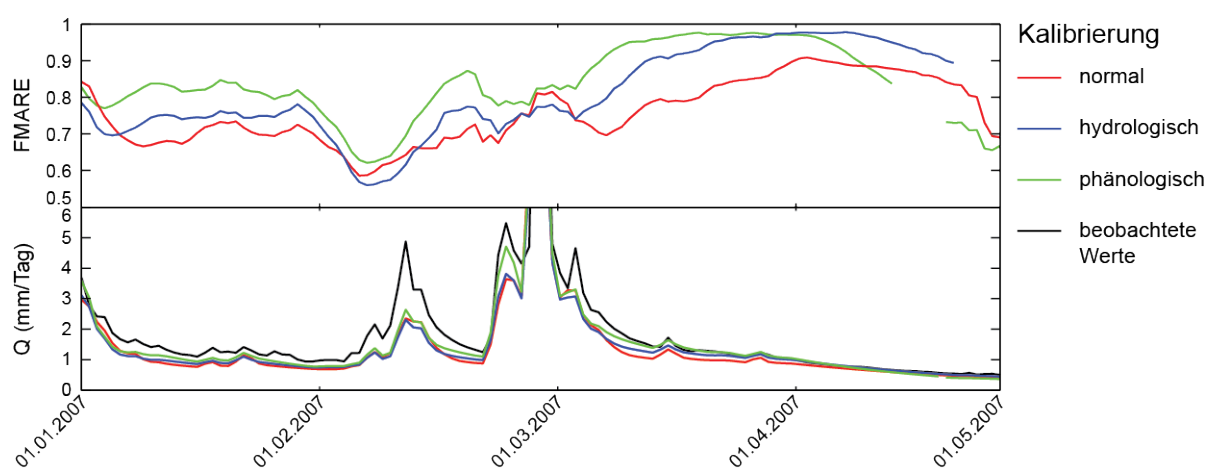


Abb. 29: FMARE und Abfluss in der Mentue im Winter 2007.

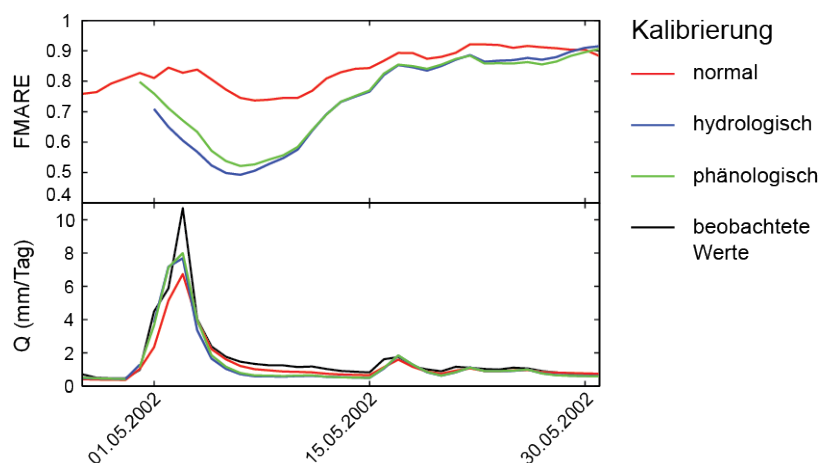


Abb. 30: FMARE und Abfluss in der Mentue im Frühling 2002.

In Abbildung 29 gilt es zu beachten, dass die phänologische Kalibrierung praktisch während der ganzen Periode konstant leicht besser abschneidet. Die normale Kalibrierung weist immer leicht tiefere Abflusswerte auf. Bemerkenswert ist, dass auch die Abflussspitzen im Winter durch die phänologische Kalibrierung deutlich am besten erfasst werden. Zu Abbildung 30 ist zu sagen, dass während solcher Frühlingsmonate häufig sehr grosse Abflussspitzen auftreten, was durch

die Schneeschmelze bedingt sein dürfte, und dabei das Rezessionsverhalten durch die normale Kalibrierung oft am besten abgebildet wird. Die hydrologische und phänologische Kalibrierung zeigen in diesen Phasen oft eine extremere Dynamik und eine steilere Rezessionskurve als die normale, was dazu führt, dass die Spitzen zwar besser abgebildet werden, der Abfluss aber während und nach der Rezession unterschätzt wird.

Betrachtet man in Abbildung 27 nun zusätzlich noch die Abflussmengen, sind längere Trockenperioden in den Jahren 1976, 1989, 2009, 2010 und 2011 feststellbar. Kürzere Perioden kamen etwa in den Jahren 1993, 2000 und 2003 vor. Gut erkennbar ist, dass während diesen Perioden die normale Kalibrierung nur noch selten am besten abschneidet (vgl. auch Abb. 28, Spalte „$Q5^{\circ}$“). Während der Anteil der phänologischen Kalibrierung etwa konstant bleibt, nimmt die hydrologische deutlich häufiger den ersten Rang ein. Interessant ist, dass bei mittleren Abflüssen alle Kalibrierungsarten ähnlich abschneiden, während bei grossen und sehr grossen Abflüssen die phänologische Kalibrierung klar oben aus schwingt. Vor allem die hydrologische Kalibrierung scheint grosse Abflüsse nur schlecht zu erfassen.

Auffallend ist, dass die mit Abstand längsten Perioden, in denen die phänologische Kalibrierung am besten abschneidet, genau in die Trockenperioden 1976, 1989 und 2003 zu liegen kommen. Während den Niedrigwasserperioden in den Sommern 2009, 2010 und 2011 scheint aber die hydrologische Kalibrierung besser abzuschneiden. Die Abbildungen 31 und 32 zeigen den Verlauf der FMARE-Werte und die Abflüsse während den Trockenperioden 1989 und 2009.

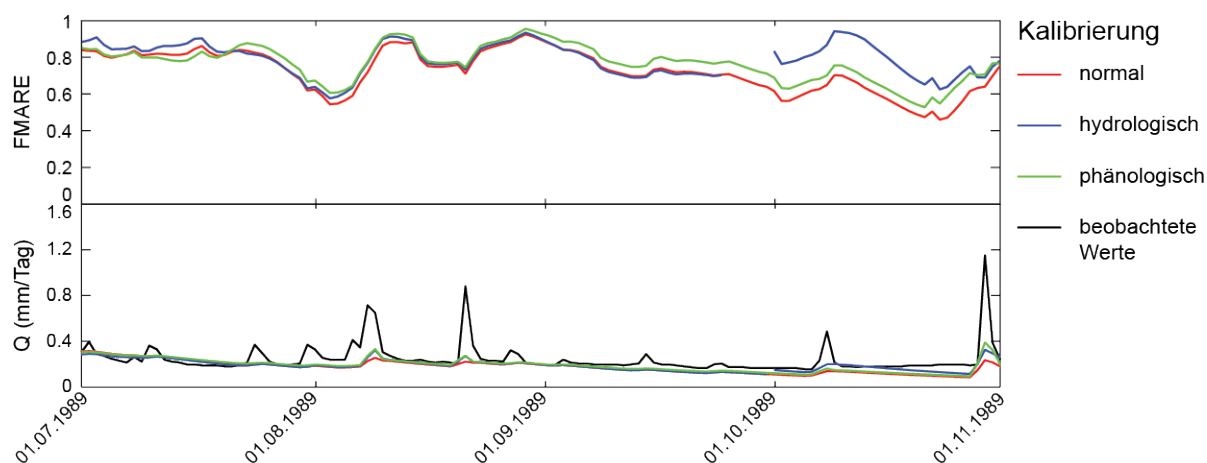


Abb. 31: FMARE und Abfluss in der Mentue während der Trockenperiode 1989.

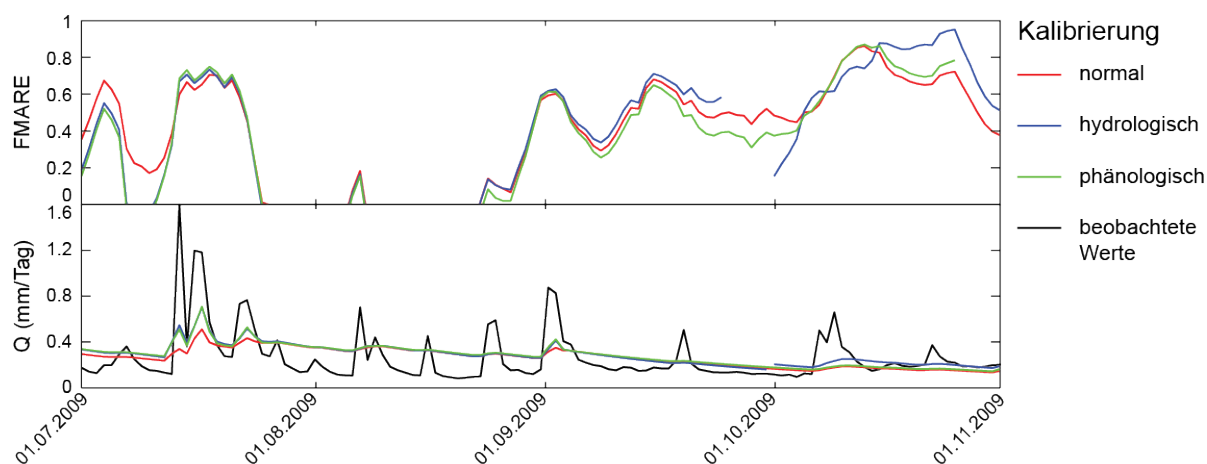


Abb. 32: FMARE und Abfluss in der Mentue während der Trockenperiode 2009.

Erkennbar ist, dass sich die beiden Perioden bezüglich des Abflussverhaltens unterscheiden. Während 1989 (wie übrigens auch 1976 und 2003) der Abfluss relativ konstant tief ist und mit zunehmender Dauer der Trockenperiode immer weiter sinkt, ist die Phase im 2009 (wie auch 2010 und 2011) ständig durch doch deutlich grössere Abflussspitzen unterbrochen. Während im ersten Fall die Abflüsse von allen Kalibrierungsmethoden mit zunehmender Dauer eher leicht unterschätzt werden, können sie im zweiten Fall die Dynamik praktisch nicht erfassen und überschätzen die Abflussminima konstant. Auch beim ersten Beispiel wird die Dynamik von allen Kalibrierungen schlecht erfasst, wobei die phänologische Kalibrierung die kleineren Abflussspitzen wenigstens ansatzweise abbildet.

Das durchschnittliche Abschneiden der verschiedenen Kalibrierungen in Zusammenhang mit der Abflussmenge präsentiert sich wie folgt (vgl. Tab. 5): Die phänologische Kalibrierung schneidet gegenüber der normalen über die gesamte Zeitspanne etwas besser ab, als nur während den Trockenperioden. Dasselbe gilt gegenüber der hydrologischen, während diese sich gegenüber der normalen leicht verbessert. Allerdings gilt es anzumerken, dass die Streuung der Werte während der Trockenperioden für die gewählten Differenzen recht hoch ist. Am besten schneidet die phänologische Kalibrierung gegenüber der normalen in Perioden mit wenig, aber nicht extrem geringem Abfluss ab. Erkennbar ist auch, dass die phänologische Kalibrierung während Phasen mit sehr grossem Abfluss, die notabene hauptsächlich im Winterhalbjahr liegen, durchschnittlich besser abschneidet als während Trockenperioden. Die hydrologische Kalibrierung scheint sich ähnlich zu verhalten wie die phänologische, ist während Trockenperioden aber wie erwähnt besser und während Spitzenabflussperioden deutlich schlechter. Erwähnenswert ist noch, dass das bessere Abschneiden der hydrologischen Kalibrierungsart während Trockenperioden hauptsächlich durch die Perioden in den Jahren 2009 bis 2011 bedingt ist, während ansonsten die phänologische Kalibrierung die besten Resultate liefert.

Tabelle 6 zeigt auf, wie gross die Differenzen in den Perioden sind, während denen die phänologische, bzw. hydrologische Kalibrierung am besten abschneidet. Der Wert von 0.081 in der ersten Zelle bedeutet also, dass während allen Phasen, in denen die phänologische Kalibrierung am besten abschneidet, diese durchschnittlich um 0.081 besser ist als die normale Kalibrierung.

Tab. 6: Differenzen der FMARE-Werte bei der Mentue, nur über die Perioden gerechnet, in denen die phänologische (Differenzen P-N und P-H), bzw. die hydrologische (Differenz H-N) Kalibrierung bessere Resultate liefert als die jeweils andere Kalibrierungsart.

Abflussmenge	Differenz	Durchschnitt	Minimum	Maximum	Standardabweichung
Gesamt	P – N	0.081	0.000	0.399	0.067
	P – H	0.050	0.000	0.727	0.078
	H – N	0.073	0.000	0.464	0.062
< Q5	P – N	0.078	0.000	0.280	0.058
	P – H	0.082	0.002	0.483	0.100
	H – N	0.104	0.000	0.367	0.078
Q5 – Q35	P – N	0.085	0.000	0.390	0.079
	P – H	0.079	0.000	0.727	0.124
	H – N	0.090	0.000	0.464	0.074
Q35 – Q65	P – N	0.078	0.000	0.399	0.065
	P – H	0.038	0.000	0.624	0.060
	H – N	0.069	0.000	0.376	0.055
Q65 – Q95	P – N	0.084	0.000	0.356	0.061
	P – H	0.040	0.000	0.478	0.035
	H – N	0.061	0.000	0.335	0.045
> Q95	P – N	0.055	0.001	0.191	0.045
	P – H	0.032	0.000	0.125	0.024
	H – N	0.039	0.000	0.296	0.044

Es zeigt sich, dass sich die Werte der Kalibrierungsarten während den Abflussspitzen weniger stark unterscheiden, als dies bei Phasen mit eher weniger Abfluss der Fall ist. Schneidet die phänologische Kalibrierung also während Trockenperioden besser ab als die anderen, tut sie dies deutlicher als während Phasen mit viel Abfluss.

4.5.2. Ergolz

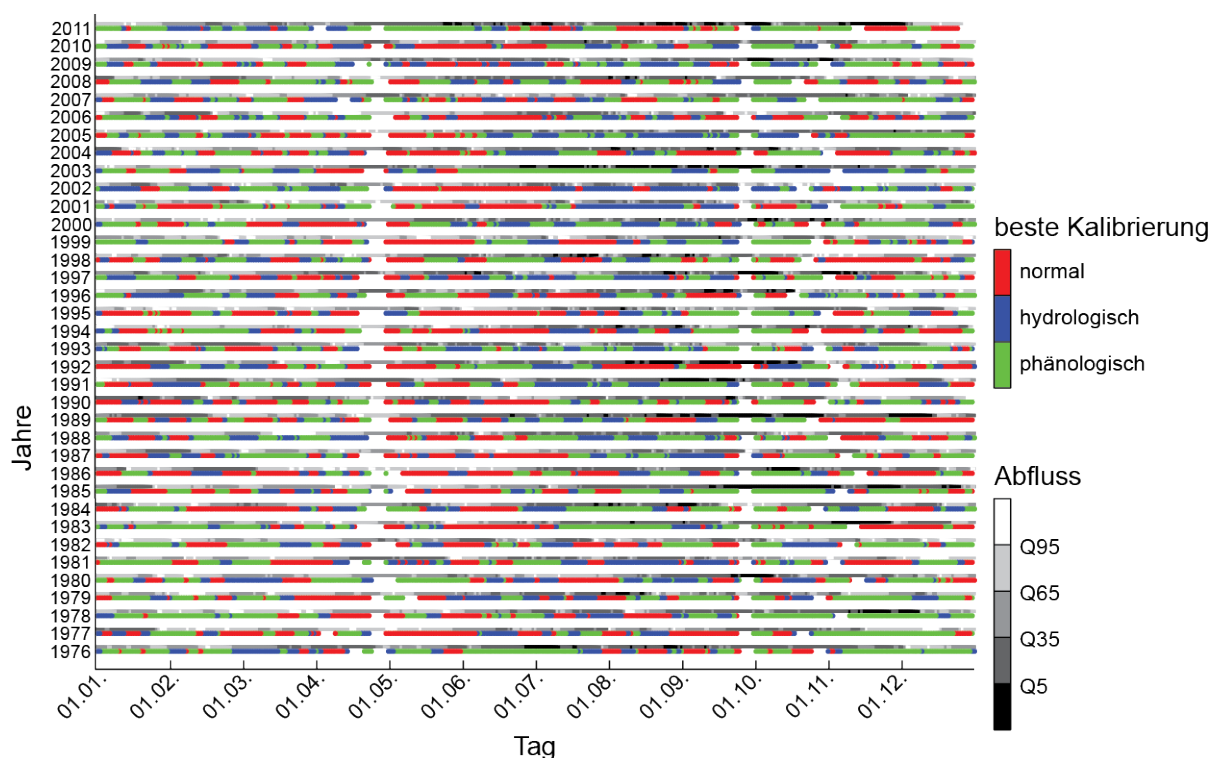


Abb. 33: Überblick über die jeweils beste Kalibrierung für die Ergolz.

