
ewz Energie · Tramstrasse 35 · 8050 Zürich
Gemeinde Bregaglia · Via ai Crott 17 · 7606 Promontogno

EZG-Management Bergell

Prognose Wasserbedarf Landwirtschaft



Dokument Nr. 2480-B-01
Datum Endfassung: 24.7.2025



AquaPlus AG · Gotthardstrasse 30 · CH-6300 Zug
Fon +41 41 729 30 00 · Fax +41 41 729 30 01
admin@aquaplus.ch · www.aquaplus.ch

Impressum

Auftraggeber: ewz Energie
Tramstrasse 35 · 8050 Zürich
Gemeinde Bregaglia
Via ai Crott 17 · 7606 Promontogno

Auftragnehmer: AquaPlus AG
Gotthardstrasse 30 · 6300 Zug

Projektleitung: Mathieu Camenzind

Bearbeitung: Timo Wicki

Zitervorschlag: AQUAPLUS 2025. EZG-Management Bergell. Prognose Wasserbedarf Landwirtschaft. 57 S.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Auftrag	1
1.2 Grundlagen	2
2 Methodik und Grundlagen Klima	3
2.1 Referenzklima	3
2.2 Zukunftsszenarien	3
3 Methodik und Grundlagen Wasserdargebot	5
3.1 Oberflächengewässer	5
3.2 Grundwasser / Quellen	7
3.3 Alpen	9
4 Methodik und Grundlagen Wasserbedarf	10
4.1 Wasserkraft	10
4.2 Landwirtschaftsflächen	11
4.3 Landwirtschaftsbetriebe inkl. Alpen (ohne Bewässerung)	19
5 Resultate Klima	22
6 Resultate Wasserdargebot	26
6.1 Oberflächengewässer	26
6.2 Grundwasser / Quellen	28
7 Resultate Wasserbedarf	30
7.1 Evapotranspiration	30
7.2 Bewässerungsbedarf Kulturen	30
7.3 Bewässerungsbedarf Landwirtschaftsflächen Bergell	35
7.4 Vieh Talboden	43
7.5 Alpen	44
8 Mögliche Massnahmen	49
8.1 Massnahmen Landwirtschaftsflächen (Talboden)	49
8.2 Massnahmen Alpbetriebe	53
9 Fazit	55
10 Literaturverzeichnis	56

ANHANG

ANHANG A: Bodeneignungskarte Schweiz

ANHANG B: Referenz-Evapotranspiration

ANHANG C: Plausibilisierung Referenzklima

ANHANG D: Einfluss der Kultur und des Bodens

ANHANG E: Bewässerungsbedarf Kulturen

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Auftrag

Im Einzugsgebiet der Maira (ital. Mera) in der Gemeinde Bergell (ital. Bregaglia) betreibt das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz) seit 1960 verschiedene Kraftwerksanlagen mit Wasserrechten bis 2039. Ewz ist gewillt, diese Wasserrechte zu erneuern und plant deshalb die Rekonzessionierung der Bergeller Kraftwerke.

Zurzeit sind keine Konflikte zwischen dem Wasserdargebot und der Nutzung durch ewz sowie anderen Nutzungen (konsumtiv und nicht konsumtiv) bekannt. Im Hinblick auf die fortschreitende Klimakrise und mögliche Änderungen in der landwirtschaftlichen Landnutzung sind potenzielle zukünftige Konflikte bezüglich der Verfügbarkeit von Wasserressourcen zu identifizieren. Die Trinkwasserversorgung der Gemeinde Bergell wird heute und in Zukunft durch Quellen und den Silsersee sichergestellt. Die landwirtschaftlichen Flächen werden heute vorwiegend als Dauerwiesen und -weiden, nur vereinzelt im Talboden als Kunstwiesen sowie als Äcker mit Gerste, Weizen, Kartoffeln und Mais genutzt. Im Rahmen dieses Auftrages soll eine Übersicht über das derzeitige und zukünftige Wasserdargebot erstellt und der zukünftige Wasserbedarf für die landwirtschaftliche Nutzung abgeschätzt werden. Der Einfluss der Klimakrise auf die Alpbetriebe und die Sömmerung soll ebenfalls beurteilt werden.

Auf eine detaillierte Beschreibung der aktuellen und zukünftigen Kraftwerksnutzung wird in diesem Bericht verzichtet, da dies im Projekt "Rekonzessionierung Bergeller Kraftwerke (ReKo Bergell)" umfassend behandelt wird. Die Ergebnisse der hier durchgeführten Analyse werden bei der Rekonzessionierung der Kraftwerke berücksichtigt.

Die Organisation und die für die Entwicklung des Projekts verantwortlichen Personen sind nachstehend aufgeführt.

Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (ewz)

Funktion: Auftraggeber
Adresse: Tramstrasse 35, 8050 Zürich, +41 58 319 41 11
Projektleitung: Susanne Haag Jaggi, Projektleiterin Umwelt

Gemeinde Bregaglia

Funktion: Auftraggeber
Adresse: Via ai Crott 17, 7606 Promontogno, +41 81 822 60 60
Projektleitung: Ueli Weber, Vizegemeindepräsident

Aqua Plus AG

Funktion: Projektumsetzung
Adresse: Gotthardstrasse 30, 6300 Zug, +41 41 729 30 00
Projektleitung: Mathieu Camenzind, MSc Biologie Uni Zürich
Projektbearbeitung: Timo Wicki, MSc. Umweltingenieur ETHZ

1.2 Grundlagen

Die Analyse basiert im Wesentlichen auf den folgenden fachlichen Grundlagen:

- Bericht "Bestimmung von Regionen mit Handlungsbedarf bei Trockenheit" (Hunziker Betatech, 2016)
- Bericht "Berechnung der Bewässerungsbedürfnisse unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen in der Schweiz" (Eisenring, Holzkämper & Calanca, 2021)
- CH2018 Klimaszenarien (CH2018, 2018) des Nationalen Zentrums für Klimadienstleistungen (NCCS).
- Bericht "Grundlagen für die Abschätzung des Bewässerungsbedarfs im Kanton Basel-Landschaft" (Fuhrer & Smith, 2015)
- Projektarbeit "Ermittlung der Bewässerungsbedürftigkeit landwirtschaftlicher Nutzflächen im Kanton Graubünden." (Göpfert, 2007)
- Bericht Forschungsprojekt Agroscope AgriMontana, Wiesenbewässerung im Berggebiet (Marbot, Schneider & Flury, 2013)
- Merkblatt "Massnahmen zur Wasserversorgung auf den Alpen" (Prométere, Montanum, Société vaudoise d'économie alpestre, 2024)
- Fact Sheet "Umgang mit zunehmender Wasserknappheit in der Berglandwirtschaft" (Schweizerische Arbeitsgemeinschaft für die Berggebiete, 2023)

Die wichtigsten ortsspezifischen Grundlagen, auf die sich der Bericht stützt, sind im Folgenden aufgeführt:

- Projekt Bondea - Umweltverträglichkeitsbericht (UVB) 1. Stufe: Bericht "Hydrologische Untersuchungen für die Wasserkraftfassungen im Bergell".
- Bericht "Voruntersuchung / Pflichtenheft Rekonzessionierung Bergeller Kraftwerke" (ecowert, 2023)
- Fachbericht "Bergeller Kraftwerke - Hydrologische Untersuchungen im Bergell. Zuflüsse Wasserfassungen und Plausibilisierung KW-Daten 2012 – 2018" (ecowert, 2020)
- Fachbericht "Bergeller Kraftwerke - Hydrologische Untersuchungen im Bergell - Zuflüsse Wasserfassungen und Plausibilisierung KW-Daten 2012 – 2023" (ecowert, 2023)
- Klimastudie zum Wasserkraftportfolio des EWZ - Abflusszenarien für 2035, 2060 und 2085 (WSL 2021)

2 Methodik und Grundlagen Klima

2.1 Referenzklima

Messstationen

Im Bergell wird das Klima an der MetoSchweiz-Station Vicosoprano gemessen. Automatische und lückenlose Messungen aller relevanten Klimaparameter (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, Globalstrahlung und Niederschlag) liegen an dieser Station jedoch erst seit 2013 vor. Aufgrund dieser kurzen Messzeitreihe werden die Daten der Messstation nur zu Plausibilisierungszwecken herangezogen: Zum einen zur Überprüfung der verwendeten Klimamodelle CH-2018 (Anhang C) und zum anderen zum Vergleich von Methoden zur Berechnung der Evapotranspiration (Anhang B).

Klimamodelle CH-2018

Ein Vergleich mit den Klimamodellen des Datensatzes CH-2018 zeigt, dass die Modellwerte für den Zeitraum 2013 bis 2023 gut mit den Messungen übereinstimmen (vgl. Anhang C). Es gibt gewisse Abweichungen in der Verteilung der Niederschläge über das Jahr. Diese sind vermutlich auf die statistisch kurze Messreihe zurückzuführen. Für das Referenzklima (Ist-Klima), mit dem die Zukunftsszenarien verglichen werden, werden daher die Daten von CH-2018 verwendet (CH2018, 2018). Als Referenzperiode werden die Jahre 1981 bis 2010 definiert.

