



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement EVD

Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART

Forschungsgruppe Lufthygiene/Klima

Abschätzung des Bewässerungsbedarfs in der Schweizer Landwirtschaft

Jürg Fuhrer



**- Abschlussbericht -
8. März 2010**

Projekt: Studie Bewässerungsbedarf in der Schweiz (BB-CH, Teil 2)

Berichtszeitraum: 01.10.2009 – 28.02.2010

Auftraggeber: Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) und die Kantone BE, LU, FR, AG, VD, VS, GE und ZH vertreten durch Dr. Fritz Zollinger, Amt für Landwirtschaft, Zürich

Auftragnehmer: Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART)
Forschungsbereich Umweltressourcen und Landwirtschaft
Forschungsgruppe Lufthygiene / Klima

Ansprechpartner: Herr Prof. Dr. Jürg Fuhrer
Tel.: +41 (0)44 377 75 05
Fax: +41 (0)44 377 72 01
eMail: juerg.fuhrer@art.admin.ch

Inhalt

	Seite
Zusammenfassung	4
1 Einleitung	5
2 Verwendete Methoden der Bewässerung.....	6
2.1 Bewässerung nach ET/ETP-Schwellwertmethode	6
2.2 Bewässerung nach Grenzwerten der Bodensaugspannung.....	8
2.3 Weitere Anmerkungen zum gewählten Setup der Bewässerungssteuerung.....	9
2.4 Einfluss der Bodenart auf die Bewässerungsmenge	10
3 Ergebnisse in den Testgebieten.....	12
4 Extrapolation der gebietsspezifischen Ergebnisse.....	16
5 Diskussion und Ausblick.....	21
6 Literatur.....	23
ANHANG.....	25
A1 Tabellenverzeichnis	25
A2 Abbildungsverzeichnis	25

Zusammenfassung

Die Landwirtschaft in der Schweiz sieht sich im Hinblick auf den weiter voranschreitenden Klimawandel mit einem zunehmenden Bewässerungsbedürfnis konfrontiert. Nur durch eine ausreichende Bewässerung lassen sich Ernteverluste vermeiden. Demgegenüber könnten durch weiträumigere oder intensivere Bewässerungsmassnahmen Nutzungskonflikte entstehen oder verstärken. Entsprechend hoch ist daher das Bedürfnis für objektive Kriterien und Grundlagen zur Beurteilung des aktuellen und zukünftigen Bewässerungsbedarfs in der Landwirtschaft. Die vorliegende Studie zielt auf eben diese Verbesserung des Kenntnisstandes zur landwirtschaftlichen Bewässerung in der Schweiz. Sie wurde im Auftrag von Bund und mehreren Kantonen durch die Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) durchgeführt. Grundlage der Arbeiten bildeten die Daten, Werkzeuge, Methoden und Ergebnisse der Vorgängerstudie zur Bewässerungsbedürftigkeit der schweizerischen Landwirtschaft (Fuhrer & Jasper [2009]).

Die flächendifferenzierte Abschätzung des saisonalen Bewässerungsbedarfs erfolgte wiederum mit Hilfe des hydrologischen Modellsystems WaSiM-ETH (<http://www.wasim.ch>). Mit ihm wurden langjährige kontinuierliche Berechnungen des Bodenwasserhaushaltes und des daran gekoppelten Bewässerungsbedarfs durchgeführt und ausgewertet. Letzterer wurde anhand zweier unterschiedlicher Methoden der bedarfsorientierten Bewässerungssteuerung ermittelt. Die Modellanwendungen erfolgten zunächst für sechs landwirtschaftlich genutzte Flussgebiete mit unterschiedlicher Charakteristik und Lage. Anschliessend wurden die gebietsbezogen ermittelten Ergebnisse anhand eines statistischen Verfahrens auf die landwirtschaftlichen Flächen der Schweiz (gemäss Landnutzungsklassen der „Arealstatistik 1992/97 der Schweiz“) übertragen. Die Analyse der räumlich differenzierten Bedarfsentwicklung (Auflösung 500 m x 500 m) erfolgte über die dynamisch berechneten Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980 - 2006. Die Ergebnisse wurden getrennt für Ackerflächen und Grasland (in vereinfachter Form auch für Obstkulturen) ausgewertet.

Die Ergebnisse zeigen grosse räumliche und zeitliche Unterschiede in den erforderlichen Bewässerungsmengen auf. Im saisonalen Mittel (1980 -2006) und unter Vernachlässigung möglicher Verluste (d.h. 100% Effizienz) werden für die Schweizer Landwirtschaft jährlich etwa 150 Mio. m³ Bewässerungswasser benötigt. Allerdings kann sich dieser Wert in Trockenjahren vervielfachen. Ackerflächen weisen gegenüber Grasland und Obstanbau den höheren Gesamtbedarf auf. Die räumliche Verteilung des Bewässerungsbedarfs indiziert erhöhte Bedarfswerte für grosse Flächenanteile des Mittellandes, der Westschweiz sowie für verschiedene landwirtschaftlich genutzte Alpentäler (z.B. Rhonetal, Rheintal). In diesen Regionen können in Trockenjahren saisonale Bewässerungsintensitäten von über 1000 m³/ha erreicht werden.

Die vorliegende Modellstudie stellt flächendifferenzierte Übersichten zum Bewässerungsbedarf in der schweizerischen Landwirtschaft unter dem aktuellen Klima bereit. Die Frage bleibt offen, wie stark die zu bewässernden Flächen im Zuge des Klimawandels künftig anwachsen und die erforderlichen Bewässerungsmengen zunehmen werden.

1 Einleitung

Der aktuelle Wasserbedarf für landwirtschaftliche Bewässerung in der Schweiz wird vom Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) auf 144 Mio. m³ für ein durchschnittliches Trockenjahr geschätzt, wobei eine vermutliche Fläche von 55'000 ha bewässert wird (Weber & Schild [2007]). Diese Angaben beruhen auf kantonalen Datenerhebungen zum Stand der Bewässerungseinrichtungen. Im Zuge der aktuellen Klimaerwärmung rechnet das BLW in den nächsten Jahren mit einem merklich ansteigenden Bewässerungsbedarf. Dieser wiederum könnte neben negativen ökonomischen und ökologischen Auswirkungen auch zu vermehrten Konflikten in der lokalen und regionalen Wassernutzung führen.

Die vom BLW durchgeführte Umfrage deckte einen sehr heterogenen Wissensstand zur landwirtschaftlichen Bewässerung in der Schweiz auf und zeigte einen allgemeinen Bedarf der Kantone nach einer gesamtschweizerischen Studie zur Abschätzung der Bewässerungsbedürftigkeit an. Die Ergebnisse dieser Modellstudie liegen inzwischen vor (Fuhrer & Jasper [2009]). Sie geben Auskunft über die grossräumlichen Muster der Bewässerungsbedürftigkeit in den vergangenen drei Jahrzehnten. Grundlage der flächendifferenzierten Abschätzung der Bewässerungsbedürftigkeit war die auf Tagesbasis berechnete relative Evapotranspiration, der Quotient aus aktueller und potenzieller Evapotranspiration (ET/ETP). Ist dieses Verhältnis kleiner als 0.80, so reagieren viele Kulturpflanzen mit Trockenstress und müssten zur Vermeidung von Ertragsverlusten bewässert werden (Raes [2002], Dorenboos & Kassam [1979]). Gebiete, in welchen dies in einem Drittel der Jahre (33%) der Fall ist, wurden als ‚bewässerungsbedürftig‘ ausgeschieden.

Ausgehend von den Ergebnissen zur Bewässerungsbedürftigkeit fokussiert die aktuelle Studie auf den *Bewässerungsbedarf*. Dieser wird unter Verwendung des bestehenden Modell-Setups (Fuhrer & Jasper [2009]) anhand von langjährigen hochauflösenden Simulationen des Wasserhaushaltes bestimmt. Die mit dem flächendetaillierten Abfluss- und Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH (Schulla & Jasper [2007], siehe auch <http://www.wasim.ch>) durchgeführten Modellrechnungen berücksichtigen neben klimatologischen, topographischen und pedologischen Aspekten auch die Ansprüche der Vegetation, nicht aber mögliche Verluste bei der Bewässerung. Referenzzeitraum für die Modellanwendungen ist wiederum die Periode 1980 - 2006. Für diesen Zeitraum werden in einem ersten Schritt für sechs Schweizer Flussgebiete kontinuierliche Tagesschrittssimulationen in einer räumlichen Auflösung von 500 m x 500 m durchgeführt. Dabei werden jeweils zwei unterschiedliche Berechnungsmethoden der bedarfsgesteuerten Bewässerung angewendet (Details in Kapitel 2):

- a) ET/ETP-Schwellwertmethode
- b) Grenzwerte der Bodensaugspannung (Eingabe Start- und Zielpunkt der Bewässerung)

In einem zweiten Schritt werden die für die Flussgebiete erzielten Ergebnisse mittels Mehrfachregression auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Gesamtschweiz übertragen und flächendifferenziert hinsichtlich des Bewässerungsbedarfs ausgewertet.

Ebenso wie in Fuhrer & Jasper [2009] beziehen sich alle Auswertungen jeweils auf die dynamisch berechnete Vegetationsperiode. Die landwirtschaftlichen Nutzflächen werden sowohl gesamthaft als auch getrennt für Acker- und Grasland analysiert. Grundlage bilden die Landnutzungsklassen der „Arealstatistik 1992/97 der Schweiz“ (BFS [2001]). Die Ausgliederung von Ackerland - diese

Nutzungskategorie wird in der Arealstatistik 1992/97 nicht separat geführt - erfolgte anhand der Kriterien des Indikatorensystems MONET (BFS et al. [2002]). Zu erwähnen ist, dass aufgrund fehlender Angaben keine kulturspezifischen Nutzungen berücksichtigt werden. Die Bewässerungsansprüche werden daher auf Basis von durchschnittlichen Ackerkulturen und des Graslandes (in vereinfachter Form auch von Obstkulturen) berechnet.

Im vorliegenden Bericht werden zunächst die verwendeten Methoden und Parameter zur Ermittlung des Bewässerungsbedarfs vorgestellt (Kapitel 2). Danach erfolgt die Präsentation der Berechnungsergebnisse für die untersuchten Flussgebiete (Kapitel 3). Anschliessend wird die Extrapolation der ermittelten Bedarfsmuster auf die Landwirtschaftsflächen der Gesamtschweiz beschrieben (Kapitel 4). Eine Bewertung der erzielten Ergebnisse findet im Kapitel 5 statt.