Betrachtet man die Grafik der Ergolz (vgl. Abb. 33), ist es auf den ersten Blick etwas schwieriger, Regelmässigkeiten wie bei der Mentue auszumachen. Erkennbar ist auch hier, dass die hydrologische und phänologische Kalibrierung zusammen insgesamt häufiger am besten abschneiden als die normale. Im Gegensatz zur Mentue ist der Unterschied zwischen hydrologischer und phänologischer Kalibrierung deutlich grösser, wobei hier die phänologische deutlich am häufigsten auf dem ersten Platz liegt (vgl. Abb. 34).

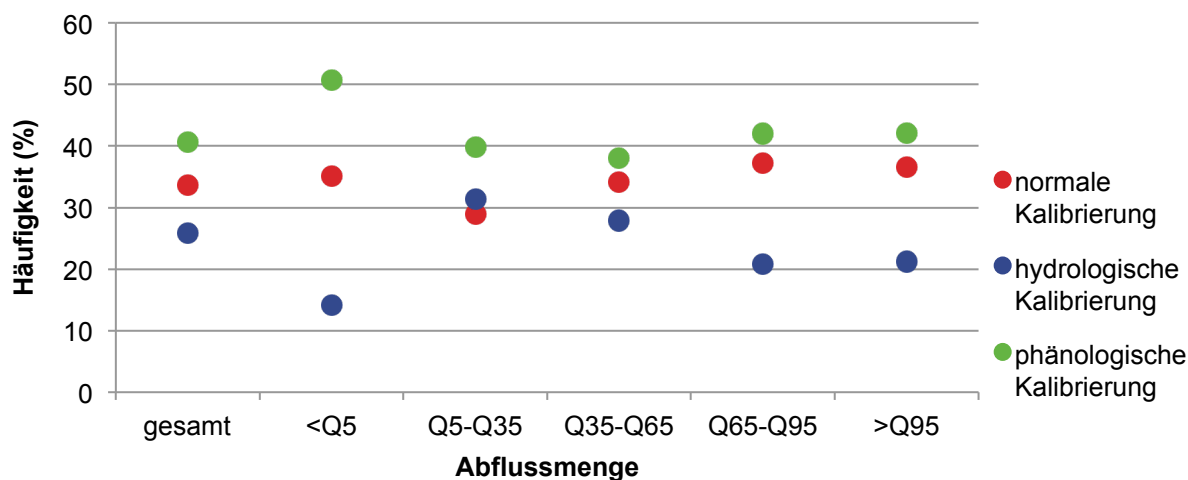


Abb. 34: Prozentuale Häufigkeit für die beste Modellgüte der verschiedenen Kalibrierungsarten bei der Ergolz.

Über die ganze Kalibrierungsperiode gesehen, schneidet die phänologische Kalibrierung durchschnittlich erneut besser ab als die normale, allerdings noch weniger deutlich als bei der Mentue. Hingegen ist die phänologische hier leicht besser als die hydrologische Kalibrierung (vgl. Tab. 7).

Tab. 7: Differenzen der FMARE-Werte in Abhängigkeit von Kalibrierungsart und Abflussmenge bei der Ergolz.

Abflussmenge	Differenz	Durchschnitt	Minimum	Maximum	Standardabweichung
Gesamt	P – N	0.012	-0.429	0.412	0.084
	P – H	0.005	-0.524	0.529	0.053
	H – N	0.006	-0.716	0.355	0.072
< Q5	P – N	0.034	-0.169	0.269	0.087
	P – H	0.023	-0.308	0.325	0.057
	H – N	0.008	-0.218	0.235	0.066
Q5 – Q35	P – N	0.020	-0.429	0.370	0.076
	P – H	0.007	-0.524	0.529	0.064
	H – N	0.011	-0.488	0.355	0.067
Q35 – Q65	P – N	0.011	-0.386	0.331	0.090
	P – H	0.003	-0.462	0.502	0.054
	H – N	0.008	-0.716	0.308	0.079
Q65 – Q95	P – N	0.003	-0.416	0.412	0.085
	P – H	0.002	-0.467	0.356	0.041
	H – N	0.001	-0.323	0.259	0.071
> Q95	P – N	-0.002	-0.342	0.173	0.070
	P – H	0.001	-0.350	0.146	0.030
	H – N	-0.002	-0.307	0.133	0.057

Bei detaillierterer Betrachtung der Abbildung 33 scheinen Muster etwas weniger klar erkennbar zu sein wie bei der Mentue. Gewisse Aspekte scheinen sich dennoch zu bestätigen. So ist auch hier zu Beginn des hydrologischen und phänologischen Sommerhalbjahres die normale Kalibrierung oft am besten. Ebenso gibt es im Winter regelmässig Phasen, während denen die phänologische Kalibrierung am besten abschneidet. Allerdings kommen diese Perioden nicht in gleicher Regelmässigkeit vor wie bei der Mentue. Auffallend ist hier das gute Abschneiden der phänologischen Kalibrierung im Herbst während des Zeitraums zwischen hydrologischem und phänologischem Winterbeginn. Die Abbildungen 35 und 36 zeigen jeweils einen Ausschnitt aus einem Winter mit bester phänologischer Kalibrierung, einem Frühling nach Einsetzen des Sommerhalbjahres und einer Periode zwischen hydrologischem und phänologischem Winterbeginn.

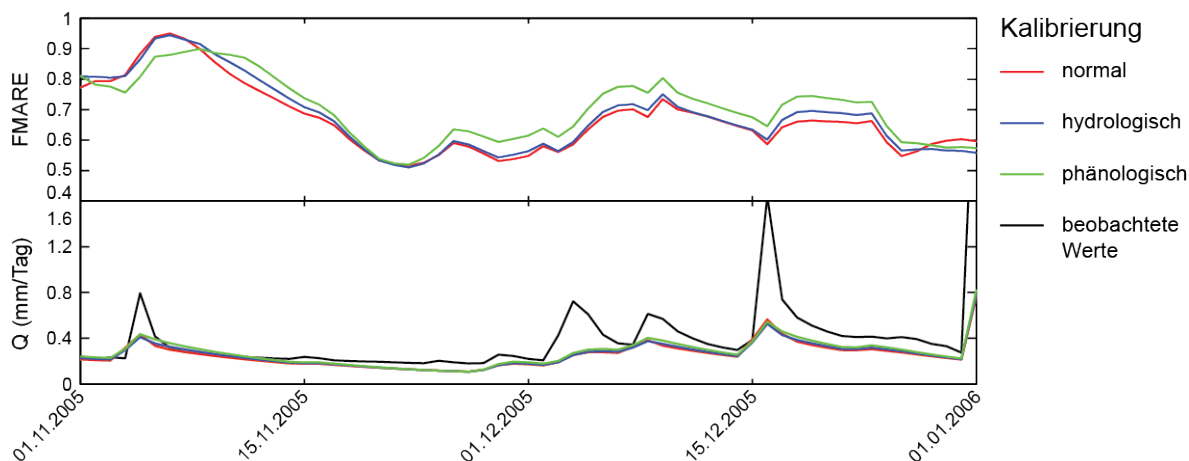


Abb. 35: FMARE und Abfluss in der Ergolz im November und Dezember 2005.

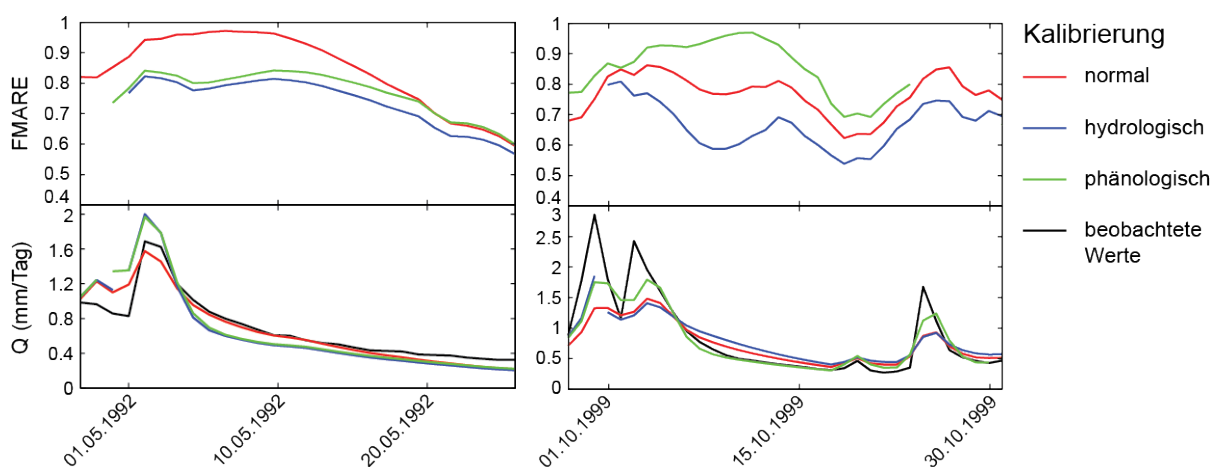


Abb. 36: FMARE und Abfluss in der Ergolz im Mai 1992 (links) und im Oktober 1999 (rechts).

Die bei der Mentue gemachten Beobachtungen bestätigen sich hier. Erneut haben die hydrologische und phänologische Kalibrierung im Frühling Mühe, die Dynamik korrekt abzubilden. Die Rezession erfolgt zu steil, die Maxima und Minima werden übertrieben dargestellt. Im Gegensatz zur Mentue werden die Abflussspitzen hier auch oft überschätzt. Auch in den Wintern zeigt sich dasselbe Bild. Hier gilt das Umgekehrte zum Frühling: die Dynamik wird hier durch die phänologische Kalibrierung am besten erfasst, während die normale Kurve schlechter abschneidet und tendenziell zu flach ist. Allerdings sind erneut alle Kurven generell eher zu tief und unterscheiden sich nur geringfügig. Bei den Phasen im Herbst zwischen hydrologischem und phänologischem Winterbeginn sieht es ähnlich aus, wobei der Umstand hier viel deutlicher zum Vorschein tritt. Erneut wird die Kurve mit der normalen und auch der hydrologischen Kalibrierung zu flach abgebildet, während sie mit der phänologischen Kalibrierung viel besser erfasst wird. Erkennbar ist hier, dass FMARE bei der phänologischen Kalibrierung teilweise um bis zu 0.3 bessere Werte aufweist als etwa die hydrologische Kalibrierung.

In diesem Zusammenhang ist auch die Verteilung der Trockenperioden von Bedeutung. Im Gegensatz zur Mentue treten die Trockenperioden eher etwas später auf und decken deshalb oft auch den erwähnten Bereich im Herbst ab, wenn die phänologische Kalibrierung besonders gut abschneidet. Ansonsten zeigt sich auch in diesem Bereich ein ähnliches Bild wie bei der Mentue. Erneut liegen viele längere Perioden mit guter phänologischer Kalibrierung in Trockenperioden. Schaut man alle diese Trockenperioden an, scheint hier die phänologische Kalibrierung noch weitaus deutlicher als bei der Mentue die Nase vorn zu haben. Besonders deutlich wird dies im Sommer 2003, wo sowohl eine der längsten Trockenperioden, als auch eine der längsten Phasen mit bester phänologischer Kalibrierung vorliegen. Auch zu anderen Zeitpunkten, wie etwa im Sommer 1976, Spätherbst 1978, Herbst 1985, Sommer 1991 oder Frühling 2011 zeigt sich dieses Bild. Eine markante Ausnahme bildet die Niedrigwasserperiode im Spätsommer und Herbst 1992, wo die normale Kalibrierung besser abschneidet. Im Gegensatz zur Mentue scheinen hier kaum Trockenperioden vorzukommen, in denen die hydrologische Kalibrierung besonders gut ist.

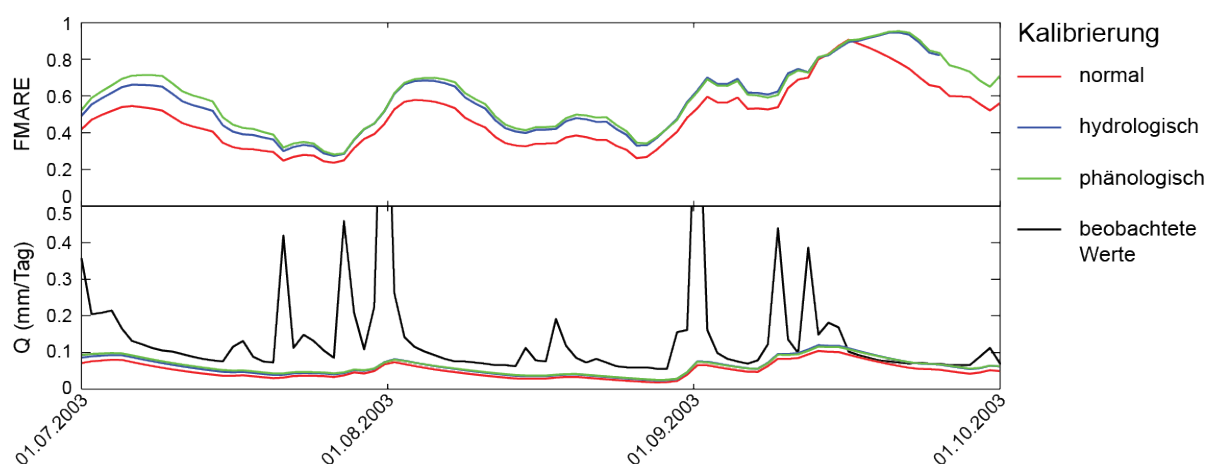


Abb. 37: FMARE und Abfluss in der Ergolz während der Trockenperiode im Sommer 2003.

