



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschaftsdepartement EVD
Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART
Forschungsgruppe Lufthygiene/Klima

Bewässerungsbedürftigkeit in der Schweiz

Jürg Fuhrer, Karsten Jasper



**- Schlussbericht -
2009**

Projekt: Studie Bewässerungsbedürftigkeit in der Schweiz (BB-CH)

Berichtszeitraum: 01.09.2008 – 31.05.2009

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 Landwirtschaft (31)
Forschungsgruppe Lufthygiene / Klima (31.1)

Ansprechpartner: 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	5
1 Auftrag und Vorgehen	7
2 Kurzpräsentation der Testgebiete	9
2.1 Übersicht	9
2.2 Das Einzugsgebiet der Thur	11
2.3 Das Einzugsgebiet der Emme	11
2.4 Das Einzugsgebiet der Broye	12
2.5 Das mittlere Rhone-Einzugsgebiet	13
2.6 Das Einzugsgebiet des Ticino.....	13
2.7 Das Einzugsgebiet des Dischmabaches.....	14
3 Inputdaten für die Modellrechnungen	15
3.1 Zeitbezogene Datensätze	15
3.1.1 Meteorologische Zeitreihen	15
3.1.2 Hydrologische Zeitreihen.....	16
3.2 Gerasterte Flächendatensätze.....	16
3.2.1 Basisdatensätze	16
3.2.2 Topographische Analyse des Höhenmodells.....	16
3.2.3 Reklassifizierung der Landnutzungsdaten	19
3.2.4 Bodenartenklassifizierung	22
3.2.5 Daten- und Modellgrids	25
4 Durchführung der Simulationen in den Testgebieten	26
4.1 Setup der Modellrechnungen.....	26
4.2 Kalibrierung des Modells.....	28
4.2.1 Vorgehensweise	28
4.2.2 Ergebnisse für die Untersuchungsgebiete	29
4.3 Ergebnisse der Modellvalidierung und Langzeitsimulation.....	30
4.3.1 Vorgehensweise	30
4.3.2 Ergebnisse für die Untersuchungsgebiete	31
5 Flächendifferenzierte Ermittlung der Bewässerungsbedürftigkeit	33
5.1 Extrapolation der gebietspezifischen Simulationsergebnisse	33
5.2 Trendanalysen zur Trockenheit	38
6 Bewertung	42
7 Literatur	44
8 Anhang	46
A: Glossar	47
B: Verwendete Abflusspegel für die Modellkalibrierung.....	49
C1: Arealstatistik Schweiz 1992/97 - Nomenklatur	50
C2: Arealstatistik Schweiz 1992/97 - Reklassifizierung.....	51
D: Definition der Kartierungseinheiten in der BEK200	53

E1:	Mittelwerte ET/ETP für Ackerland.....	57
E2:	Mittelwerte ET/ETP für Grasland	58
E3:	ET/ETP Quantile für Ackerland.....	59
E4:	ET/ETP Quantile für Grasland	60
E5:	20% ET/ETP Quantil für Ackerland.....	61
E6:	20% ET/ETP Quantil für Grasland	62
E7:	25% ET/ETP Quantil für Ackerland.....	63
E8:	25% ET/ETP Quantil für Grasland	64
E9:	33% ET/ETP Quantil für Ackerland.....	65
E10:	33% ET/ETP Quantil für Grasland	66
E11:	50% ET/ETP Quantil für Ackerland.....	67
E12:	50% ET/ETP Quantil für Grasland	68
E15:	Maximale Länge der Trockenheitsperiode für Ackerland	69
E16:	Maximale Länge der Trockenheitsperiode für Grasland.....	70
F	Tabellenverzeichnis	71
G	Abbildungsverzeichnis	72

Zusammenfassung

Die Nachfrage nach Bewässerung nimmt zu und wird im Zuge des Klimawandels weiter steigen. Für die Planung erfordert diese Entwicklung Angaben zur Bewässerungsbedürftigkeit, welche mit Hilfe eines hydrologischen Berechnungsmodells für die Periode 1980-2006 schweizweit erhoben wurden. Als Ergebnis stehen Karten im 500 x 500 m Raster zur Verfügung, die das Risiko für Ertragsverluste anhand verschiedener Trockenheits-Indikatoren für Acker- und Grasland darstellen.

Heute werden in der Schweiz zur Sicherung des Ernteertrags 38'000 Hektaren der landwirtschaftlichen Nutzfläche regelmässig und zusätzliche 12-17'000 Hektaren gelegentlich bewässert. In Zukunft könnte sich dies ändern, denn im Zuge des Klimawandels dürften viele Landwirte mit einem zunehmenden Bewässerungsbedürfnis konfrontiert sein. Aufgrund der Klimaszenarien für die Schweiz werden die sommerlichen Niederschläge bis 2050 um durchschnittlich gegen 20% abnehmen. Gleichzeitig fördern steigende Temperaturen von mehreren Graden sowie vermehrte Strahlung die potentielle Verdunstung. Im Zusammenspiel dieser Entwicklungen entstehen zunehmend Defizite bei der Wasserversorgung, mit negativen Folgen für den Ertrag empfindlicher Kulturpflanzen. Unter den klimatischen Bedingungen im Sommer 2003, die oft als Abbildung typischer Bedingungen gegen Ende dieses Jahrhunderts bezeichnet werden, traten Ertragseinbussen von durchschnittlich 20% und in extremen Lagen von über 50% ein.

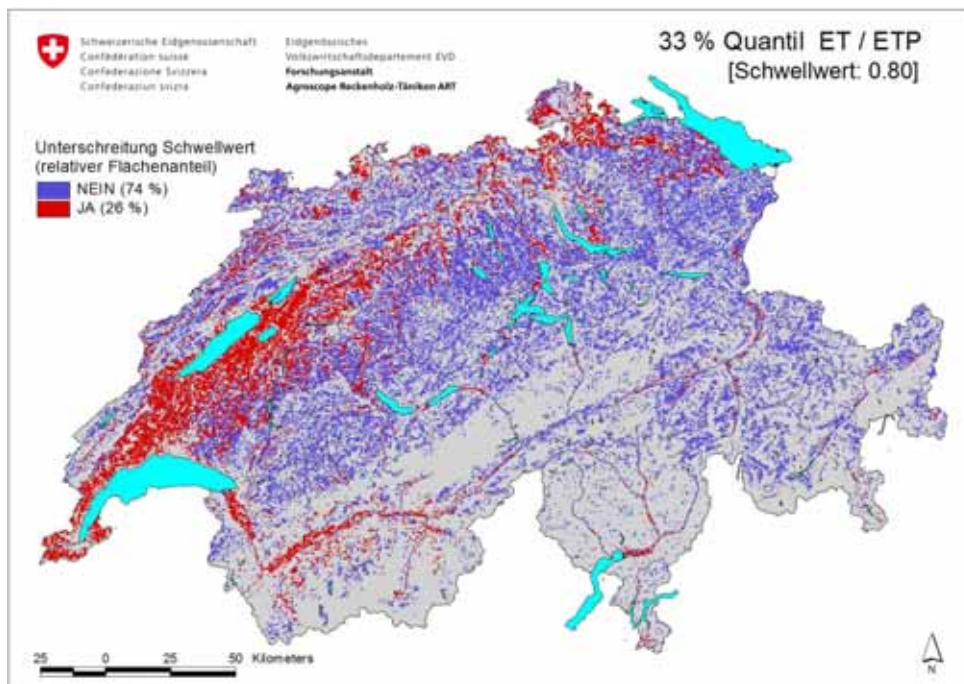
Der zunehmende Bedarf für ergänzende Bewässerung dürfte neben ökonomischen und ökologischen Problemfeldern auch ein erhöhtes Konfliktpotenzial für die Wassernutzung durch Wirtschaft und Gesellschaft auslösen. Entsprechend hoch ist das Bedürfnis für objektive Kriterien und Grundlagen zur Beurteilung der gegenwärtigen und zukünftigen Bewässerungsbedürftigkeit in der Landwirtschaft. Aus diesem Grund wurde durch die Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART im Auftrag von Bund und mehreren Kantonen eine erste Studie durchgeführt, um die landwirtschaftlich genutzten Gebiete der Schweiz hinsichtlich ihrer heutigen Bewässerungsbedürftigkeit zu analysieren und zu bewerten. Dazu wurden räumlich interpolierten Klimadaten sowie Topographie und Bodeneigenschaften und die Ansprüche von durchschnittlichen Ackerkulturen und des Graslandes (in vereinfachter Form auch von Obstkulturen) berücksichtigt.

Die Berechnungen in Tagesschritten mit einer Auflösung von 500 x 500 m wurden mit Hilfe des flächendifferenziert arbeitenden Wasserhaushaltsmodells WaSiM-ETH(<http://www.wasim.ch>) durchgeführt. Dieses vielseitige Modellsystem stellt den aktuellen Stand des Wissens in der hydrologischen Modellierung von Einzugsgebieten dar. Die physikalisch basierten Grundlagen erlauben eine zeit- und flächendetaillierte Berechnung aller hydrologisch relevanten Wasserflüsse, mit einem besonderen Augenmerk auf der realitätsnahen Abbildung der Bodenwasserdynamik und des Bodenwasserhaushaltes. Für diese gesamtschweizerische Studie wurde ein zweistufiges Vorgehen gewählt: In einem ersten Schritt wurde das Modell mit Hilfe von beobachteten Daten für Abfluss und Bodenfeuchte in sechs Gebieten unterschiedlicher Charakteristik und Lage kalibriert und überprüft. In einem zweiten Schritt wurden die Ergebnisse der gebietsbezogenen Modellkalibrierung durch ein statistisches Verfahren auf die Gesamtschweiz übertragen und für die flächendeckende Wasserhaushaltsberechnung verwendet.

Als wichtigste Bewertungsgrösse für die ertragsrelevante Trockenheit wurde das Verhältnis aus aktueller zu potentieller Verdunstung (ET/ETP) benutzt. Diese Grösse berücksichtigt sowohl die klimatologischen Bedingungen der Verdunstung wie auch den Einfluss der Wasserverfügbarkeit im Boden während der Vegetationszeit. Zudem besteht ein direkter Zusammenhang zwischen diesem Verhältnis und der Ertragsminderung. Je tiefer das Verhältnis, umso grösser die Wahrscheinlich-

keit, dass der Ertrag durch eine ungenügende Wasserversorgung gemindert ist. Als Schwelle für die Bewertung wurde schliesslich ein Wert für das ET/ETP-Verhältnis von 0.80 gewählt.

In der folgenden Karte sind die landwirtschaftlich genutzten Gebiete ausgeschieden, in welchen die kritische Schwelle von 0.80 im Mittel der Vegetationsperiode in einem Drittel der 27 untersuchten Jahre unterschritten war (33%-Quantil), beziehungsweise in jedem dritten Jahr eine Ertragsminderung aufgetreten ist. Die betroffene Fläche hat einen Anteil von 26% an der gesamten Nutzfläche, mit dem überwiegenden Flächenanteil in den ackerbaulich genutzten Regionen des westlichen Mittellandes, im Wallis sowie in kleineren inneralpinen Tälern.



Karte der Bewässerungsbedürftigkeit in der Schweiz aufgrund der Unterschreitung des Schwellenwerts in einem Drittel der Jahre 1980-2006.

Die regionale Differenzierung der Bewässerungsbedürftigkeit widerspiegelt die Verteilung der klimatischen Bedingungen und der Bodeneigenschaften, aber auch die Höhenlage und die wechselnden Anteile von Acker- und Grünland. Aus den Daten kann somit das grossräumliche Muster der Bewässerungsbedürftigkeit und die zeitliche Entwicklung während der letzten 27 Jahre herausgelesen werden. Für eine detaillierte Analyse einzelner Standorte oder bestimmter Kulturen sind aber zusätzliche Berechnungen unter Verwendung lokaler Daten unverzichtbar.

Neben der Häufigkeit ist insbesondere auch die Dauer einer Schwellenwertunterschreitung von Interesse, d.h. die Länge und Intensität einer Trockenheitsperiode. Daher wurden flächendifferenzierte Analysen zur Dauer einer ET/ETP Schwellenwertunterschreitung und zu möglichen Trends durchgeführt. Die Berechnungen zur Trockenheitsperiode, d.h. zur Länge der Periode mit einer dauernden Unterschreitung des kritischen Schwellenwerts von 0.80 im Ackerland, weisen darauf hin, dass ohne zusätzliche Bewässerung bereits heute viele Ackerbauflächen regelmässig für mehrere zusammenhängende Wochen oder gar Monate unterhalb kritischer Trockenheitsgrenzen liegen. Die längsten mittleren Trockenheitsperioden mit über 60 Tagen traten im Seeland und in der Westschweiz auf. Maximale Längen für die Trockenheitsperioden in diesen Gebieten liegen bei 150 bis 200 Tagen.

Die nun vorliegenden Grundlagen zeigen, dass eine Bewässerung zur Vermeidung häufiger Ertragseinbussen vor allem im Ackerbau bereits heute in vielen Regionen notwendig ist. Im Zuge des Klimawandels dürfte die betroffene Fläche in den kommenden Jahrzehnten weiter wachsen und damit die Nachfrage nach Bewässerung steigen.

1 Auftrag und Vorgehen

Im Zuge des Klimawandels sieht sich die Landwirtschaft der Schweiz künftig mit einem zunehmenden Bewässerungsbedürfnis konfrontiert. Dieses dürfte neben ökonomischen und ökologischen Problemfeldern auch ein erhöhtes Konfliktpotenzial für die Wassernutzung mit sich bringen. Entsprechend hoch ist das Interesse an objektiven Kriterien und Grundlagen zur Beurteilung der gegenwärtigen und zukünftigen Bewässerungsbedürftigkeit landwirtschaftlicher Kulturen.

Der Auftrag für die vorliegende Studie bestand darin, belastbare Entscheidungsgrundlagen zur Bewässerungsbedürftigkeit in der schweizerischen Landwirtschaft bereitzustellen. Dazu waren mit Hilfe von geeigneten Daten, Werkzeugen und Methoden die landwirtschaftlich genutzten Gebiete der Schweiz hinsichtlich ihrer 'Bewässerungsbedürftigkeit' übersichtsmässig zu analysieren und zu bewerten. Im Rahmen der Arbeiten sollten sowohl klimatologische, topographische als auch pedologische Aspekte (Daten), und schliesslich die Ansprüche der Vegetation (Acker- und Grünland) berücksichtigt werden.

Eine attraktive Möglichkeit für die Erfüllung der oben genannten Leistungsvorgaben war durch den Einsatz von flächendifferenziert arbeitenden Wasserhaushaltsmodellen gegeben. Im Rahmen dieser Studie kam folgerichtig ein Vertreter dieser Modellgruppe, namentlich das Abfluss- und Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH (Schulla [1997], Schulla & Jasper [2007], vgl. auch www.wasim.ch), zur Anwendung. 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 flächendeckende Simulation aller hydrologisch relevanten Wasserflüsse. Besonderes Augenmerk wird vom Modell auf die realitätsnahe Simulation der Bodenwasserdynamik und des Bodenwasserhaushalts gelegt. Diese Tatsache, zusammen mit den vergleichsweise geringen Datenanforderungen, prädestinierte den Einsatz von WaSiM-ETH im aktuellen Projekt. Gewinnbringend kam hinzu, dass der Auftragnehmer im Zusammenhang mit Studien über die Auswirkungen des Klimawandels in der Schweiz bereits auf umfangreiche Erfahrungen in der Anwendung des gewählten Modellsystems zurückgreifen konnte (u.a. Jasper et al. [2004], [2006]).

Die modellseitigen Arbeiten zur Umsetzung der Leistungsvorgaben zielten auf langjährige, kontinuierliche Wasserhaushaltssimulationen für die gesamte Schweiz. Zielgrösse der Untersuchungen war die flächendifferenzierte Bestimmung von potentieller (ETP) und aktueller (ET) Evapotranspiration. Das Verhältnis, d.h. ET/ETP als relative Evapotranspiration für die Vegetationsperiode, stellt einen geeigneten und vielfach genutzten Indikator zur Beurteilung von trockenheitsbedingten Ertragsausfällen dar (FAO Irrigation and Drainage Paper No 33, Dorenboos & Kassam [1979]). Das Verhältnis ET/ETP steht in einem direkten Zusammenhang mit dem Verhältnis von aktuellem zu potentiellstem Ertrag ($Y_{\text{aktuell}}/Y_{\text{max}}$) landwirtschaftlicher Kulturen (Raes [2002]), mit einem kulturspezifischen Proportionalitätsfaktor K_y (Dorenboos & Kassam [1979]).

$$1 - \frac{Y_{\text{aktuell}}}{Y_{\text{max}}} = K_y \left(1 - \frac{ET}{ETP} \right)$$

Damit kann die Betrachtung der Bewässerungsbedürftigkeit auf dem Kriterium der Ertragsreduktion aufgebaut werden (Abbildung 1). Das Verhältnis berücksichtigt sowohl die klimatischen Bedingungen, welche die Evapotranspiration beeinflussen, wie auch die lokalen Faktoren, welche die pflanzliche Transpirationsleistung reduzieren können, insbesondere den verfügbaren Wassergehalt des Bodens.

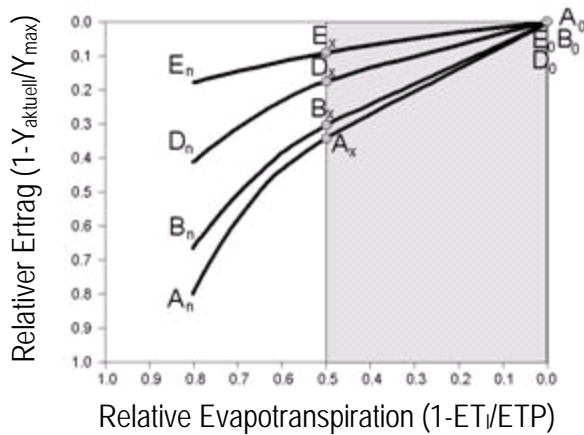


Abbildung 1: Beziehung zwischen der relativen Evapotranspiration (ET/ETP) und dem relativen Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen ($Y_{\text{aktuell}}/Y_{\text{max}}$). Die Situationen A_n bis E_n repräsentieren unterschiedliche Umweltbedingungen von optimal (A_n) bis schlecht (E_n). Bis zu einem Wert für ET/ETP von 0.5 werden diese Beziehungen als linear angenommen (Raes [2002]).

Als Kriterium für die Bewässerungsbedürftigkeit durchschnittlicher Acker- und Wiesenkulturen wurde in Absprache mit dem Auftraggeber ein kritischer Wert für das Verhältnis ET/ETP von 0.80 gewählt, zudem als Kriterium für Trockenheit die Länge der Periode (Anzahl Tage: Mittelwert und Maximalwert) mit einer Unterschreitung des kritischen Werts von 0.80, wobei die Periode mindestens 5 Tage lang sein musste und Unterbrechungen von maximal 2 Tagen toleriert wurden.

Als Referenzzeitraum wurde die Periode 1980-2006 gewählt. Für dieses Zeitfenster wurden kontinuierliche Tagesschrittssimulationen in einer räumlichen Auflösung von 500 m x 500 m durchgeführt. Da der Aufwand für eine gesamtschweizerische Wasserhaushaltsmodellierung in dieser hohen Modellauflösung und geplanten Detailliertheit ausgesprochen hoch wäre, wurde in Absprache mit dem Auftraggeber ein zweigeteiltes Vorgehen gewählt:

In einem *1. Schritt* wurde das Modell für sechs Schweizer Flussgebiete unterschiedlicher Charakteristik und Lage kalibriert, anschliessend mit unabhängigen Daten validiert, schliesslich für die Berechnung von ET/ETP Werten für jede Gridzelle verwendet. In einem *2. Schritt* wurden die für die Flussgebiete erzielten ET/ETP Indikatoren mittels Mehrfachregression auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Gesamtschweiz übertragen und für die flächendifferenzierte Bestimmung der Bewässerungsbedürftigkeit und des Trockenheitsrisikos verwendet.

Im Rahmen dieser Studie wurden alle statistischen Auswertungen für die Vegetationsperiode durchgeführt. Deren Ermittlung (Start und Länge) erfolgte für Acker- und Grasland mit einem dynamischen Berechnungsansatz (Beginn temperaturgesteuert). Die landwirtschaftlichen Nutzflächen wurden sowohl gesamthaft als auch getrennt für Acker- und Grasland analysiert.

Der vorliegende Bericht dokumentiert zunächst die Anwendung von WaSiM-ETH (Modellversion 8.3.2, Richards-Ansatz) auf ausgewählte Flusseinzugsgebiete (Thur, Emme, Broye, mittlere Rhone, Ticino und Dismabach). Nach der Präsentation der Testgebiete (Kapitel 2) wird die Sichtung und modellgerechte Aufbereitung der vorhandenen Datengrundlagen beschrieben (Kapitel 3). Anschliessend erfolgt die Dokumentation der Konfigurierung, Kalibrierung und Validierung des Modells für die Testgebiete (Kapitel 4). Die Extrapolation der ermittelten ET/ETP Indikatorenmuster auf die Landwirtschaftsflächen der Gesamtschweiz ist im Kapitel 5 beschrieben. Eine Bewertung der Ergebnisse findet sich im Kapitel 6.

2 Kurzpräsentation der Testgebiete

2.1 Übersicht

Die für die Modellanwendung ausgewählten Flussgebiete (Abbildung 2) weisen aufgrund ihrer spezifischen geographischen Lage sehr unterschiedliche Gebietseigenschaften und damit auch landwirtschaftliche Nutzungseignungen auf. Sie repräsentieren in geeigneter Weise die verschiedenen Bedingungen, denen die Schweizer Landwirtschaft unterworfen ist. Für die Regionalisierung ihrer Ergebnisse auf die gesamtschweizerische Landwirtschaft waren somit günstige Voraussetzungen gegeben.

Die Testgebiete haben eine flächenhafte Ausdehnungen zwischen 43 und 1700 km² (Tabelle 1). Die Höhenbereiche erstrecken sich von 220 bis 4435 m ü.M. Die mittleren Höhen der Flussgebiete auf der Alpensüdseite (Rhone, Ticino, Dischmabach) liegen um mehr als 1000 m über denen der Mittellandgebiete (Thur, Emme, Broye). Sie weisen zudem eine stärkere Relieffierung als die nördlich der Alpen gelegenen Gebiete auf.

Der Anteil der landwirtschaftlichen Nutzflächen an der jeweiligen Gesamtgebietsfläche beträgt zwischen 13% und 64%. Die Landwirtschaft in den Südschweizer Flussgebieten des Molassehügellandes wird von Graslandnutzung dominiert, während auf der Alpennordseite im Mittelland vornehmlich ackerbauliche Nutzung anzutreffen ist. Den prozentual höchsten ackerbaulichen Flächennutzungsgrad hat das Broye-Gebiet (57%).

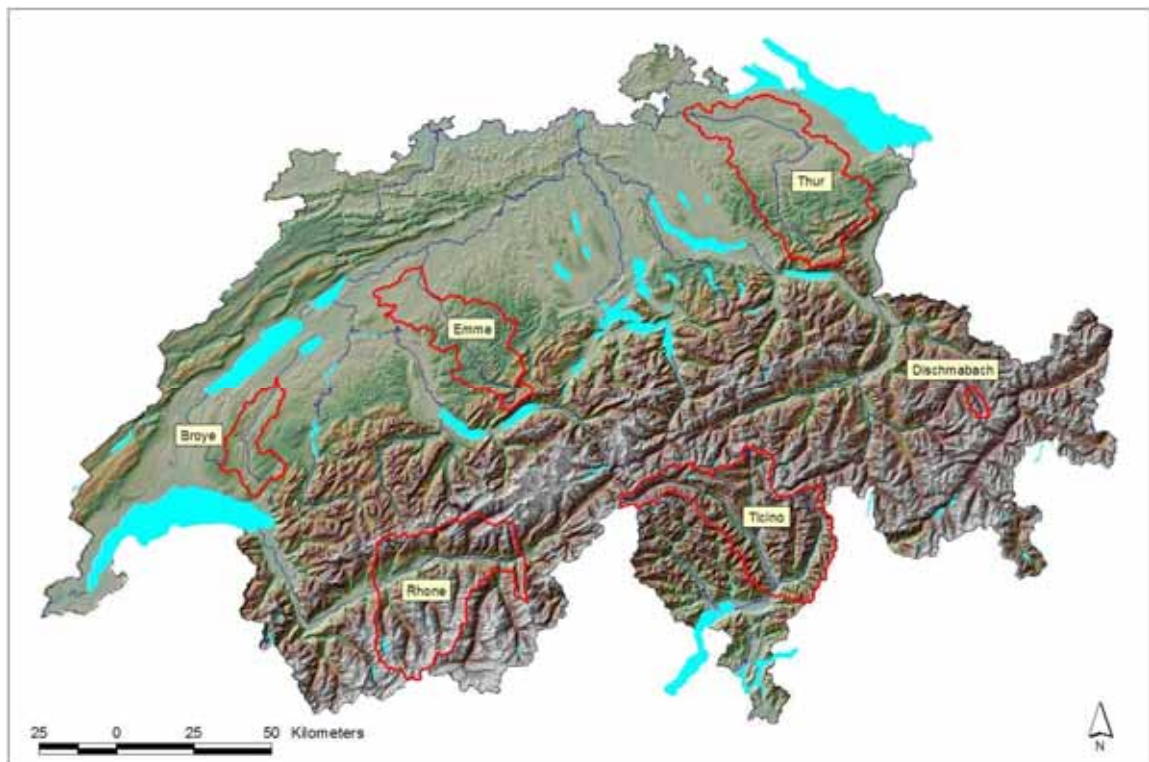


Abbildung 2: Lage der Testgebiete in der Schweiz

Tabelle 1: Kurzcharakteristik der Untersuchungsgebiete

Flussgebiet		Thur	Emme	Broye	Rhone ^e	Ticino	Dischma
Abflusspegel		Andelfingen	Wiler	Payerne	Sion	Bellinzona	Kriegsmatte
Topographie							
Fläche	(km ²)	1696	939	392	1574	1515	43.3
Höchster Punkt	(m üNN)	2504	2221	1504	4435	3402	3146
Niedrigster Punkt	(m üNN)	356	458	441	484	220	1668
Mittlere Höhe	(m üNN)	770	860	710	2066	1680	2372
Mittleres Gefälle ^a	(Grad)	9.5	10.1	5.6	24.3	27.9	24.6
Hauptsächliche Landnutzungen^b							
Bebauung	(%)	9.0	6.8	6.8	3.5	2.6	0.6
Wald	(%)	26.9	35.3	25.5	23.9	37.8	3.9
Ackerland	(%)	36.4	27.4	57.1	0.2	0.5	-
Grasland	(%)	18.8	24.1	7.0	16.7	12.4	27.1
Fels	(%)	1.1	0.80	-	29.2	18.9	41.2
Gletscher	(%)	-	-	-	8.4	0.7	2.1
Abfluss^c							
Minimum	(m ³ s ⁻¹)	2.24	2.26	0.11	17.1	10.6	0.08
Mittel	(m ³ s ⁻¹)	47.0	19.3	7.8	112	67.7	1.7
Maximum	(m ³ s ⁻¹)	1130	663	415	910	1500	19.1
Klima^d							
Jahresniederschlag	(mm)	1564	1402	1300	1200	1959	1324
Jahres- mitteltemperatur	(°C)	7.6	7.2	8.4	2.1	4.3	-0.4

^a Datengrundlage RIMINI-Modell (swisstopo [2004]; vgl. auch Kapitel 3.2.2)

^b Datengrundlage Arealstatistik 1992/97 (BFS [2001]; vgl. auch Kapitel 3.2.3)

^c Angaben aus Hydrologischem Jahrbuch der Schweiz 2007 (BAFU [2008])

^d berechneter Mittelwert für die Simulationsperiode 1980-2006

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

2.2 Das Einzugsgebiet der Thur

Das vorwiegend landwirtschaftlich genutzte Einzugsgebiet der Thur liegt in der Nordostschweiz zwischen Walensee im Süden, dem Tal des Alpenrheins im Osten, dem Bodensee im Norden und den Höhenzügen des Toggenburg im Westen (Abbildung 3). Bis zum Abflusspegel Andelfingen umfasst das Thur-Gebiet eine Fläche von ca. 1700 km². Von Nord nach Süd nimmt der Gebirgscharakter stark zu. Das untere und mittlere Thur-Gebiet kann dem Mittelland zugeordnet werden. Der obere Gebietsteil weist hingegen alpinen Charakter auf. Der Anteil an Flächen unter 1000 m ü.M. beträgt im Thur-Gebiet etwa 81%. Über 2000 m ü.M. befinden sich lediglich 10 km² oder 0.6% der gesamten Einzugsgebietsfläche. In diesem Höhenbereich werden Gefällewerte von mehr als 60° erreicht. Für das Gesamtgebiet wird ein mittleres Gefälle von 9.5° oder 17% ausgewiesen.

Die Thur hat eine Lauflänge von ca. 127 km und ist unterhalb des Bodensees der erste bedeutende Zufluss zum Rhein. Der südöstliche, alpine Teil des Thur-Gebietes ist geologisch durch Kalkstein sowie durch flachgründige Böden gekennzeichnet. Die flachen, schwer durchlässigen und gering wasserspeichernden Böden führen in Verbindung mit dem grossen Geländegefälle zu schnellen Abflussreaktionen auf Starkniederschläge. Diese schnellen Reaktionen werden jedoch zeitlich und mengenmässig durch die verbreitet auftretenden Verkarstungen gedämpft (Details in Schulla [1997]).

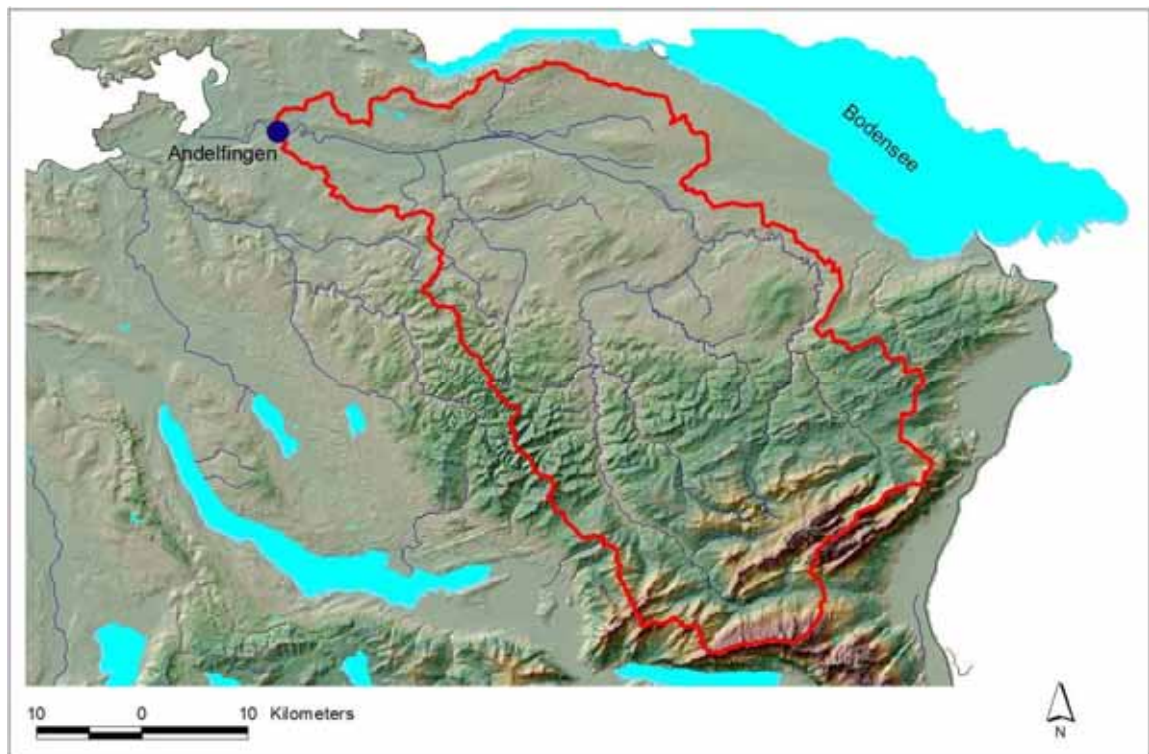


Abbildung 3: Thur-Gebiet mit Lage des Abflusspegels Andelfingen

2.3 Das Einzugsgebiet der Emme

Die Emme entspringt am Hohgant am Alpenrand, fliesst durch das Emmental und einen Teil des Mittellandes (Abbildung 4). Nach einer Fließstrecke von ca. 80 km mündet sie unterhalb von Solothurn in die Aare. Die Emme hat den Charakter eines voralpinen Gebirgsflusses mit wildbachähnlichen Zügen in den höheren Lagen. Ihr Anteil an Flächen mit Höhenlagen unterhalb von 1000 m ü.M. liegt bei 74%. Im Emme-Gebiet sind die tiefer liegenden Gebiete zumeist intensiv durch Ackerbau genutzt.