2 Berechnungsmethoden

Das hydrologische Einzugsgebietsmodell WaSiM-ETH erlaubt, landwirtschaftliche Kulturen auf zwei verschiedenen Arten zu bewässern:

- a) über fixe Vorgaben zu Bewässerungsterminen und -mengen
- b) durch bedarfsgesteuerte Bewässerung über vorzugebende Schwellwerte

Im aktuellen Projekt wird letzteres Verfahren zur Bestimmung des Bewässerungsbedarfs eingesetzt. Hierbei werden die Methoden "ET/ETP-Schwellwert" und "Saugspannungsgrenzwerte" angewendet. Die erstgenannte Methode korrespondiert mit der in Fuhrer & Jasper [2009] beschriebenen Methodik zur Ermittlung der Bewässerungsbedürftigkeit. Sie wurde im Rahmen des aktuellen Projektes als zusätzliche Bewässerungsmethode ins WaSiM-ETH Modell implementiert. Die zweite Methode entspricht einer in der landwirtschaftlichen Berechnungsberatung weitverbreiteten Vorgehensweise zur Abschätzung des Wasserbedarfs (z.B. Lüttger et al. [2005], Mastel [2002]). Sie wird hier als Vergleichsmethode zur Berechnung des Bewässerungsbedarfs genutzt.

2.1 Bewässerung nach ET/ETP-Schwellwertmethode

Bei dieser Variante der bedarfsgesteuerten Bewässerungssimulation wird der Wasserbedarf anhand der modellierten Verdunstungsreduktion bestimmt. Dazu werden flächendetailliert die mittlere Bodenfeuchte im durchwurzelten Bodenprofil sowie das aktuelle Verhältnis ET/ETP berechnet. Diese Werte werden in jedem Berechnungszeitschritt 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.

In der aktuellen Studie wurde eine bodenfeuchteabhängige 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.

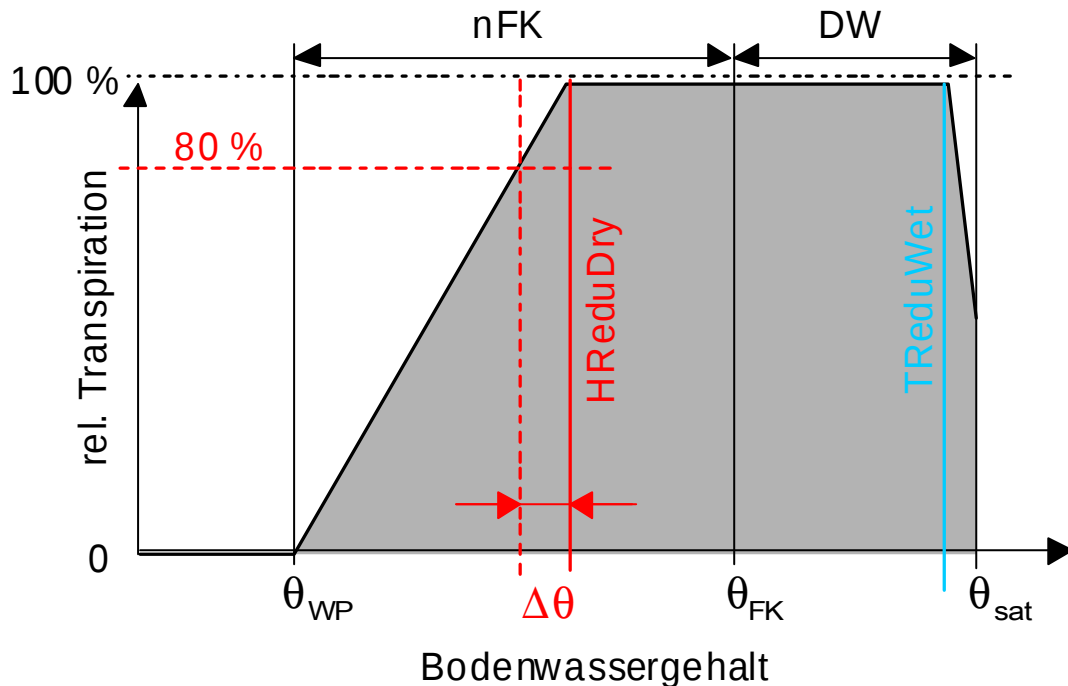


Abbildung 1: Definition der Bewässerungsmenge in Abhängigkeit von Transpiration und Bodenwassergehalt. nFK = nutzbare Feldkapazität; DW = Drän- oder Gravitationswasser, θ_{WP} = Wassergehalt beim Welkepunkt, θ_{FK} = Wassergehalt bei Feldkapazität, θ_{sat} = Wassergehalt bei Sättigung, $\Delta\theta$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

Entsprechend den obigen Ausführungen wird in WaSiM-ETH der Beginn von Trockenstress über einen vegetationsspezifischen 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 & Jasper [2009]. Wie in Abbildung 2 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 bodenartabhängige Feuchtigkeitsäquivalent (FÄ) ersetzt (z.B. Renger et al. [2008]), welches einen Wasserspannungsbereich von 60 hPa (sandige Böden) bis 320 hPa (tonige Böden) vorsieht (= pF 1.8 - 2.5).

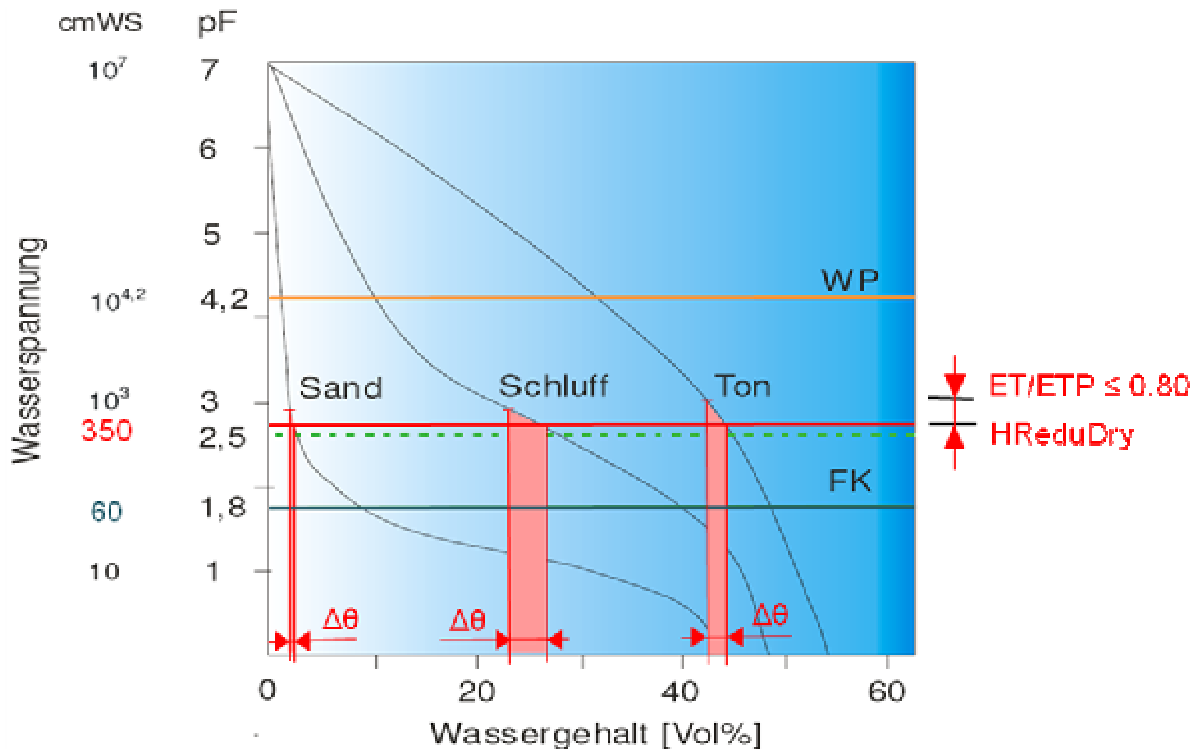


Abbildung 2: Beziehung zwischen Wasserspannung und Bodenwassergehalt (pF-Kurven) für verschiedene Bodenarten und daraus resultierender Bewässerungsbedarf nach ET/ETP-Schwellwertmethode. ET/ETP = relative Evapotranspiration, $H_{ReduDry}$ = Grenzwert für den Beginn von Trockenstress, $\Delta\theta$ = Bewässerungsbedarf, FK = Feldkapazität; WP = Welkepunkt (Abbildung aus Koll [2005], modifiziert).

2.2 Bewässerung nach Grenzwerten der Bodensaugspannung

Diese Variante der Bewässerungssteuerung benötigt zwei Grenzwerte der Bodensaugspannung: einen Wert, bei dessen Überschreiten bewässert wird, und einen anderen Wert, bis zu dem bewässert werden soll. In Anlehnung an die gängige Literatur zur Beregnungssteuerung (z.B. Mastel [2002], [2004], Lüttger et al. [2005], Bohne & Stüdemann [1973]) wurden die Grenzwerte auf das Bodenfeuchteniveau von 50% nutzbare Feldkapazität (nFK) (= Startpunkt der Bewässerung) und 80% nFK (= Bewässerungsstop) festgelegt. Unter der Annahme, dass die maximale Wasserhaltekapazität eines Bodens (= FK) bei einer Bodenwasserspannung von 60 hPa (= pF 1.8) definiert ist (siehe Kap. 2.1), ergeben sich die Start- und Endwerte der Bewässerung zu rund 1000 hPa (= pF 3.0) und 200 hPa (= pF 2.3) Wasserspannung (vgl. auch Abbildung 3).

