

Bewässerungsbedarf | Juni 2012



Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot unter heutigen und künftigen Klimabedingungen

Autor

Jürg Fuhrer, Lufthygiene/Klima, ART



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches
Volkswirtschaftsdepartement EVD
Forschungsanstalt
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

Impressum

Herausgeberin Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART
Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich
Telefon +41 44 377 71 11, info@agroscope.ch,
www.agroscope.ch

Titelbild: Bewässerungsanlage, Jürg Fuhrer, ART

Redaktion: Etel Keller, ART

Copyright: 2012 ART

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	5
1.1.	Ausgangslage.....	5
1.2.	Aufgabenstellung.....	5
2.	Methodische Grundlagen.....	7
2.1.	Berechnung des Bewässerungsbedarfs mit Hilfe des hydrologischen Modells.....	7
2.2.	Erweiterte Modellrechnungen für die Testgebiete.....	8
2.3.	Aufskalierung der Modellergebnisse.....	12
2.4.	Statistische Auswertungen für Regionen.....	12
2.5.	Definition und Ableitung der Bewässerungsregionen.....	12
2.6.	Aufbereitung der Abflussdaten (Dargebot).....	13
3.	Bewässerungsbedarf für Regionen.....	15
3.1.	Regionaler Vergleich von Bedarf und Dargebot.....	15
3.2.	Regionaler Vergleich von Bedarf/Dargebot.....	19
4.	Definition und Kalibrierung der Hotspot-Gebiete.....	23
4.1.	Definition.....	23
4.2.	Modellaufbau und -kalibrierung für die Hotspot-Gebiete.....	24
5.	Klimaszenarien.....	26
5.1.	Ausgangspunkt und Herleitung.....	26
5.2.	Klimaszenarien für die ausgewählten Regionen.....	27
6.	Ergebnisse für Wasserbedarf und -dargebot in Hotspot-Regionen.....	33
6.1.	Wasserbedarf für die Bewässerung.....	33
7.	Zusammenfassung und Bewertung.....	37
8.	Literatur.....	39
9.	Anhang.....	40
9.1.	A1 Tabellenverzeichnis.....	40
9.2.	A2 Abbildungsverzeichnis.....	40
9.3.	B1 – Regionaler Vergleich zwischen Bewässerungsbedarf und Dargebot.....	42
9.4.	B2 – Regionaler Vergleich zwischen Bewässerungsbedarf und Dargebot.....	43
9.5.	B3 – Regionaler Vergleich zwischen Bewässerungsbedarf und Dargebot.....	44
9.6.	B4 – Regionaler Vergleich zwischen Bewässerungsbedarf und Dargebot.....	45
9.7.	B5 – Regionaler Vergleich zwischen Bewässerungsbedarf und Dargebot.....	46

Zusammenfassung

Mit Hilfe des hydrologischen Modells WaSiM-ETH wurde die potentiell benötigte Bewässerungsmenge für die landwirtschaftliche Flächen in mittelgrossen Einzugsgebieten für die Monate Juni, Juli, August der Jahre 1981 bis 2010 berechnet und den Abflussmengen gegenübergestellt. Für Gebiete mit einem kritischen Verhältnis von Bedarf und Dargebot wurden zusätzlich Berechnungen für den Zeithorizont 2050 durchgeführt. Unter Verwendung von zwei regionalen Klimaszenarien ergaben diese Berechnungen, dass mit dem Klimawandel die Wasserknappheit besonders in den Gebieten Broye-Mentue und Birs deutlich zunehmen könnte, was ohne Anpassung der Bewässerungspraxis vermehrt zu Nutzungskonflikten führen könnte.

Ziel dieser Studie war es, Gebiete auszuscheiden, in denen potentiell Konflikte zwischen verfügbarem Wasser (Oberflächenabfluss) und potenziellem Wasserbedarf für die Bewässerung auftreten können, und zwar unter heutigen (1981–2010) und künftigen (2036–2065) Klimabedingungen. Dazu wurde mit Hilfe eines hydrologischen Modells (WaSiM-ETH) der Bewässerungsbedarf aufgrund der jüngsten Arealstatistik für Ackerland, Grünland und Obstanlagen im 500x500-Meter-Raster berechnet, regional aggregiert und mit dem beobachteten Abfluss in diesen Regionen in Beziehung gesetzt. Aufgrund der Ergebnisse wurden fünf Schwerpunktregionen (Thur, Emme, Glatt-Töss, Birs, Broye-Mentue) ausgewählt und die Berechnungen für das heutige Klima und für künftige Klimabedingungen durchgeführt. Hierfür wurden zwei Klimaszenarien für den Zeithorizont 2036 bis 2065 berücksichtigt.

Die Berechnungen ergaben, dass in der Periode 1981 bis 2010 in zwei Regionen (Birs, Broye-Mentue) in Jahren mit hohen Temperaturen, geringen Niederschlägen und reduziertem Abfluss (2003) der Bedarf das Angebot (ohne Grundwasser) übersteigen kann. Mit dem ‚milden‘ Klimaszenario (SMHIRCA-BCM) steigt das Risiko in diesen Gebieten unwesentlich, jedoch mit dem ‚extremen‘ Klimaszenario (ETHZ-CLM) deutlich an, und in einzelnen Jahren übertrifft der Bedarf das Angebot auch in den Regionen Thur und Emme.

Als Ergebnis zeichnet sich ab, dass das Risiko von Wasserknappheit in den Sommermonaten auf Einzugsgebietsebene mit dem Klimawandel deutlich zunimmt. Dies legt nahe, dass eine Anpassung der Bedarfssituation durch Massnahmen in der Bewirtschaftung oder durch Infrastrukturmassnahmen wie Zuleitungen aus grösseren Speichern zur Verbesserung des Dargebots in den kritischen Sommermonaten notwendig wird.

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Es wird geschätzt, dass in der Schweiz heute rund 38'000 ha der landwirtschaftlichen Nutzfläche regelmässig und zusätzliche 12'000 bis 17'000 ha gelegentlich bewässert werden (BLW 2007). Die bewässerungsbedürftige Fläche liegt sogar wesentlich höher; Modellrechnungen ergaben für 41 % der potentiellen Ackerfläche und 26 % der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche einen Bewässerungsbedarf (Fuhrer & Jasper 2009), das heisst ohne zusätzliche Bewässerung wird das Ertragspotenzial nicht ausgeschöpft. In den nächsten Jahrzehnten könnte sich die Situation ändern; im Zuge des projizierten Klimawandels dürften viele Landwirtinnen und Landwirte zur Sicherung des Ernteertrags mit einem zunehmenden Bewässerungsbedarf konfrontiert sein. Zur Vermeidung von Konflikten bei Wasserknappheit bedarf es deshalb neuer Lösungsansätze und Strategien der Wassernutzung.

In diesem Zusammenhang fordert das Postulat Walter 10.3533 «Wasser und Landwirtschaft – Zukünftige Herausforderungen» einen Bericht zu einer nachhaltigen Wasserstrategie aus Sicht der verschiedenen Nutzergruppen. Die Strategie soll sowohl Handlungs- und Lösungsansätze für kurzfristige Ereignisse als auch langfristige Perspektiven beinhalten. Sie soll Richtlinien, Handlungsansätze und Spielregeln zur Wasserverteilung an die verschiedenen Nutzenden ebenso definieren wie die Interessenabwägung zwischen Schutz- und Nutzinteressen und Angaben zur entsprechenden Rechtsbasis enthalten.

Basis für die Suche nach strategischen Lösungsansätzen für die Nutzung von Wasser in Zeiten der Knappheit ist die Auslegeordnung zur heutigen Situation und den Herausforderungen der verschiedenen Wassernutzenden sowie der Schutzinteressen. Ein wichtiges Element ist dabei die räumlich differenzierte Schätzung des Bedarfs und des Angebots von Wasser in durchschnittlichen Jahren und in ‚Trockenjahren‘. Die vorliegende Studie soll als Grundlage für den Bewässerungsbedarf der Landwirtschaft und die Gegenüberstellung zum Angebot von Wasser im Bericht zum Postulat Walter dienen, und insbesondere auch die Situation unter einer künftigen Klimaänderung berücksichtigen.

1.2. Aufgabenstellung

Gemäss Auftrag sollten aufbauend auf den Studien von Fuhrer und Jasper (2009) sowie Fuhrer (2010) mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH (Schulla & Jasper 2007) zeitlich und regional differenzierte Bilanzierungen zum landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarf (ohne Tierhaltung) unter Berücksichtigung des dafür oberflächlich vorhandenen Wasserangebots (Abfluss) erfolgen. Die Modellrechnungen waren zunächst für die in den genannten Studien ausgewiesenen Testgebiete durchzuführen und auszuwerten. Als Simulationszeitraum war die in aktuelleren Studien zu Klimaänderungen benutzte Referenzperiode 1981 bis 2010 auszuwählen (z. B. SGHL & CHy 2011, CH2011 2011). Der Bewässerungsbedarf war für jedes Testgebiet auf monatlicher Basis auszuweisen. Die gebietsspezifischen Modellergebnisse des monatlichen und jährlichen Bewässerungsbedarfes (Mittel über 1981–2010 und Einzeljahr 2003) sollten sodann auf die gesamte Landwirtschaftsfläche zu extrapoliert werden. Die Ergebnisse des Upscalings sollten anschliessend für vordefinierte Bewässerungsregionen (mittlere Grösse zirka 1000 km²) unter Berücksichtigung des verfügbaren Wasserdargebots (Abfluss) statistisch und graphisch ausgewertet werden. Durch den Vergleich von Bedarf und Dargebot sollten mögliche Problemregionen („Hotspots“) identifiziert werden.

In einem zweiten Arbeitsschritt waren allfällige Problemregionen nach Absprache mit dem Auftraggeber einer detaillierteren Analyse zu unterziehen. Insbesondere sollten für diese Regionen zusätzlich Bedarfsrechnungen für zukünftige Klimabedingungen durchgeführt und mit Abschätzungen zum Dargebot für die Monate Juni, Juli und August verglichen werden. Die Modellrechnungen hatten sich auf die aktuell verfügbaren Daten zur Klimaänderung der Schweiz zu stützen und den Zeithorizont 2050 abzudecken (OcCC 2007, CH2011 2011).

2. Methodische Grundlagen

2.1. Berechnung des Bewässerungsbedarfs mit Hilfe des hydrologischen Modells

Die Berechnungsgrundlagen für den Bewässerungsbedarf wurden in Fuhrer (2010) beschrieben und mit Hilfe des hydrologischen Abfluss und Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH (Schulla 1997, Schulla & Jasper 2007, siehe auch www.wasim.ch) durchgeführt. Dieses flexibel verwendbare Modellsystem spiegelt den aktuellen Stand des Wissens in der hydrologischen, prozessorientierten Einzugsgebietsmodellierung wider. Mit Hilfe seines physikalisch basierten Methodenwerks erlaubt das Modell eine zeit- und flächendetaillierte Simulation aller hydrologisch relevanten Wasserflüsse. Das Modell legt ein besonderes Augenmerk auf die realitätsnahe Simulation der Bodenwasserdynamik und des Bodenwasserhaushalts. Diese Tatsache, zusammen mit den vergleichsweise geringen Datenanforderungen, prädestinierte den Einsatz von WaSiM-ETH im aktuellen Projekt.

Die Berechnung des Bewässerungsbedarfs entspricht einer bedarfsgesteuerten Bewässerungssimulation, bei welcher der Wasserbedarf anhand der modellierten Verdunstungsreduktion bestimmt wird. Dazu werden flächendetailliert die mittlere Bodenfeuchte im durchwurzelteten Bodenprofil sowie das Verhältnis von aktueller zu potentieller Evapotranspiration (ET/ETP) berechnet. Diese Werte werden in jedem Berechnungsschritt an das Bewässerungsmodul von WaSiM-ETH übergeben und dort ausgewertet. Wird in einem Zeitschritt ein vordefinierter ET/ETP-Schwellwert unterschritten, so wird die Bewässerung ausgelöst. Die Bewässerungsmenge ermittelt sich aus der Differenz zwischen dem Zielwert und dem aktuellen Wert der über die Wurzeltiefe gemittelten Bodenfeuchte.

Wie bereits in früheren Studien (Fuhrer und Jasper 2009, Fuhrer 2010) wurde eine Bodenfeuchte abhängige Reduktion der Transpiration um 20 % als Auslöser für die Bewässerung festgelegt ($ET/ETP = 0,80$). Als Zielgrösse der Bewässerung diente der Bodenfeuchtezustand, ab dem eine Reduktion der aktuellen Transpiration gegenüber der potenziellen eingeleitet wird. Die Vorgehensweise zur Bewässerungssteuerung ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Darin bezeichnet $\Delta\theta$ den Wasseranteil, der bei Unterschreiten des ET/ETP-Schwellwertes jeweils durch Bewässerung aufzufüllen ist. Dabei ist zu beachten, dass der so berechnete Bewässerungsbedarf eine potenzielle Menge bei idealer Bewässerungstechnik darstellt. Bewässerungsverluste wie sie in der Praxis üblich sind (d.h. Bewässerungseffizienz <100 %) wurden nicht berücksichtigt. Das heisst, die Berechnungsergebnisse geben eher die Untergrenze der Wassermenge an, die zur Bewässerung entnommen werden muss.

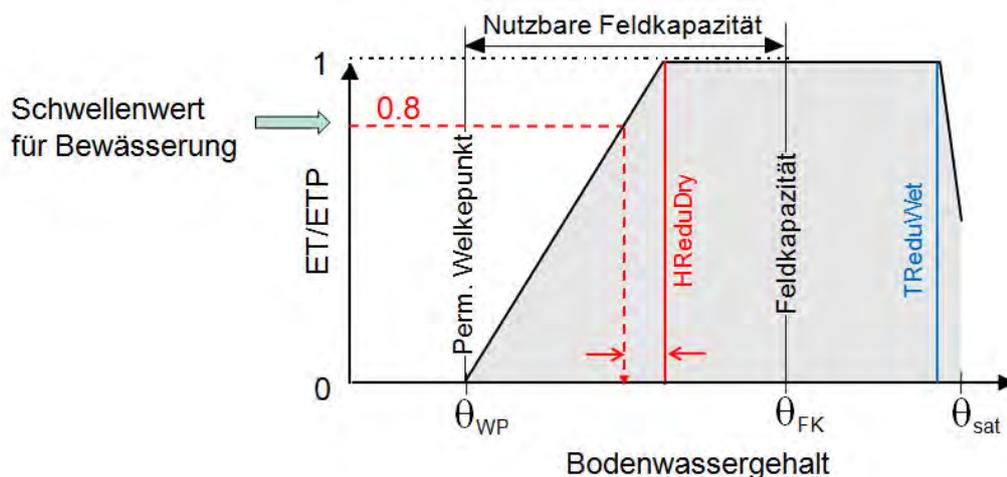


Abbildung 1: Definition der Bewässerungsmenge in Abhängigkeit von Transpiration und Bodenwassergehalt. nFK = nutzbare Feldkapazität; DW = Drän- oder Gravitationswasser, θ_{WP} = Wassergehalt beim Welkepunkt, θ_{FK} = Wassergehalt bei Feldkapazität, θ_{sat} = Wassergehalt bei Sättigung, $\Delta\theta$ = Bewässerungsbedarf, $HReduDry$ = Grenzwert für den Beginn von Trockenstress, $TReduWet$ = Grenzwert für den Beginn von Nässestress (infolge von Sauerstoffmangel).

Entsprechend den obigen Ausführungen wird der Beginn von Trockenstress über einen vegetations-spezifischen Grenzwert der Bodenwasserspannung gesteuert ($HReduDry$). Dieser Grenzwert wurde in der aktuellen Studie für alle betrachteten Landnutzungsarten einheitlich auf 350 hPa (oder cm Wassersäule) festgelegt (= pF 2,54). Er entspricht damit dem gewählten Parameterwert in den Modellanwendungen von Fuhrer und Jasper (2009). Wie in Abbildung 1 skizziert, liegen die mit $HReduDry$ korrespondierenden bodenartabhängigen Bodenwassergehalte jeweils unterhalb jener bei Feldkapazität (FK). Als FK wird in der Literatur vielfach der Bodenwassergehalt bezeichnet, der bei einer Bodenwasserspannung von 60 hPa (= pF 1,8) gebunden ist (z. B. Schlichting & Blume 1966, Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005). Diese vereinfachende Definition wird allerdings der Komplexität dieses Parameters nicht gänzlich gerecht. Daher wird FK in der bodenkundlichen Praxis zunehmend durch das von der Bodenart abhängige Feuchtigkeitsäquivalent (FÄ) ersetzt (z. B. Renger et al. (2008), das einen Wasserspannungsbereich von 60 hPa (sandige Böden) bis 320 hPa (tonige Böden) vorsieht (= pF 1,8–2,5).

2.2. Erweiterte Modellrechnungen für die Testgebiete

Wie in den Vorgängerstudien (Fuhrer & Jasper 2009, Fuhrer 2010) wurden auch in dieser Arbeit flächendeckende hydrologische Modellrechnungen für die Flussgebiete von Thur, Emme, Broye, Rhone, Ticino und Dischma-Bach als Grundlage für die Ermittlung eines schweizweiten landwirtschaftlichen Bewässerungspotentials verwendet. Die Lage und Ausdehnung der genannten Flussgebiete (Testgebiete) verdeutlicht Abbildung 2. Die Gebietsgrößen liegen zwischen 43 km² (Dischmabach) und 1700 km² (Thur), wobei der Anteil der landwirtschaftlichen Nutzflächen an der jeweiligen Gesamtgebietsfläche zwischen 13 und 65 % schwankt (siehe Tab. 1). Insgesamt werden von den Testgebieten etwa 16 % (oder zirka 2200 km²) der gesamtschweizerischen Landwirtschaftsfläche erfasst. Die spezielle Lage und Charakteristik der Testgebiete ermöglicht eine breite Abbildung der unterschiedlichen Nutzungsbedingungen (Klima, Relief, Boden, etc.) in der Schweizer Landwirtschaft.

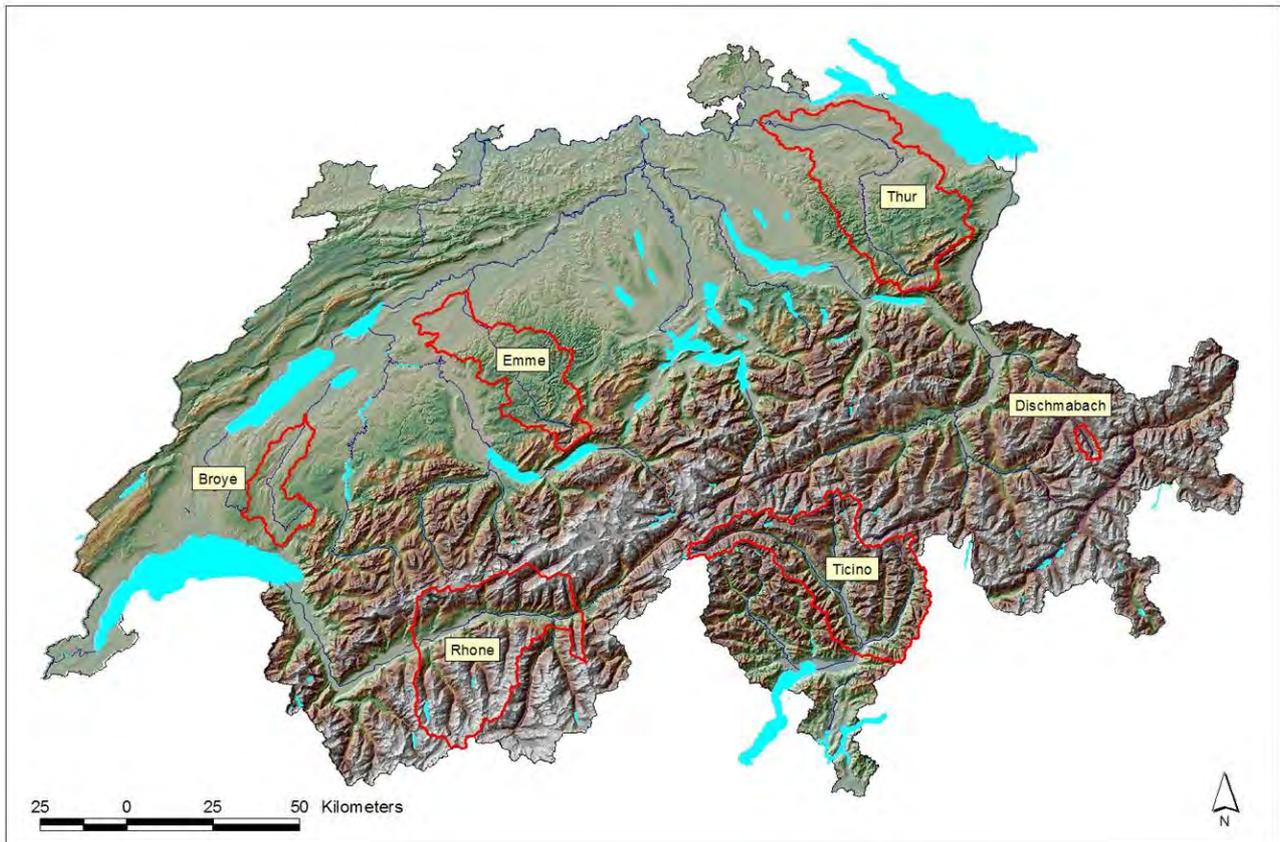


Abbildung 2: Lage der Untersuchungsgebiete in der Schweiz (aus Fuhrer & Jasper 2009).