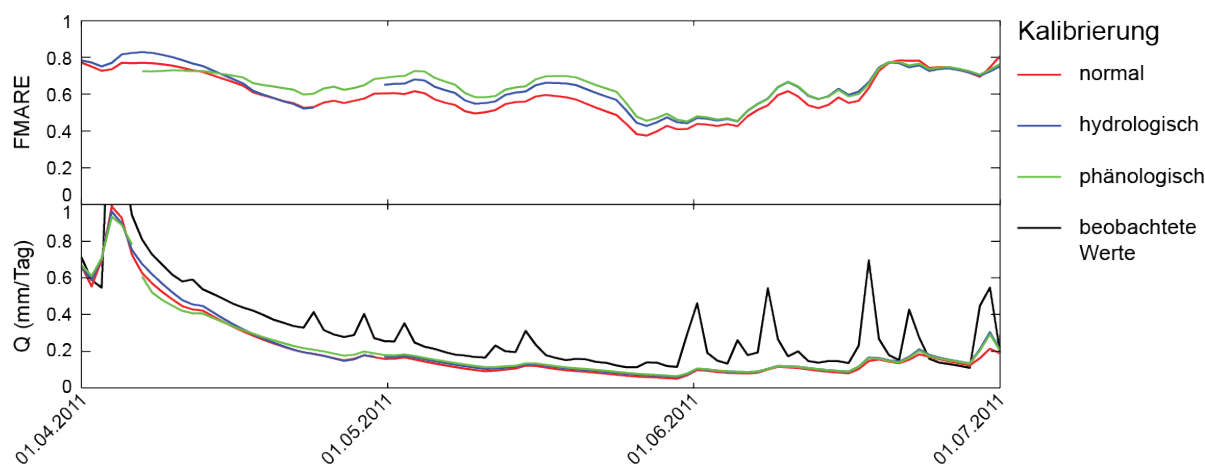


Abb. 38: FMARE und Abfluss in der Ergolz während der Trockenperiode im Frühling 2011.

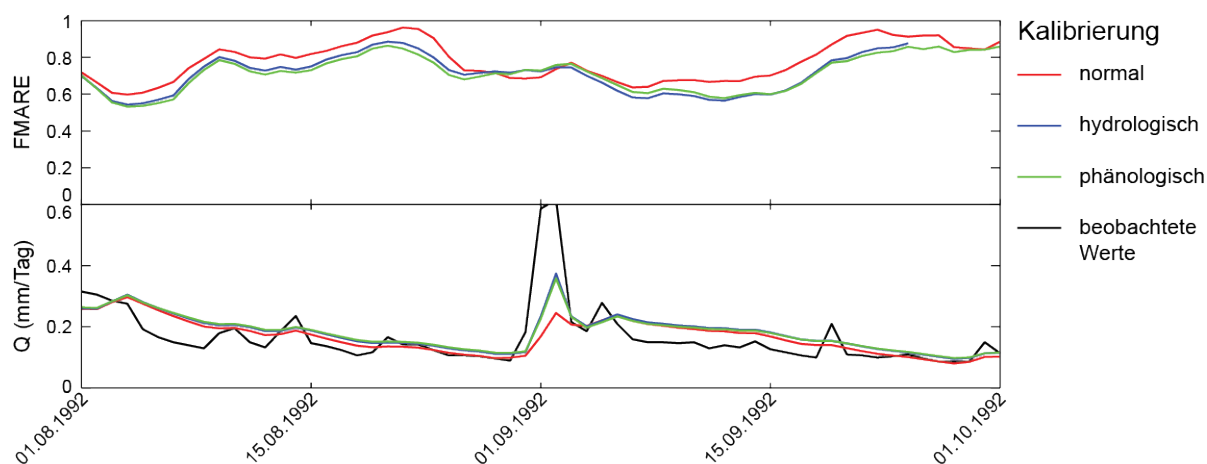


Abb. 39: FMARE und Abfluss in der Ergolz während der Trockenperiode im Sommer 1992.

Die Abflussganglinien sehen ähnlich aus wie bei der Mentue. In den ersten zwei Beispielen (vgl. Abb. 37 und 38) liegen lange Trockenperioden ohne nennenswerte Ausreisser nach oben vor, die drei Kurven verlaufen parallel und bilden die Dynamik nur schlecht ab, wobei die phänologische am nächsten an die beobachtete Kurve heran kommt. 1992 zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Mentue in den Jahren 2009 bis 2011, wenngleich auch in weitaus geringerem Ausmass (vgl. Abb. 39). Die Abflussminima werden hier überschätzt. Gleichzeitig erfasst die normale Kurve das vorhandene kleine Maxima deutlich schlechter als die anderen beiden Kurven.

Der Eindruck des überaus guten Abschneidens der phänologischen Kalibrierung wird auch zahlenmässig bestätigt (vgl. Abb. 34). Während Trockenperioden ist die phänologische Kalibrierung in jedem zweiten Fall am besten, der Anteil der normalen Kalibrierung zeigt kaum eine Veränderung gegenüber der gesamten Zeitspanne, während die hydrologische Kalibrierung auf rund 14 Prozent sinkt. Während Phasen mit etwas höherem Abfluss ist die Verteilung zwischen den drei Kalibrierungen ausgeglichener als bei der Mentue. Auffallend ist auch hier das recht gute Abschneiden der phänologischen Kalibrierung während den Perioden mit höchstem Abfluss.

Auch in den Daten zum durchschnittlichen Abschneiden bestätigt sich die Beobachtung (vgl. Tab. 7). Im Gegensatz zur Mentue schneidet die phänologische Kalibrierung während Trockenperioden besser ab als im Gesamtdurchschnitt. Auch gegenüber der hydrologischen Kalibrierung ist sie besser. Obwohl die Standardabweichung gleich bleibt, nimmt die Spannweite der Werte merklich ab. Die durchschnittlich besten Werte weist die phänologische Kalibrierung hier während den Phasen mit eher geringem Abfluss auf. Während den Perioden mit grossem und sehr grossem Abfluss scheinen sich die Kurven durchschnittlich nicht gross zu unterscheiden. Ist die phänologische Kalibrierung am besten, ist sie dies während Trockenperioden erneut deutlicher als während Niedrigabflussperioden (vgl. Tab. 8).

Tab. 8: Differenzen der FMARE-Werte bei der Ergolz, nur über die Perioden gerechnet, in denen die phänologische (Differenzen P-N und P-H), bzw. die hydrologische (Differenz H-N) Kalibrierung bessere Resultate liefert als die jeweils andere Kalibrierungsart.

Abflussmenge	Differenz	Durchschnitt	Minimum	Maximum	Standardabweichung
Gesamt	P – N	0.061	0.000	0.370	0.051
	P – H	0.030	0.000	0.529	0.051
	H – N	0.050	0.000	0.355	0.043
< Q5	P – N	0.089	0.001	0.269	0.058
	P – H	0.050	0.000	0.325	0.048
	H – N	0.059	0.000	0.235	0.047
Q5 – Q35	P – N	0.059	0.000	0.370	0.052
	P – H	0.038	0.000	0.529	0.065
	H – N	0.051	0.000	0.355	0.046
Q35 – Q65	P – N	0.067	0.000	0.331	0.055
	P – H	0.027	0.000	0.502	0.054
	H – N	0.055	0.000	0.308	0.047
Q65 – Q95	P – N	0.057	0.000	0.272	0.044
	P – H	0.023	0.000	0.356	0.030
	H – N	0.045	0.000	0.259	0.036
> Q95	P – N	0.041	0.000	0.173	0.032
	P – H	0.017	0.000	0.146	0.020
	H – N	0.030	0.000	0.133	0.026

4.5.3. Rom

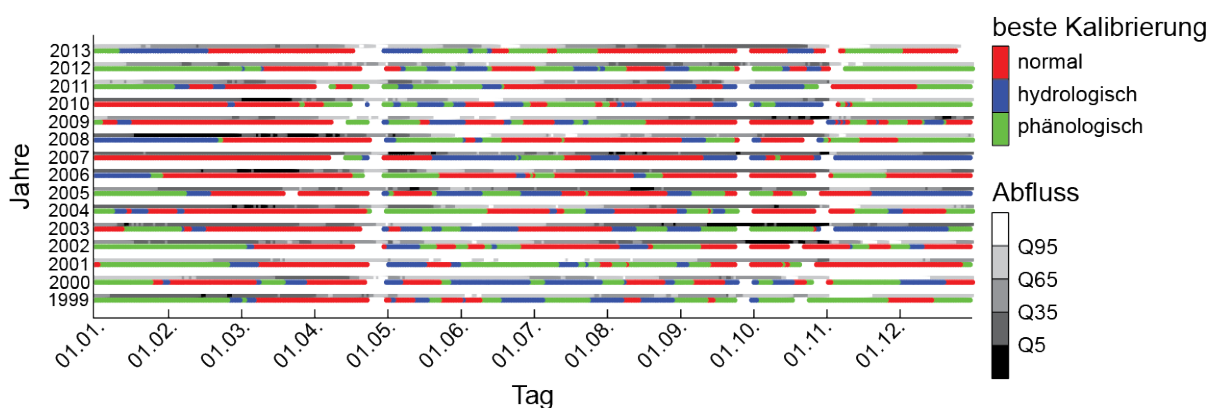


Abb. 40: Überblick über die jeweils beste Kalibrierung für den Rom.

Etwas anders sieht das Bild beim Rom aus, dessen Einzugsgebiet sich bezüglich seiner Charakteristika auch stark von den beiden vorherigen unterscheidet. Bei einem ersten Blick auf die Grafik scheint hier die normale Kalibrierung häufiger das beste Resultat aufzuweisen, als dies bei Mentue und Ergolz der Fall war (vgl. Abb. 40). Effektiv zeigt auch die Statistik, dass die normale Kalibrierung in rund 47 Prozent der Tage am besten abschneidet, gefolgt von der phänologischen und der hydrologischen Kalibrierung (vgl. Abb. 41).

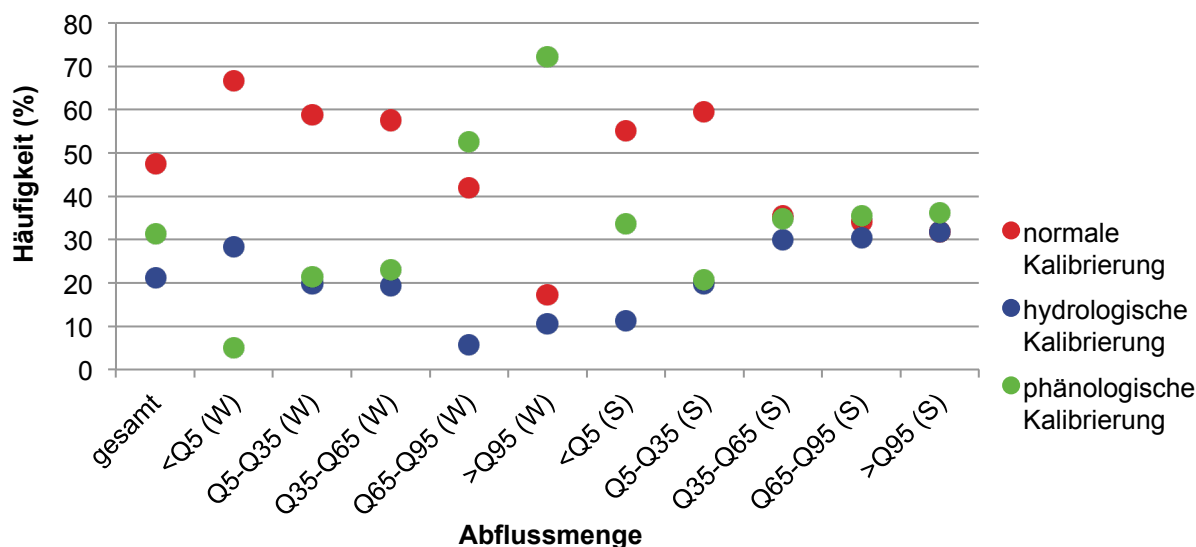


Abb. 41: Prozentuale Häufigkeit für die beste Modellgüte der verschiedenen Kalibrierungsarten beim Rom.

Durchschnittlich gesehen schneiden sowohl die phänologische, als auch die hydrologische Kalibrierung leicht schlechter ab als die Kalibrierung über die gesamte Zeitspanne. Auch weist die phänologische einen leicht schlechteren Wert auf als die hydrologische (vgl. Tab. 9).

Tab. 9: Differenzen der FMARE-Werte in Abhängigkeit von Kalibrierungsart und Abflussmenge beim Rom.

Abflussmenge	Differenz	Durchschnitt	Minimum	Maximum	Standardabweichung
Gesamt	P – N	-0.015	-0.617	0.309	0.096
	P – H	-0.006	-0.608	0.237	0.064
	H – N	-0.010	-0.427	0.301	0.075
< Q5 (Winter)	P – N	-0.014	-0.069	0.125	0.051
	P – H	0.003	-0.013	0.062	0.012
	H – N	-0.017	-0.067	0.066	0.053
Q5 – Q35 (Winter)	P – N	-0.014	-0.323	0.124	0.058
	P – H	-0.002	-0.291	0.062	0.040
	H – N	-0.013	-0.070	0.063	0.037
Q35 – Q65 (Winter)	P – N	-0.028	-0.302	0.131	0.060
	P – H	-0.018	-0.271	0.084	0.048
	H – N	-0.010	-0.093	0.136	0.028
Q65 – Q95 (Winter)	P – N	-0.003	-0.271	0.283	0.055
	P – H	0.008	-0.116	0.215	0.038
	H – N	-0.014	-0.341	0.172	0.038
> Q95 (Winter)	P – N	0.029	-0.161	0.236	0.056
	P – H	0.028	-0.015	0.170	0.028
	H – N	-0.014	-0.258	0.093	0.053
< Q5 (Sommer)	P – N	-0.064	-0.615	0.230	0.210
	P – H	-0.030	-0.606	0.237	0.188
	H – N	-0.037	-0.240	0.146	0.085
Q5 – Q35 (Sommer)	P – N	-0.073	-0.617	0.309	0.133
	P – H	-0.031	-0.608	0.128	0.108
	H – N	-0.038	-0.427	0.301	0.108
Q35 – Q65 (Sommer)	P – N	0.001	-0.308	0.286	0.112
	P – H	0.000	-0.246	0.125	0.053
	H – N	0.001	-0.296	0.281	0.110

Q65 – Q95 (Sommer)	P – N	0.015	-0.316	0.248	0.070
	P – H	0.003	-0.180	0.157	0.029
	H – N	0.010	-0.290	0.229	0.071
> Q95 (Sommer)	P – N	0.046	-0.115	0.247	0.091
	P – H	-0.003	-0.143	0.029	0.028
	H – N	0.049	-0.122	0.228	0.085

Auch hinsichtlich allfälliger Muster zeigt sich beim Rom ein anderes Bild. Während die normale Kalibrierung bei Mentue und Ergolz anfangs Sommerhalbjahr regelmässig am besten abschneidet, tut sie dies hier in den Monaten März und April, d.h. unmittelbar vor Beginn des hydrologischen und phänologischen Sommers. Hingegen sind während der Wintermonate auch hier häufig längere Perioden auszumachen, während denen die phänologische Kalibrierung an erster Stelle ist. Während des Sommerhalbjahres sind kaum Regelmässigkeiten festzustellen. Tendenziell schneiden phänologische und hydrologische Kalibrierung anfangs Sommer besser ab, die normale eher in der zweiten Sommerhälfte. Die Abbildungen 42, 43 und 44 zeigen Beispiele eines Winters mit guter phänologischer Kalibrierung, einer Periode vor dem Einsetzen des hydrologischen und phänologischen Sommers und eine Herbstphase mit guter normaler Kalibrierung.