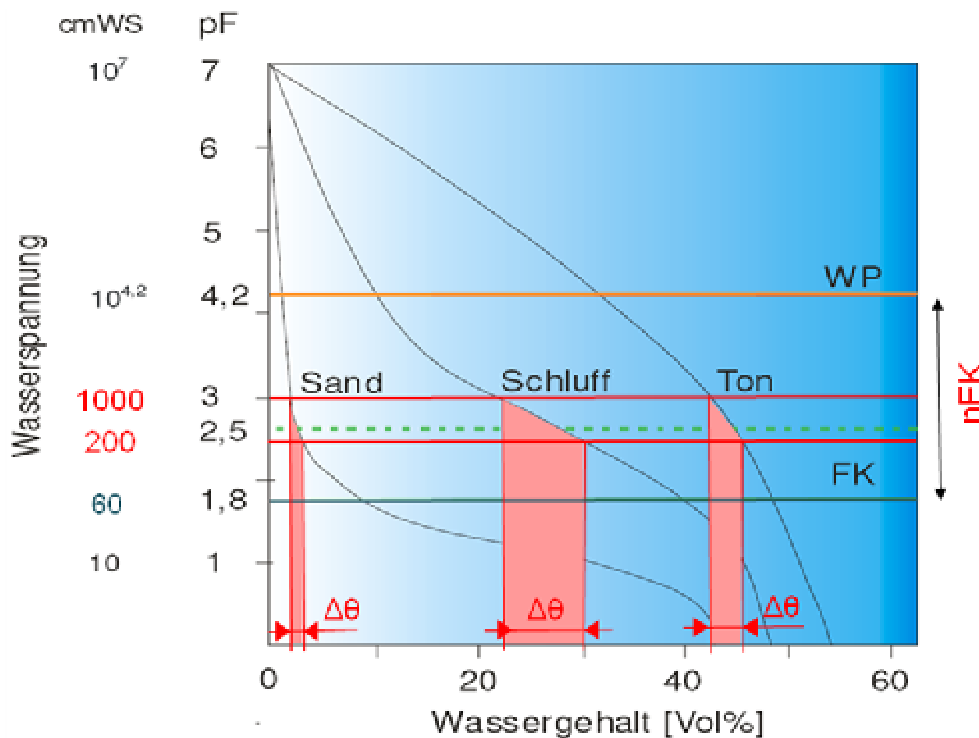


Abbildung 3: Beziehung zwischen Wasserspannung und Bodenwassergehalt (pF-Kurven) für verschiedene Bodenarten und daraus resultierender Bewässerungsbedarf nach der Methode "Saugspannungsgrenzwerte". $\Delta\theta$ = Bewässerungsbedarf, nFK = nutzbare Feldkapazität, FK = Feldkapazität; WP = Welkepunkt (Abbildung aus Koll [2005], modifiziert).

2.3 Weitere Anmerkungen zum gewählten Setup der Bewässerungssteuerung

- Eine allfällige Limitierung des Wasserangebots wurde nicht berücksichtigt. Die Entnahme des Bewässerungswassers erfolgte im aktuellen Projekt jeweils aus dem Grundwasser, wobei WaSiM-ETH grundsätzlich auch die Steuerung der Entnahmen aus dem Flussnetz oder aus Seen erlaubt, sofern diese genügend Wasser führen resp. beinhalten. Dabei kann die als notwendig ermittelte Bewässerungsmenge über mehrere Zeitintervalle verteilt werden.
- Aufgrund fehlender Angaben konnten keine kulturartenspezifischen Parameterwerte für die Berechnung von Bodenwasserdynamik und Bewässerungssteuerung verwendet werden. Vielmehr musste in beiden Berechnungsvarianten (vgl. Kap. 2.1 und 2.2) auf mittlere Werte zur Beschreibung des Bewuchses von Acker- und Grasland sowie von Obstanbauflächen zurückgegriffen werden.
- Die Feuchtigkeitszufuhr des Bodens durch Güllung fand in den Modellrechnungen aufgrund fehlender Angaben keine Berücksichtigung. In der landwirtschaftlichen Praxis dürfte dieser Eintrag bei ca. 30-60 m³/ha liegen und damit temporären Einfluss auf die lokale Bodenwasserdynamik haben.
- Grundlage für die Identifizierung der landwirtschaftlichen Nutzflächen bildete der derzeit aktuellste schweizweite Datensatz zur Landbedeckung, die Arealstatistik 1992/97 (BFS [2004]). In dieser werden Ackerflächen allerdings nicht separat ausgegrenzt. Diese Flächen

wurden daher unter Verwendung weiterer raumbezogener Datensätze in einem aufwendigen Verfahren nach dem MONET-Indikatorensystem (BFS et al. [2002]) abgeleitet (vgl. auch Fuhrer & Jasper [2009]). Trotz dieses fortgeschrittenen Ableitungsverfahrens ist es recht wahrscheinlich, dass die Lage der tatsächlich ackerbaulich genutzten Flächen von den hergeleiteten Ackerflächen abweicht. Letztere sollten im Projekt daher eher als "potenziell nutzbares Ackerland" verstanden werden.

- Im weiteren wurde bei den Berechnungen davon ausgegangen, dass die pflanzenphysiologischen Fähigkeiten, wie z.B. die Saugkraftleistung, unabhängig von der Bodenart und vom phänologischen Entwicklungsstadium sind. Auch wurden die definierten Bewässerungsrichtlinien (Start- und Endpunkt der Bewässerung) vereinfachend als jeweils konstant über die gesamte Vegetationsperiode angenommen. In der landwirtschaftlichen Berechnungspraxis sind hier durchaus Unterschiede vorzufinden. So z.B. werden Frühkartoffeln oftmals bereits ab 45% nFK beregnet, späte Reifegruppen zur Zeit des Knollenansatzes bis zur Blüte hingegen erst ab 35% nFK (Lüttger et al. [2005]).
- Aus modelltechnischer Sicht muss weiterhin vermerkt werden, dass bei der Ermittlung der bodenartspezifischen Wasserspannungskurven (pF-Kurven) keine Hystereseeffekte berücksichtigt wurden (Hysterese: zwischen der Entwässerung (*Desorption*) eines gesättigten Bodens und der Bewässerung eines trockenen Bodens gibt es Unterschiede im Verlauf der Wasserspannungskurve eines Bodens).
- Die Simulation der Bodenwasserdynamik erfolgte nach dem Ansatz von van Genuchten [1980, 1991] mit Parametrisierung nach Carsel & Parrish [1988]. Hierzu ist darauf hinzuweisen, dass die bodenkundliche Literatur eine grosse Anzahl an verschiedenen Parametrisierungen zum van-Genuchten-Modell bereitstellt, ohne allerdings spezifische Eignungsangaben für Schweizer Böden anzugeben. Die Auswahl der Parameterisierung kann grossen Einfluss auf die Ausprägung der resultierenden bodenartabhängigen Wasserspannungskurven haben und damit auch auf die modellseitige Berechnung der Bodenwasserdynamik und des daraus resultierenden Bewässerungsbedarfs.

2.4 Einfluss der Bodenart auf die Bewässerungsmenge

Wie zuvor erwähnt, haben die Bodeneigenschaften einen markanten Einfluss auf die Höhe der Bewässerungsmenge. Entsprechend den gewählten Modell-Setups zur Bewässerungssteuerung (vgl. Kap. 2.1 und Kap. 2.2) erhalten schwere Böden (Lehme, Schluffe, Tone) beim Erreichen kritischer Bodenfeuchtegrenzwerte (Startpunkt der Bewässerung) eine jeweils grössere Menge an Bewässerungswasser zugeführt als leichte (sandige) Böden. Da aber letztere Böden kleinere Wasserspeichervermögen aufweisen, müssen sie in Trockenzeiten früher und häufiger als schwere Böden bewässert werden. Dieses ambivalente Verhalten ist in Abbildung 4 exemplarisch dargestellt. In diesem Beispiel wird deutlich, dass die gesamthaft über die Vegetationsperiode akkumulierte Bewässerungsmenge beim Lehm Boden signifikant höher ausfällt als beim sandigen Lehm.

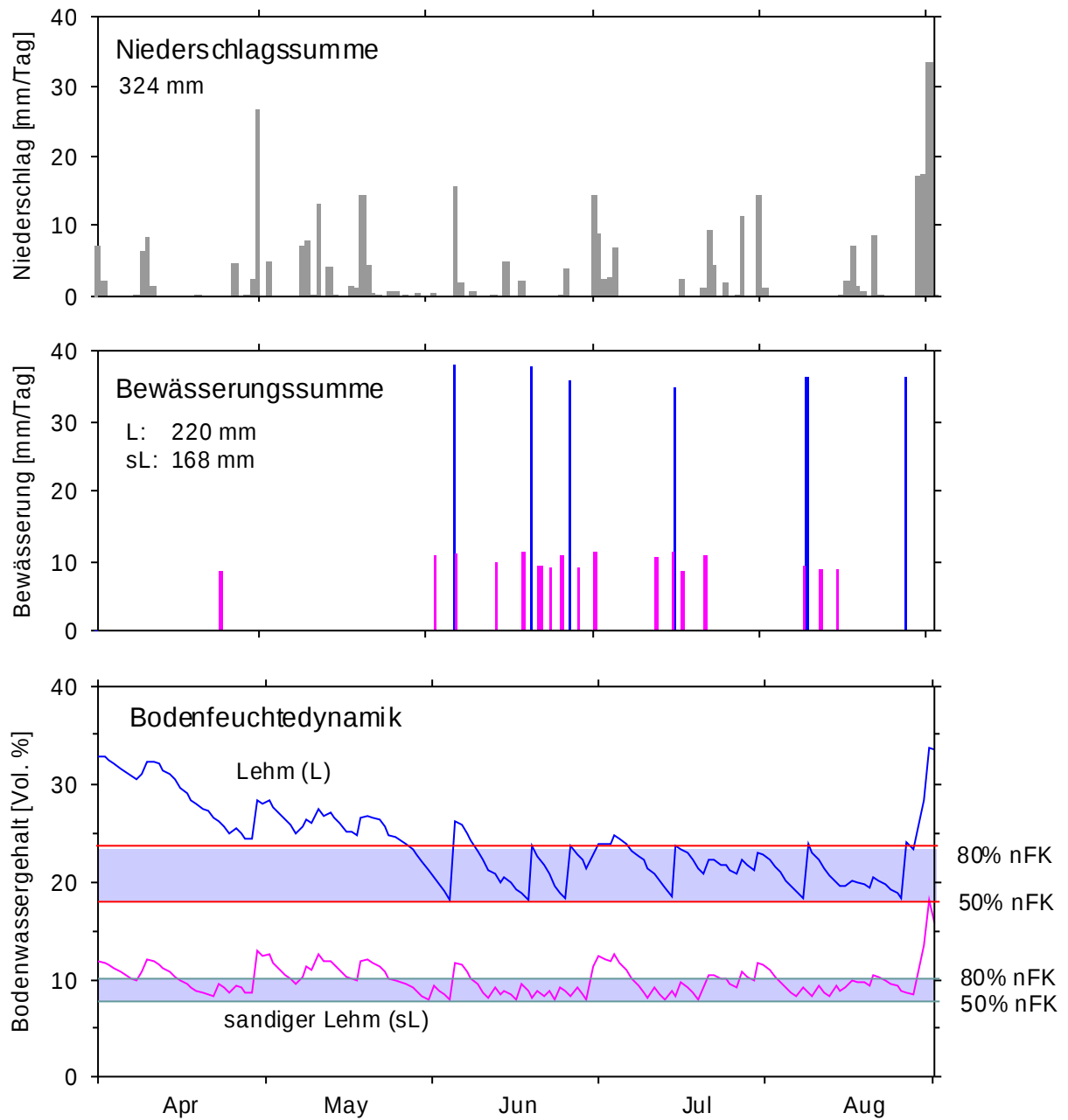


Abbildung 4: Einfluss der Bodenart auf die Bewässerungsmenge: simulierte Bodenfeuchte- und Bewässerungsdynamik nach der Berechnungsmethode "fixe Saugspannungsgrenzwerte" für einen Standort mit unterschiedlichen Böden im Broye-Gebiet nahe Payerne im Trockenjahr 2003.