Im Gegensatz zu Fuhrer und Jasper (2009) und Fuhrer (2010) wurden in dieser Studie die Daten der Arealstatistik 2004/09 (Stand: August 2011; siehe Abb. 3) zur Identifizierung der Landwirtschaftsflächen (Acker, Grasland, Obstanbau) berücksichtigt. Für die aktuell noch nicht erfassten Gebietsanteile der Schweiz wurde weiterhin der ältere Datensatz der Arealstatistik 1992/97 (BFS 2004) genutzt. In diesem Datensatz werden Ackerflächen allerdings nicht separat ausgegrenzt, sondern müssen mittels spezieller Ableitungsverfahren bestimmt werden (siehe Fuhrer & Jasper 2009). Man spricht daher auch von der Kategorie <potenziell nutzbares Ackerland>, das in seiner Lage und Ausdehnung durchaus stärker von den tatsächlich ackerbaulich genutzten Flächen abweichen kann. Insgesamt müssen noch etwa 25 % der landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz auf Basis der älteren Arealstatistik 1992/97 identifiziert werden.

Tabelle 1: Landwirtschaftlich genutzte Flächenanteile (LW) in den Testgebieten

Gebiet		Thur	Emme	Broye	Rhone ^a	Ticino	Dischma
Gesamtfläche	[km ²]	1696	939	392	1574	1515	43
Anteil LW (rel.)	[%]	58	52	65	18	13	28
Anteil LW (abs.)	[ha]	97 800	49 100	25 400	28 300	19 700	1200
Ackerland	[ha]	33 800	17 800	14 500	600	800	0
Grasland	[ha]	59 900	30 500	10 500	24 500	18 600	1200
Obstanbau	[ha]	4100	800	400	3'200	300	0

^a Abschnitt zwischen Brig und Sion (ohne die seitlichen Zuflussgebiete Vispa-Visp und Lonza-Blatten)

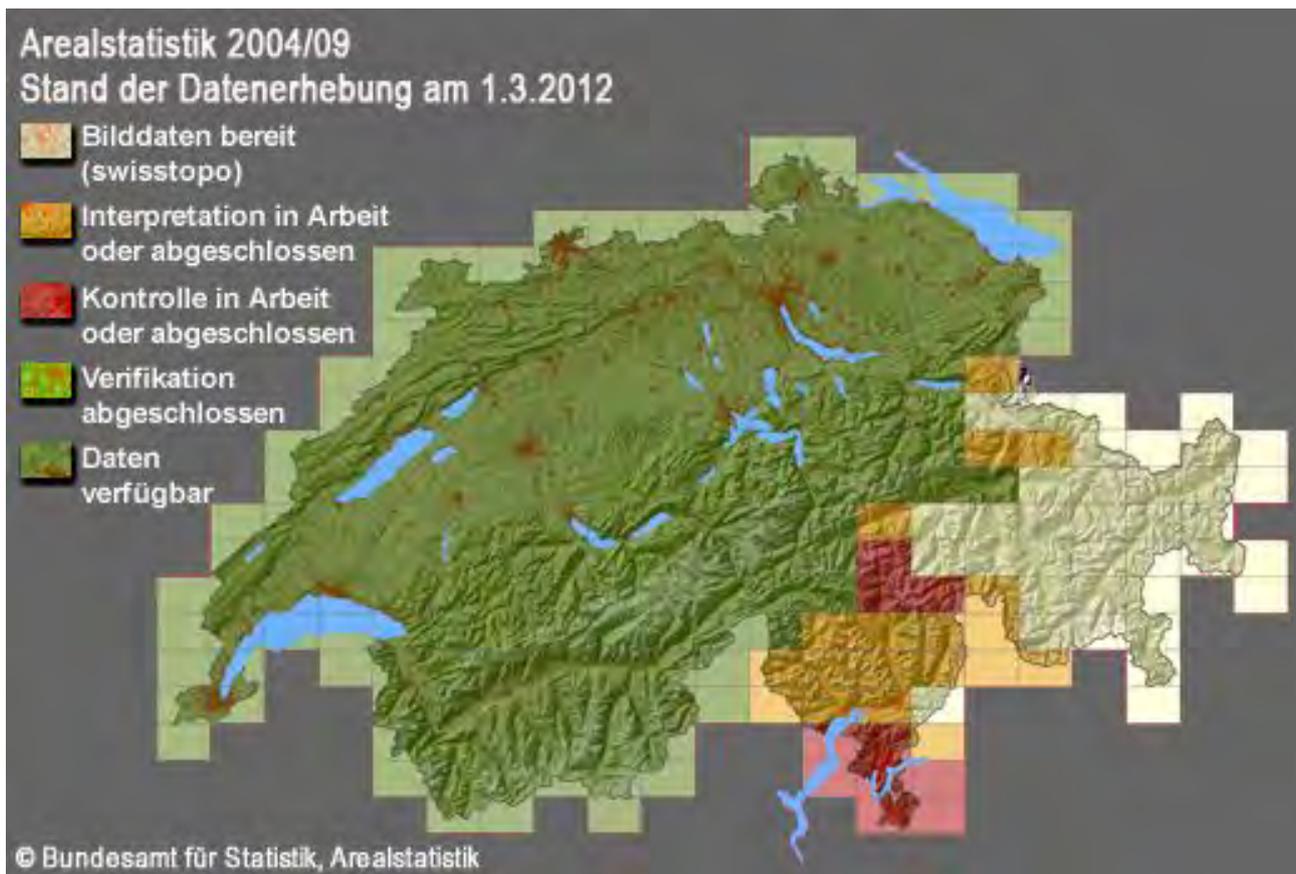


Abbildung 3: Aktueller Stand der Datenerhebung für Arealstatistik 2004/09 (Quelle: Bundesamt für Statistik BFS, www.bfs.admin.ch)

Für die hochauflösenden Simulationen zum Wasserhaushalt und Bewässerungsbedarf wurde das in Fuhrer und Jasper (2009) sowie Fuhrer (2010) vorgestellte Modell-Setup verwendet. Entsprechend erfolgten die Modellrechnungen als kontinuierliche Tageswertsimulationen in einer räumlichen Auflösung von 500x500 Meter.

Des Weiteren ist das gewählte Modell-Setup zur Bewässerungssteuerung durch folgende Annahmen gekennzeichnet:

- keine Limitierung des Wasserangebots für die Bewässerung
- keine kulturartenspezifischen Parameterwerte für die Berechnung von Bodenwasserdynamik und Bewässerungssteuerung, das heisst mittlere Werte zur phänologischen Beschreibung des Bewuchses von Acker- und Grasland sowie von Obstanbauflächen
- Simulation der Bodenwasserdynamik nach dem Ansatz von van Genuchten (1980) mit Parametrisierung nach Carsel und Parrish (1988)

Im Unterschied zu den beiden Vorgängerstudien (Fuhrer & Jasper 2009, Fuhrer 2010) wurden in den aktuellen Simulationen die phänologischen Zyklen der Graslandentwicklung durch Mähtermine unterbrochen. Dazu werden jeweils drei Grasschnitte pro Vegetationsperiode vordefiniert, wobei diese Termine nicht statisch sind, sondern je nach Höhenlage des jeweiligen Standortes variieren.

Die Einführung der Grasschnitte und die Verlängerung des Simulationszeitraumes war mit folgenden Zusatzarbeiten verbunden:

- Bereitstellung und modellgerechten Aufbereitung der benötigten meteorologischen und hydrologischen Beobachtungsreihen (stationsgebundene Daten jeweils für die Verlängerungsperiode 2007–2010)
- Überprüfung und gegebenenfalls Rekalibrierung der Modell-Setups
- Durchführung der langjährigen Modellrechnungen (1981–2010) für alle Testgebiete
- Auswertung der gebietsspezifischen Ergebnisse zum Bewässerungsbedarf

Neu war auch die Ausrichtung der Simulationsperiode auf das Zeitfenster 1981 bis 2010 (vorher 1980–2006). Dieses Zeitfenster stellt die aktuelle Referenzperiode in der Klimamodellierung dar (z. B. CH2011 2011) und wird aus Gründen der Vergleichbarkeit daher auch in dieser Arbeit benutzt.

Die Ergebnisse der statistischen Auswertungen zum Bewässerungsbedarf sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Monatlicher Bewässerungsbedarf für die landwirtschaftlichen Nutzflächen (ohne Teilkomponenten) in den Testgebieten; Mittelwerte für den Zeitraum 1981 bis 2010 und für das Trockenjahr 2003 (alle Angaben in Mio. m³)

Gebiet	Thur	Emme	Broye	Rhone ^a	Ticino	Dischma
Mittelwerte für 1981–2010						
Januar	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Februar	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
März	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
April	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0
Mai	0,2	0,1	0,1	0,4	0,1	0,0
Juni	0,5	0,4	0,5	0,7	0,2	0,0
Juli	2,1	1,3	2,0	1,1	0,3	0,0
August	0,9	0,9	1,1	0,8	0,1	0,0
September	0,3	0,1	0,1	0,4	0,1	0,0
Oktober	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0
November	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Dezember	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Jahr	4,5	3,1	4,1	3,9	1,0	0,0
Trockenjahr 2003						
Januar	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Februar	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
März	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,0
April	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0
Mai	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0
Juni	7,7	4,5	4,6	1,2	1,1	0,0
Juli	11,8	5,8	8,1	2,9	0,9	0,0
August	9,9	7,9	9,0	2,1	1,0	0,0
September	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0
Oktober	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
November	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Dezember	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Jahr	29,5	18,3	21,7	8,1	3,2	0,0

^a Abschnitt zwischen Brig und Sion (ohne die seitlichen Zuflussgebiete Vispa-Visp und Lonza-Blatten)

2.3. Aufskalierung der Modellergebnisse

Für das Upscaling der gebietspezifisch ermittelten Bewässerungsmengen auf die gesamte Landwirtschaftsfläche der Schweiz wurde die in Fuhrer (2010) beschriebene Methodik der Mehrfachregression verwendet. Diese berücksichtigt die Abhängigkeit des Wasserbedarfs von klimatologischen, topographischen und pedologischen Bedingungen.

Die Ergebnisse des Upscalings sind in Tabelle 3 zusammengefasst, jeweils als Monats- und Jahreswerte. Danach wird für die Schweizer Landwirtschaft ein mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf von 130 Mio. Kubikmeter angezeigt. Dieser Bedarf erhöht sich im Trockenjahr 2003 um mehr als das Vierfache. Bei den Einzelmonaten ragen erwartungsgemäss die Sommermonate als Perioden mit den höchsten Bewässerungsmengen heraus. In August 2003 wird beispielsweise ein Bedarfswert ermittelt, der sieben Mal höher liegt als im langjährigen Mittel.

Tabelle 3: Extrapolation der gebietsbezogenen Bewässerungsmengen auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz (alle Angaben in Mio. m³)

Periode	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1981–2010	0	0	1	7	9	19	52	30	8	5	0	0	130
2003	0	0	5	8	6	136	201	211	5	1	0	0	572

Es sei hier angemerkt, dass die extrapolierten Bedarfsschätzungen insgesamt etwas zu gering ausfallen dürften, insbesondere in Trockenjahren. Dies zeigen Ergebnisvergleiche zwischen Extrapolation und Simulation in den betrachteten Testgebieten. Im Trockenjahr 2003 liegen die Extrapolationswerte beispielsweise in mehreren Testgebieten (Emme, Rhone, Ticino, Broje) um etwa 10 % unter denjenigen aus der expliziten Simulation.

2.4. Statistische Auswertungen für Regionen

Ausgehend von den Ergebnissen des Upscalings wurden die rechnerisch ermittelten Bedarfsmengen mit dem tatsächlichen Wasserdargebot verglichen. In Ermangelung an zeit- und flächendetaillierten Beobachtungsdaten zum Grundwasserdargebot (Grundwasserdaten liegen nur punktuell vor) wurden in dieser Studie vereinfachend nur die gemessenen Abflüsse von oberirdischen Fliessgewässern berücksichtigt (ohne Berücksichtigung von Seen oder Speichern).

Die durchzuführenden Arbeiten gliederten sich wie folgt:

- Ableitung von «geeigneten» Bewässerungsregionen. Diese Regionen sollten vorzugsweise eine mittlere Grösse von zirka 1000 km² aufweisen und die Schweiz gesamthaft erfassen
- Verschneidung der extrapolierten Bedarfskarten (siehe Kapitel 3) mit der erstellten Karte zu den Bewässerungsregionen
- Bereitstellung und statistische Aufbereitung der zu den Regionen gehörenden Abflussdaten (langjährige monatliche Mittelwerte für die Periode 1981–2010)
- Statistische und graphische Auswertungen zum Verhältnis von Bedarf und Dargebot

2.5. Definition und Ableitung der Bewässerungsregionen

Die Gebietsausgrenzung wurde auf Basis von zwei detaillierten Flächendatensätzen durchgeführt: Mit Hilfe des RIMINI-Höhenmodells (swisstopo 2004) wurde zunächst eine umfangreiche topographische Gebietsanalyse für die Schweiz durchgeführt und für ausgewählte Abflussstationen die zugehörigen Entwässer-

rungsgebiete bestimmt. Anschliessend wurden „unsauber“ abgeleitete Einzelgebiete mit Daten aus dem EZGG-CH-Produkt „Einzugsgebietgliederung Schweiz“ (BAFU 2011) ergänzt. Hierzu wurden Datensätze aus der Aggregationsebene 1000 km^2 berücksichtigt. Auf einer ausschliesslichen Verwendung des EZGG-CH-Datensatzes wurde in dieser Arbeit bewusst verzichtet, da dieser Datensatz keine explizite Gebietsausgliederung anhand von frei wählbaren Abflussstationen anbietet.

Im Ergebnis der Analyse wurden insgesamt 39 Regionen ausgegrenzt (siehe Abb. 4 und Tab. 4). Die Regionen haben Flächengrössen zwischen 526 km^2 (Broye-Mentue-Gebiet [31]) und 1722 km^2 (Broye-Ebene-Seeland [33]). Die landwirtschaftlichen Flächenanteile betragen zwischen 6 % (Maggia-Gebiet [7]) und 66 % (Broye-Mentue-Gebiet [31]).

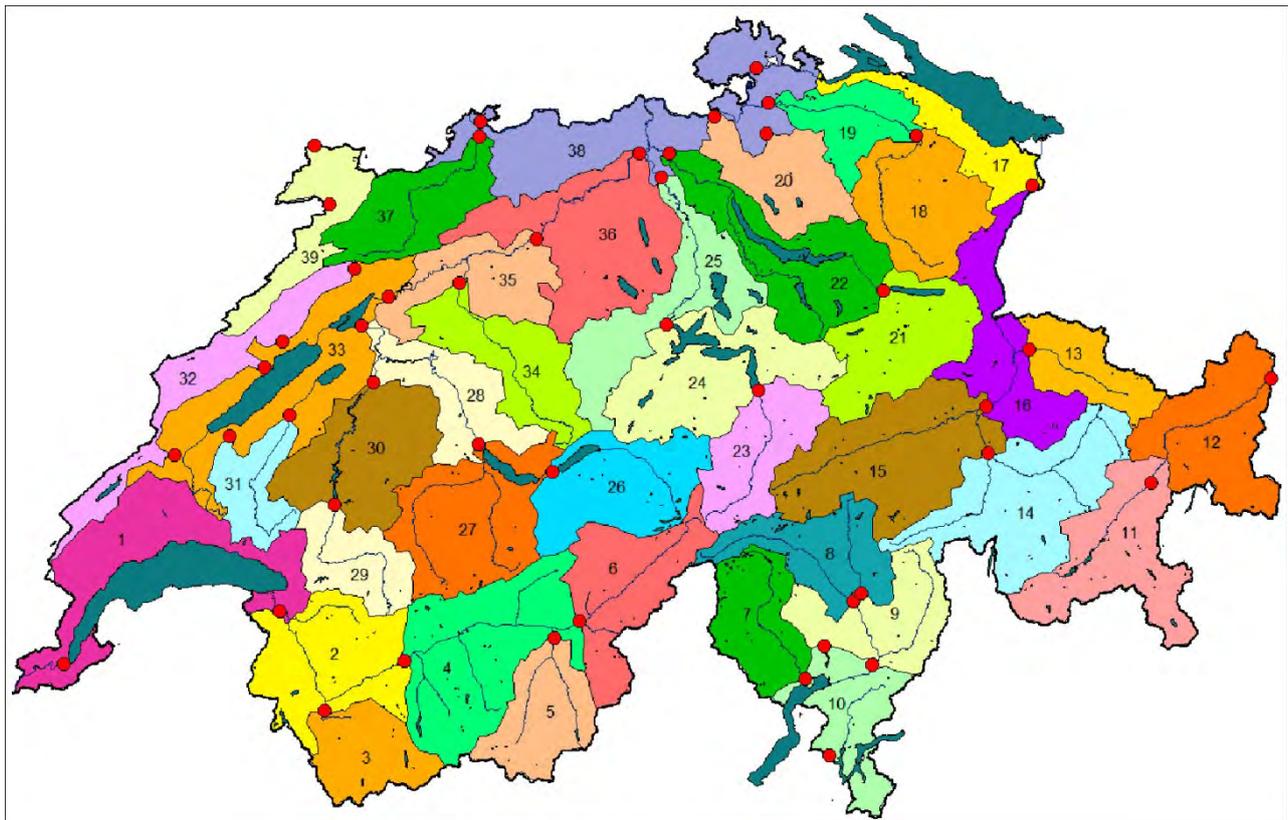


Abbildung 4: Lage und ID der ausgegrenzten Regionen und zugehörige Abflussstationen (Kreissymbol)

2.6. Aufbereitung der Abflussdaten (Dargebot)

Das potenzielle Dargebot an Bewässerungswasser wurde in dieser Studie anhand von beobachteten Abflussvolumina abgeschätzt. Dazu wurden für jede Region die zugehörigen stationsbezogenen Abflusszeitreihen (siehe Tab. 4) für die Untersuchungsperiode 1981 bis 2010 statistisch ausgewertet. Insgesamt wurden für 47 Abflussstationen die mittleren monatlichen Abflusssummen bestimmt. Restwassermengen wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 4: Angaben zu den ausgewählten Regionen (LW: Landwirtschaftsfläche)

ID	Regionsbezeichnung	Grösse ^a [km ²]	Anteil LW [%]	Zugehörigen Abflussstation(en) [Flussname – Stationsname]
1	Genfersee-Gebiet	1668	35,2	Rhone – Genf
2	Chablais	1235	25,6	Rhone – Port du Scex
3	Dranse-Gebiet	670	15,0	Dranse – Martigny
4	Mittelwallis	1661	17,1	Rhone – Sion
5	Vispatal	777	8,9	Vispa – Visp
6	Oberwallis	1077	15,6	Rhone – Brig
7	Maggiatal	753	6,1	Maggia – Locarno-Solduno
8	Oberes Ticino-Gebiet (Leventina, Bleniotal)	846	16,5	Ticino – Pollegio Brenno – Loderio
9	Mittleres Ticino-Gebiet (Riviera, Misox, Verzascatal)	853	8,3	Ticino – Bellinzona Verzasca – Lavertezzo
10	Magadino-Tresa-Gebiet	777	11,2	Tresa – Ponte Tresa
11	Oberengadin	1210	16,2	Inn – Cinneschel
12	Untereingadin	1133	22,4	Inn – Martina
13	Prättigau	619	34,1	Landquart – Felsenbach
14	Hinterrhein-Gebiet	1523	27,5	Hinterrhein – Fürstenu
15	Vorderrhein-Gebiet	1640	28,8	Rhein – Domat-Ems
16	Alpenrheintal	974	38,1	Rhein – Diepoldsau
17	Bodensee-Gebiet	708	41,3	Rhein – Neuhausen
18	Oberes Thur-Gebiet	1083	56,2	Thur – Halden
19	Unteres Thur-Gebiet	597	60,2	Thur – Andelfingen
20	Glattal-Tösstal	768	40,8	Glatt – Rheinfelden Töss – Neftenbach
21	Glarnerland-Sarganserland	1072	29,4	Linth – Weesen
22	Zürichsee-Gebiet	1318	38,2	Limmat – Baden
23	Oberes Reusstal	831	16,2	Reuss – Seedorf
24	Zentralschweiz	1431	33,2	Reuss – Luzern
25	Entlebuch – untere Reuss	1125	48,6	Reuss – Mellingen
26	Brienzersee-Gebiet	1141	18,5	Aare – Ringgenberg
27	Thunersee-Gebiet	1370	35,7	Aare – Thun
28	Berner Mittelland	802	54,3	Aare – Hagneck
29	Saaneland	636	41,2	Sarine – Broc
30	Greyerzerland – Senseland	1208	56,5	Saane – Laupen
31	Broye-Mentue-Gebiet	526	65,6	Broye – Payerne Mentue – Yvonand
32	Orbe-Areuse-Seyon-Suze-Gebiet	863	42,6	Orbe – Orbe, Areuse – Boudry, Seyon – Valangin, Suze – Sonceboz
33	Broyeebene-Seeland	1722	46,3	Aare – Brügg
34	Emmental	928	51,6	Emme – Wiler
35	Mittleres Aare-Gebiet	825	54,0	Aare – Murgenthal
36	Unteres Aare-Gebiet	1617	50,2	Aare – Brugg
37	Birs-Gebiet	880	42,0	Birs – Münchenstein
38	Hochrhein	1719	44,2	Rhein – Basel
39	Doubs-Gebiet	636	50,9	Doubs – Ocourt Allaine – Boncourt

^a Flächenangaben beziehen sich auf die in Abbildung 2 dargestellten Regionen, nicht auf die stationsbezogenen Zuflussgebiete.