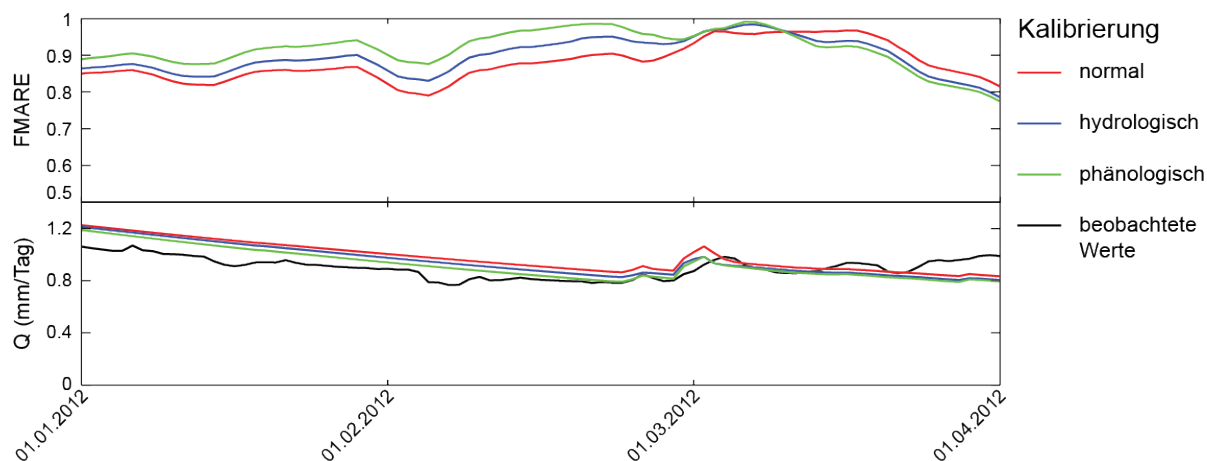


Abb. 42: FMARE und Abfluss im Rom im Winter 2012.

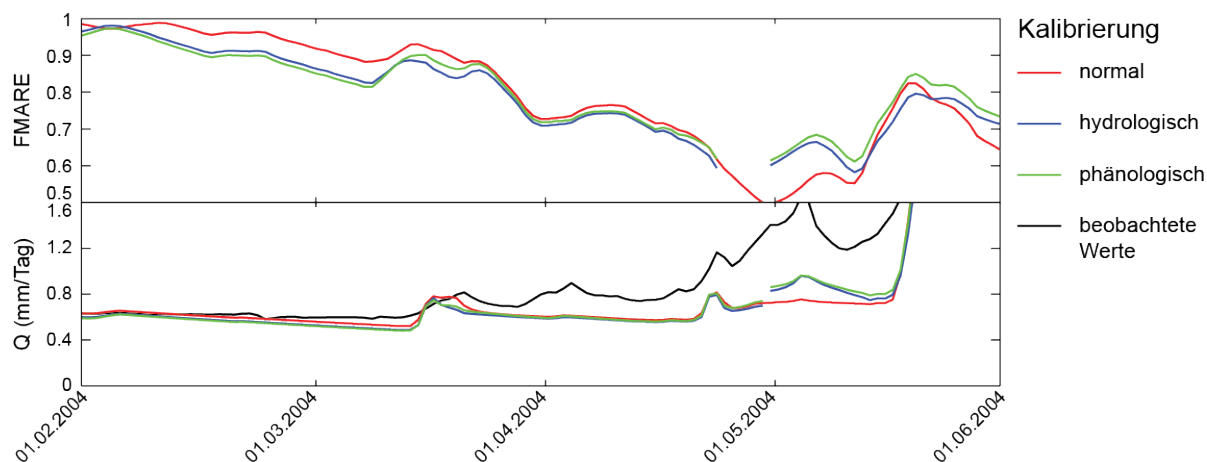


Abb. 43: FMARE und Abfluss im Rom im Frühling 2004.

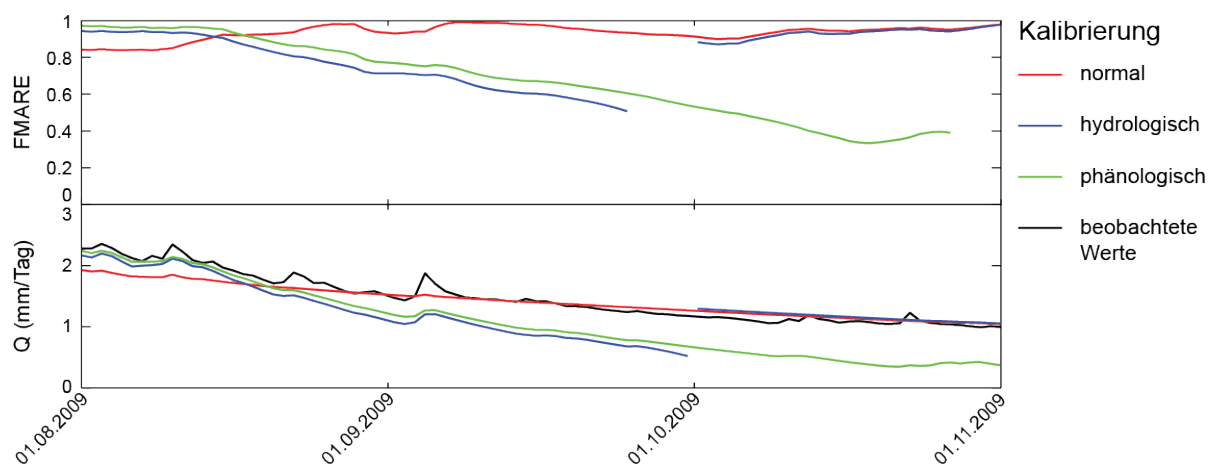


Abb. 44: FMARE und Abfluss im Rom im Herbst 2009.

Auffallend bei diesem Einzugsgebiet ist das sehr regelmässige jährlich auftretende Abflussverhalten. Dies dürfte auf die klimatischen Bedingungen zurückzuführen sein. Einerseits ist das Einzugsgebiet relativ hoch gelegen, was zu einer grossen Schneeanammlung führt, was wiederum die sehr grossen Abflussspitzen im Zuge der Schneeschmelze erklärt. Dass das Einzugsgebiet ausserdem sehr wenig Niederschlag erhält, zeigt sich in den langen kontinuierlichen Rezessionsperioden ohne grosse Abflussspitzen ab Ende der Schneeschmelze bis in den Winter hinein. Die simulierten Abflusskurven verhalten sich während diesen Rezessionsperioden immer ähnlich: die Kurve der normalen Kalibrierung verläuft am flachsten, während vor allem die phänologische oft steiler verläuft. Da alle simulierten Kurven meist etwas versetzt zu den beobachteten Werten verlaufen, führt dies zu den langen Phasen mit bester phänologischer oder normaler Kalibrierung im Winter. Je länger die Phase dauert, desto eher wird die normale Kalibrierung am besten, da die beiden saisonalen Kalibrierungen oft etwas steiler abfallen. Auffallend sind auch die grossen Sprünge, welche die hydrologische und vor allem die phänologische Kalibrierung jeweils bei den Jahreszeitenwechseln aufweisen. Häufig bilden diese das Abflussverhalten vor dem Jahreszeitenwechsel nur noch schlecht ab, was sich dann aber schlagartig ändert. Dies führt sowohl im Frühling wie auch im Herbst zu den langen Perioden mit bester normaler Kalibrierung, während nach dem Jahreszeitenwechsel die anderen beiden oft besser sind.

Da es sich beim Rom um ein Einzugsgebiet in recht grosser Höhe handelt, ergibt sich das in Kapitel 3.7. erwähnte Problem, dass alle Trockenperioden ins Winterhalbjahr zu liegen kommen. Deshalb wurde hier die Abflussklassifizierung für den Sommer (Mai bis Oktober) und Winter (November bis April) separat berechnet. Eine Trockenperiode im Sommer kann somit einem doch beträchtlichen Abfluss im Winter entsprechen.

Bei den Winter-Trockenperioden zeigt sich keinerlei Zusammenhang mit der phänologischen Kalibrierung. Diese ist nur in 6 Prozent aller Fälle am besten, während die normale Kalibrierung

in rund 70 Prozent der Tage an erster Stelle steht. Auffallend ist, dass die phänologische Kalibrierung im Gegenzug während den winterlichen Abflussspitzen klar am besten abschneidet, sowohl was die prozentuale Häufigkeit, als auch die durchschnittliche Modellgüte anbelangt. Hierbei ist erneut darauf hinzuweisen, dass der Abfluss während den Wintermonaten ja praktisch stetig sinkt. Somit liegen die Winter-Trockenperioden eher im Spätwinter, wo wie gesehen die saisonale Kalibrierung etwas zu tief fällt.

Etwas anders sieht es aus, wenn man nur die Sommer-Trockenperioden anschaut. Hier steigt der Prozentanteil der phänologischen Kalibrierung auf rund 33 Prozent. Auffallend ist, dass insbesondere während der längsten durchgehenden Trockenphase im Herbst 2003 die phänologische Kalibrierung praktisch durchwegs das beste Resultat aufweist (vgl. Abb. 45). Dennoch verschlechtert sich das durchschnittliche Abschneiden der phänologischen und hydrologischen gegenüber der normalen während der Trockenperioden, was sich damit erklären lässt, dass aufgrund der oben erwähnten Beobachtungen die phänologische Kalibrierung vor dem Winterbeginn oft schlecht abschneidet. Erneut fällt auf, dass die phänologische Kalibrierung während den Abflussspitzen durchschnittlich sehr gut abschneidet. Allerdings belegen alle drei Kalibrierungsarten während des Sommerhalbjahres etwa gleich oft die Spitzenposition, mit Ausnahme der Trockenperioden, wo die normale Kalibrierung öfters an erster Stelle steht. Abbildung 45 wirft noch einen Blick auf die Trockenperiode 2003, die sich auch mit der längsten Phase mit bester phänologischer Kalibrierung deckt. Es zeigt sich, dass die phänologische Kalibrierung die beobachtete Abflusskurve effektiv am besten trifft.

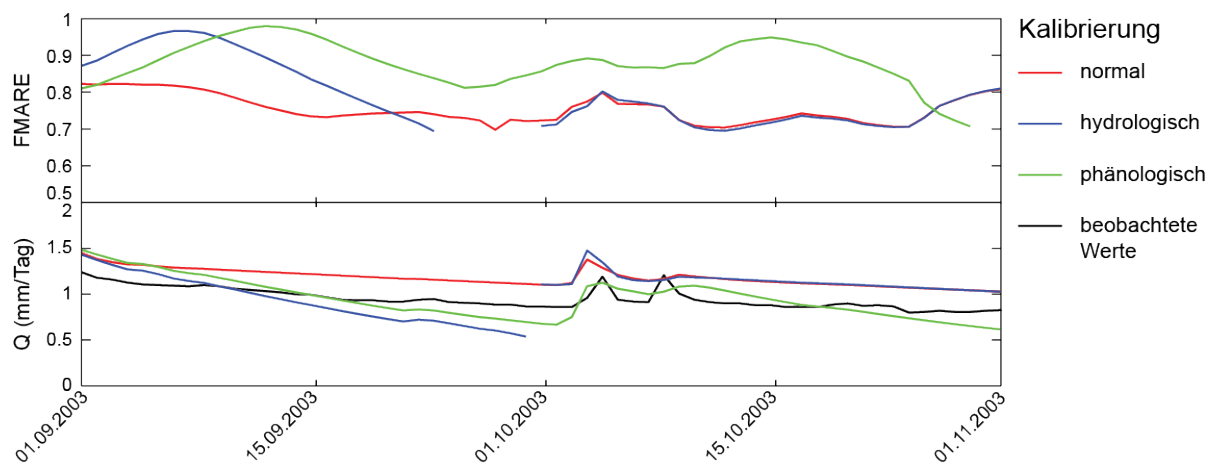


Abb. 45: FMARE und Abfluss im Rom im Herbst 2003.

Wie schon bei den beiden ersten Einzugsgebieten gesehen, weist auch hier die phänologische Kalibrierung während den Trockenphasen den grössten Vorsprung auf, sofern sie am besten abschneidet (vgl. Tab. 10).

Tab. 10: Differenzen der FMARE-Werte beim Rom, nur über die Perioden gerechnet, in denen die phänologische (Differenzen P-N und P-H), bzw. die hydrologische (Differenz H-N) Kalibrierung bessere Resultate liefert als die jeweils andere Kalibrierungsart.

Abflussmenge	Differenz	Durchschnitt	Minimum	Maximum	Standard-abweichung
Gesamt	P – N	0.057	0.000	0.309	0.052
	P – H	0.030	0.000	0.237	0.031
	H – N	0.049	0.000	0.301	0.052
< Q5 (Winter)	P – N	0.053	0.001	0.125	0.023
	P – H	0.010	0.000	0.062	0.010
	H – N	0.056	0.001	0.066	0.017
Q5 – Q35 (Winter)	P – N	0.045	0.000	0.124	0.033
	P – H	0.022	0.000	0.062	0.020
	H – N	0.031	0.000	0.063	0.019
Q35 – Q65 (Winter)	P – N	0.038	0.000	0.096	0.029
	P – H	0.026	0.001	0.084	0.017
	H – N	0.021	0.000	0.136	0.016
Q65 – Q95 (Winter)	P – N	0.028	0.000	0.181	0.028
	P – H	0.027	0.000	0.215	0.031
	H – N	0.012	0.000	0.172	0.014
> Q95 (Winter)	P – N	0.039	0.002	0.174	0.029
	P – H	0.033	0.001	0.170	0.027
	H – N	0.021	0.001	0.093	0.015
< Q5 (Sommer)	P – N	0.145	0.003	0.230	0.064
	P – H	0.113	0.001	0.237	0.069
	H – N	0.058	0.000	0.146	0.051
Q5 – Q35 (Sommer)	P – N	0.066	0.000	0.309	0.063
	P – H	0.041	0.000	0.128	0.029
	H – N	0.063	0.000	0.301	0.064
Q35 – Q65 (Sommer)	P – N	0.081	0.000	0.286	0.061
	P – H	0.038	0.001	0.125	0.032
	H – N	0.080	0.000	0.281	0.067
Q65 – Q95 (Sommer)	P – N	0.054	0.001	0.248	0.044
	P – H	0.021	0.000	0.157	0.025
	H – N	0.057	0.000	0.229	0.045
> Q95 (Sommer)	P – N	0.105	0.001	0.247	0.071
	P – H	0.016	0.000	0.029	0.009
	H – N	0.091	0.000	0.228	0.066

4.5.4. Allenbach

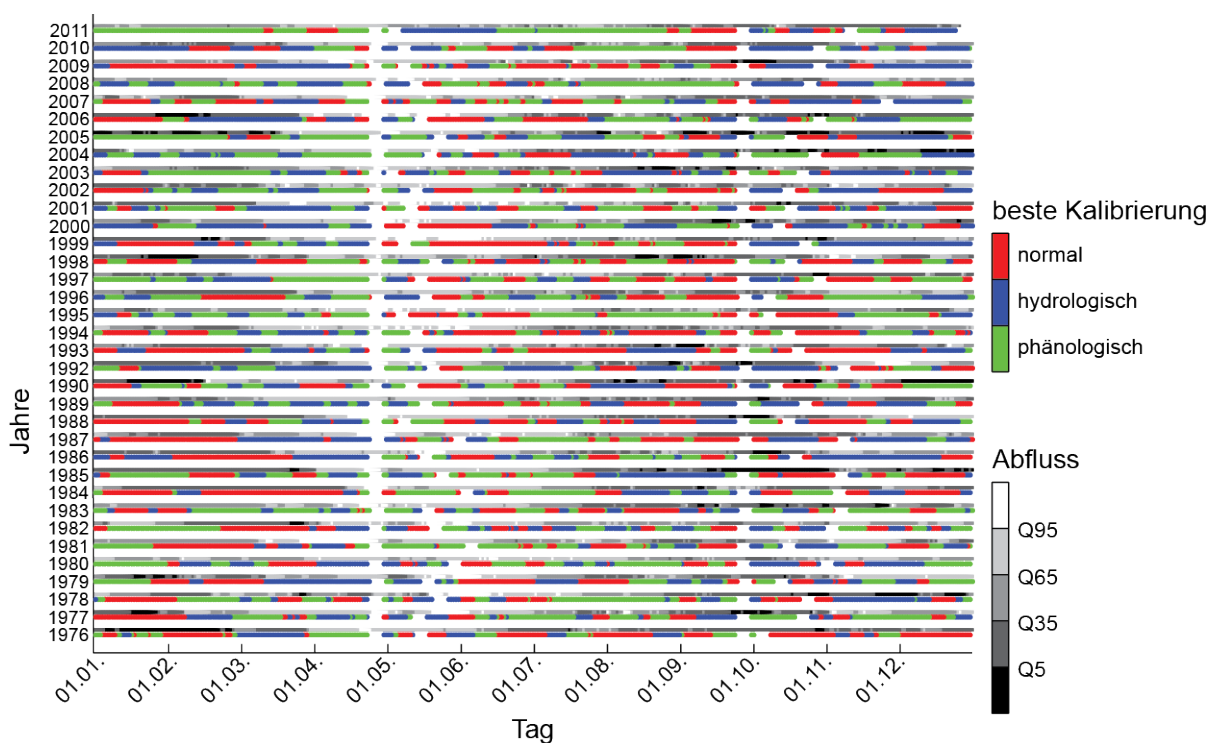


Abb. 46: Überblick über die jeweils beste Kalibrierung für den Allenbach.