3 Ergebnisse in den Testgebieten

Grundlage für die Karten zum landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarf der Schweiz bilden die flächendetaillierten hydrologischen Modellrechnungen in den Flussgebieten von Thur, Emme, Broye, Rhone, Ticino und Dischmabach. Diese bis zu 1700 km² grossen Flussgebiete erfassen aufgrund ihrer speziellen geographischen Lage und Charakteristik die unterschiedlichen Nutzungsbedingungen (Klima, Boden, Relief, etc.), mit denen sich die Schweizer Landwirtschaft konfrontiert sieht.

Die hochauflösenden Simulationen zum Wasserhalt und Bewässerungsbedarf verwendeten das von Fuhrer & Jasper [2009] entwickelte Modell-Setup. Die Berechnungen erfolgten als kontinuierliche Tageswertsimulationen in einer räumlichen Auflösung von 500 m x 500 m. Als Simulationsperiode diente der Zeitraum 1980 – 2006.

Die Ergebnisse der Simulationen wurden gezielt für die landwirtschaftlichen Nutzflächen und deren Teilkomponenten Ackerland und Grasland ausgewertet. Obstanbauflächen als dritte Komponente wurden nicht separat untersucht. Deren Auswertung erfolgte indirekt über die gesamthafte Landwirtschaftsfläche. Die gebietsspezifische Zusammenstellung des mittleren saisonalen Bewässerungsbedarfs zeigt Tabelle 1. Die Ergebnisse sind für beide Berechnungsmethoden (Bewässerung nach ET/ETP-Schwellwert und fixen Saugspannungsgrenzwerten) getrennt aufgeführt.

Tabelle 1: Gebietsbezogener Bewässerungsbedarf für Ackerland, Grasland und gesamthafte landwirtschaftliche Nutzflächen (inklusive Obstanbauflächen); Mittelwerte für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980 – 2006 (alle Angaben in Mio. m³)

Nutzfläche	Methode	Thur	Emme	Broye	Rhone ^a	Ticino	Dischma
Ackerland	ET/ETP	3.7	1.5	2.7	0.1	0	0
	Saugspannung (nFK)	2.9	1.2	2.3	0.1	0	0
	Rasterzahl	2438	1019	891	6	28	0
Grasland	ET/ETP	1.7	1.5	1.6	3.7	1.1	0
	Saugspannung (nFK)	1.4	1.2	1.5	3.6	1.1	0
	Rasterzahl	1274	902	109	1049	743	48
Landwirtschaftsfläche (total)	ET/ETP	5.8	3.0	4.4	5.5	1.2	0
	Saugspannung (nFK)	4.6	2.5	3.9	5.3	1.2	0
	Rasterzahl	3914	1975	1022	1198	779	48

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

Aus Tabelle 1 wird ersichtlich, dass die methodenbedingten Unterschiede in den Berechnungsergebnissen zum Bewässerungsbedarf recht gering ausfallen. Tendenziell liegen die Bewässerungsmengen bei Verwendung der Methode "fixe Grenzwerte der Bodensaugspannung" leicht unter denen, die mittels "ET/ETP-Schwellwertmethode" berechnet wurden.

Die höchsten Werte zum mittleren saisonalen Bewässerungsbedarf (1980 - 2006) werden mit je knapp 6 Mio. m³ für das Thur- und Rhonegebiet ermittelt. Auffallend ist, dass beide Gebiete markante Unterschiede beim nutzungsspezifischen Bedarf aufweisen. Während im Thurgebiet das Wasser hauptsächlich für die Bewässerung von Ackerflächen benötigt wird, steht im Rhonegebiet die Bewässerung von Grasland im Vordergrund. Dies verwundert allerdings nicht in Anbetracht der flächenanteiligen Zusammensetzung der Landwirtschaftsflächen in beiden Gebieten.

Insgesamt zeigen die Auswertungen zum saisonalen Bewässerungsbedarf grosse Unterschiede zwischen den Gebieten und den einzelnen Jahren an. Dieser Umstand wird insbesondere in den nachfolgenden beiden Abbildungen sichtbar. Im Thurgau schwankt der saisonale landwirtschaftliche Bewässerungsbedarf im Beobachtungszeitraum beispielsweise zwischen weniger als eine Million m^3 und mehr als 30 Millionen m^3 (vgl. Abbildung 5). Diese jahresbedingten Schwankungen im Bewässerungsbedarf sind auch in den näher untersuchten Nutzungsarten Acker- und Grasland zu beobachten (Abbildung 6).

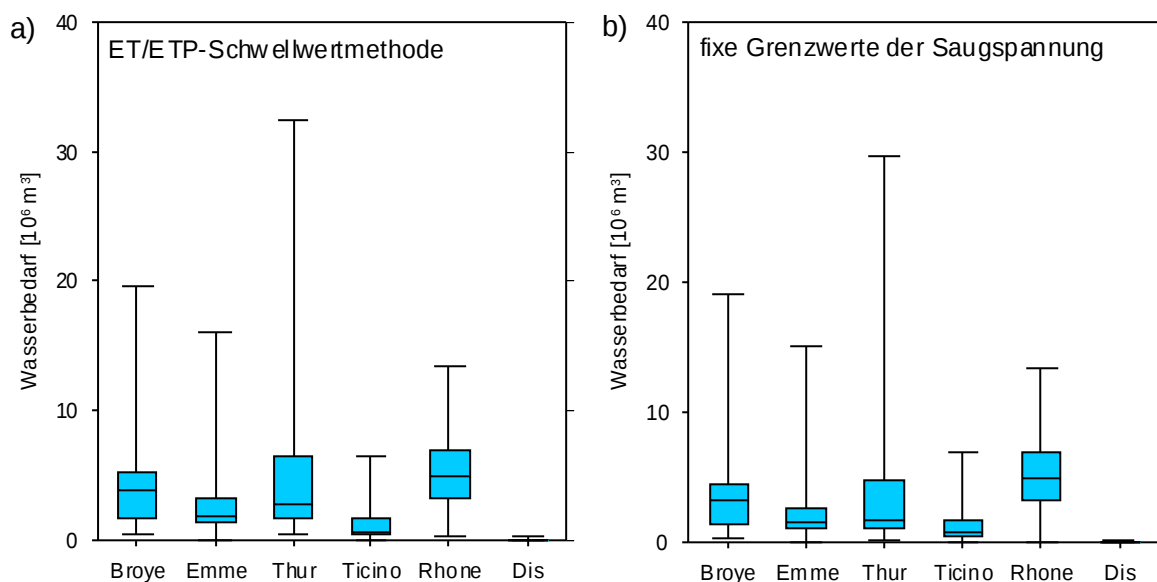


Abbildung 5: Gebietsbezogener saisonaler Bewässerungsbedarf (Spannweite, Median, 1.+ 3. Quartil) für die gesamthaften landwirtschaftlichen Nutzflächen (1980 - 2006), ermittelt a) nach ET/ETP-Schwellwertmethode und b) nach der Methode der fixen Saugspannungsgrenzwerte.

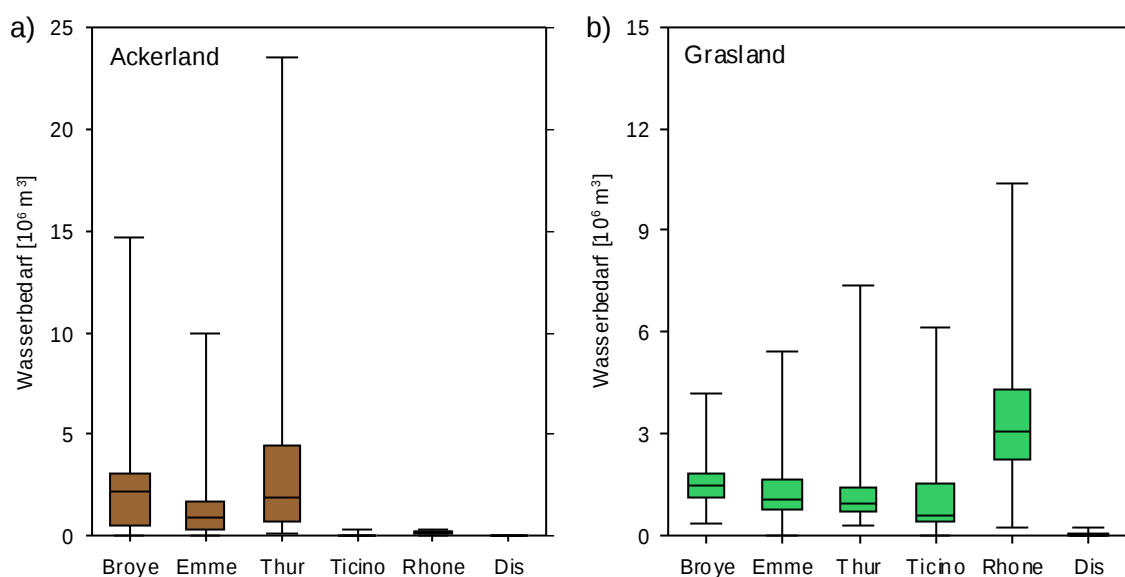


Abbildung 6: Gebietsbezogener saisonaler Bewässerungsbedarf (Spannweite, Median, 1.+ 3. Quartil) für Ackerflächen und Grasland (1980 - 2006), jeweils ermittelt nach ET/ETP-Schwellwertmethode (beachte unterschiedliche Skalierung der y-Achse).

Beschränkt man die quantitative Auswertung des saisonalen Bewässerungsbedarfs auf die Jahre mit dem höchsten Wasserbedarf (Trockenjahre), so werden die in Tabelle 1 ausgewiesenen Mittelwerte oftmals um ein Vielfaches übertroffen, insbesondere im extremen Trockenjahr 2003 (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Gebietsbezogener saisonaler Bewässerungsbedarf für die landwirtschaftlichen Nutzflächen (gesamthaft); jeweils ermittelt nach ET/ETP-Schwellwertmethode für die Trockenjahre im Zeitraum 1980 – 2006 (alle Angaben in Mio. m³).