2.2 Zukunftsszenarien

Klimamodelle CH-2018

Für den Vergleich des aktuellen Klimas mit Zukunftsszenarien wird der von MetoSchweiz zur Verfügung gestellte Datensatz CH-2018 verwendet (CH2018, 2018; Feigenwinter et al. 2018). Aus dem Datensatz CH-2018 'DAILY-LOCAL' (Stationsdaten) werden die Niederschlagsdaten für den Standort 'Soglio' verwendet. Die restlichen Klimaparameter sind für diese Station nicht verfügbar. Aus diesem Grund werden die Klimaparameter Temperatur (mittlere, maximale und minimale Tagestemperatur) aus dem CH-2018-Rasterdatensatz "DAILY-GRIDDED" extrahiert. Dazu wird die Zeitreihe aus der 2 km x 2 km Rasterzelle im untersten Teil des Bergells an der Grenze zu Italien extrahiert. Diese Temperaturwerte stimmen für die Zeitperiode 2013-2023 gut mit den Messwerten der Messstation Vicosoprano überein (vgl. Anhang C). Der Parameter Globalstrahlung wird vom Datensatz 'DAILY-LOCAL' von der Station Samedan (SAM) verwendet. Auch diese Werte stimmen für die Periode 2013-2023 gut mit den Messwerten der Station Vicosoprano überein (vgl. Anhang C). Die so extrahierten Daten werden für ein gegebenes Klimamodell (Klimakette) jeweils zu einem neuen Datensatz zusammengefügt. Die Datensätze enthalten Tageswerte von 1981 bis 2099. In der vorliegende Untersuchung werden folgende Zeithorizonte miteinander verglichen:

Zeitperiode	Bezeichnung
1981 - 2010	Referenz
2020 - 2049	Anfang des Jahrhunderts
2045 - 2074	Mitte des Jahrhunderts
2070 - 2099	Ende des Jahrhunderts

Für zukünftige Perioden werden die folgenden zwei Emissionspfade betrachtet:

Emissionspfad	Beschreibung
RCP 4.5 (bzw. RCP45)	Mittlerer Klimaschutz
RCP 8.5 (bzw. RCP85)	Kein expliziter Klimaschutz

Und für jeden Emissionspfad werden drei Klimamodellketten berücksichtigt. Diese wurden in Anlehnung an die Auswahl gemäss der Methode von Sikorska-Senoner et al. (2024) für den Anwendungsfall "Trockenheit" und die Region "Alpen" ausgewählt. Die Methode schlägt für jedes Terzil eine Liste mit geeigneten Modellketten vor. Diese sind nach ihrer Eignung zur Abbildung des jeweiligen Terzils geordnet. Aus diesen Vorschlägen wurden folgende passende Modellketten ausgewählt:

Klimamodelkette	Beschreibung
SMHI-RCA_CCCMA_EUR44	oberes Terzil
KNMI-RACMO_HADGEM_EUR44	mittleres Terzil
KNMI-RACMO_ECEARTH_EUR44	unteres Terzil

Die Berechnung der Evapotranspiration und des Bewässerungsbedarfs erfolgt auf Tagesbasis. Aus Gründen der Interpretation werden die Ergebnisse jeweils auf Monatsbasis aggregiert.

Gletscherentwicklung

Die zukünftige Entwicklung der Gletscherausdehnung wird auf Basis des im Hydrologischen Atlas der Schweiz bereitgestellten Datensatzes "Gletscherentwicklung bis 2100" analysiert (CH2018, 2018; Zekollari et al., 2021).

3 Methodik und Grundlagen Wasserdargebot

3.1 Oberflächengewässer

Einzugsgebiete	Die Hydrologie im Bergell ist stark durch die Wasserkraftnutzung geprägt. Abbildung 3.1 gibt einen Überblick über die bestehenden Kraftwerksanlagen, Teileinzugsgebiete und Abflussmessstellen. Die Darstellung stammt aus dem Fachbericht "Bergeller Kraftwerke - Hydrologische Untersuchungen im Bergell" (ecowert, 2023).
Aktuelle Hydrologie	Für das Bergell inklusive der einzelnen Teileinzugsgebiete liegen gute hydrologische Grundlagendaten vor, die unter anderem im oben erwähnten Bericht zu finden sind. In Tabelle 3.1 sind die mittleren Jahresabflüsse für verschiedene Messstellen aufgeführt, was einen Eindruck über die Ergiebigkeit der Teileinzugsgebiete vermittelt. Für detailliertere Informationen, wie z.B. den Jahresgang der Abflüsse in den einzelnen Teileinzugsgebieten, wird auf die oben genannten Berichte von ecowert verwiesen.
Zukunftsszenarien	Für den Vergleich der aktuellen Hydrologie mit Zukunftsszenarien wird der vom hydrologischen Atlas der Schweiz zur Verfügung gestellte Datensatz Hydro-CH2018 verwendet (Freudiger et al., 2021). Es wird die Veränderung des jährlichen und monatlichen Abflusses des Einzugsgebietes der Maira für die unterschiedlichen Zeiträume (Referenz, Anfang, Mitte und Ende des Jahrhunderts) und Emissionspfade (RCP 4.5, RCP 8.5) untersucht. Zusätzlich werden die Ergebnisse der WSL-Klimastudie (WSL, 2021), in der hydrologische Modellrechnungen auf Basis des Klimamodells CH2018 durchgeführt wurden, als Beurteilungsgrundlage verwendet.

Tab. 3.1: Mittlerer jährlicher Abfluss an den verschiedenen Messstellen. Die Daten wurden aus dem Bericht "Bergeller Kraftwerke - Hydrologische Untersuchungen im Bergell" (ecowert, 2023) entnommen.

Messstelle (Periode)	Jahresmittelabfluss (l/s) ca.	Jahresmenge (Mio. m ³) ca.
Maira Soglio (LHG) (2012-2021)	4'356	137
Murettobach, WF (2016-2021)	183	6
Orlegna, WF Plancanin (2013-2021)	1'860	59
Maira, WF Maroz Dora (2016-2021)	999	31
Maira Löbbia nat. (2014-2018)	3'979	125
Maira Löbbia Ist. (2014-2021)	2'280	72
Albigna Stausee, WF (2012-2021)	1'497	47
Bondesca, WF Prä (2015-2016)	1'240	39

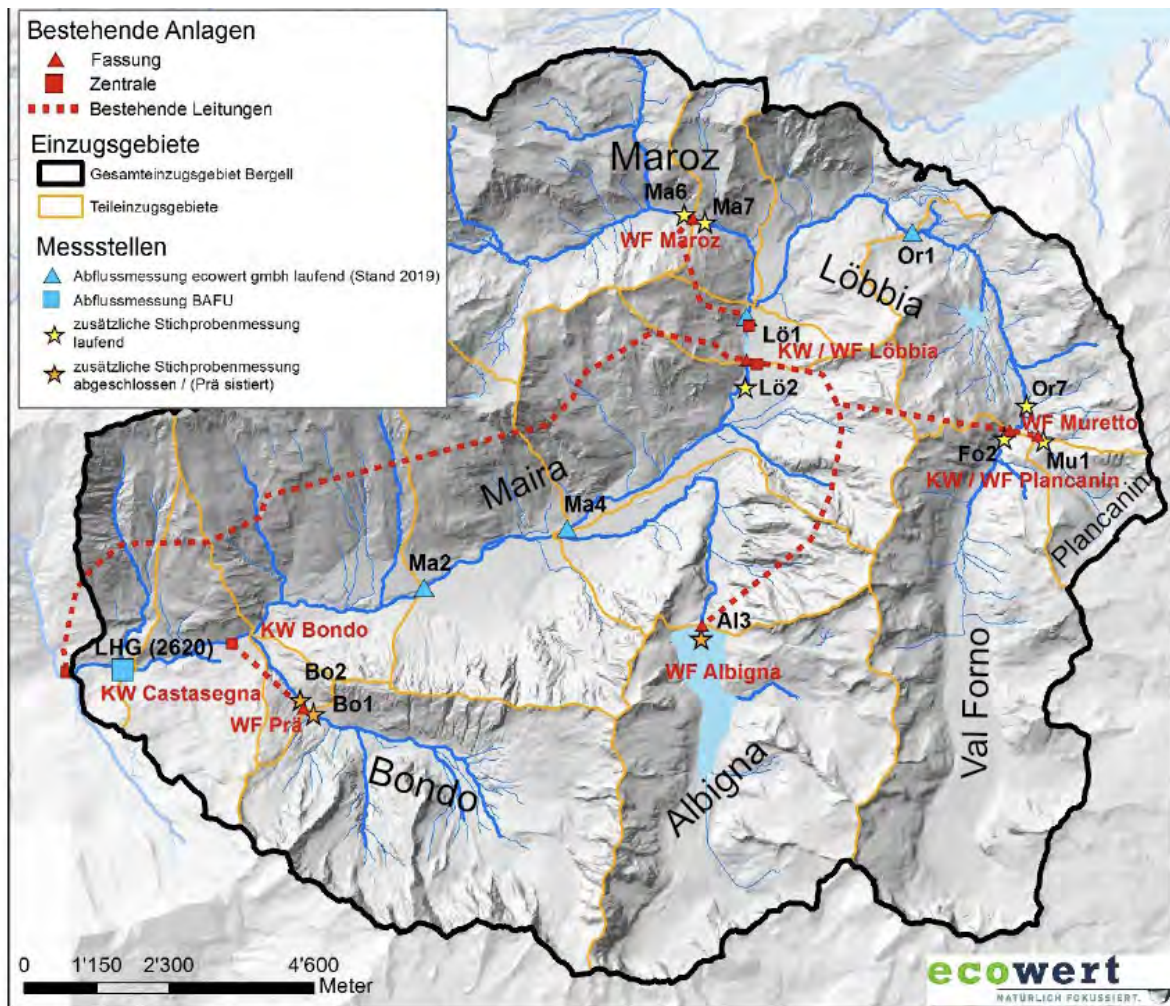


Abb. 3.1: Übersicht der Teileinzugsgebiete und Abflussmessstellen. Die Aufteilung in die Teileinzugsgebiete erfolgte im Rahmen des Projektes "Bondea UVB 1. Stufe" (2013) und wurden im Projekt "Bergeller Kraftwerke - Hydrologische Untersuchungen im Bergell" (ecowert, 2023) angepasst. Die Karte zeigt ausserdem die aktuellen Wasserfassungen von ewz .

3.2 Grundwasser / Quellen

Grundwasservorkommen	Abbildung 3.2 zeigt die aktuell gefassten und ungefasste Quellen sowie Gewässerschutzbereiche gemäss Gewässerschutzkarte. Die Karte wurde dem Bericht "Rekonzessionierung Bergeller Kraftwerke - UVB 1. Stufe - Voruntersuchung / Pflichtenheft" (2023) entnommen. Das Grundwasservorkommen im Bergell ist eng mit den geologischen und hydrologischen Gegebenheiten des Gebiets verknüpft. Ergiebige Grundwasservorkommen sind nur entlang der grösseren Talflüsse zu erwarten.
Nutzung und Ergiebigkeit	Die Karte in Abbildung 3.2 zeigt, dass das Trinkwasser im Bergell ausschliesslich aus gefassten Quellen gewonnen wird. Es gibt keine Grundwassernutzung aus alluvialen Grundwasservorkommen. In Tabelle 3.2 sind die Schüttungsmengen und Speichervolumina der bestehenden Quellfassungen auf der Grundlage von Zähl-daten für die Jahre 2022-2024 zusammengestellt. In der Tabelle sind auch die tatsächlich gebrauchten Mengen sowie die Überlaufmengen aufgeführt.
Zukünftige Ergiebigkeit	Die zukünftige Ergiebigkeit der Grundwasserleiter im Bergell ist aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser schwer vorherzusagen. Veränderungen des Oberflächenabflusses können sich auf die Grundwasserstände und damit auf die Ergiebigkeit von Grundwasserleitern und Quellen auswirken. Die Bewertung der Grundwasseränderung durch den Klimawandel beschränkt sich daher auf eine gutachterliche Abschätzung auf der Basis von Niederschlagsveränderungen, Gletscherschwund und Abflussveränderungen der Oberflächengewässer.