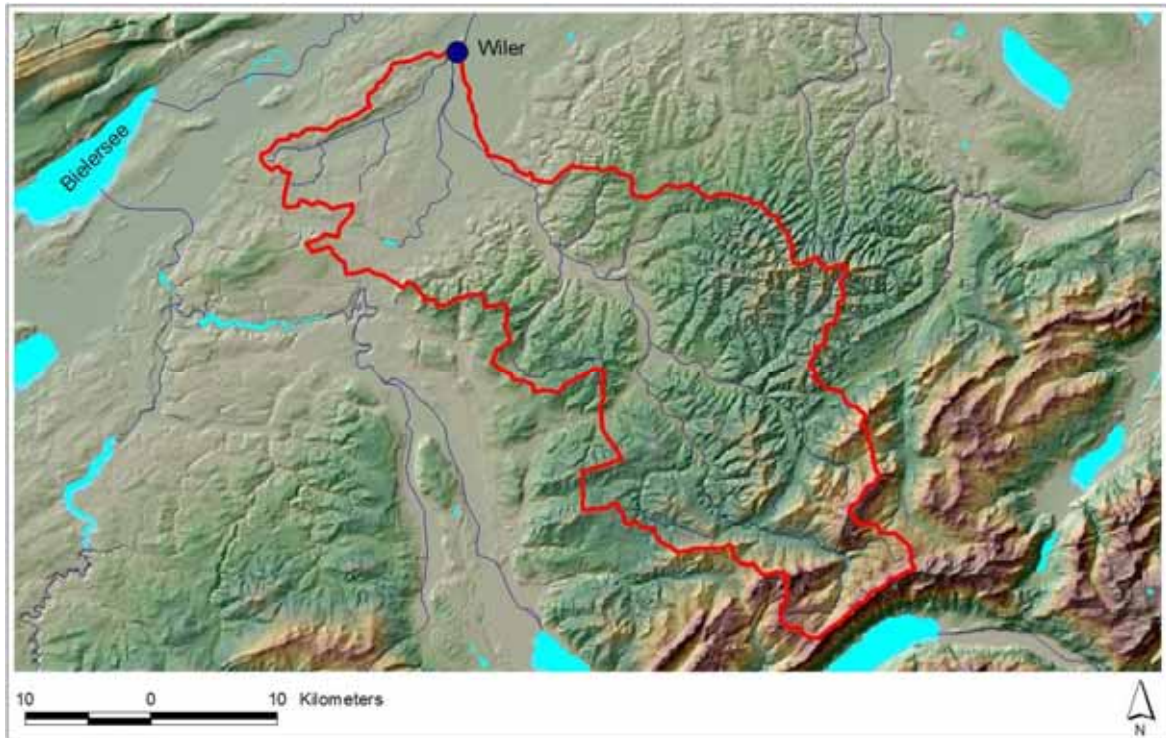


Abbildung 4: Emme-Gebiet bis zum Abflusspegel Wiler

2.4 Das Einzugsgebiet der Broye

Die Broye ist ein 79 km langer Fluss im Westschweizer Mittelland. Sie entspringt in den Freiburger Voralpen, betritt den Talgrund bei Moudon und fliesst in nordöstlicher Richtung zum Murtensee (Abbildung 5). Oberhalb vom Murtensee umfasst das Einzugsgebiet eine Fläche von ca. 570 km², bis zum Abflusspegel Payerne beträgt die Zustromfläche 392 km². Im Broye-Gebiet dominiert ähnlich dem Emme-Gebiet landwirtschaftliche Nutzung. Oberhalb von Payerne beträgt der Anteil der landwirtschaftlichen Nutzfläche 66%, davon entfallen 87% auf Ackernutzung.



Abbildung 5: Broye-Gebiet bis zum Abflusspegel Payerne

2.5 Das mittlere Rhone-Einzugsgebiet

Das hier untersuchte Rhone-Zwischengebiet (Flussabschnitt zwischen Brig und Sion) überdeckt eine Fläche von 1574 km² (ohne die hochalpinen Zuflussgebiete Vispa-Visp und Lonza-Blatten) (Abbildung 6). Das Untersuchungsgebiet ist durch extreme topographische Bedingungen gekennzeichnet. Vom Talboden bis hinauf zu den hochalpinen Gebietsbegrenzungen werden Höhenunterschiede von bis zu 4000 m gemessen.

Der Vergletscherungsgrad beträgt im beschriebenen Rhone-Zwischengebiet etwa 8% und liegt damit deutlich niedriger als für das gesamte flussaufwärts von Sion gelegene Rhone-Einzugsgebiet. Für dieses Gesamtgebiet (3373 km²) wird eine Vergletscherung von mehr als 18% ausgewiesen (BAFU [2008]).

Landwirtschaftliche Nutzflächen befinden sich im Untersuchungsgebiet vor allem im Bereich des Talbodens. Die hier vorkommenden mittel- bis tiefgründigen Böden werden jedoch aufgrund ihrer Überflutungsgefährdung kaum für Ackerbau genutzt. Vielmehr dominiert Graslandnutzung sowie Obstanbau. Ausserhalb der Talbereiche ist eine landwirtschaftliche Nutzung aufgrund von starker Reliefierung und wenig entwickelten Böden nur noch eingeschränkt möglich. Ein Profiteur der günstigen klimatischen Verhältnisse mit überdurchschnittlichem Strahlungsgenuss ist im Rhone-Gebiet der Weinanbau.

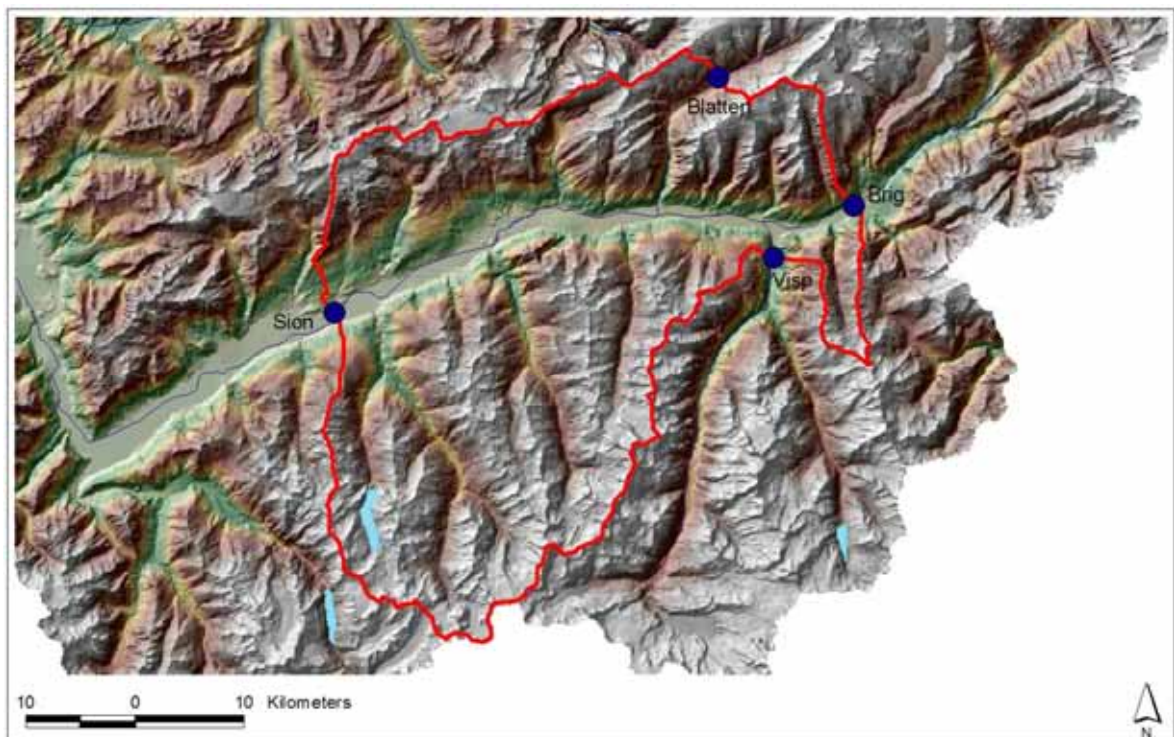


Abbildung 6: Mittleres Rhone-Gebiet mit Lage der verwendeten Abflusspegel

2.6 Das Einzugsgebiet des Ticino

Das 1515 km² grosse Ticino-Gebiet befindet sich auf der Alpensüdseite. Bedingt durch seine spezifische Lage ist es starken klimatischen und hydrologischen Variationen unterworfen (Abbildung 7). Extreme Niederschläge auf der einen Seite und lang andauernde Trockenperioden auf der anderen Seite kennzeichnen die klimatischen Verhältnisse.

Das Gebiet ist durch eine ausgeprägte Topographie charakterisiert. Es weist Höhenunterschiede von über 3000 m und ein mittleres Geländegefälle von ca. 28° auf. Etwa 80% des Ticino-Gebietes liegen oberhalb von 1000 m ü.M. Im Ticino-Gebiet dominieren geringmächtige lehmige Sandbö-

den. Als hauptsächliche Landnutzung wird Waldbewuchs ausgewiesen (38%). Aus Sicht der Landwirtschaft überwiegt ganz klar die Graslandnutzung. Sie nimmt im Ticino-Gebiet einen Flächenanteil von 12% ein.



Abbildung 7: Ticino-Gebiet bis zum Abflusspegel Bellinzona

2.7 Das Einzugsgebiet des Dischmabaches

Der Dischmabach ist ein etwa 15 km langer Quellfluss des Rheins. Er entwässert das Dischma-Hochtal (Abbildung 8). Bis zum Abflusspegel Kriegsmatte beträgt das Einzugsgebiet des Dischmabaches ca. 43 km². Das Dischmatal befindet sich im Übergangsbereich zwischen den feuchteren nördlichen und den trockeneren südlichen Alpen (Gurtz et al. [2003]). Sein Haupttal erstreckt sich von SSO nach NNW. Das Gebiet des Dischmabachs hat eine mittlere Höhe von 2372 m ü.M. und ist zu 2.1% vergletschert. Es ist das höchstgelegene der sechs untersuchten Einzugsgebiete.

Die Böden des Dischmatals sind wenig entwickelt und weisen zumeist Bodentiefen von weniger als 50 cm auf. Grundwasservorkommen sind lediglich in Flusslaufnähe anzutreffen. Grasland ist die dominierende Vegetationsform im Dischmabach-Gebiet.

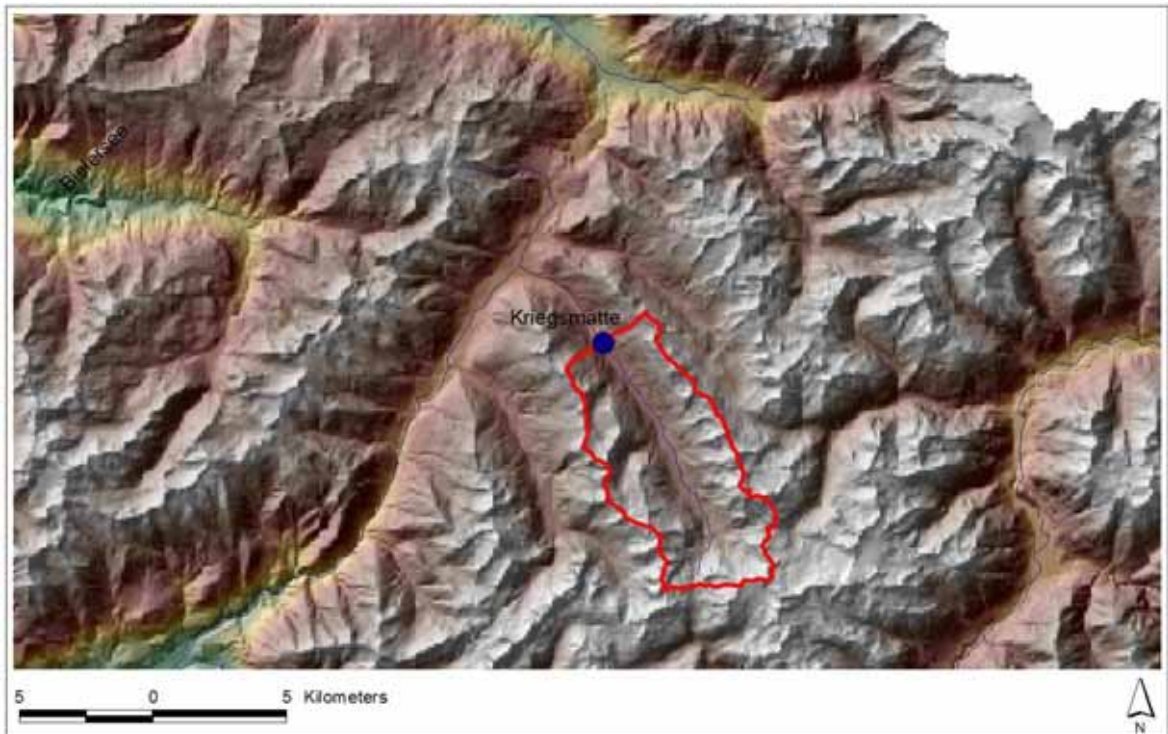


Abbildung 8: Dismbach-Gebiet bis zum Abflusspegel Davos-Kriegsmatte

3 Inputdaten für die Modellrechnungen

3.1 Zeitbezogene Datensätze

3.1.1 Meteorologische Zeitreihen

Für die Modellanwendungen wurden langjährige meteorologische Beobachtungsreihen von verschiedenen Bodenmessnetzen der MeteoSchweiz (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie) über die CLIMAP-net Datenbank verfügbar gemacht und modellgerecht aufbereitet (Tabelle 2). Es wurden sowohl stationsbezogene Datenreihen der automatischen Messnetze (ANETZ, KLIMA, ENET) als auch die des dichteren Niederschlagsmessnetzes (NIME) verwendet. Im Ergebnis der Arbeiten standen Tabellendateien mit schweizweiten Tageswerten für die meteorologischen Kenngrössen *Niederschlag* (428 Stationen), *Lufttemperatur* (84), *Windgeschwindigkeit* (100), *Dampfdruck* (61), *relative Luftfeuchtigkeit* (86), *Globalstrahlung* (68) und *relative Sonnenscheindauer* (68) zur Verfügung. Die aufbereiteten Zeitreihen erstrecken sich jeweils über die Periode 01.01.1980–31.12.2006. Längere Datenlücken bestanden vor allem für die Variablen *Globalstrahlung* und *Sonnenscheindauer*.

Tabelle 2: Stationszahl für die Modellanwendungen

	CH	Thur	Emme	Broye	Rhone	Ticino	Dischma
Niederschlag	428	61	40	21	29	24	3
Lufttemperatur	84	12	11	11	12	12	2
Windgeschwindigkeit	100	16	17	14	12	14	2
Dampfdruck	-	11	10	10	-	7	2
Luftfeuchtigkeit	86	-	-	-	14	-	-
Globalstrahlung	68	11	10	10	8	12	2
Sonnenscheindauer	68	12	10	10	8	12	2

Die meteorologischen Beobachtungsstationen erfassen Messwerte auf Höhenlagen zwischen 203 und 3580 m ü.M. Die Mehrzahl der Stationen befindet sich unterhalb von 1000 m ü.M. (z.B. 69% der Niederschlagsstationen). Oberhalb von 2000 m ü.M. (entspricht ca. 24% Flächenanteil der Gesamtschweiz) sind nur noch 2% der Niederschlagsstationen und 10-20% der Klimastationen verfügbar.

Im Rahmen der Zeitreihenanalyse wurde eine mehr oder minder stark ausgeprägte Höhenabhängigkeit (10-90%) für die verwendeten meteorologischen Variablen nachgewiesen. Die räumliche Interpolation der stationsbezogenen Messdaten auf das Modellgitter wurde daher durch eine gewichtete Kombination aus höhenabhängiger Regression und abstandsgewichteter Interpolation durchgeführt (vgl. auch Kapitel 4.1). Beide Verfahren sind ausführlich in Schulla [1997] und Schulla & Jasper [2007] beschrieben. Die Ermittlung der höhenabhängigen Regressionen erfolgte regionsspezifisch auf Basis der klimatischen Grossregionen der Schweiz (Müller [1980]).

3.1.2 Hydrologische Zeitreihen

Für die Kalibrierung und Validierung des hydrologischen Modells wurden Tagesmittelwerte des Abflusses (in m^3/s) als kontinuierliche pegelbezogene Messwertreihen (1980-2006) vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) bezogen und modellgerecht in Form von WaSiM-Tabellen aufbereitet. Für die anstehenden Modellanwendungen wurden Abflussdaten von insgesamt 26 Pegeln verfügbar gemacht: Thur (12 Stationen), Emme (4), Broye (1), Rhone (4), Ticino (4), Dischmabach (1). Eine Auflistung aller verwendeten Pegelstationen befindet sich im Anhang B.

3.2 Gerasterte Flächendatensätze

3.2.1 Basisdatensätze

Die für die Durchführung der Modellsimulationen notwendigen Raumdaten wurden aus den nachfolgend genannten 100 m x 100 m Flächendatensätzen der Schweiz extrahiert:

- Interpolierte Höhendaten des RIMINI-Modells (originale Maschenweite 250 m x 250 m) (swiss-topo [2004])
- Landnutzungsklassen der „Arealstatistik 1992/97 der Schweiz“ (BFS [2001])
- Bodendatenklassifizierungen der „Digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz“ (BFS [2004])

3.2.2 Topographische Analyse des Höhenmodells

Im Rahmen der Datenaufbereitung erfolgte eine umfassende topographische Analyse des vorliegenden landesweiten RIMINI-Höhenmodells. Dazu wurde das WaSiM-Helptool *TANALYS* (Topographische ANALYSe) eingesetzt (Schulla [1997]). Dieses Programm-Tool gestattet eine automatisierte Berechnung und Korrektur von modellseitig benötigten Rasterdatensätzen (z.B. Hangneigung, Exposition, Fliessakkumulation und Fliesszeiten) und Linienstrukturen (Angaben zur Fliessgewässergeometrie mit Gerinnetiefen, -breiten, -längen und -gefälle sowie zur Retention). Nach der Definition von Pegelpunkten (vgl. Anhang B) können aus den Daten des Höhenmodells Einzugsgebiets- und Teileinzugsgebietsstrukturen extrahiert werden. Diesen Strukturen können im weiteren flächenbezogene Analyseprodukte (z.B. teilgebietsbezogene Fliesszeitsummen und höhenstufenbezogene Hangneigungen) und Routing-Strukturen (z.B. flussabschnittsbezogene Gerinneparameter sowie Verknüpfungen der Routing-Strecken) zugeordnet werden.

Die Arbeiten zur topographischen Analyse erfolgten sowohl gesamthaft für die Schweiz als auch separat für die ausgewählten Untersuchungsgebiete. Stellvertretend seien nachfolgend die Ergebnisse für das Thur-Gebiet beschrieben.

In der aktuellen Modellanwendung wird die Grösse des Thur-Gebietes durch den Pegel Andelfingen begrenzt, welcher die am weitesten flussabwärts gelegene Abflussmessstelle der Thur vor ihrer Einmündung in den Rhein darstellt. Im Ergebnis der topographischen Analyse wurde für die Thur-Andelfingen ein Einzugsgebiet mit einer Fläche von 1699 km² generiert. Diese Fläche weicht nur um 0.2% von den Angaben im *Hydrologischen Jahrbuch der Schweiz* ab (BAFU [2008]) und liegt damit im unteren Fehlertoleranzbereich.

Das abgeleitete Höhenmodell der Thur ist in Abbildung 9 dargestellt. Es weist eine mittlere Höhe von 769 m und eine Höhenausdehnung von 361 m bis 2458 m auf (vgl. Abbildung 10). Die mittlere Hangneigung wurde zu 9.5° berechnet (vgl. Abbildung 11).

Im Thur-Gebiet befinden sich 12 kontinuierlich beobachtete Abflussmessstellen. Diese Pegel zusätzlich eines virtuellen (künstlich eingefügten) Pegels wurden genutzt, um das Thur-Gebiet in 13 Teileinzugsgebiete (TG) zu unterteilen (vgl. Abbildung 12). Eines der ausgegliederten TG (10) stellt das gut untersuchte Forschungsgebiet Rietholzbach dar. Die Flächengrössen der TG liegen zwischen 3.3 und 318 km² (Tabelle 3).

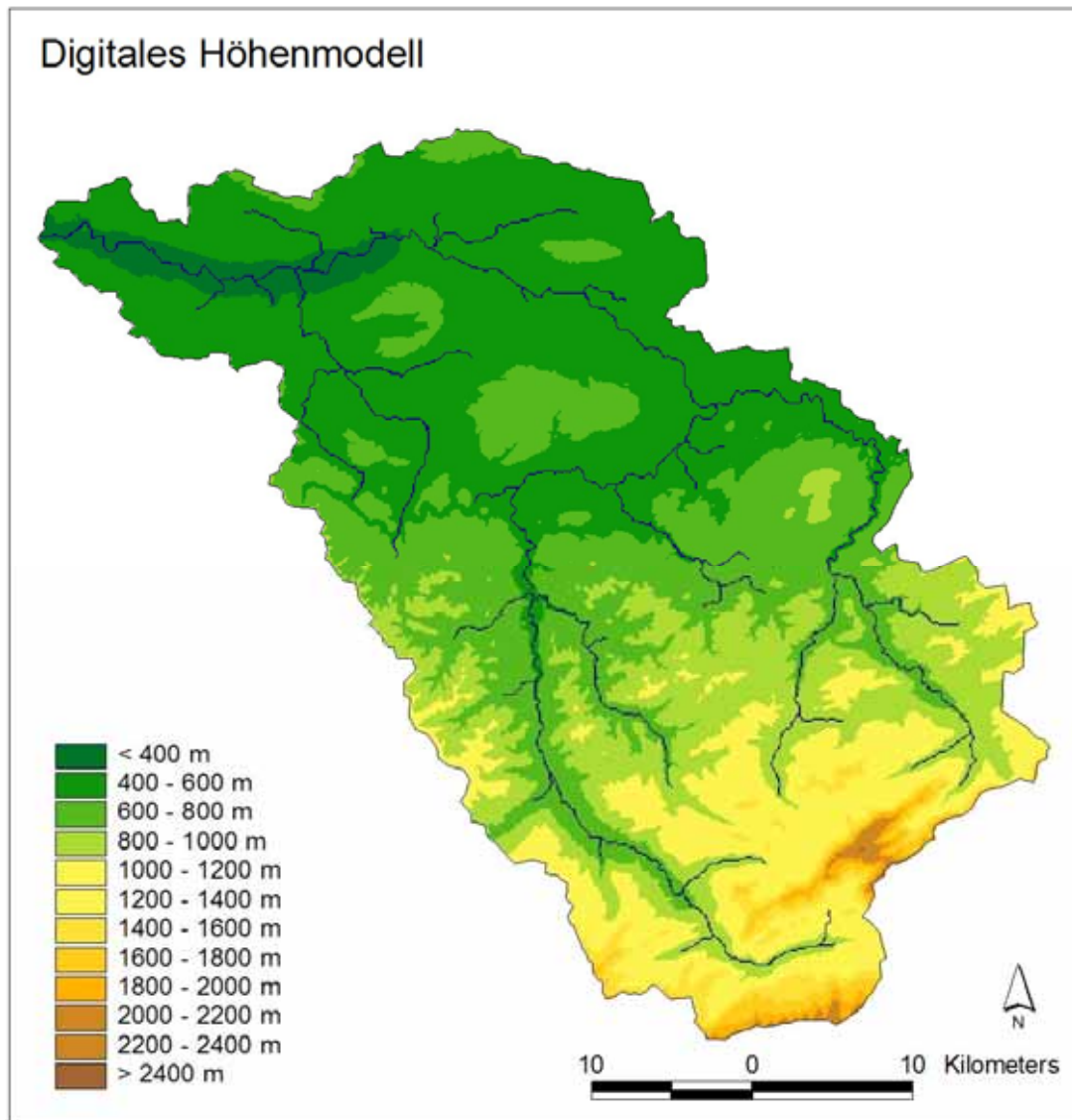


Abbildung 9: Höhenmodell (DHM100) für das Thur-Gebiet mit Flussnetz

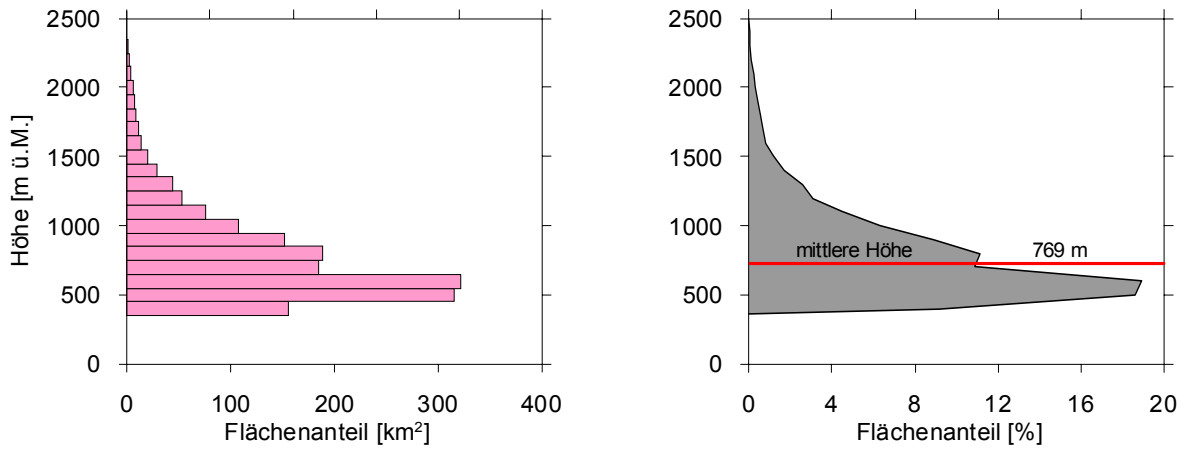


Abbildung 10: Flächenstatistik zur Verteilung der Geländehöhen im Thur-Gebiet

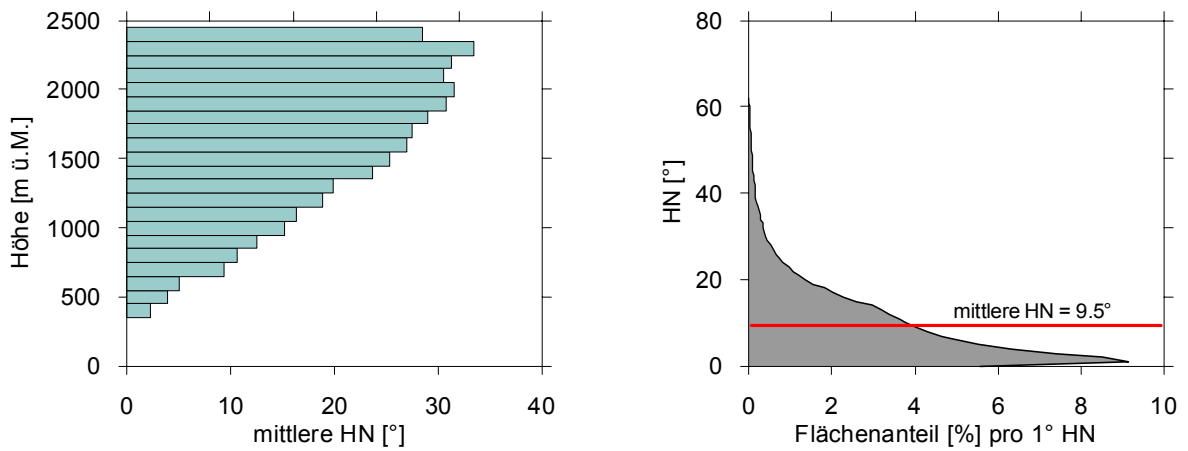


Abbildung 11: Flächenstatistik zur Höhenverteilung der Hangneigungen (HN) im Thur-Gebiet

Tabelle 3: Abgeleitete Teileinzugsgebiete für die Thur (AE_o: oberirdische Einzugsgebietsfläche; TG: Teilgebiet; ber.: berechnet); grau: Zwischengebiete, gelb: Kopfgebiete

Pegel	Pegel-Nr.	Zone	Zulauf zu Zone	AE _o vom TG (ber.) [km ²]	AE _o akkum. (ber.) [km ²]	AE _o akkum. (BAFU) [km ²]
Andelfingen	2044	1		102.6	1698.9	1696.0
Virtuell	xxxx	13	1	299.7	1596.3	Xxx
Halden	2181	4	13	316.9	1090.0	1085.0
Jonschwil	2303	9	4	318.4	492.4	493.0
St. Gallen	2468	5	4	126.3	264.0	261.0
Frauenfeld	2386	2	13	135.6	206.6	212.0
Mogelsberg	2374	11	9	88.7	88.7	88.2
Stein	2331	12	9	82.0	82.0	84.0
Wängi	2126	7	5	71.0	71.0	78.9
Appenzell	2112	3	2	73.4	73.4	74.2
Hundwil	2313	6	5	64.4	64.4	64.5
Herisau	2305	8	4	16.6	16.6	16.2
Mosnang	2414	10	9	3.3	3.3	3.3
Summe				1698.9		

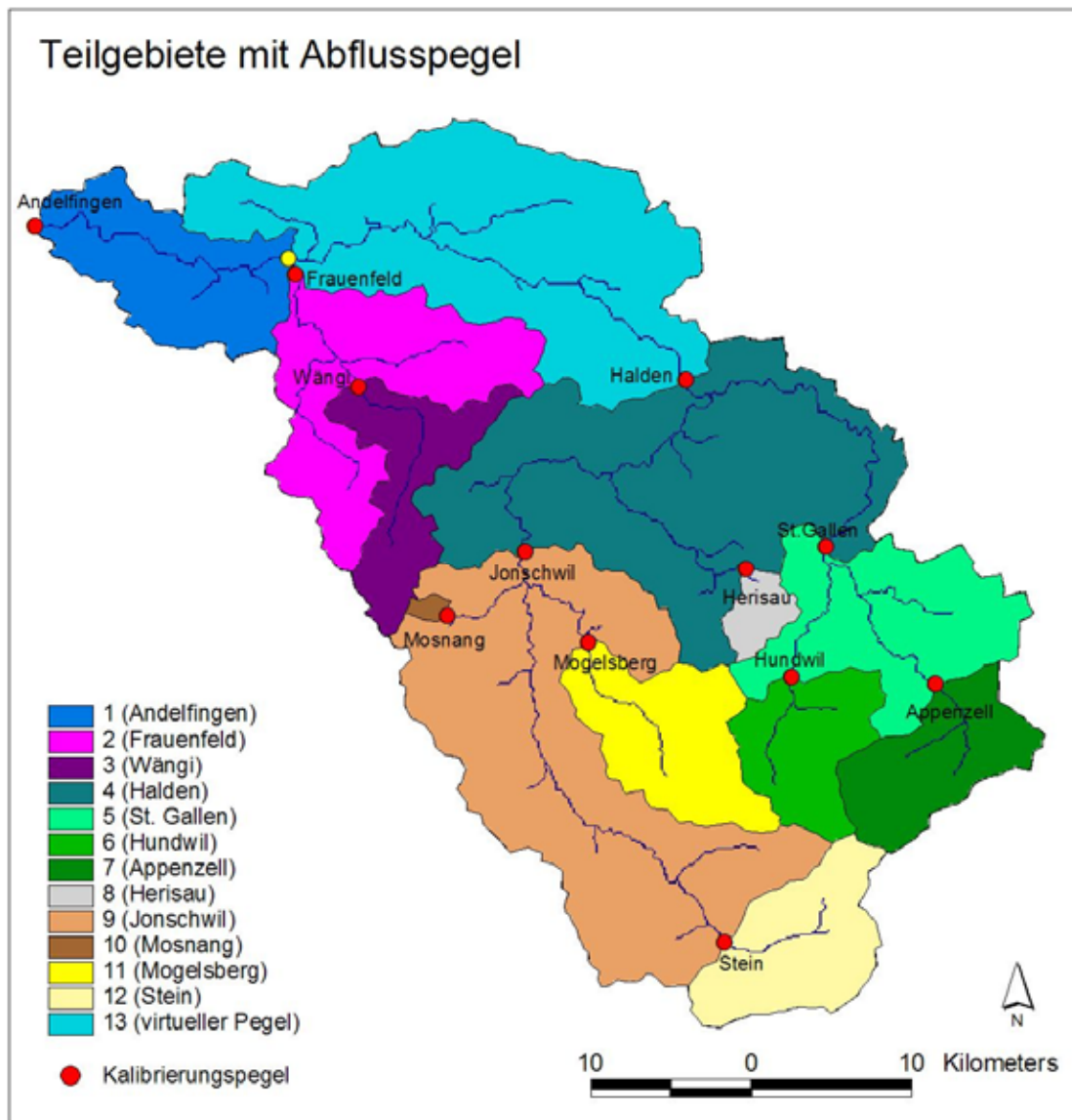


Abbildung 12: Abgeleitete Teileinzugsgebiete für die Thur (● = virtueller Abflusspegel)

3.2.3 Reklassifizierung der Landnutzungsdaten

Die Basisdaten zur Landnutzung wurden der *Arealstatistik der Schweiz 1992/97* (AS97) entnommen (BFS [2001]). Dieser schweizweit vorliegende Datensatz repräsentiert den Zustand der Boden- und Landnutzung Mitte der 90er Jahre. Aktuellere Datensätze zur Landnutzung (Arealstatistik 2004/09) sind noch nicht verfügbar. Für die Erstellung der AS97 wurden das Geländemodell DHM25 sowie Luftbilder der Jahre 1992 bis 1997 des Bundesamtes für Landestopographie (swisstopo) verwendet. Die AS97 unterscheidet insgesamt 74 Nutzungskategorien in den Hauptbereichen (vgl. auch Anhang C1):

- Siedlungsflächen: Gebäude(areal), Industriearéal, Verkehrsflächen, Erholungsanlagen, Abbau, Deponie, Baustellen
- Bestockte Flächen: Wald, Gebüschwald, Gehölze
- Landwirtschaftsflächen: Obstbau, Rebbau, Gartenbau, Wies- und Ackerland, Heimweiden, Alpwirtschaftsfläche

- Unproduktive Flächen: Gewässer, unproduktive Vegetation, vegetationslose Flächen

Die Flächenanteile der Hauptnutzungen sind in Abbildung 13 dargestellt. Danach nehmen die landwirtschaftlich genutzten Gebiete 36.9% der gesamten Landesfläche ein.