Methode (Jahresauswahl)	Thur	Emme	Broye	Rhone ^a	Ticino	Dischma
ET/ETP (33 %)*	12.0	4.9	6.4	6.4	2.3	0.0
ET/ETP (10 %)*	23.4	7.4	9.9	8.1	3.8	0.1
ET/ETP (2003)	30.8	16.0	19.6	13.4	6.5	0.1

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

* Prozent der Jahre mit höchstem Wasserbedarf (jeweils gemittelt)

Entsprechend Tabelle 2 zeigen die mehr ackerbaulich genutzten Gebiete (Thur, Broye, Emme) in den Trockenjahren einen stärker zunehmenden Bewässerungsbedarf an als die durch Grünlandnutzung dominierten Gebiete (Rhone, Ticino, Dischma).

Die jährlichen Unterschiede in den erforderlichen Bewässerungsmengen sind an unterschiedliche Ausdehnungen der zu bewässernden Flächen (vgl. Tabelle 3) und an unterschiedliche Bewässerungsintensitäten (m³/ha pro Saison) gekoppelt. Beispielsweise kann allein im Thurgau die als notwendig ermittelte Bewässerungsfläche in Trockenjahren auf über 700 km² (oder 70'000 ha) ansteigen. Gleichzeitig sind in diesen Jahren auch erhöhte Intensitäten der Bewässerung zu erwarten. Die Abbildungen 7 bis 9 zeigen die jährlichen Auswertungen zu den effektiven Bewässerungsflächen und den auf diesen Flächen erforderlichen Bewässerungsintensitäten [m³/ha/Saison].

Tabelle 3: Effektive Bewässerungsfläche (%) in ihrer zeitlichen Abhängigkeit; jeweils ermittelt nach ET/ETP-Schwellwertmethode für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Untersuchungsgebiete im Zeitraum 1980 – 2006

	Thur	Emme	Broye	Rhone ^a	Ticino	Dischma
Landwirtschaftsfläche [ha]	97'800	49'400	25'600	30'000	19'500	1'200
davon bewässert [%]						
- im Mittel (1980 - 2006)	19	21	39	53	31	21
- in 33 % der Jahre *	38	38	62	68	48	29
- in 10 % der Jahre *	61	47	78	72	64	60
- im Trockenjahr 2003	63	66	95	82	82	88

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

* mit höchstem Wasserbedarf (jeweils gemittelt)

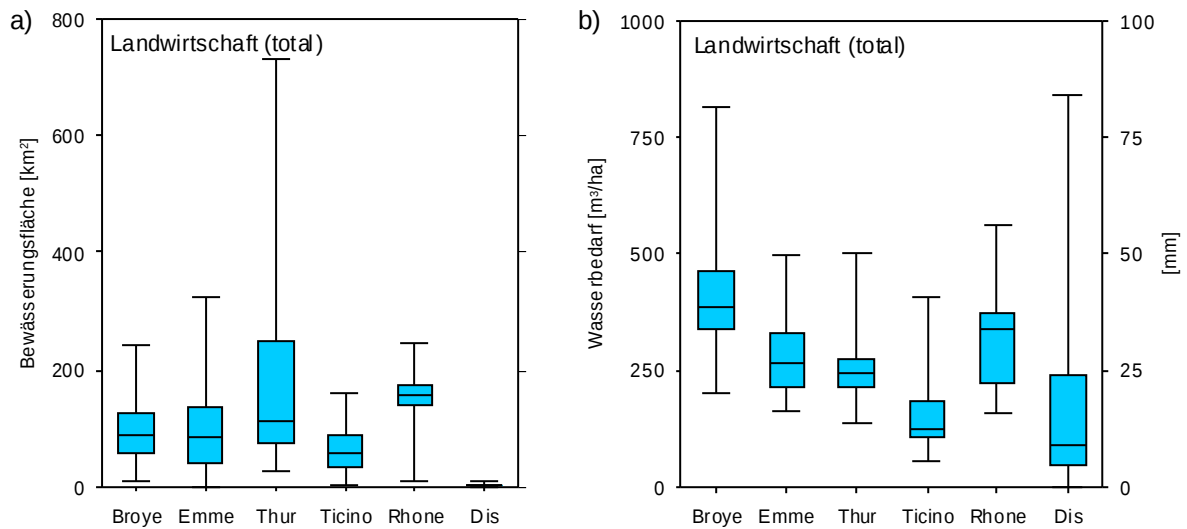


Abbildung 7: Gebietsbezogene saisonale Bewässerungsflächen (links) und zugehöriger Bewässerungsbedarf pro ha (rechts) für die landwirtschaftlichen Nutzflächen (jeweils für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006), ermittelt nach ET/ETP-Schwellwertmethode (Spannweite, Median, 1.+ 3. Quartil).

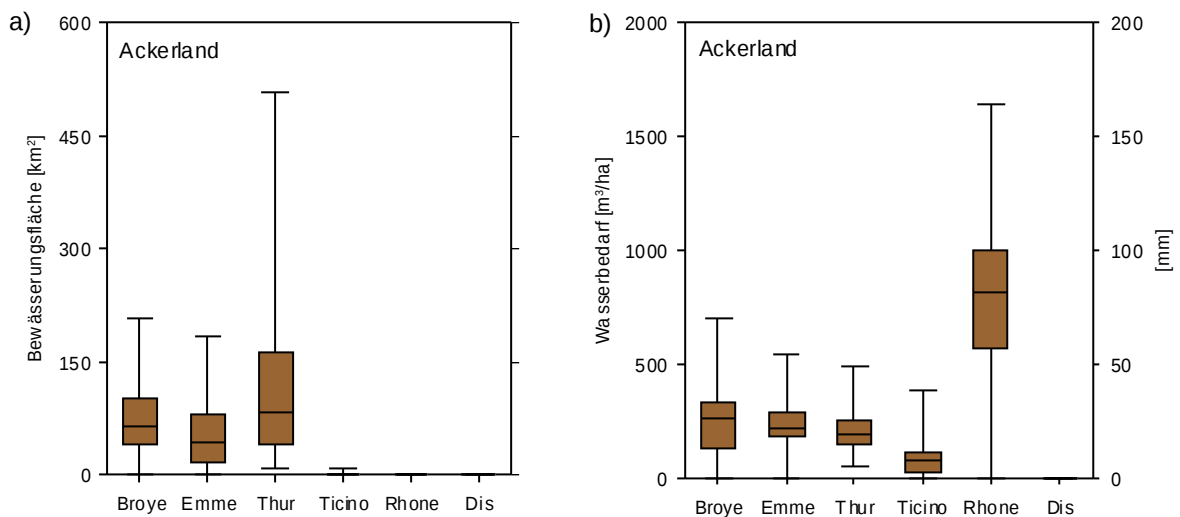


Abbildung 8: Gebietsbezogene saisonale Bewässerungsflächen (links) und zugehöriger Bewässerungsbedarf pro ha (rechts) für Ackerland (jeweils für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006), ermittelt nach ET/ETP-Schwellwertmethode (Spannweite, Median, 1.+ 3. Quartil).

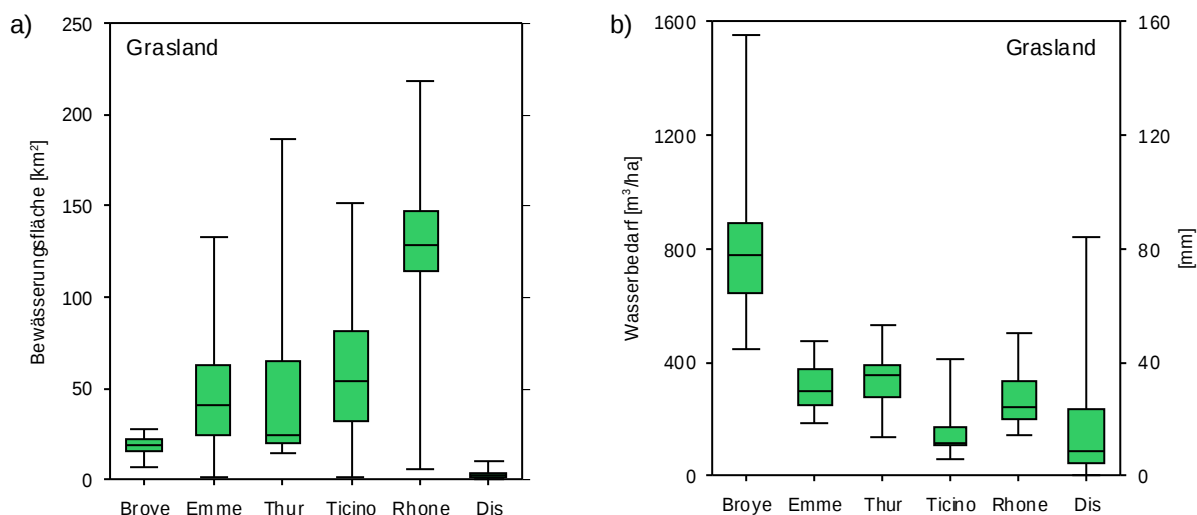


Abbildung 9: Gebietsbezogene saisonale Bewässerungsflächen (links) und zugehöriger Bewässerungsbedarf pro ha (rechts) für Grasland (jeweils für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006), ermittelt nach ET/ETP-Schwellwertmethode (Spannweite, Median, 1.+ 3. Quartil).

4 Extrapolation der gebietsspezifischen Ergebnisse

Die Übertragung des gebietsspezifisch ermittelten Bewässerungsbedarfs auf die Landwirtschaftsfläche der Schweiz erfolgte mittels Mehrfachregression. Diese berücksichtigte die Abhängigkeit des Wasserbedarfs von klimatologischen, topographischen und pedologischen Bedingungen. In Tabelle 4 ist der statistische Zusammenhang zwischen den räumlichen Verteilungsmustern von Bewässerungsmenge und relevanten Gebietsmerkmalen quantifiziert. Als Grundlage der flächendetaillierten Korrelationsanalyse dienten die ermittelten Bewässerungsmengen für die Trockenjahre der Periode 1980 - 2006 (Mittel von 33 % der Jahre mit höchstem Wasserbedarf).

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen dem berechneten Bewässerungsbedarf und verschiedenen Gebietsmerkmalen (Angaben jeweils bezogen auf die gesamthafte Landwirtschaftsfläche der Untersuchungsgebiete)

Merkmal	Korrelationswert
Verhältnis aus potenzieller Evapotranspiration und Niederschlag (ETP/N) ^a	0.60
Geländehöhe ^b	0.21
Hangneigung ^c	0.46
Bodendurchlässigkeit ^d	0.64
Bodentiefe ^d	0.15
Bodenspeichervermögen ^d	0.19
Skelettgehalt des Bodens ^d	0.12

^a langjähriges Mittel über die Vegetationsperiode (1980 – 2006); N steht für Niederschlag

^b 100 m Höhenzonen als Klasseneinteilung

^c Klasseneinteilung auf Basis von 5°-Stufen

^d mit Klasseneinteilung entsprechend Bodeneignungskarte der Schweiz BEK200 (BFS [2004])

Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass der Bewässerungsbedarf deutlich schwächer mit Gebietsmerkmalen korreliert ist als die zuvor untersuchte Bewässerungsbedürftigkeit (vgl. Fuhrer & Jasper [2009]). Dies berücksichtigend wurde eine gegenüber der Bewässerungsbedürftigkeit verkleinerte Zuordnungstabelle mit 27 anstatt 81 Klassen (Kombination aus 3 Merkmalen mit je 3 Klassen) erstellt. Mit deren Hilfe erfolgte die Übertragung der in den Untersuchungsgebieten gewonnenen Flächenmuster des Bewässerungsbedarfs auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Gesamtschweiz. Die verwendeten Merkmalsklassen sind in Tabelle 5 definiert. Die Klassenbereiche wurden so ausgewählt, dass jede Klasse mit einer hinreichenden Anzahl an Rasterzellen belegt ist.