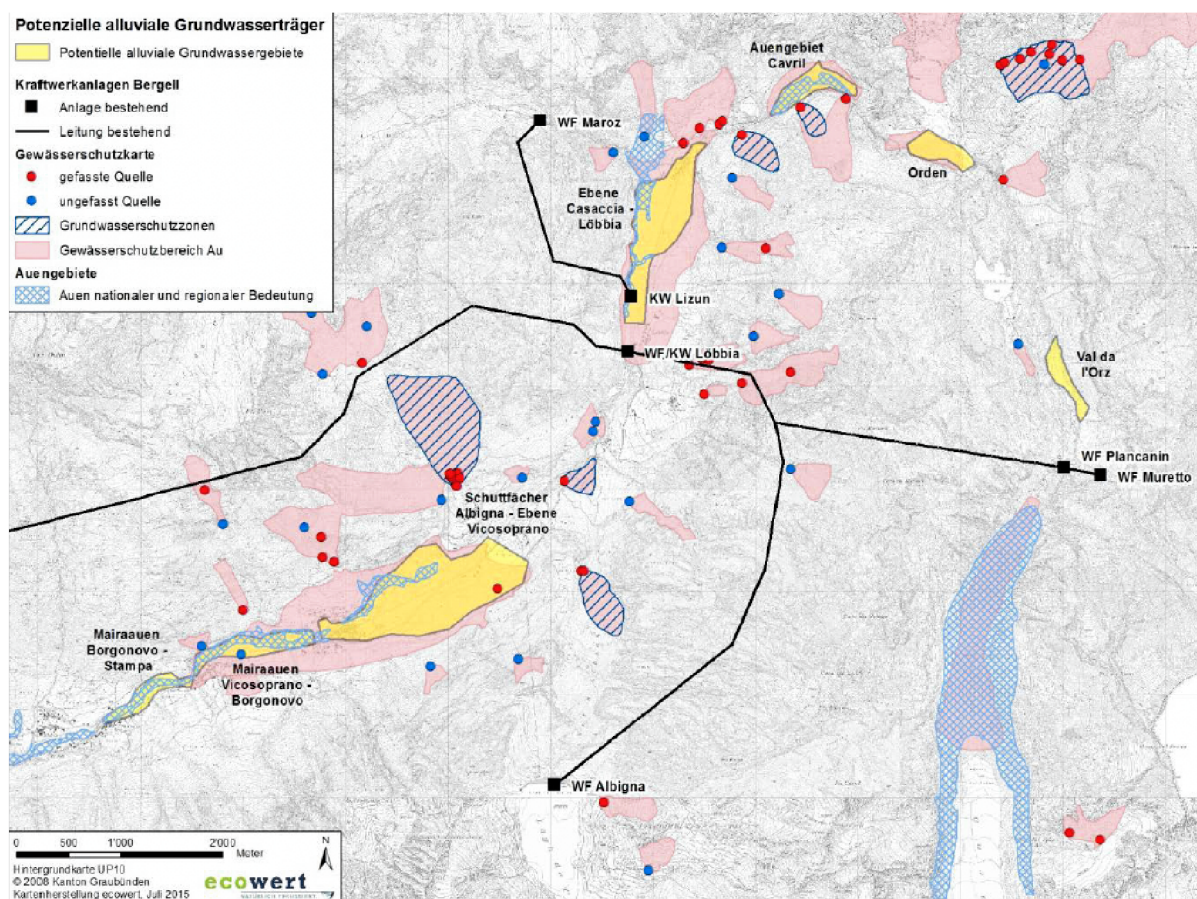


Abb. 3.2: Gefasste und ungefasste Quellen sowie Gewässerschutzbereiche gemäss Gewässerschutzkarte und Auengebiete gemäss Natur- und Landschaftsschutzinventar (Stand Januar 2016). Die Karte wurde dem Bericht "Rekonzessionierung Bergeller Kraftwerke - UVB 1. Stufe - Voruntersuchung / Pflichtenheft" (2023) entnommen.

Tab. 3.2: Schüttungsmengen und Speichervolumen der bestehenden Quellwasserfassungen im Bergell. Die Daten wurden von der Gemeinde Bergell zur Verfügung gestellt (12.2024) und basieren auf Messungen aus den Jahren 2022-2024. Wobei BR=Brauchreserve und LR=Löschreserve.

Wasserfassung	Fördermenge (m ³ /a)	Verbrauch (m ³ /a)	Überlauf (nicht gebraucht)	Reservoir (m ³)
Isola	ca. 40'000 - 140'000 m ³ /a	ca. 20'000 m ³ /a	ca. 20'000 - 120'000 m ³ /a	BR: 30, LR: 50
Maloja (Quellen)	ca. 70'000 - 250'000 m ³ /a	ca. 100'000 m ³ /a	ca. 160'000 m ³ /a	La Palza: BR: 80, LR: 220
Maloja (See)	ca. 5'000 - 30'000 m ³ /a	ca. 5'000 m ³ /a	-	Reinwasserbecken: BR: 35
Casaccia	ca. 50'000 - 160'000 m ³ /a	ca. 20'000 - 60'000 m ³ /a	ca. 30'000 - 100'000 m ³ /a	BR: 15, LR: 85
Löbbia	ca. 200'000 m ³ /a	ca. 40'000 m ³ /a	ca. 160'000 m ³ /a	BR: 25, LR: 25
Ca d'Faret	ca. 100'000 m ³ /a	ca. 20'000 m ³ /a	ca. 60'000 m ³ /a	BR: 60
Vicosoprano	ca. 1.5 - 2.5 Mio. m ³ /a	ca. 600'000 m ³ /a	ca. 1-2 Mio. m ³ /a	Reservoir Not Fob: BR: 15 Reservoir Albigna: BR: 23 Reservoir Pranzaria: BR: 15 Reservoir Camplungh: BR: 50, LR: 150 Reservoir Montaccio: BR: 100, LR: 200
Bondo	ca. 1 Mio. m ³ /a	ca. 200'000 m ³ /a	ca. 800'000 m ³ /a turbiniert	Reservoir Prä: BR: 50
Soglio	ca. 900'000 m ³ /a	ca. 50'000 m ³ /a	ca. 850'000 m ³ /a davon ca. 400'000 m ³ /a turbiniert	Reservoir Clüs: BR: 30, LR: 170 Reservoir Tublà Nov: BR: 170 Reservoir Flin: BR: 50, LR: 160
Castasegna	ca. 500'000 m ³ /a	ca. 100'000 m ³ /a	ca. 400'000 m ³ /a	Reservoir Brentan: BR: 150, LR: 150
Total	ca. 4.5 - 6 Mio. m³/a	ca. 1.2 Mio m³/a	ca. 3.5 - 4.5 Mio m³/a	

3.3 Alpen

Für die Wasserbilanz der gesamten Gemeinde sind die Alpbetriebe vernachlässigbar. Die Veränderung des Dargebots von Quellen und Oberflächengewässer kann für die einzelnen Alpbetrieben jedoch von grosser Bedeutung sein. Aus diesem Grund wird die Situation der Alpbetriebe vertieft analysiert.

Ist-Situation

Eine genaue hydrologische Modellrechnung für die Alpbetriebe würde den Rahmen des Projekts sprengen. Deshalb stützt sich die Analyse vor allem auf Befragungen der Landwirte. Ziel ist es, Betriebe zu identifizieren, in denen Wasser bereits heute knapp ist.

Zukünftige Situation

Auch bei der Beurteilung der künftigen Situation bezüglich der Wasserverfügbarkeit werden die Einschätzungen der Landwirte berücksichtigt. Zudem erfolgt eine qualitative Beurteilung des Einflusses der abnehmenden Schneeschmelze und Gletscher. Die Analyse ermöglicht es, Alpbetriebe zu erkennen, bei denen bei zunehmender Trockenheit voraussichtlich zuerst Massnahmen im Wassermanagement erforderlich werden.

4 Methodik und Grundlagen Wasserbedarf

4.1 Wasserkraft

Wie im Kapitel Einleitung erläutert, wird auf eine detaillierte Beschreibung der aktuellen und künftigen Kraftwerksnutzung verzichtet, da dies bereits im Projekt "Rekonzessionierung Bergeller Kraftwerke" umfassend behandelt wird. Wichtige Informationen sind unter anderem im Fachbericht "Voruntersuchung / Pflichtenheft Rekonzessionierung Bergeller Kraftwerke" (ecowert, 2023) zu finden. Unter anderem ist darin ein hydraulisches Schema der Bergeller Kraftwerke mit Angaben zu den Durchfluss- und Restwassermenge enthalten. Eine simple Übersicht über die bestehenden Kraftwerksanlagen ist in Abbildung 3.1 gegeben. Nachfolgend werden die wichtigsten Kennwerte aufgeführt.

Insgesamt erzeugen die Kraftwerksstufen des Elektrizitätswerks Zürich (ewz) im Bergell eine durchschnittliche Jahresproduktion von ca. 430 GWh, wobei der grösste Teil über die Stufe Albignasee - Löbbia - Castasesgna produziert wird.

Derzeit finden Abklärungen zu künftigen Restwassermengen statt. Diese könnten den Wasserbezug der Wasserkraftwerke leicht beeinflussen. Sie treten mit der Ablösung der bis 2039 gültigen Konzession in Kraft.

4.1.1 Stufe Forno/Plancanin - Löbbia und Kraftwerk Plancanin

Die Wasserfassung Plancanin sammelt das Wasser des Fornatals, das aus dem Murettobach und der Orlegna, die dem Fornogletscher entspringt, stammt. Dieses Wasser wird über einen 3 km langen Druckstollen nach Murtaira geleitet und von dort über einen Druckschacht in das Maschinenhaus des Kraftwerks Löbbia transportiert. Die Maschinengruppe Forno hat eine durchschnittliche Jahresproduktion von ca. 40 GWh (ca. 45 Mio m³ turbinieretes Wasser).