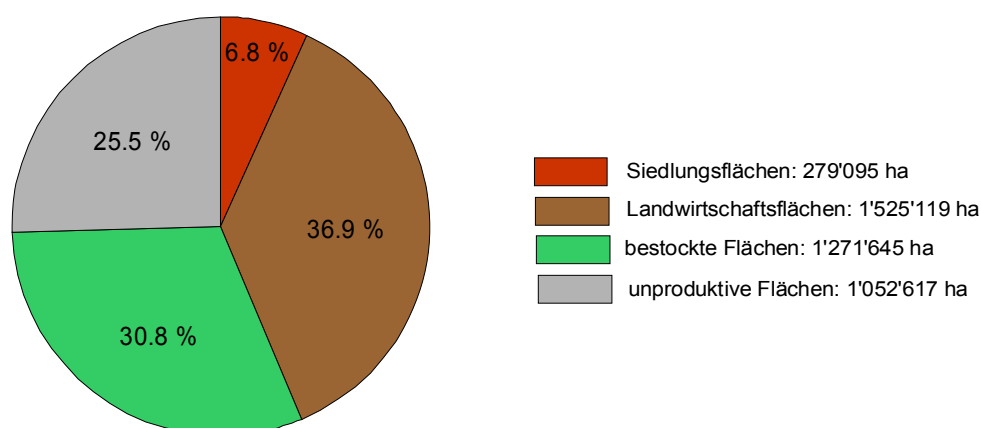


Abbildung 13: Flächenanteile der Hauptnutzungen in der Schweiz nach Arealstatistik 1992/97

Die 74 Nutzungskategorien der AS97 sind für hydrologische Modellanwendungen nicht geeignet parametrisierbar. Sie müssen daher in hydrologisch relevante Landnutzungsklassen reklassifiziert werden. Im aktuellen Projekt verringerte sich durch diese Reklassifizierung die Klassenanzahl drastisch von 74 auf 16. Die vorgenommenen Klassenzuordnungen sind im Anhang C2 aufgeführt und beispielhaft für das Thurgewiet dargestellt (vgl. Abbildung 14).

Die Ausgliederung von Ackerland - diese Nutzungskategorie wird in der AS97 nicht separat geführt- erfolgte anhand der Kriterien des Indikatorensystems MONET (BFS et al. [2002]). Danach „muss der Boden, gemäss Arealstatistik, zum günstigen Wies- und Ackerland, zum übrigen Wies- und Ackerland oder zu den Heimweiden zählen, unterhalb 900 m ü.M. liegen und eine Hangneigung von weniger als 20% aufweisen“. Darüber hinaus soll sich die Ausgrenzung der „ackerfähigen Böden“ an den vorherrschenden klimatischen Verhältnissen und an der Beschaffenheit des Bodens (Klima- und Bodeneignung) orientieren.

Im aktuellen Projekt wurden daher „ackerfähige Böden“ (potenzielles Ackerland) nach folgenden qualitativen und quantitativen Kriterien ausgegrenzt (vgl. auch

Tabelle 4):

- Zugehörigkeit zu den Arealstatistik-Kategorien: 81, 82, 83
- Höhenlage tiefer oder gleich 900 m ü.M. und Hangneigung kleiner 20% (Grund: eingeschränkte Mechanisierbarkeit der Bewirtschaftung und erhöhte Anfälligkeit für Erosion bei höheren Hangneigungen)
- Sehr gute bis gute Eignung für die ackerbauliche Nutzung (Getreide-, Futter- und Hackfruchtbau) entsprechend den Kriterien der *Digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz* (BFS [2004])

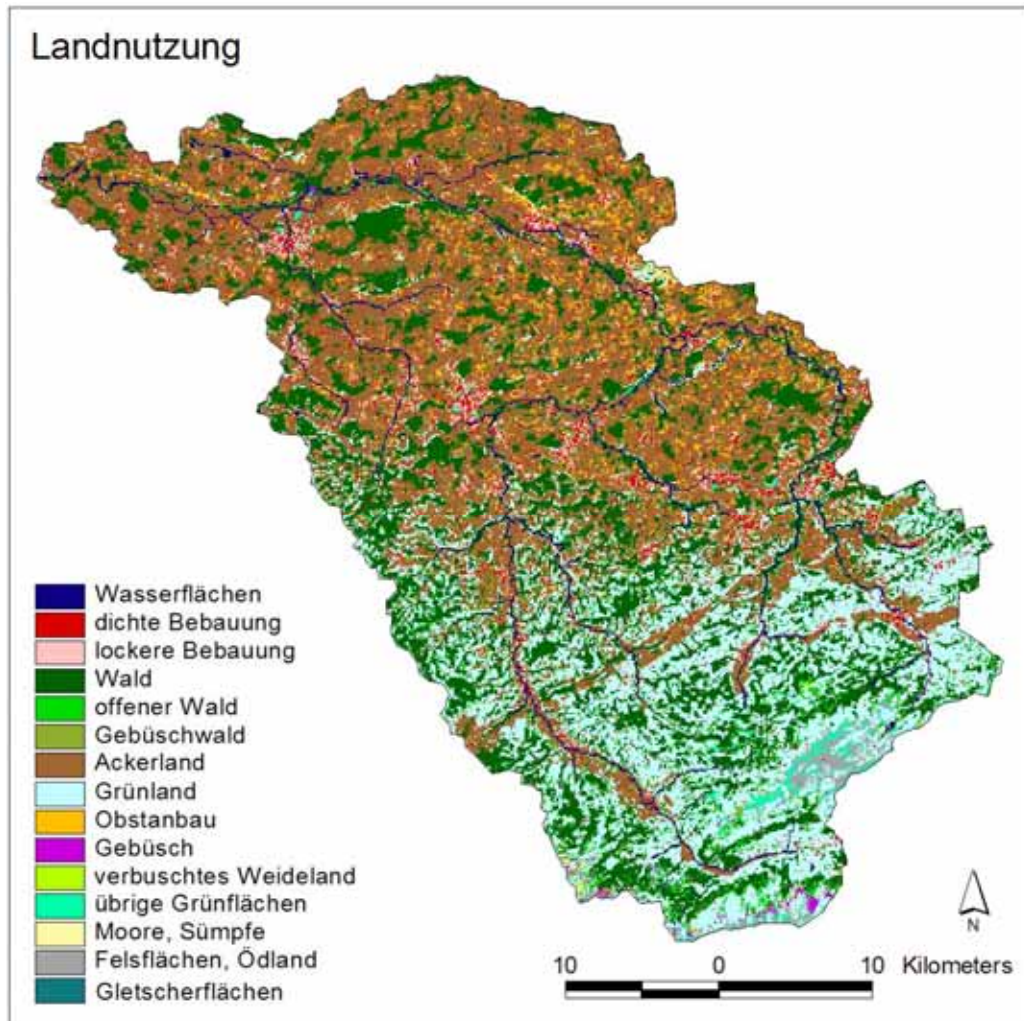


Abbildung 14: Räumliche Verteilung der reklassifizierten Landnutzungen im Thur-Gebiet

Tabelle 4: Ableitung der Landnutzung „Ackerland“ nach dem MONET-Indikatorensystem

Kriterium der Ausgrenzung	(potenzielle) Ackerfläche [ha]
AS97-Kategorie (81, 82, 83)	924'431
→ davon mit Höhenlage ≤ 900 m ü.M.	764'202
→ davon mit Hangneigung ≤ 20%	674'246
→ davon mit Bodeneignung für Getreide-, Hackfrucht- o. Futterbau	629'146

Die reklassifizierten AS97-Daten weisen für die Gesamtschweiz einen landwirtschaftlich genutzten Flächenanteil von 34.9% auf (bezogen auf die WaSiM-Kategorien: Ackerland, Grasland und Obstanbau). In diesem Flächenanteil sind die AS97-Nutzungskategorien 84 (verbuschte Wiesen und Heimweiden), 86 (verbuschte Alp- und Juraweiden) und 89 (versteinte Alp- und Juraweiden) aufgrund ihrer für die aktuelle Fragestellung geringeren Bedeutung nicht enthalten (vgl. Anhang C2).

Die reklassifizierte Landwirtschaftsfläche der Schweiz unterteilt sich danach in 44% Ackerland, 52% Grasland und 4% Obstanbauflächen. Ihre flächenhafte Verteilung ist in Abbildung 15 dargestellt. Das räumliche Verteilungsmuster der Nutzungen veranschaulicht die Dominanz von Ackerflächen im tieferen Mittelland. In den alpinen Regionen ist hingegen Grasland die vorherrschende Nutzungsart. Diese Aufteilung wird auch durch die Flächenanteile der landwirtschaftlichen Nutzungen in den ausgewählten Untersuchungsgebieten bestätigt (siehe auch Kapitel 2.1).

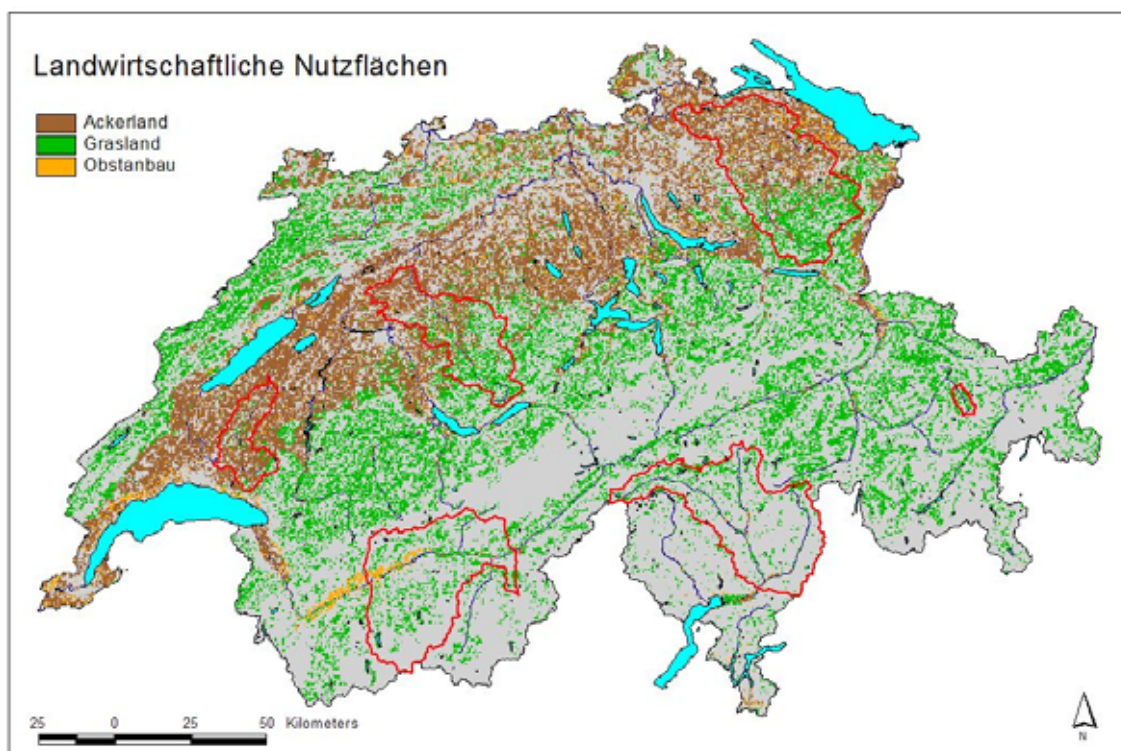


Abbildung 15: Räumliche Verteilung der reklassifizierten Landwirtschaftsflächen in der Schweiz mit Lage der Untersuchungsgebiete

3.2.4 Bodenartenklassifizierung

Die Daten der überarbeiteten „Digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz“ 1:200'000 (BEK200) bildeten im aktuellen Projekt die Grundlage für die Ableitung der modellseitig benötigten Bodenparametersätze. Die BEK200 hat aufgrund ihres Generalisierungsgrades gegenüber detaillierten Bodenkarten (Massstab 1:50'000 und kleiner) diverse qualitative und informative Nachteile. Sie hat aber den entscheidenden Vorteil, dass sie als digitaler Datensatz mit einer Rasterauflösung von 100 m x 100 m landesweit verfügbar ist und damit eine überregional anwendbare Grundlage für raumplanerische Untersuchungen und Entscheide darstellt.

Insgesamt werden in der BEK200 143 Kartierungseinheiten (KE) unterschieden. Diese verteilen sich auf ca. 11'000 Polygone (BFS [2004]). Die KE sind hinsichtlich ihrer land- und forstwirtschaftlichen Eignung kategorisiert (4 Kategorien: (a) sehr gut; (b) gut; (c) mässig; (d) schlecht). Zusätzlich enthalten sie Angaben zu den häufigst vorkommenden Bodentypen sowie Klassifizierungen von bodenhydraulischen Eigenschaften, u.a.:

- Gründigkeit (durchwurzelbare Bodentiefe)
- Skelettgehalt (in den obersten 50 cm des Bodenprofils)
- Mittleres, pflanzennutzbare Wasserspeichervermögen in der durchwurzelten Bodenschicht (pF-Bereich zwischen 2 und 3; abzüglich Bodenskelettanteil und grosser Hohlräume)
- Gesättigte hydraulische Durchlässigkeit des Bodens (im schlechtest durchlässigen Horizont der obersten 50 cm)
- Vernässung (mit Lage des dauernd porengesättigten Horizonts in Tiefe u. Geländeoberkante)

Die BEK200 stellt Bodeninformationen für insgesamt 78.9% der Schweizer Landesfläche bereit. Keine bodenbezogenen Angaben liegen hingegen für Seen, Sumpfgebiete, Fels- und Siedlungsflächen vor. Für die reklassifizierten Landwirtschaftsflächen der Schweiz (vgl. Abbildung 15) sind die o.g. bodenhydraulischen Eigenschaften mit folgenden Flächenanteilen vertreten (vgl. Abbildung 16 und Tabelle 5).

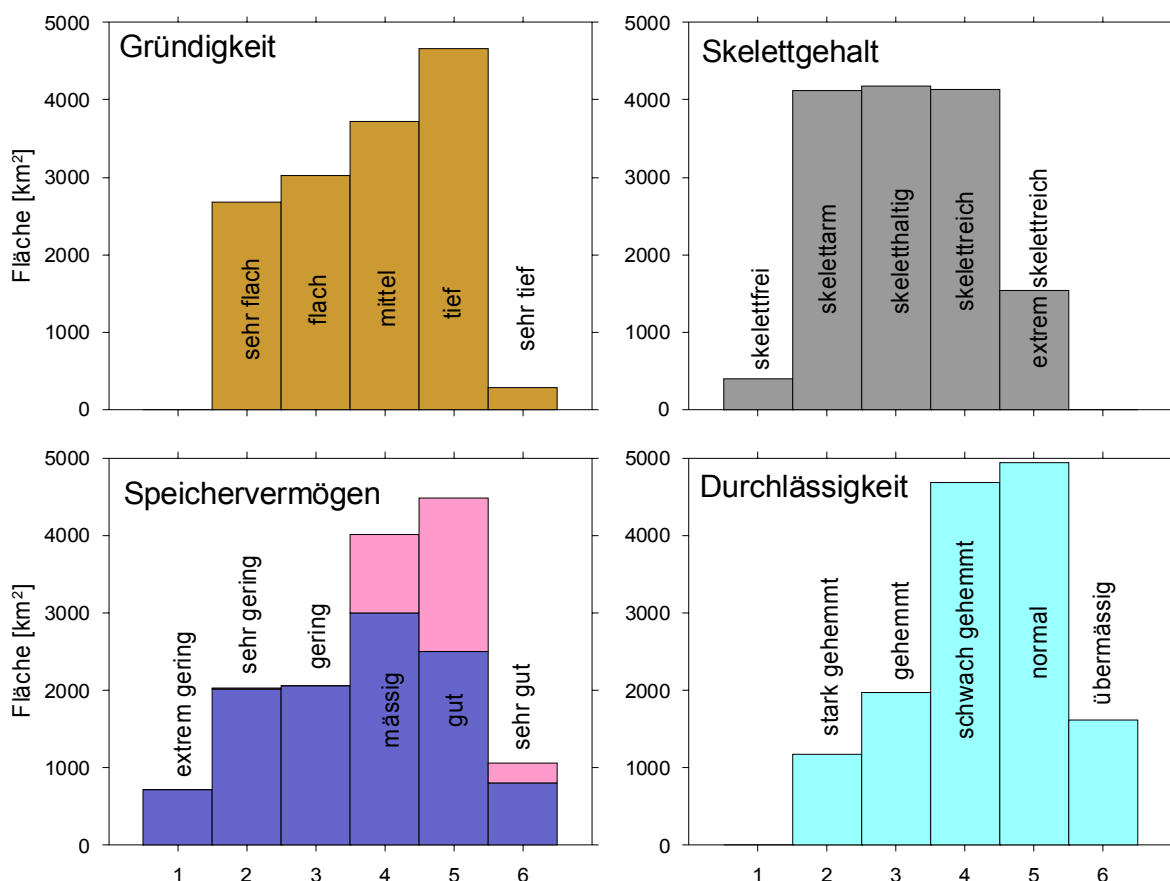


Abbildung 16: Bodeneigenschaften nach BEK200 mit Flächenanteilen für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz (Anmerkung: Flächenanteile mit Grundvernäsung sind beim Speichervermögen rosa eingefärbt.)

Im Gegensatz zu detaillierten Bodenkarten liefert die BEK200 keine direkte Angaben zur Körnung (Bodentextur). Diese für die hydrologische Modellanwendung notwendige Angabe kann allerdings in erster Näherung aus der Eigenschaft „Durchlässigkeit“ abgeleitet werden. Abbildung 17 zeigt beispielhaft die flächenhafte Verteilung dieses Parameters für das Thur-Gebiet.

Im aktuellen Projekt wurde versucht, die Bodeninformation der BEK200 möglichst vollständig in die Modellanwendung einzubringen. Dementsprechend wurde jeder KE ein eigenes Bodenprofil mit horizontbezogenen bodenhydraulischen Angaben zugeordnet.

Für die Modellierung der Untersuchungsgebiete standen auf diesem Wege jeweils eine Vielzahl von KE-bezogenen Bodenprofilen zur Verfügung: Thur-Gebiet (50 Profile), Emme-Gebiet (46), Broye-Gebiet (22), Rhone-Gebiet (39), Ticino-Gebiet (41) und Dischmabach-Gebiet (9).

Tabelle 5: Definition der Bodeneigenschaften nach BEK200 und Flächenanteile für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz

Code	Eigenschaft	Kategorie	Flächenanteil [ha]
Gründigkeit			
1	extrem flach	< 10 cm	-
2	sehr flach	10 - 30 cm	268'784
3	Flach	30 - 60 cm	302'639
4	Mittel	60 - 90 cm	372'668
5	Tief	90 - 120 cm	466'887
6	sehr tief	120 - 150 cm	28'159
7	extrem tief	> 150 cm	-
<i>Total</i>			1'439'137
Skelettgehalt			
1	skelettfrei	bis 5 Vol-%	40'043
2	skelettarm	bis 10 Vol-%	412'471
3	skeletthaltig	bis 20 Vol-%	418'284
4	skelettreich	bis 50 Vol-%	413'660
5	extrem skelettreich	über 50 Vol-%	154'679
<i>Total</i>			1'439'137
Wasserspeichervermögen^{*)}			
1	extrem gering	< 15 mm	72'443
2	sehr gering	15 - 30 mm	201'359
3	Gering	30 - 45 mm	206'125
4	Mässig	45 - 60 mm	300'523
5	Gut	60 - 100 mm	250'846
6	sehr gut	> 100 mm	80'943
-1	extrem gering	< 15 mm	-
-2	sehr gering	15 - 30 mm	2'404
-3	Gering	30 - 45 mm	-
-4	Mässig	45 - 60 mm	101'074
-5	Gut	60 - 100 mm	197'910
-6	sehr gut	> 100 mm	25'510
<i>Total</i>			1'439'137
Durchlässigkeit			
1	undurchlässig	< 10 ⁻⁶ cm/s	-
2	stark gehemmt	bis 10 ⁻⁶ cm/s	118'258
3	gehemmt	bis 10 ⁻⁵ cm/s	197'201
4	schwach gehemmt	bis 10 ⁻⁴ cm/s	467'979
5	Normal	bis 10 ⁻³ cm/s	494'183
6	übermässig	bis 10 ⁻² cm/s	161'516
7	Extrem	10 ⁻¹ cm/s	-
<i>Total</i>			1'439'137
Vernässung			
1	keine Vernässung	-	844'764
2	grundfeucht	> 90 cm	264'704
3	schwach grundnass	60 - 90 cm	200'310
4	mässig grundnass	45 - 60 cm	129'359
5	Ziemlich stark grundnass	30 - 45 cm	-
6	stark grundnass	< 30 cm	-
<i>Total</i>			1'439'137

^{*)} Negative Codes kennzeichnen Wasserspeichervermögen, die infolge Grundvernässung nicht limitiert sind.

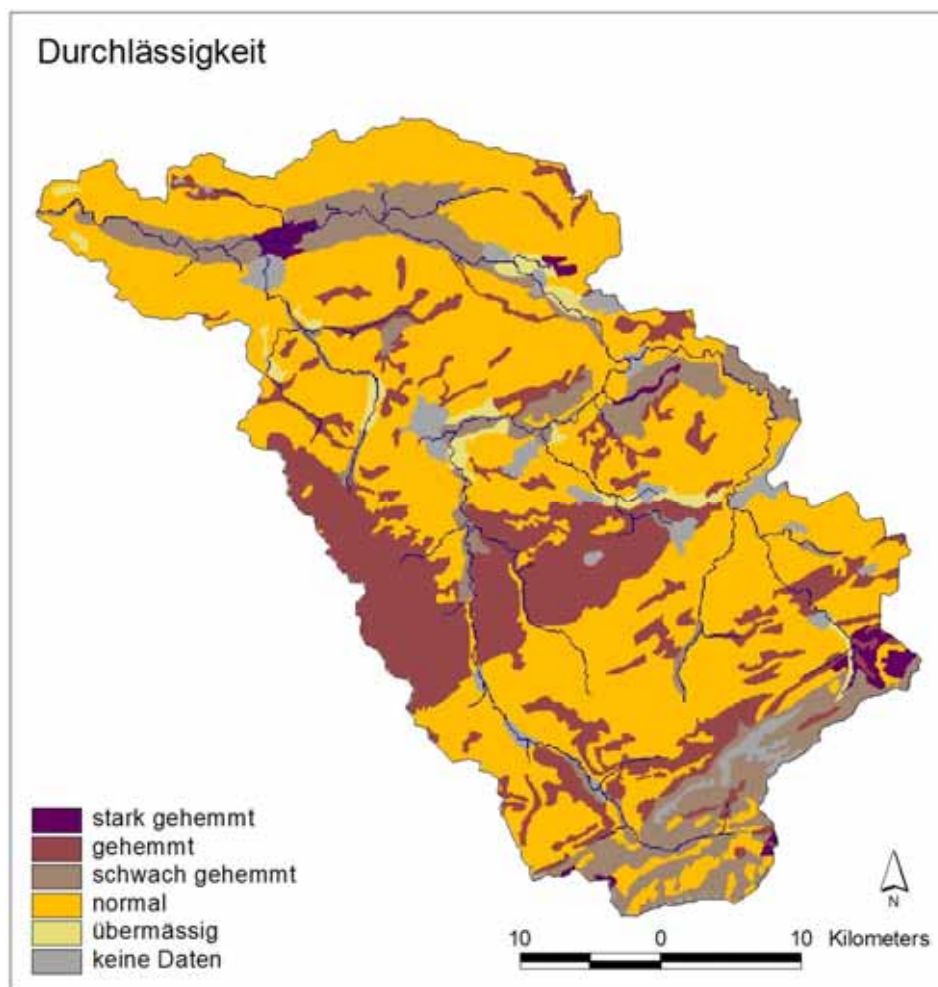


Abbildung 17: Räumliche Verteilung der Durchlässigkeiten im Thur-Gebiet nach BEK200

3.2.5 Daten- und Modellgrids

Im Zuge der Datenaufbereitung wurden die hochauflösenden 100 m x 100 m Daten-Grids auf das 500 m x 500 m Rechenraster der Modell-Grids übertragen. Für dieses Upscaling kamen datenart-abhängige Moving-Windows-Verfahren zum Einsatz: Mittelwertbildung für kontinuierliche Daten (z.B. für Geländehöhen) und Stichpunktmethod für kategorisierte Daten (z.B. für Landnutzungs-klassen).

Die Ergebnisse des Upscalings vom Daten- auf das Modell-Grid zeigten wie erwartet kaum Veränderungen in den Statistiken des Basisdatensatzes Landnutzung. Die Flächenanteile von Ackerland und Grasland erhöhten sich für die Gesamtschweiz nur leicht um 0.2%. Bei den räumlich stärker strukturierten Bodeneinheiten (143 KE für die Nutzungskategorien Acker- und Grasland) waren die Unterschiede zwischen Daten- und Modellgrid etwas grösser. Für die Hauptbodeneinheiten der ausgegrenzten Landwirtschaftsflächen (KE aus dem tieferen Molassehügelland mit teilweiser Moränenüberdeckung, vgl. Anhang D) wurden beim Upscaling flächenanteilige Änderungen von bis zu 2% ermittelt.

Das Upscaling der Geländehöhen führte erwartungsgemäss zu einer leichten Glättung der Geländeoberfläche. Für den Bereich der Landwirtschaftsflächen änderte sich die durchschnittliche Höhenlage von 1020 auf 1022 m ü.M., während die Höhenspreizung von 189-3090 m auf 195-2988 m abnahm. Die maximale Hangneigung reduzierte sich für diesen Bereich von 76° auf 61°. Die mittlere Hangneigung der gesamthaften Landwirtschaftsflächen verblieb hingegen konstant bei 10.80° resp. 19%.

4 Durchführung der Simulationen in den Testgebieten

4.1 Setup der Modellrechnungen

Entsprechend der Aufgabenstellung erfolgten sämtliche Modellsimulationen in Tagesschritten und 500 m x 500 m Modellauflösung für die Zeitscheibe 1980-2006. Die im Kapitel 3 beschriebenen Inputdaten dienten als Grundlage der langjährigen kontinuierlichen Wasserhaltssimulationen mit WaSiM-ETH (Modellversion 8.3.2, Richards). Die Grundkonfiguration des Modells sah die Verwendung der in Tabelle 6 aufgelisteten Ansätze vor.

Tabelle 6: Verwendete Modellkonfiguration für die Simulation der Testgebiete

	Teilmodell	verwendeter Ansatz
1	Niederschlagskorrektur	Getrennte Korrektur für flüssigen und festen Anteil
2	Interpolation der Meteo-Daten	Kombinationsverfahren aus "Inverse Distance Weighting Interpolation" und höhenabhängiger Regression
3	Strahlungskorrektur	Korrektur nach Hangneigung und Exposition (auch für Lufttemperatur)
4	Verdunstungsmodell	Penman-Monteith-Methode mit Berücksichtigung von dynamischer Phänologie für Acker- und Grasland
5	Schneemodell	Temperatur-Wind-Index-Verfahren
6	Interzeptionsmodell	Speichermodell
7	Bodenmodell	Richards-Ansatz
8	Grundwassermodell	Finite-Differenzen-Verfahren
9	Routing-Modell	Translation-Retention-Verfahren

Erläuterungen zur Modellkonfiguration

Niederschlagskorrektur: Niederschlagsmessungen sind mit systematischen Fehlern behaftet (Windfehler, Haftwasserverlust, Verdunstungsverlust). Die unkorrigierten Niederschlagsdaten wurden daher in WaSiM einer temperatur- und windabhängigen Korrektur unterzogen (Sevruk [1986]). Die Korrektur des Niederschlages erfolgte für Schnee und Regen getrennt nach dem in Schulla [1997] und Schulla & Jasper [2007] beschriebenen Verfahren. Die Werte für die Korrekturfaktoren wurden separat für jedes Testgebiet ermittelt. Dabei konnte auf Erfahrungswerte früherer Modellanwendungen in Schweizer Flussgebieten zurückgegriffen werden.

Interpolation der meteorologischen Eingangsdaten: Die statistische Analyse der meteorologischen Beobachtungsdaten zeigte für alle verwendeten Variablen eine mehr oder weniger ausgeprägte Abhängigkeit von der Höhenlage. Infolgedessen wurden alle stationsbezogenen meteorologischen Zeitreihen durch eine unterschiedlich gewichtete Kombination aus höhenabhängiger Regression und IDW-Methode auf das Modellgitter interpoliert. Die Bestimmung der Gewichtsanteile für IDW Interpolation und Höhenregression erfolgte für jedes Testgebiet und jede meteorologische Variable separat.

Strahlungs- (und Temperatur)korrektur: Der Einfluss der Topographie (Exposition, Hangneigung) auf die interpolierte Temperatur und Strahlung wurde durch die Aktivierung des entsprechenden Korrekturmoduls in WaSiM-ETH berücksichtigt.

Verdunstungsmodell: Die Modellierung der Evapotranspiration (inklusive Evaporation aus dem Interzeptions- und Schneespeicher) erfolgte im aktuellen Projekt ausschliesslich nach der Penman-Monteith-Gleichung (Monteith & Unsworth [1990]). Die benötigten Vegetationsparameter

(Blattflächenindex, Vegetationsbedeckungsgrad, Verdunstungswiderstand und Wurzeltiefe) wurden dabei über Multi-Layer-Landnutzungstabellen bereitgestellt. In diesen Tabellen wird den Parametern aller Landnutzungstypen ein vordefinierter detaillierter Jahresgang zugeordnet.

Für die landwirtschaftlichen Nutzungstypen, Acker- und Grasland, wurden die statischen Phänologie-Kurven durch dynamisch berechnete abgelöst. Das benutzte Phänologie-Modell basiert auf einem „Thermal Time Model“ Ansatz und nutzt entsprechend die aktuelle Temperaturentwicklung zur Steuerung der phänologischen Phasen (vgl. Schulla & Jasper [2007]). Die Parametrisierung des hier verwendeten Phänologie-Modells basiert auf Untersuchungen von Pöhler et al. [2007].

Keine explizite dynamische Berechnung der phänologischen Entwicklungsphasen erfolgte hingegen für den dritten landwirtschaftlichen Nutzungstyp, dem Obstanbau. Hier wurde aufgrund von Unsicherheiten in der Modellparametrisierung die Phänologie vereinfachend, anhand vordefinierter Jahreskurven und Abhängigkeiten von der Höhenlage, erfasst (vgl. Schulla [1997]).

Hinweis: Im aktuellen Projekt werden die landwirtschaftlichen Nutzflächen durch drei Nutzungstypen definiert: Ackerland, Grasland und Obstanbau (vgl. Abbildung 14). Die nachfolgenden Modellergebnisse für die Rubrik „landwirtschaftliche Nutzflächen“ sind deshalb als Gesamtheit aller drei Nutzungstypen zu interpretieren.

Schneemodell: Für die Berechnung der Schneeschmelze wurde das Temperatur-Wind-Index-Verfahren anstelle des einfachen Temperatur-Index-Verfahren eingesetzt.

Interzeptionsmodell: Die Kapazität des Interzeptionsspeichers wurde separat für jede Landnutzung definiert. Die Entleerung des Interzeptionsspeichers erfolgte durch Evaporation nach dem Ansatz von Penman-Monteith.

Bodenmodell (Modell der ungesättigten Bodenzone): Die Parametrisierung des Bodenmodells erfolgte unter Verwendung der vorliegenden pedologischen Datenbasis (KE der BEK200 mit dazugehörigen Angaben zur Gründigkeit, zum Skelettgehalt und zur Durchlässigkeit). Aufbauend auf diesen Daten wurden 143 verschiedene Bodenprofile ausgegliedert und deren Horizonte bodenhydraulisch charakterisiert. Die Parametrisierung erfolgte mit Hilfe von Pedotransferfunktionen nach van-Genuchten [1980]. Für einzelne Bodenprofile, insbesondere in den alpin geprägten Gebietsanteilen, wurde das in WaSiM-ETH integrierte Makroporenmodell aktiviert (z.B. für Rohböden und kalkhaltige Braunerden/Podssole). Mit dieser konzeptionellen Massnahme konnte ansatzweise auch der Einfluss von Verkarstung auf das Abflussgeschehen berücksichtigt werden.