3. Bewässerungsbedarf für Regionen

3.1. Regionaler Vergleich von Bedarf und Dargebot

Die regionsspezifische Auswertung zum saisonalen Bewässerungsbedarf wurde einerseits für die Periode 1981 bis 2010 (Abb. 4 und Tab. 5) und andererseits für das Einzeljahr 2003 (Abb. 5 und Tab. 6) vorgenommen. In beiden Zeitperioden wurden die höchsten Bedarfswerte jeweils für das Genfersee-Gebiet (Region 1), das Broye-Seeland-Gebiet (Region 33) und den Hochrhein (Region 38) ermittelt. Den kleinsten Bedarf weist hingegen das wenig landwirtschaftlich genutzte Maggia-Gebiet auf (Region 7).

Zu beachten ist, dass die berechneten Mengen für die einzelnen Regionen einerseits von der vorherrschenden landwirtschaftlichen Nutzungsart (Acker, Grasland, Obstanbau) und andererseits von deren gebiets-spezifischen Bedingungen wie Höhenlage, Gefälle, Boden und Klima bestimmt werden. In Gebieten mit einem erheblichen Anteil an landwirtschaftlicher Nutzung in höher gelegenen Flächen liegt der Bewässerungsbedarf eher tief, da hier mit höheren Niederschlagsmengen und geringeren Verdunstungsraten (u. a. durch tiefere Temperaturen) als in Tallagen zu rechnen ist. Dies trifft speziell für weite Teile des ausgedehnten Rhone-Gebietes zu, dessen landwirtschaftliche Nutzung durch Grasland in höheren Lagen dominiert wird. Acker- und Obstanbauflächen konzentrieren sich hier vor allem im Bereich des Talbodens.

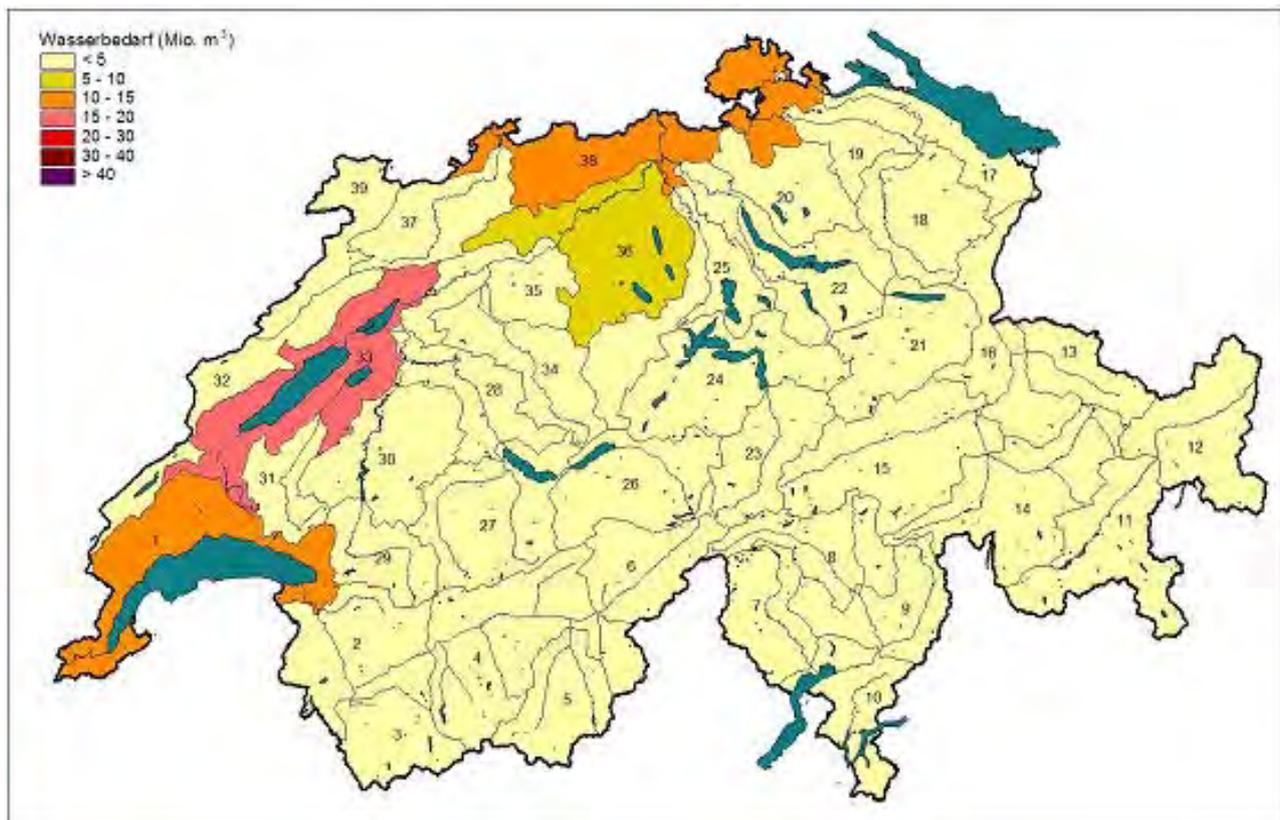


Abbildung 5: Mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf in der Schweizer Landwirtschaft für die Periode 1981 bis 2010 (mit Regionsbezeichnung)

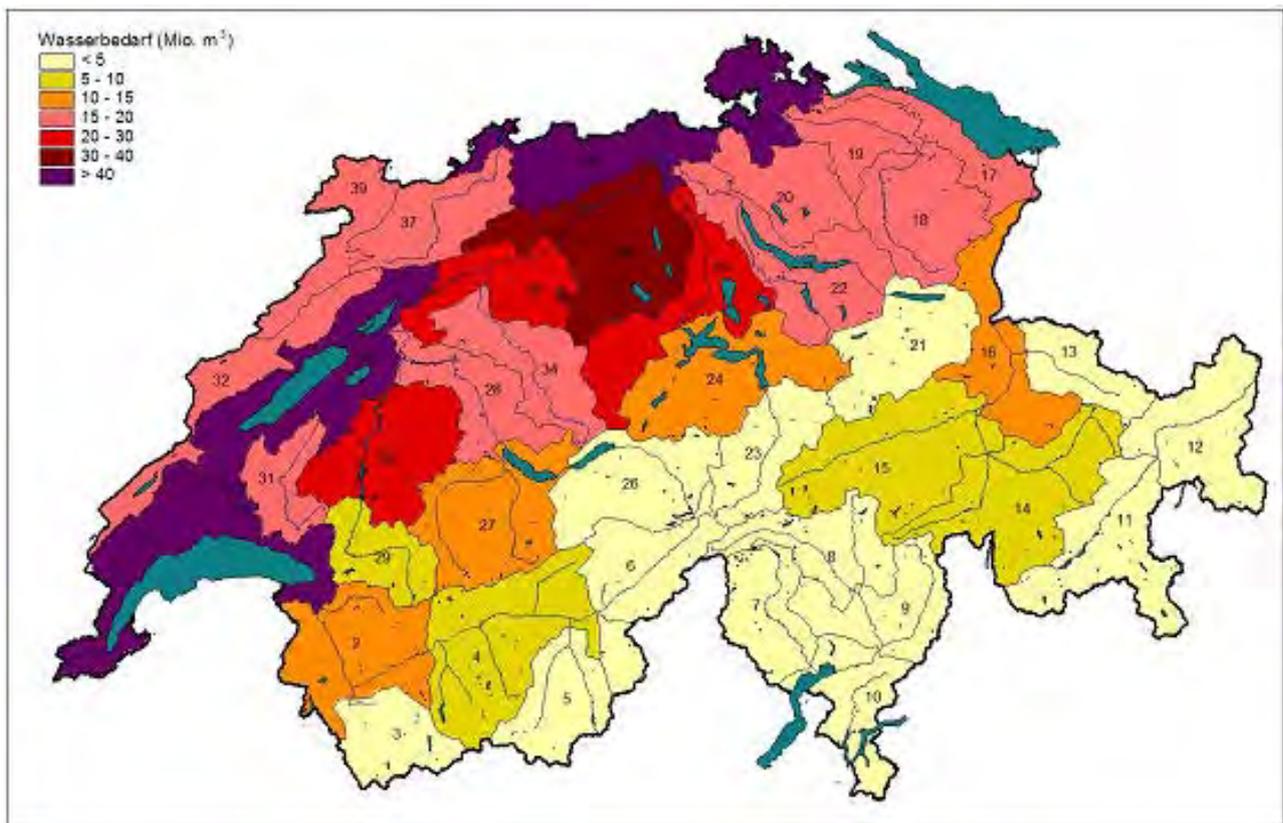


Abbildung 6: Bewässerungsbedarf in der Schweizer Landwirtschaft im Trockenjahr 2003 (mit Regionsbezeichnung)

Weiter ist zu beachten, dass in der aktuellen Studie die landwirtschaftlichen Nutzflächen noch teilweise aus der „alten“ Arealstatistik 1992/97 abgeleitet worden sind (siehe Kapitel 2). Die „neuere“ Arealstatistik 2004/09, die mit Stand August 2011 für zirka 75 % der Landesfläche ausgewertet vorliegt (Abb. 2), weist im Vergleich zur Arealstatistik 1992/97 deutlich weniger Ackerland (-35 %) und mehr Grasland (+30 %) aus. Verglichen mit den Vorgängerstudien dürfte dies zu tieferen Bedarfswerten führen.

Tabelle 5: Mittlerer regionaler Bewässerungsbedarf für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz in der Periode 1981 bis 2010 (alle Angaben in Mio. m³)

Region	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1	0,0	0,0	0,0	0,6	1,0	2,3	5,0	2,7	0,6	0,3	0,0	0,0	12,4
2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,6	1,3	0,8	0,3	0,2	0,0	0,0	3,8
3	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	0,8	0,5	0,2	0,1	0,0	0,0	2,4
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,7
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,9
12	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	1,1
13	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,9
14	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,6	0,4	0,2	0,2	0,0	0,0	1,8
15	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,7	0,4	0,2	0,2	0,0	0,0	2,0
16	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,4	1,3	0,8	0,2	0,2	0,0	0,0	3,3
17	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,4	1,3	0,7	0,1	0,1	0,0	0,0	2,7
18	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3	1,5	0,9	0,3	0,2	0,0	0,0	3,5
19	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,5	1,5	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	3,2
20	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,4	1,3	0,7	0,1	0,1	0,0	0,0	2,9
21	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,5	0,3	0,1	0,1	0,0	0,0	1,4
22	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,5	1,7	1,0	0,2	0,2	0,0	0,0	3,9
23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,5
24	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,3	0,9	0,6	0,2	0,2	0,0	0,0	2,5
25	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5	1,8	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	4,0
26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,8
27	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,2	0,9	0,6	0,2	0,2	0,0	0,0	2,5
28	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,7	1,8	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	4,2
29	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,6	0,4	0,1	0,1	0,0	0,0	1,5
30	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,7	2,1	1,2	0,2	0,2	0,0	0,0	5,0
31	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,8	1,9	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	4,7
32	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	1,3	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	3,1
33	0,0	0,0	0,0	1,4	2,2	3,9	6,8	3,7	1,2	0,5	0,0	0,0	19,8
34	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,5	1,4	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	3,3
35	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,8	1,9	1,0	0,2	0,1	0,0	0,0	4,5
36	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	1,0	3,0	1,7	0,3	0,1	0,0	0,0	6,8
37	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,5	1,4	0,9	0,2	0,1	0,0	0,0	3,5
38	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6	1,6	4,6	2,8	0,5	0,2	0,0	0,0	10,8
39	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,4	1,3	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	3,1
To-	0,0	0,0	0,0	6,2	8,5	19,6	51,9	29,9	7,4	5	0,0	0,0	130,1

Tabelle 6: Regionaler Bewässerungsbedarf für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz im Trockenjahr 2003 (alle Angaben in Mio. m³)

Region	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
1	0,0	0,0	0,4	1,2	0,9	14,6	15,7	15,7	0,7	0,1	0,0	0,0	49,2
2	0,0	0,0	0,2	0,4	0,3	2,9	4,5	5,1	0,2	0,0	0,0	0,0	13,6
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,6	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
4	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	1,5	2,4	2,8	0,2	0,0	0,0	0,0	7,5
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,8	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,5	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,9	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4
11	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	1,1	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,4	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	1,2	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6
14	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,8	2,1	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	6,3
15	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	1,1	2,5	3,6	0,1	0,0	0,0	0,0	7,4
16	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	3,3	4,7	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	13,9
17	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	4,8	6,1	5,2	0,0	0,0	0,0	0,0	16,2
18	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	3,5	7,1	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0	18,6
19	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	5,4	7,4	6,1	0,1	0,0	0,0	0,0	19,3
20	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	4,4	6,2	5,6	0,1	0,0	0,0	0,0	16,5
21	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,8	1,5	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9
22	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	4,8	7,3	7,5	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0
23	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,6	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8
24	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	1,9	3,8	4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	10,6
25	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	5,7	8,9	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	23,1
26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,9	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7
27	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	1,4	3,9	5,2	0,1	0,0	0,0	0,0	10,8
28	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2	5,1	7,1	7,1	0,1	0,0	0,0	0,0	20,0
29	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	2,6	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	6,9
30	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	5,2	8,9	10,0	0,1	0,0	0,0	0,0	24,7
31	0,0	0,0	0,1	0,4	0,3	5,3	6,8	7,0	0,2	0,0	0,0	0,0	20,1
32	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	3,7	6,0	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	16,2
33	0,0	0,0	1,0	2,8	2,2	15,8	18,3	17,6	1,6	0,2	0,0	0,0	59,4
34	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	4,0	6,0	6,3	0,1	0,0	0,0	0,0	16,7
35	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2	5,5	7,5	7,2	0,2	0,0	0,0	0,0	21,1
36	0,0	0,0	0,2	0,3	0,2	9,6	14,0	12,8	0,1	0,0	0,0	0,0	37,3
37	0,0	0,0	0,1	0,2	0,1	3,4	5,9	6,5	0,1	0,0	0,0	0,0	16,4
38	0,0	0,0	0,3	0,5	0,4	12,8	18,5	19,3	0,3	0,0	0,0	0,0	52,2
39	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	3,5	6,1	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	16,2
Total	0,0	0,0	4,4	7,7	6,0	136,3	200,7	210,5	4,3	0,3	0,0	0,0	572

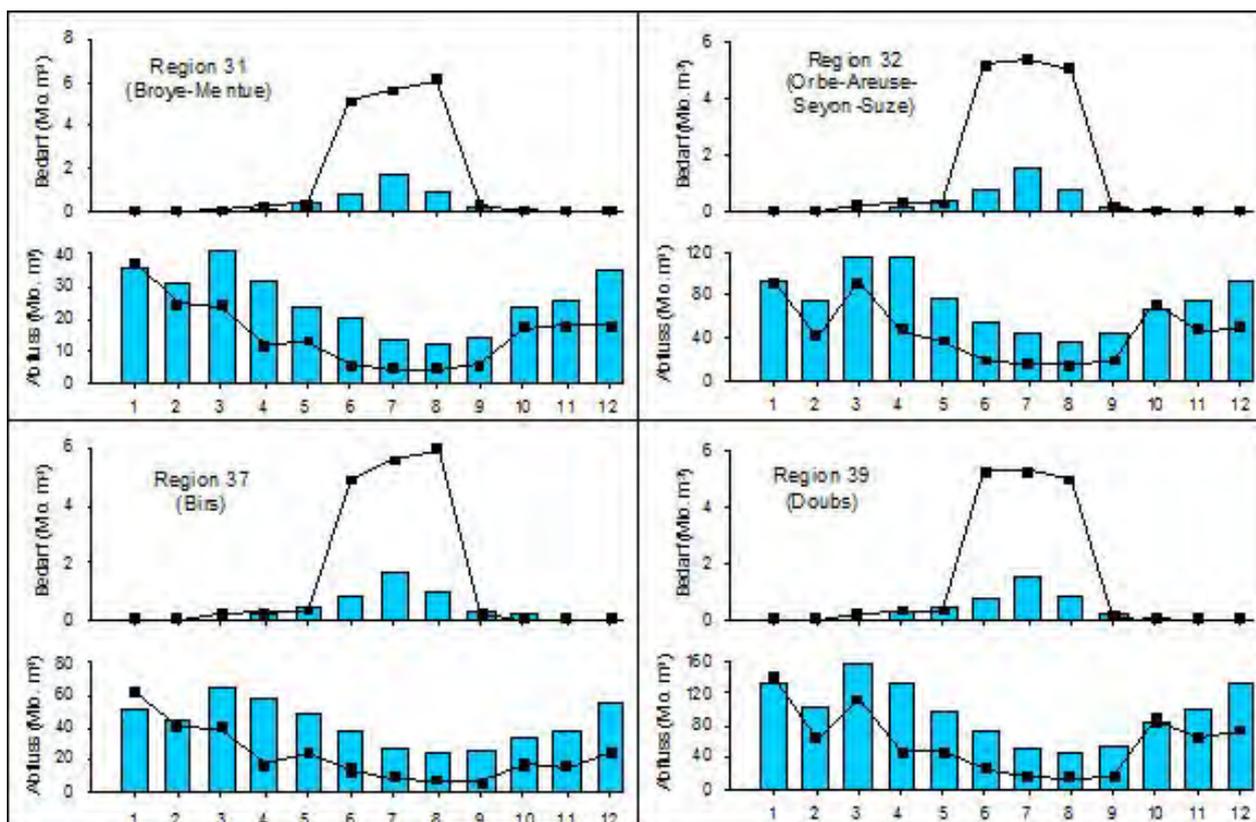


Abbildung 7: Monatliche Werte zum Bewässerungsbedarf und zum Dargebot (Abfluss) für ausgewählte Regionen; jeweils für die Periode 1981 bis 2010 (Balken) und für das Trockenjahr 2003 (Linie)

3.2. Regionaler Vergleich von Bedarf/Dargebot

Der regionale Vergleich zwischen dem ermittelten Bewässerungsbedarf und dem verfügbaren (oberirdischen) Wasserdargebot zeigt im untersuchten Zeitraum (1981–2010) nur in Trockenjahren wie 2003 mögliche Limitierungen bei der Flusswassernutzung für Bewässerungszwecke an. Im Sommer 2003 wird insbesondere in den Regionen Broye-Mentue, Orbe-Areuse-Seyon-Suze, Birs und Doubs ein Grössenordnung im Dargebot erreicht, die jener des Bedarfs ähnlich ist (siehe Abb. 6). Die monatlichen Vergleichsplots für alle Regionen finden sich im Anhang B.

Der angewandte Vergleich (Bedarf/Dargebot) setzt voraus, dass jede landwirtschaftliche Nutzfläche in der betrachteten Region durch Flusswasser bewässert werden kann, was in der Praxis jedoch kaum gewährleistet sein dürfte (lange Transportwege etc.), und keine Grundwasservorkommen genutzt werden. Insofern dürften Defizitprobleme hinsichtlich der Verfügbarkeit von Bewässerungswasser im lokalen Massstab weit aus verbreiteter sein als auf der regionalen Ebene, und dies nicht nur in Trockenjahren. Auch gestattet die zeitliche Differenzierung in Monatsschritten keine Erfassung von kurzzeitigen Phasen mit Wassermangel. Schliesslich müssten vorgeschriebene Restwassermengen sowie der Effizienzgrad der Bewässerung, der je nach verwendetem Bewässerungssystem deutlich unter 80 % liegen kann, mitberücksichtigt werden.

Die Ergebnisse für die kritischen Sommermonate Juni-Juli-August (JJA) sind geordnet nach Grösse des Mittelwerts (1981–2010) in Abbildung 8 dargestellt. Abbildung 9 gibt eine Übersicht über die räumliche Verteilung der mittleren Verhältnisse und Abbildung 10 jene für 2003.