4.1.2 Stufe Albignasee - Löbbia

Der **Albigna-Stausee** liegt auf einer Höhe von 2'161 m ü. M. und verfügt über ein nutzbares Speichervolumen von etwa **70 Mio. m³**. Ein Grossteil des zufließenden Wassers stammt aus dem Einzugsgebiet des Flusses Albigna. Weiteres Wasser stammt aus dem Val Forno, welches über die Wasserfassung Plancanin in das Wasserschloss des Kraftwerks Murtaira geleitet wird und von dort in den See gepumpt wird. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, bereits im Kraftwerk Löbbia genutztes Wasser aus dem dortigen Ausgleichsbecken wieder in den Albigna-Stausee zurückzupumpen. Die Maschinengruppe Albigna hat eine durchschnittliche Jahresproduktion von ca. 110 GWh (ca. 65 Mio m³ turbinieretes Wasser).

4.1.3 Stufe Löbbia - Castasegna

Das **Ausgleichsbecken Löbbia**, das ein Fassungsvermögen von ca. **180'000 m³** hat, ist über einen 12 km langen Druckstollen mit dem Kraftwerk Castasegna verbunden. Das Ausgleichsbecken nimmt den Zufluss der Maira auf sowie das Betriebswasser aus den Turbinen der Stufen Albigna, Forno und Maroz. Das Kraftwerk Castasegna hat eine durchschnittliche Jahresproduktion von ca. 250 GWh (ca. 145 Mio m³ turbinieretes Wasser).

4.1.4 Stufe Maroz - Lizun/Löbbia

Das Kraftwerk Lizun ist ein reines Laufkraftwerk, d.h. das Wasser wird nicht gespeichert, sondern gefasst und sofort weitergeleitet. Die durchschnittliche Jahresproduktion des Kraftwerks Lizun beträgt ca. 18 GWh.

4.1.5 Stufe Bondesca – Bondo

Das Kraftwerk Bondo ist ebenfalls ein reines Laufkraftwerk. Die Anlage befindet sich am Rand der Talebene bei Bondo. Es nutzt das Wasser der Bondasca zwischen Fassung Prä und Talsohle. Die durchschnittliche Jahresproduktion des Kraftwerks Bondo beträgt ca. 18 GWh.

4.2 Landwirtschaftsflächen

Derzeit werden die landwirtschaftlichen Flächen nach Auskunft der Gemeinde und der Landwirtschaftskommission nicht bewässert. Mit der Veränderung des Klimas könnte die Bewässerung allerdings durchaus ein Thema werden. Im Folgenden werden daher die Methodik und die notwendigen Grundlagen zur Ermittlung des Bewässerungsbedarfs einer Kultur unter den gegebenen klimatischen Bedingungen erläutert.

4.2.1 Nutzungsarten

Aktuelle Nutzungsdaten

Die landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen befinden sich im Talboden des Bergells (Abbildung 4.1). Die Flächen befinden sich in den landwirtschaftlichen Zonen Bergzone III und Bergzone IV. Heute werden die Flächen zum Grösstenteil als Wiesen genutzt, zu einem kleinen Anteil als Weideland und zu einem geringen Anteil als Ackerfläche mit Kunstwiesen, Mais, Weizen und Kartoffeln (Tabelle 4.1). Die Werte in Tabelle 4.1 stammen aus dem Datensatz "Direktzahlung DZV" des Bundesamts für Landwirtschaft (BLW). Gemäss Einschätzung der Landwirtschaftskommission beträgt der Anteil Kunstwiesen tendenziell mehr als in diesem Datensatz ausgewiesen.

Die am intensivsten bewirtschafteten Flächen befinden sich in den Ebenen im Talboden, vor allem in den Gebieten Malta (Casaccia bis Löbbia), Crotto (Vicosoprano) und im Gebiet Caltüra bei Bondo.

Bei einem bedeutenden Teil der Flächen gibt es eine überlagernde Nutzung mit Hochstamm-Feldobstbäumen, Kastanienbäumen und Nussbäumen (Tabelle 4.2). Besonders ausgeprägt ist dies im Gebiet zwischen Soglio und Castasegna.

Ungefähr 90% der Betriebe werden biologisch bewirtschaftet.

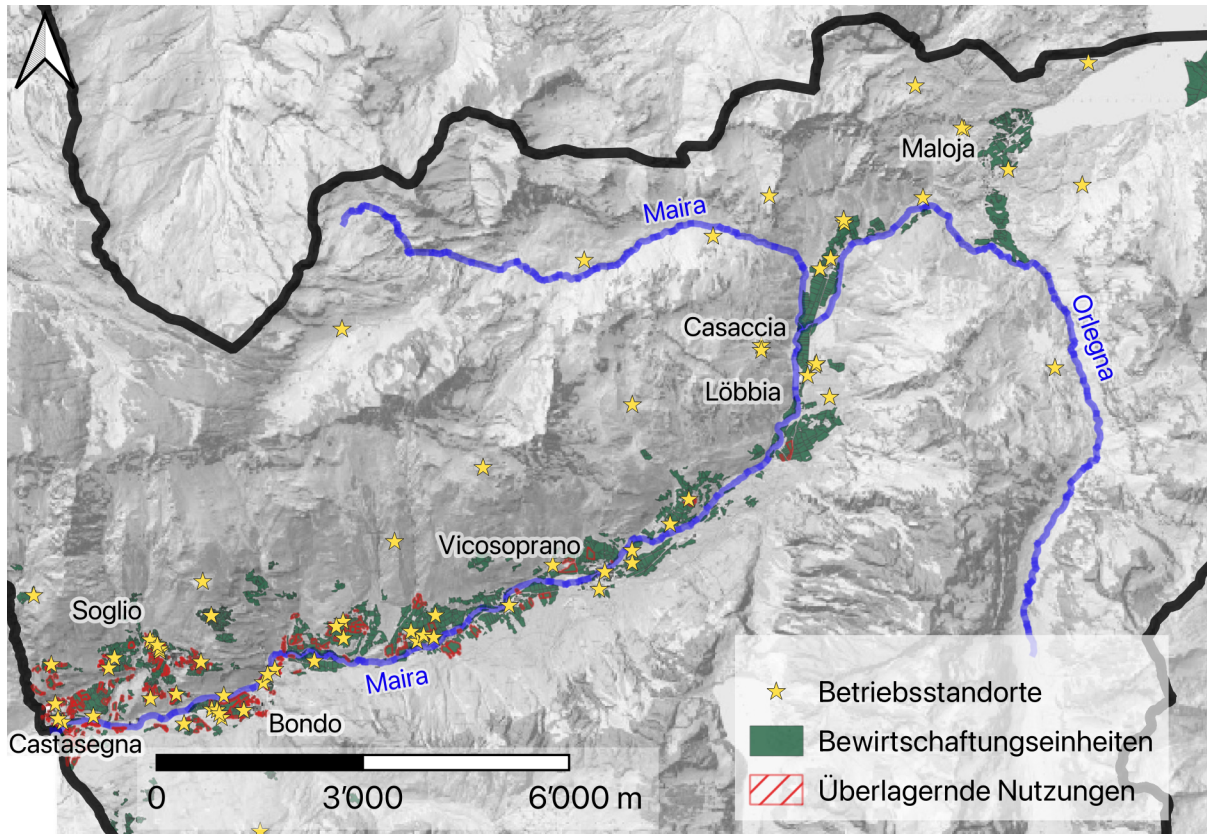


Abb. 4.1: Aktuell vorhandene landwirtschaftliche Betriebe und Bewirtschaftungseinheiten im Bergell gemäss Datensatz "Direktzahlung DZV" vom Bundesamt für Landwirtschaft BLW (Bezug: September 2024).

Tab. 4.1: Aktuell vorhandene landwirtschaftliche Nutzungsarten im Bergell gemäss Datensatz "Direktzahlung DZV" vom Bundesamt für Landwirtschaft BLW (Bezug: September 2024).

Nutzung	Fläche (ha)	Anteil (%)
Dauerwiesen	509.1	84.7
Übrige Dauerwiesen (ohne Weiden)	295.8	49.2
Extensiv genutzte Wiesen (ohne Weiden)	88.6	14.7
Regionsspezifische Biodiversitätsförderfläche (Grünflächen ohne Weiden)	71.9	12.0
Wenig intensiv genutzte Wiesen (ohne Weiden)	52.8	8.8
Dauerweiden	81.5	13.6
Extensiv genutzte Weiden	55.9	9.3
Waldweiden (ohne bewaldete Fläche)	1.8	0.3
Weiden (Heimweiden, übrige Weiden ohne Sömmerungsweiden)	23.9	4.0
Ackerfläche	5.9	1.0
Silo- und Grünmais	0.4	0.1
Sommerweizen (ohne Futterweizen der Sortenliste swiss granum)	0.2	0.0
Kunstpflanzen (ohne Weiden)	4.0	0.7
Übrige Kunstpflanze, beitragsberechtigt (z.B. Schweineweide, Geflügelweide)	0.0	0.0
Kartoffeln	0.2	0.0
Einjährige Freilandgemüse, ohne Konservengemüse	0.2	0.0
Winterweizen (ohne Futterweizen der Sortenliste swiss granum)	0.9	0.1
Einjährige Gewürz- und Medizinalpflanzen	0.1	0.0
Übrige Fläche innerhalb der LN	2.9	0.5
Flächen ausserhalb der LN	0.7	0.1
Übrige Dauerkulturen	0.7	0.1
Unbekannt	0.3	0.0
Hecken-, Feld- und Ufergehölze	0.1	0.0
Streueflächen	0.1	0.0
Total	601.3	

Tab. 4.2: Aktuell vorhandene überlagernde landwirtschaftliche Nutzungsarten im Bergell gemäss "Datensatz Direktzahlung DZV" vom Bundesamt für Landwirtschaft BLW (Bezug: September 2024).