Grundwassermodell: Dieses Teilmodell wurde nur für die Testgebiete des Mittellandes verwendet und für die vornehmlich alpin geprägten Gebiete ohne grössere zusammenhängende Grundwasserleiter deaktiviert. Das Grundwassermodell wurde aufgrund von fehlenden Untergrunddaten vereinfachend nur mit einem ungespannten Grundwasserleiter (Grundwasserstockwerk) betrieben. Einige Parameterwerte für das Grundwassermodell mussten im Rahmen der Modellkalibrierung ermittelt werden (Kolmation der Gerinnesohle).

Routing-Modell: Dieses Teilmodell verwendet ein hydraulisches Verfahren zur Berechnung der Translationsgeschwindigkeit in den Gerinnen. Für dieses Verfahren werden Daten über die Gerinnegeometrie (Flussbreite und -tiefe, Rauigkeiten, Gefälle, Vorlandbreiten, Länge der Gerinneteilstücke im Teilgebiet) sowie Angaben über die Retention im Hauptbett und Vorland benötigt. Diese Angaben lagen für die betrachteten Untersuchungsgebiete nicht vor. Sie wurden daher mit dem topographischen Analyseprogramm TANALYS geschätzt (vgl. Kapitel 3.2.2).

4.2 Kalibrierung des Modells

4.2.1 Vorgehensweise

Eine Modellkalibrierung wird im allgemeinen so vorgenommen, dass für weniger sensitiv reagierende Modellteile die Parameter aus bereits modellierten, hydrologisch ähnlichen Gebieten übernommen werden und nur jene Teilmodelle eine Kalibrierung erfahren, deren Parameter stark von den Eigenschaften des zu untersuchenden Gebietes beeinflusst werden.

Aus Gründen der Datenverfügbarkeit konzentrierte sich im aktuellen Projekt die Modellkalibrierung vornehmlich auf den Vergleich von gemessenen und simulierten Abflusszeitreihen. Die Anpassungsgüte wurde sowohl visuell als auch rechnerisch bestimmt. Als rechnerisches Gütekriterium fand die Nash-Sutcliffe-Effizienz Verwendung (Nash & Sutcliffe [1970]). Dieses recht sensitiv reagierende Gütekriterium ist ein in der Hydrologie vielfach benutzter Gradmesser für die Qualitätsbewertung der Abflussreproduktion. Üblicherweise gelten Effizienzwerte zwischen 0.7 und 1.0 als eine erfolgreiche Modellanwendung (für „unproblematische“ Einzugsgebiete). Neben der qualitativen und quantitativen Bewertung der modellseitigen Abflussreproduktion wurde im Rahmen der Modellkalibrierung auch auf die Plausibilität der simulierten Wasserbilanzen geachtet.

Die Kalibrierung des Modells erfolgte für die Untersuchungsgebiete manuell, d.h. ohne Unterstützung von Programmen zur automatisierten Parameteroptimierung. Die massgeblichen Kalibrierungsparameter waren die teilgebietsbezogene Drainage- oder Entwässerungsdichte, die gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten des Bodens, die Retentionskonstanten für Direktabfluss und Interflow sowie die Kolmation im Flussnetz.

Im aktuellen Projekt wurde so vorgegangen, dass zunächst ohne Aktivierung des Makroporenmodells, aber mit Zuschaltung des Grundwassermodells, die Parameter für die extrahierten Quellgebiete kalibriert wurden. Danach erfolgte die Kalibrierung der restlichen Teilgebiete. Das Vorgehen zur Kalibrierung war zweistufig: In einem ersten Schritt wurde mit gemessenen Zuläufen kalibriert. Anschließend wurden diese durch berechnete Zuläufe ersetzt. Eine Übersicht zu den kalibrierten Parametern zeigt die nachfolgende Tabelle. Aus Tabelle 7 ist ersichtlich, dass beim Grundwassermodell lediglich die Kolmation des Flussnetzes variiert worden ist. Die anderen für das Grundwassermodell benötigten Flächendatensätze (z.B. Aquifermächtigkeiten und horizontale hydraulische Leitfähigkeiten) blieben während der Kalibrierung unverändert.

Tabelle 7: Kalibrierungsparameter mit Wertebereiche

	Parameter	Wertebereich
dr	Entwässerungsdichte	1 - 40
kd, ki	Retentionskonstanten für Direktabfluss und Interflow	5 – 50 h
k_sat	Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit	variiert bis Faktor 100
kol	Kolmation des Flussnetzes	10^{-5} - 10^{-6} m/s

Anmerkung: Die im Zuge der topographischen Analyse mit TANALYS ermittelten Parameter zur Flussbreite und -tiefe (vgl. Kapitel 3.2.2) wurden vor ihrer Benutzung im Grundwassermodell nachträglich modifiziert. Die Nachbearbeitung dieser Parameter basierte auf der Annahme, dass es prinzipiell möglich sein sollte, in jeder einzelnen 500 m x 500 m Rasterzelle Basisabfluss (Grundwasserexfiltration) zu generieren. Die Ausdehnung des Flussnetzes auf alle Rasterzellen des Gebietes wurde mittels eines gefälleabhängigen Skalierungsverfahrens vollzogen. Die Zellen des bisherigen Flussnetzes wurden um die ermittelten Skalierungswerte additiv erhöht.

4.2.2 Ergebnisse für die Untersuchungsgebiete

Die Kalibrierung des Modells für die Untersuchungsgebiete erfolgte durch die kontinuierliche Simulationen für die 10-jährige Zeitscheibe 1981-1990. Als Einschwingperiode dienten die Ergebnisse von 1980. Ausgewählte Ergebnisse der Modellierung zeigt Abbildung 18. Die Ergebnisse der Kalibrierung zeigen eine grundsätzlich gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Abflüssen. Sie bestätigen, dass das verwendete Modell in der Lage ist, die unterschiedlichen Einzugsgebiete und Abflussregimes mit einer problemadäquaten Genauigkeit zu simulieren. Die logarithmische Nash-Sutcliffe-Effizienz als Mass für die Simulationsgüte des Abflusskontinuums liegt zwischen 0.70 und 0.90.

Gemäss Aufgabenstellung zielte die Modellkalibrierung nicht auf die Reproduktion von einzelnen Hochwasserereignissen, sondern konzentrierte sich auf die möglichst gute Erfassung der Mittel- und Niedrigwasserbereiche. Dass diese Aufgabe in einzelnen Gebieten nicht unproblematisch war, zeigte die Analyse von simulierten und gemessenen Abflussvolumina. Danach ergaben sich leichte Überschätzungen im simulierten Abflussvolumen ($\Delta Q < 10\%$) für das Thur- und Ticino-Gebiet, wohingegen stärker überhöhte Abflüsse ($\Delta Q > 10\%$) für das Emme-Gebiet berechnet wurden. Die Abweichungen in den landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten von Thur und Emme könnten einerseits ihre Ursache in anthropogenen Eingriffen in den natürlichen Wasserhaushalt haben (in der Modellanwendung wurden aufgrund fehlender Daten derartige Beeinflussungen nicht berücksichtigt!), z.B. Flusswasserentnahmen zur Bewässerung, andererseits könnten sie auch auf bestehende Defizite in der Modellanpassung hinweisen. Etwas klarer erscheint in dem Zusammenhang die Interpretation der überhöhten Abflussvolumina im Ticino-Gebiet. Hier wird das Abflussregime vergleichsweise intensiv durch die Speicherbewirtschaftung mit verschiedenen gebietsübergreifenden Zu-, Ab- und Überleitungen beeinflusst. Signifikante Verbesserungen der Modellanpassung lassen sich im Ticino-Gebiet nur erzielen, wenn derartigen abflussbeeinflussende Bewirtschaftungsdaten mit einbezogen werden. Frühere Modellanwendungen im Ticino-Gebiet zeigten, dass durch diese Zusatzdaten die Simulationsgüte des Abflusskontinuums (bei gleicher Modellkonfiguration) auf Effizienzwerte grösser als 0.90 gesteigert werden kann (vgl. Jasper [2005]).

Leichte bis moderate Abflussunterschätzungen ($3\% < \Delta Q < 15\%$) werden beim Vergleich der simulierten und gemessenen Abflussvolumina für das Dischmabach- und Rhone-Gebiet angezeigt. Hierfür dürfte hauptsächlich der etwas schwächer modellierte Gletscherabfluss verantwortlich sein, welcher ganz klar das Abflussgeschehen (Form und Volumen der Abflusskurve) im Rhone- und auch im Dischmabach-Gebiet prägt. Es muss bezüglich des verwendeten Modell-Setups erwähnt werden, dass keine Dynamik in der Ausdehnung der Gletscherfläche berücksichtigt. Die Lage der modellierten Firn- und Eisflächen wurde als über die Simulationsperiode konstant angenommen, was kaum der Realität entsprechen dürfte. Auch ist die verwendete zeitliche Auflösung von einem Tag ist für die Reproduktion der gletscherbedingten Abflussdynamik nicht genügend geeignet. Frühere Modellstudien zeigen, dass über stündliche Modellauflösungen die Abflusscharakteristik in (teil)vergletscherten Einzugsgebieten hingegen sehr gut erfasst werden kann (vgl. Klok et al. [2001], Gurtz et al. [2003], Verbunt et al. [2003]).

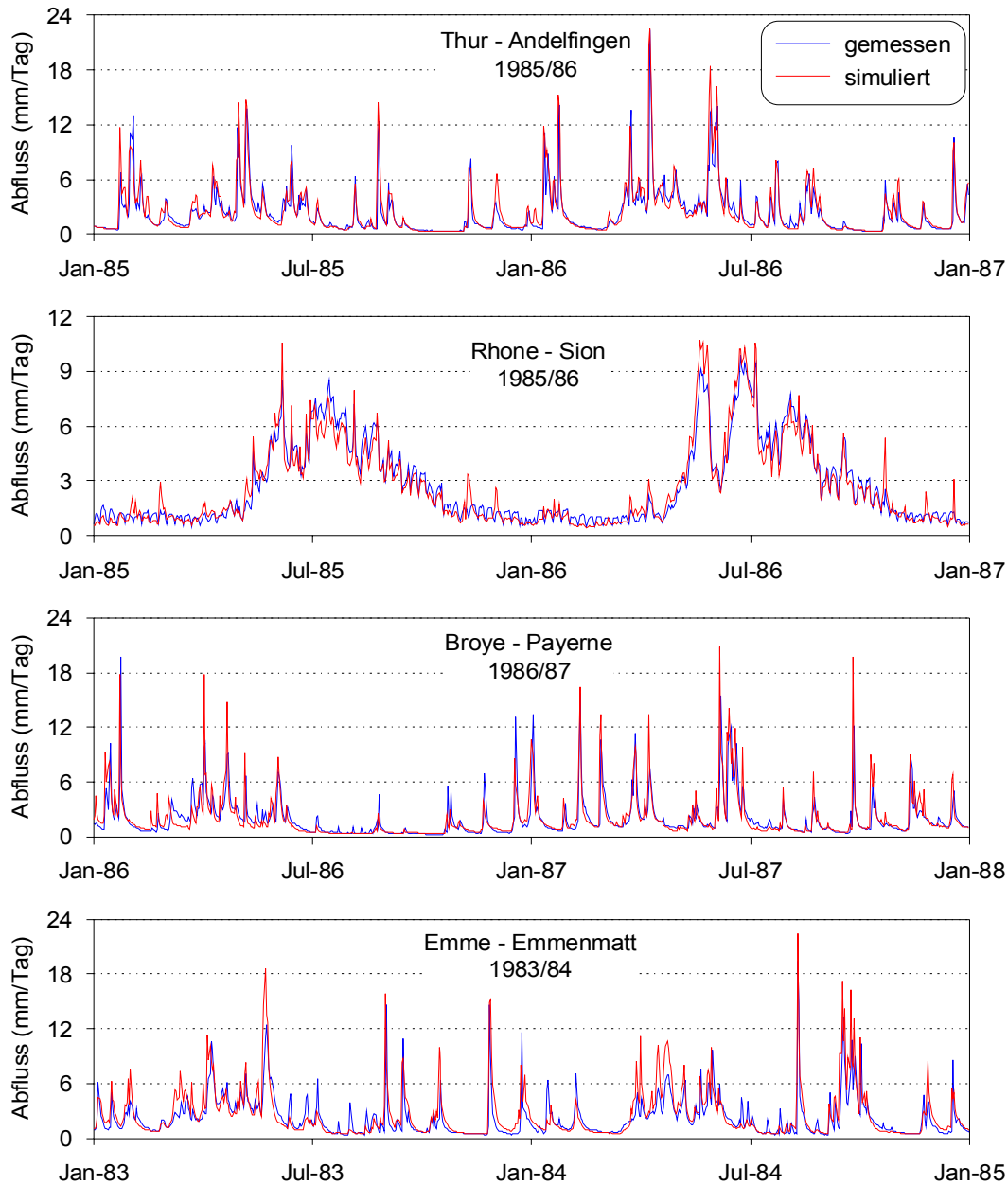


Abbildung 18: Kalibrierung des Modells durch Vergleich von gemessenen und simulierten Abflüssen

4.3 Ergebnisse der Modellvalidierung und Langzeitsimulation

4.3.1 Vorgehensweise

Die Verifizierung oder Validierung eines kalibrierten Modells dient dazu, die Gültigkeit für andere als bei der Kalibrierung verwendete Zeitspannen und Systembelastungen zu prüfen und zu bewerten. Im Rahmen der Verifizierung werden Modellrechnungen mit gemessenen Eingangsdaten und kalibrierten Parametern durchgeführt und die Berechnungsergebnisse mit den gemessenen Daten verglichen. Die Verifizierung des kalibrierten Modells erfolgte durch kontinuierliche Modellrechnungen für die Periode 1991-2000. Die verwendeten Eingangsdaten waren unabhängig von denen der Kalibrierungsperiode. Nach der Modellverifizierung wurde die Langzeitsimulation durchgeführt. Diese erstreckte sich über den Beobachtungszeitraum 1980-2006. Die Ergebnisse der Modellverifizierung und Langzeitsimulation sind im nachfolgenden Kapitel dokumentiert.

4.3.2 Ergebnisse für die Untersuchungsgebiete

Die Ergebnisse der Modellverifizierung und Langzeitsimulation zeigen gegenüber den Ergebnissen der Modellkalibrierung kaum Qualitätseinbussen, sowohl hinsichtlich der rechnerischen Anpassungsgüte als auch der visuellen Anpassung von gemessenen und simulierten Abflüssen (vgl. Abbildung 19). Die Modellverifizierung kann somit als gelungen angesehen werden. Gleichwohl bleiben die im vorangegangenen Kapitel genannten Defizite in der Modellanpassung bestehen.

Die Ergebnisse der Langzeitsimulation wurden für die gesamte landwirtschaftlichen Nutzfläche und spezielle für deren Teilkomponenten Ackerland und Grasland ausgewertet. Obstbauflächen als dritte Komponente wurden nicht getrennt untersucht. Die Berücksichtigung dieser Flächen erfolgte lediglich bei den Berechnungen für die gesamten Landwirtschaftsfläche.

Zielgrösse der Wasserhaushaltsuntersuchungen war entsprechend der Aufgabenstellung die relative Evapotranspiration (ET/ETP) der landwirtschaftlichen Nutzflächen während der Vegetationsperiode. Diese Grösse wurde nachfolgend für jedes Untersuchungsgebiet flächendifferenziert ausgewertet. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse von ET/ETP mit den dazugehörigen Flächenbezügen gebietsspezifisch zusammengestellt. Für die gesamthaften Landwirtschaftsflächen liegt ET/ETP im Mittel zwischen 0.800 und 0.807. Die kleinsten Werte und damit den höchsten potenziellen Wasserbedarf weisen das Broye- und Rhone-Gebiet auf. Dies gilt auch für das Ackerland im Allgemeinen, welches durchweg kleinere ET/ETP Indikatorenwerte anzeigt als das Grasland.

Tabelle 8: Gebietsspezifische Werte von ET/ETP für Ackerland, Grasland und landwirtschaftliche Nutzfläche insgesamt (inklusive Obstanbauflächen); Mittelwerte für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006

Flussgebiet		Thur	Emme	Broye	Rhone ^{*)}	Ticino	Dischma
Ackerland	ET/ETP	0.805	0.802	0.800	0.70	0.79	-
	Rasterzahl	2470	1028	893	10	31	-
Grasland	ET/ETP	0.92	0.91	0.90	0.803	0.807	0.806
	Rasterzahl	1277	903	110	1050	746	48
Landwirtschaftsfläche (total)	ET/ETP	0.807	0.806	0.801	0.800	0.806	0.806
	Rasterzahl	3956	1985	1025	1207	787	48

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

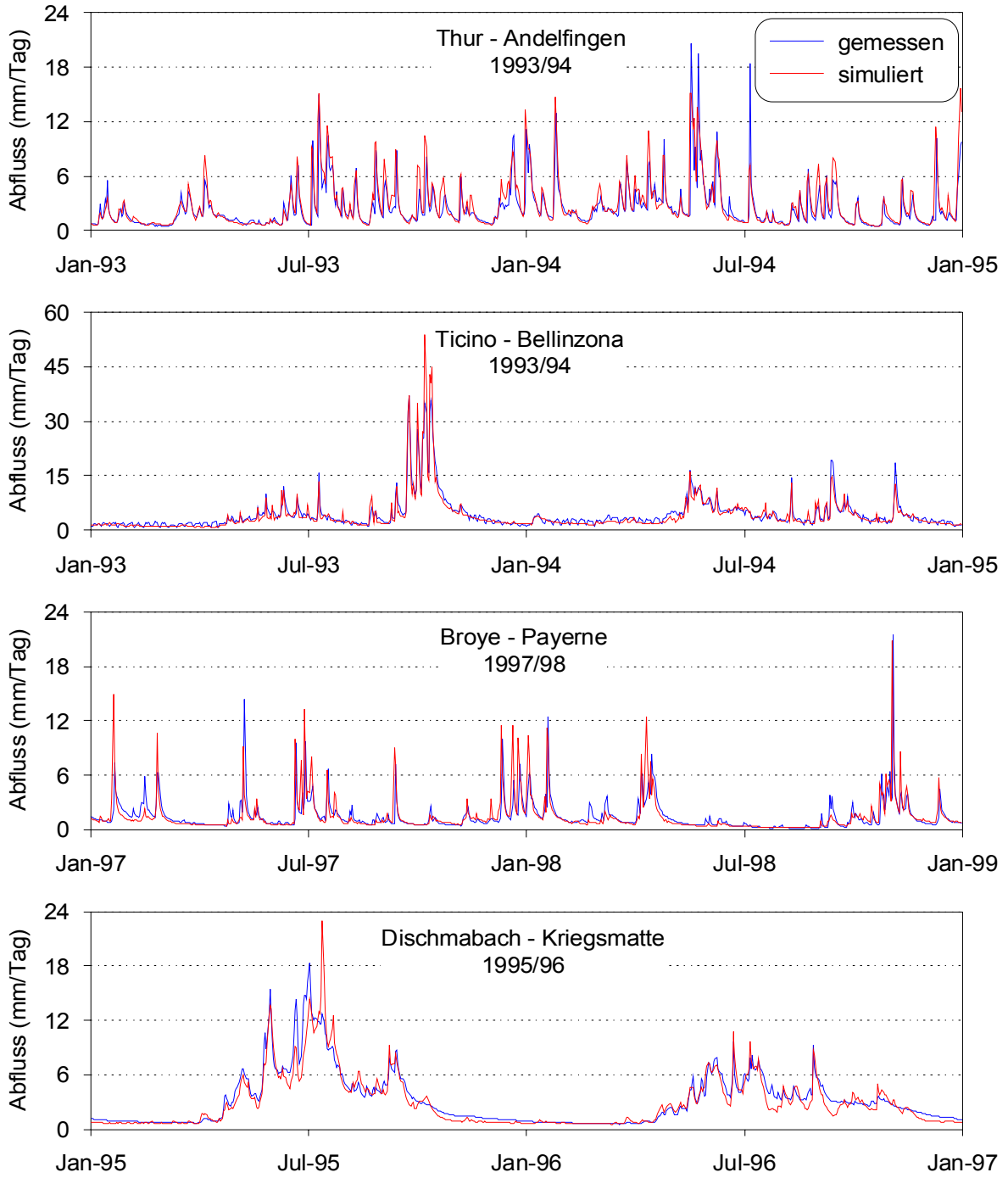


Abbildung 19: Verifizierung des Modells durch Vergleich von gemessenen und simulierten Abflüssen

5 Flächendifferenzierte Ermittlung der Bewässerungsbedürftigkeit

5.1 Extrapolation der gebietsspezifischen Simulationsergebnisse

Die Übertragung der gebietsspezifisch ermittelten Trockenheitsindikatoren ET/ETP auf die Landwirtschaftsfläche der Schweiz erfolgte mittels Mehrfachregression. Diese berücksichtigte die Abhängigkeit der relativen Evapotranspiration von klimatologischen, topographischen und pedologischen Bedingungen. In Tabelle 9 ist der statistische Zusammenhang zwischen den räumlichen Verteilungsmustern von ET/ETP und relevanten Gebietsmerkmalen quantifiziert.

Tabelle 9: Zusammenhang zwischen den berechneten Werten von ET/ETP und verschiedenen Gebietsmerkmalen (Angaben jeweils bezogen auf die gesamthafte Landwirtschaftsfläche der Untersuchungsgebiete)

Merkmal	Korrelationswert
Verhältnis aus potenzieller Evapotranspiration und Niederschlag (ETP / N) ^a	0.97
Geländehöhe ^b	0.90
Hangneigung ^c	0.79
Bodendurchlässigkeit ^d	0.95
Bodentiefe ^d	0.75
Bodenspeichervermögen ^d	0.64
Skelettgehalt des Bodens ^d	0.55

^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 BEK200 (vgl. Tabelle 5)

Ausgehend von den Ergebnissen der Korrelationsanalyse wurde eine Zuordnungstabelle mit 81 Klassen (Kombination aus 4 Merkmalen mit je 3 Klassen) erstellt, mit deren Hilfe die in den Untersuchungsgebieten gewonnenen ET/ETP Flächenmuster auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Gesamtschweiz übertragen werden konnten. Die verwendeten Merkmalsklassen sind in Tabelle 10 definiert. Die Klassenbereiche wurden so ausgewählt, dass jede Klasse mit einer hinreichenden Anzahl an Rasterzellen belegt ist.

Tabelle 10: Ausgewählte Merkmale mit Klassenbelegung für die Extrapolation von ET/ETP (mit relativen Flächenangaben jeweils bezogen auf die gesamthafte Landwirtschaftsfläche der Untersuchungsgebiete)

Merkmal	Klasse 1		Klasse 2		Klasse 3	
	Wertebereich	Fläche (%)	Wertebereich	Fläche (%)	Wertebereich	Fläche (%)
ETP/N ^a	< 0.5	33	0.5 - 0.80	37	> 0.80	30
Durchlässigkeitsklasse ^b	2 - 3	17	4	39	5-6	44
Geländehöhe [m ü.M.]	< 600	28	600-1200	50	> 1200	22
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 BEK200 (vgl. Tabelle 5)

Insgesamt werden durch die Untersuchungsgebiete 15.6% (oder 2252 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 10 aufgeführten merkmalsbezogenen relativen Flächenangaben liegen in einer ähnlichen Grössenordnung wie die der gesamtschweizerischen Landwirtschaft.

Die Durchführung der ET/ETP Extrapolation erfordert eine Klassifizierung des Zielgebietes gemäss den Angaben in Tabelle 10. Drei der vier Gebietsmerkmale konnten aus den aufbereiteten Basisdatensätzen gewonnen werden, die Durchlässigkeit des Bodens aus der *Digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz* (BEK200) und die topographischen Flächenparameter Geländehöhe und Hangneigung aus dem *RIMINI-Höhenmodell* (vgl. Kapitel 3.2). Der auf die Vegetationsperiode bezogene ETP/N Indikator musste hingegen durch Modellrechnungen bestimmt werden. Abbildung 20 zeigt die flächenhafte Verteilung dieses Indikators für die Landwirtschaftsflächen der Schweiz.

Regionen mit Indikatorenwerten von ≥ 1 stellen potenzielle Zehrgebiete mit negativen Wasserbilanzen dar. Werte von kleiner als 0.6 dürften hingegen potenzielle Nährgebiete ausweisen. Generell geben die Verteilungsmuster von ETP/N bereits Hinweise auf die Lage von Gebieten mit potenzieller Bewässerungsbedürftigkeit. Entsprechend Abbildung 20 dürften potenziell gefährdete Gebiete vor allem im tieferen Mittelland und im Rhone-Tal auszumachen sein.

Besser abgestützte Aussagen zur Bewässerungsbedürftigkeit lassen sich allerdings über flächendifferenzierte Analysen von ET/ETP erzielen, denn nur dieser Indikator berücksichtigt auch den für die Pflanzen so wichtigen aktuellen Bodenwassergehalt. Die sich aus Tabelle 10 ergebende multiple Regressionsbeziehung diente weiter dazu, die gebietspezifischen Werte von ET/ETP auf die gesamtschweizerischen Landwirtschaftsflächen zu extrapolieren. Das danach erhaltene Flächenverteilungsmuster zeigt Abbildung 21. Die Gebiete mit unterschiedlichen Quantilen für die Unterschreitung eines ET/ETP Schwellenwertes von 0.80 sind in Abbildung 22 zu sehen, und Angaben zu den langjährigen Mittelwerten können getrennt für Ackerland und Grasland der Tabelle 11 entnommen werden. Diese Tabelle enthält darüber hinaus auch Angaben zu prozentualen Wahrscheinlichkeiten einer Schwellenwertunterschreitung von $ET/ETP < 0.800$. Die räumliche Lage der entsprechenden Gebiete ist in den Abbildungen 22-26 dargestellt.

Tabelle 11: Mittelwert und Quantile (20%, 25%, 33%, 50%) von ET/ETP für die landwirtschaftlichen Nutzflächen (inklusive Obstanbauflächen), separate Angaben für Ackerland und Grasland; Mittelwerte für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006; Quantile als relative Flächenangabe für $ET/ETP < 0.80$

		Mittelwert	Q20%	Q25%	Q33%	Q50%
Ackerland		0.801	50.80 %	44.3 %	41.1 %	17.4 %
	Zellzahl	25221	12825	11171	10367	4380
Grasland		0.808	18.1 %	10.6 %	9.6 %	5.4 %
	Zellzahl	29938	5425	3178	2863	1629
Landwirtschaftsfläche (total)		0.805	35.6 %	28.7 %	26.5 %	12.8 %
	Zellzahl	57706	20525	16572	15288	7366

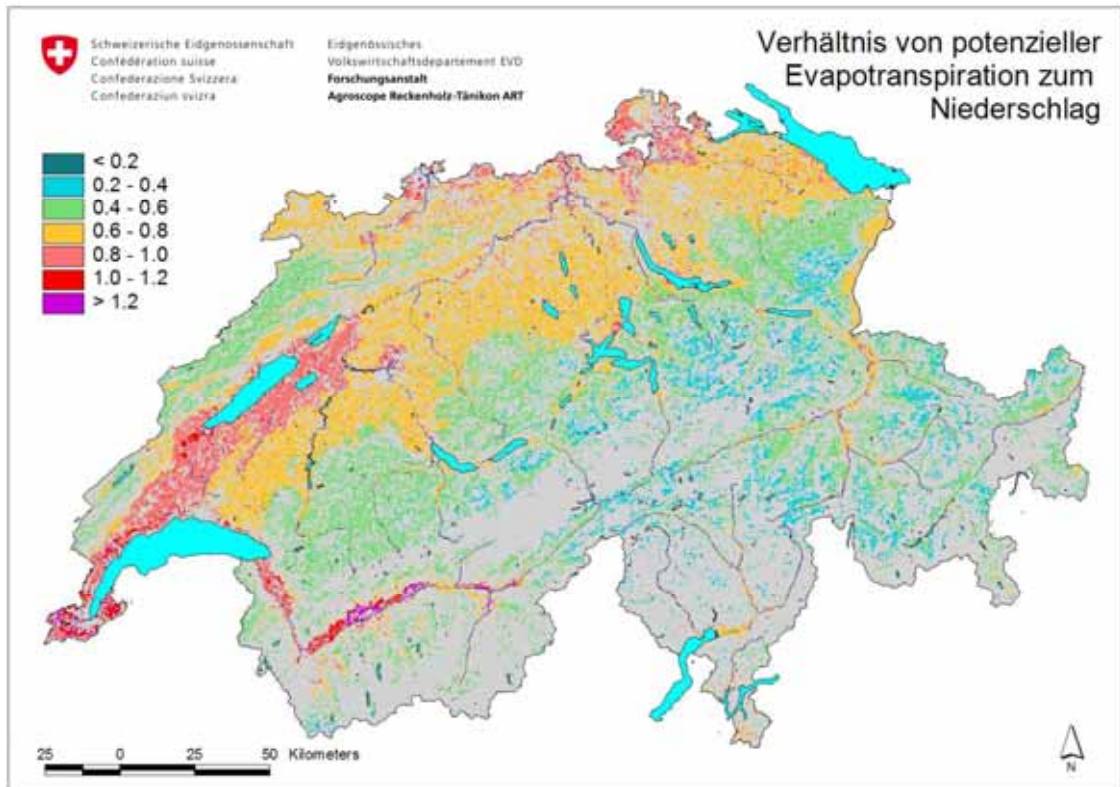


Abbildung 20: Räumliche Verteilung des Verhältnisses potenzielle Evapotranspiration zu Niederschlag (ETP/N) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

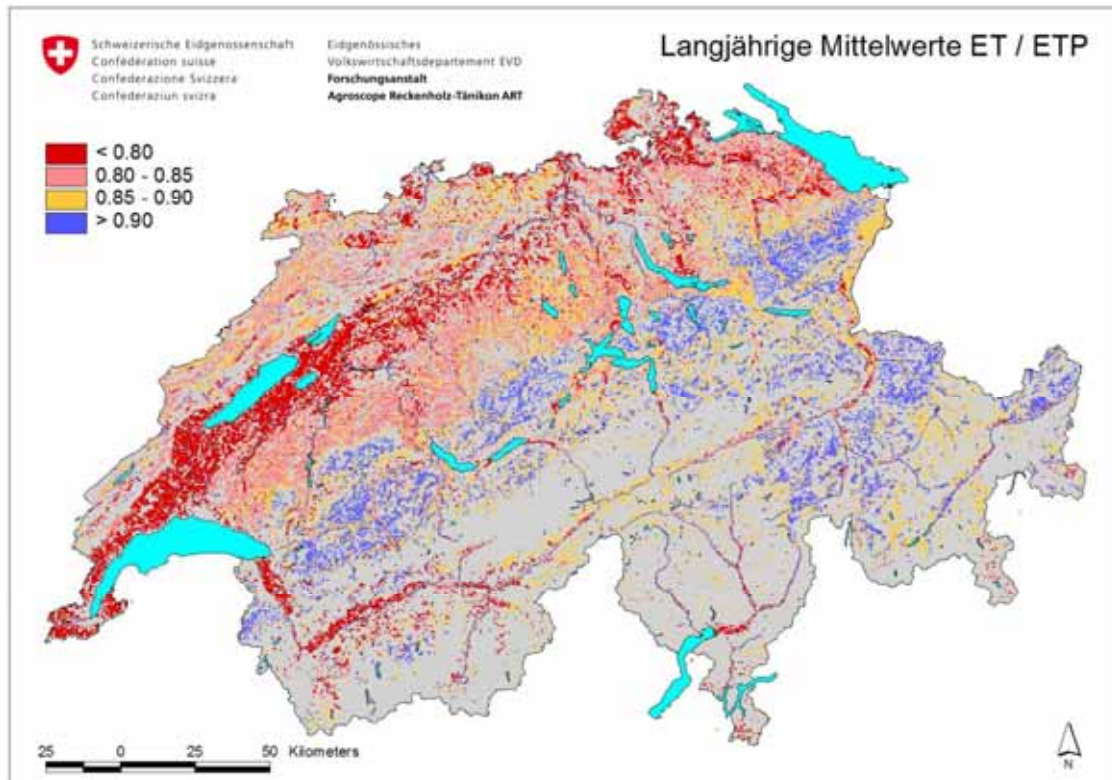


Abbildung 21: Langjährige Mittelwerte der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