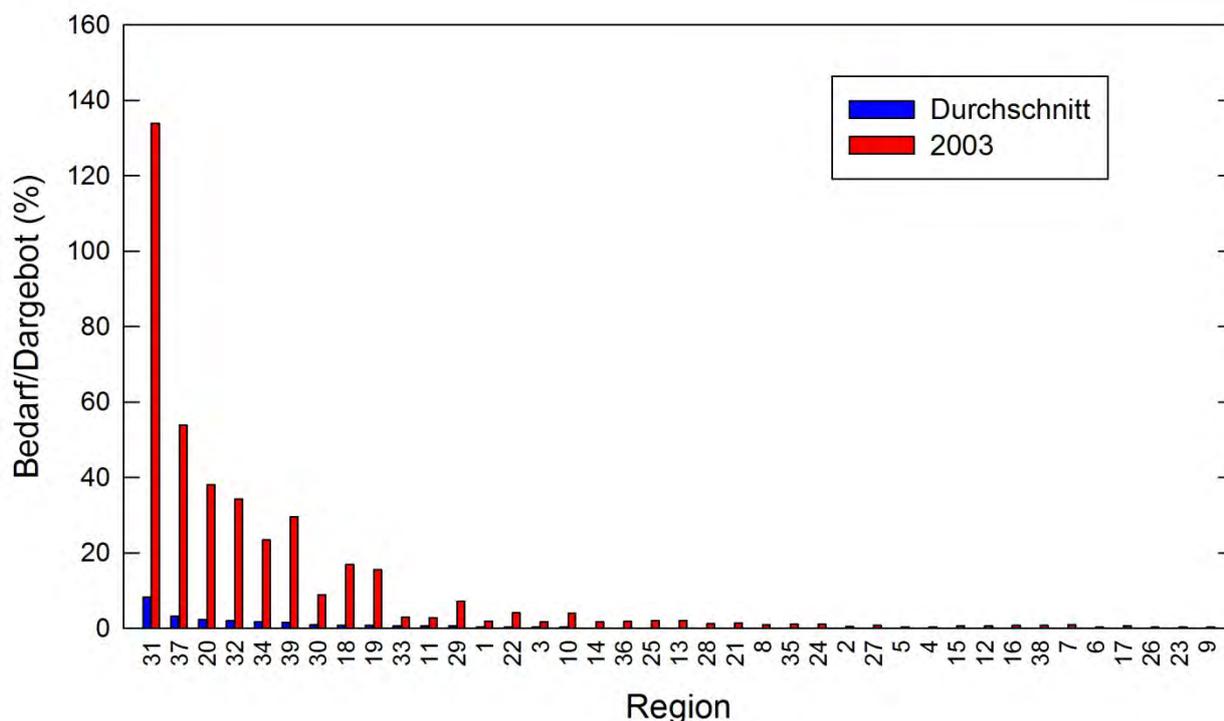


Abbildung 8: Das Verhältnis von Bedarf und Dargebot (JJA) für alle Einzugsgebiete im Mittel (1981–2010) und für 2003, angeordnet nach der Grösse des mittleren Verhältnisses (Einzugsgebietsnummern gem. Tab. 4).

Dadurch lassen sich mögliche Problemregionen erkennen, in denen sich in extrem warmen und trockenen Jahren Engpässe in der Wasserverfügbarkeit für die Landwirtschaft ergeben könnten. Aus Abbildung 8 geht hervor, dass in der Mehrzahl der Einzugsgebiete der mittlere Bedarf unter 1 % des Dargebots liegt. Auch 2003 liegen die relativen Bedarfswerte trotz extremer Klimabedingungen sehr tief, mit Ausnahme weniger Gebiete, in denen der Bedarf auf über 20 % des Dargebots ansteigt.

Die Auswertungen zeigen für das Broye-Mentue-Gebiet (Region 31) und das Gebiet der Birs (Region 37) das höchste Risikopotenzial für die landwirtschaftliche Wasserversorgung. In den Sommermonaten des Trockenjahres 2003 übersteigt hier der ermittelte Bewässerungsbedarf das Dargebot (verfügbarer Abfluss) um mehr als 30 %. In den anderen Regionen liegt der Bedarf jeweils deutlich unterhalb des Dargebotes, was aber keineswegs mit einer allgemeinen Entwarnung gleichzusetzen ist. Erhöhte Beanspruchungen des Dargebotes (30–60 %) werden insbesondere für das Glatt-Töss-Gebiet, die Zuflussgebiete zum Neuenburger- und Bielersee (Orbe-Areuse-Seyon-Suze) und das Doubs-Gebiet ermittelt.

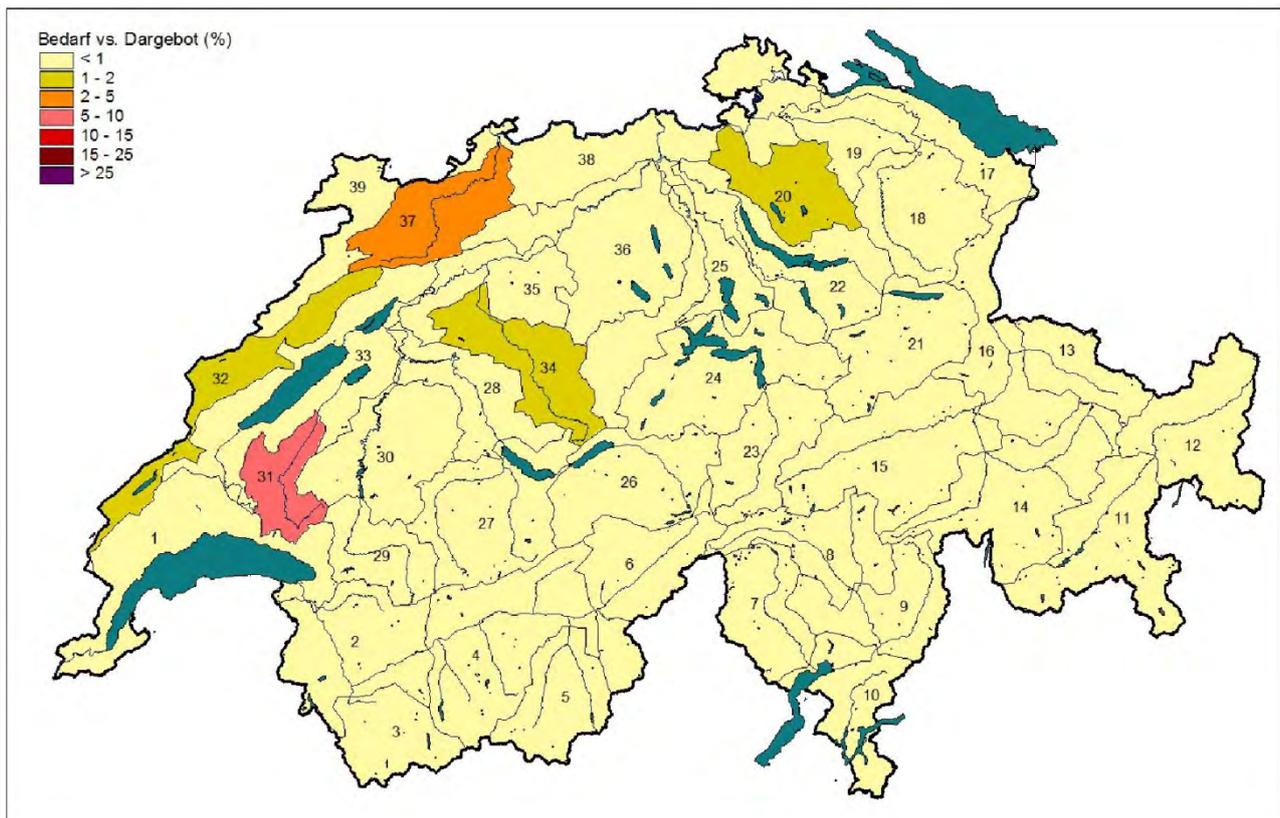


Abbildung 9: Verteilung des Verhältnisses von Bewässerungsbedarf und Dargebot (Abflussvolumen) für die Sommermonate (JJA) der Periode 1981 bis 2010 (mit Regionsbezeichnung)

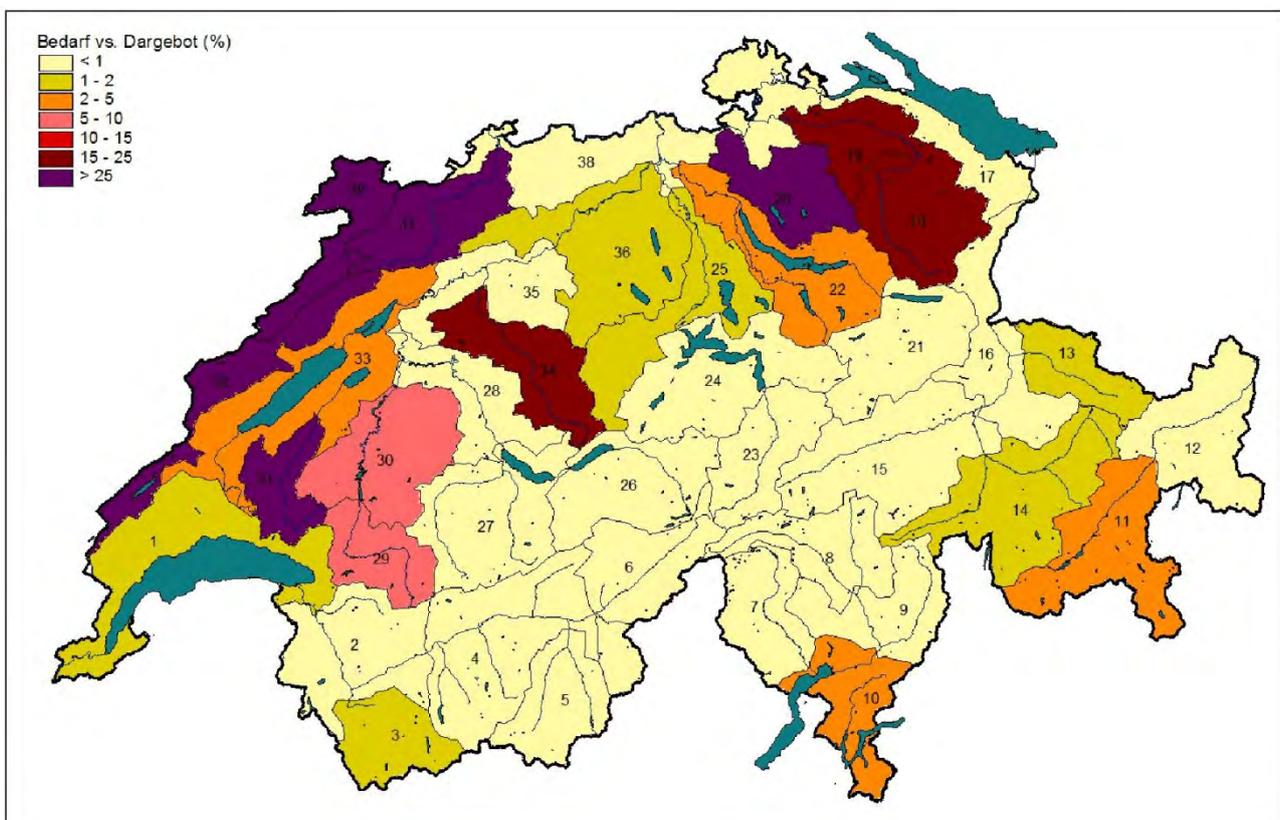


Abbildung 10: Regionale Verteilung des Verhältnisses von Bewässerungsbedarf und Dargebot (Abflussvolumen) im Sommer (JJA) des Jahres 2003 (mit Regionsbezeichnung)

Es gilt zu berücksichtigen, dass die Belastungssituation in Extremjahren stark vom Abflussregime der betrachteten Flussläufe abhängt. So ist in niederschlagsarmen Jahren das Bewässerungsangebot in nival-pluvialen Gebieten gegenüber nival-glazialen Gebieten deutlich reduziert. Betrachtet man nur die Bedarfsseite, so sieht die räumliche Differenzierung anders aus, wie die Verteilung der Bewässerungsintensitäten (m^3/ha) für das Trockenjahr 2003 zeigt (Abb. 11). Hier wird deutlich, dass die höchsten Intensitäten (Bewässerungsmengen pro Hektare Landwirtschaftsland) sowohl in Gebieten mit hohem als auch mit geringem Dargebot anzutreffen sind.

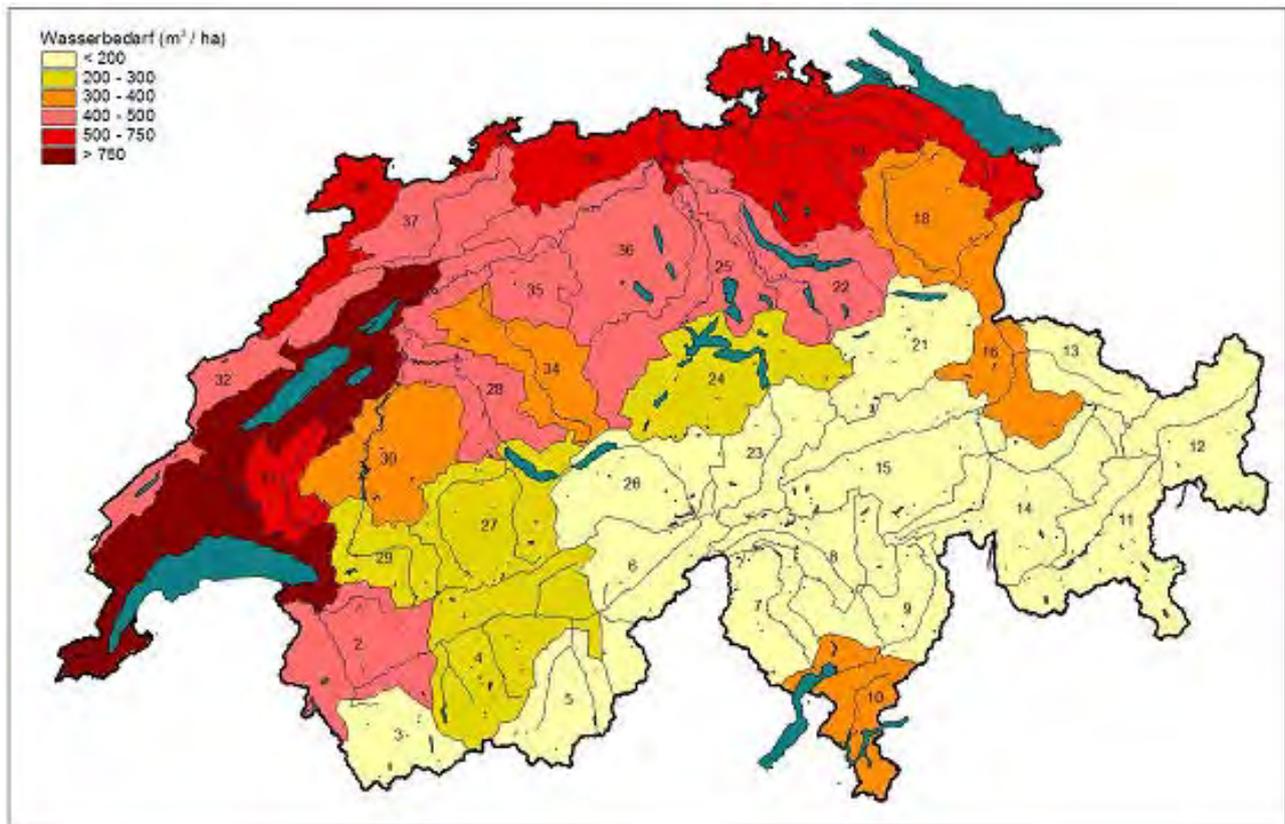


Abbildung 11: Regionale Verteilung des Bewässerungsbedarfs für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für das Trockenjahr 2003 (mit Regionsbezeichnung)

4. Definition und Kalibrierung der Hotspot-Gebiete

4.1. Definition

Die regionale Verteilung des Bewässerungsbedarfs weist mehrere Gebiete mit einem erhöhten Risikopotenzial für die landwirtschaftliche Wasserversorgung aus. Für diese „Hotspots“ wurden erweiterte Modellrechnungen und Analysen durchgeführt. Insbesondere wurden hierzu die Bedarfs- und Dargebotssituationen für zukünftige Klimabedingungen (Zeithorizont 2050) abgeschätzt und miteinander verglichen (siehe Kapitel 1).

Die Auswahl und Lage der Hotspot-Gebiete ist in Abbildung 12 dargestellt. Zwei Gebiete (Emmental und Birs-Gebiet) wurden quasi unverändert aus der bisherigen Regionsmaske übernommen (siehe Abbildung 3). Die restlichen drei „Hotspots“ (Thur-Gebiet, Glatttal-Tössstal und Broye-Mentue-Gebiet) erfuhren hingegen eine Gebietsausdehnung. Für Thur und Töss werden nunmehr auch ihre jeweiligen Mündungsareale betrachtet. Beim Broye-Mentue-Gebiet wurden zusätzlich zum bisher betrachteten Gebiet auch die Zuflussbereiche zum Murten- und Neuenburgersee aufgenommen.

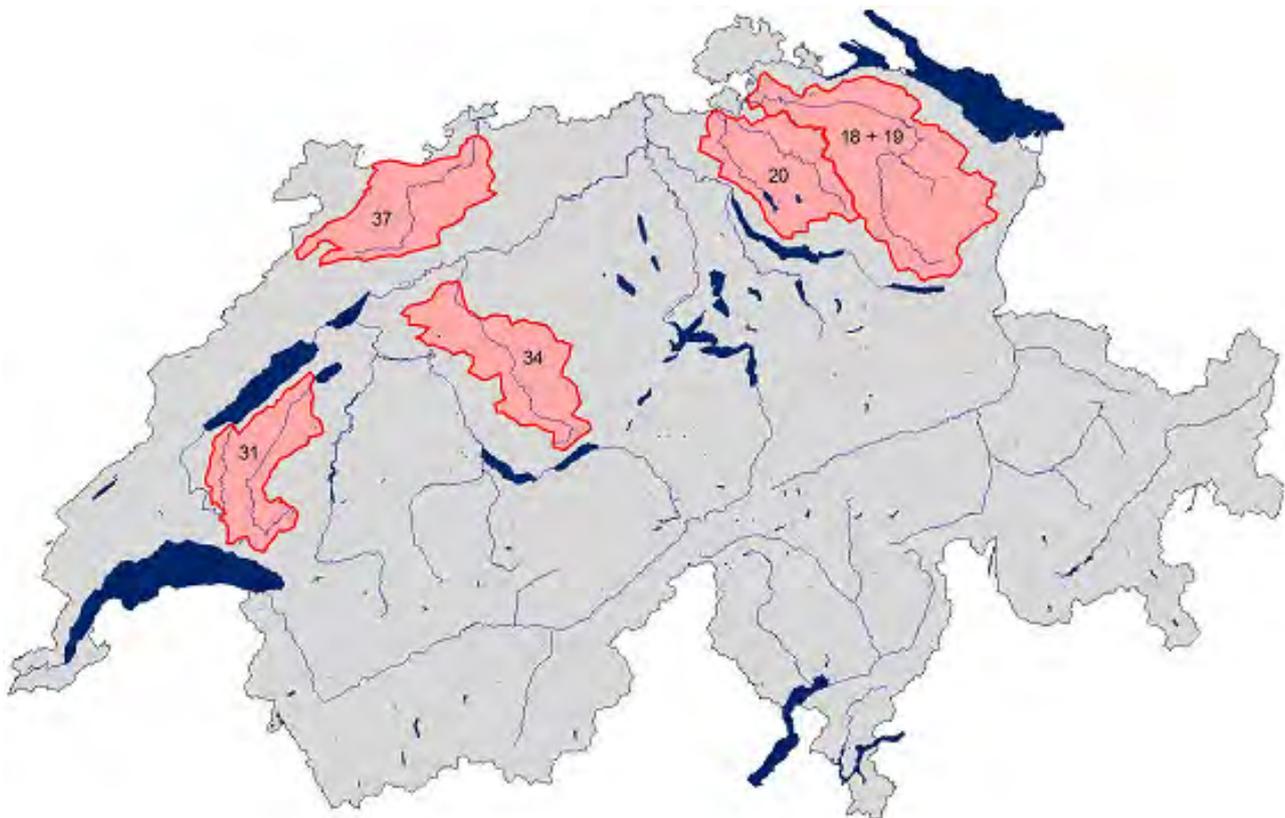


Abbildung 12: Lage der ausgewählten Hotspot-Regionen ([18]+[19] Thur, [20] Glatt-Töss, [31] Broye-Mentue, [34] Emme, [37] Birs)

Tabelle 7 stellt die landwirtschaftlichen Flächenanteile in den Hotspot-Gebieten zusammen. Der landwirtschaftliche Nutzflächenanteil an der Gesamtfläche beträgt in den Auswahlgebieten durchschnittlich 52 %, wobei die Nutzung von Grasland (54 %) gegenüber Ackerland (43 %) dominiert (3 % Obstanbau).

Tabelle 7: Landwirtschaftlich genutzte Flächenanteile (LW) in den Hotspot-Gebieten:

[18]+[19] Thur, [20] Glatt-Töss, [31] Broye-Mentue, [34] Emme, [37] Birs

Gebiet		Thur	Glatt-Töss	Broye-Mentue	Emme	Birs
Gesamtfläche	[km ²]	1758	862	755	939	911
Anteil LW (rel.)	[%]	57	42	67	52	42
Anteil LW (abs.)	[ha]	100 600	35 800	50 600	49 100	38 200
Ackerland	[ha]	36 100	18 400	35 000	17 800	10 500
Grasland	[ha]	60 300	16 200	14 900	30 500	27 000
Obstanbau	[ha]	4200	1200	700	800	700

4.2. Modellaufbau und -kalibrierung für die Hotspot-Gebiete

Für einige der ausgewählten Hotspot-Gebiete (Thur, Emme und Broye) lagen bereits kalibrierte Modell-Setups vor (siehe Kapitel 2). Für die Mehrzahl der betrachteten Flussgebiete (Glatt, Töss, Mentue und Birs) mussten jedoch neue Flussgebietsmodelle aufgebaut und kalibriert werden. Diese Arbeiten sind recht aufwendig. Sie sind für jedes Modell separat durchzuführen und bestehen aus folgenden Hauptarbeitsschritten:

- Beschaffung, Analyse und Aufbereitung der benötigten Modelleingangsdaten:
 - raumbezogene Daten, z. B. Höhen- und Landnutzungsverteilung, Bodenverhältnisse
 - zeitbezogene Daten (langjährige meteorologische und hydrologische Messreihen von ausgewählten Stationen)
- Konfiguration des Modells (Einrichtung der Teilmodelle inkl. Parametrisierung)
- Modellkalibrierung und -validierung
- Durchführung der Langzeitsimulation (1981–2010)

Die gebietsbezogenen Modellkalibrierungen erfolgten jeweils durch kontinuierliche Abfluss- und Wasserhaushaltssimulationen über mehrere Jahre und fokussierten dabei insbesondere auf eine möglichst gute Reproduktion der Mittel- und Niedrigwasserabflüsse. In Einzelfällen war es möglich, gewonnene Parameter-Setups aus den Testgebieten auf die Zielgebiete zu übertragen. Allerdings waren auch hier Nachjustierungen von einzelnen Eichparametern notwendig.