Überlagernde Nutzungen	Fläche (ha)	Anteil (%)
Nussbäume	14.3	15.8
Hochstamm-Feldobstbäume	55.3	61.0
Kastanienbäume in gepflegten Selven	15.7	17.3
Einheimische standortgerechte Einzelbäume und Alleen	5.4	5.9
Total	90.7	

4.2.2 Boden

Bodeneignungskarte	<p>Die Böden im Bergell sind gemäss der digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz (Bundesamt für Landwirtschaft BWL, 1980) weitgehend flachgründig und haben grösstenteils ein geringes Wasserspeichervermögen. Die Wasserdurchlässigkeit ist über eine grosse Fläche als "übermässig" und an einigen Stellen als "gehemmt" oder "stark gehemmt" klassifiziert. Die Produktionsergiebigkeit des Kulturlandes ist daher grösstenteils gering bis mässig, und als Kulturarten sind vor allem der Futterbau (Dauerwiesen) und die Nutztierhaltung (Weideland) geeignet. Die Informationen der Bodeneignungskarte der Schweiz sind in Anhang A dargestellt.</p>
Hinweise Vegetation	<p>Im Talboden zwischen Promontogno und Castasagna befinden sich einige Selven mit Kastanienbäumen. Diese gedeihen meist auf Humuspodsol oder gelegentlich auf podsolierter Braunerde. Ihre Wasser- und Nährstoffspeicherkapazität ist gering bis mittel. Ackerstandorte auf solchen Böden haben nur ein geringes Ertragspotenzial. Wiesen und Weiden unterhalb der Waldgrenze werden nur durch die landwirtschaftliche Nutzung gehölzfrei gehalten. Diese stark vom Menschen beeinflussten Pflanzenbestände lassen nur wenige Rückschlüsse auf die darunter liegenden Böden zu. Talfettweiden besiedeln in der Regel gut drainierte, mässig tiefgründige bis tiefgründige Böden. Kunstwiesen werden meist an nährstoffreichen, nicht zu flachgründigen Standorten mit guter Wasserversorgung angelegt.</p>
Bodenkarte	<p>Die digitale Bodeneignungskarte der Schweiz und die aktuelle Vegetationsbedeckung geben nur einen groben Überblick über die Bodeneigenschaften. Um genauere Aussagen treffen zu können, wäre eine genauere Untersuchung der Böden (Gründigkeit, Textur, Saugspannung usw.) durch Beprobungen (Bohrungen, Sondierungen) notwendig. Für das Bergell sind zur Zeit keine weiteren Bodendaten verfügbar.</p>
Definiton Bodentypen	<p>Für die Berechnung des Wasserbedarfs wurde das Gebiet der Einfachheit halber anhand der Bodeneignungskarte der Schweiz in drei Bodentypen unterteilt (Abbildung 4.2). Anschliessend wurde die Karte unter Einbezug der Kenntnisse der Landwirtschaftskommission noch leicht angepasst.</p> <p>Die Festlegung der Bodeneigenschaften (Tabelle 4.3) und -kennwerte (Anhang D) für die drei Bodentypen erfolgte ebenfalls in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftskommission.</p> <p>In Tabelle 4.4 ist die Flächenausdehnung der verschiedenen landwirtschaftlichen Nutzungsarten pro Bodentyp dargestellt.</p>

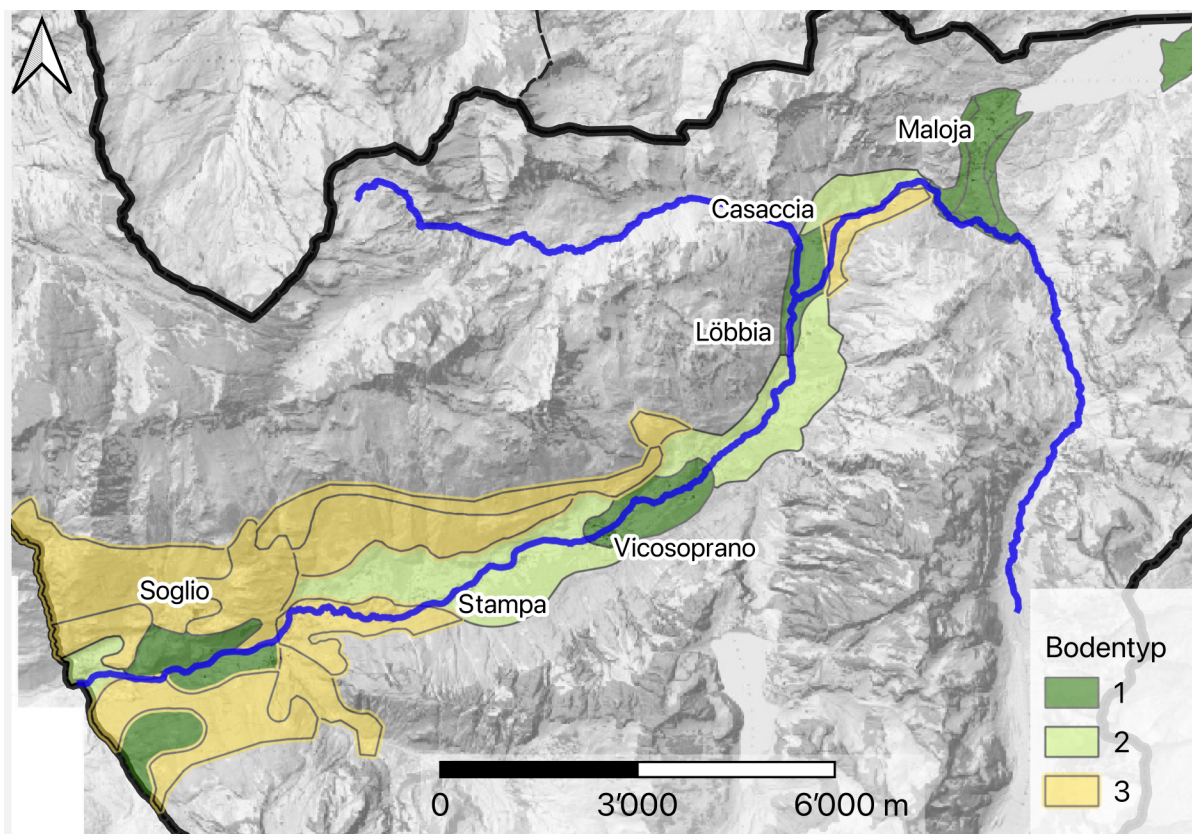


Abb. 4.2: Darstellung der Bodentypen, welche basierend auf der Bodeneignungskarte der Schweiz (BLW, 1980) und einem Austausch mit den Landwirten definiert wurden. Für Bodeneigenschaften der Bodentypen siehe Tabelle 4.3.

Tab. 4.3: Unterteilung des Gebietes in drei Bodentypen anhand der digitalen Bodeneignungskarte der Schweiz (BLW, 1980) und einem Austausch mit den Landwirten. Für die Bodentypen werden die in der Tabelle aufgeführten Eigenschaften angenommen. Um eine genauere Ausgangslage der Bodeneigenschaften zu erhalten, wären Beprobungen vor Ort notwendig.

Bodentyp	Bodeneigenschaften
Bodentyp 1	<ul style="list-style-type: none"> - Gründigkeit: Gering bis Mittel - Wasserspeichervermögen: Gering bis Mässig - Wasserdurchlässigkeit: Normal bis Übermässig - Vernässung: Keine - Skelettgehalt: Skeletthaltig bis Skelettreich - Nährstoffspeichervermögen: Gering bis Mässig
Bodentyp 2	<ul style="list-style-type: none"> - Gründigkeit: Flach - Wasserspeichervermögen: Sehr gering bis gering - Wasserdurchlässigkeit: Übermässig - Vernässung: Keine - Skelettgehalt: Skelettreich - Nährstoffspeichervermögen: Sehr gering bis gering
Bodentyp 3	<ul style="list-style-type: none"> - Gründigkeit: Sehr Flach bis Flach - Wasserspeichervermögen: Extrem Gering bis sehr Gering - Wasserdurchlässigkeit: Gehemmt bis Übermässig - Vernässung: Keine bis schwach Grundnass - Skelettgehalt: Skelettreich bis extrem Skelettreich - Nährstoffspeichervermögen: Extrem Gering bis sehr Gering

Tab. 4.4: Landwirtschaftliche Nutzungsart (Hauptkategorie) aufgliedert in Flächen mit gleichem Bodentyp.

	Bodentyp 1	Bodentyp 2	Bodentyp 3
Dauerwiesen	ca. 190 ha	ca. 199 ha	ca. 120 ha
Dauerweiden	ca. 16 ha	ca. 36 ha	ca. 30 ha
Ackerflächen	ca. 1.8 ha	ca. 4 ha	ca. 0.1 ha
Überlagernde Nutzungen	ca. 20 ha	ca. 37 ha	ca. 34 ha

4.2.3 Evapotranspiration und Bewässerungsbedarf

Die Berechnung des täglichen Bewässerungsbedarfs in einer bestimmten Situation, d.h. bei gegebenem Klima, gegebener Kultur und gegebenem Boden basiert auf der Arbeit von Smith, Calanca & Fuhrer (2012) und orientiert sich an der Methodik des FAO Bewässerungsberichtes (Allen et al. 1998). Weitere Informationen zum Berechnungsverfahren und zu den Parameterwerten wurden weitgehend den Berichten "Berechnung der Bewässerungsbedürfnisse unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen in der Schweiz" (Eisenring, Holzkämper & Calanca 2021) und "Grundlagen für die Abschätzung des Bewässerungsbedarfs im Kanton Basel-Landschaft" (Fuhrer & Smith, 2015) entnommen.

Der tägliche Bewässerungsbedarf wird unter Berücksichtigung der vertikalen Wasserbilanz für den maximalen Wurzelraum der Kultur wie folgt abgeschätzt:

Wasserbilanz

$$d/dt (SW) = P + IWR - RO - DP - ET_a$$

mit: SW = Bodenwassergehalt in mm

P = Niederschlag in mm/Tag

IWR = die Bewässerung in mm/Tag

RO = Wasserabfluss an der Bodenoberfläche in mm/Tag

DP = Tiefenversickerung in mm/Tag

ET_a = Aktuelle Evapotranspiration in mm/Tag

Der Wassergehalt des Bodens an einem bestimmten Tag wird aus der Wasserbilanz der Wurzelzone und dem Wassergehalt des Vortages berechnet. Folgende Wasserflüsse tragen zur Wasserbilanz des betrachteten Tages bei: Der Niederschlag (P), Verluste durch Oberflächenabfluss (RO), Sickerwasser (DP), das durch die Schwerkraft ins Grundwasser fließt, die aktuelle Evapotranspiration (ET_a) des betrachteten Tages und die Bewässerung des Vortages (IWR). RO wird aus der Differenz zwischen Niederschlag und Infiltrationskapazität ermittelt. Bei einer Sättigung des Bodens mit Wasser ist keine Infiltration mehr möglich und der gesamte Niederschlag wird als RO abgeleitet. Die Infiltrationskapazität wird aus der Differenz zwischen der Porosität des Bodens und der mit dem aktuellen Wassergehalt multiplizierten Porosität berechnet. Bei einem Überschuss des aktuellen Was-

sergehalts über die Feldkapazität ist der Boden nicht mehr in der Lage, das Wasser gegen die Schwerkraft zu halten. Infolgedessen kommt es zu einer Ableitung des überschüssigen Wassers in Form von DP. Bei der Lösung der Wasserbilanzgleichung werden Interzeption des Niederschlags, laterale Wasserflüsse, Wasseransammlungen in Form von Pfützen, kapillarer Aufstieg und Wasserspeicherung als Schnee vernachlässigt. Bei der Berechnung wird für den Wassergehalt am ersten Tag der Wert der nutzbaren Feldkapazität TAW angenommen (Smith, Calanca, & Fuhrer, 2012). Anschliessend wird der Wassergehalt des Bodens am betreffenden Tag mit Hilfe der Wasserbilanz des Wurzelbereichs und dem Wassergehalt am Vortag errechnet.