Erneut anders präsentieren sich die Ergebnisse beim Allenbach, dessen Einzugsgebiet ja nahezu frei von laubwerfender Vegetation ist. Der Blick auf die Abbildung 46 lässt kaum erahnen, welche Kalibrierung am häufigsten am besten abschneidet. Erkennbar ist aber, dass auch hier die hydrologische und phänologische Kalibrierung gemeinsam öfters den ersten Rang belegen dürften als die normale Kalibrierung. In der Tat bestätigen sich diese Annahmen in Abbildung 47: Alle drei Kalibrierung schneiden praktisch gleich oft am besten ab.

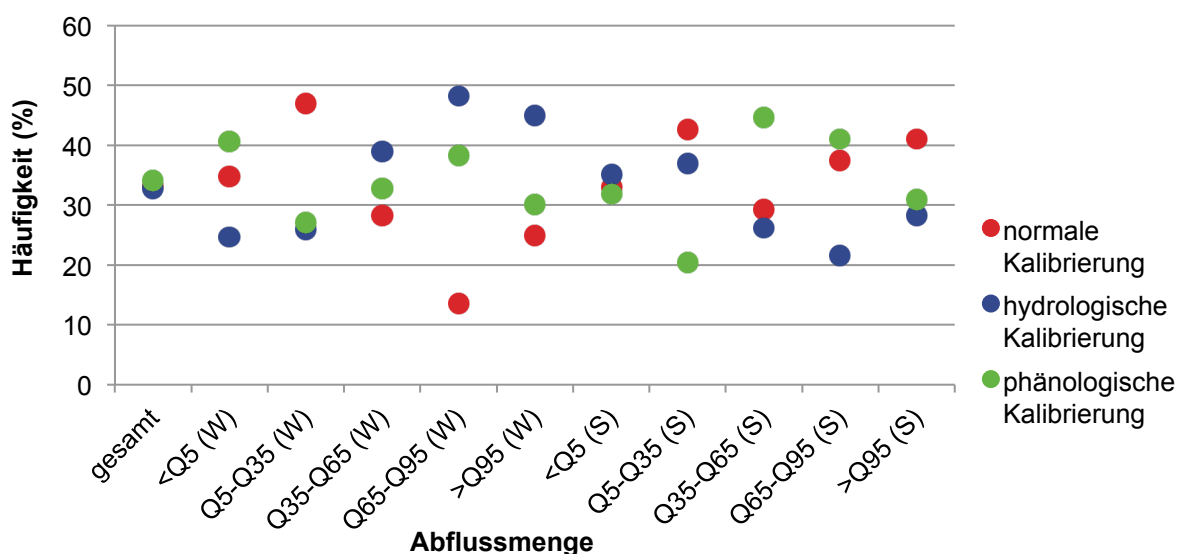


Abb. 47: Prozentuale Häufigkeit für die beste Modellgüte der verschiedenen Kalibrierungsarten beim Allenbach.

Auch beim durchschnittlichen Abschneiden zeigt sich dasselbe Muster: alle drei Kalibrierungen unterscheiden sich kaum (vgl. Tab. 11).

Tab. 11: Differenzen der FMARE-Werte in Abhängigkeit von Kalibrierungsart und Abflussmenge beim Allenbach.

Abflussmenge	Differenz	Durchschnitt	Minimum	Maximum	Standardabweichung
Gesamt	P – N	0.003	-0.598	0.768	0.083
	P – H	-0.004	-0.665	0.483	0.073
	H – N	0.006	-0.553	0.828	0.074
< Q5 (Winter)	P – N	0.022	-0.139	0.464	0.086
	P – H	0.019	-0.185	0.312	0.071
	H – N	0.004	-0.218	0.292	0.073
Q5 – Q35 (Winter)	P – N	-0.017	-0.477	0.768	0.098
	P – H	-0.010	-0.665	0.471	0.085
	H – N	-0.008	-0.224	0.828	0.080
Q35 – Q65 (Winter)	P – N	0.009	-0.410	0.561	0.080
	P – H	-0.003	-0.411	0.397	0.056
	H – N	0.012	-0.201	0.485	0.069
Q65 – Q95 (Winter)	P – N	0.032	-0.282	0.588	0.076
	P – H	-0.010	-0.323	0.372	0.063
	H – N	0.042	-0.242	0.427	0.068
> Q95 (Winter)	P – N	-0.001	-0.157	0.430	0.055
	P – H	-0.005	-0.234	0.280	0.085
	H – N	-0.002	-0.222	0.187	0.070
< Q5 (Sommer)	P – N	0.007	-0.598	0.327	0.194
	P – H	-0.023	-0.560	0.483	0.195
	H – N	0.012	-0.535	0.483	0.132
Q5 – Q35 (Sommer)	P – N	-0.025	-0.365	0.315	0.089
	P – H	-0.011	-0.389	0.407	0.103
	H – N	-0.015	-0.553	0.428	0.095
Q35 – Q65 (Sommer)	P – N	0.011	-0.214	0.300	0.052
	P – H	0.002	-0.165	0.313	0.038
	H – N	0.010	-0.263	0.237	0.050
Q65 – Q95 (Sommer)	P – N	0.004	-0.256	0.283	0.056
	P – H	0.004	-0.133	0.345	0.037
	H – N	0.000	-0.291	0.238	0.048
> Q95 (Sommer)	P – N	-0.001	-0.252	0.149	0.055
	P – H	-0.001	-0.111	0.135	0.033
	H – N	0.001	-0.244	0.160	0.047

Genau so regelmässig wie die obige Verteilung zeigt sich auch die räumliche Verteilung in Abbildung 46. Es sind kaum irgendwelche Regelmässigkeiten auszumachen. Mit etwas gutem Willen kann man eine gewisse Häufung der phänologischen und hydrologischen Kalibrierung vor Beginn des Sommerhalbjahres erkennen, während die normale Kalibrierung nach Beginn des phänologischen Sommers oft die besten Resultate zu liefern scheint (vgl. Abb. 47). Trotz fehlender Regelmässigkeit sind immer wieder längere Perioden zu erkennen, während denen die phänologische Kalibrierung am besten abschneidet. Allerdings lassen sich diese Phasen nicht einer spezifischen Jahreszeit zuordnen.

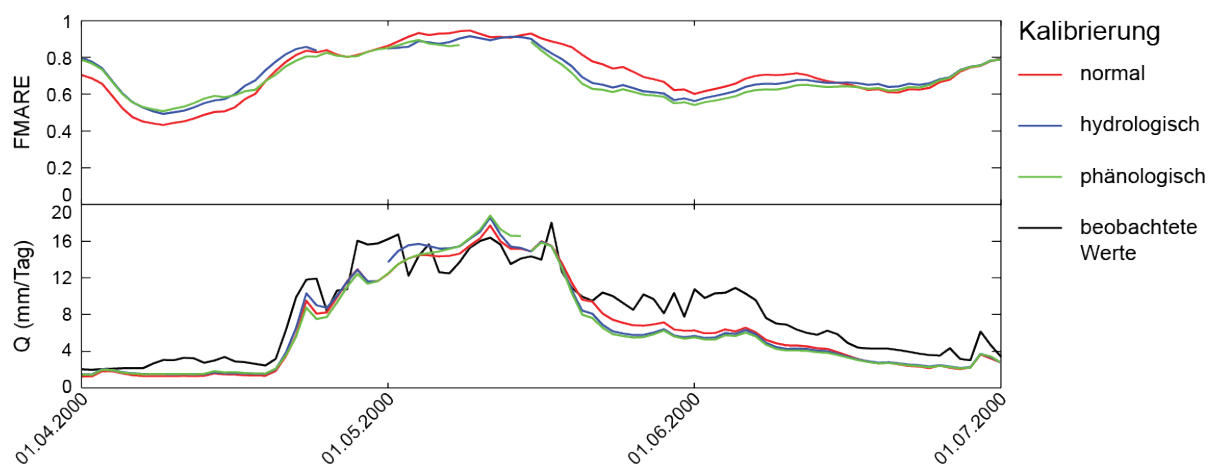


Abb. 48: FMARE und Abfluss im Allenbach im Frühling 2000.

Erkennbar beim Beispiel in Abbildung 48 ist, dass sich die Sommerbeginne oft ungefähr mit einer Abflussspitze decken, die mit der Schneeschmelze in Verbindung gebracht werden kann. Dabei zeigt sich erneut, dass die Spitzen durch die phänologische und hydrologische Kalibrierung teilweise nicht schlecht getroffen werden, diese beiden Kurven dann aber eine zu steile Rezession zeigen, so dass die normale Kalibrierung nach Abklingen der grössten Spitze besser abschneidet, wengleich auch diese Kurve den Abfluss unterschätzt.

Für die Definition der Trockenperioden ergibt sich erneut das Problem der grossen Höhe. Auch hier wurden die Perioden deshalb für Winter und Sommer separat berechnet.

Für die Winter-Trockenheiten gibt es ein paar Perioden, in denen die phänologische Kalibrierung am besten ist (Dezember 1991, Winter 2004/2005). Es gibt aber ebenso Perioden, während denen andere Kalibrierungen besser abschneiden (vgl. Abb. 49 und 50). Effektiv bleibt der Anteil der Tage mit der phänologischen Kalibrierung an erster Stelle praktisch gleich gegenüber der Gesamtperiode, während die normale Kalibrierung auf Kosten der hydrologischen häufiger am besten ist (vgl. Abb. 47).

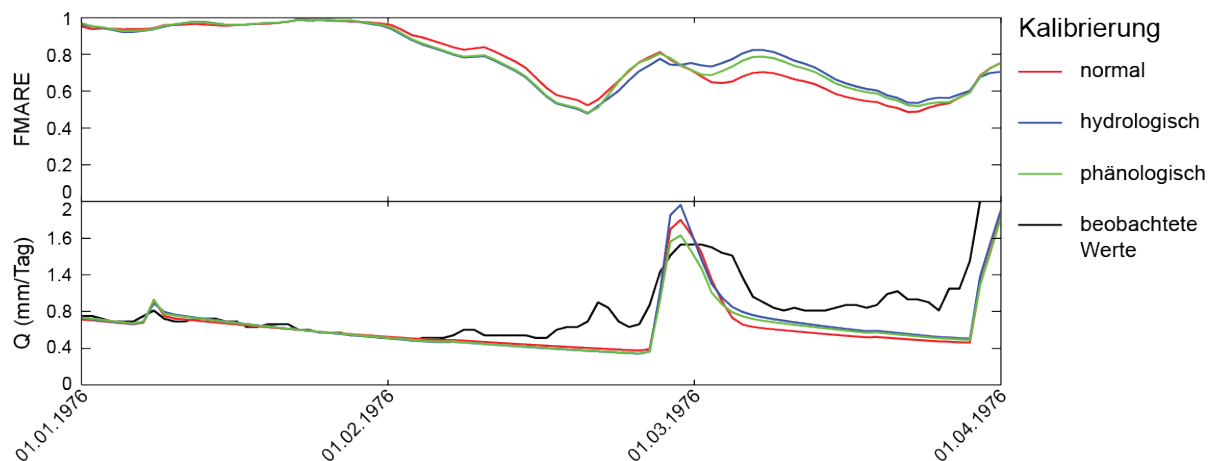


Abb. 49: FMARE und Abfluss im Allenbach im Winter 1976.

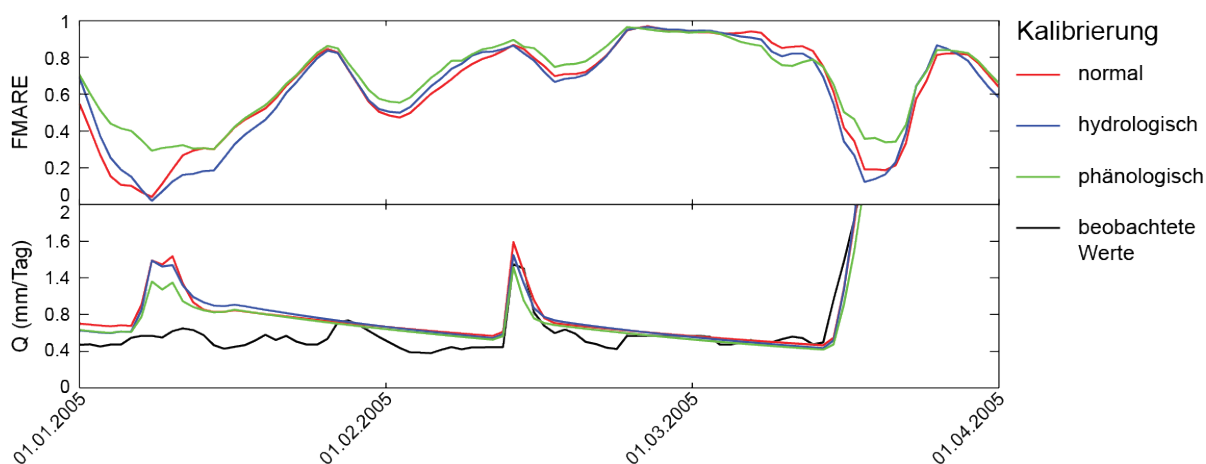


Abb. 50: FMARE und Abfluss im Allenbach im Frühling 2005.

Zu sehen ist, dass sich die drei simulierten Kurven bei beiden Perioden ähnlich verhalten und wie beim Rom etwas zu steil abfallen. Allerdings liegen alle Kurven sehr nahe beieinander und überschätzen den Abfluss in Abbildung 50 kollektiv.

Die Sommer-Trockenperioden liegen erneut ausschliesslich im Spätsommer und Herbst. Von Auge sind auch hier keine klaren Muster zu erkennen. So verschieben sich denn auch die Anteile der besten Kalibrierungen um maximal vier Prozentpunkte gegenüber der Gesamtperiode. Längere Trockenperioden, während denen die phänologische Kalibrierung am besten abschneidet, sind in diesem Einzugsgebiet nicht zu erkennen. So schneidet auch im Sommer 2003 die phänologische Kalibrierung nicht am besten ab, wie dies bei den anderen Einzugsgebieten der Fall ist (vgl. Abb. 51). Dennoch scheint die Dynamik durch die phänologische Kalibrierung am besten abgebildet zu werden.