Die Ergebnisse der Modelleichungen zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen. Die logarithmische Nash-Sutcliffe-Effizienz (Nash & Sutcliffe 1979) als Mass für die Simulationsgüte des Abflusskontinuums liegt in den Zielgebieten zwischen 0,70 und 0,85 (jeweils bezogen auf die Periode 1981–2010) und bestätigt, dass das verwendete Modell in der Lage ist, die unterschiedlichen Einzugsgebiete und Abflussregimes mit einer problemadäquaten Genauigkeit zu simulieren. Die langjährig simulierten Abflussvolumina stimmten mehrheitlich gut mit den gemessenen überein ($\Delta Q < 3\%$; Abb. 13). Leichte Überschätzungen im simulierten Abflussvolumen ($\Delta Q < 10\%$) ergaben sich für das Gebiet der Mentue, wohingegen stärker überhöhte Abflüsse ($\Delta Q > 10\%$) für das Birs-Gebiet berechnet wurden. Die Gründe für die Abweichungen im Birs-Gebiet dürften im Karsteinfluss zu finden sein. Dieser dominiert das Abflussverhalten vor allem in den oberen und mittleren Gebietsanteilen. Möglicherweise werden signifikante Ab-

flussanteile unterirdisch über das Karstsystem in benachbarte Gebiete abgeleitet. In die hydrologische Modellierung des Birs-Gebietes flossen derartige Annahmen nicht ein. Im Emme-Gebiet haben wir eine recht deutliche Überschätzung im Sommer (Abb. 13). Diese könnte durch nicht berücksichtigte Entnahmen im Unterlauf erklärbar sein. Am Auslasspegel des Emme-Gebietes gibt es einen Umleitungskanal (Gerlafingen), der im Sommer offensichtlich stärkeren Einfluss hat.

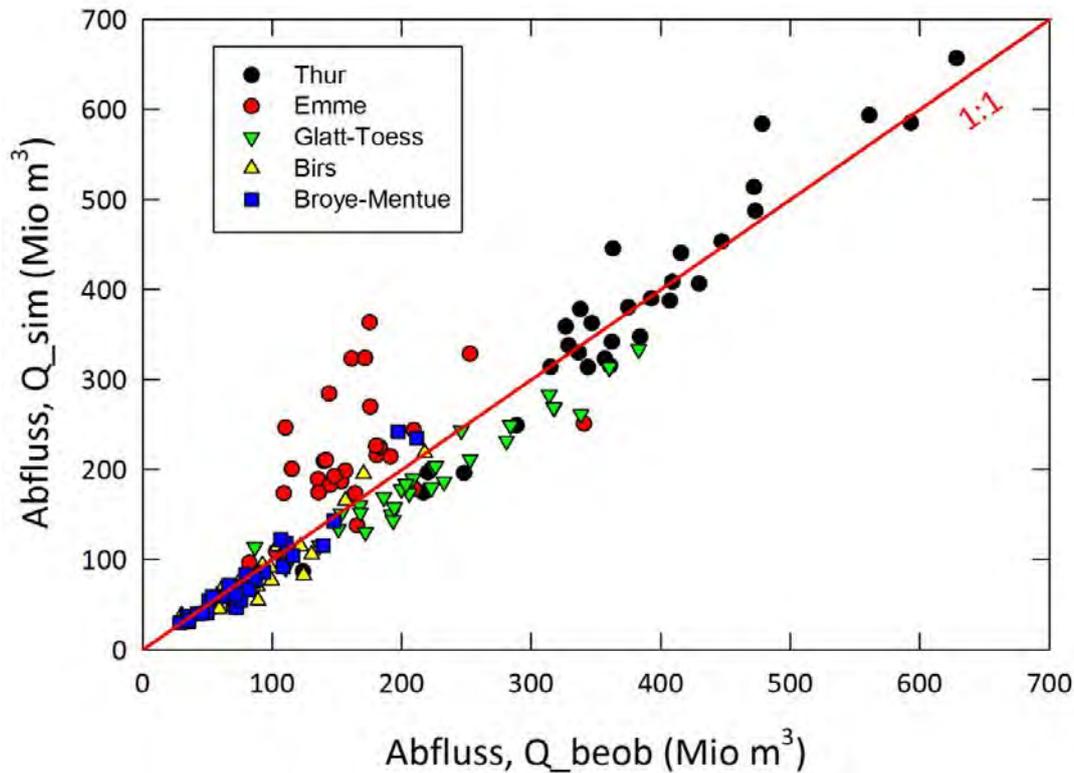


Abbildung 13: Vergleich von beobachteten und simulierten Abflüssen in den ausgewählten Regionen für die Sommermonate (JJA)

5. Klimaszenarien

5.1. Ausgangspunkt und Herleitung

Die Aufgabenstellung sah für die Hotspot-Gebiete Berechnungen sowohl für heutige als auch für zukünftige Klimabedingungen vor (Zeitfenster um 2050).

In der aktuellen Diskussion zur Klimaänderung werden hauptsächlich drei unterschiedliche Emissionsszenarien diskutiert. Zwei Szenarien gehen von einer weiteren Zunahme der Treibhausgasemissionen aus (A2 und A1B). Ein drittes Szenario, ein sogenanntes Klimastabilisierungsszenario, projiziert eine Senkung der Emissionen bis 2050 um 50 % (RCP3PD). Die mit diesen drei Szenarien verbundenen Emissionsverläufe sind in Abbildung 14 dargestellt. Im Rahmen dieser Studie wurde das Emissionsszenario A1B und dessen klimabedingten Auswirkungen abgebildet. Dieses Szenario geht von einer ausgewogenen Nutzung fossiler und nichtfossiler Energiequellen aus. Es beschreibt ausserdem ein starkes Wirtschaftswachstum, einen globalen Bevölkerungs-Peak zur Mitte des aktuellen Jahrhunderts sowie einen raschen Technologiefortschritt (Nakicenovic & Swart 2000).

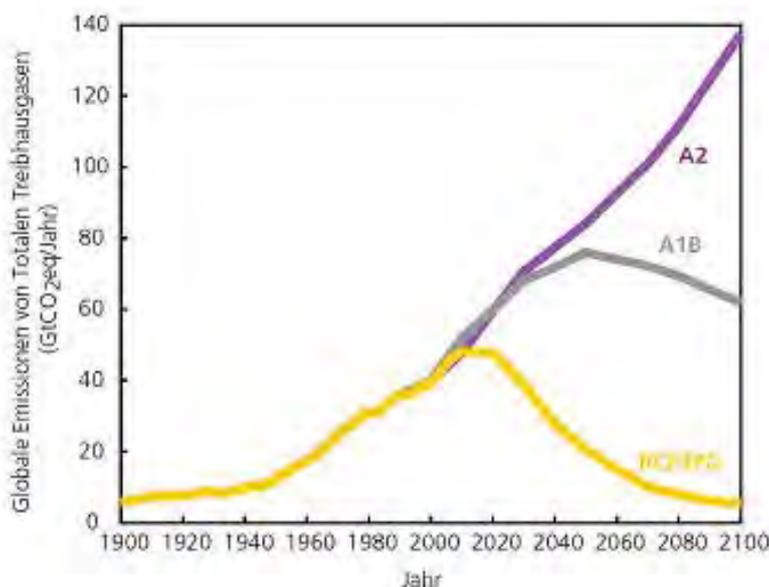


Abbildung 14: Emissionsszenarien zur Klimaänderung in der Schweiz (CH2011 2011)

Im EU Klimaforschungsprojekt ENSEMBLES (van der Linden & Mitchell 2009) wurde basierend auf dem A1B-Szenario eine Vielzahl von Modellexperimenten zum zukünftigen europäischen Klima berechnet und ausgewertet. Dabei kamen mehr als 30 verschiedene Modellkombinationen, das heisst Modellketten bestehend aus globalem Klimamodell (GCM) und daran gekoppelten regionalem Klimamodell (RCM), zum Einsatz (Details unter: <http://ensemblesrt3.dmi.dk/>; siehe auch Christensen *et al.* 2010). Die Klimaprojektionen von zwei dieser eingesetzten Modellketten (Ensemble Members) sind Gegenstand der nachfolgenden Untersuchungen.

Die Simulation wichtiger Klimagrössen unter zukünftigen Klimabedingungen erfolgte durch P. Calanca (Agroscope ART) auf der Basis von zwei regionalen Klimaszenarien für die Zeitspanne 2036 bis 2065. Für die Schweiz liefern diese zwei Modellläufe eine obere („extremes“ Szenario) bzw. untere („mildes“ Szenario)

Grenze der möglichen Klimaentwicklungen, die aus der Gesamtheit der ENSEMBLES-Szenarien resultieren.

- Klimamodell der ETH Zürich: **ETHZ-CLM** (nachfolgend als ETHZ bezeichnet); => antreibendes GCM: HadCM3Q0 mit A1B-Szenario, RCM: CLM, RCM-Auflösung: 25 km
- Klimamodell des SMHI (Schwedens Meteorologisches und Hydrologisches Institut). **SMHIRCA-BCM** (nachfolgend als SMHI bezeichnet); => antreibendes GCM: BCM mit A1B-Szenario, RCM: RCA, RCM-Auflösung: 25 km

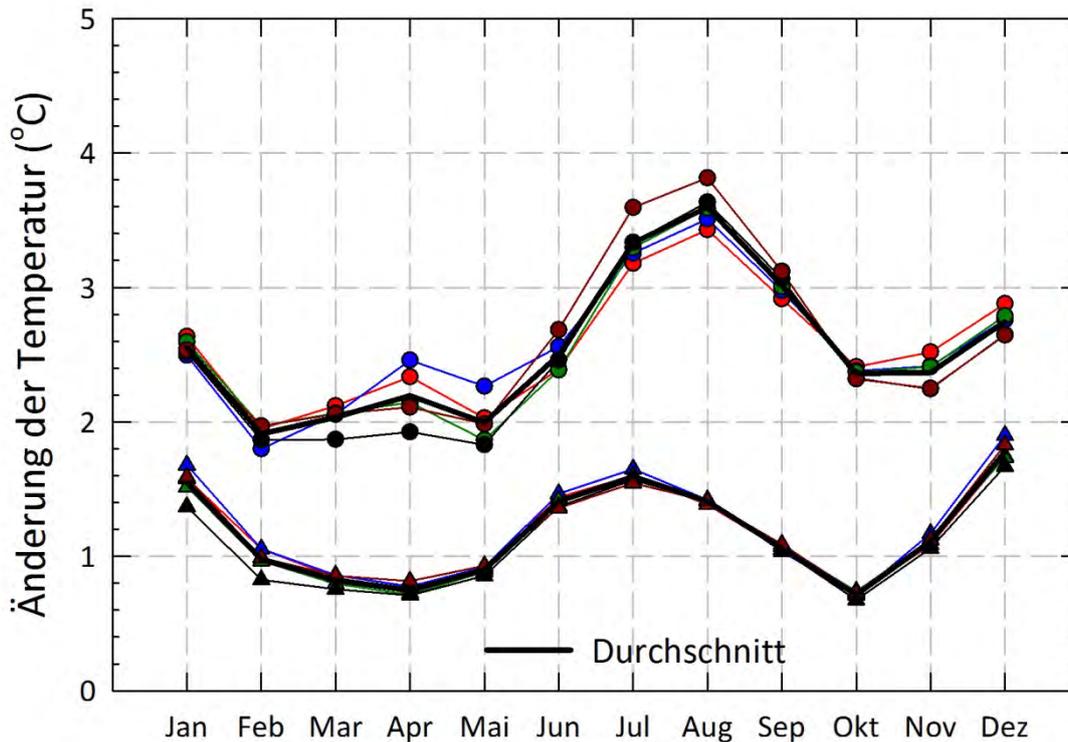
Die Szenarien standen als mittlere monatliche Delta-Werte (= Abweichung zur Referenz) für Temperatur, Niederschlag und Strahlung zur Verfügung. Vor ihrer Verwendung in den hydrologischen Modellrechnungen wurden die Outputs der RCMs einer Filterung (Glättung) unterzogen (Moving Windows über drei Monate mit Gewichtung: 0,25, 0,50 und 0,25), um so mögliche Unregelmässigkeiten in den ungefilterten Outputs (Rohdaten) zu entfernen.

5.2. Klimaszenarien für die ausgewählten Regionen

In den folgenden Abbildungen 15 bis 19 sind die Abweichungen von der Referenzperiode für ausgewählte Klimaparameter als Monatsmittel im Jahresverlauf dargestellt. Diese Abbildungen illustrieren das Mass der Klimaveränderung, die für die nachfolgenden Berechnungen besonders relevant sind. Sie beziehen sich auf das Zeitfenster 2036 bis 2065 und repräsentieren damit die erwarteten Änderungen um 2050.

Insgesamt ist zu erkennen, dass mit ETHZ-Szenario die Sommer deutlich wärmer und auch trockener sind, was sowohl durch die Abnahme der Niederschläge, wie durch die Zunahme der Trockenphasen und der Globalstrahlung (resp. Verdunstung) unterstrichen wird. Mit SMHI-Szenario sind die Tendenzen ähnlich, aber deutlich weniger stark ausgeprägt. Die stärksten Änderungen mit dem ETHZ-Szenario werden für die Regionen Broye-Mentue und Birs berechnet.

Die Signalstärke der prognostizierten Temperaturänderungen ist erwartungsgemäss beim ETHZ-Szenario am grössten (Abb. 15). Die mittleren monatlichen Temperaturzunahmen betragen hier je nach Hotspot-Gebiet bis zu 3,8 °C. Die höchsten Zunahmen werden im August berechnet. Das SMHI erwartet hingegen die stärksten Temperaturzunahmen im Dezember. Die jahreszeitliche Mitteltemperatur erhöht sich entsprechend ETHZ um etwa 2,6 °C; bei SMHI liegt diese Schätzung bei etwa 1,2 °C. In den Sommermonaten (JJA) wird zwischen den Modellszenarien eine mittlere Temperaturdifferenz von 1,7 °C ausgewiesen.



Sce_ETHZ		Sce_SMHI	
●	Thur	▲	Thur
●	Emme	▲	Emme
●	Glatt-Toess	▲	Glatt-Toess
●	Birs	▲	Birs
●	Broye-Mentue	▲	Broye-Mentue

Abbildung 15: Monatsmittel der erwarteten Temperaturänderung in den Hotspot-Gebieten für den Zeitraum 2036 bis 2065 aufgrund von zwei Klimaszenarien.

Die Projektionen mit ETHZ zeigen für die Sommermonate um 2050 eine deutliche Abnahme der Niederschlagsmengen an (Abb. 16). Je nach Gebiet werden in dieser Zeit zwischen 20 und 30 % weniger Niederschlag erwartet, mit maximalen Abnahmen im Juli von –30 % (ETHZ) für Broye-Mentue und Birs. Im Mittel über alle Hotspot-Gebiete beträgt der prognostizierte Rückgang 22 % (bezogen auf JJA). Im Vergleich dazu fällt die mittlere sommerliche Niederschlagsabnahme im SMHI-Szenario deutlich geringer aus (–8 %). Der Jahresgang der erwarteten Niederschlagsänderung zeigt beim SMHI eine markante Erhöhung der Niederschlagsmengen ausserhalb der Sommerzeit an. Auf Jahressicht wird vom SMHI eine leichte Zunahme der Jahresniederschläge prognostiziert (+4 %). Eine mittlere Abnahme der Jahresniederschläge um 8 % wird hingegen durch das ETHZ-Szenario angezeigt.

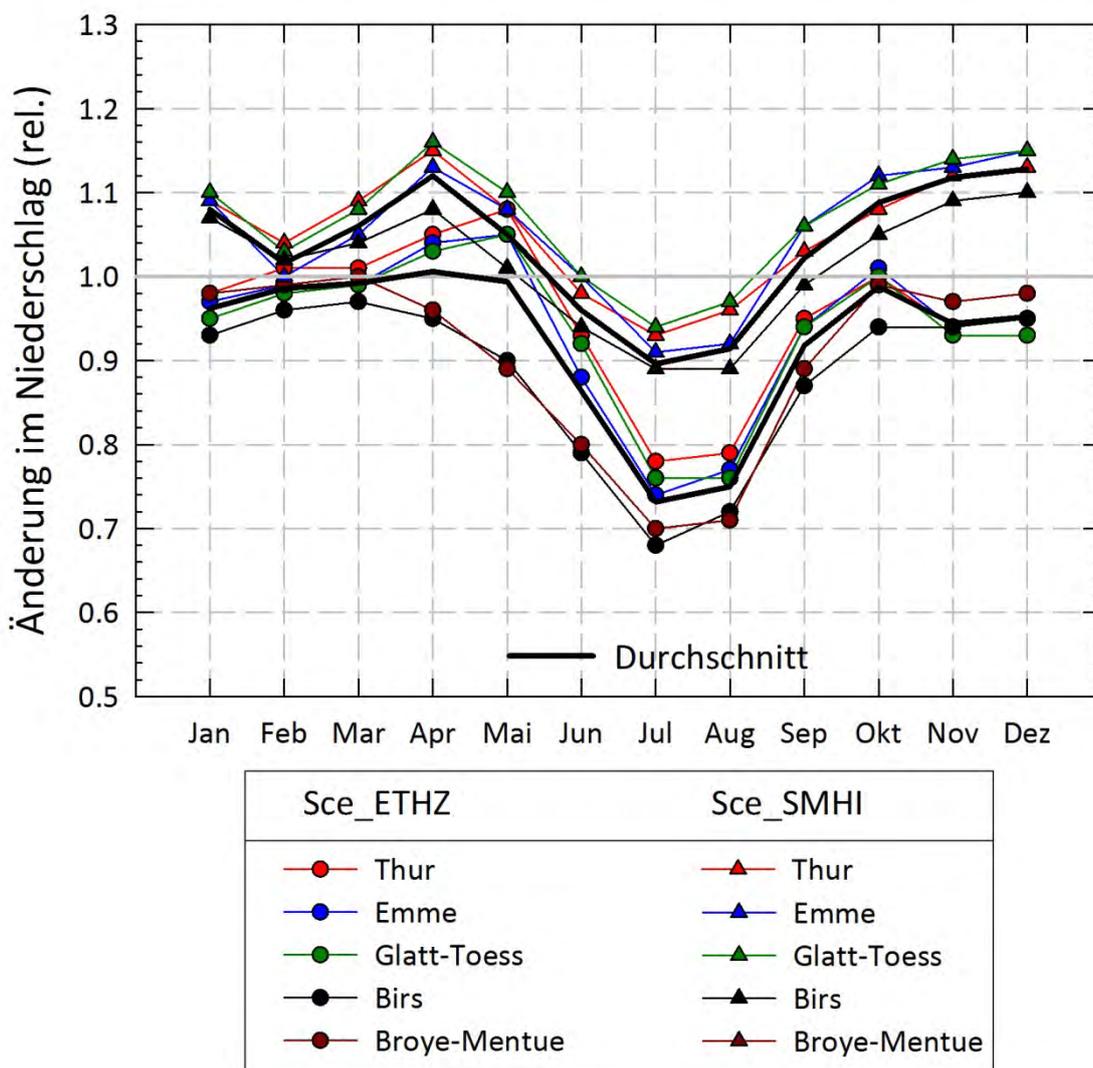
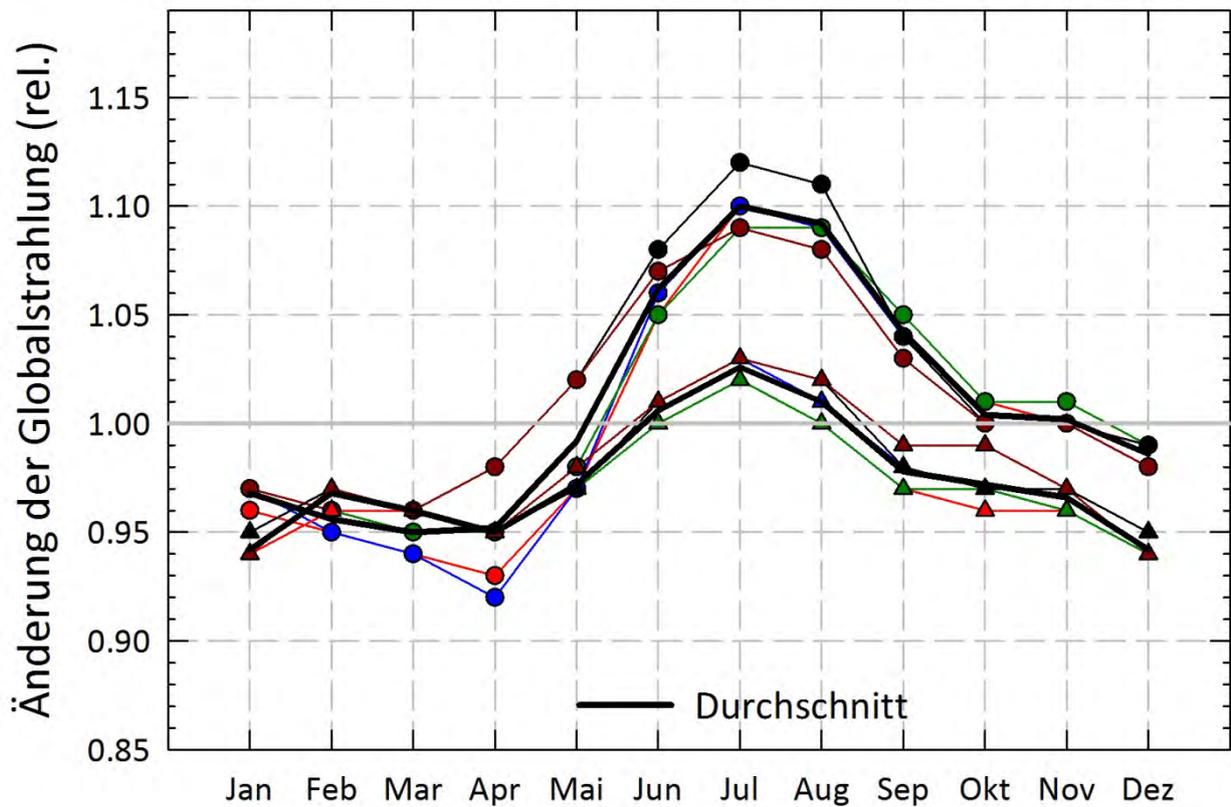


Abbildung 16: Monatsmittel der erwarteten Änderung im Niederschlag in den Hotspot-Gebieten für den Zeitraum 2036 bis 2065 aufgrund von zwei Klimaszenarien.