Tabelle 5: Ausgewählte Merkmale mit Klassenbelegung für die Extrapolation des Bewässerungsbedarfs (mit relativen Flächenangaben jeweils bezogen auf die gesamthafte Landwirtschaftsfläche der Untersuchungsgebiete)

Merkmal	Klasse 1		Klasse 2		Klasse 3	
	Werteber.	Fläche (%)	Werteber.	Fläche (%)	Werteber.	Fläche (%)
ETP / N ^a	< 0.5	33	0.5 - 0.8	37	> 0.8	30
Durchlässigkeitsklasse ^b	2 - 3	17	4	39	5-6	44
Hangneigung [Grad]	< 5	37	5 - 15	36	> 15	27

^a Verhältnis aus potenzieller Evapotranspiration (ETP) und Niederschlag (N) als langjähriges Mittel über die Vegetationsperiode (1980 – 2006)

^b mit Klasseneinteilung entsprechend Bodeneignungskarte der Schweiz BEK200 (BFS [2004])

Insgesamt werden durch die Untersuchungsgebiete 15.7% (oder 2'233 km²) der landwirtschaftlichen Nutzflächen in der Schweiz erfasst. Bezogen auf die ausgegrenzten Ackerflächen liegt dieser Anteil bei 19.3%; für Grasland beträgt er 13.8%. Die in Tabelle 5 aufgeführten merkmalsbezogenen relativen Flächenangaben liegen in einer ähnlichen Grössenordnung wie die der gesamtschweizerischen Landwirtschaft.

Die Durchführung der Extrapolation des Bewässerungsbedarfs auf die Schweizer Landwirtschaftsfläche erfordert eine Klassifizierung des Zielgebietes gemäss den Angaben in Tabelle 5. Zwei der drei Gebietsmerkmale konnten aus den aufbereiteten Basisdatensätzen gewonnen werden; die Durchlässigkeit des Bodens aus der *Digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz* (BEK200) (BFS [2004]) und die Hangneigung aus dem *RIMINI-Höhenmodell* (swisstopo [2004]). Der auf die Vegetationsperiode bezogene ETP/N - Indikator musste hingegen durch Modellrechnungen bestimmt werden (vgl. Fuhrer & Jasper [2009]).

Die Ergebnisse der Extrapolationen sind in Tabelle 6 und den Abbildungen 10-12 dargestellt. Danach werden im langjährigen Mittel (1980 - 2006) je nach angewandter Berechnungsmethode 136 Mio. m³ bzw. 154 Mio. m³ Bewässerungswasser für die Schweizer Landwirtschaft benötigt. In Trockenjahren kann sich dieser Bewässerungsbedarf auf ein Vielfaches erhöhen. Ackerland weist gegenüber Grasland und Obstanbau den höchsten Gesamtbedarf auf. Ein Direktvergleich der Intensitäten (m³/ha) ist nur bedingt möglich und wird hier weggelassen, da sich die bewässerten Flächen nicht an gleicher Stelle befinden und deshalb unterschiedlichen pedologischen und klimatischen Bedingungen ausgesetzt sind.

Die räumliche Verteilung des Bewässerungsbedarfs indiziert erhöhte Bedarfswerte für weite Teile des Mittellandes, für die Region um den Genfersee sowie für verschiedene Alpentäler (z.B. Rhone-tal, Rheintal). In Trockenjahren werden in einzelnen Regionen saisonale Bewässerungsintensitäten von über 1000 m³/ha erreicht (mit Spitzenwerten von über 2000 m³/ha).

Tabelle 6: Extrapolation der gebietsbezogenen saisonalen Bewässerungsmengen auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz (alle Angaben in Mio. m³ und bezogen auf die Periode 1980 – 2006)

Methode	Ackerland	Grasland	Obstanbau	Landwirtschafts- fläche (total)
ET/ETP (Mittelwert)	79	61	14	154
Saugspannung (nFK) (Mittelwert)	70	53	13	136
ET/ETP (33 %)*	124	100	20	244
ET/ETP (10 %)*	205	152	29	386
ET/ETP (2003)	355	222	61	638
Flächenanteile (total) [ha]	615'950	744'925	58'700	1'419'575

* Prozent der Jahre mit höchstem Wasserbedarf (jeweils gemittelt)

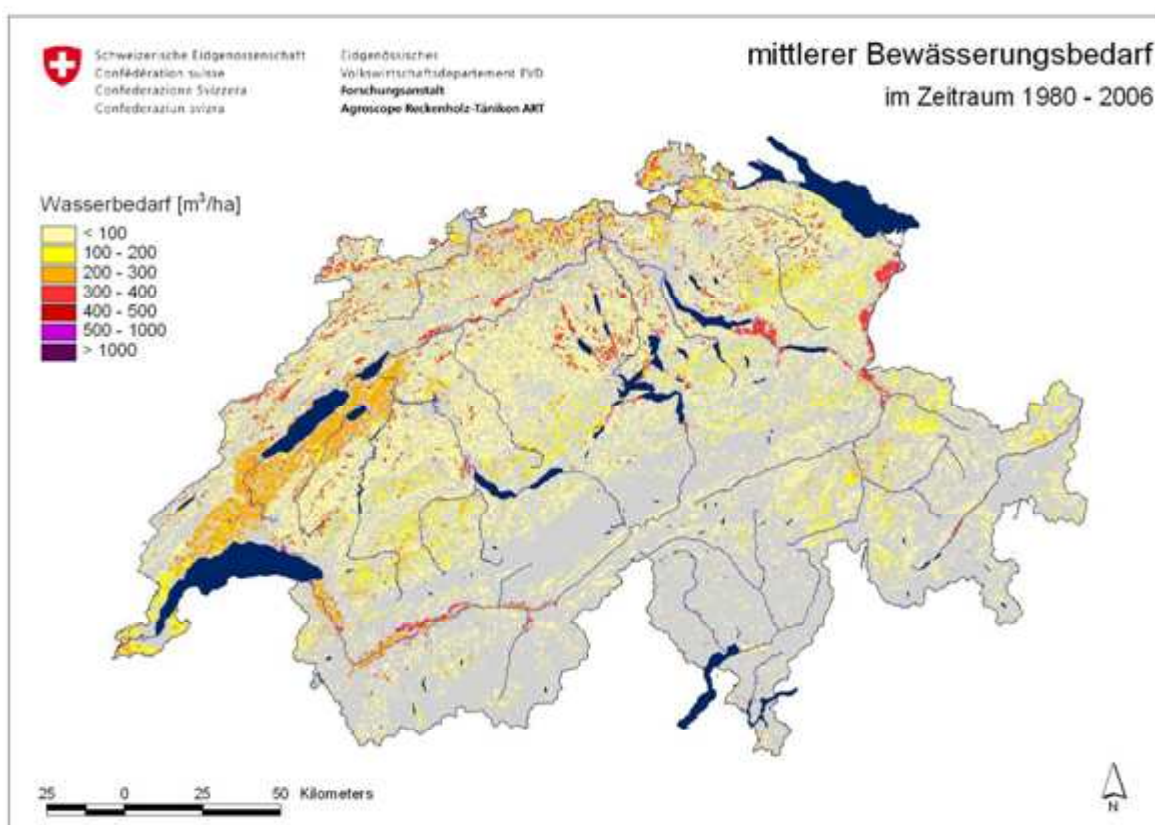


Abbildung 10: Räumliche Verteilung des mittleren Bewässerungsbedarfs für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980 – 2006 im 500 m x 500 m Raster.

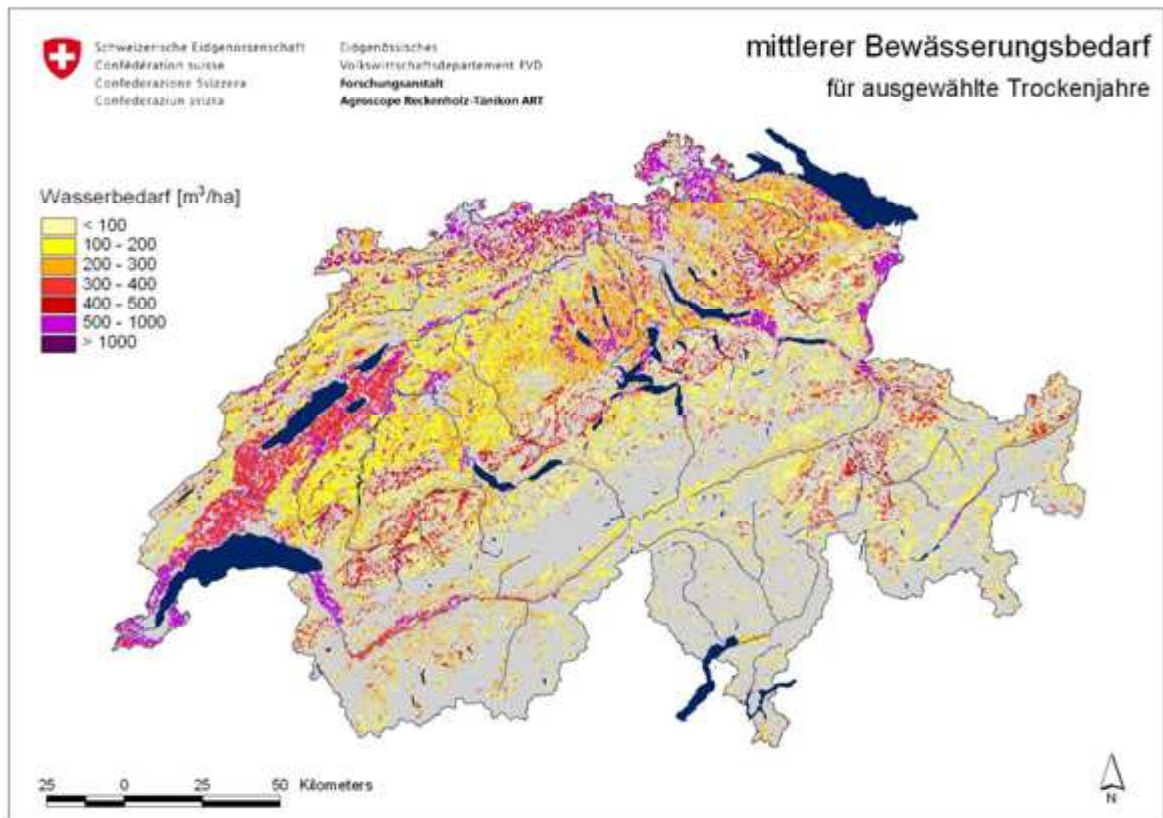


Abbildung 11: Räumliche Verteilung des mittleren Bewässerungsbedarfs für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden der drei trockensten Jahre des Zeitraumes 1980 – 2006 im 500 m x 500 m Raster.