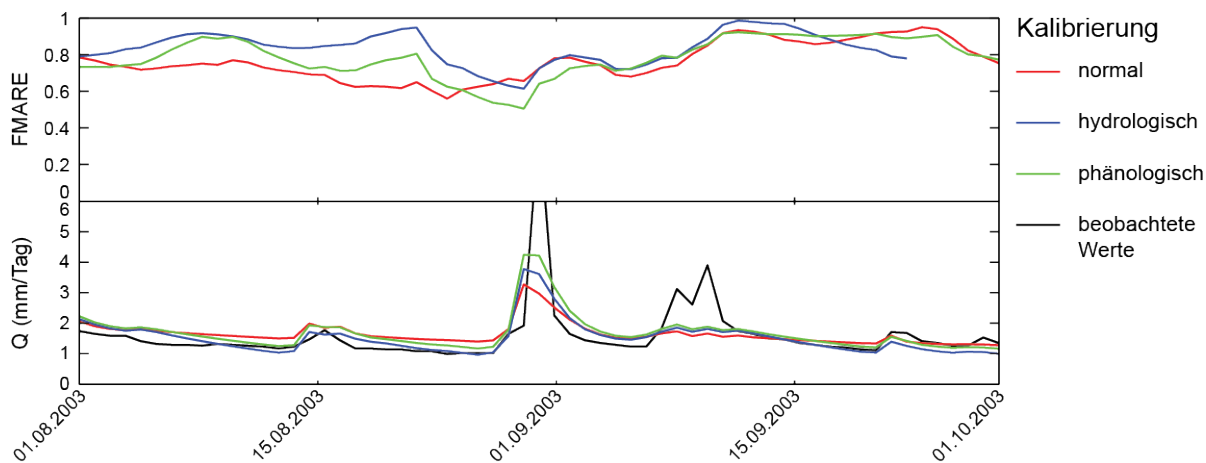


Abb. 51: FMARE und Abfluss im Allenbach im Sommer 2003.

Auch die prozentuale Häufigkeit in Zusammenhang mit der Abflussmenge zeigt keine klaren Verhältnisse. Die phänologische Kalibrierung schneidet in trockenen Winterphasen und Perioden mit mittleren Abflüssen im Sommer am häufigsten am besten ab (vgl. Abb. 47). Sowohl für die Winter- als auch für die Sommer-Trockenperioden verändert sich das durchschnittliche Ab-

schneiden nur unwesentlich im Vergleich mit der gesamten Zeitspanne (vgl. Tab. 11). Auffallend ist, dass die phänologische Kalibrierung, sofern sie bei sommerlichen Niedrigabflussperioden am besten abschneidet, sie dies überaus deutlich tut (vgl. Tab. 12).

Tab. 12: Differenzen der FMARE-Werte beim Allenbach, nur über die Perioden gerechnet, in denen die phänologische (Differenzen P-N und P-H), bzw. die hydrologische (Differenz H-N) Kalibrierung bessere Resultate liefert als die jeweils andere Kalibrierungsart.

Abflussmenge	Differenz	Durchschnitt	Minimum	Maximum	Standardabweichung
Gesamt	P – N	0.055	0.000	0.768	0.060
	P – H	0.041	0.000	0.483	0.054
	H – N	0.051	0.000	0.828	0.057
< Q5 (Winter)	P – N	0.077	0.000	0.464	0.079
	P – H	0.049	0.000	0.312	0.059
	H – N	0.061	0.000	0.292	0.052
Q5 – Q35 (Winter)	P – N	0.059	0.000	0.768	0.085
	P – H	0.040	0.000	0.471	0.055
	H – N	0.048	0.000	0.828	0.086
Q35 – Q65 (Winter)	P – N	0.055	0.000	0.561	0.060
	P – H	0.040	0.000	0.397	0.047
	H – N	0.050	0.000	0.485	0.049
Q65 – Q95 (Winter)	P – N	0.066	0.000	0.588	0.064
	P – H	0.041	0.000	0.372	0.043
	H – N	0.065	0.000	0.427	0.054
> Q95 (Winter)	P – N	0.041	0.000	0.430	0.056
	P – H	0.072	0.000	0.280	0.071
	H – N	0.042	0.002	0.187	0.044
< Q5 (Sommer)	P – N	0.116	0.001	0.324	0.083
	P – H	0.156	0.001	0.483	0.121
	H – N	0.138	0.000	0.483	0.109
Q5 – Q35 (Sommer)	P – N	0.050	0.000	0.275	0.049
	P – H	0.066	0.000	0.407	0.069
	H – N	0.060	0.000	0.428	0.059
Q35 – Q65 (Sommer)	P – N	0.042	0.000	0.300	0.039
	P – H	0.022	0.000	0.313	0.026
	H – N	0.039	0.000	0.237	0.034
Q65 – Q95 (Sommer)	P – N	0.042	0.000	0.283	0.038
	P – H	0.027	0.000	0.345	0.033
	H – N	0.034	0.000	0.222	0.031
> Q95 (Sommer)	P – N	0.039	0.000	0.149	0.033
	P – H	0.027	0.000	0.135	0.030
	H – N	0.037	0.000	0.105	0.025

4.6. Breggia

Wie erwähnt, hat sich gezeigt, dass die Modellierung des Abflusses der Breggia nur ungenügend funktioniert und nur sehr schlechte Modellgüten erreicht werden konnten. Auf diese Problematik soll an dieser Stelle noch kurz eingegangen werden.

Ein Blick auf die Ausprägung der Modellparameter nach der Kalibrierung hat gezeigt, dass teilweise massive Unterschiede zwischen den einzelnen Kalibrierungsarten vorkamen. Dies könnte auf den ersten Blick durch den grossen Waldanteil und den entsprechend grossen Einfluss der

Evapotranspiration erklärt werden. Auf einen zweiten Blick konnte aber festgestellt werden, dass viele Parameter Werte direkt an den festgelegten Grenzwerten annehmen. Dies deutet darauf hin, dass mit einer Ausweitung der Grenzen eventuell bessere Resultate erzielt werden könnten. Entsprechende Versuche wurden durchgeführt. Dabei hat sich aber gezeigt, dass die Parameter einerseits Werte annahmen, die auf die Realität bezogen als unplausibel eingestuft werden müssen. Dazu gehört beispielsweise eine Temperatur-Grenzwert T^* von über 5°C . Andererseits wurde auch mit diesen neuen Parameterwerten keine markante Erhöhung der Modellgüte erreicht.

In einem weiteren Schritt wurden noch alternative Modellstrukturen ausprobiert. Auch damit erreichte die Modellgüte aber nie einen höheren Wert als 0.35, was immer noch als ungenügend einzustufen ist. Ein Blick auf die Abflusskurven hat gezeigt, dass immer wieder extrem schlecht abgebildete Perioden vorkommen. Eine Regelmässigkeit war aber nicht zu erkennen. Somit musste, trotz ansatzweise vielversprechender Resultate was den Vergleich zwischen phänologischer und Standardkalibrierung angeht, auf eine weitere Behandlung dieses Einzugsgebietes verzichtet werden. Für das Scheitern einer ansprechenden Abbildung der Abflussverhältnisse dürfte aller Wahrscheinlichkeit nach der grosse Karstanteil, der die Abflussbildung stark beeinflusst, verantwortlich sein. Aufgrund der grossen Durchlässigkeit ist eine gute Modellierung mit den vorhandenen Mitteln nicht umsetzbar. Als weiterer möglicher Punkt kommt die mässige Beeinflussung des Gewässers durch künstliche Ableitungen in Frage (vgl. auch Tab. 2).

5. Diskussion

5.1. Unterschiede Modellausprägung

Ein Blick auf die Ausprägung der Modellparameter nach dem Kalibrierungsprozess hat gezeigt, dass bei einer Unterscheidung zwischen Winter- und Sommerhalbjahr wie erwartet gewisse Unterschiede entstehen. Die durchschnittlichen Werte, welche die Parameter annahmen, unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Kalibrierungsarten grösstenteils signifikant. Allgemein gilt, dass viele Parameter grossen Schwankungen unterworfen sind, was das Problem der „Equifinality“ nochmals verdeutlicht. Nichtsdestotrotz treten die Unterschiede oft da, wo sie erwartet wurden, am klarsten zum Vorschein. Bei der Schnee-Routine, die allerdings für die tiefergelegenen Einzugsgebiete wenig relevant ist, sind die grössten Unterschiede beim Parameter SFCF zu erkennen, der die Evaporation von der Schneedecke beschreibt. Besonders deutlich sind die Unterschiede auch beim Parameter C_{et} zu erkennen, der in die Berechnung der potenziellen Evapotranspiration miteinfliesst. Am deutlichsten ist diese Differenz bei der phänologischen Kalibrierung zu erkennen, was den Schluss zulässt, dass effektiv die Vegetation einen direkten Einfluss auf den Parameter C_{et} und damit die potenzielle Evapotranspiration ausübt. Auch bei anderen Parametern der Boden-Routine, die auch gewisse Zusammenhänge mit der Evapotranspiration aufweisen, sind Unterschiede erkennbar. In der Grundwasser-Routine war in erster Linie ein Effekt beim Parameter K_2 zu erwarten. Dieser beschreibt das Rezessionsverhalten bei niedrigen Abflüssen, wenn also der Abfluss nicht durch Niederschlagsereignisse, sondern zu einem wesentlichen Teil durch die Evapotranspiration beeinflusst wird. Auch diese Erwartung konnte bestätigt werden. Im Gegensatz zu den anderen Rezessionsparametern treten hier die deutlichsten Differenzen zwischen Sommer- und Winterkalibrierung auf. Auch beim Parameter PERC, der die Perkolation in die untere Grundwasser-Box beschreibt sind klare Unterschiede zu erkennen. Unterschiede zwischen den verschiedenen Einzugsgebieten gibt es, allerdings treten die nun erwähnten Differenzen bei allen Gebieten in mehr oder weniger klarer Deutlichkeit auf. Dies bestätigt die Annahme, dass eine saisonale Modellkalibrierung gerechtfertigt ist.

Nicht klar bestätigt hat sich die Vermutung, dass sich eine saisonale Kalibrierung auch in der Ausprägung der aktuellen Evapotranspiration niederschlägt. Zwar sind gewisse Unterschiede zwischen der Standard- und den saisonalen Kalibrierungen auszumachen, allerdings sind diese sehr gering. Hingegen kann erahnt werden, dass die Evapotranspiration durch die Standardkalibrierung bei der Mentue im Sommer eher unterschätzt wird, während sie beim Rom und dem Allenbach eher überschätzt wird. Dies würde dazu passen, dass die aktuelle Evapotranspiration beim Rom und Allenbach aufgrund der fehlenden Laubvegetation effektiv geringer ausfällt, als dies bei der Mentue der Fall ist.

5.2. Modellgüte gesamt

Im Hinblick auf die Modellgüte über die gesamten behandelten Zeitspannen gesehen, muss zwischen den drei Einzugsgebietstypen (Mentue/Ergolz, Rom, Allenbach) unterschieden werden. Für die Mentue und die Ergolz kann vorerst festgehalten werden, dass der Einbezug der phänologischen Daten in den Kalibrierungsprozess übers Ganze gesehen keine oder nur eine sehr geringe Verschlechterung der Modellgüte zur Folge hat, was schon mal als positiv zu werten ist. Beim Rom wiesen die Winterkalibrierungen etwas schlechtere Resultate auf und waren auch grösseren Schwankungen unterworfen. Beim Allenbach wiederum gab es etwas grössere Unterschiede zwischen Sommer- und Winterkalibrierungen, wobei für den Winter eine schlechtere, für den Sommer eine bessere Modellgüte als mit der Standardkalibrierung erzielt werden konnte.

Für die täglichen Berechnungen der Modellgüte (jeweils über eine Woche gerechnet) wurden die Sommer- und Winterkalibrierungen kombiniert. Übers ganze Jahr gesehen bestätigte sich das Bild mehr oder weniger. Bei der Mentue und der Ergolz schneidet die phänologische Kalibrierung im Durchschnitt besser ab als die Standardmethode. Auf den ersten Blick dürften die Verbesserungen um 0.020 bzw. 0.012 gegenüber der Standardkalibrierung zwar bescheiden anmuten. Auf einen zweiten Blick und im Wissen darum, dass es sich um Mittelwerte einer stark schwankenden Datenreihe handelt, sind sie dennoch erwähnenswert.

Beim Allenbach, der aufgrund seiner Vegetation kaum einen Einfluss der phänologischen Daten erwarten liess, ist die durchschnittliche Differenz mit 0.002 doch deutlich geringer, was auf keine klare Unterscheidung zwischen den drei Kalibrierungsarten hindeutet. Beim Rom schliesslich verschlechtert sich diese Differenz um durchschnittlich -0.015 gegenüber der Standardmethode. Allgemein sind die FMARE-Werte beim Rom aber sehr hoch, so dass man aus diesem Umstand schliessen kann, dass bereits die Standardmethode das Abflussverhalten recht gut abbildet. Eine saisonale Kalibrierung scheint dabei keine weiteren grösseren Vorteile zu bringen.

Diese Muster sind auch zu erkennen, wenn man betrachtet, wie oft eine Kalibrierungsmethode am besten abschneidet. Auch hier gibt es bei Mentue und Ergolz deutliche Verbesserungen durch Einbezug der Saisonalität, während beim Rom die normale Kalibrierung häufiger am besten abschneidet und beim Allenbach kaum Unterschiede zu erkennen sind.

Vorerst bestätigen sich meine Annahmen also grösstenteils: bei Mentue und Ergolz ist im Gegensatz zum Allenbach eine Verbesserung der Modellgüte möglich, wenn phänologische Daten miteinbezogen werden. Nicht der Fall ist dies beim Rom, dessen Vegetation komplett laublos ist, aber zu einem beträchtlichen Teil aus nadelwerfender Lärche besteht.

5.3. Saisonale Muster

Interessant ist jetzt die Betrachtung allfälliger saisonaler Muster. Mentue und Ergolz, deren Einzugsgebiete sehr ähnliche Charakteristika aufweisen, zeigen auch ein sehr ähnliches Verhalten. Es hat sich gezeigt, dass während dem Sommerhalbjahr die auf normaler Kalibrierung basierende Abflusskurve oft deutlich flacher simuliert wird als die beiden anderen Kurven. Bei diesen werden vor allem kleinere und mittlere Abflussspitzen höher geschätzt, Abflussminima nach solchen Spitzen aber meistens tiefer. Dies hat zur Folge, dass während längeren Perioden ohne nennenswerte Abflussspitzen die normale Kalibrierung den Abfluss oft überschätzt und somit die phänologische Kalibrierung die Kurve wesentlich besser trifft. Im Gegenzug gibt es aber auch zahlreiche Beispiele, wo die normale Kurve besser passt, während die phänologische Kalibrierung die Abflussminima zum Teil deutlich unterschätzt. Dies hat zur Folge, dass während des Sommers keine klaren regelmässigen Muster bezüglich Häufigkeit des besten Abschneidens erkennbar sind, da beide beschriebenen Situationen immer wieder auftreten. Tendenziell tritt die erste dieser beiden Situationen eher in der zweiten Sommerhälfte auf, während letztere regelmässig im Frühling erkennbar ist, was das oft gute Abschneiden der normalen Kalibrierung in dieser Zeit erklärt. Ein Blick auf die Parameterwerte zeigt, dass zwischen der normalen Kalibrierung und der phänologischen Sommerkalibrierung kaum grössere Unterschiede auftreten. Manipulationen dieser Parameterwerte im HBV-Modell haben aber gezeigt, dass insbesondere durch eine Veränderung der Parameter der Grundwasser-Routine (insbesondere PERC und K1) ein ähnliches Verhalten wie bei der normalen Kalibrierung erreicht werden kann. Die nun gemachten Feststellungen können unter einem generellen Aspekt zusammengefasst werden: Die Rezessionskurven der Sommerkalibrierungen verlaufen steiler als diejenigen der normalen Kalibrierung. Interessant ist hierbei der Umstand, dass frühere Forschungen gezeigt haben, dass die sommerlichen Rezessionskurven effektiv steiler verlaufen als diejenigen im Winter (Tallaksen, 1995: 365). Es ergibt sich also der Schluss, dass eine saisonale Kalibrierung diese steilere Rezessionskurve abbildet, was vor allem in der zweiten Sommerhälfte zu besseren Modellgüten führt. Zu Beginn des phänologischen Sommerhalbjahres wird die Kurve aber oft zu steil abgebildet. Dies wiederum könnte damit zu tun haben, dass ja mit Einsetzen der Blattvegetation nicht sofort ein komplettes Blätterdach vorliegt. Dieses entwickelt sich über mehrere Wochen oder sogar Monate. Damit ergibt sich die Situation, dass die Abflüsse im Frühling vermutlich noch ein eher winterliches Rezessionsverhalten aufweisen, das durch die bereits sommerliche Kalibrierung noch ungenügend abgebildet wird.