Die Berechnung der aktuellen Evapotranspiration ET_a erfolgt ausgehend von der Referenz-Evapotranspiration ET_0 in Abhängigkeit der Kultur (über den Kulturkoeffizienten K_c) und der variablen Wasserverfügbarkeit im Boden (über den Trockenstresskoeffizienten K_s).

Aktuelle Evapotranspiration	$ET_a = K_s \times K_c \times ET_0$ <p>mit:</p> <ul style="list-style-type: none"> ET_a = Aktuelle Evapotranspiration in mm/Tag ET_0 = Referenz-Evapotranspiration in mm/Tag K_c = Kulturkoeffizient (abhängig von Kultur und Wachstumsphase) K_s = Trockenstresskoeffizient (abhängig vom Boden)
-----------------------------	---

Ref.-Evapotranspiration	<p>In einem ersten Schritt wird die Referenz-Evapotranspiration ET_0 pro Tag in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen berechnet. Die Referenz-Evapotranspiration kann mit verschiedenen Methoden berechnet werden. Allen et al. (1998) empfehlen die Anwendung der FAO Penman-Monteith-Gleichung, welche die Evapotranspiration physikalisch gut wiedergibt. Allerdings stellt diese Methode hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit von Messdaten (Lufttemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit). Weit verbreitet sind auch die empirischen Formeln nach Priestley-Taylor (1972) und Turc (1972). Diese haben den Vorteil, dass weniger Messparameter benötigt werden. Für die gemessenen Klimadaten (2013-2023) ergaben alle drei Methoden vergleichbare Evapotranspirationswerte (siehe Anhang B). Daher wird für die vorliegende Analyse die Formel von Priestley-Taylor (1972) verwendet, welche von der Temperatur und der Globalstrahlung abhängig ist. Eine detaillierte Beschreibung der Methodik zur Berechnung der Referenz-Evapotranspiration findet sich in Anhang B.</p>
-------------------------	--

Einfluss der Kultur	<p>Der Koeffizient K_c kann einen Wert zwischen 0 und 1 oder höher annehmen. Für Körnermais z. B. 1.2 in der Mitte des vegetativen Zyklus, wenn die Pflanze das meiste Wasser verdunsten kann. Der Vegetationszyklus von allen hier untersuchten Kulturen wird in vier vegetative Phasen unterteilt. Für alle hier berücksichtigten Acker- und Obstkulturen wird eine einmalige Ernte pro Jahr angenommen. Für jede Kultur wurden die in Anhang D aufgeführten Parameter gemäss Allen et al. (1998) bestimmt. Die Parameterwerte wurden mit Hilfe von Angaben aus der Literatur (Allen et al. 1998; Geyer, et al. 2020; Bregy et al. 2017; Smith, Calanca,</p>
---------------------	---

& Fuhrer 2012; Agrometeo; Agroscope) und in Absprache mit der Landwirtschaftskommission bestimmt.

Grünland

Für Grünland, das ganzjährig den Boden bedeckt, wird ein Schnitt in Abhängigkeit vom Blattflächenindex simuliert. Dieser ist abhängig von der Temperatur und nimmt im Verlauf der Zeit ausgehend von einem Minimalwert kumulativ zu. Der Schnitt erfolgt, falls der Blattflächenindex einen bestimmten Wert erreicht. Anschliessend nimmt der Wert wieder den Minimalwert an. Die für die Berechnung benötigten Parameterwerte sind in Anhang D zu finden. Die Werte wurden aus Literaturangaben (Bassin, Calanca, Weidinger, Gerosa & Fuhrer 2004; Smith, Calanca & Fuhrer 2012; Vuffray, et al. 2017) und in Abstimmung mit der Landwirtschaftskommission definiert. Dabei wurden die Wachstumsparameter so angepasst, dass die berechnete Anzahl der Schnitzyklen pro Jahr in der Referenzperiode den Angaben der Landwirte entspricht (siehe Anhang D).

Anschliessend wird für jede Kultur die potenzielle Evapotranspiration berechnet. Dabei handelt es sich um die Evapotranspiration, welche die Pflanze unter idealen Bedingungen (v.a. kein Wassermangel) verdunsten kann.

Pot.-Evapotranspiration

$$ET_p = K_c \times ET_o$$

mit: ET_p = Potentielle Evapotranspiration in mm/Tag

K_c = Kulturkoeffizient (abhängig von Wachstumsphase)

Einfluss des Bodentyps

Der Koeffizient K_s spiegelt die Auswirkung der Entwicklung des Bodenwasserdefizits im Wurzelbereich in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge, der Bilanz der anderen Wasserflüsse und der spezifischen Toleranz der Kultur gegenüber dem Bodenwasserdefizit wieder. K_s liegt zwischen 0 (vollständige Hemmung der Evapotranspiration) und 1 (keine Einschränkung der Evapotranspiration). Das Wasserrückhaltevermögen pro Bodenvolumen hängt von der Textur des Bodens ab. Dieses Vermögen entspricht der Differenz zwischen den typischen Werten für den Wassergehalt des Bodens bei der Feldkapazität (Q_{FC}) und dem permanenten Welkepunkt (Q_{WP}). Diese Kennwerte wurden aus der Literatur (Allen et al. 1998) und in Abstimmung mit der Landwirtschaftskommission bestimmt. Die Kennwerte sind in Anhang D für die drei berücksichtigten Bodentypen aufgeführt.

Bewässerungsbedürftigkeit

Das Tages-Bodenwasserdefizit D_r entspricht der Differenz zwischen der nutzbaren Feldkapazität TAW und dem Wassergehalt des Bodens am betreffenden Tag. Die Toleranz einer Kultur gegenüber Bodenwasserdefizit wird bestimmt durch den Anteil der entsprechenden TAW, der fehlen kann, ohne dass die Evapotranspiration beschränkt wird, d.h. $ET_p = ET_a$ und $K_s = 1$. Dieser Anteil kann auch als leicht verfügbares Bodenwasser bezeichnet werden. Ist das Bodenwasserdefizit so gross, dass die Wurzeln auf die restlichen, weniger gut verfügbaren Reserven zurückgreifen müssen, nimmt die Evapotranspiration linear bis auf den Wert Null ab, wenn die TAW vollständig erschöpft ist. In der Literatur wird angegeben, dass Kartoffeln ein Defizit an Bodenwasser von bis zu 35% tolerieren, während beweidetes Grünland ein Defizit von bis zu 60% toleriert. Im Verlaufe des Vegetationszyklus kann sich bei trockenen atmosphärischen Bedingungen im Wurzelbereich ein mehr oder weniger grosses Wasserdefizit einstellen, das beim Überschreiten eines bestimmten kulturspezifischen Schwellenwerts durch Bewässerung so aus-

geglichen werden sollte, dass Ernteeinbussen vermieden werden ohne Wasser zu verschwenden. Dies wurde bei der Berechnung des Bewässerungsbedarfs berücksichtigt. Detailliertere Ausführungen zur Berechnung der Bewässerungsmenge sind in Anhang D zu finden.

Wasserbedarf Bergell

Für jeden Bodentyp werden die berechneten Bewässerungsmengen (mm-Werte) der Kulturen (Nutzungsarten) mit der jeweiligen Flächenausdehnung multipliziert und die Werte anschliessend summiert (siehe Tabelle 4.4). Bei überlagernden Nutzungen werden die mm-Werte mit 10% der Flächenausdehnung der Bewirtschaftungseinheit multipliziert, da diese nicht flächendeckend sind.

Zusätzlich zur Gesamtabstschätzung des Wasserbedarfs für alle landwirtschaftlichen Nutzflächen im Bergell wurde die Berechnung auch noch separat für bestimmte Gebiete durchgeführt, insbesondere für ebene Gebiete mit dem Bodentyp 1. In diesen Gebieten kommt eine Bewässerung am ehesten infrage.

Für die Berechnung der Bewässerungsmenge werden die folgenden Nutzungsarten berücksichtigt und der Einfachheit halber dem Bewässerungsbedarf der aufgeführten Kulturen zugeordnet:

Nutzungsart (Hauptkategorie)	Kultur Bewässerungsmenge
Dauerwiesen	Naturwiese
Dauerweiden	Weideland
Ackerflächen	Raigras
Überlagernde Nutzungen	Apfel (Gala)

Künftige Nutzungsarten

Die landwirtschaftlichen Nutzungsarten dürften sich in Zukunft nur geringfügig verändern. Eine leichte Zunahme von Kunstwiesen auf Kosten von Naturwiesen erscheint zwar möglich, ist jedoch kritisch zu hinterfragen – insbesondere im Hinblick auf die meist flachgründigen Böden, die sich nur begrenzt für eine intensivere Nutzung eignen. Auch bei einer Umstellung auf Kunstwiesen ist der potenzielle Ertrag auf solchen Standorten begrenzt. Ausserdem ist eine vielfältige und ökologische Kulturlandschaft auf das Nebeneinander verschiedener Wiesentypen angewiesen (Marbot et al., 2013). Der Anteil von Kunstwiesen sollte sich also höchstens auf die tiefgründigsten Böden (ebene Flächen mit Bodentyp 1) beschränken.

4.3 Wasserverbrauch Landwirtschaftsbetriebe (ohne Bewässerung)

Nutzung

Im Vergleich zu einer möglichen Bewässerung und auch im Vergleich zum Gesamtdargebot ist die Nutzung von Oberflächengewässer und Quellen für den betrieblichen Unterhalt und das Vieh wenig relevant. Lokal, insbesondere bei Alpbetrieben, kann eine künftige Änderung des Dargebots jedoch von grosser Bedeutung sein.

Aktueller Viehbestand

Den grössten Teil des Wasserverbrauchs im betrieblichen Unterhalt macht die Versorgung des Viehs aus. In Tabelle 4.5 ist der aktuelle Bestand an Nutztieren im Bergell gemäss Auskunft der Gemeinde aufgeführt. Die Tiere verbringen ca. 270 Tage im Tal. Die meisten Kühe, Schafe und Ziegen verbringen den Sommer auf der Alp. Zusätzlich werden einige Kühe, Schafe und Ziegen von ausserhalb des Bergells auf die Alp gebracht. Der gesamte Wasserbezug der Betriebe betrug im

Jahr 2023 gemäss Zählerdaten der Gemeinde rund 10'000 m³. Diese Zahl betrifft jedoch nur Betriebe, die an das öffentliche Trinkwassernetz angeschlossen sind. Wassernutzungen aus privaten Quellen (zwei Betriebe im Tal sowie Alpbetriebe) oder direkt aus Gewässern, beispielsweise für Tränken auf dem Feld, sind darin nicht enthalten.