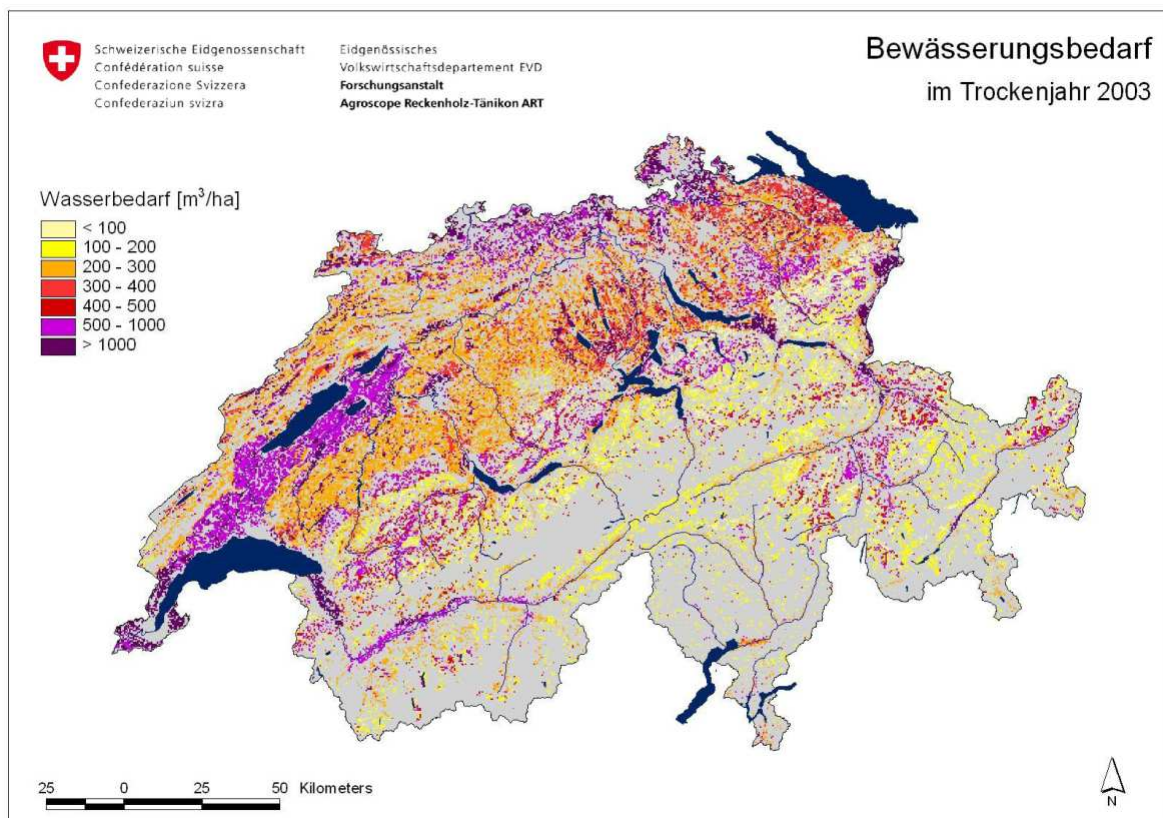


Abbildung 12: Räumliche Verteilung des Bewässerungsbedarfs für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperiode des Trockenjahres 2003 im 500 m x 500 m Raster.

Eine Abschätzung des flächenverteilt ermittelten Bewässerungsbedarfs für einzelne Kantone zeigt Tabelle 7. Danach werden den Kantonen Bern, Waadt und Graubünden die höchsten Bedarfmengen zugeordnet. Hierbei gilt es allerdings zu beachten, dass eben diese Kantone auch über die grössten landwirtschaftlichen Flächenanteile verfügen.

Tabelle 7: Kantonaler Bewässerungsbedarf ermittelt nach Methode ET/ETP (alle Angaben in Mio. m³ und bezogen auf die Periode 1980–2006).

	Kanton	Landwirtschaftsfläche [ha]	Bedarf (Mittelwert)	Bedarf (33 %)*	Bedarf (10 %)*	Bedarf (2003)
AG	Aargau	61250	8.3	13.2	22.4	38.7
AI	Appenzell Innerrhoden	8975	0.8	1.2	1.8	2.7
AR	Appenzell Ausserrhoden	13425	0.7	1.3	2.1	3.1
BE	Bern	248850	22.0	36.6	57.7	92.4
BL	Basel-Landschaft	20750	4.0	6.0	9.8	17.2
BS	Basel-Stadt	250	0.1	0.1	0.2	0.4
FR	Freiburg	95325	10.4	15.7	23.8	40.6
GE	Genf	10825	1.9	3.7	6.6	13.0
GL	Glarus	18475	1.5	2.4	3.6	5.2
GR	Graubünden	175075	13.8	22.7	33.5	48.0
JU	Jura	39600	5.3	8.1	13.1	21.2
LU	Luzern	79575	7.5	12.9	22.4	35.8
NE	Neuenburg	33350	3.9	6.1	10.0	16.7
NW	Nidwalden	9975	0.7	1.3	1.9	2.9
OW	Obwalden	17350	1.5	2.4	3.6	5.3
SG	St. Gallen	92800	10.9	16.8	27.3	42.2
SH	Schaffhausen	12500	2.7	4.5	7.4	14.2
SO	Solothurn	32900	4.0	6.1	9.8	16.2
SZ	Schwyz	35825	3.7	5.6	8.8	13.7
TG	Thurgau	51500	4.8	9.0	17.2	29.8
TI	Tessin	30375	1.8	3.0	4.4	6.7
UR	Uri	20600	1.4	2.4	3.5	5.0
VD	Waadt	136500	22.6	32.5	47.1	85.0
VS	Wallis	88025	10.4	14.4	20.3	34.6
ZG	Zug	10625	1.0	1.7	3.0	4.8
ZH	Zürich	73250	8.1	13.9	24.8	42.7
total		1417950	154	243	386	638

* Prozent der Jahre mit höchstem Wasserbedarf (jeweils gemittelt)

5 Diskussion und Ausblick

In der vorliegenden Studie wird mit modernen Werkzeugen und Methoden sowie unter Einbezug einer umfassenden Datenbasis eine flächendifferenzierte Abschätzung zum saisonalen Bewässerungsbedarf in der schweizerischen Landwirtschaft vorgenommen. Die vorgestellten Ergebnisse und Karten geben einen Überblick zur grossräumigen Verteilung der Bedarfssituation im Durchschnitt und in ausgewählten Trockenjahren der Periode 1980-2006 und erlauben die Identifizierung von Gebieten mit erhöhtem Wasserbedarf. Das Ergebnis stellt nicht den aktuellen Verbrauch von Wasser für die Bewässerung dar, sondern den durch die klimatischen und räumlichen Gegebenheiten bestimmten, potentiellen Bedarf für durchschnittliche Ackerkulturen, Grasland und Obstkulturen.

Vergleicht man die in dieser Studie ermittelten Bedarfszahlen mit jenen aus dem Umfragebericht zum Stand der Bewässerung in der Schweizer Landwirtschaft (Weber & Schild [2007]), so zeigen sich zunächst erstaunliche Parallelen. Den im Umfragebericht ausgewiesenen 144 Mio. m³ saisonaler Wasserbedarf (Stand: 2006) stehen in der aktuellen Modellstudie 154 Mio. m³ als mittlerer Bedarf gegenüber. Bei näherer Betrachtung wird jedoch deutlich, dass dieser Zahlenvergleich nicht sinnvoll ist. Die Gründe dafür sind mannigfaltig. Während die Angaben in der Studie von Weber & Schild [2007] ausschliesslich auf kantonalen Erhebungen basieren (mit aktueller Flächennutzung und Bewässerungstechnik), so sind die Ergebnisse der Modellstudie eher im Lichte einer optimalen bodenfeuchteabhängigen Bewässerungssteuerung zu verstehen, bei der eine Bewässerungseffizienz von 100 % angenommen wird (keine technischen Verluste). Diese hohe Effizienz wird in der heutigen Praxis kaum erreicht. Je nach Bewässerungstechnik liegen die Effizienzwerte der Feldberegnung meist zwischen 50 und 70% (Ausnahme Tropfbewässerung). Insbesondere die vielerorts im Wallis praktizierte Bewässerung aus Suonen muss als recht ineffizient eingeschätzt werden. Bemerkenswert ist, dass mit dieser Bewässerungstechnik etwa 60% der gesamthaft geschätzten Bewässerungsmenge ausgebracht werden. Unter realen Bedingungen dürften die eingesetzten Mengen entsprechend den jeweiligen Verlustraten höher ausfallen als hier berechnet.

Insgesamt zeigt sich, dass die in der aktuellen Studie berechneten Bedarfsflächen wesentlich grösser ausfallen und auch regional weiter verteilt sind, als jene im Umfragebericht. Letzterer geht von einer genutzten schweizweiten Bewässerungsfläche von nur ca. 55'000 ha für ein durchschnittliches Trockenjahr aus, wovon allein 21'000 ha auf das Rhonegebiet entfallen. Aus diesen Angaben resultieren mittlere saisonale Bewässerungsintensitäten von ca. 2'600 m³/ha. Diese hohen Werte werden in den aktuellen Modellrechnungen nicht erreicht, auch nicht für extreme Trockenjahre. So z.B. wurden für das Trockenjahr 2003 mittlere Bewässerungsmengen von 450 m³/ha ermittelt (vgl. Abbildung 12).