Die Prognosen zur Strahlungsänderung stellen einen weiteren wichtigen Input für die Berechnungen zum Bewässerungsbedarf unter zukünftigen Klimabedingungen dar. In beiden Szenarien wird von einem erhöhten Strahlungsgenuss in den Sommermonaten ausgegangen, wobei die Zunahme im ETHZ-Szenario deutlich stärker ausfällt (Abb. 17). Im Winter und Frühjahr wird in beiden Szenarien eine Strahlungsreduktion prognostiziert.



Scen ETHZ		Scen SMHI	
●	Thur	▲	Thur
●	Emme	▲	Emme
●	Glatt-Toess	▲	Glatt-Toess
●	Birs	▲	Birs
●	Broye-Mentue	▲	Broye-Mentue

Abbildung 17: Monatsmittel der erwarteten relativen Änderung der Globalstrahlung in den Hotspot-Gebieten für den Zeitraum 2036 bis 2065 aufgrund von zwei Klimaszenarien.

Interessant sind aber nicht nur die Veränderungen in den mittleren Werten für Temperatur und Niederschlag, sondern auch jene in der Länge der sogenannten Dry-Spells (Trockenphasen mit Tagen ohne nennenswerte Niederschläge) und Wet-Spells (Feuchtphasen mit Niederschlagstagen). Es ist allerdings zu beachten, dass bezüglich dieser Grössen die Ausgangsdaten aus den regionalen Klimamodellen noch deutlich unsicherer sind, als jene für die Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag.

Die abgebildeten Tendenzen lassen erkennen, dass mit ETHZ im Sommer in allen Regionen eine Zunahme der Trockenphasen von 20 bis 30 % erwartet wird, während mit SMHI im Sommer eine schwache Abnahme mit erkennbaren regionalen Unterschieden, und im Frühjahr eine deutliche Abnahme resultiert (Abb. 18). Für die Wintermonate nimmt mit beiden Szenarien dieser Parameter zu.

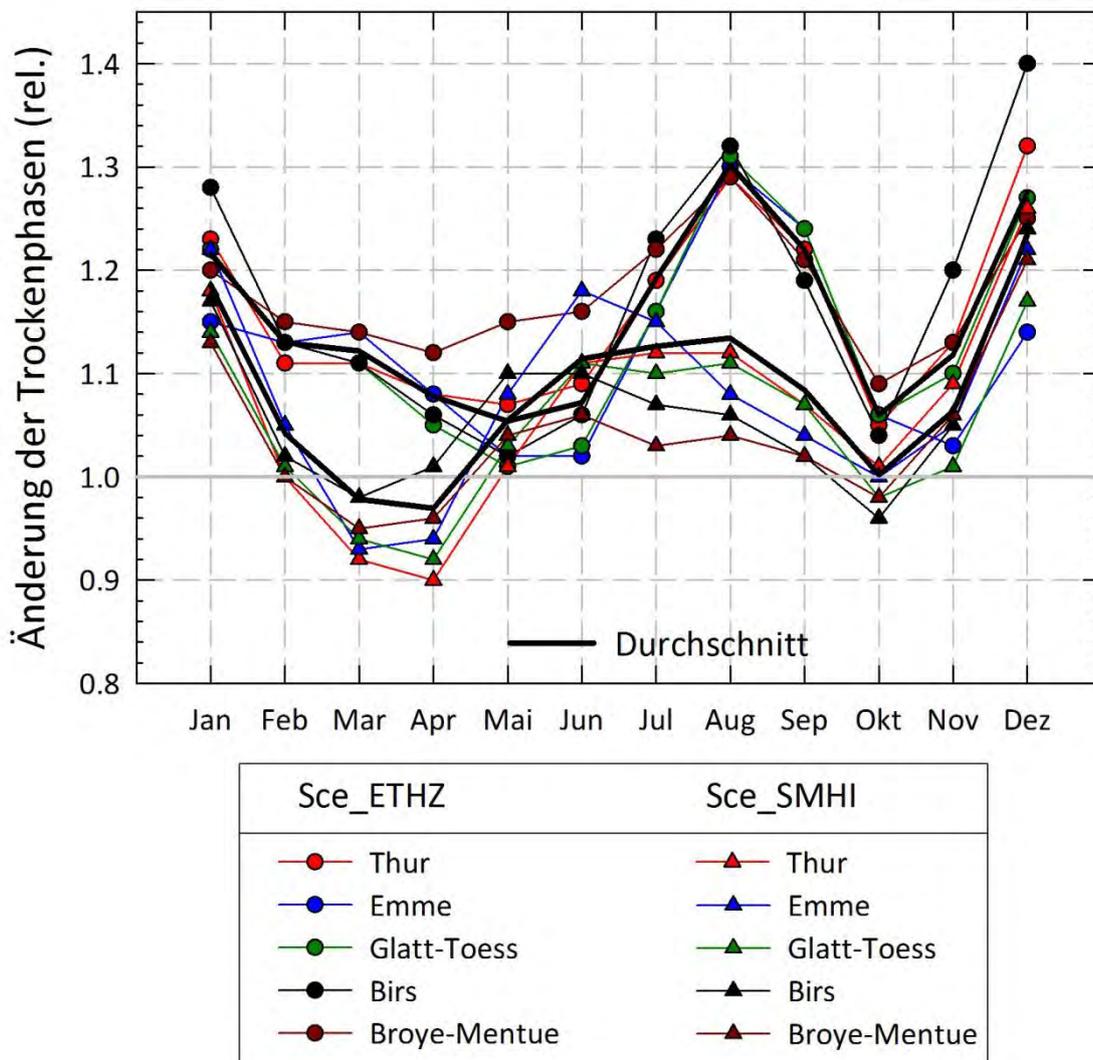


Abbildung 18: Monatsmittel der erwarteten relativen Änderung der Länge der Trockenphasen in den Hotspot-Gebieten für den Zeitraum 2036 bis 2065 aufgrund von zwei Klimaszenarien.

Im Falle der Feuchtphasen ergibt sich das umgekehrte Bild: die Abnahme im Sommer ist für ETHZ deutlich, für SMHI wenig ausgeprägt und sie fällt für die verschiedenen Regionen unterschiedlich stark aus (Abb. 19).

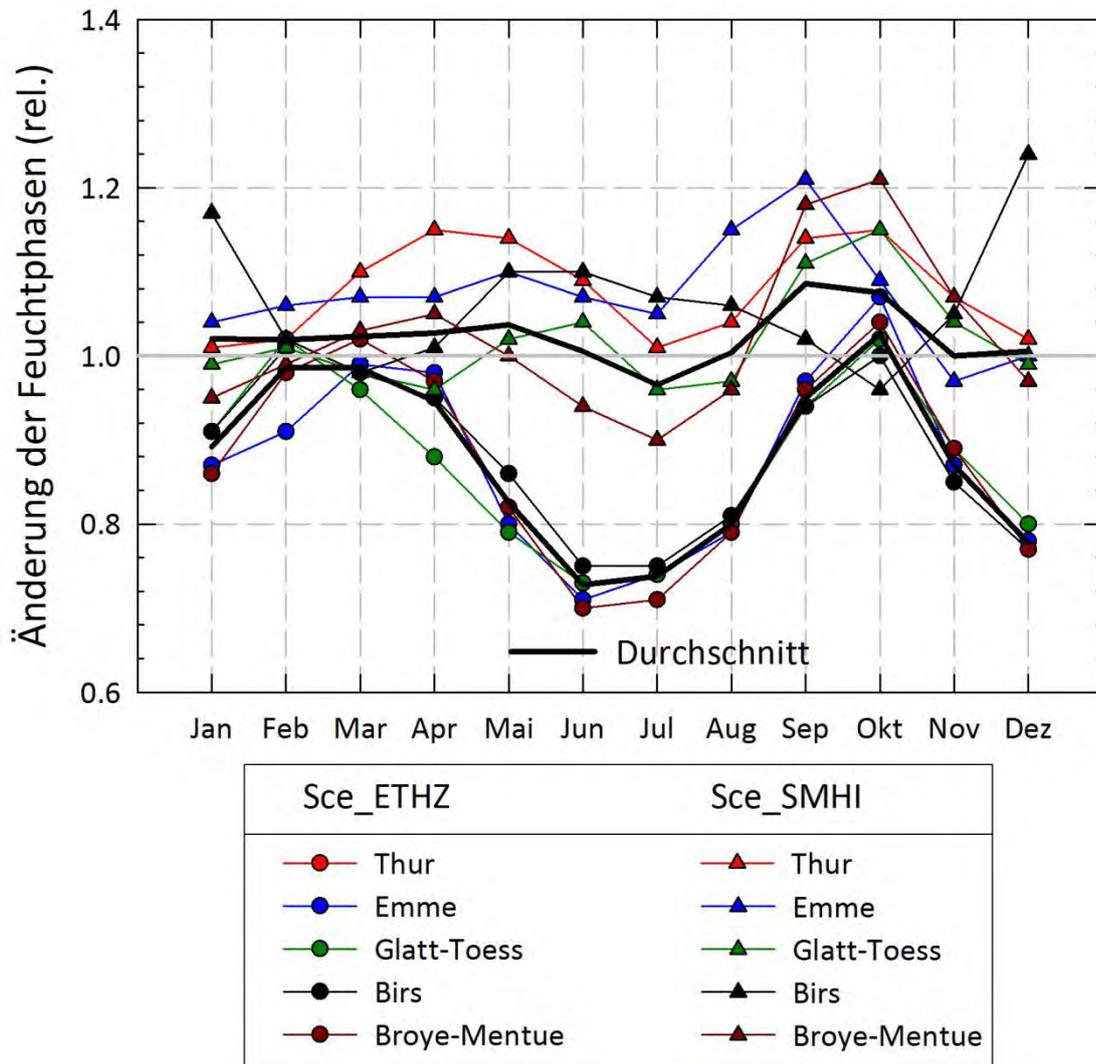


Abbildung 19: Monatsmittel der erwarteten relativen Änderung der Länge der Feuchtphasen in den Hotspot-Gebieten für den Zeitraum 2036 bis 2065 aufgrund von zwei Klimaszenarien.

6. Ergebnisse für Wasserbedarf und -dargebot in Hotspot-Regionen

6.1. Wasserbedarf für die Bewässerung

Der potentielle Wasserbedarf für die Bewässerung (ohne Berücksichtigung der Bewässerungseffizienz), das heisst die Menge Wasser, die zur Vermeidung von Ertragsverlusten potentiell notwendig wäre, ist für die ausgewählten Regionen aggregiert in Abbildung 20 dargestellt. Für die Referenzperiode liegen die Medianwerte im Bereich 1,2 (Thur) bis 5,4, (Broye-Mentue) und steigen für das ‚extreme‘ Szenario (ETHZ) um einen Faktor 4 bis über 5 an, mit dem stärksten Anstieg in der Region ‚Birs‘. Mit dem ‚milden‘ Szenario steigen die Bedarfswerte bis maximal 2,5 Mal höher. Der schwächste relative Anstieg wird für beide Szenarien für die Region ‚Broye-Mentue‘ berechnet.

Interessant sind auch die Extremwerte ausserhalb des 95%-Quantils. Die höchsten Werte sind rund zwei Mal höher als die höchsten der Referenzperiode. Die Werte (Median und Extremwerte) für das ‚milde‘ Szenario sind ebenfalls höher als jene der Referenzperiode, aber nur unwesentlich.

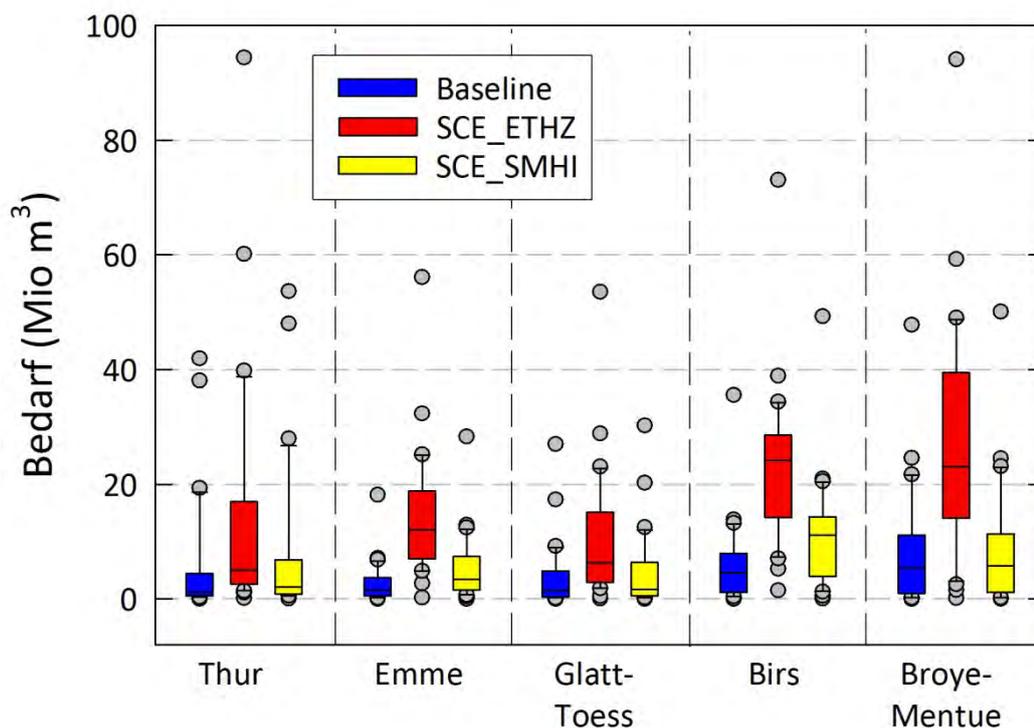


Abbildung 20: Mittlerer sommerlicher Bewässerungsbedarf (JJA) für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Hotspot-Gebiete; Ergebnisse für die Referenzperiode 1981 bis 2010 sowie für 2036 bis 2065 mit Hilfe der Klimaszenarien Sce_ETHZ und Sce_SMHI; dargestellt sind Median (50%-Quantil), 25/75%-Quantile (box), 10/90%-Quantile (whiskers), und Extremwerte (Punkte).

Die Daten in Abbildung 20 sind abhängig von der Grösse der Regionen. Bezogen auf die gesamte landwirtschaftliche Nutzfläche in den verschiedenen Regionen ergeben sich die Bedarfswerte über alle Nutzungskategorien in Tabelle 8. Diese liegen maximal bei gegen 100 mm in den Regionen ‚Birs‘ und ‚Broye-Mentue‘ für die Referenzperiode und gegen 200 mm mit dem ETHZ Szenario. In allen Regionen steigen die Maxima im ‚extremen‘ Szenario um einen Faktor von zirka 2.

Tabelle 8: Landwirtschaftlich genutzte Flächenanteile (LW) in den Hotspot-Gebieten und flächenbezogener Wasserbedarf für JJA: [18]+[19] Thur, [34] Emme, [20] Glatt-Töss, [37] Birs, [31] Broye-Mentue,

Gebiet		Thur	Emme	Glatt-Töss	Birs	Broye-Mentue
LW Nutzfläche	[ha]	100 600	49 100	35 800	38 200	50 600
<i>Referenzperiode</i>						
Median	[mm]	1	3	4	12	11
Maximum (2003)	[mm]	42	37	75	93	94
<i>Szenario SMHI 2050</i>						
Median	[mm]	2	7	5	29	11
Maximum	[mm]	54	56	84	129	99
<i>Szenario ETHZ 2050</i>						
Median	[mm]	5	25	17	63	46
Maximum	[mm]	94	114	150	191	186

Die Ergebnisse der Simulation des Dargebots (Gebietsabfluss) sind in Abbildung 21 dargestellt. Für die Referenzperiode ergibt sich eine bedeutende Jahr-zu-Jahr-Variabilität, die in den Szenario-Simulationen weitgehend erhalten bleibt. Interessant ist, dass die extrem tiefen Werte der Szenario-Simulationen – auch im Falle des extremen Szenarios – nur unwesentlich unter den tiefsten Abflussdaten der Referenzperiode liegen, die sich speziell auf das Jahr 2003 beziehen. Dagegen liegen die maximalen Abflussraten und die Medianwerte deutlich tiefer als in der Referenzperiode. Dies besagt, dass die Abflussraten in den Szenario-Simulationen generell tiefer liegen und auch die maximalen Abflussraten im Sommer nicht mehr erreicht werden.

Bezogen auf die Medianwerte der Referenzperiode ergeben sich für die ausgewählten Regionen die in Tabelle 9 zusammengefassten Reduktionen im Abflussvolumen. Diese liegen im Mittel aller Regionen bei 43 % für das ‚extreme‘ ETHZ Szenario und 12 % für das ‚milde‘ SMHI Szenario.

Tabelle 9: Relative Veränderung im simulierten Abflussvolumen relativ zur Referenzperiode für JJA: [18]+[19] Thur, [34] Emme, [20] Glatt-Töss, [37] Birs, [31] Broye-Mentue.

Gebiet		Thur	Emme	Glatt-Töss	Birs	Broye-Mentue
ETHZ 2050	[%]	34,1	52,3	34,5	51,2	39,6
SMHI 2050	[%]	10,1	19,8	3,5	24,4	3,7

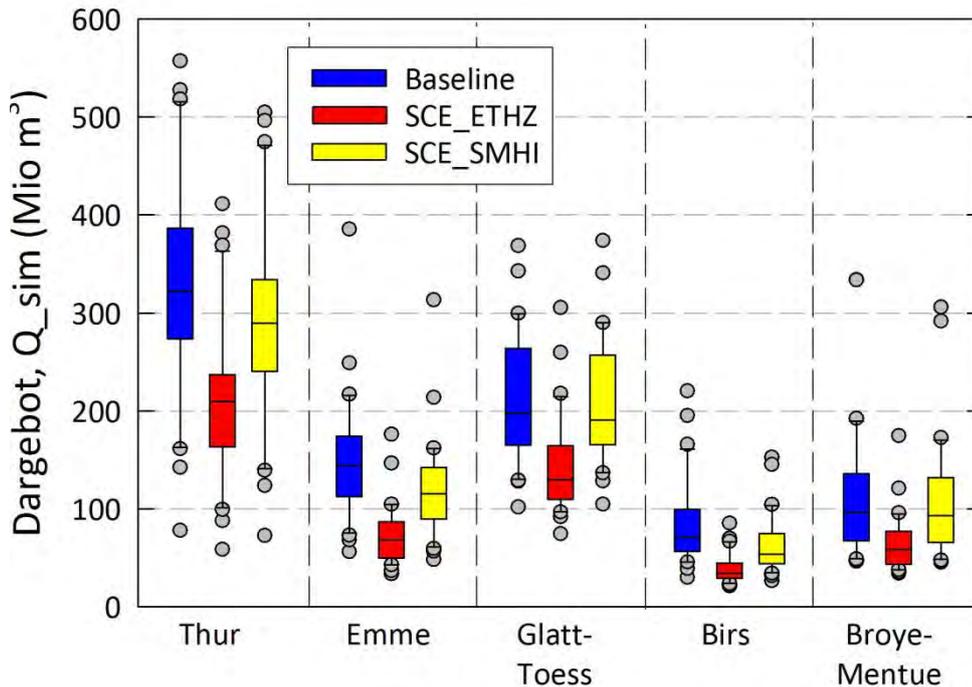


Abbildung 21: Mittleres sommerliches Dargebot (Abflussvolumen) an Bewässerungswasser (JJA) für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Hotspot-Gebiete; Ergebnisse für die Referenzperiode 1981 bis 2010 sowie für 2036 bis 2065 mit Hilfe der Klimaszenarien Sce_ETHZ und Sce_SMHI; dargestellt sind Median (50%-Quantil), 25/75%-Quantile (Box), 10/90%-Quantile (Whiskers) und Extremwerte (Punkte).