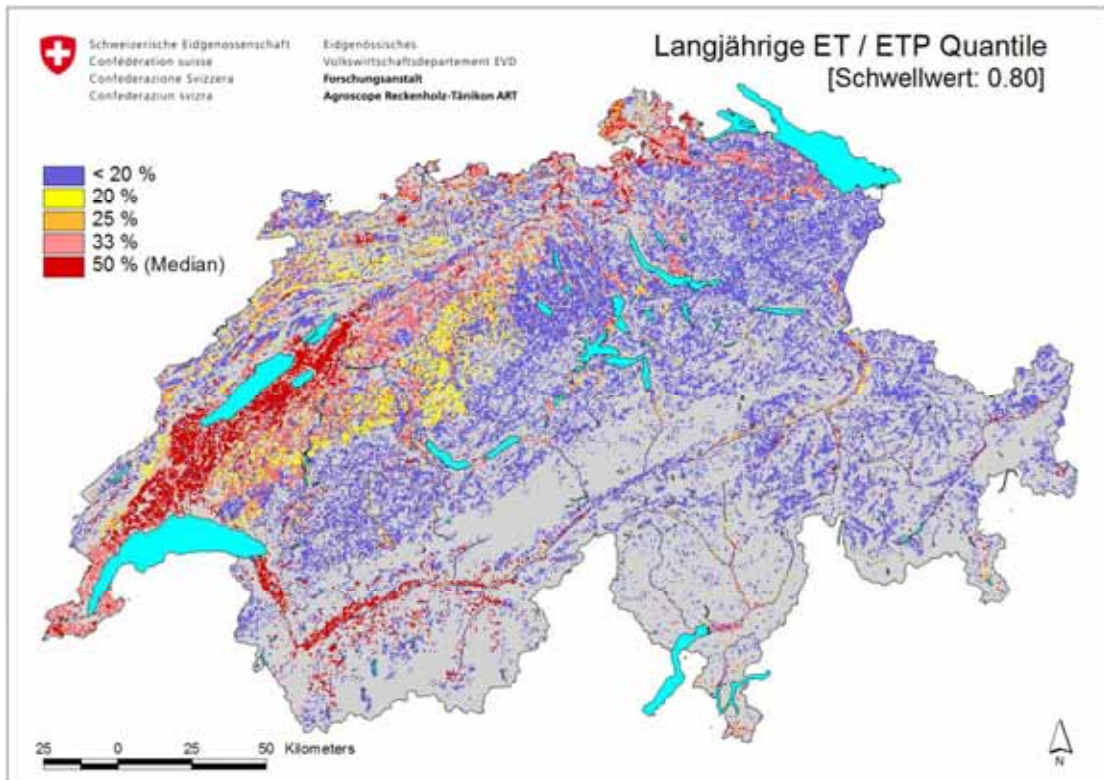


Abbildung 22: Langjährige Quantile der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

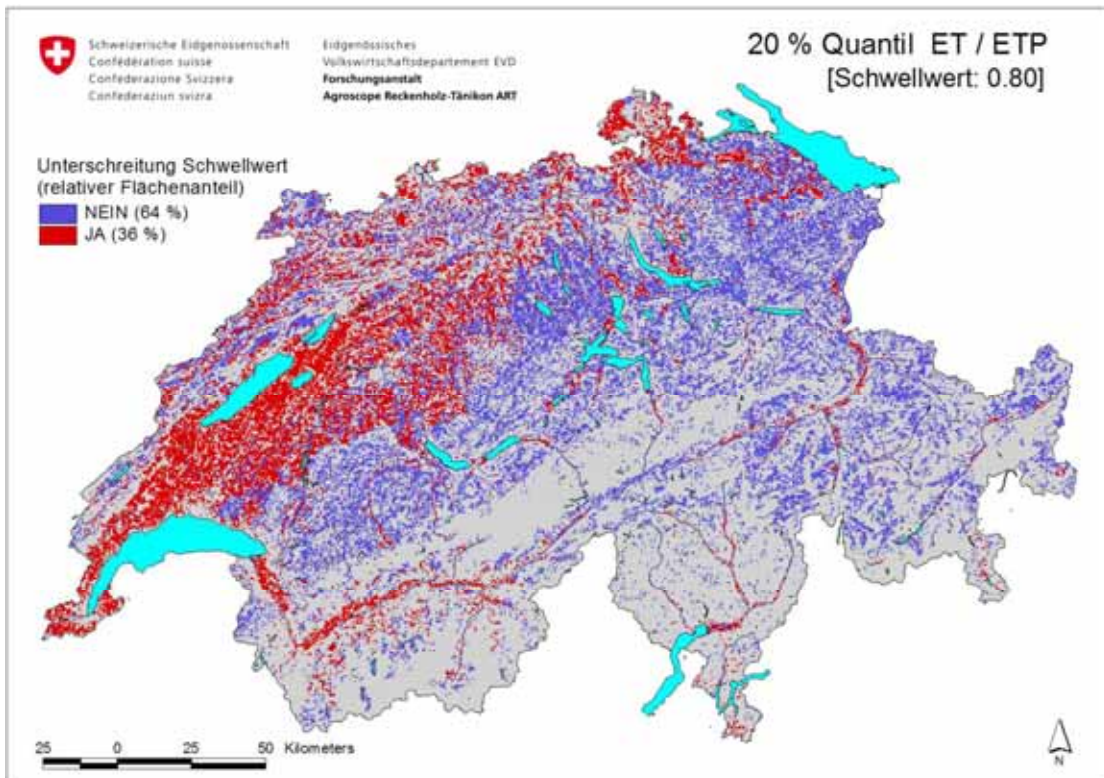


Abbildung 23: Langjähriges 20% Quantil der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

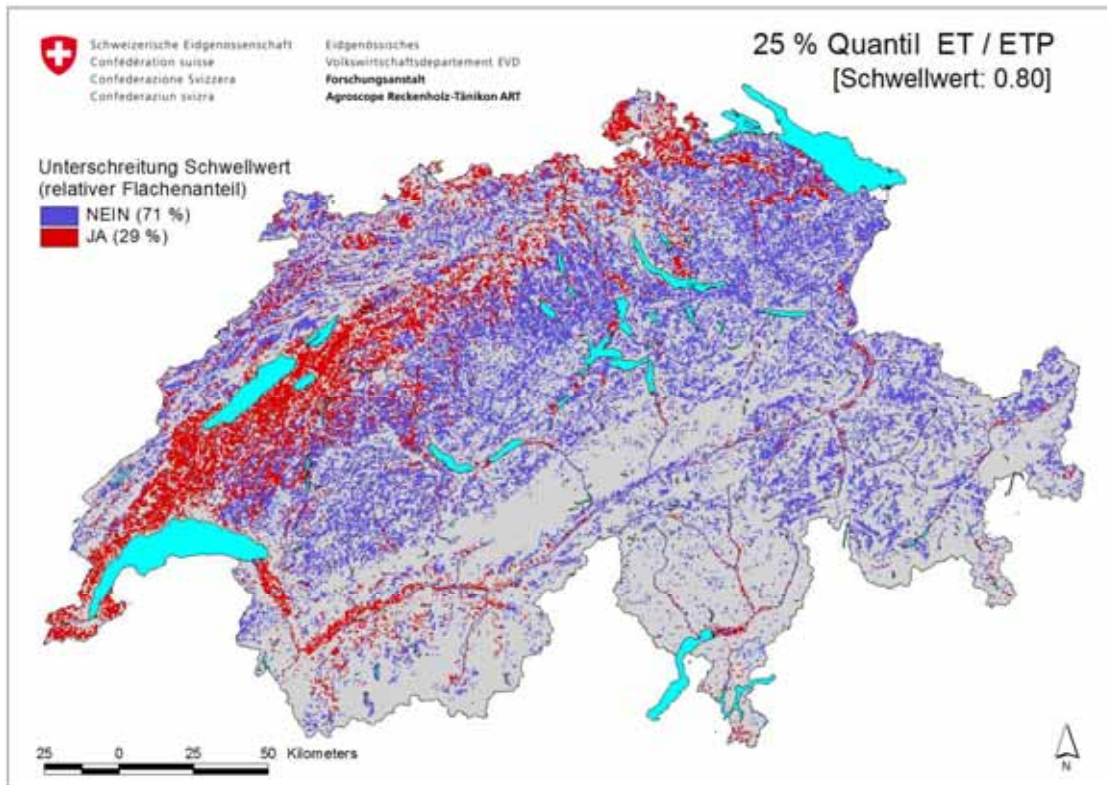


Abbildung 24: Langjähriges 25% Quantil der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

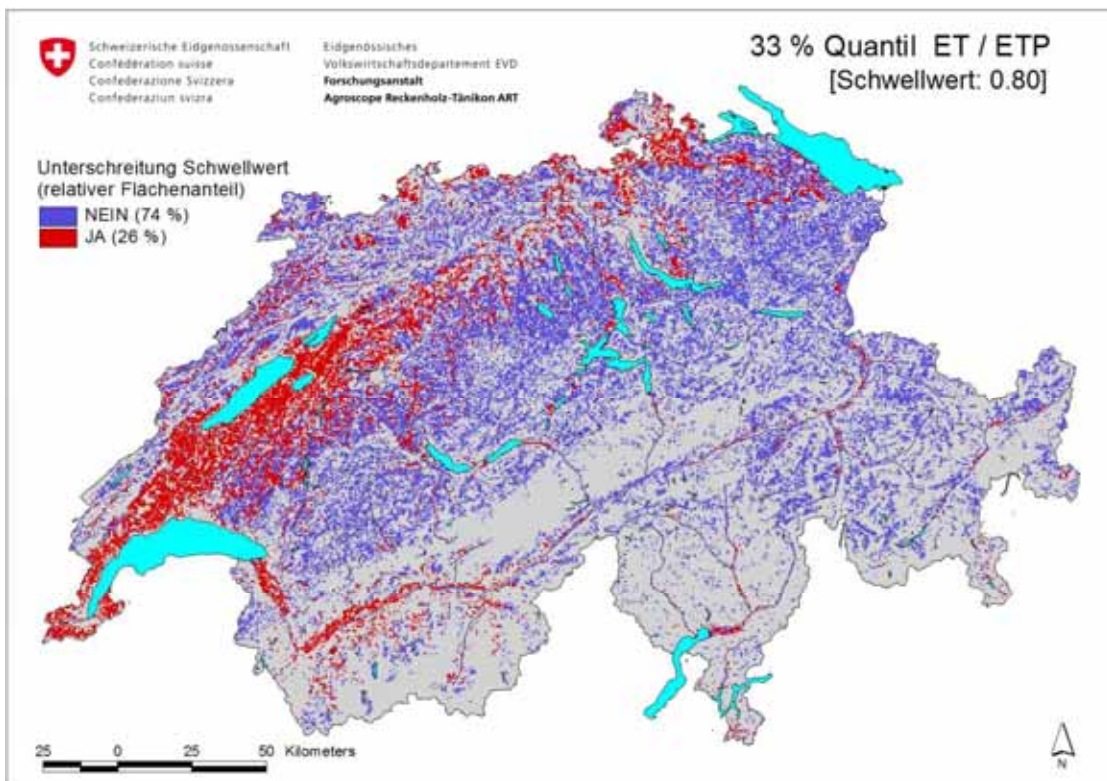


Abbildung 25: Langjähriges 33% Quantil der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

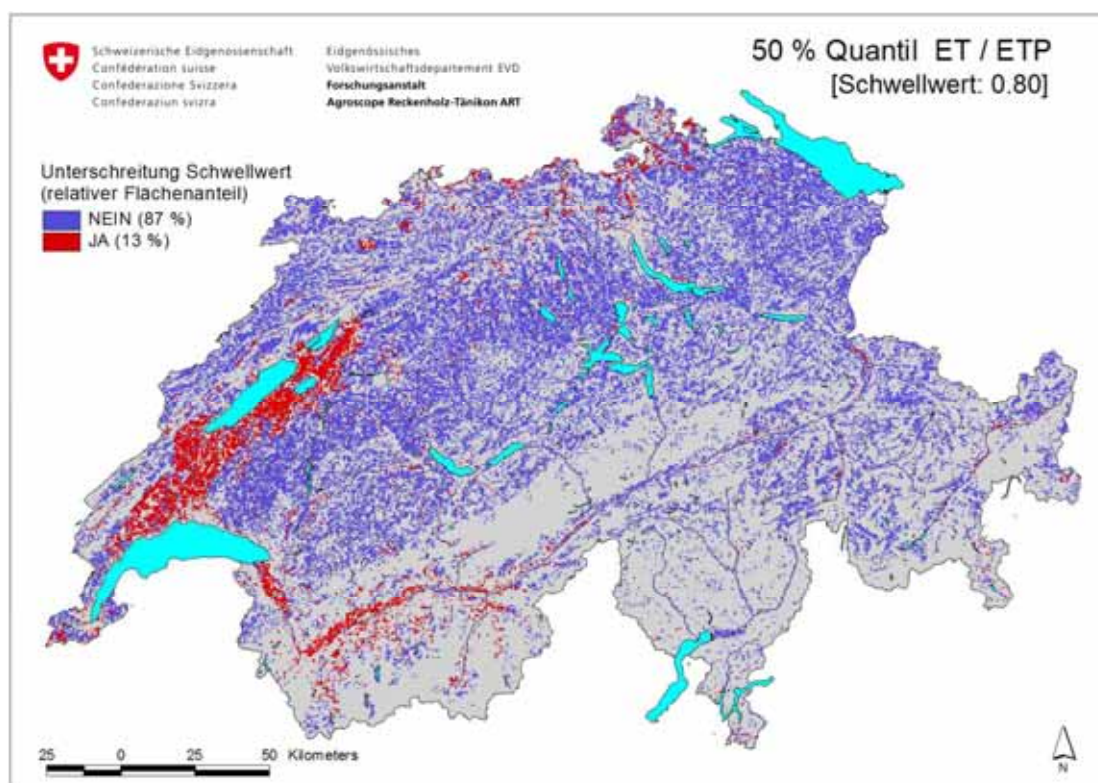


Abbildung 26: Langjähriges 50% Quantil der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

5.2 Trendanalysen zur Trockenheit

Neben der Häufigkeit ist insbesondere auch die Dauer einer Schwellenwertunterschreitung von ET/ETP für die Landwirte von Interesse. Schliesslich entscheidet zumeist die Länge und Intensität einer Trockenheitsperiode über den Grad des zu erwartenden Ernteausfalls. In dieser Studie wurden daher flächendifferenzierte Analysen zur Dauer einer Unterschreitung des Schwellenwerts von ET/ETP und zu möglichen Trends durchgeführt.

Im verwendeten Verfahren wurden Trockenheitsperioden als zusammenhängende Periode mit Unterschreitungen des ET/ETP Schwellenwertes von 0.800 definiert (vgl. Kapitel 5.1). Dabei war es zulässig, dass eine bereits mindestens 5 Tage andauernde Trockenheitsperiode für maximal zwei aufeinanderfolgende Tage unterbrochen werden konnte. Dauerte der Unterbruch länger, wurde die aktuelle Zählung abgebrochen und mit einer neuen Trockenheitsperiode fortgesetzt. In der aktuellen Studie ist die Entwicklung von Trockenheitsperioden auf die Länge einer Vegetationsperiode beschränkt.

Aus den im Kapitel 4.3.2 beschriebenen Modellrechnungen standen gebietspezifische tägliche Flächendatensätze zur Analyse der Schwellenwertunterschreitung von ET/ETP über 27 aufeinanderfolgende Vegetationsperioden (1980-2006) zur Verfügung (Langzeitsimulation). Ausgehend von diesen Datensätzen erfolgte die flächendifferenzierte Ermittlung der jährlichen Periodenlängen mit zusammenhängenden Unterschreitungen. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Tabelle 12 aufgeführt. Erwartungsgemäss werden in den Tallagen von Rhone und Ticino die längsten Trockenperioden ausgewiesen. Für Ackerflächen beträgt hier die mittlere Dauer einer Trockenheitsperiode zwischen 47 und 102 Tagen. Maximale Periodenlängen liegen für einzelne Rasterzellen z.T. deutlich oberhalb von 200 Tagen.

Tabelle 12: Gebietspezifische Werte zur Länge von Trockenheitsperioden (ET/ETP<0.80) für Ackerland, Grasland und die landwirtschaftlicher Nutzfläche insgesamt (inklusive Obstanbauflächen); Angaben in Tagen und für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006.

		Thur	Emme	Broye	Rhone ^a	Ticino	Dischma
Ackerland	Max. Länge	54	92	107	226	127	-
	Mittlere L.	20	31	39	102	47	-
	Rasterzahl	2470	1028	893	10	31	-
Grasland	Max. Länge	12	28	37	109	93	82
	Mittlere L.	5	9	11	56	37	38
	Rasterzahl	1277	903	110	1050	746	48
Landwirtschaftsfläche (total)	Max. Länge	43	63	100	128	96	82
	Mittlere L.	16	21	36	68	39	38
	Rasterzahl	3956	1985	1025	1207	787	48

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

Die Extrapolation der gebietspezifisch ermittelten Periodenlängen auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz bestätigen die Vorgaben aus den Untersuchungsgebieten. Ackerflächen wiesen eine mittlere Periodenlänge von 37 Tagen aus (Abbildung 27) (max = 91 Tage), währenddessen sich für Grasland die Periode auf 25 Tage reduzierte (Abbildung 28) (max = 58 Tage). Das Periodenmittel über die Gesamtfläche der Schweizer Landwirtschaft ergab sich zu 31 Tagen (max = 76 Tage). Karten der maximalen Längen befinden sich in Anhang E (E15, E16).

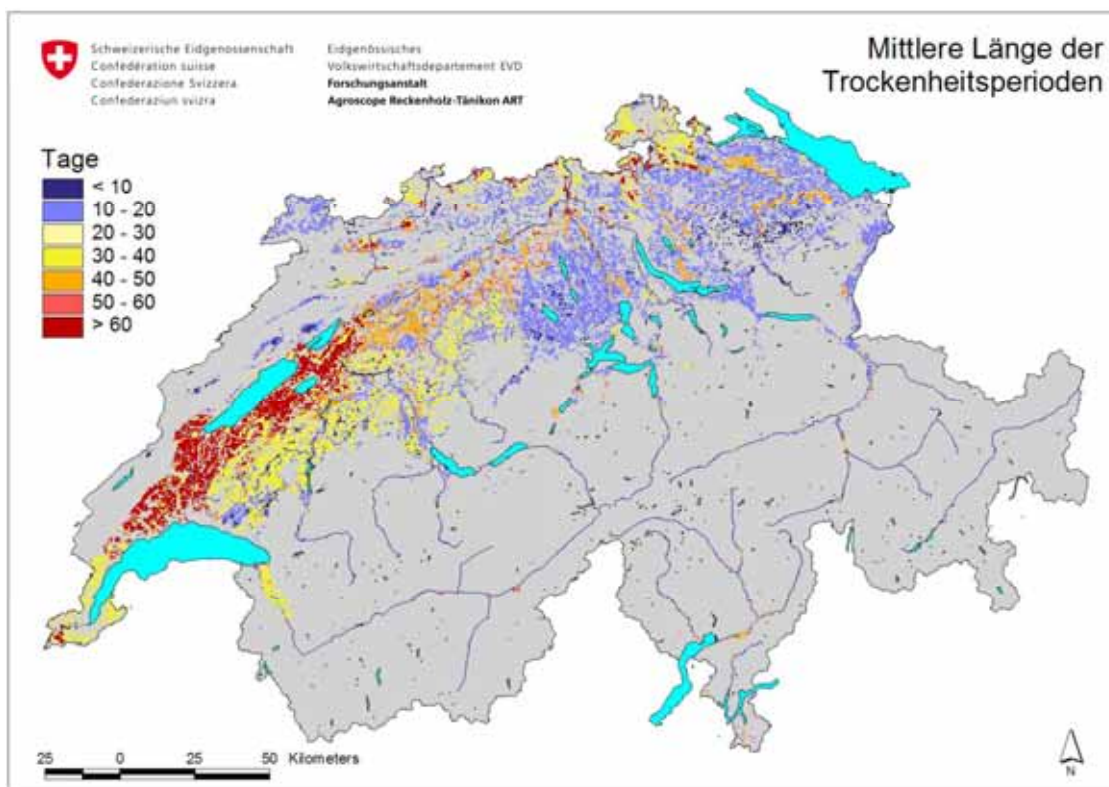


Abbildung 27: Mittlere Länge der zusammenhängenden Trockenheitsperiode (ET/ETP<0.80) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

Gemäss den berechneten Flächendatensätzen sind das Seeland und die flachgründigen Böden des Rhone-Tals als Gebiete mit gesteigerten Trockenheitsrisiken anzusehen. Hier ist eine länger andauernde Unterschreitung von kritischen Trockenheitsgrenzwerten eher die Regel als die Ausnahme. Daneben werden auch in verschiedenen Alpentälern sowie in den vorwiegend ackerbaulich genutzten Bereichen des unteren Mittellandes erhöhte Trockenheitsrisiken gesehen.

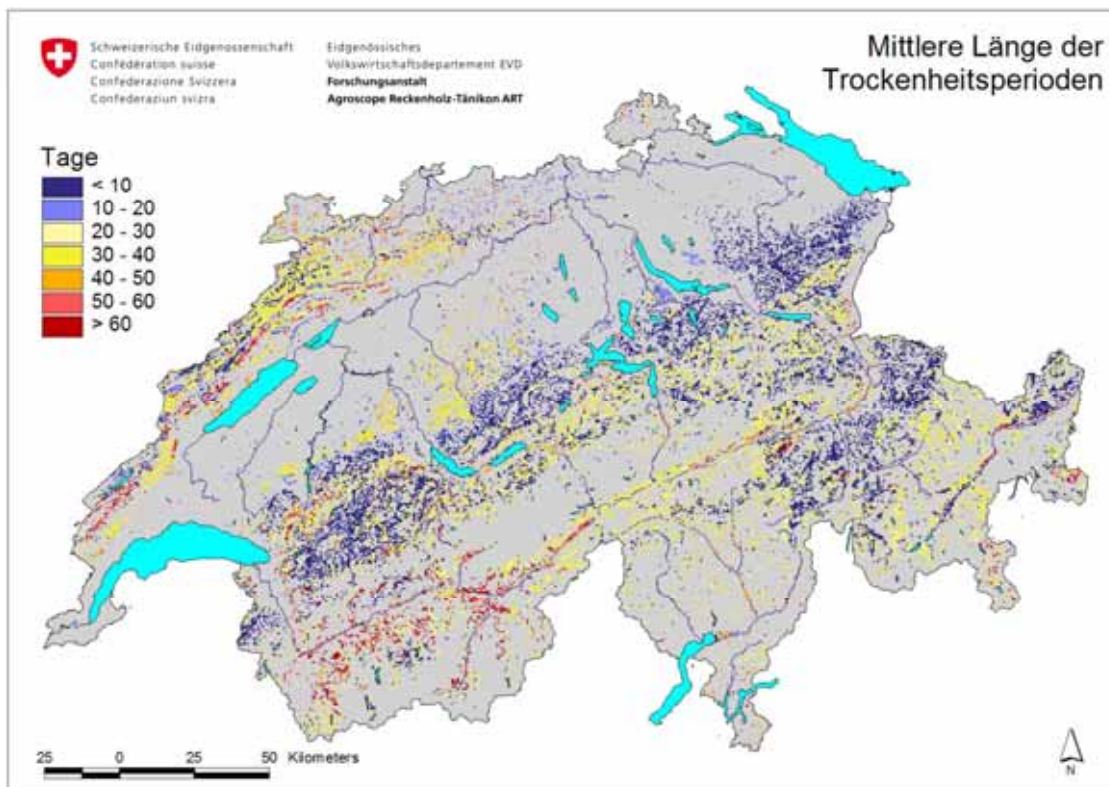


Abbildung 28: Mittlere Länge der zusammenhängenden Trockenheitsperiode (ET/ETP<0.80) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

Die Analyse zu den Periodenlängen wurde von flächendifferenzierten Trenduntersuchungen ergänzt. Als Kriterium für die Ausgrenzung von Trends wurde die Steigung der Regressionsgeraden über die 27 Jahreswerte der Periodenlängen genutzt. Positive Trends (Zunahme der Periodenlängen) wurden bei Geradensteigungen grösser als 0.1 angenommen, negative Trends (Abnahme der Periodenlängen) entsprechend bei Werten kleiner als -0.1.

Die Extrapolation der gebietspezifischen Werte auf die gesamtschweizerische Landwirtschaftsfläche zeigt eine markante Längenzunahme der Trockenheitsperioden in den Ackerbaugebieten auf der Alpennordseite, insbesondere im Rheintal, südlich des Bodensees, im Ausflussgebiet des Vierwaldstättersees und in diversen Flussniederungen des Mittellandes (Abbildung 29). Für das Grasland wurden lediglich vereinzelt positive Trends in der Nordostschweiz berechnet (Abbildung 30).

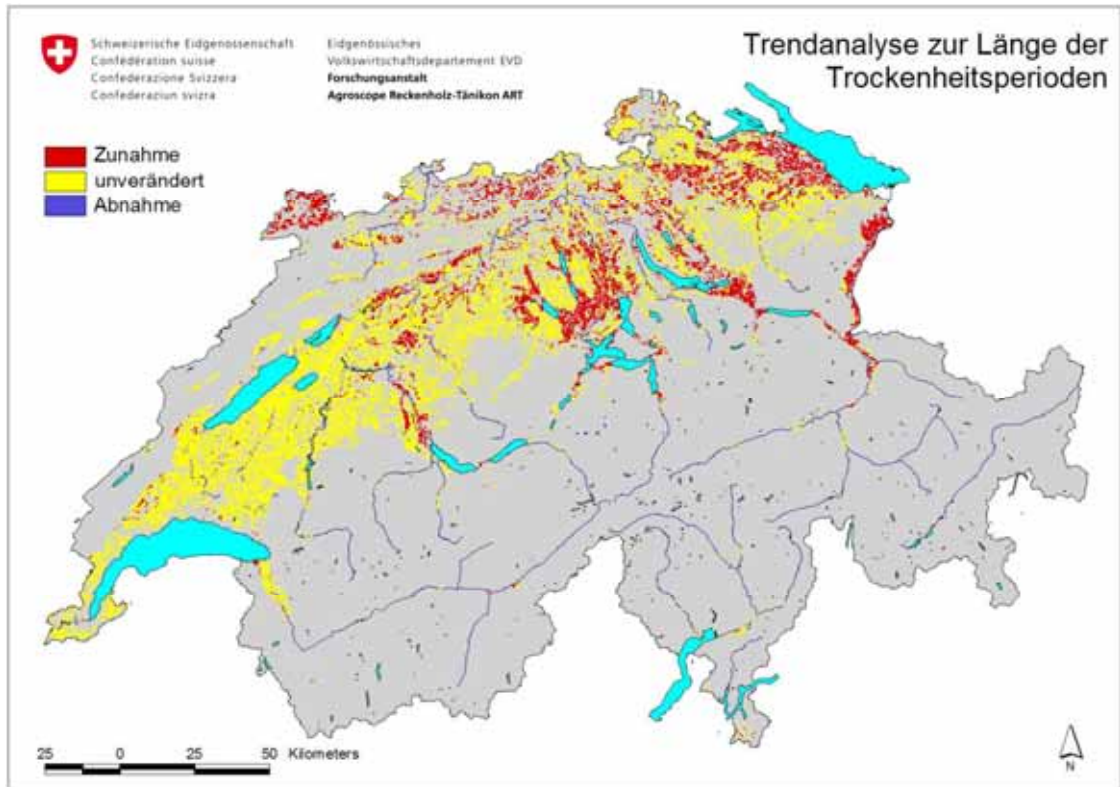


Abbildung 29: Trendanalyse zur Länge der zusammenhängenden Trockenheitsperiode (ET/ETP<0.80) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

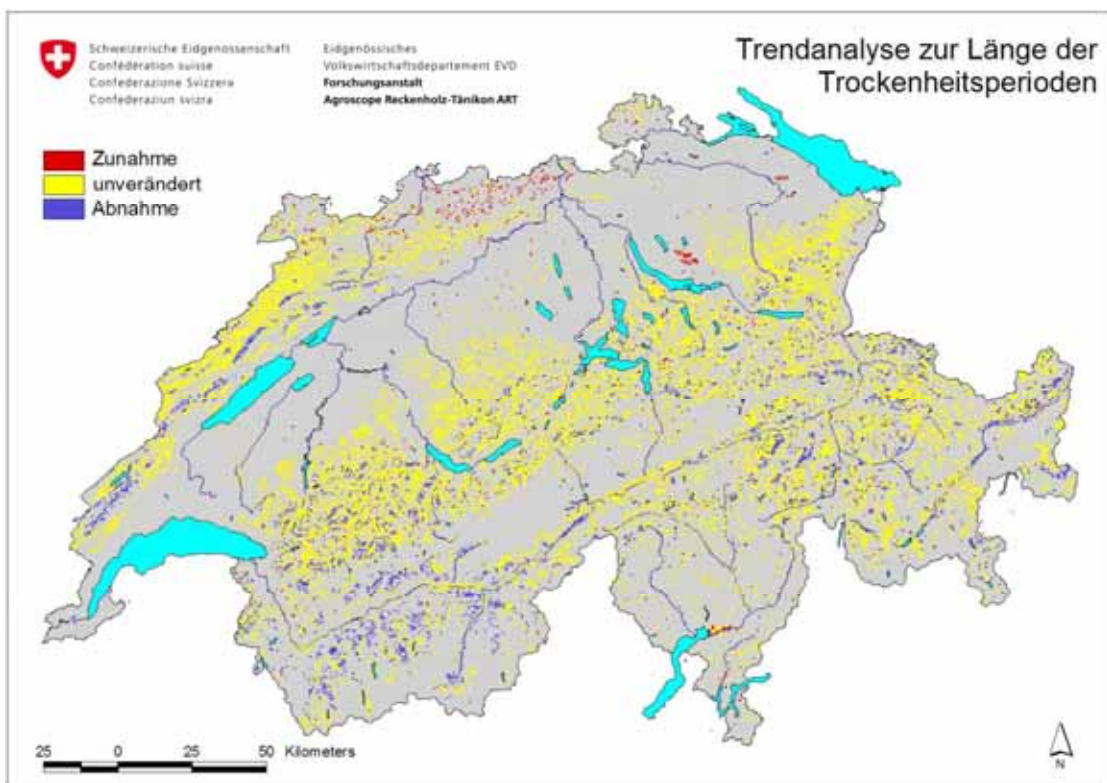


Abbildung 30: Trendanalyse zur Länge der zusammenhängenden Trockenheitsperioden (ET/ETP<0.80) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

6 Bewertung

In der vorliegenden Studie wurden mit modernen Werkzeugen und unter Einbezug einer umfassenden Datenbasis Entscheidungsgrundlagen zur Bewässerungsbedürftigkeit in der schweizerischen Landwirtschaft geliefert. Auf Basis des erstellten Kartenmaterials ist es nunmehr möglich, Gebiete mit unterschiedlichem Trockenheitsrisiko zu identifizieren und somit die grossräumlichen Muster der Bewässerungsbedürftigkeit und deren zeitliche Entwicklung während der letzten 27 Jahre herauszulesen. Die räumliche Differenzierung der Bewässerungsbedürftigkeit widerspiegelt hauptsächlich die Verteilung der klimatischen Bedingungen und der Bodeneigenschaften, aber auch die Höhenlage und die wechselnden Anteile von Acker- und Grasland.

Die modellseitigen Analysen zum Bewässerungsbedarf stützten sich vordergründig auf den definierten ET/ETP Schwellenwert von 0.80. Wird dieser Schwellenwert für eine hinreichende Dauer unterschritten, muss mit deutlichen Ertragseinbussen in der Grössenordnung von durchschnittlich 20% gerechnet werden. Die Unterschreitung dieses Schwellenwertes stellt somit einen Indikator in der landwirtschaftlichen Bewässerungsbeurteilung dar, die auf dem Kriterium *Ertrag* beruht. Allerdings ist die Festlegung des Schwellenwerts teilweise subjektiv und stellt einen Kompromiss dar. Sie entspricht dem Bedürfnis des Nutzers, die betroffenen Gebiete mit einer genügend grossen Sicherheit erkennen zu können. Würde ein tieferer Schwellenwert gewählt, wäre die Sicherheit noch grösser, könnte aber zu einer Unterschätzung der effektiv von trockenheitsbedingten Ertragsreduktionen (im Bereich von 20%) betroffenen Fläche führen.

Die so gewonnenen Flächenmuster von $ET/ETP < 0.80$ zeigen vor allem im westlichen Mittelland potenziell bewässerungsbedürftige Gebiete an. Weitere Regionen mit erhöhtem Trockenheitsrisiko sind das zumeist warme und niederschlagsarme Rhone-Tal, die tieferen Tallagen im Tessin, verschiedene Graubündener Alpentäler sowie das nordostschweizerische Mittelland (u.a. auch das untere Thur-Gebiet). Generell ist die Wahrscheinlichkeit einer Schwellenwertunterschreitung für Ackerland grösser als für Grasland. Für das gesamtschweizerische Ackerland liegt der 33%-Quantil für eine Unterschreitung bei recht hohen 41%. Für Grasland ist dieser Wert hingegen bei nur 10% anzusetzen.

Die Berechnungen ergaben, dass aufgrund des gewählten Kriteriums ($ET/ETP < 0.80$) für die Bewässerungsbedürftigkeit ein beträchtlicher Anteil (ca. 26%) der landwirtschaftlichen Nutzfläche in der Schweiz bewässerungsbedürftig ist. Das bedeutet, dass auf diesen Flächen der Ertrag einer durchschnittlichen Ackerkultur und in vermindertem Mass des Graslandes häufig von einer Zusatzbewässerung profitieren könnte. Unter Berücksichtigung der gesamten landwirtschaftlichen Fläche entspricht dies für das 33%-Quantil (d.h. jedes 3. Jahr) einer Fläche von ca. 400'000 ha, davon 275'000 ha Ackerland. Dieser Wert liegt deutlich über der heute bewässerten Fläche von rund 50'000 ha. Dies bedeutet, dass heute die regelmässige oder gelegentliche Bewässerung nur auf den stärker betroffenen Flächen angewandt wird, die mit einem tieferen Schwellenwert von ET/ETP und/oder einem höheren Quantil (z.B. bei 50% sind es 13% der Gesamtfläche) erfasst werden.