Während des Winterhalbjahres, das meist durch eher geringe Abflüsse geprägt ist, zeigt sich ein etwas anderes Bild. Hier erreicht die phänologische Kalibrierung überdurchschnittlich oft das beste Resultat. Der Blick auf die Abflusskurven hat gezeigt, dass hier die normale Kurve die Abflüsse häufig unterschätzt. Dies gilt sowohl für Abflussmaxima als auch -minima. Bezogen auf die

Parameter scheint hier erneut die Grundwasser-Routine die Hauptrolle zu spielen. Der Parameter K2, der bei der phänologischen Winterkalibrierung deutlich höher als bei der Standardmethode kalibriert wurde, hat hier einen wesentlichen Einfluss auf das Kurvenverhalten. Erneut bestätigt sich der Umstand mit dem Rezessionsverhalten. Während des Winters verlaufen die Rezessionskurven flacher als im Sommer (Tallaksen, 1995: 365). Die normal kalibrierte Kurve verläuft aber tendenziell zu steil und unterschätzt deshalb häufig die Abflüsse.

Beim stark nival geprägten Einzugsgebiet des Rom treten saisonale Regelmässigkeiten nur während des Winters auf. Hier liegen alle Kurven meist recht nahe beieinander, wobei alle Kurven den Abfluss meist überschätzen. Die phänologische Kalibrierung kommt aber oft am nächsten an die beobachteten Werte heran. Gegen Ende des Winters sinken die Kurven oft zu steil, so dass dann der Abfluss eher unterschätzt wird und die normale Kalibrierung besser abschneidet. Dies deutet oft gewisse Probleme mit der Schnee-Routine hin. So wird Mitte Winter möglicherweise etwas mehr Niederschlag in der ausgeprägten Schneedecke gespeichert, als das Modell annimmt. Gegen Ende Winter schmilzt vielleicht schon mehr, als das HBV-Modell vermutet.

Generell fällt beim Rom auf, dass die Abflüsse ab Ende der Schneeschmelze kaum Schwankungen unterworfen sind und oft fast kontinuierlich abfallen. Dabei zeigt sich erneut, dass die Kurven der saisonalen Kalibrierungen steiler abfallen als die Standardkalibrierung. Allerdings entspricht hier das Abflussverhalten im Gegensatz zur Mentue und Ergolz eher der flacheren Rezession, die über weite Strecken durch die Standardkalibrierung am besten erfasst wird.

Beim Allenbach schliesslich sind praktisch keine Zusammenhänge zwischen bester Kalibrierung und Zeitpunkt im Jahr zu erkennen. Die Abflusskurven werden hier etwa auch im Sommer 2003 von allen drei Kalibrierungsarten ähnlich gut erfasst. Die Tendenz mit den zu steilen Rezessionskurven der saisonalen Kalibrierung ist im Frühling dennoch auch leicht zu erkennen.

In Bezug auf die Grösse der Differenzen zwischen den verschiedenen Kalibrierungen kann noch eine für alle Einzugsgebiete gültige Aussage gemacht werden. Häufig unterscheiden sich die drei Kurven nicht extrem stark. Die grössten Unterschiede zwischen den drei Kalibrierungen treten praktisch durchs Band rund um die Jahreszeitenwechsel auf. Dabei gibt es keine Unterschiede zwischen Frühling und Herbst. Die phänologische und hydrologische Kalibrierung zeigen dabei oft grössere Sprünge an diesen Stellen. Besonders ausgeprägt ist dies beim Rom zu erkennen. Die Kurven unterscheiden sich hier im Extremfall um Werte bis 0.5. Bei all diesen Phasen sind aber kaum klare „Gewinner“ auszumachen. Manchmal ist die phänologische Kalibrierung massiv besser als die anderen, dann ist es wieder die hydrologische. Dies deutet darauf hin, dass die beiden saisonalen Kalibrierungen grundsätzlich Mühe haben, die Abflussprozesse rund um den Jahreszeitenwechsel adäquat darzustellen. Erneut könnte dies mit der schleichenden Entwicklung des

Blätterdachs zu tun haben. Während den Übergangsphasen im Frühling und Herbst scheint weder die Winter-, noch die Sommerkalibrierung richtig gut zu passen. Eine Mischform der beiden, die dann bezüglich Parameterausprägung vielleicht etwa der Standardkalibrierung entsprechen dürfte, könnte hier allenfalls bessere Resultate liefern.

5.4. Unterschiede in Zusammenhang mit der Abflussmenge

Die Hauptfragestellung dieser Arbeit ist, ob sich die Modellierung von Trockenperioden durch den Einbezug der saisonalen Kalibrierung verbessern lässt. Auch hier muss wieder zwischen den pluvial geprägten Einzugsgebieten von Mentue und Egolz einerseits und dem nival geprägten Einzugsgebiet des Rom unterschieden werden. Schaut man bei ersteren, bei welchen Abflussmengen die phänologische Kalibrierung am häufigsten an erster Stelle liegt, zeigt sich auf den ersten Blick Überraschendes. Nicht wie angenommen während den Trockenperioden, sondern während den Phasen mit dem höchsten Abfluss scheint die phänologische Kalibrierung am besten abzuschneiden. Allerdings muss jetzt der typische Abflussgang über ein Jahr bei solch pluvialen Regimetypen betrachtet werden. Dabei zeigt sich, dass die grössten Abflussspitzen in diesen Gebieten im Winterhalbjahr auftreten. Wie im vorherigen Kapitel erläutert ist ja aber die Modellgüte während des Winters generell besser bei der phänologischen Kalibrierung. Dabei spielt es keine Rolle, ob grosse oder kleine Abflüsse auftreten. Betrachtet man nur die Sommer zeigt sich auffallend, dass praktisch alle längeren Trockenperioden durch die phänologische Kalibrierung am besten erfasst werden. Bei der Ergolz äussert sich dies auch darin, dass die phänologische Kalibrierung auch während diesen Phasen am häufigsten an erster Stelle liegt. Bei der Mentue scheint die hydrologische Kalibrierung in diesen Perioden besser abzuschneiden. Ein genauerer Blick zeigt aber, dass dies hauptsächlich durch die drei Trockenperioden in den Jahren 2009 bis 2011 bedingt ist. Diese zeigten eine etwas andere und unruhigere Dynamik als die restlichen Niedrigabflussperioden und wurden durch alle Kalibrierungsarten nur sehr schlecht erfasst. Bei den restlichen Trockenperioden schwingt erneut die phänologische Kalibrierung oben aus. Zusammengefasst kann hier gesagt werden, dass die Grafiken, die teilweise genau das Gegenteil meiner Hypothesen nahelegen, nicht darüber hinwegtäuschen können, dass hauptsächlich die allgemein gute Winterkalibrierung und nicht effektiv die Abflussmenge zu diesem Ergebnis führt. Im Sommerhalbjahr decken sich lange Trockenperioden und Abschnitte mit phänologischer Kalibrierung hingegen sehr häufig. Hinzu kommt, dass die Kalibrierungen spezifisch auf Niedrigwasserperioden ausgerichtet waren. Eine Interpretation der Modellgüte bei grösseren Abflussmengen ist deshalb mit Vorsicht durchzuführen. So ist es zu erwarten, dass mit einer Kalibrierung auf das Gütemass Reff hin Abflussspitzen deutlich besser erfasst werden. Dabei kann sich dann auch bezüglich der verschiedenen Kalibrierungsarten wieder ein ganz anderes Bild zeigen.

Beim nival geprägten Rom liegt ein komplett anderer Regimetyp vor. Während hier der Winter von deutlichen Niedrigabflussperioden geprägt ist, treten die absolut höchsten Abflussspitzen im Frühling und Frühsommer im Rahmen der Schneeschmelze auf. Während des Winters werden die Abflussspitzen erneut gut durch die phänologische Kalibrierung erfasst. Dies ist wiederum der stärker ausgeprägten Dynamik der phänologischen Abflusskurve geschuldet. Im Gegenzug werden Niedrigabflussperioden während des Winters oft unterschätzt und durch die normale Kalibrierung besser erfasst. Während des Sommerhalbjahres zeigt sich wieder ein ähnliches Bild wie bei den anderen Einzugsgebieten, wenn auch etwas weniger klar ausgeprägt. Während den höchsten Abflüssen schneiden alle Kalibrierungen etwa gleich regelmässig am besten ab. Herrscht Niedrigabfluss, schneidet zwar entgegen meiner Annahme die normale Kalibrierung am besten ab, just in der längsten Trockenperiode im Jahr 2003 liegt aber wieder die phänologische Kalibrierung an erster Stelle.

Beim Allenbach schliesslich bestätigen sich meine Annahmen ebenfalls. Alle drei Abflusskurven liegen über weite Strecken sehr nahe beieinander. Es sind keine klaren Regelmässigkeiten und Zusammenhänge zu erkennen. Auch während den sommerlichen Trockenperioden gibt es keinen klaren Favoriten. Aufgrund der fehlenden laubwerfenden Vegetation in diesem Gebiet sind grosse Unterschiede bezüglich Evapotranspiration und deshalb auch eine klare Verbesserung der phänologischen Kalibrierung aber auch nicht zu erwarten. Was sich hingegen erneut bestätigt, ist das vergleichsweise schlechte Abschneiden der Standardkalibrierung während des Winters, wenngleich hier im Gegensatz zu den vorherigen Einzugsgebieten eher die hydrologische, denn die phänologische Kalibrierung am besten abschneidet.

Obwohl während den sommerlichen Trockenperioden die phänologische Kalibrierung grösstenteils am besten abschneidet, muss dazu noch angefügt werden, dass die FMARE-Werte genau während diesen Phasen meist am schlechtesten sind. Oft werden nur durchschnittliche Werte erreicht, jedoch sind diese nur vereinzelt so tief, dass sie eigentlich nicht für eine Akzeptanz des verwendeten Modells sprechen würden. Dies ist etwa bei den Sommertrockenphasen in den Jahren 2009 bis 2011 bei der Mentue der Fall, die von allen Kalibrierungsarten sehr schlecht erfasst werden. Betrachtet man die Abflusskurven während Trockenperioden, zeigt sich regelmässig das gleiche Bild. Die beobachteten Werte werden von allen Kalibrierungen unterschätzt. Kleinere Abflussspitzen während diesen Phasen werden nicht oder kaum erfasst. Die phänologische Kalibrierung kommt oft am nächsten an die beobachteten Werte heran und zeigt teilweise leichte Anzeichen für eine Abbildung der Dynamik, aber wäre dennoch noch stark verbesserbar. Nicht der Fall ist dies bei der Sommertrockenheit 2003 beim Rom, die durch die phänologische Kalibrierung effektiv deutlich besser erfasst wird als mit den anderen Kalibrierungen.

Interessant ist noch der Blick auf den Vorsprung der phänologischen Kalibrierung gegenüber den anderen. Schneidet die phänologische Kalibrierung am besten ab, tut sie dies bezogen auf die Modellgüte überall am deutlichsten während Niedrigabflussperioden.

5.5. Unterschiede phänologische/ hydrologische Kalibrierung

Im Allgemeinen unterscheiden sich die phänologische und hydrologische Kalibrierung nur wenig. Dies erstaunt kaum, handelt es sich doch bei beiden Typen um saisonale Kalibrierungen. Hinzu kommt, dass der hydrologische und phänologische Sommerbeginn oft sehr nahe beieinander liegen. Etwas grösser sind die Differenzen im Herbst. Dennoch zeigt ein Blick auf die Häufigkeitsgrafiken, dass die phänologische Kalibrierung weitaus häufiger am besten abschneidet, als die hydrologische. Diese liegt anteilmässig oft auch hinter der normalen Kalibrierung zurück. Einzig bei den Niedrigabflussperioden bei der Mentue hat sie die Nase vorn, was aber durch die erwähnten drei Trockenperioden in den Jahren 2009 bis 2011 bedingt ist. Vergleicht man die Abflusskurven liegen die beiden meist relativ nahe beisammen. Auch zeigen sie eine ähnliche Dynamik. Auffallend ist aber, dass diese bei der phänologischen Kalibrierung oft etwas extremer ausgeprägt ist. So werden beispielsweise winterliche Abflussspitzen durch die hydrologische Kalibrierung immer noch etwas deutlicher unterschätzt. Diese Kalibrierungsart nimmt somit oft eine Zwischenposition zwischen Standard- und phänologischer Kalibrierung ein. Es lässt sich also der Schluss ziehen, dass die Richtung der Kalibrierung über das hydrologische Jahr zwar stimmt, mit der Verwendung der flexiblen phänologischen Daten aber dennoch bessere Resultate erzielt werden können.

5.6. Regionale Unterschiede

Im Hinblick auf die Teilfragestellung, wie sich das Verhalten zwischen unterschiedlichen Regionen und mit unterschiedlichem Waldanteil und Artenzusammensetzung verändert, sind nur beschränkt Aussagen möglich. Es war kaum möglich, Gebiete mit stark unterschiedlichen Charakteristika auszuwählen, es mussten mehr oder weniger diejenigen ausgewählt werden, die alle Kriterien in halbwegs akzeptabler Weise erfüllen. Die beiden Einzugsgebiete der Mentue und Ergolz weisen relativ ähnliche Eigenschaften auf. Gleichzeitig zeigen auch die Modellierungen ein ähnliches Verhalten. Betrachtet man die Häufigkeiten der besten Kalibrierungsart, zeigt sich aber, dass bei der Ergolz die phänologische Kalibrierung deutlicher vorne liegt. Gleichzeitig weist das Einzugsgebiet der Ergolz auch einen höheren Wald- und Laubholzanteil auf als dasjenige der Mentue. Somit würde sich meine diesbezügliche Hypothese bestätigen.

Im Hinblick auf den Waldanteil wäre die Behandlung der Breggia von grossem Interesse gewesen, da deren Einzugsgebiet sehr grossflächig bewaldet ist und zudem ausschliesslich aus Laub-

vegetation besteht. Beide Punkte treffen auf die Mentue und Ergolz nur beschränkt zu. Im Hinblick auf die Hypothese, dass ein grösserer Wald- und Laubanteil auch zu einem grösseren Effekt der phänologischen Kalibrierung führt, zeigten die Resultate der Breggia ansatzweise gute Resultate, so dass man hätte annehmen können, dass die Vermutungen bestätigt werden könnten. Aus bekannten Gründen war aber die gesamte Modellgüte derart schlecht, dass auf eine weitere Analyse der Breggia verzichtet werden musste.

Bezüglich Rom war anzunehmen, dass der Einfluss der phänologischen Kalibrierung hier bedeutend geringer als bei der Mentue und Ergolz ausfallen würde, aber dennoch erkennbar sein müsste. Grund dafür ist die Bewachung mit Lärchen, die als Nadelbäume zwar einen wesentlich geringeren Einfluss auf Evapotranspiration und Interzeption aufweisen, aber dank dem Nadelfall im Herbst dennoch auf einen Effekt hoffen liessen. Diese Annahme kann durch die Ergebnisse teilweise bestätigt werden. So zeigte sich einerseits auch hier der beobachtete Effekt, dass die phänologische Kalibrierung einerseits während den Wintermonaten, andererseits auch während der einzigen längeren Sommer-Trockenperiode im Jahr 2003, das beste Resultat aufweisen konnte. Allerdings hat sich auch gezeigt, dass die phänologische Kalibrierung durchschnittlich über alle Trockenperioden und auch die gesamte Zeitspanne gerechnet, der Standardkalibrierung unterlegen ist. Die FMARE-Werte zeigen, dass das Abflussverhalten des Roms im Allgemeinen auch durch die Standardkalibrierung bereits recht gut erfasst wird.