Der wichtigste Teil der Berechnungen betrifft das Verhältnis von Bedarf und Dargebot. Überschreitet dieses Verhältnis 100 %, so bedeutet dies, dass der potentielle Bedarf an Bewässerungswasser nicht mehr durch Entnahmen aus den Flüssen gedeckt werden kann. Dabei wird nicht berücksichtigt, dass für jedes Fließgewässer eine minimale Restwassermenge eingehalten werden muss, das heisst, dass die verfügbare Menge geringer ist, als jene, die hier in die Berechnung eingeflossen ist. Andererseits stellen die berechneten Bedarfswerte eine Obergrenze dar, die in der Praxis kaum erreicht wird, da nicht alle Kulturen bewässerungswürdig sind. Die Ergebnisse sollten dementsprechend nicht in ihrer Absolutheit, sondern eher als eine Art Risikoanalyse betrachtet werden.

Die Ergebnisse in Abbildung 22 zeigen, dass in der Mehrzahl der Jahre (Medianwert) in allen Regionen die Marke von 100 % nicht überschritten wird, auch nicht in den Szenario-Simulationen. Einzelne kritische Jahre während der Referenzperiode treten in den Regionen ‚Birs‘ und ‚Broye-Mentue‘ auf und reflektieren die Situation im Jahr 2003. In den Simulationen mit dem ‚extremen‘ Szenario (ETHZ) nimmt die Häufigkeit der Überschreitungen deutlich zu, insbesondere in den beiden oben erwähnten Regionen. In der Region ‚Glatt-Töss‘ bleiben die Werte aber weiterhin unterhalb der 100%-Marke.

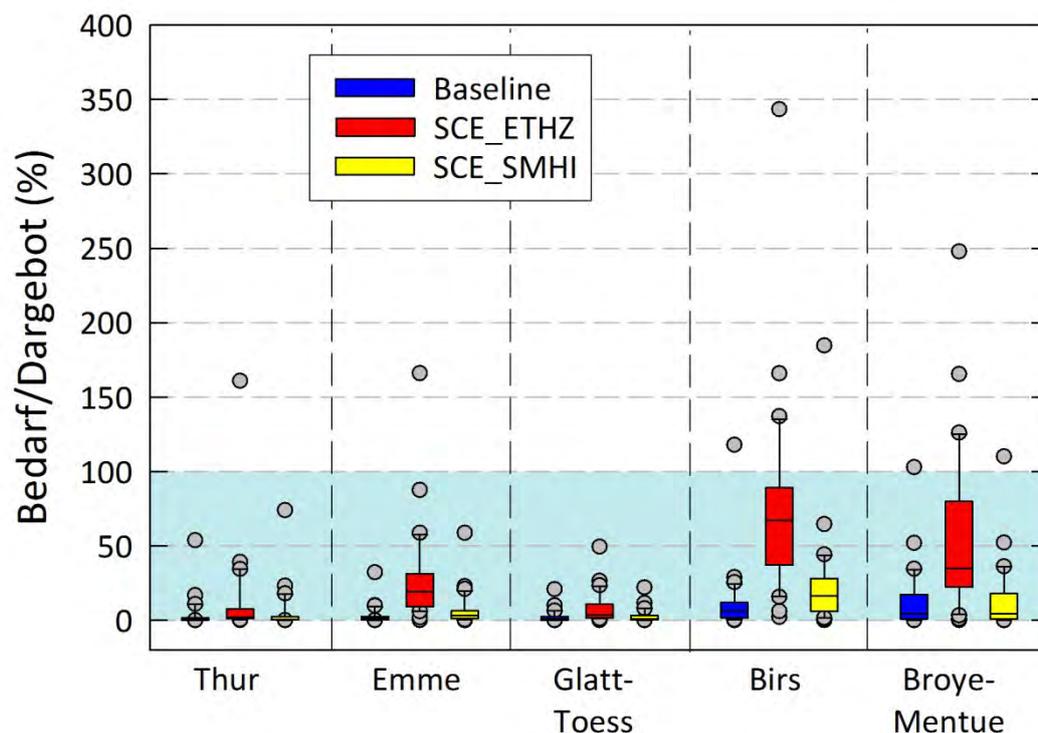


Abbildung 22: Mittleres Verhältnis von Bewässerungsbedarf und Dargebot im Sommer (JJA) für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Hotspot-Gebiete; Ergebnisse für die Referenzperiode 1981 bis 2010 sowie für 2036 bis 2065 mit Hilfe der Klimaszenarien Sce_ETHZ und Sce_SMHI; dargestellt sind Median (50%-Quantil), 25/75%-Quantile (box), 10/90%-Quantile (whiskers) und Extremwerte (Punkte). Der blau hinterlegte Abschnitt markiert den Wertebereich unter 100 %.

Die 100%-Marke wird in den 30 Jahren mit dem ETHZ Szenario in den Regionen ‚Thur‘ und ‚Emme‘ in einem Jahr überschritten, in der Region ‚Glatt-Töss‘ nie – trotz hoher Bedarfswerte –, und in den Regionen ‚Birs‘ und ‚Broye-Mentue‘ 5 beziehungsweise 6 Mal. Letzteres entspricht einem Risiko von 17 und 20 %.

7. Zusammenfassung und Bewertung

In der vorliegenden Studie wurden zeitlich und regional differenzierte Bilanzierungen zum potentiellen, landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarf durchgeführt. Dazu wurden zunächst mit Hilfe des Modells WaSiM-ETH mehrere Flussgebiete der Schweiz (Testregionen) eingehend hinsichtlich ihres Bewässerungsanspruchs untersucht. Die Modellrechnungen erfolgten räumlich hochaufgelöst (500 x 500 Meter) und als kontinuierliche Tageswertsimulationen über die Periode 1981 bis 2010 und unter Verwendung – soweit vorhanden – der aktuellsten Arealstatistik. Der gebietspezifisch ermittelte Bewässerungsbedarf wurde anschliessend mit einem multiplen Regressionsansatz auf die gesamte Landwirtschaftsfläche der Schweiz extrapoliert und für insgesamt 39 unterschiedliche Regionen (Einzugsgebiete) ausgewertet. Um mögliche Problemregionen identifizieren zu können, wurde ein Vergleich zwischen dem ermittelten, regionalen Bewässerungsbedarf und dem verfügbaren Wasserdargebot durchgeführt. Aus Gründen der Datenverfügbarkeit wurde das Dargebot der Regionen vereinfachend mit der Wasserführung in den Flüssen gleichgesetzt (ohne Berücksichtigung von Seen oder Grundwasserreservoirs). Die statistische und graphische Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass in Trockenjahren wie 2003 verschiedene Regionen (insbesondere das Broye-Mentue-Gebiet) auch ohne Berücksichtigung von möglichen Verlusten (= 100 % Effizienz der Bewässerung) und Restwassermengen Probleme in der Deckung ihres landwirtschaftlichen Wasserbedarfes bekommen könnten.

In einem Folgeschritt wurden fünf Regionen mit einem erhöhten Risikopotenzial ausgeschieden und nach einer teilweisen Anpassung ihrer Gebietsgrenzen die Bedarfsrechnungen erneut durchgeführt. Die Simulationen erfolgten sowohl für die Referenzperiode 1981 bis 2010 als auch für die Periode 2036 bis 2065. Dazu wurden zwei Klimaszenarien eingesetzt, die eine obere und eine untere Grenze der möglichen Klimaentwicklungen darstellen. Die Ergebnisse wurden speziell für die Sommermonate ausgewertet (Juni-August), für welche die grössten Konflikte erwartet werden. Dabei darf aber nicht vergessen werden, dass auch in Frühlingsmonaten Wasserknappheit möglich ist, wie dies zum Beispiel 2011 in einzelnen Regionen der Fall war.

Die Ergebnisse zeigen, dass besonders in den Regionen Broye-Mentue und Birs das bereits während der Referenzperiode bestehende Risiko einer Überschreitung des Dargebots durch den Bedarf mit dem Klimawandel weiter zunimmt. Im ‚extremen‘ Fall (wärmeres und trockeneres Szenario) tritt diese Überschreitung statistisch gesehen in jedem 5. beziehungsweise 6. Jahr auf, was einem Risiko von 17 und 20 % entspricht. Die Zunahme in allen Regionen ist bedingt durch den steigenden Wasserbedarf der Kulturen in einem wärmeren und strahlungsreicheren Klima, sowie durch die Abnahme des Abflussvolumens aufgrund abnehmender Niederschläge.

Diese Zunahme des Risikos legt nahe, dass in den besonders betroffenen Regionen vorsorgliche Massnahmen notwendig werden, um Konflikte in extremen Jahren zu minimieren. Dazu gehören Anpassungen bei der Bewirtschaftung (u. a. Kulturen-, Sorten- und Standortwahl, Bodenbearbeitung) oder im Bereich der Infrastruktur (u. a. Zuleitungen) für zusätzliche Bewässerung mit Wasser aus grösseren Reservoirs (Seen, grosse Flüsse). Eine eingehende Betrachtung solcher Massnahmen war aber nicht Teil dieser Studie.

Die Ergebnisse der Berechnungen unterliegen allerdings verschiedenen Einschränkungen und Unsicherheiten. Dazu gehören insbesondere folgende Aspekte:

- Keine kulturartenspezifischen Parameterwerte für die Berechnung von Bodenwasserdynamik und Bewässerungssteuerung, das heisst mittlere Werte zur phänologischen Beschreibung des Bewuchses von Acker- und Grasland sowie von Obstanbauflächen;
- Unsicherheiten bei den Bodeneigenschaften (Ableitungen der Modellparameter aus der Bodeneignungskarte als einzige landesweite Kartengrundlage mit Informationen zum Boden und Untergrund);
- Unsicherheiten bei der Simulation des Gebietswasserhaushalts aufgrund fehlender Angaben zu anthropogenen Eingriffen (z. B. Wasserentnahmen, Seen- und Speicherbewirtschaftung);
- Unsicherheiten bei den Klimaszenarien;
- Vereinfachte Annahmen in den Szenarien-basierten Modellrechnungen (z. B. keine Berücksichtigung zukünftiger Veränderungen im Landschaftsbild wie der landwirtschaftlichen Nutzflächenverteilung).

Zudem ist zu beachten, dass es sich um Schätzungen eines ‚potentiellen‘ Bewässerungsbedarfs‘ handelt. Genauere Abschätzungen des ‚aktuellen‘ Bewässerungsbedarfs wären unter Verwendung kulturspezifischer Inputdaten möglich und müssten sich auf die bewässerungswürdigen Kulturen beschränken. Die Ergebnisse sollten dementsprechend nicht in ihrer Absolutheit, sondern eher als Risikobetrachtung verwendet werden.

Trotz dieser Einschränkungen ergeben sich aus den Ergebnissen verschiedene Erkenntnisse, die für die weitere Diskussion möglicher Massnahmen im Bereich der Gewässerbewirtschaftung und insbesondere der landwirtschaftlichen Ansprüche wertvoll sind.

8. Literatur

- Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005). Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. verbesserte und erweiterte Auflage. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2011). EZGG-CH – Einzugsgebietsgliederung Schweiz. Produktdokumentation, Bern.
- BFS (Bundesamt für Statistik) (2004). Bodennutzung im Wandel: Arealstatistik der Schweiz, Neuchâtel.
- BLW (Bundesamt für Landwirtschaft) (2007). Stand der Bewässerungen in der Schweiz – Bericht zur Umfrage 2006, Bern.
- Carsel R.F. & Parrish R.S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24, S. 755–769.
- CH2011 (2011). Swiss Climate Change Scenarios CH2011. Hrsg. C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate und OcCC, Zürich, 88 S. (ISBN: 978-3-033-03065-7).
- Christensen J.H., Kjellström E., Giorgi F., Lenderink G. & Rummukainen M. (2010). Weight assignment in regional climate models. *Clim Res* 44: 179–194 [doi: 10.3354/cr00916].
- Fuhrer J. (2010). Abschätzung des Bewässerungsbedarfes in der Schweizer Landwirtschaft. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), 26 S.
- Fuhrer J. & Jasper K. (2009). Bewässerungsbedürftigkeit in der Schweiz. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich, 74 S.
- Nash J.E. & Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290.
- Nakicenovic N. & Swart R. (2000). IPCC Special Report on Emission Scenarios, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 570 pp.
- OcCC (Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Hrsg.) (2007). Klimaänderung und die Schweiz 2050: Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. 173 S.
- Renger D., Bohne K., Facklam M., Harrach T., Riek W., Schäfer W., Wessolek G. & Zacharias S. (2008). Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe „Kennwerte des Bodengefüges“ zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte, Berlin, 51 S.
- Schlichting E. & Blume H.P. (1966). Bodenkundliches Praktikum. P. Parey, Hamburg, 209 S.
- Schulla J. (1997). Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. *Zürcher Geographische Schriften* 69, ETH Zürich.
- Schulla J. & Jasper K. (2007). Model description WaSiM-ETH [verfügbarer Download unter: http://www.wasim.ch/wasim/products/wasim_description.htm].
- SGHL (Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie) & CHy (Hydrologische Kommission) (2011). Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung: Synthesebericht. In: Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 38, Bern.
- swisstopo (Bundesamt für Landestopografie) (2004). RIMINI – Das preisgünstige digitale Höhenmodell der ganzen Schweiz, Wabern.
- van der Linden P. & Mitchell J.F.B. (eds.; 2009). ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Fitz Roy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160 pp.
- Van Genuchten M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 44 (5), S. 892–898.

9. Anhang

9.1. A1 Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Landwirtschaftlich genutzte Flächenanteile (LW) in den Testgebieten	9
Tabelle 2: Monatlicher Bewässerungsbedarf für die landwirtschaftlichen Nutzflächen (ohne Teilkomponenten) in den Testgebieten; Mittelwerte für den Zeitraum 1981 bis 2010 und für das Trockenjahr 2003 (alle Angaben in Mio. m ³)	11
Tabelle 3: Extrapolation der gebietsbezogenen Bewässerungsmengen auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz (alle Angaben in Mio. m ³).....	12
Tabelle 4: Angaben zu den ausgewählten Regionen (LW: Landwirtschaftsfläche).....	14
Tabelle 5: Mittlerer regionaler Bewässerungsbedarf für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz in der Periode 1981 bis 2010 (alle Angaben in Mio. m ³)	17
Tabelle 6: Regionaler Bewässerungsbedarf für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz im Trockenjahr 2003 (alle Angaben in Mio. m ³).....	18
Tabelle 7: Landwirtschaftlich genutzte Flächenanteile (LW) in den Hotspot-Gebieten: [18]+[19] Thur, [20] Glatt-Töss, [31] Broye-Mentue, [34] Emme, [37] Birs.....	24
Tabelle 8: Landwirtschaftlich genutzte Flächenanteile (LW) in den Hotspot-Gebieten und flächenbezogener Wasserbedarf für JJA: [18]+[19] Thur, [34] Emme, [20] Glatt-Töss, [37] Birs, [31] Broye-Mentue,	34
Tabelle 9: Relative Veränderung im simulierten Abflussvolumen relativ zur Referenzperiode für JJA: [18]+[19] Thur, [34] Emme, [20] Glatt-Töss, [37] Birs, [31] Broye-Mentue.....	34

9.2. A2 Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1: Definition der Bewässerungsmenge in Abhängigkeit von Transpiration und Bodenwassergehalt. nFK = nutzbare Feldkapazität; DW = Drän- oder Gravitationswasser, θ_{WP} = Wassergehalt beim Welkepunkt, θ_{FK} = Wassergehalt bei Feldkapazität, θ_{sat} = Wassergehalt bei Sättigung, $\Delta\theta$ = Bewässerungsbedarf, HReduDry = Grenzwert für den Beginn von Trockenstress, TReduWet = Grenzwert für den Beginn von Nässestress (infolge von Sauerstoffmangel).....	8
Abbildung 2: Lage der Untersuchungsgebiete in der Schweiz (aus Fuhrer & Jasper 2009).....	9
Abbildung 3: Aktueller Stand der Datenerhebung für Arealstatistik 2004/09 (Quelle: Bundesamt für Statistik BFS, www.bfs.admin.ch)	10
Abbildung 4: Lage und ID der ausgegrenzten Regionen und zugehörige Abflussstationen (Kreissymbol).....	13
Abbildung 5: Mittlerer jährlicher Bewässerungsbedarf in der Schweizer Landwirtschaft für die Periode 1981 bis 2010 (mit Regionsbezeichnung).....	15
Abbildung 6: Bewässerungsbedarf in der Schweizer Landwirtschaft im Trockenjahr 2003 (mit Regionsbezeichnung).....	16
Abbildung 7: Monatliche Werte zum Bewässerungsbedarf und zum Dargebot (Abfluss) für ausgewählte Regionen; jeweils für die Periode 1981 bis 2010 (Balken) und für das Trockenjahr 2003 (Linie).....	19
Abbildung 8: Das Verhältnis von Bedarf und Dargebot (JJA) für alle Einzugsgebiete im Mittel (1981–2010) und für 2003, angeordnet nach der Grösse des mittleren Verhältnisses (Einzugsgebietsnummern gem. Tab. 4).	20
Abbildung 9: Verteilung des Verhältnisses von Bewässerungsbedarf und Dargebot (Abflussvolumen) für die Sommermonate (JJA) der Periode 1981 bis 2010 (mit Regionsbezeichnung)	21
Abbildung 10: Regionale Verteilung des Verhältnisses von Bewässerungsbedarf und Dargebot (Abflussvolumen) im Sommer (JJA) des Jahres 2003 (mit Regionsbezeichnung).....	21

Abbildung 11: Regionale Verteilung des Bewässerungsbedarfs für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für das Trockenjahr 2003 (mit Regionsbezeichnung)	22
Abbildung 12: Lage der ausgewählten Hotspot-Regionen ([18]+[19] Thur, [20] Glatt-Töss, [31] Broye-Mentue, [34] Emme, [37] Birs)	23
Abbildung 13: Vergleich von beobachteten und simulierten Abflüssen in den ausgewählten Regionen für die Sommermonate (JJA)	25
Abbildung 14: Emissionsszenarien zur Klimaänderung in der Schweiz (CH2011 2011).....	26
Abbildung 15: Monatsmittel der erwarteten Temperaturänderung in den Hotspot-Gebieten für den Zeitraum 2036 bis 2065 aufgrund von zwei Klimaszenarien	28
Abbildung 16: Monatsmittel der erwarteten Änderung im Niederschlag in den Hotspot-Gebieten für den Zeitraum 2036 bis 2065 aufgrund von zwei Klimaszenarien	29
Abbildung 17: Monatsmittel der erwarteten relativen Änderung der Globalstrahlung in den Hotspot-Gebieten für den Zeitraum 2036 bis 2065 aufgrund von zwei Klimaszenarien	30
Abbildung 18: Monatsmittel der erwarteten relativen Änderung der Länge der Trockenphasen in den Hotspot-Gebieten für den Zeitraum 2036 bis 2065 aufgrund von zwei Klimaszenarien	31
Abbildung 19: Monatsmittel der erwarteten relativen Änderung der Länge der Feuchtphasen in den Hotspot-Gebieten für den Zeitraum 2036 bis 2065 aufgrund von zwei Klimaszenarien	32
Abbildung 20: Mittlerer sommerlicher Bewässerungsbedarf (JJA) für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Hotspot-Gebiete; Ergebnisse für die Referenzperiode 1981 bis 2010 sowie für 2036 bis 2065 mit Hilfe der Klimaszenarien Sce_ETHZ und Sce_SMHI; dargestellt sind Median (50%-Quantil), 25/75%-Quantile (box), 10/90%-Quantile (whiskers), und Extremwerte (Punkte)	33
Abbildung 21: Mittleres sommerliches Dargebot (Abflussvolumen) an Bewässerungswasser (JJA) für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Hotspot-Gebiete; Ergebnisse für die Referenzperiode 1981 bis 2010 sowie für 2036 bis 2065 mit Hilfe der Klimaszenarien Sce_ETHZ und Sce_SMHI; dargestellt sind Median (50%-Quantil), 25/75%-Quantile (Box), 10/90%-Quantile (Whiskers) und Extremwerte (Punkte)	35
Abbildung 22: Mittleres Verhältnis von Bewässerungsbedarf und Dargebot im Sommer (JJA) für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Hotspot-Gebiete; Ergebnisse für die Referenzperiode 1981 bis 2010 sowie für 2036 bis 2065 mit Hilfe der Klimaszenarien Sce_ETHZ und Sce_SMHI; dargestellt sind Median (50%-Quantil), 25/75%-Quantile (box), 10/90%-Quantile (whiskers) und Extremwerte (Punkte). Der blau hinterlegte Abschnitt markiert den Wertebereich unter 100 %.....	36
Abbildung 23: Monatliche Werte zum Bewässerungsbedarf und zum Dargebot (Abfluss) für die Regionen 1 bis 8; jeweils für die Periode 1981–2010 (Balken) und für das Trockenjahr 2003 (Linie).....	42
Abbildung 24: Monatliche Werte zum Bewässerungsbedarf und zum Dargebot (Abfluss) für die Regionen 9 bis 16; jeweils für die Periode 1981–2010 (Balken) und für das Trockenjahr 2003 (Linie).....	43
Abbildung 25: Monatliche Werte zum Bewässerungsbedarf und zum Dargebot (Abfluss) für die Regionen 17 bis 24; jeweils für die Periode 1981–2010 (Balken) und für das Trockenjahr 2003 (Linie).....	44
Abbildung 26: Monatliche Werte zum Bewässerungsbedarf und zum Dargebot (Abfluss) für die Regionen 25 bis 32; jeweils für die Periode 1981–2010 (Balken) und für das Trockenjahr 2003 (Linie).....	45
Abbildung 27: Monatliche Werte zum Bewässerungsbedarf und zum Dargebot (Abfluss) für die Regionen 33 bis 39; jeweils für die Periode 1981–2010 (Balken) und für das Trockenjahr 2003 (Linie).....	46