Unter Verwendung des Schwellenwerts von 0.80 wird ersichtlich, dass zusätzliche Flächen auch von einer Bewässerung profitieren könnten. In diesen Gebieten dürfte der Wunsch nach Bewässerungsmöglichkeiten künftig steigen. Insbesondere im Zuge des Klimawandels dürfte diese betroffene Fläche in den kommenden Jahrzehnten weiter wachsen und damit die Nachfrage nach Bewässerung steigen. Die Veränderung der klimatischen Bedingungen in Richtung höherer Temperaturen und weniger Sommerniederschlag ist verbunden mit einem steigenden Evapotranspirationspotenzial, d.h. steigendem Wasserbedarf der Kulturen. Betroffen wären in erster Linie wasserbedürftige Kulturen wie Kartoffel oder Gemüse, später aber auch Mais und Getreide, und schliesslich exponierte Graslandflächen. Das Trockenheitsrisiko wird nicht nur über die Häufigkeit des Auf-

treten einer Schwellenwertsunterschreitung charakterisiert, sondern auch über die Dauer der Trockenheitsperioden. Die in dieser Studie durchgeführten Analysen weisen darauf hin, dass ohne künstliche Bewässerung bereits heute viele Landwirtschaftsflächen für mehrere zusammenhängende Wochen oder gar Monate unterhalb kritischer Trockenheitsgrenzen liegen. Die Trendanalysen zeigen überdies für viele Gebiete auf der Alpennordseite, insbesondere im Nordosten des Landes eine zunehmende Länge der Trockenheitsperioden an. Dieser Trend dürfte mit der bereits stattgefundenen Klimaerwärmung zusammenhängen.

Ein zunehmender Wasserbedarf für die Bewässerung birgt einerseits ein Konfliktpotenzial bei der Wassernutzung durch verschiedene Sektoren – wie im Sommer 2003 – sowie andererseits auch Risiken für die Umwelt. Dazu gehört die Gefahr der Nährstoffauswaschung oder die Absenkung des Grundwasserspiegels. Diese Risiken müssen rechtzeitig erkannt werden und bei der Wahl der Wasserquelle, der Bewässerungsmenge und -technik, sowie wie auch bei der Festlegung der Bewässerungsperiode gebührend berücksichtigt werden.

Mit der vorliegenden Studie wurden die landwirtschaftlich genutzten Gebiete der Schweiz einer ersten flächendifferenzierten Abschätzung zur Bewässerungsbedürftigkeit unterzogen. Diese Gesamtschau erlaubt es, räumliche Differenzierungen und zeitliche Trends abzuschätzen. In einem weiteren Schritt könnte der Bewässerungsbedarf - auch in Abhängigkeit von Klimaprojektionen – auf der gleichen Rasterbasis quantifiziert werden. Die dafür notwendigen Daten und Werkzeuge liegen nun vor. Für eine detaillierte Analyse einzelner Standorte oder für Bewässerungsprojekte bestimmter Kulturen und Fruchtfolgen sind aber zusätzliche Berechnungen unter Verwendung lokaler Daten und kulturspezifischer Parameter im Modell unverzichtbar.

7 Literatur

- BAFU (Bundesamt für Umwelt) (2008): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2007. Bern
- 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
- DOORENBOS, J. & KASSAM, A.H. (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 56. Rome, Italy. 193 pp.
- GURTZ, J., ZAPPA, M., JASPER, K., LANG, H., BADOUX, A., VERBUNT, M. & VITVAR, T. (2003): A comparative study in modelling runoff and its components in two mountainous catchments. *Hydrol. Processes* 17, 297-311
- JASPER, K., CALANCA, P.L., GYALISTRAS, D. & FUHRER, J. (2004): Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basis. *Climate Res.* 26, 113-129.
- JASPER, K., CALANCA, P. & FUHRER, J. (2006): Changes in summertime soil water patterns in complex terrain due to climatic change. *J. Hydrol.* 327, 550-563
- KLOK, E.J., JASPER, K., ROELOFSMA, K.P., BADOUX, A. & GURTZ, J. (2001): Distributed hydrological modelling of a glaciated Alpine river basin. - *Hydrol. Sci. J.* 46, 553-570
- MONTEITH, J.L. UND UNSWORTH, M.H. (1990): Principles of environmental physics, Second Edition, Edward Arnold, London.
- NASH, J.E. & SUTCLIFFE, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models. - 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10, 282-290.
- PÖHLER, H., CHMIELEWSKI, F.-M., JASPER, K., HENNIGES, Y., SCHERZER, J. (2007): KiiWEP – Abschätzung der Auswirkungen der für Sachsen prognostizierten Klimaveränderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt im Einzugsgebiet der Parthe Weiterentwicklung von WaSiM-ETH: Implikation dynamischer Vegetationszeiten und Durchführung von Testsimulationen für sächsische Klimaregionen. Sächsische Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- RAES, D. (2002): Yield response to water. Report KuLeuven, Leuven, Belgium, 17pp.
- SCHÜEPP, M. & GENSLER, G. (1980): Klimaregionen der Schweiz. In: Müller G., 1980. Die Beobachtungsnetze der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt. Konzept 1980. Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, Nr. 93, Anhang Ib. Zürich.
- 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]
- SEVRUK, B. (Ed.) (1986): Correction of precipitation measurements. Zürcher Geographische Schriften, 23 ETH Zürich.
- swisstopo (Bundesamt für Landestopografie) (2004): RIMINI – Das preisgünstige digitale Höhenmodell der ganzen Schweiz. Wabern

VERBUNT, M., GURTZ, J., JASPER, K., LAMG, H., WARMERDAM, P. & ZAPPA, M. (2003): The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modelling. *J. Hydrol.* 182, 36-44

VAN GENUCHTEN, M.T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 44, 892-898

Anhang

Anhang A

Glossar

Anhang B

Verwendete Abflusspegel für die Modellkalibrierung

Anhang C

Arealstatistik Schweiz 1992/97 - Reklassifizierung

Anhang D

Definition der Kartiereinheiten in der Bodeneignungskarte der Schweiz (BEK200)

Anhang E

Karten zur Flächenstatistik von ET/ETP

Anhang F

Tabellenverzeichnis

Anhang G

Abbildungsverzeichnis

A: Glossar

Abstandsgewichtete Interpolation oder **inverse Distanzgewichtung** (*engl.*: Inverse Distance Weighting - IDW): Methode basiert auf der Annahme, dass punktuell gemessene Raumdaten in Abhängigkeit von ihrer Distanz im Raum gewisse Ähnlichkeiten aufweisen. Der Wert an einem nicht beobachteten Punkt wird durch ein abstandsgewichtetes Mittel der benachbarten Messwerte geschätzt. Die Gewichte des verwendeten linearen Schätzers sind proportional zu den Inversen des Abstands zwischen dem unbekanntem Punkt und dem verwendeten gemessenen Punkt.

Die inverse Distanzgewichtung wird in WaSiM-ETH (zumeist in Kombination mit der höhenabhängigen Regression) für die Interpolation der stationsbezogenen meteorologischen Messdaten auf das Modellraster genutzt.

Details in: Schulla & Jasper [1998] oder unter http://www.wasim.ch/the_model/feature_idw.htm.
Vergleiche auch *höhenabhängige Regression*.

Durchlässigkeit: oft als Synonym für die *gesättigte hydraulische Leitfähigkeit* genutzt. In der Bodeneignungskarte der Schweiz (BEK200) wird die Durchlässigkeit verwendet, um den Boden hinsichtlich seiner Wasserdurchlässigkeit zu charakterisieren. Zumeist werden hierbei qualitative Angaben verwendet (z.B. mässig durchlässig).

Entwässerungsdichte: (teil)gebietsbezogener Kalibrierungsparameter in WaSiM-ETH. Der Parameter berücksichtigt die Drainagedichte des Bodens in einer Rasterzelle sowie den Unterschied zwischen vertikaler und lateraler hydraulischer Leitfähigkeit. Er ist aufgrund seines Charakters ein Sammelparameter, der linear auf die berechnete Menge des *Interflows* wirkt.

Fliessakkumulation: spezifisches Einzugsgebiet eines Punktes in Anzahl Rasterzellen. Durch Setzen eines Schwellenwerts kann aus der Fliessakkumulation das Flussnetz extrahiert werden. Vergleiche auch *Tanalys*.

Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit: Quotient aus Filtergeschwindigkeit und Druckgefälle als Mass für die Durchlässigkeit eines wassergesättigten Bodens. *Gegenteil*: ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit. Generell gilt, dass mit abnehmender Bodenfeuchte die hydraulische Leitfähigkeit markant kleiner wird.

Höhenabhängige Regression: Ermittlung des Interpolationswertes anhand der Höhenabhängigkeit einer meteorologischen Grösse. Details in: Schulla & Jasper [1998] oder unter http://www.wasim.ch/the_model/feature_regression.htm. Vergleiche auch *abstandsgewichtete Interpolation*.

Interflow (*deutsch*: Zwischenabfluss oder hypodermischer Abfluss): lateraler Abfluss an den Bodenschichtgrenzen.

Interzeption: Abfangen bzw. Zurückhalten von Niederschlägen auf der „Oberfläche“ der Vegetation.

Interzeptionsspeicher: Speicherkapazität einer (Vegetations-)Oberfläche zur Aufnahme bzw. zum Rückhalt von Niederschlagswasser.

Mehrfachregression (*engl.*: multiple regression): Beziehung zwischen einer abhängigen Variablen und mehreren unabhängigen Variablen.

Mesoskalig: in der Hydrologie der Flächenbereich zwischen 1 km² und 10'000 km²

Pedotransferfunktionen (PTFs): Grundlage der Ermittlung von hydrologisch relevanten Bodeneigenschaften (Retentionskurven, Speicherkennwerte, etc.). Sie dienen als Ersatz für Messwerte, die nur punktuell und nicht flächendeckend ermittelt werden können.

pF-Bereich: Ausdruck der Bodenwasserspannung. Der pF-Wert entspricht dem dekadischen Logarithmus der Saugspannung im Boden. Die Saugspannung wiederum ist als negativer Druck des Bodenwassers relativ zum atmosphärischen Druck zu verstehen. Sie kennzeichnet die Bindungsintensität des Wassers in der ungesättigten Bodenzone.

Phänologie: befasst sich mit den im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Entwicklungsercheinungen in der Natur. In der hydrologischen Modellierung werden charakteristische phänologische Entwicklungsstadien der Vegetation erfasst und simuliert.

Retentionskonstante: (teil)gebietsbezogener Kalibrierungsparameter in WaSiM-ETH. Der Parameter wird zur Charakterisierung des Speicherausflusses genutzt. Er bezeichnet die Zeitverschiebung zwischen den Schwerpunkten der Speicherzufluss- und -ausflussganglinie.

Rimini-Modell: Höhenmodell für die gesamte Schweiz mit 250 m Maschenweite.

Routing-Modell: berechnet die Abflusskonzentration (Abflussverformung) im Fließgerinne und Vorland.

Routing-Strecken: Gewässerteilstrecken

Routing-Strukturen: Vernetzung der Fließgewässer in einem Flussgebiet (Ober-/Unterlieger, Gewässerordnungen)

Steigung der Regressionsgeraden: Regressionsgeraden sind oft gebrauchte Mittel, um Trendverläufe in beliebigen Wertpapieren sichtbar zu machen und störende Zufallsbewegungen herauszufiltern. Ein nützliches Nebenprodukt der linearen Regression ist die Steigung der Regressionsgerade.

TANALYS: Dieses topographische Analyseprogramm ist ein Grundlagenwerkzeug für die Arbeit mit WaSiM-ETH. Ausgehend von einem digitalen Höhenmodell (DHM) erlaubt es die automatisierte Ableitung und Bereitstellung von modellrelevanten Rasterdaten, Strukturen und Beziehungen. Details in: Schulla & Jasper [1998] oder unter <http://www.wasim.ch/products/tanalis.htm>. Vergleiche auch *Fliessakkumulation*.

Thermal Time Model: Phänologie-Modell, welches typischerweise auf die Lufttemperatur zur Bestimmung des Vegetationsbeginns basiert.

Translation-Retention-Verfahren: Basisverfahren vieler hydrologischen Routing-Modelle.

Translationsgeschwindigkeit: Fließgeschwindigkeit ohne Einfluss von Speichereffekten.

B: Verwendete Abflusspegel für die Modellkalibrierung

Tabelle 13: Verwendete Abflusspegel zur Abschätzung der Modellgüte in den Untersuchungsgebieten; AE_o: oberirdische Einzugsgebietsfläche (Angaben aus BAFU [2008])

Pegelstation	Gewässer	y-Koordinate	x-Koordinate	Höhe [m ü.M.]	AE _o [km ²]
Thur-Gebiet					
Andelfingen	Thur	693510	272500	356	1696
Frauenfeld	Murg	709540	269660	390	212
Wängi	Murg	714105	261720	466	78.9
Halden	Thur	733560	263180	456	1085
St. Gallen	Sitter	742540	253230	577	261
Hundwil	Urnäsch	740170	244800	746	64.5
Appenzell	Sitter	749040	244220	769	74.2
Herisau	Glatt	737270	251290	679	16.2
Jonschwil	Thur	723675	252720	534	493
Mosnang	Rietholzbach	718840	248440	682	3.31
Mogelsberg	Necker	727110	247290	606	88.2
Stein/Ittishag	Thur	736020	228250	850	84.0
Emme-Gebiet					
Wiler	Emme	608220	223240	458	939
Emmenmatt	Emme	623610	200420	638	443
Eggwil	Emme	627910	191180	745	124
Langnau	Ilfis	627320	198600	685	188
Broye-Gebiet					
Payerne	Broye	561660	187320	441	392
Rhone-Gebiet					
Sion	Rhone	593770	118630	484	3373
Brig	Rhone	641340	129700	667	913
Visp	Vispa	634150	124850	659	778
Blatten	Lonza	629130	140910	1520	77.8
Ticino-Gebiet					
Bellinzona	Ticino	721245	117025	220	1515
Lumino	Moesa	724765	120360	249	471
Loderio	Brenno	717770	137270	348	397
Pollegio	Ticino	716120	135330	298	444
Dischmabach-Gebiet					
Davos-Kriegsmatte	Dischmabach	786220	183370	1668	43.3

C1: Arealstatistik Schweiz 1992/97 - Nomenklatur

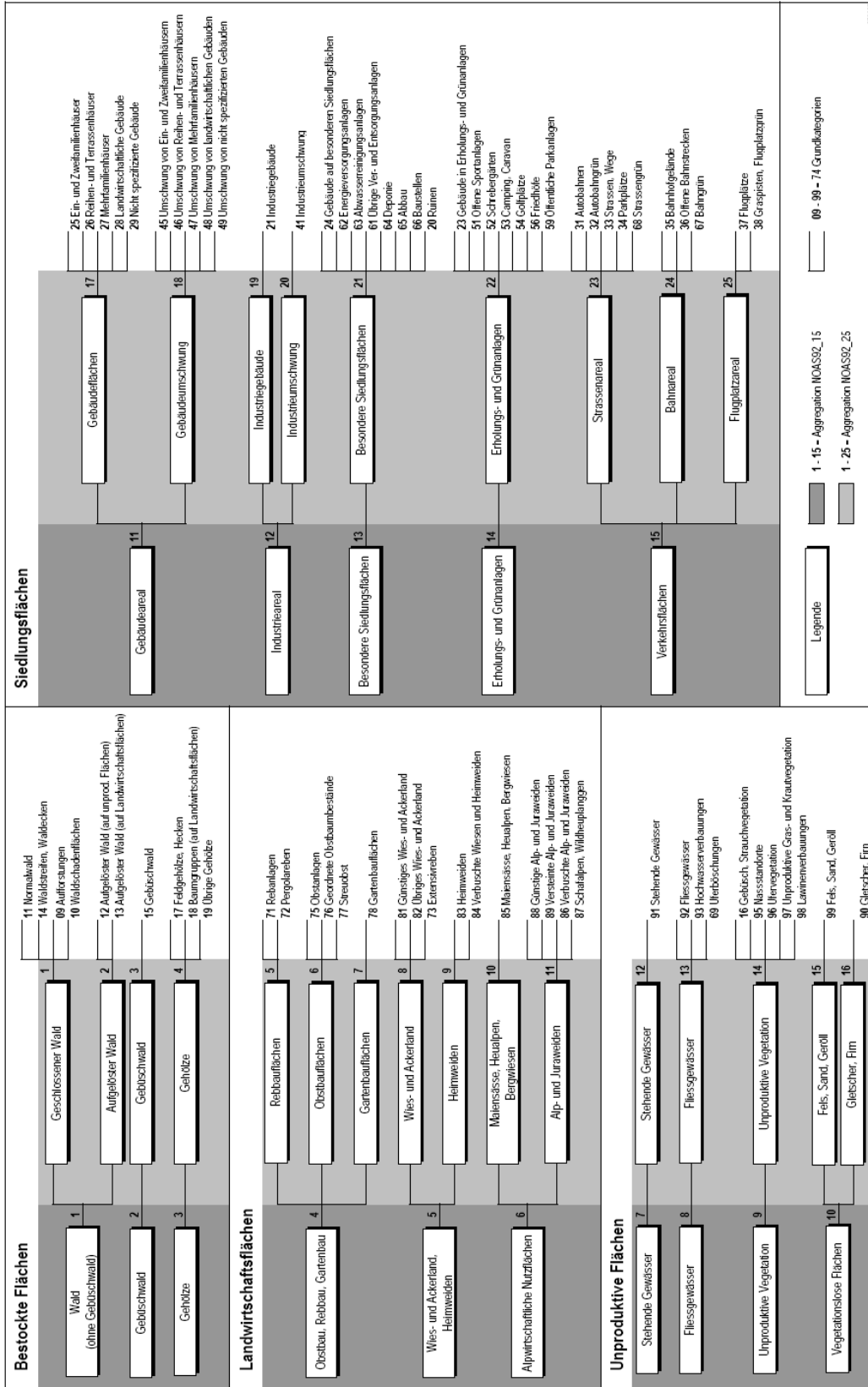


Abbildung 31: Arealstatistik Schweiz 1992/97 – Nomenklatur NOAS97: Grundkategorien und Aggregationen (BFS [2001])

C2: Arealstatistik Schweiz 1992/97 - Reklassifizierung

Tabelle 14: Reklassifizierung der Arealstatistik Schweiz 1992/97 mit Flächenangaben

Code	Arealstatistik	Fläche [ha]	Code	WaSiM-Landnutzung
9	Aufforstungen	3349	4	Wald
10	Waldschadenflächen	14851	5	Offener Wald
11	Normalwald	962312	4	Wald
12	Aufgelöster Wald (auf unprod. Fl.)	52825	5	Offener Wald
13	Aufgelöster Wald (auf LW-Flächen)	24108	5	Offener Wald
14	Waldstreifen, Waldecken	44711	6	Gebüschwald
15	Gebüschwald	60514	6	Gebüschwald
16	Gebüsch, Strauchvegetation	70278	10	Gebüsch
17	Feldgehölze, Hecken	35807	5	Offener Wald
18	Baumgruppen (auf LW-Flächen)	38157	5	Offener Wald
19	Übrige Gehölze	35011	5	Offener Wald
20	Ruinen	98	2	Dichte Bebauung
21	Industriegebäude	7292	2	Dichte Bebauung
23	Gebäude in Erholungs- und Grünanl.	420	3	Lockere Bebauung
24	Gebäude auf bes. Siedlungsflächen	228	2	Dichte Bebauung
25	Ein- und Zweifamilienhäuser	10652	2	Dichte Bebauung
26	Reihen- und Terrassenhäuser	760	2	Dichte Bebauung
27	Mehrfamilienhäuser	5480	2	Dichte Bebauung
28	Landwirtsch. Gebäude	9131	2	Dichte Bebauung
29	Nicht spezifizierte Gebäude	12485	2	Dichte Bebauung
31	Autobahnen	3602	2	Dichte Bebauung
32	Autobahngrün	2214	12	Übrige Grünflächen
33	Strassen, Wege	64791	2	Dichte Bebauung
34	Parkplätze	4358	2	Dichte Bebauung
35	Bahnhofgelände	2301	2	Dichte Bebauung
36	Offene Bahnstrecken	3331	3	Lockere Bebauung
37	Flugplätze	841	2	Dichte Bebauung
38	Graspisten, Flugplatzgrün	744	12	Übrige Grünflächen
41	Industrieumschwung	12941	3	Lockere Bebauung
45	Umschwung von [25]	45705	3	Lockere Bebauung
46	Umschwung von [26]	1943	3	Lockere Bebauung
47	Umschwung von [27]	14062	3	Lockere Bebauung
48	Umschwung von [28]	14948	3	Lockere Bebauung
49	Umschwung von [29]	22392	3	Lockere Bebauung
51	Offene Sportanlagen	6760	12	Übrige Grünflächen
52	Schrebergärten	1807	9	Obstbauflächen
53	Campingplätze	1045	12	Übrige Grünflächen
54	Golfplätze	1126	12	Übrige Grünflächen
56	Friedhöfe	1371	12	Übrige Grünflächen

Code	Arealstatistik	Fläche [ha]	Code	WaSiM-Landnutzung
59	Öffentliche Parkanlagen	3331	12	Übrige Grünflächen
61	Übrige Ver- und Entsorgungsanlagen	303	3	Lockere Bebauung
62	Energieversorgungsanlagen	1176	2	Dichte Bebauung
63	Abwasserreinigungsanlagen	510	2	Dichte Bebauung
64	Deponie	2438	3	Lockere Bebauung
65	Abbau	5385	3	Lockere Bebauung
66	Baustellen	5975	3	Lockere Bebauung
67	Bahngrün	2817	12	Übrige Grünflächen
68	Strassengrün	4332	12	Übrige Grünflächen
69	Uferböschungen	2717	12	Übrige Grünflächen
71	Rebanlagen	15290	9	Obstbauflächen
72	Pergolareben	146	9	Obstbauflächen
73	Extensivreben	227	9	Obstbauflächen
75	Obstanlagen	8288	9	Obstbauflächen
76	Geordnete Obstbestände	3306	9	Obstbauflächen
77	Streuobst	29886	9	Obstbauflächen
78	Gartenbauflächen	4036	9	Obstbauflächen
81	Günstiges Wies- und Ackerland	547754	7/8	Ackerland / Grünland ^{a)}
82	Übriges Wies- und Ackerland	289374	7/8	Ackerland / Grünland ^{a)}
83	Heimweiden	87303	7/8	Ackerland / Grünland ^{a)}
84	Verbuschte Wiesen und Heimweiden	1708	11	Verbuschtes Weideland
85	Maiensässe, Heualpen, Bergwiesen	32316	8	Grünland
86	Verbuschte Alp- und Juraweiden	39646	11	Verbuschtes Weideland
87	Schafalpen, Wildheuplanggen	51124	8	Grünland
88	Günstige Alp- und Juraweiden	368691	8	Grünland
89	Versteinte Alp- und Juraweiden	46024	14	Felsflächen, Ödland
90	Gletscher, Firn	134757	15/16	Eis-/Firnflächen ^{b)}
91	Stehende Gewässer	142235	1	Wasserflächen
92	Fliessgewässer	28253	1	Wasserflächen
93	Hochwasserverbauungen	762	3	Lockere Bebauung
95	Nassstandorte	7931	13	Moore, Sümpfe
96	Ufervegetation	1036	13	Moore, Sümpfe
97	Unprod. Gras- und Krautvegetation	182384	12	Übrige Grünflächen
98	Lawinerverbauungen	1422	3	Lockere Bebauung
99	Fels, Sand, Geröll	480842	14	Felsflächen, Ödland

^{a)} Unterscheidung von Ackerland und Grünland nach Indikatorensystem MONET (BFS et al. [2002])

^{b)} Unterscheidung von Gletscherflächen in Eis- und Firnanteile erfolgt höhenabhängig. Gletscherflächen unterhalb von 2900 m ü.M. werden als Eisflächen definiert, die darüber liegenden als Firnflächen.

D: Definition der Kartierungseinheiten in der BEK200

Tabelle 15: Kartierungseinheiten (KE) der Digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz (BEK200) mit Angaben zu den ausgewiesenen bodenhydraulischen Parametern (Code-Definitionen in Tabelle 5).

KE	Formelemente der Landschaft	Gründig- keit	Skelett- gehalt	Durch- lässigkeit	Spei- cher- verm.	Ver- näs- ung
1	Seen	-	-	-	-	-
6	Moore	-	-	-	-	-
7	Siedlungen	-	-	-	-	-
8	Felsflächen	-	-	-	-	-
TAFELJURA						
A1	Plateau, harter Kalk	3	4	5	3	-
A2	Steilhänge, vorw. Süd-exponiert, HN >35%	2	5	5	2	-
A3	Steilhänge, vorw. Nord-exponiert., HN >35%	3	4	3	3	2
A4	Plateau, Mergel	5	2	3	5	-
A5	Hanglagen, Mergel o. Hanglehm, vorw. Süd-exponiert, HN<35%	5	2	3	5	2
A6	Hanglagen, Mergel o. Hanglehm, vorw. Nord-exponiert, HN<35%	5	2	2	4	2
A7	Plateau, Löss o. Schwemmlehm	6	1	4	6	-
A8	Hanglagen, Löss, Schwemmlehm, vorw. südexp., HN<35%	5	1	4	6	-
A9	Hanglagen, Löss Schwemmlehm, vorw. nordexp., HN<35%	5	1	4	6	2
BECKEN UND TÄLER IM TAFEL- UND FALTENJURA						
B2	Tafeljura, Talsohlen mit Alluv., HN<10%	5	2	3	5	2
B3	Tafeljura, Schotter, HN<10%	5	4	6	3	-
B4	Tafeljura, Hangmulden, HN<25%	5	3	3	5	2
B5	Faltenjura, Talsohlen mit Alluvionen	5	2	3	5	2
B6	Faltenjura, Schotter	5	4	5	4	-
B7	Faltenjura, Sundgauschotter + Verwitterungs- lehm	6	2	4	5	-
B8	Hanglagen, Molasse, vorw. Süd-exponiert, HN<25%	5	2	5	4	-
B9	Hanglagen, Molasse, vorw. Nord-exponiert, HN<25%	5	2	5	5	2
LÄNGSTÄLER IM FALTENJURA						
C1	Torfareale	4	1	3	-5	4
C2	Moräne	5	4	4	4	-
C3	Schotter	4	4	6	3	-
C4	Alluvionen	5	3	3	5	2
C5	Kalk	3	4	5	3	-
C6	Jurarandmoräne	3	4	6	3	-
C7	Hanglagen, Molasse vermischt, vorw. Süd-exponiert, HN<25%	4	3	5	4	-
C8	Hanglagen, Molasse vermischt, vorw. Nord-exponiert, HN<25%	4	3	5	-4	3
PLATEAUJURA						
D	wie D1					
D1	Plateau, Kalkhöhenzüge	3	4	5	4	-
D2	Antiklinal- und Synklinalmulden	4	2	2	-5	3
HÖHENZÜGE IM KETTENJURA						
E1	Hanglagen, Hanglehm, vorw. Süd-exponiert, HN<35%	4	3	4	4	-
E2	Steilhänge, Kalk, vorw. Süd-exponiert, HN>35%	3	4	5	3	-
E3	Steilhänge von Felsköpfen und Felsbändern	2	5	6	2	-

KE	Formelemente der Landschaft	Gründig-keit	Skelett-gehalt	Durch-lässig-keit	Spei-cher-vern.	Ver-näs-sung
	durchzogen, HN>35%					
E4	Rumpfebenen und Verflachungen	4	4	3	4	-
E5	Kuppen und höhergelegene Hänge, Kalk	3	4	5	4	-
E6	Hanglagen, Hanglehm, vorw. nordexp., HN<35%	4	3	3	4	-
E7	Steilhänge, Kalk, vorw. nordexp., HN>35%	3	4	5	3	-
E8	Hangmulden, Hanglehm, vorw. Süd-exponiert	4	3	3	-4	3
E9	Hangmulden, Hanglehm, vorw. Nord-exponiert	4	3	3	-5	4
EBENEN DES TIEFEREN MITTELLANDES						
F1	Moore, Torf	4	1	3	-5	4
F2	Schotter	5	3	6	4	-
F3	Rezente Alluvionen, tonig	4	2	2	-5	3
F4	Rezente Alluvionen, sandig	5	2	5	4	2
LEICHT GEWELLTES MORÄNENHÜGELLAND						
G1	Mulden, Grundmoräne, Moore	4	2	3	-4	4
G2	fluvioglaziale Schotterebenen	5	3	6	4	-
G3	Rücken, flache Drumlins, Endmoränen	5	3	4	5	-
G4	feinkörnige Alluvionen	4	2	4	-5	3
TIEFERES MOLASSEHÜGELLAND MIT TEILWEISER MORÄNEBEDECKUNG						
H1	Gew. Plateaus, Hangterr., Moräne, tonig	5	3	4	6	2
H2	Hanglagen, vorwieg. Wallmoräne	5	3	4	-5	3
H3	Steilhänge, vorwieg. Molasse	4	3	4	4	-
H4	Mulden, Akkumulationsrinnen	4	1	3	-5	4
H5	leichte gewellte Plateaus und Hangterrassen, Moräne/Moräne sandig, West-CH	5	2	5	5	-
H6	Hanglagen, West-CH, HN<25%	5	2	5	5	-
H7	Deckenschotter	6	4	6	4	-
SOHLENTÄLER DES MITTELLANDES						
J1	feinkörnige Alluvionen	4	2	4	-5	3
J2	kiesige Alluvionen	4	4	5	4	-
MITTLERES MOLASSEHÜGELLAND MIT TEILWEISER GLAZIALER ÜBERFORMUNG						
K1	Plateaus und Hangterrassen, feinsandig Molasse	5	2	4	5	2
K2	Hanglagen, feinsandig Molasse, HN<25%	6	2	5	5	2
K3	Steilhänge, sandige Molasse, HN>25%	4	2	5	4	-
K4	Mulden, Akkum.-Rinnen	4	2	4	-5	3
DRUMLINLANDSCHAFTEN MIT STÄRKEREM RELIEF						
L2	vorwieg. Mulden	3	1	2	-4	4
L3	Buckel und Mulden gleichwertig	3 / 4	1 / 4	2 / 6	-4 / 3	- / 4
L4	flache Buckel, vernässte Mulden	4	3	5	4	-
HÖHERES MOLASSEHÜGELLAND MIT STARKEM EROSIONSRELIEF (HÖRNLI)						
M1	Kuppen	4	3	4	4	2
M2	mässig geneigte Hänge	4	3	3	-5	3
M3	Steilhänge	4	3	3	4	2
M4	Mulden, Akkumulationsrinnen	4	3	3	-5	4
HÖHERES MOLASSEHÜGELLAND MIT STARKEM EROSIONSRELIEF (NAPF)						
N1	Kuppen, Verflachungen, HN<25%	4	3	5	4	-
N2	Hanglagen, HN<35%	5	3	4	5	2
N3	Steilhänge, HN>35%	4	3	5	4	2
N4	Mulden, Akkum.-Rinnen	4	3	4	-5	4
ALPENRAND, VORWIEGEND SANDIGE MOLASSE						
O1	Ebene Lagen	4	2	4	-5	3
O2	Hanglagen	5	2	4	-6	3
O3	Steilhänge, vorwieg. Süd-exponiert	4	3	4	5	2
O4	Steilhänge, vorwieg. Nord-exponiert	4	3	4	5	2