Für die fachgerechte Interpretation der erstellten Wasserbedarfskarten ist zudem die Kenntnis der verwendeten Datengrundlagen wichtig. In dieser Modellstudie flossen Datensätze ein, die in der vorangegangenen Studie zur Bewässerungsbedürftigkeit (Fuhrer & Jasper [2009]) aufbereitet worden sind. Entsprechend sind die verwendeten Ackerflächen als Flächen mit potenzieller Ackernutzung zu verstehen, da die als Grundlage der Ausgrenzung dienende Arealstatistik 1992/97 (BFS [2004]) keine direkten Angaben zum Ackerland vorhält (vgl. auch Kap. 2.3). Der Ge-

samtbedarf für den Ackerbau dürfte aufgrund der kleineren ‚aktuellen‘ Ackerfläche in der vorliegenden Berechnung überschätzt werden, wobei aber auch zu berücksichtigen ist, dass die angegebenen Werte für die Zeit ab 1980 gelten. Die Ergebnisse der Modellrechnungen sind zusätzlich mit Unsicherheiten behaftet, welche durch die eingesetzten Werte für die Modellparameter bestimmt werden. Kleine Änderungen in diesen Werten können bei der Summenbildung zu bedeutenden Unterschieden in den jährlichen Bedarfszahlen führen.

Mittlerweile liegen aktualisierte Daten zur Arealstatistik vor, allerdings bisher nur für etwa 50% der Schweizer Landesfläche. In diesem neuen Datensatz der Arealstatistik 2004/09 wird erstmalig Ackerland als separate Landnutzungs-kategorie ausgewiesen. Es erscheint daher empfehlenswert, für nachfolgende Modellstudien zur Bewässerung unter heutigen Bedingungen diese aktualisierten Nutzungsdaten zu verwenden.

Weiterhin sollten zukünftige regionale Studien zur Bewässerungsabschätzung von feiner aufgelösten und detaillierten Bodenkarten profitieren können. Diese Karten liegen mittlerweile für viele Regionen in der Schweiz vor und könnten zumindest regional die in dieser Studie verwendete (recht grobe) Bodeneignungskarte der Schweiz (BFS [2004]) ersetzen.

Das im aktuellen Projekt eingesetzte Modellsystem hat sich als geeignetes Werkzeug für eine bedarfsorientierte Bewässerungssteuerung erwiesen. Das Modellsystem erlaubt dem Anwender, beliebige ackerbauliche Kulturarten, Fruchtfolgen sowie Graslandstrukturen flächendifferenziert hinsichtlich ihres Bewässerungsbedarfs zu untersuchen, sowohl für historische als auch für zukünftige Zeiträume. Damit kann das in der hiesigen Studie verwendete Methodengerüst als wertvolle lokale und regionale Planungs- und Entscheidungshilfe betrachtet werden.

6 Literatur

- Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. verbesserte und erweiterte Auflage. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- BFS (Bundesamt für Statistik) (2001): Bodennutzung im Wandel: Arealstatistik der Schweiz. Neuchâtel
- BFS (Bundesamt für Statistik), BAFU (Bundesamt für Umwelt), ARE (Bundesamt für Raumentwicklung) (Hrsg.) (2002): Nachhaltige Entwicklung messen: Einblick in MONET – das Schweizer Monitoringsystem. Neuchâtel
- BFS (Bundesamt für Statistik) (2004): Die Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz. Überarbeitung 2000. Neuchâtel
- BFS (Bundesamt für Statistik), BAFU (Bundesamt für Umwelt), ARE (Bundesamt für Raumentwicklung) (Hrsg.) (2002): Nachhaltige Entwicklung messen: Einblick in MONET – das Schweizer Monitoringsystem. Neuchâtel
- BFS (Bundesamt für Statistik) (2004): Bodennutzung im Wandel: Arealstatistik der Schweiz. Neuchâtel
- Bohne, K. & Stüdemann, O. (1973): Ein Beitrag zur Bestimmung der Beregnungsbedürftigkeit. Arch. Acker- und Pflanzenbau 17, S. 29-43
- CARSEL, R.F. & PARRISH, R.S. (1988): Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. – Water Resour. Res. 24: S. 755-769
- DOORENBOES, J. & KASSAM, A.H. (1979): Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper N°56. Rome, Italy, 193 pp.
- FUHRER, J. & JASPER, K. (2009): Bewässerungsbedürftigkeit in der Schweiz. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), 74 S.
http://www.blw.admin.ch/dokumentation/00018/00112/00504/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,lnp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCEdIR5fWym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--.
- KOLL, J. (2005): Bodenkundliche Grundlagen von Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten. IUP Ingenieure GmbH, Braunschweig
- LÜTTGER, A., DITTMANN, B. & SOURELL, H. (2005): Leitfaden zur Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen. Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Bd. 6, Heft IV, Potsdam
- MASTEL, K. (2002): Beregnung und Bewässerung landwirtschaftlicher und gärtnerischer Kulturen. Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung, Nr. 24, Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim, Rheinstetten, Baden-Württemberg
- MASTEL, K. (2004): Beregnungssteuerung mit Internet. Landesanstalt für Pflanzenbau Forchheim, Rheinstetten, Baden-Württemberg
- Raes, D. (2002): Yield response to water. Report KuLeuven, Leuven, Belgium, 17 pp.

- 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. & Jasper, K. (2007): Model description WaSiM-ETH [verfügbarer Download unter: http://www.wasim.ch/wasim/products/wasim_description.htm]
- swisstopo (Bundesamt für Landestopografie) (2004) RIMINI – Das preisgünstige digitale Höhenmodell der ganzen Schweiz. Wabern
- 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
- VAN GENUCHTEN, M. TH., LEIJ F. J. & YATES S.R. (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils; EPA-Report 600/2-91/065, U. S. Environmental Protection Agency; ADA, Oklahoma
- WEBER, M. & A. SCHILD (2007): Stand der Bewässerung in der Schweiz. Bericht zur Umfrage 2006. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern, 17 S.

ANHANG

A1 Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Gebietsbezogener Bewässerungsbedarf für Ackerland, Grasland und gesamthafte landwirtschaftliche Nutzflächen (inklusive Obstanbauflächen); Mittelwerte für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980 – 2006 (alle Angaben in Mio. m ³).....	12
Tabelle 2: Gebietsbezogener saisonaler Bewässerungsbedarf für die landwirtschaftlichen Nutzflächen (gesamthafte); jeweils ermittelt nach ET/ETP-Schwellwertmethode für die Trockenjahre im Zeitraum 1980 – 2006 (alle Angaben in Mio. m ³).	14
Tabelle 3: Effektive Bewässerungsfläche (%) in ihrer zeitlichen Abhängigkeit; jeweils ermittelt nach ET/ETP-Schwellwertmethode für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Untersuchungsgebiete im Zeitraum 1980 – 2006	14
Tabelle 4: Zusammenhang zwischen dem berechneten Bewässerungsbedarf und verschiedenen Gebietsmerkmalen (Angaben jeweils bezogen auf die gesamthafte Landwirtschaftsfläche der Untersuchungsgebiete)	16
Tabelle 5: Ausgewählte Merkmale mit Klassenbelegung für die Extrapolation des Bewässerungsbedarfs (mit relativen Flächenangaben jeweils bezogen auf die gesamthafte Landwirtschaftsfläche der Untersuchungsgebiete).....	17
Tabelle 6: Extrapolation der gebietsbezogenen saisonalen Bewässerungsmengen auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz (alle Angaben in Mio. m ³ und bezogen auf die Periode 1980 – 2006)	18
Tabelle 7: Ermittelter kantonaler Bewässerungsbedarf nach Methode ET/ETP = 0.8 (alle Angaben in Mio. m ³ und bezogen auf die Periode 1980–2006).	20

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).....	7
Abbildung 2: Beziehung zwischen Wasserspannung und Bodenwassergehalt (pF-Kurven) für verschiedene Bodenarten und daraus resultierender Bewässerungsbedarf nach ET/ETP-Schwellwertmethode. ET/ETP=relative Evapotranspiration, HReduDry=Grenzwert für den Beginn von Trockenstress, $\Delta\theta$ =Bewässerungsbedarf, FK=Feldkapazität; WP=Welkepunkt (Abbildung aus Koll [2005], modifiziert)	8

Abbildung 3: ..Beziehung zwischen Wasserspannung und Bodenwassergehalt (pF-Kurven) für verschiedene Bodenarten und resultierender Bewässerungsbedarf nach der Methode "Saugspannungsgrenzwerte". $\Delta\theta$ = Bewässerungsbedarf, nFK = nutzbare Feldkapazität, FK =Feldkapazität; WP =Welkepunkt (Abbildung aus Koll [2005], modifiziert)	9
Abbildung 4: Simulierte Bodenfeuchte- und Bewässerungsdynamik nach der Berechnungsmethode "fixe Saugspannungsgrenzwerte" für einen Standort mit unterschiedlichen Böden im Broye-Gebiet nahe Payerne im Trockenjahr 2003	11
Abbildung 5: Gebietsbezogener saisonaler Bewässerungsbedarf (Spannweite, Median, 1.+3. Quartil) für die gesamthaften landwirtschaftlichen Nutzflächen (1980 - 2006), ermittelt a) nach ET/ETP-Schwellwertmethode und b) nach der Methode der fixen Saugspannungsgrenzwerte	13
Abbildung 6: Gebietsbezogener saisonaler Bewässerungsbedarf (Spannweite, Median, 1.+3. Quartil) für Ackerflächen und Grasland (1980 - 2006), jeweils ermittelt nach ET/ETP-Schwellwertmethode (beachte unterschiedliche Skalierung der y-Achse)	13
Abbildung 7: Gebietsbezogene saisonale Bewässerungsflächen und zugehöriger Bewässerungsbedarf (Spannweite, Median, 1.+3. Quartil) für die landwirtschaftlichen Nutzflächen (jeweils für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980 - 2006); ermittelt nach ET/ETP-Schwellwertmethode	15
Abbildung 8: Gebietsbezogene saisonale Bewässerungsflächen und zugehöriger Bewässerungsbedarf (Spannweite, Median, 1.+3. Quartil) für Ackerland (jeweils für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980 - 2006); ermittelt nach ET/ETP-Schwellwertmethode	15
Abbildung 9: Gebietsbezogene saisonale Bewässerungsflächen und zugehöriger Bewässerungsbedarf (Spannweite, Median, 1.+3. Quartil) für Grasland (jeweils für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980 - 2006); ermittelt nach ET/ETP-Schwellwertmethode	16
Abbildung 10: Räumliche Verteilung des mittleren Bewässerungsbedarfs für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980 – 2006 im 500 m x 500 m Raster	18
Abbildung 11: Räumliche Verteilung des mittleren Bewässerungsbedarfs für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden der drei trockensten Jahre des Zeitraumes 1980 – 2006 im 500 m x 500 m Raster.	19
Abbildung 12: Räumliche Verteilung des Bewässerungsbedarfs für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperiode des Trockenjahres 2003 im 500 m x 500 m Raster.	19