9.3. B1 – Regionaler Vergleich zwischen Bewässerungsbedarf und Dargebot

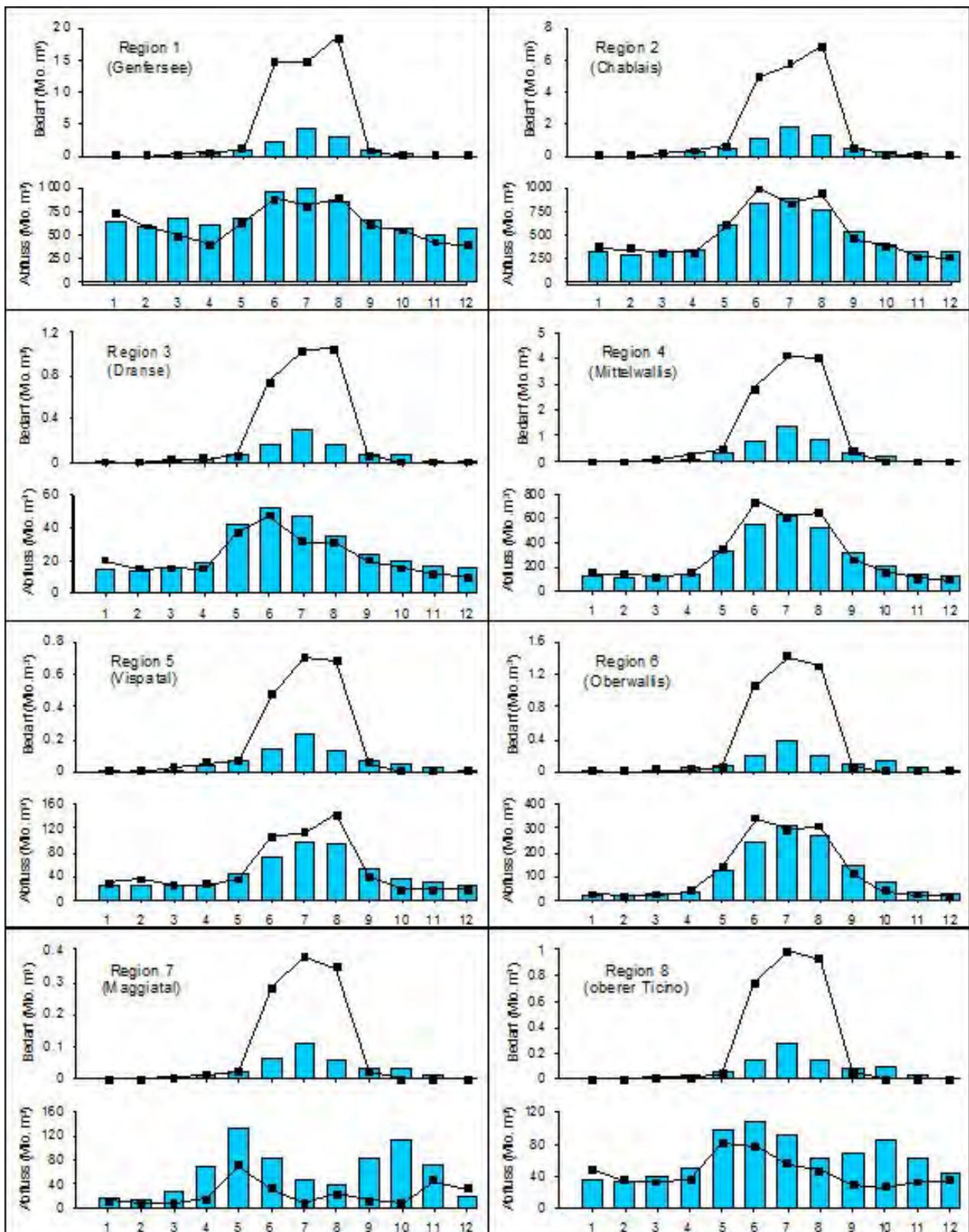


Abbildung 23: Monatliche Werte zum Bewässerungsbedarf und zum Dargebot (Abfluss) für die Regionen 1 bis 8; jeweils für die Periode 1981–2010 (Balken) und für das Trockenjahr 2003 (Linie)

9.4. B2 – Regionaler Vergleich zwischen Bewässerungsbedarf und Dargebot

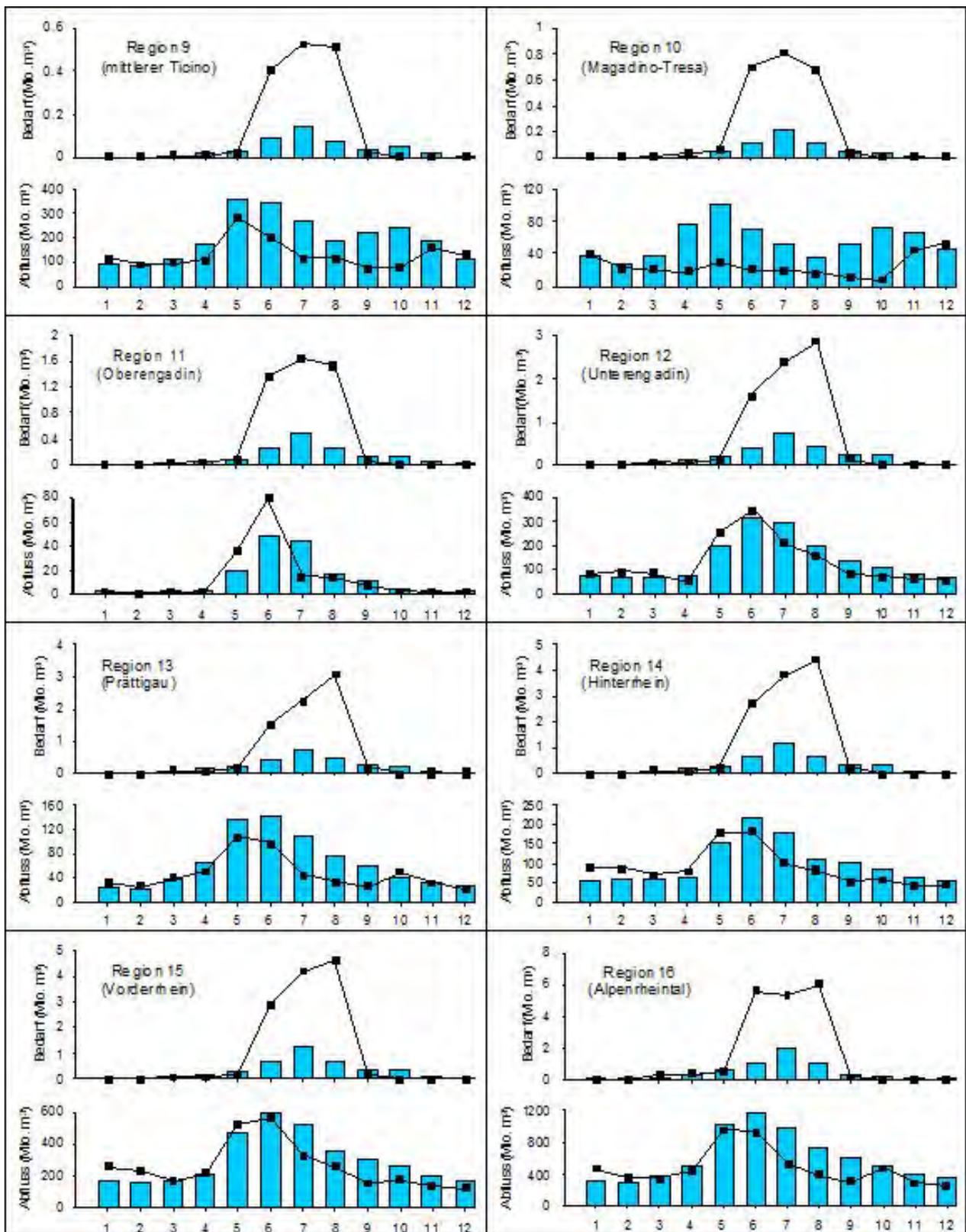


Abbildung 24: Monatliche Werte zum Bewässerungsbedarf und zum Dargebot (Abfluss) für die Regionen 9 bis 16; jeweils für die Periode 1981–2010 (Balken) und für das Trockenjahr 2003 (Linie)

9.5. B3 – Regionaler Vergleich zwischen Bewässerungsbedarf und Dargebot

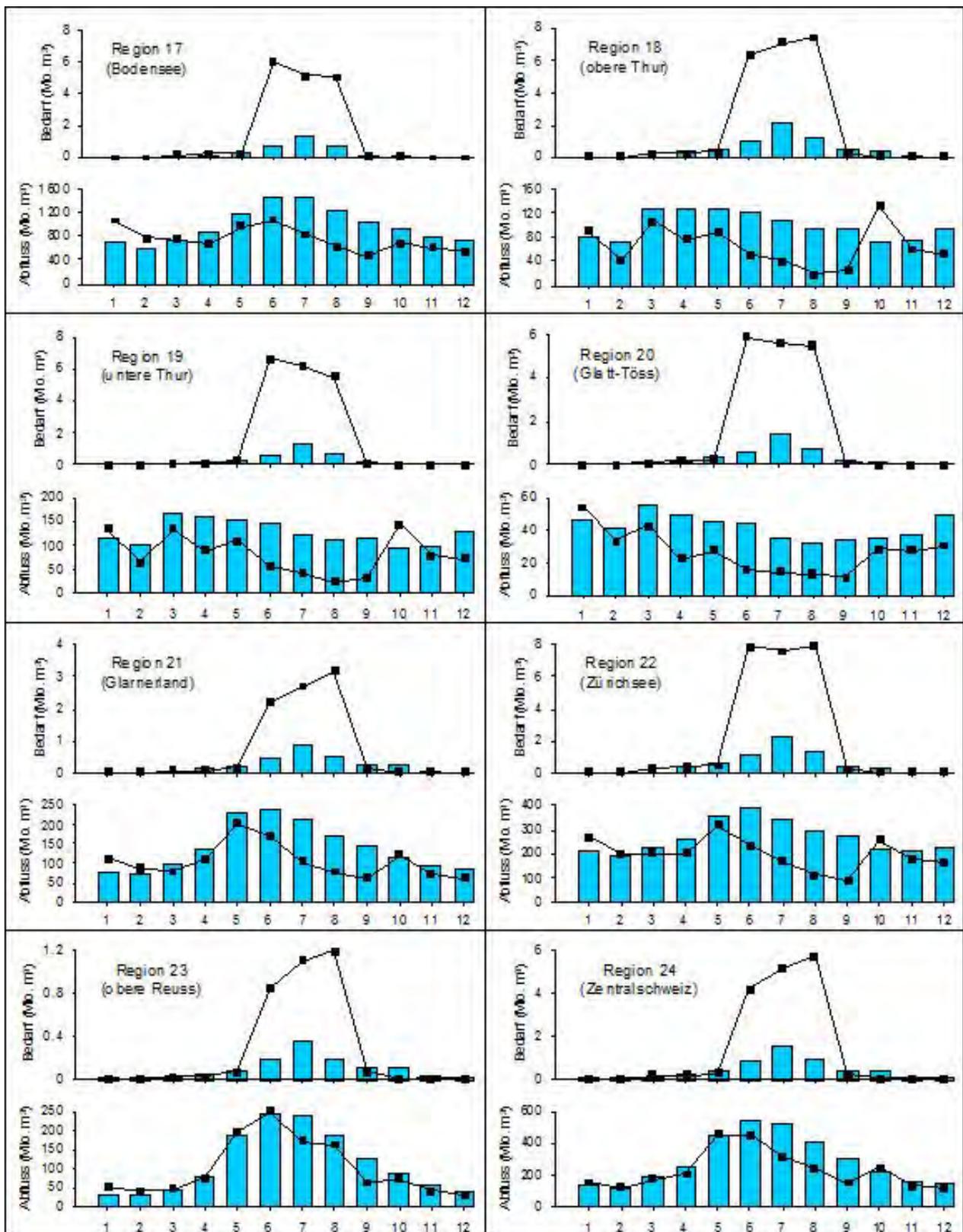


Abbildung 25: Monatliche Werte zum Bewässerungsbedarf und zum Dargebot (Abfluss) für die Regionen 17 bis 24; jeweils für die Periode 1981–2010 (Balken) und für das Trockenjahr 2003 (Linie)

9.6. B4 – Regionaler Vergleich zwischen Bewässerungsbedarf und Dargebot

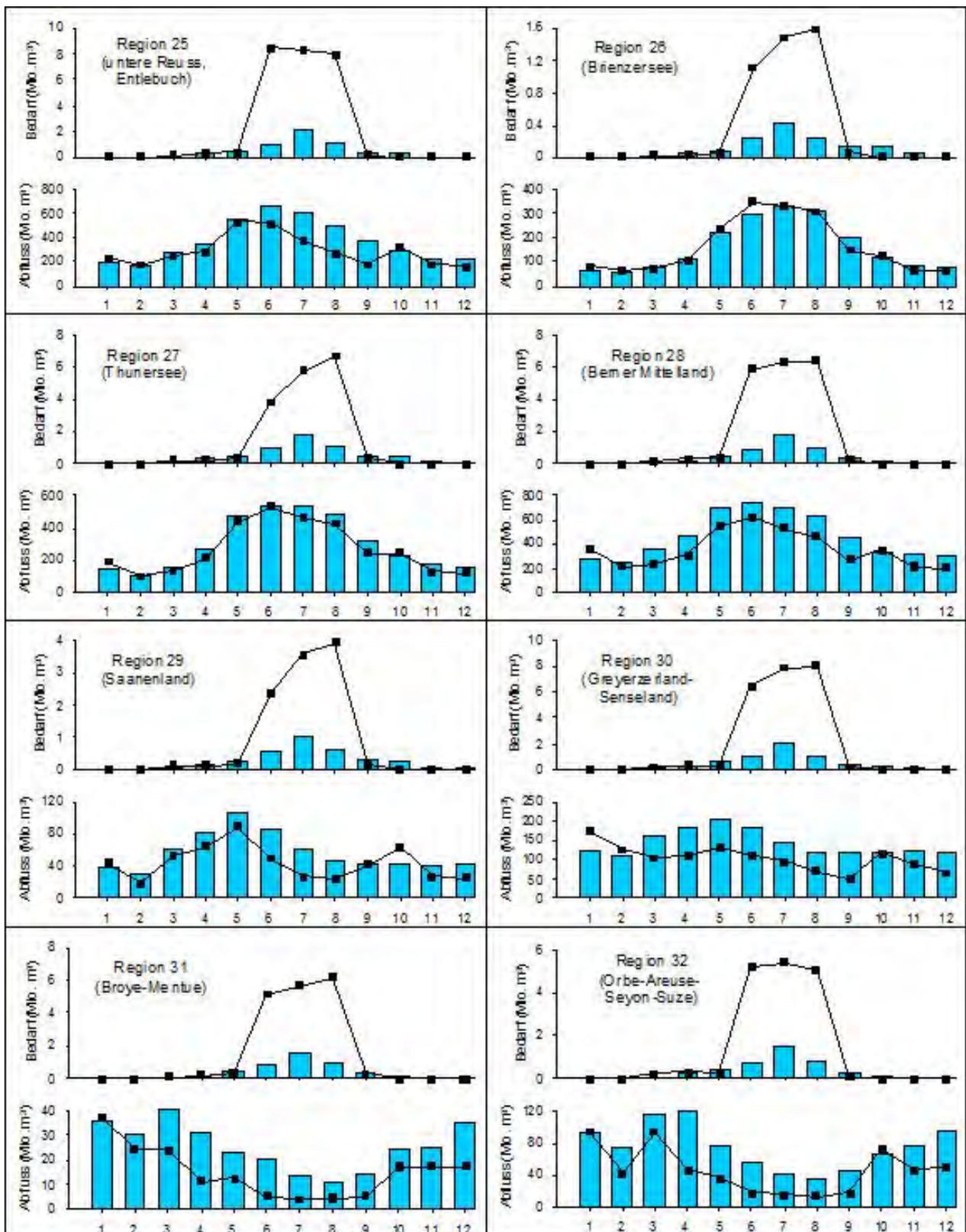


Abbildung 26: Monatliche Werte zum Bewässerungsbedarf und zum Dargebot (Abfluss) für die Regionen 25 bis 32; jeweils für die Periode 1981–2010 (Balken) und für das Trockenjahr 2003 (Linie)

9.7. B5 – Regionaler Vergleich zwischen Bewässerungsbedarf und Dargebot

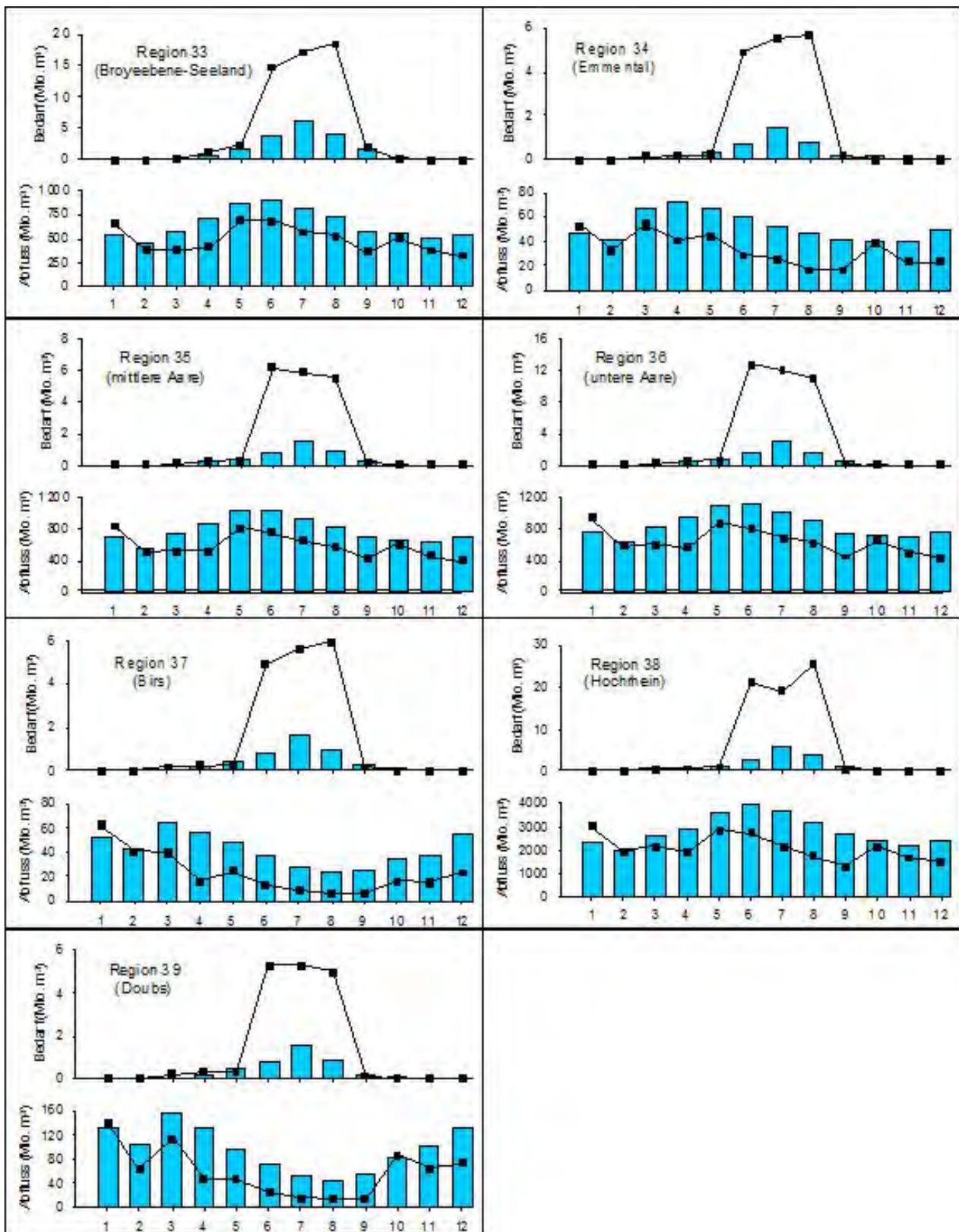


Abbildung 27: Monatliche Werte zum Bewässerungsbedarf und zum Dargebot (Abfluss) für die Regionen 33 bis 39; jeweils für die Periode 1981–2010 (Balken) und für das Trockenjahr 2003 (Linie)