KE	Formelemente der Landschaft	Gründig-keit	Skelett-gehalt	Durch-lässig-keit	Spei-cher-vern.	Ver-näs-sung
O5	Mulden, Akkumulationsrinnen	4	2	3	-5	4
ALPENRAND, VORWIEGEND NAGELFLUH						
P1	felsbänderdurchzog. Hänge + Kuppen	3	4	4	2	-
P2	Hanglagen, vorwieg. Süd-exponiert, Ost-CH, HN<35%	4	3	3	-5	3
P3	Hanglagen, vorw. Süd-exponiert, West-CH, HN<35%	4	3	5	5	-
P4	Steilhänge, vorwieg. Süd-exponiert, HN>35%	3	4	4	3	-
P5	Hanglagen, vorwieg. Nord-exponiert, Ost-CH, HN<35%	4	3	3	-5	3
P6	Hanglagen, vorwieg. Nord-exponiert, West-CH, HN<35%	4	3	5	5	-
P7	Steilhänge, vorwieg. Nord-exponiert, HN>35%	3	4	4	3	-
P8	Mulden	3	3	3	-4	4
WEITE ALPENTÄLER						
Q1	feinkörnige Alluvionen	5	2	3	6	2
Q2	kiesige Alluvionen	4	4	6	3	-
Q3	grundnasse Alluvionen	4	2	2	-5	4
Q4	Schwemmfächer	5	4	5	5	-
Q5	Schuttkegel	4	5	6	3	-
ENGE ALPENTÄLER						
R1	feinkörnige Alluvionen	4	3	5	-4	3
R2	kiesige Alluvionen	4	4	6	3	2
R3	grundnasse Alluvionen, Moore	3	3	3	-5	4
R4	Schwemmfächer	5	4	5	4	-
R5	Schuttkegel	4	5	6	3	-
ALPINE FLYSCH-BERGLANDSCHAFT, BÜNDNERSCHIEFER						
S1	Kreten und felsbänderdurchzog. Hänge	2	4	5	2	-
S2	hochgeleg. Südhänge (>1500m), HN<35%	3	4	3	-4	3
S3	hochgeleg. Nordhänge (>1500m) HN<35%	3	4	3	-4	4
S4	tiefergelegene Südhänge	3	2	2	-4	4
S5	steile Südhänge	3	4	4	3	-
S6	tiefergelegene Nordhänge	3	2	2	-4	4
S7	steile Nordhänge	3	4	3	3	2
S8	Mulden	3	3	2	-4	4
BÜNDNERSCHIEFER IM BEREICH DES OBEREN RHONETALS UND TESSIN						
T1	Kreten und felsbänderdurchzogene Hänge	2	4	5	2	-
T2	Tiefergelegene Hänge (<1000m), HN<35%	4	3	5	4	-
T3	Steilhänge, HN>35%	3	4	5	3	-
T4	Hochgelegene Hänge (>1000m), HN<35%	4	4	5	4	-
ALPINE KALK-BERGLANDSCHAFTEN						
U1	Kreten und felsbänderdurchzog. Hänge	2	5	5	1	-
U2	hochgelegene Südhänge	3	4	4	3	-
U3	hochgelegene Nordhänge	3	4	4	3	-
U4	tiefergelegene Südhänge	4	3	4	4	-
U5	steile Südhänge	2	4	5	2	-
U6	tiefergelegene Nordhänge	4	3	4	4	2
U7	steile Nordhänge	2	4	5	2	-
U8	Mulden	3	3	3	-4	4
ALPINE KRISTALLINE BERGLANDSCHAFT (GRANIT, ORTHOGNEIS)						
V1	Kreten und felsbänderdurchzogene Hänge	2	5	6	1	-
V2	hochgeleg. Südhänge (>1500m), HN<35%	3	5	6	3	-
V3	hochgeleg. Nordhänge (>1500m) HN<35%	3	5	6	3	-
V4	tiefergeleg. Südhänge (<1500m) HN<35%	4	4	6	3	-
V5	steile Südhänge, HN>35%	2	5	6	2	-

KE	Formelemente der Landschaft	Gründig- keit	Skelett- gehalt	Durch- lässig- keit	Spei- cher- verm.	Ver- näs- sung
V6	tiefergeleg. Nordhänge (<1500m) HN<35%	4	4	6	3	-
V7	steile Nordhänge, HN>35%	2	5	6	2	-
V8	Mulden	3	5	5	1	3
ALPINE KRISTALLINE BERGLANDSCHAFT (PARAGNEIS)						
W1	Kreten und felsbänderdurchzog. Hänge	2	5	6	1	-
W2	hochgeleg. Südhänge (>1500m), HN<35%	3	4	5	3	2
W3	hochgeleg. Nordhänge (>1500m) HN<35%	3	4	5	3	2
W4	tiefergel. Südhänge (<1500m), HN<35%	4	3	5	4	-
W5	steile Südhänge, HN>35%	2	4	6	2	-
W6	tiefergel. Nordhänge (<1500m), HN<35%	4	3	5	4	-
W7	steile Nordhänge, HN>35%	2	4	6	2	-
W8	Mulden	3	5	5	-2	3
ALPENRANDMOLASSE MIT TEILWEISER MORÄNEBEDECKUNG (TESSIN)						
X1	Hanglagen, Hangterrassen, HN<25%	5	3	5	5	-
X2	Steilhänge, HN>25%	4	3	5	4	-
TALLANDSCHAFTEN (ALPENSÜDSEITE)						
Y1	vorw. feinkörnige Alluvionen	4	3	5	4	-
Y2	vorw. kiesige Alluvionen	3	5	6	2	-
Y3	Terrassen	6	3	5	5	-
Y4	Schwemmfächer	4	4	5	4	-
Y5	Schuttkegel	3	5	6	2	-
EBENEN (MAGADINO, MENDRISIO)						
Z1	feinkörnige Alluvionen	5	2	4	-5	3
Z2	sandige Alluvionen	4	2	6	3	2
Z3	grundnasse Alluvionen	3	2	4	-4	4
Z4	Schotter	5	3	5	4	-
Z5	Schwemmfächer	6	3	5	5	-

E1: Mittelwerte ET/ETP für Ackerland

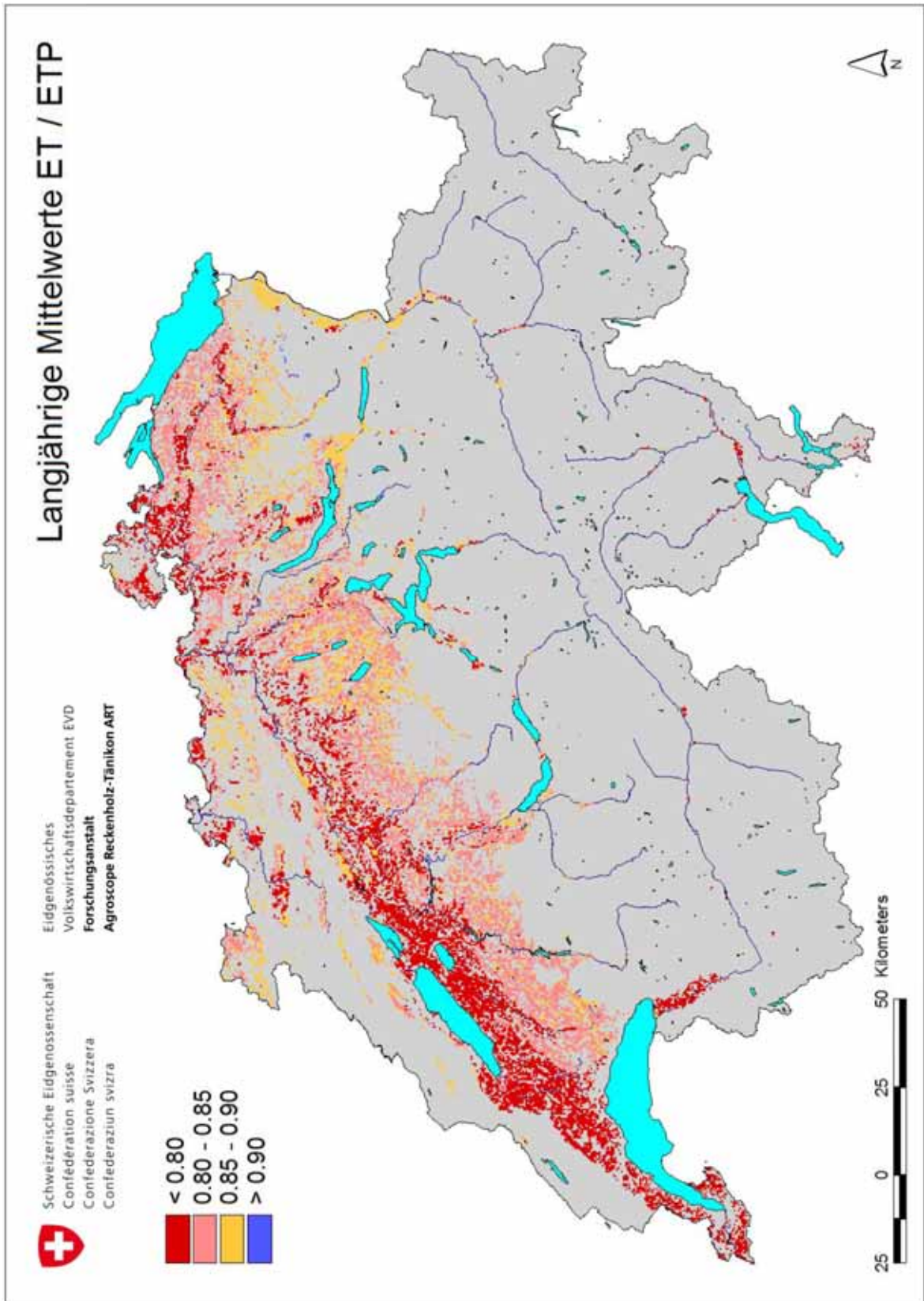


Abbildung 32: Langjährige Quantile der relativen Evapotranspiration (=Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

E2: Mittelwerte ET/ETP für Grasland

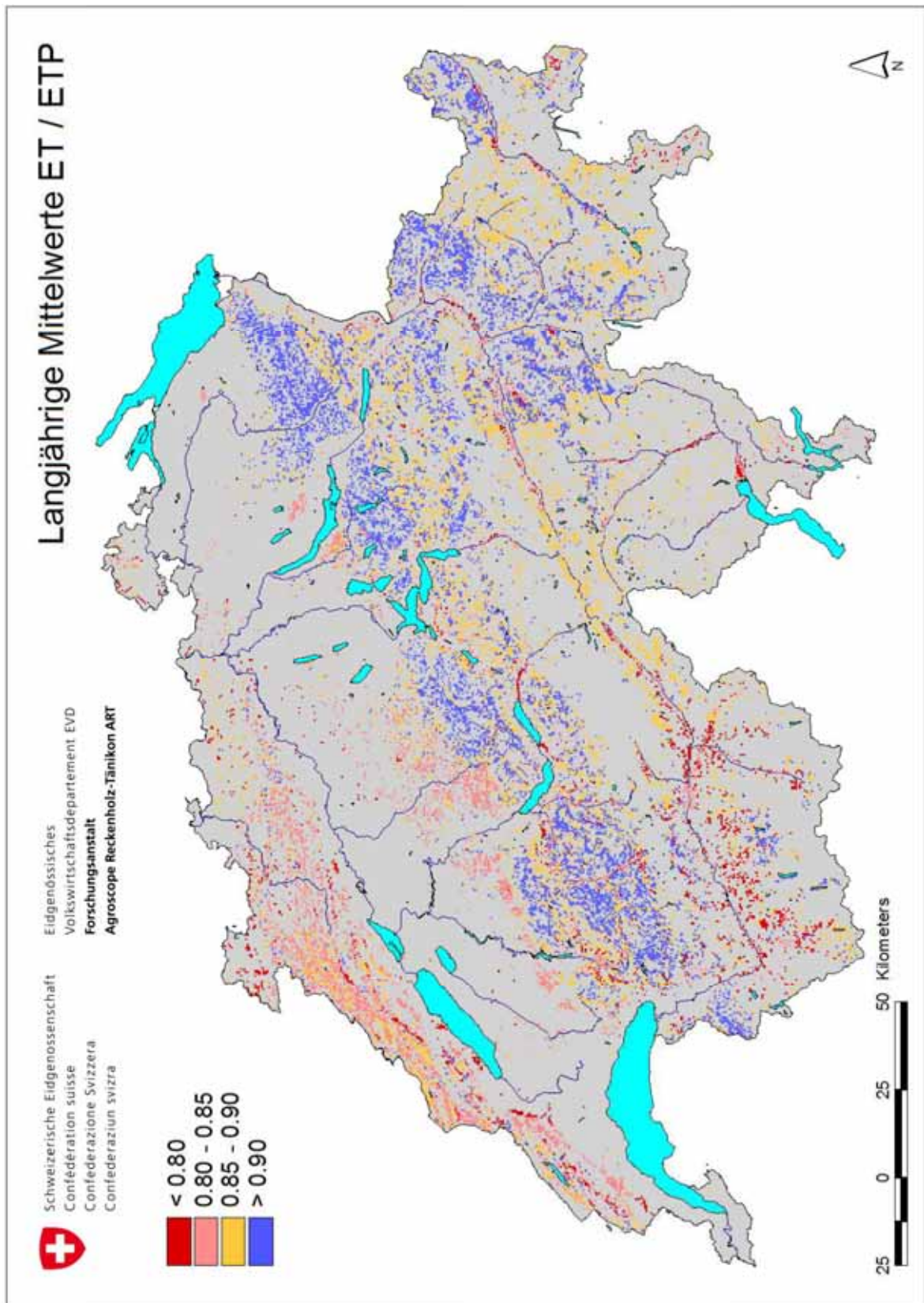


Abbildung 33: Langjährige Mittelwerte der relativen Evapotranspiration (=Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster

E3: ET/ETP Quantile für Ackerland

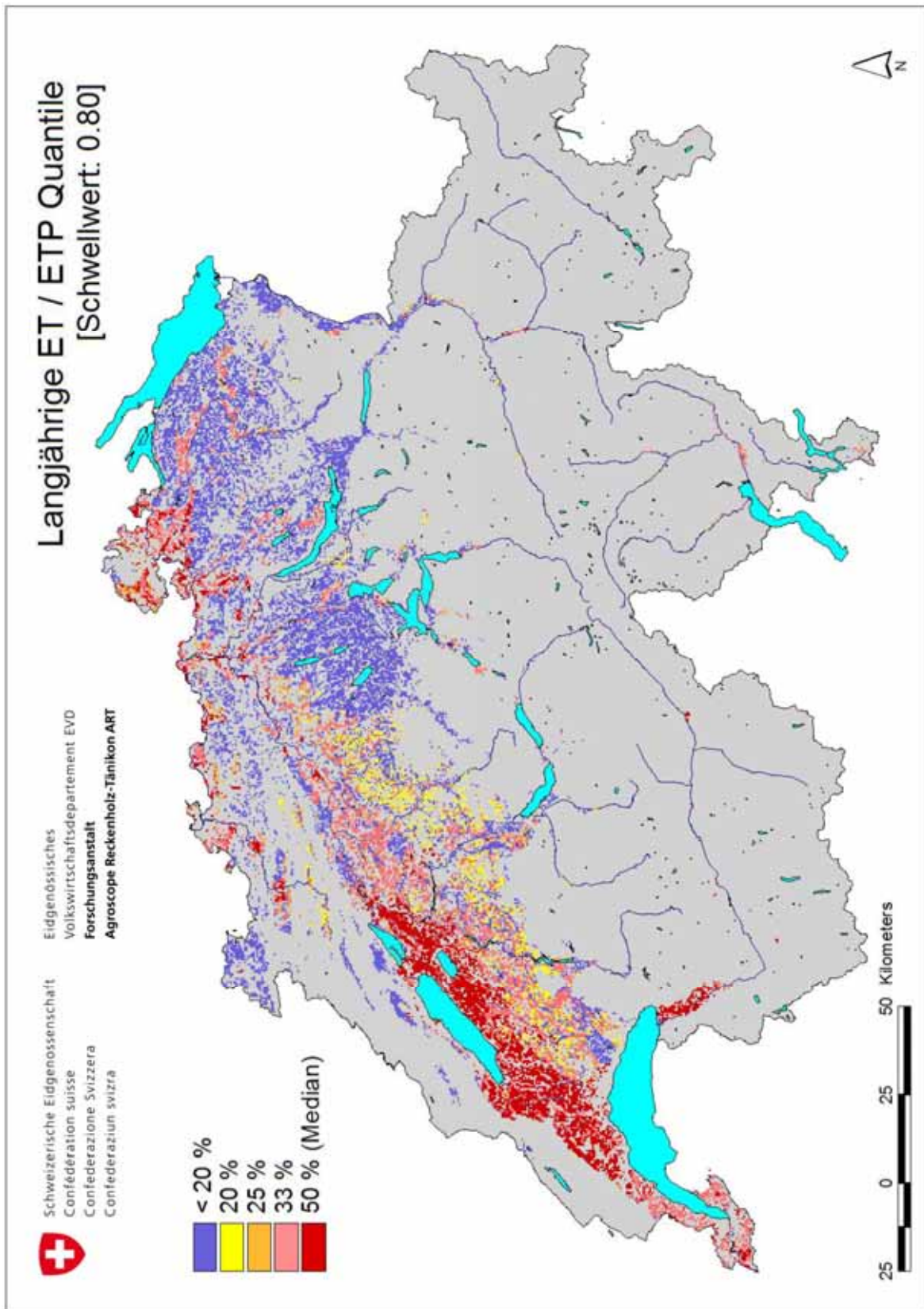


Abbildung 34: Quantile der langjährigen Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (=Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

E4: ET/ETP Quantile für Grasland

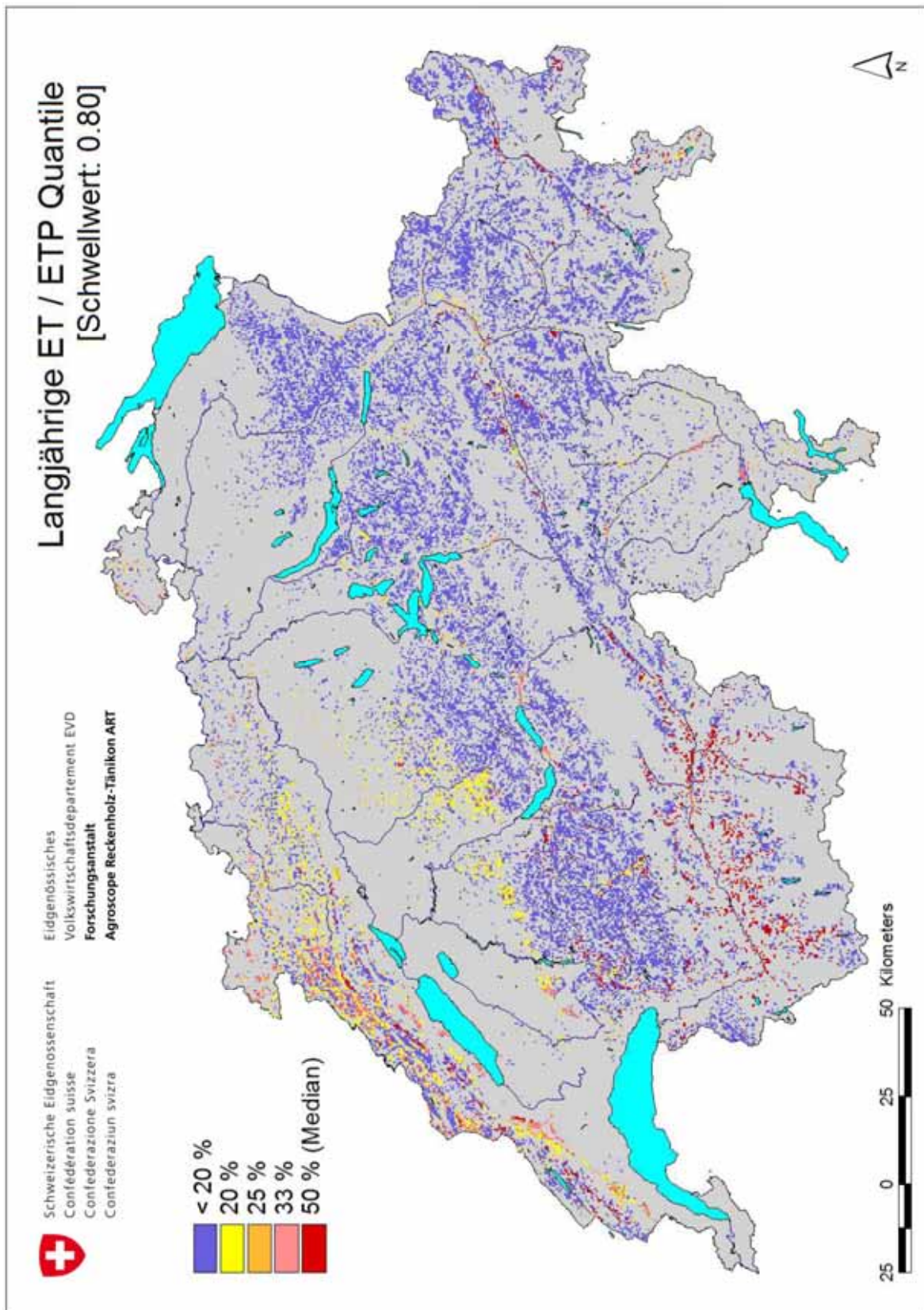


Abbildung 35: Quantile der langjährigen Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (=Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

E5: 20% ET/ETP Quantil für Ackerland

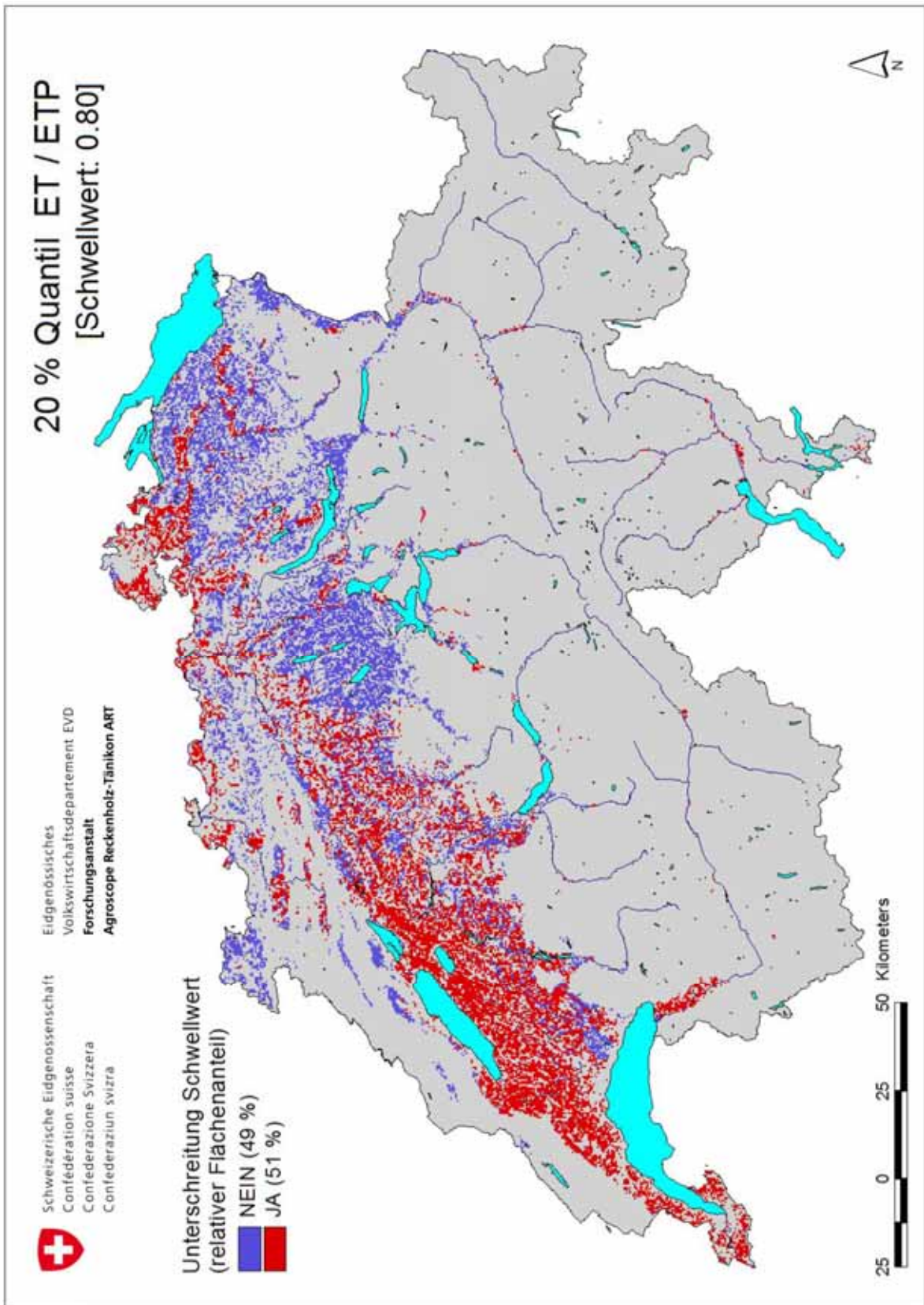


Abbildung 36: Langjähriges 20% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (=Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

E6: 20% ET/ETP Quantil für Grasland

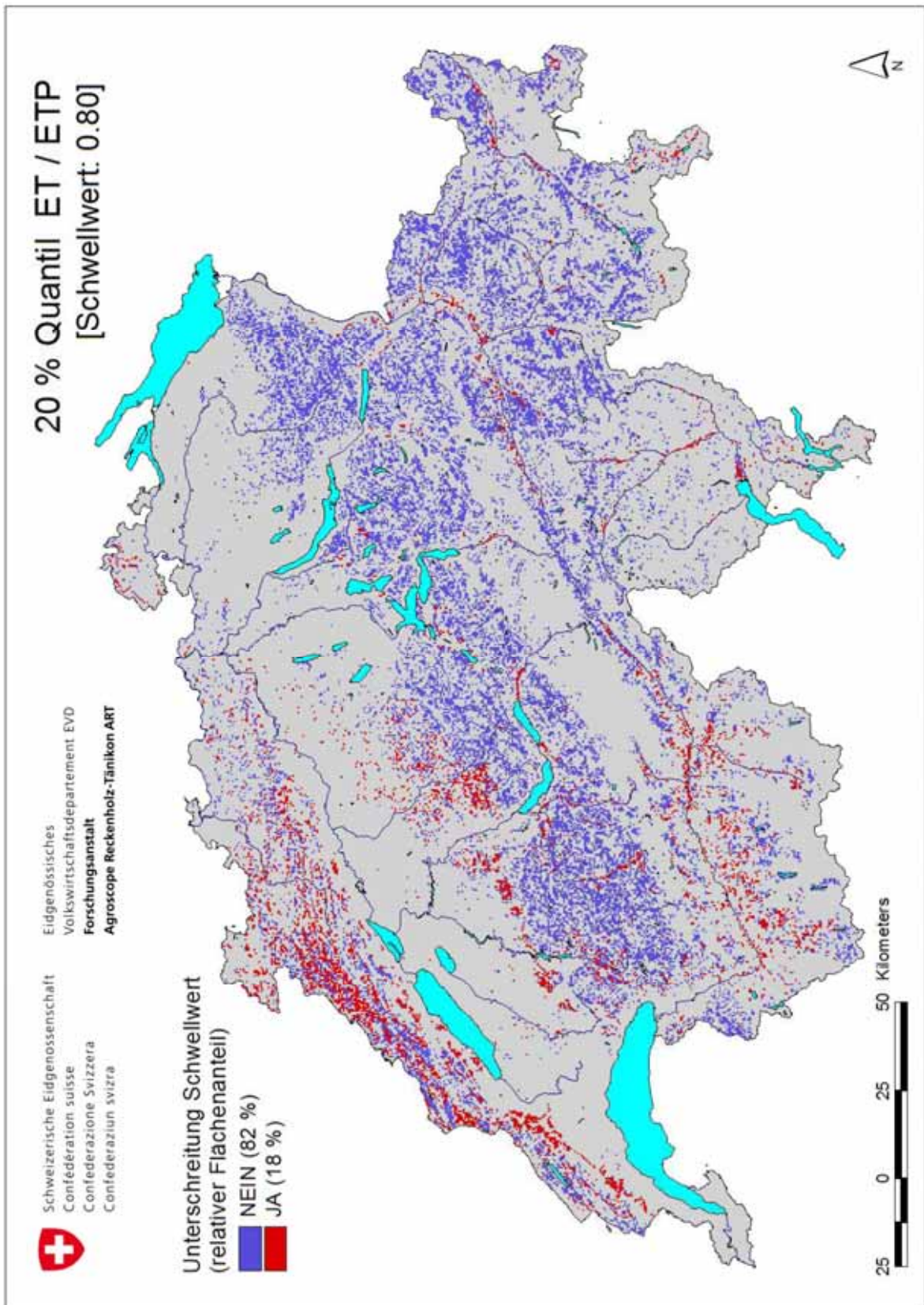


Abbildung 37: Langjähriges 20% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (=Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

E7: 25% ET/ETP Quantil für Ackerland

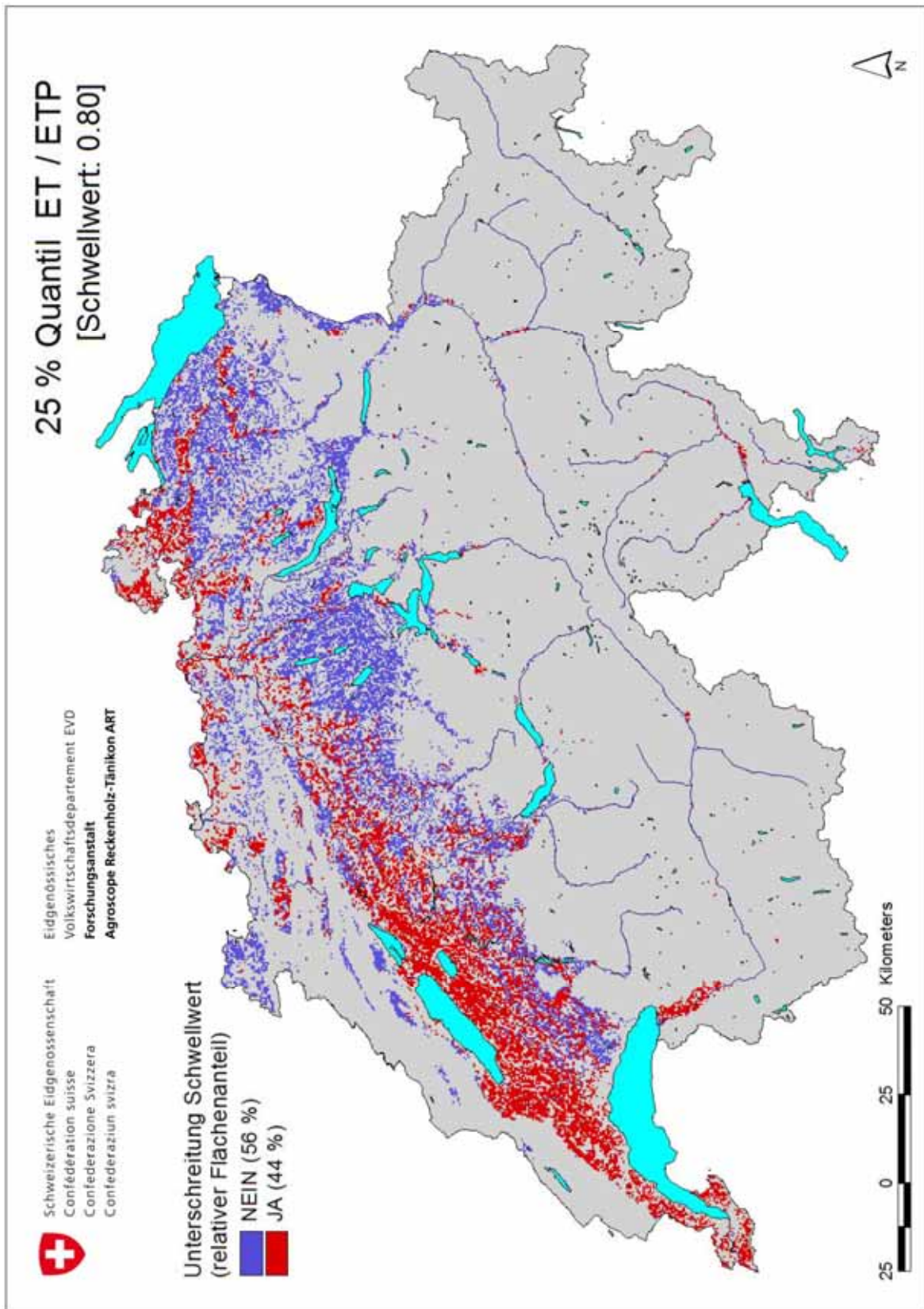


Abbildung 38: Langjähriges 25% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (=Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