Für die einzelnen Alpen ist der sogenannte Normalstoss (NST) pro Betrieb bekannt (Tabelle 4.6). Ein Normalstoss entspricht der Sömmerung einer raufutterverzehrenden Grossvieheinheit (RGVE) während 100 Tagen. Beispiel: Wenn auf einer Alp mit 80 Normalstössen (NST) 80 Kühe während 100 Tagen gesömmeret werden, ergibt dies eine Sömmerung von 100%. Werden weniger Tiere gehalten, verlängert sich entsprechend die mögliche Sömmerungsdauer – mit mehr Tieren verkürzt sie sich. Um den unterschiedlichen Futterbedarf verschiedener Tierarten zu berücksichtigen, existieren Umrechnungsfaktoren (z. B. Kuh = 1 NST, Schaf = 0.25 NST, Ziege = 0.2 NST). Zur Abschätzung des Wasserbedarfs des Viehs wird angenommen, dass 1 NST dem durchschnittlichen Wasserbedarf einer Kuh entspricht (ca. 75 l/Tag). Der zusätzliche Wasserbedarf für Personen auf der Alp sowie für eine allfällige Alpkäserei wurde in dieser Berechnung nicht berücksichtigt.

Künftiger Bedarf

Die Landwirtschaftskommission geht davon aus, dass der Viehbestand in Zukunft auf ungefähr demselben Niveau bleiben wird wie heute.

Tab. 4.5: Anzahl Nutztiere im Bergell (2023) gemäss Auskunft der Gemeinde. Im Stall bzw. im Tal verbringen die Tiere ca. 270 Tage. Den Sommer verbringen die meisten Kühe, Schafe und Ziegen auf der Alp. Zusätzlich kommen einige Kühe, Schafe und Ziegen von ausserhalb des Bergells auf die Alp.

Vieh	Stall/Tal (270 Tage)	Alp (Sommer)
Kühe	562	ca. 700
Schafe und Widder	193	ca. 270
Jungschafe	176	-
Ziegen und Ziegenböcke	333	ca. 450
Jungziegen	27	-
Esel und Pferde	45	-
Schweine	7	-
Hühner	286	-
Kaninchen	16	-
Enten	5	-

Tab. 4.6: Anzahl Normalstösse (NST) pro Alpbetrieb (2024) gemäss Auskunft Landwirtschaftskommission. Zur Abschätzung des Wasserbedarfs wurde ein Wert von 75 l/Tag pro NST angenommen. In dieser Berechnung wurde der zusätzliche Wasserbedarf für Personen auf der Alp sowie für eine mögliche Alpkäserei nicht berücksichtigt.

Alp	Normalstoss (Stand 2024)	Geschätzter Wasserverbrauch (m³/Alpsaison)
Isola	ca. 25 von 32.6 (Isola/Cavril)	187.5
Cavril	ca. 8 von 32.6 (Isola/Cavril)	60
Ca d'Starnam	ca. 62 von 92.2 (Löbbia/Ca d'Starnam)	465
Löbbia	ca. 30 von 92.2 (Löbbia/Ca d'Starnam)	225
Spluega	10.2	76.5
Aela (Maloja- / Aela-Gebiet)	69	517.5
Pila	6	45
Lunghin	15.6	117
Cavloccio	48.3	362.25
Preda Blanca	29.6	222
Maroz Dora	ca. 30 von 47.6 (Maroz Dora/Alpascela)	225
Alpascela	ca. 17 von 47.6 (Maroz Dora/Alpascela)	127.5
Maroz Dent	39.2	294
Lizun	Aktuell nicht in Betrieb (künftig allenfalls ca. 5)	37.5
Furcela	29.6	222
Plan Lò	23.9	179.25
Bosch da Muntac	7.7	57.75
Tombal	ca. 67.1 mit Plan Vest und Val da Duana	503.25
Plan Vest	ca. 67.1 mit Tombal und Val da Duana	"
Val da Duana	67.1 mit Tombal und Plan Vest	"
Laira	5.1 mit Dair	38.25
Dair	5.1 mit Laira	"
Lera d'Zura	4.8	36
Preda / Souvräna	158	1'185
Bles	78	585
Total	ca. 800	ca. 6'000

5 Resultate Klima

Temperatur, Niederschlag

Abbildung 5.1 zeigt die Ergebnisse der CH2018-Klimamodelle (CH2018, 2018) für die Zeithorizonte Anfang des Jahrhunderts (2020-2049), Mitte des Jahrhunderts (2045-2074) und Ende des Jahrhunderts (2070-2099). Die schwarze Linie zeigt das aktuelle Klima (Mittelwert der Referenzperiode 1981-2010), die blaue Linie den Mittelwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Mittelwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden (Extremwerte). In der Schweiz wird der Anstieg der atmosphärischen Temperatur auf der Alpensüdseite und in den höher gelegenen Bergregionen am stärksten sein. Dies zeigt sich auch in der Analyse für die Gemeinde Bergell. Zudem ist zu erwarten, dass der Temperaturanstieg in den Sommermonaten stärker ausfallen wird als in den Wintermonaten. Im Sommer ist bereits bis Mitte des Jahrhunderts mit einem Anstieg von 2 bis 3 °C gegenüber dem Referenzklima zu rechnen und bis Ende des Jahrhunderts mit bis zu 5 °C. Mit höheren Temperaturen gehen intensivere und variablere Niederschläge einher (IPCC, 2014). Im Winter ist mit mehr Niederschlag zu rechnen, während die Sommer trockener werden.

Es ist ersichtlich, dass im Frühling zu Beginn des Jahrhunderts im Emissionspfad RCP 8.5 im Mittel höhere Niederschläge prognostiziert werden als im Emissionspfad RCP 4.5. Ab Mitte des Jahrhunderts kehrt sich dieser Trend jedoch um und gegen Ende des Jahrhunderts sind unter RCP 8.5 geringere Niederschlagsmengen zu erwarten. Für die landwirtschaftliche Praxis ist zudem die zeitliche Verteilung der Niederschläge von zentraler Bedeutung. Aus der Abbildung lassen sich Informationen zur Niederschlagsvariabilität jedoch nicht direkt ableiten.

Sonnenstrahlung

Es wird erwartet, dass die Globalstrahlung im Frühjahr etwa gleich bleibt und im Sommer etwas zunimmt.

Schneeschnmelze, Gletscher

Die Schneeschnmelze wird deutlich früher einsetzen und geringer ausfallen und die Gletscher werden stark zurückgehen. Derzeit sind ca. 7% der Gesamtfläche des Bergells vergletschert (Zekollari et al., 2021). Mit effektiven Klimaschutzmassnahmen (RCP 4.5) könnte eine Reduktion und Stabilisierung der Gletscherausdehnung bis Ende des Jahrhunderts auf ca. 3% der Gesamtfläche des Bergells begrenzt werden. Damit würde insbesondere ein bedeutender Teil des Fornogletschers erhalten bleiben. Ohne wirkungsvolle Klimaschutzmassnahmen (RCP 8.5) muss bis Ende des Jahrhunderts mit einem vollständigen Rückzug der Gletscher gerechnet werden (Abbildung 5.2 & Abbildung 5.3, Zekollari et al., 2021).

Diese Veränderungen haben einen grossen Einfluss auf das Wasserdargebot (Kapitel 6) und den Wasserbedarf der Landwirtschaftskulturen (Kapitel 7).

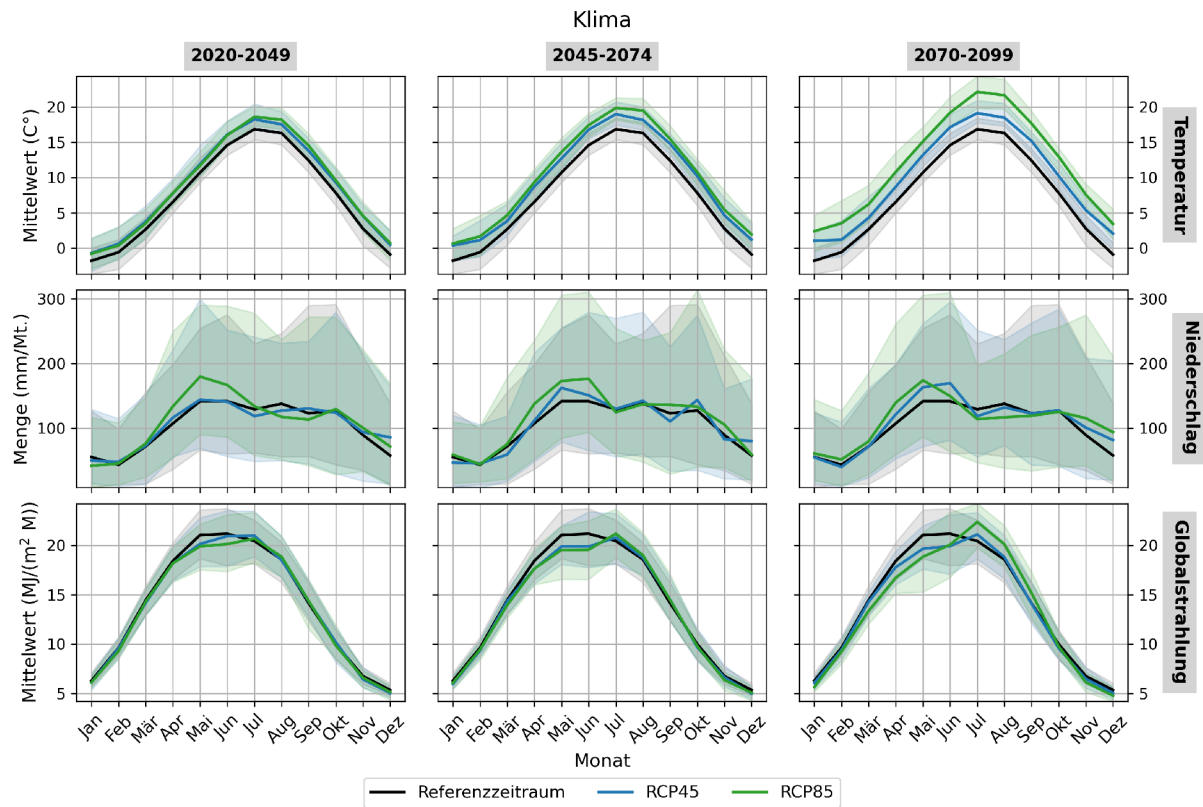


Abb. 5.1: Entwicklung Temperatur, Niederschlag und Globalstrahlung für unterschiedliche Zeithorizonte. Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5) für die jeweiligen Zeithorizonte (2020-2049, 2045-2074, 2070-2099). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10%- und 90%-Quantil der Monatswerte in den jeweiligen Zeitperioden (Extremwerte). Bei Temperatur und Globalstrahlung handelt es sich um Monatsmittelwerte, beim Niederschlag um Monatssummen. (Quelle: CH2018, 2018)