Der Allenbach wurde als Vergleichsstandort gewählt, der weder nennenswerten Waldanteil, noch Laubvegetation aufweist. Für dieses Einzugsgebiet können die Erwartungen dank „schlechter“ Resultate ebenfalls bestätigt werden. Es hat sich gezeigt, dass die drei simulierten Kurven über weite Strecken praktisch identisch verlaufen. Auch sind weder klar regelmässige Phasen mit besser phänologischer Kalibrierung zu erkennen. Die drei Kalibrierungsarten unterscheiden sich durchschnittlich kaum und auch bezüglich prozentuaalem Anteil an bestem Abschneiden gibt es keinen klaren Sieger auszumachen. Dies deutet darauf hin, dass die drei Methoden keine grossen Unterschiede aufweisen und die Verteilung des ersten Ranges relativ zufällig erfolgt, wie dies aufgrund der Eigenschaften des Einzugsgebietes erwartet werden konnte.

5.7. Unsicherheiten

Eine der wesentlichen Unsicherheiten in Bezug auf die Aussagekraft meiner Untersuchungen ist sicher die geringe Anzahl behandelter Einzugsgebiete. Grundsätzlich dürften vier Einzugsgebiete, von denen eines nur als Kontrollgebiet diente, eigentlich zu wenig sein, um verlässliche Aussagen zu machen. Hinzu kommt, dass alle Einzugsgebiete die im Optimalfall zu erfüllenden Kriterien nicht erreichen. Bei allen Gebieten mussten gewisse Abstriche in Bezug auf den Waldanteil, die Baumartenzusammensetzung oder den Untergrund gemacht werden. Eine Behandlung der Breg-

gia wäre ein sehr guter Gradmesser für meine Analysen gewesen, hätte nicht der Karst zu den schlechten Werten geführt. Für eine Bestätigung meiner gemachten Aussagen wäre es deshalb wertvoll, wenn zusätzliche Versuche an Einzugsgebieten mit ähnlichen Eigenschaften wie die Breggia gemacht werden könnten. Im Hinblick auf die Praxis muss dennoch festgestellt werden, dass vermutlich ein Grossteil der Einzugsgebiete, insbesondere in der Schweiz, näher bei den Charakteristika von Mentue und Ergolz als denjenigen der Breggia liegen. Zahlreiche weitere Unsicherheiten sind während der Datenaufbereitung entstanden. Niederschlags- und Temperaturdaten wurden aus einem eher grob aufgelösten Datensatz extrahiert und anschliessend aufgrund berechneter Höhenstufen gewichtet und gemittelt. Die Evapotranspirationswerte wurden gemäss einer verhältnismässig einfachen Formel berechnet, was zwar dem gängigen Umgang mit dieser Problematik entspricht, aber dennoch eine mögliche Fehlerquelle darstellt. Im Hinblick auf die Erfassung der phänologischen Daten ist zu erwähnen, dass diese von Menschen persönlich an einem bestimmten Punkt erhoben werden. Die grossen regionalen Unterschiede zeigen, dass eine grosse Variabilität mit der Lokalität und vielen beeinflussenden Faktoren auftritt. Dennoch konnte dies in meinen Modellierungen nicht berücksichtigt werden, ebenso der Umstand, dass sich das Blätterdach eines Waldes nicht von einem Tag auf den anderen ausbildet, sondern sich über Tage und Wochen langsam entwickelt. Weitere Unsicherheiten kommen beim Kalibrierungsprozess hinzu, insbesondere bei der doch teilweise subjektiven Wahl der Parametergrenzen. Speziell zu erwähnen gilt es hier die Fixierung und Berechnung der Parameter Pelev und Telev, die erneut auf verhältnismässig einfache Art und Weise durchgeführt wurde. Fehler bei dieser Berechnung können aber einen wesentlichen Einfluss auf die Modellergebnisse haben, da die Wahl der Höhe wie gesehen die Kalibrierungsergebnisse massgeblich beeinflusst. Das Problem der „Equifinality“ dürfte mit dem gewählten 100-fachen Kalibrierungsverfahren und dem anschliessend verwendeten Mittelwert dieser Ergebnisse für die weiteren Berechnungen grösstenteils eliminiert worden sein. Eine wesentliche Unsicherheit entsteht zudem noch daraus, dass aus Kapazitätsgründen keine weitreichende Modellevaluation vorgenommen werden konnte. Der Miteinbezug von weiteren Messdaten, wie zum Beispiel Schneemengen oder Grundwasserdaten, könnte dazu verwendet werden, zu überprüfen, ob das Modell gewisse Prozesse effektiv richtig erfasst und modelliert. Somit würde sich eine weitere Bestätigung ergeben, dass das Modell effektiv wie gewünscht kalibriert wurde und die Realität angemessen abbildet. Dies würde die Aussagekraft meiner Analysen noch erhöhen.

6. Fazit und Ausblick

Die für diese Arbeit gestellten Hypothesen konnten weitestgehend bestätigt werden. Durch den Einbezug von phänologischen Daten in den Kalibrierungsprozess hat sich gezeigt, dass verschiedene Modellparameter saisonal unterschiedliche Werte annehmen. Dabei handelt es sich in erster Linie um Parameter, die in Zusammenhang mit der Evapotranspiration oder dem Rezessionsverhalten stehen. Hier, aber nicht nur hier, traten die klarsten Unterschiede auf, was bestätigt, dass eine Berücksichtigung der Saisonalität im Modellierungsprozess gerechtfertigt ist.

Gesamthaft gesehen konnte so bei den Einzugsgebieten mit laubwerfender Vegetation eine leichte Verbesserung der Modellgüte übers ganze Jahr erreicht werden. Bei den Gebieten ohne solche Vegetation war dies nicht der Fall.

Bei der genaueren Analyse der Modellierungsergebnisse von Mentue und Ergolz zeigten sich gewisse saisonale Regelmässigkeiten. Während des Winterhalbjahres schneidet die phänologische Kalibrierung häufig besser ab als die Standardmethode. Aufgrund eines zu steilen Rezessionsverhaltens unterschätzt diese den Abfluss oft. Da im Winter aber die grössten Abflüsse auftreten, wären weitere Modellierungsversuche mit Fokus auf die Abflussspitzen interessant. An den Übergängen zwischen Winter- und Sommerhalbjahr bilden die saisonalen Kalibrierungen das Rezessionsverhalten nur ungenügend ab, was mit dem Gegensatz zwischen abrupter Änderung der Parameterwerte und kontinuierlicher, langsamer Ausbildung des Blätterdachs in Verbindung gebracht werden kann. Aus dem selben Grund erreichen die beiden saisonalen Kalibrierungen bessere Werte, je länger der Sommer dauert. Auffallend oft zeigen sie während sommerlicher Trockenperioden das beste Ergebnis, indem sie die Abflussdynamik am besten erfassen. Dennoch darf nicht darüber hinweggesehen werden, dass die Modellgüte während diesen Phasen allgemein nach wie vor eher bescheiden ist. Weitergehende Forschungen im Hinblick auf Verbesserungen in diesen Phasen wären deshalb wünschenswert.

Zu bestätigen scheint sich auch, dass die gemachten Feststellungen effektiv in Zusammenhang mit der Vegetation stehen. So zeigen die Modellierungen am lärchenbewachsenen Einzugsgebiet des Rom zwar ein ähnliches Verhalten, indem auch hier etwa die Trockenheit 2003 durch die phänologische Kalibrierung am besten erfasst wird. Allerdings sind hier übers Ganze gesehen keine grossen Verbesserungen gegenüber der Standardkalibrierung möglich. Beim Allenbach schliesslich, wo kaum ein Einfluss durch saisonale Vegetationsänderungen besteht, sind effektiv auch keine klaren Verbesserungen erkennbar. Die verschiedenen Kalibrierungsarten verhalten sich sehr ähnlich und unterscheiden sich nur geringfügig.

Zusammengefasst kann die Hauptfragestellung bejaht werden. Der Einbezug phänologischer Daten kann hydrologische Modellierungen während Trockenphasen verbessern. Dabei bestehen die beiden Einschränkungen, dass effektiv grossflächige saisonabhängige Vegetation vorhanden

sein muss und dass die Verbesserungen zu einem immer noch nicht völlig befriedigenden Ergebnis führen.

In einem nächsten Schritt wäre es vorerst relevant zusätzliche Daten miteinzubeziehen, um eine genaue Modellevaluation und -validierung durchführen zu können. Dies würde aufzuzeigen, wie gut das Modell fähig ist, die gesamten Prozesse, und nicht nur den Abfluss an sich, zu modellieren. Anschliessend wären zusätzliche Untersuchungen an weiteren Einzugsgebieten interessant. Eine Bestätigung meiner Resultate durch weitere Beispiele würde die Aussagekraft erhöhen. Insbesondere wäre es von grossem Interesse zu sehen, wie sich ein stark bewaldetes und ansonsten kaum beeinflusstes Einzugsgebiet verhalten würde. Ein weiterer interessanter Aspekt wären Untersuchungen an verschiedenen Gebieten mit stark unterschiedlicher Vegetation, was aber kaum innerhalb der Schweiz möglich ist. Grundsätzlich gilt: je mehr behandelte Einzugsgebiete und je grösser die charakteristischen Unterschiede zwischen diesen Gebieten, desto grösser ist die Aussagekraft der erzielten Resultate.

Wie gesehen, scheint das saisonale Rezessionsverhalten in Zusammenhang mit der Thematik eine beträchtliche Rolle zu spielen. Deshalb wären auch in diesem Bereich weitere Untersuchungen, insbesondere in den Phasen der Vegetationsentwicklung, interessant.

Sind die Modellevaluation und die Ausdehnung der Anzahl und Variabilität untersuchter Gebiete abgeschlossen, wäre dann in einem nächsten Schritt die zeitliche Ausdehnung von Interesse.

Damit ist gemeint, dass Projektionen in die Zukunft (oder wenigstens in eine simulierte Zukunft), also die eigentlichen Vorhersagen, gemacht werden. Dieser Punkt ist relevant in Bezug auf einen späteren Miteinbezug in die Praxis. Konkret geht es darum die Modelle so zu verbessern, dass zukünftig zuverlässige und natürlich möglichst frühzeitige Vorhersagen von voraussichtlich immer öfter auftretenden Trockenperioden gemacht werden können.

Literatur

- Aschwanden, H. & Kan, C. (1999). Niedrigwasser – Grundlagen zur Bestimmung der Abflussmenge Q_{347} . In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Geographisches Institut, Universität Bern. URL: http://www.hades.unibe.ch/de/products/druckausgabe/gewaesser/tafel5_08 (Zugriff: 29.12.2014).
- BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) (2010). Die Niedrigwasser-Datenbank NQStat. Bedienungsanleitung.
- BAFU (Bundesamt für Umwelt) (Hrsg.) (2012). Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro). *Umwelt-Wissen*, Nr. 1217.
- BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2014a). Basismessnetz: Wasserstand und Abfluss an Oberflächengewässern. URL: <http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01831/01839/index.html?lang=de> (Zugriff: 14.12.2014).
- BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2014b). Aktuelle Situation Gewässer. URL: <http://www.hydrodaten.admin.ch/de/> (Zugriff: 12.10.2014).
- Beven, K. (2005). A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320(2006), 18-36.
- Beven, K. (2012). Rainfall-Runoff Modelling. The Primer. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Beven, K. & Young, P. (2013). A guide to good practice in modeling semantics for authors and referees. *Water Resources Research*, 49, 1-7.
- CH2011 (2011). Swiss Climate Change Scenarios CH2011. Zürich: C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate & OcCC.
- Czikowsky, M. J. & Fitzjarrald, D. R. (2004). Evidence of Seasonal Changes in Evapotranspiration in Eastern U.S. Hydrological Records. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 974-988.
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *WIREs Climate Change*, 2011(2), 45-65.
- Davie, T. (2008). Fundamentals of Hydrology. *Routledge Fundamentals of Physical Geography*. Abingdon: Routledge.
- Hisdal, H. & Tallaksen, L. M. (Hrsg.) (2000). Drought Event Definition. Technical Report No. 6, Assessment of the Regional Impact of Droughts in Europe.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (2007). Freshwater resources and their management. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jukic, D. & Denic-Jukic, D. (2009). Groundwater balance estimation in karst by using a conceptual rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 373(2009), 302-315.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. & Berström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, 201 (1997), 272-288.
- Menzel, A. (2007). Phänologische Modelle. In: Deutscher Wetterdienst (Hrsg.). Phänologie. *Pro-met – Meteorologische Fortbildung*, 33(1/2), 20-27.

- MeteoSchweiz (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie) (2014). Phänologisches Beobachtungsnetz. URL: <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/mess-und-prognosesysteme/bodenstationen/phaenologisches-beobachtungsnetz.html> (Zugriff: 30.10.2014).
- MeteoSchweiz (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie) (2015). Daily precipitation (final analysis): RhiresD. Documentation of MeteoSwiss Grid-Data Products. URL: <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/service-und-publikationen/produkte.subpage.html/de/data/products/2014/raeumliche-daten-niederschlag.html> (Zugriff: 03.01.2015).
- Menzel, A., Estrella, N. & Fabian, P. (2001). Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology*, 2001(7), 657-666.
- Mishra, A. K. & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(2010), 202-216.
- Mishra, A. K. & Singh, V. P. (2011). Drought modeling – A review. *Journal of Hydrology*, 403(2011), 157-175.
- OcCC (Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung) (Hrsg.) (2000). Trockenheit in der Schweiz. Workshopbericht.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 – Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(2005), 290-306.
- Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N. & Andréassian, V. (2012). A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. *Journal of Hydrology*, 420-421(2012), 171-182.
- Seibert, J. (2000). Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(2), 215-224.
- Seibert, J. (2005). User's Manual. HBV-light, version 2.
- Seibert, J. & McDonnell, J. (2001). Towards a better process representation of catchment hydrology in conceptual runoff modelling. In: Leibundgut, C., Uhlenbrook, S. & McDonnell, J. Runoff Generation and Implications for River Basin Modelling. *Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 13*.
- Seibert, J. & Vis, M. J. P. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3315-3325.
- Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240(2001), 147-186.
- Stahel, W. A. (2009). Statistische Datenanalyse. Eine Einführung für Naturwissenschaftler. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Staudinger, M., Stahl, K., Seibert, J., Clark, M. P. & Tallaksen, L. M. (2011). Comparison of hydrological model structures based on recession and low flow simulations.
- Tallaksen, L. M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 165(1995), 349-370.
- Tallaksen, L. M. & Van Lanen, H. A. J. (2004). Hydrological Drought. Processes and estimation

methods for streamflow and groundwater. *Developments in Water Science*, 48. Amsterdam: Elsevier.

Tritz, S., Guinot, V. & Jourde, H. (2011). Modelling the behaviour of a karst system catchment using non-linear hysteretic conceptual model. *Journal of Hydrology*, 397(2011), 250-262.

Wagner, T., McIntyre, N., Lees, M. J., Wheater, H. S. & Gupta, H. V. (2003). Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: Dynamic identifiability analysis. *Hydrological Processes*, 17, 455-476.

Weingartner, R. & Aschwanden, H. (1992). Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Geographisches Institut, Universität Bern. URL: http://www.hades.unibe.ch/de/products/druckausgabe/gewaesser/tafel5_02 (Zugriff: 29.12.2014).

WSL (Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft) (2014). Die häufigsten Waldbäume der Schweiz. URL: <https://www.lfi.ch/resultate/baumarten.php> (Zugriff: 15.12.2014).

Persönliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die den verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Schaffhausen, 25.01.2015

Fabian Ringli