E8: 25% ET/ETP Quantil für Grasland

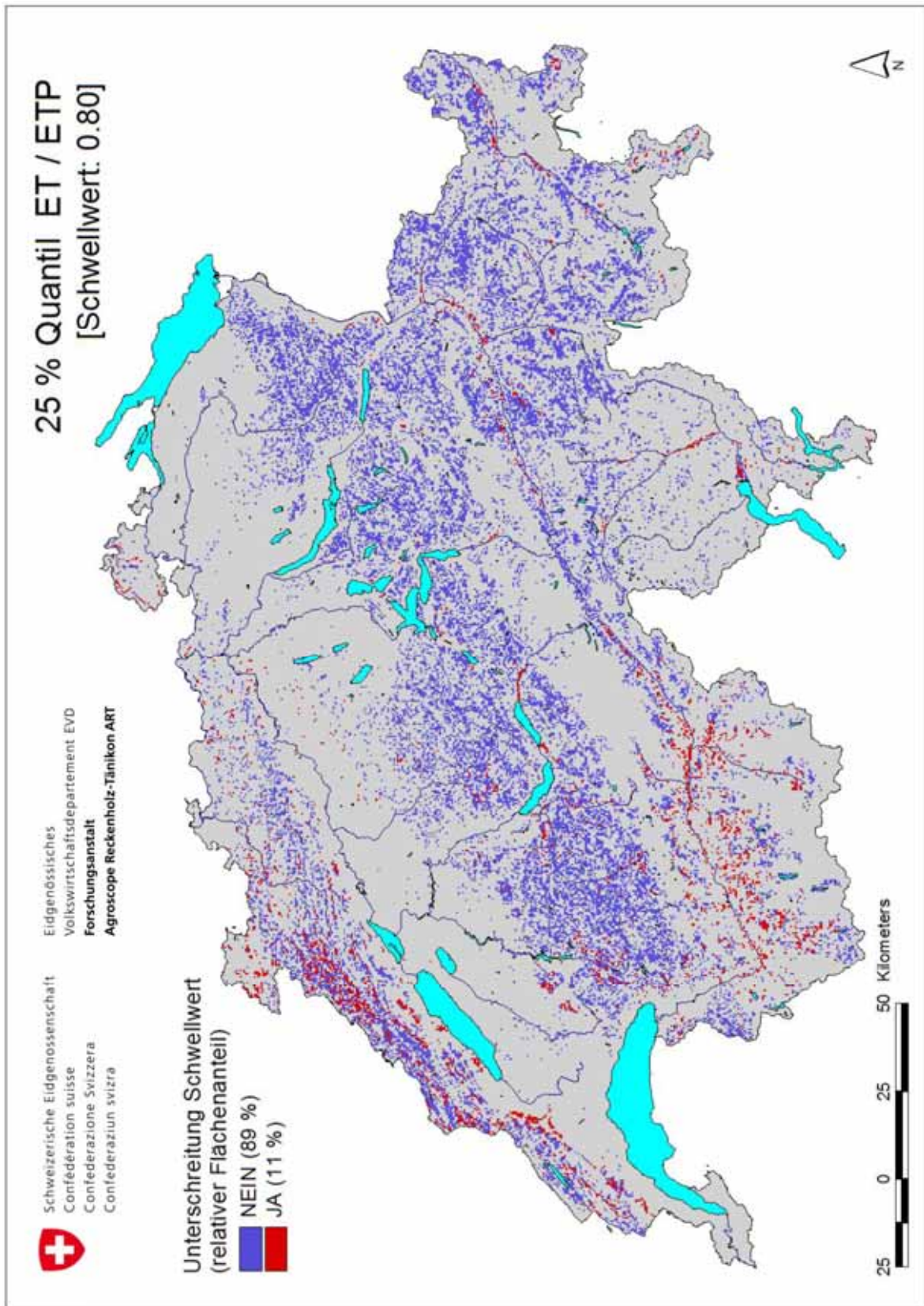


Abbildung 39: Langjähriges 25% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (=Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

E9: 33% ET/ETP Quantil für Ackerland

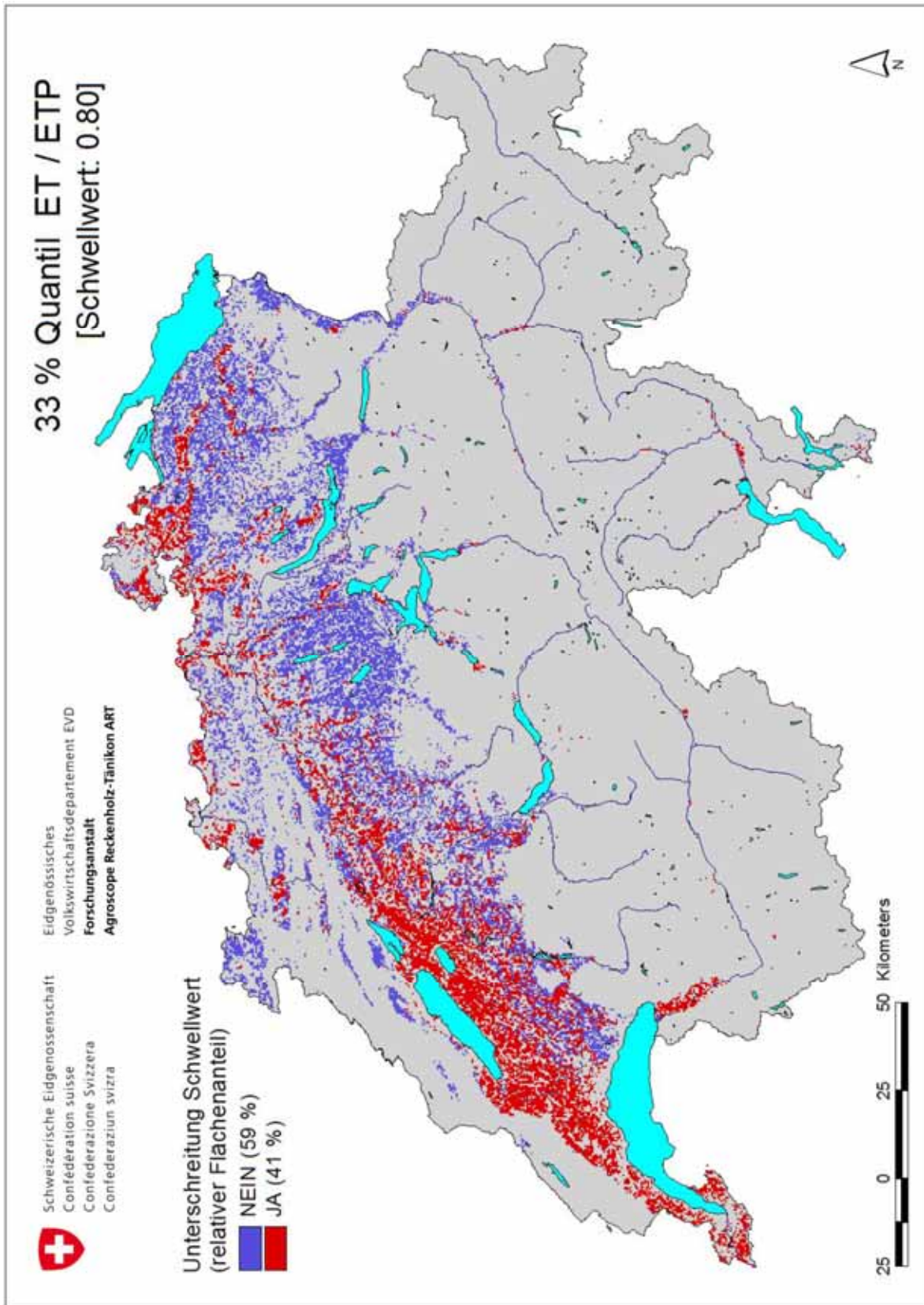


Abbildung 40: Langjähriges 33% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (=Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

E10: 33% ET/ETP Quantil für Grasland

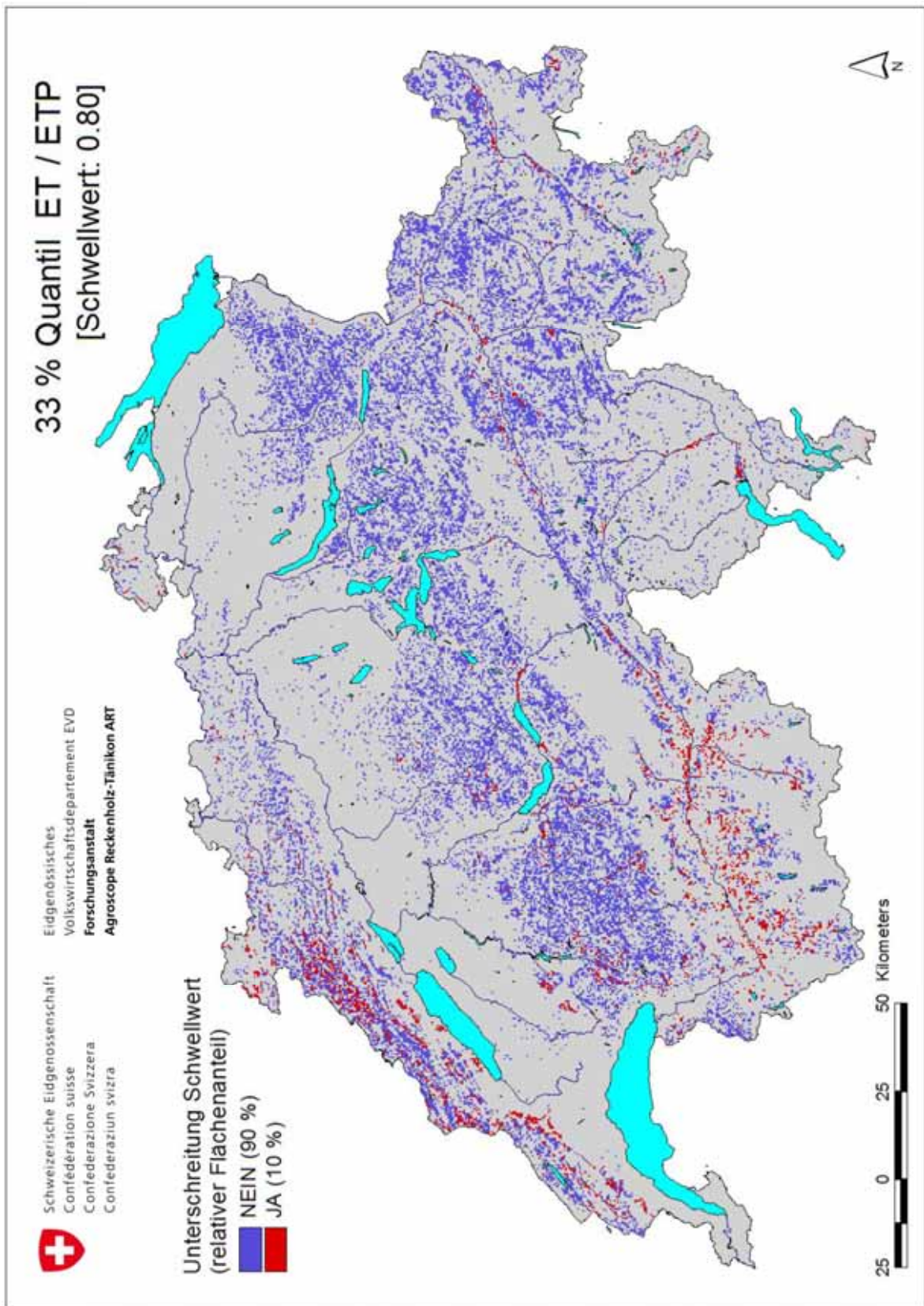


Abbildung 41: Langjähriges 33% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (=Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

E11: 50% ET/ETP Quantil für Ackerland

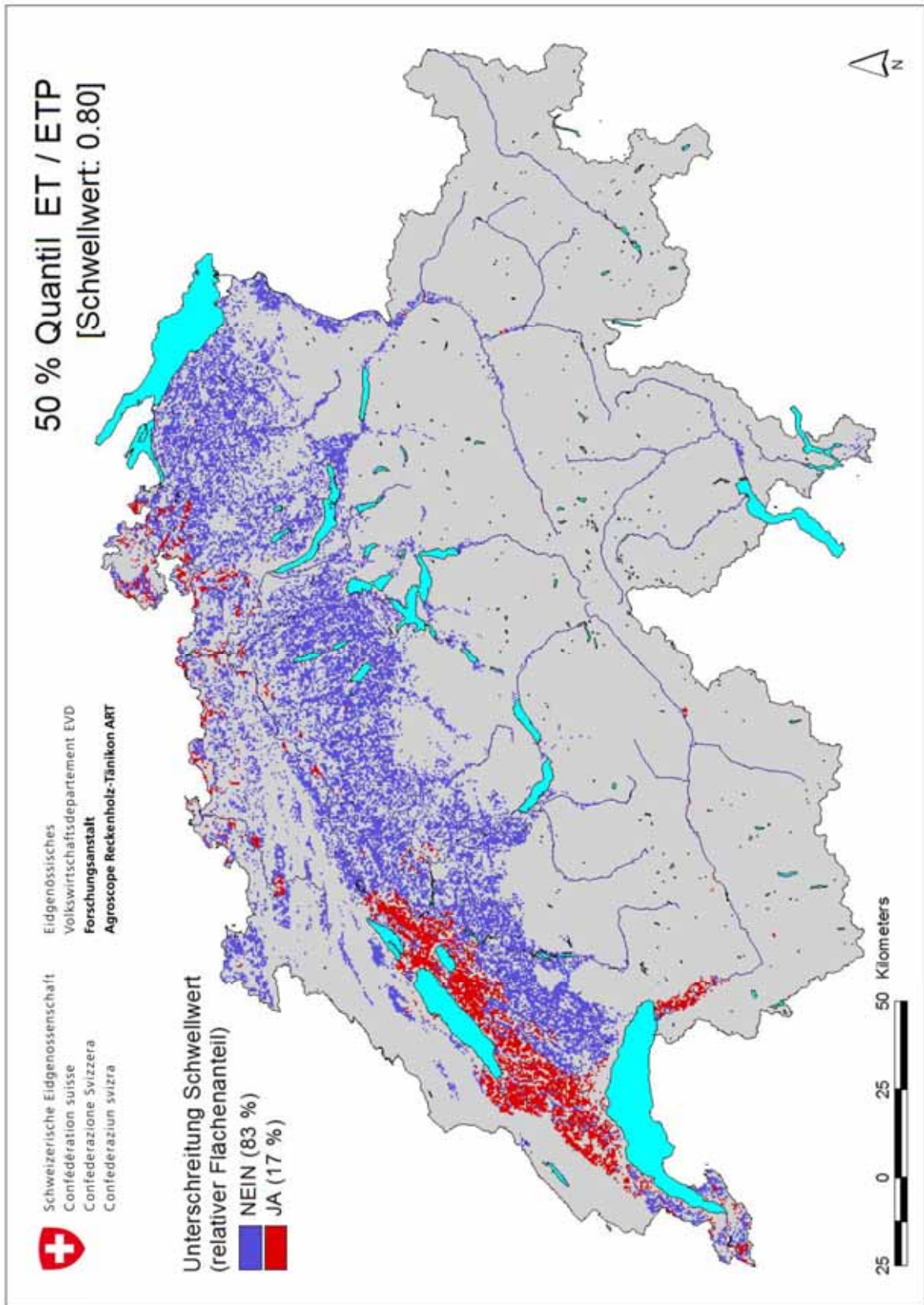


Abbildung 42: Langjähriges 50% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (=Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

E12: 50% ET/ETP Quantil für Grasland

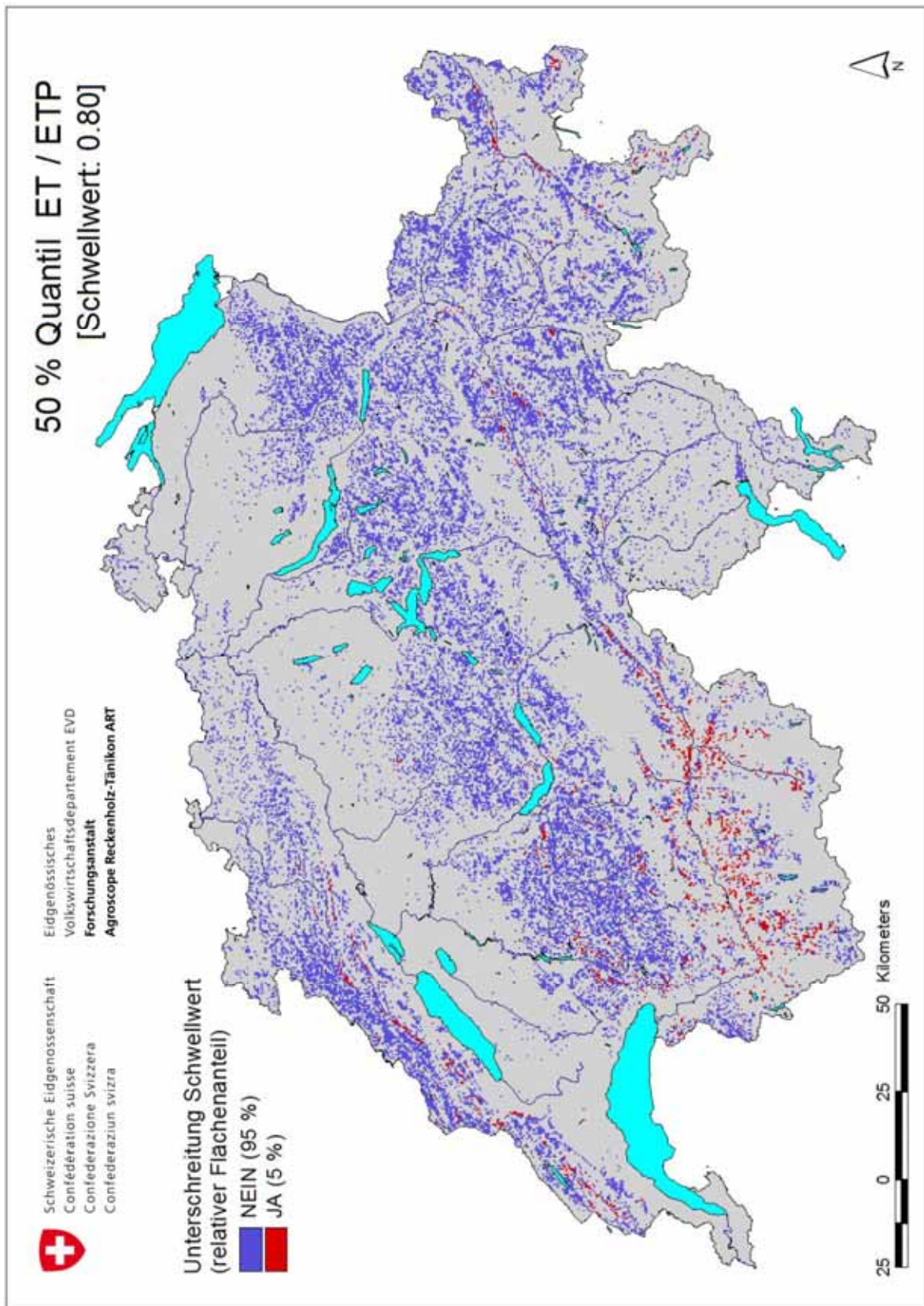


Abbildung 43: Langjähriges 50% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (=Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

E15: Maximale Länge der Trockenheitsperiode für Ackerland

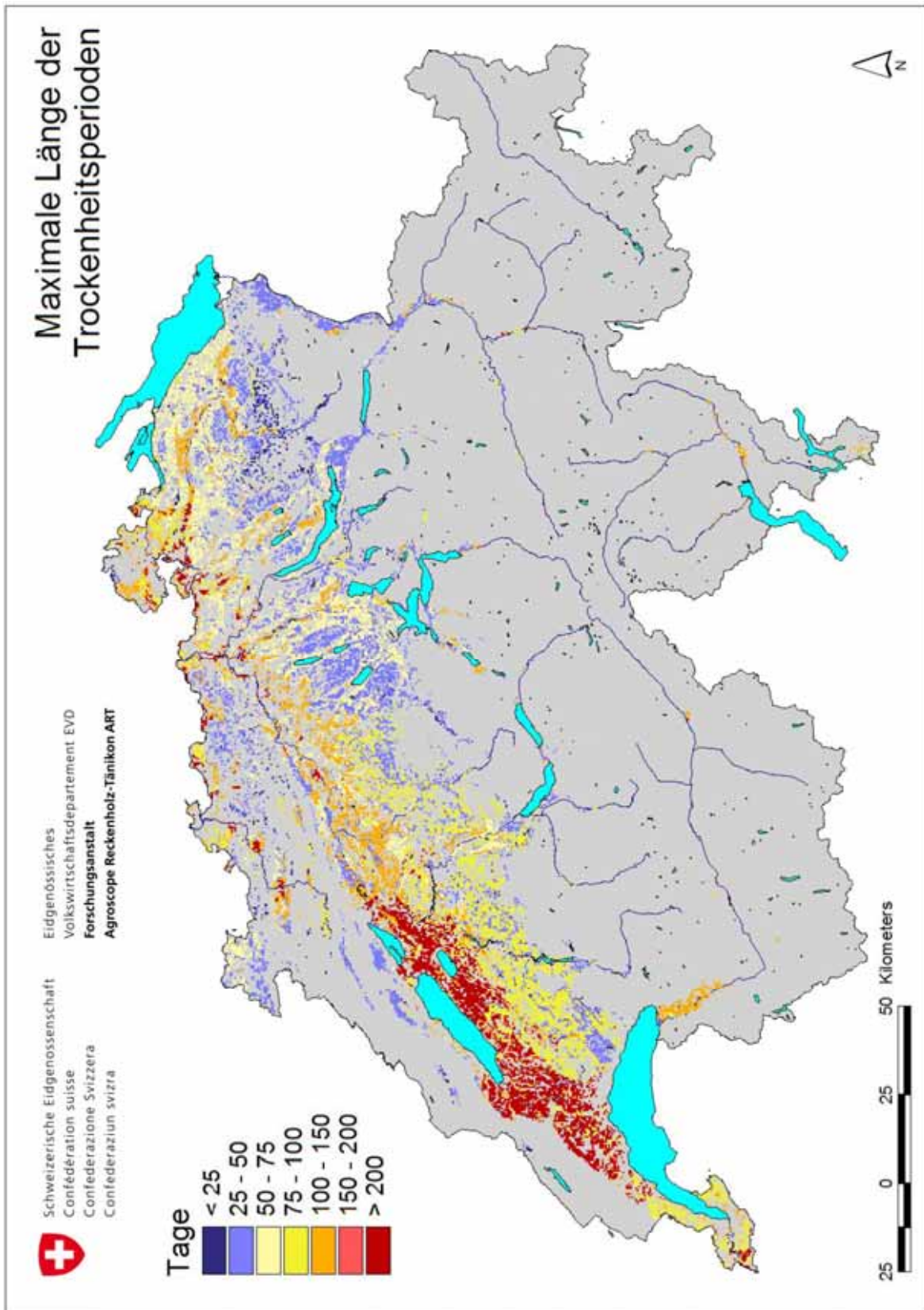


Abbildung 44: Maximale Länge der zusammenhängenden Trockenheitsperiode (ET/ETP < 0.80) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

E16: Maximale Länge der Trockenheitsperiode für Grasland

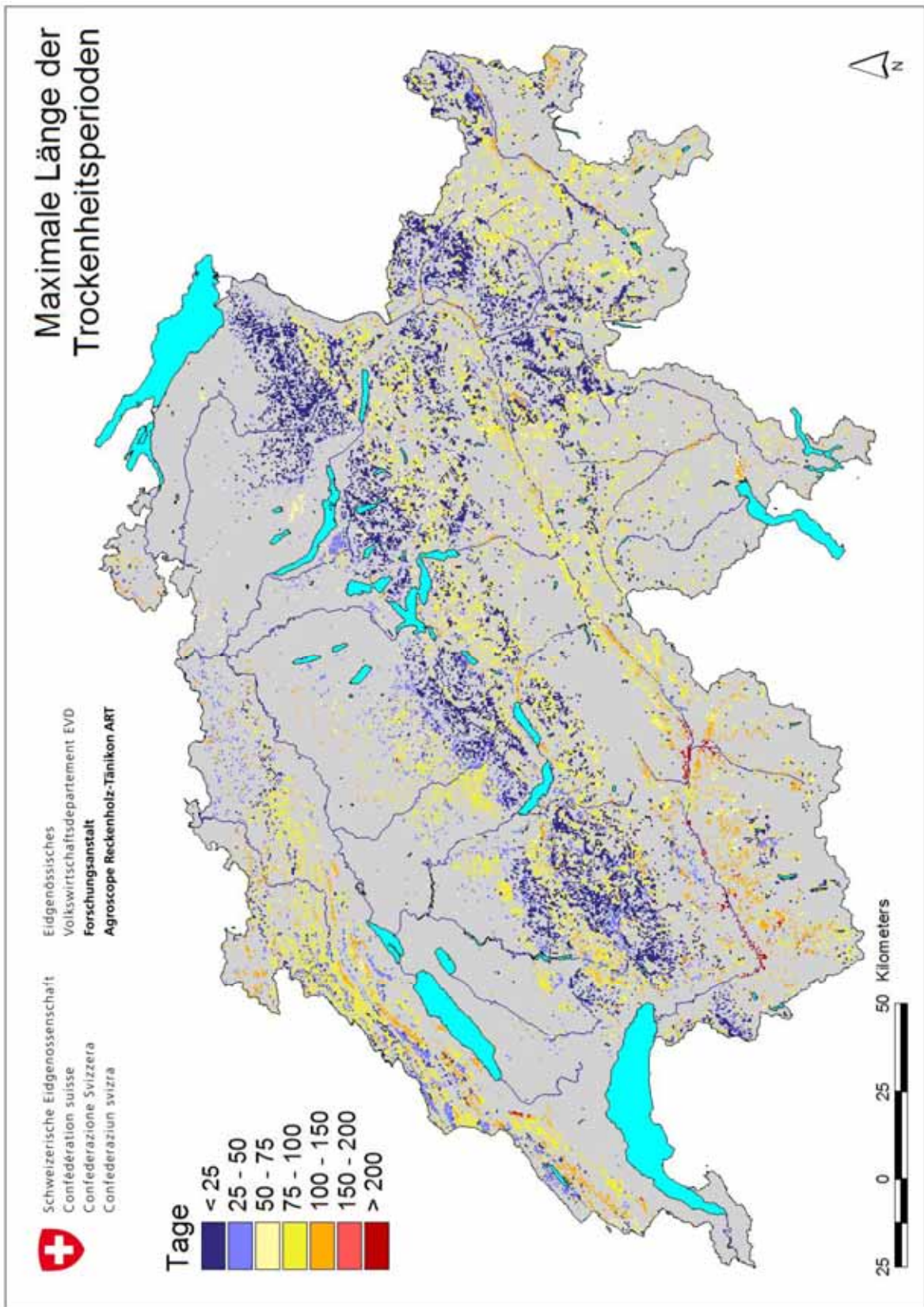


Abbildung 45: Maximale Länge der zusammenhängenden Trockenheitsperiode (ET/ETP < 0.80) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster.

F Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Kurzcharakteristik der Untersuchungsgebiete.....	10
Tabelle 2: Stationszahl für die Modellanwendungen.....	15
Tabelle 3: Abgeleitete Teileinzugsgebiete für die Thur (AE _o : oberirdische Einzugs- gebietsfläche; TG: Teilgebiet; ber.: berechnet); grau: Zwischengebiete, gelb: Kopfggebiete.....	18
Tabelle 4: Ableitung der Landnutzung „Ackerland“ nach dem MONET-Indikatorensystem..	21
Tabelle 5: Definition der Bodeneigenschaften nach BEK200 und Flächenanteile für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz.....	24
Tabelle 6: Verwendete Modellkonfiguration für die Simulation der Testgebiete	26
Tabelle 7: Kalibrierungsparameter mit Wertebereiche	28
Tabelle 8: Gebietspezifische Werte von ET/ETP für Ackerland, Grasland und landwirtschaftliche Nutzfläche insgesamt (inklusive Obstanbauflächen); Mittelwerte für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006.....	31
Tabelle 9: Zusammenhang zwischen den berechneten Werten von ET/ETP und verschiedenen Gebietsmerkmalen (Angaben jeweils bezogen auf die gesamthafte Landwirtschaftsfläche der Untersuchungsgebiete).....	33
Tabelle 10: Ausgewählte Merkmale mit Klassenbelegung für die Extrapolation von ET/ETP (mit relativen Flächenangaben jeweils bezogen auf die gesamthafte Landwirtschaftsfläche der Untersuchungsgebiete).....	33
Tabelle 11: Mittelwert und Quantile (20%, 25%, 33%, 50%) von ET/ETP für die landwirtschaftlichen Nutzflächen (inklusive Obstanbauflächen), separate Angaben für Ackerland und Grasland; Mittelwerte für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006; Quantile als relative Flächenangabe für ET/ETP<0.80	34
Tabelle 12: Gebietspezifische Werte zur Länge von Trockenheitsperioden (ET/ETP<0.80) für Ackerland, Grasland und die landwirtschaftlicher Nutzfläche insgesamt (inklusive Obstanbauflächen); Angaben in Tagen und für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006.....	39
Tabelle 13: Verwendete Abflusspegel zur Abschätzung der Modellgüte in den Untersuchungsgebieten; AE _o : oberirdische Einzugsgebietsfläche (Angaben aus BAFU [2008])	49
Tabelle 14: Reklassifizierung der Arealstatistik Schweiz 1992/97 mit Flächenangaben	51
Tabelle 15: Kartierungseinheiten (KE) der Digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz (BEK200) mit Angaben zu den ausgewiesenen bodenhydraulischen Parametern (Code-Definitionen in Tabelle 5).....	53

G Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1: Beziehung zwischen der relativen Evapotranspiration (ET/ETP) und dem relativen Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen ($Y_{\text{aktuell}}/Y_{\text{max}}$). Die Situationen A_n bis E_n repräsentieren unterschiedliche Umweltbedingungen von optimal (A_n) bis schlecht (E_n). Bis zu einem Wert für ET/ETP von 0.5 werden diese Beziehungen als linear angenommen (Raes [2000])	8
Abbildung 2: Lage der Testgebiete in der Schweiz	9
Abbildung 3: Thur-Gebiet mit Lage des Abflusspegels Andelfingen	11
Abbildung 4: Emme-Gebiet bis zum Abflusspegel Wiler	12
Abbildung 5: Broye-Gebiet bis zum Abflusspegel Payerne	12
Abbildung 6: Mittleres Rhone-Gebiet mit Lage der verwendeten Abflusspegel	13
Abbildung 7: Ticino-Gebiet bis zum Abflusspegel Bellinzona	14
Abbildung 8: Dischmabach-Gebiet bis zum Abflusspegel Davos-Kriegsmatte	15
Abbildung 9: Höhenmodell (DHM100) für das Thur-Gebiet mit Flussnetz	17
Abbildung 10: Flächenstatistik zur Verteilung der Geländehöhen im Thur-Gebiet	18
Abbildung 11: Flächenstatistik zur Höhenverteilung der Hangneigungen (HN) im Thur-Gebiet	18
Abbildung 12: Abgeleitete Teileinzugsgebiete für die Thur (gelbes Kreissymbol: virtueller Abflusspegel)	19
Abbildung 13: Flächenanteile der Hauptnutzungen in der Schweiz nach Arealstatistik 1992/97	20
Abbildung 14: Räumliche Verteilung der reklassifizierten Landnutzungen im Thur-Gebiet	21
Abbildung 15: Räumliche Verteilung der reklassifizierten Landwirtschaftsflächen in der Schweiz mit Lage der Untersuchungsgebiete	22
Abbildung 16: Bodeneigenschaften nach BEK200 mit Flächenanteilen für die landwirtschaftlichen Nutzflächen der Schweiz (Anmerkung: Flächenanteile mit Grundvernässung sind beim Speichervermögen rosa eingefärbt.)	23
Abbildung 17: Räumliche Verteilung der Durchlässigkeiten im Thur-Gebiet nach BEK200	25
Abbildung 18: Kalibrierung des Modells durch Vergleich von gemessenen und simulierten Abflüssen	30
Abbildung 19: Verifizierung des Modells durch Vergleich von gemessenen und simulierten Abflüssen	32
Abbildung 20: Räumliche Verteilung des Verhältnisses potenzielle Evapotranspiration zu Niederschlag (ETP/N) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	35
Abbildung 21: Langjährige Mittelwerte der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	35
Abbildung 22: Langjährige Quantile der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	36
Abbildung 23: Langjähriges 20% Quantil der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	36
Abbildung 24: Langjähriges 25% Quantil der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	37
Abbildung 25: Langjähriges 33% Quantil der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	37

Abbildung 26: Langjähriges 50% Quantil der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für landwirtschaftliche Nutzflächen in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	38
Abbildung 27: Mittlere Länge der zusammenhängenden Trockenheitsperiode (ET/ETP<0.80) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	39
Abbildung 28: Mittlere Länge der zusammenhängenden Trockenheitsperiode (ET/ETP<0.80) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	40
Abbildung 29: Trendanalyse zur Länge der zusammenhängenden Trockenheitsperiode (ET/ETP < 0.80) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	41
Abbildung 30: Trendanalyse zur Länge der zusammenhängenden Trockenheitsperiode (ET/ETP < 0.80) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	41
Abbildung 31: Arealstatistik Schweiz 1992/97 – Nomenklatur NOAS97: Grundkategorien und Aggregationen (BFS [2001])	50
Abbildung 32: Langjährige Quantile der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	57
Abbildung 33: Langjährige Mittelwerte der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	58
Abbildung 34: Quantile der langjährigen Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	59
Abbildung 35: Quantile der langjährigen Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	60
Abbildung 36: Langjähriges 20% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	61
Abbildung 37: Langjähriges 20% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	62
Abbildung 38: Langjähriges 25% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	63
Abbildung 39: Langjähriges 25% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	64
Abbildung 40: Langjähriges 33% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	65
Abbildung 41: Langjähriges 33% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	66

Abbildung 42: Langjähriges 50% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	67
Abbildung 43: Langjähriges 50% Quantil der Schwellwertunterschreitung der relativen Evapotranspiration (Verhältnis von aktueller zu potenzieller Evapotranspiration, ET/ETP) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	68
Abbildung 44: Maximale Länge der zusammenhängenden Trockenheitsperiode (ET/ETP<0.80) für Ackerland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	69
Abbildung 45: Maximale Länge der zusammenhängenden Trockenheitsperiode (ET/ETP<0.80) für Grasland in der Schweiz; Berechnung für die Vegetationsperioden des Zeitraumes 1980-2006 im 500 m x 500 m Raster	70