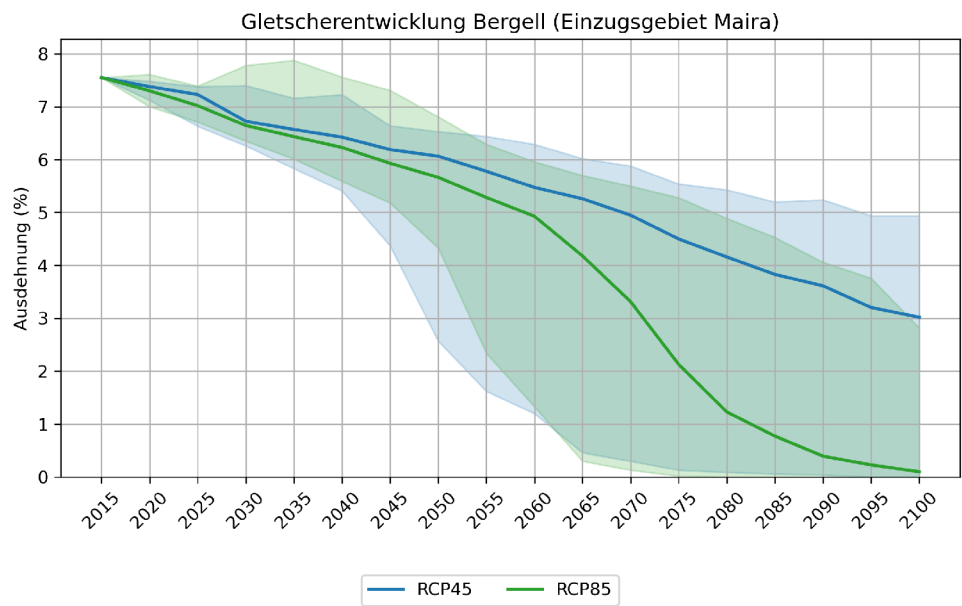


Abb. 5.2: Entwicklung der Gletscherausdehnung für das Einzugsgebiet der Maira bei Soglio. Die blaue Linie zeigt den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den minimalen und maximalen Schätzwert aller Klimamodelle. (CH2018, 2018)

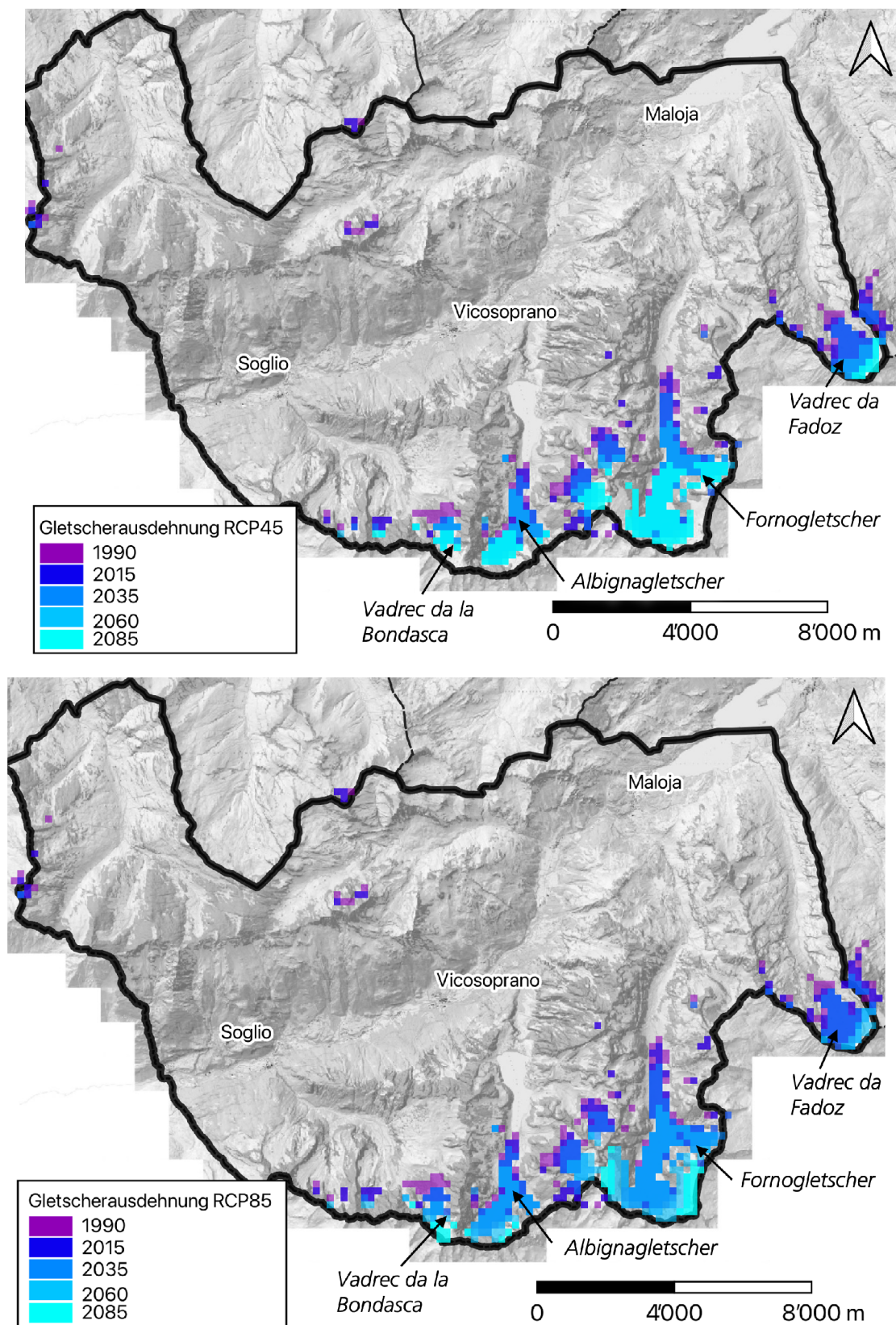


Abb. 5.3: Darstellung der Gletscherausdehnung gemäss dem mittleren Szenario RCP 4.5 (oben) und dem Szenario RCP 8.5 ohne expliziten Klimaschutz (unten). Bei den dargestellten Werten handelt es sich um Medianwerte. (CH2018, 2018)

6 Resultate Wasserdargebot

6.1 Oberflächengewässer

Abbildung 6.1 zeigt die erwartete Veränderung des mittleren jährlichen Abflusses der Maira gemäss Datensatz Hydro-CH2018 (Freudiger et al., 2021). Demnach ist im Bergell bis Ende des Jahrhunderts mit einer Abnahme des mittleren Jahresabflusses von ca. 5% bis 10% zu rechnen. Die grösste Veränderung wird sich aber in der zeitlichen Verteilung des Abflusses zeigen. Es ist mit einer markanten Veränderung des Abflussregimes zu rechnen. Abbildung 6.2 zeigt die erwartete Veränderung des monatlichen Abflusses der Maira bei Soglio, also annähernd des gesamten Einzugsgebietes, gemäss Datensatz Hydro-CH2018 (Freudiger et al., 2021). Die Veränderung des Regimes ist weniger auf die Änderung der Niederschlagsmenge als auf die Änderung der Schneeschmelze und den Rückgang der Vergletscherung zurückzuführen. Die Abflüsse im Frühling und Winter nehmen zu, da weniger Niederschlag als Schnee fällt. Während der Abfluss aus der Gletscherschmelze im Frühsommer zunächst noch zunimmt, nimmt er gegen Ende des Jahrhunderts stark ab. Dies führt langfristig zu einer Zunahme des Abflusses im Winter und zu einer deutlichen Abnahme im Sommer. Diese Tendenz ist beim Emissionspfad ohne explizite Klimaschutzmassnahmen stärker ausgeprägt als bei den Modellen mit Klimaschutzmassnahmen. Zum Beispiel ist damit zu rechnen, dass der mittlere Abfluss im August in der Mitte des Jahrhunderts um ca. 33% (RCP 4.5) bis ca. 39% (RCP 8.5) abnimmt und bis zum Ende des Jahrhunderts um ca. 41% (RCP 4.5) bis ca. 56% (RCP 8.5).

Die selben Erkenntnisse ergeben sich aus einer Klimastudie der WSL (WSL, 2021), in welcher hydrologische Modellrechnungen auf Basis der Klimamodelle CH2018 durchgeführt wurden. Die WSL-Studie zeigt ausserdem, dass die Q_{347} -Werte (Niedrigwasserabflüsse) deutlich höher sein werden als heute. Dies weil durch die Zunahme der Niederschläge im Winter, verbunden mit einem teilweisen Wechsel von Schnee zu Regen, die Abflüsse in der Niedrigwasserperiode zunehmen. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird mit einer Zunahme der Q_{347} -Werte um ca. 43% (RCP 4.5) bis ca. 59% (RCP 8.5) gerechnet. In der WSL-Studie wurden neben der Veränderung des Abflusses im gesamten Einzugsgebiet der Maira zusätzlich die Abflussveränderung in Teileinzugsgebieten (Albigna, Val Forno, Maroz, Plancanin, Löbbia, Bondo) untersucht. Es zeigt sich, dass die Tendenz der Verschiebung vom Sommer- zum Winterabfluss umso grösser ist, je höher der Gletscheranteil im Teileinzugsgebiet ist. Beispielsweise ist damit zu rechnen, dass der mittlere Augustabfluss im Teileinzugsgebiet Albigna in der Mitte des Jahrhunderts um ca. 30% (RCP 4.5) bis ca. 40% (RCP 8.5) abnimmt und bis zum Ende des Jahrhunderts gar um ca. 50% (RCP 4.5) bis ca. 70% (RCP 8.5).

Die modellierten Veränderungen des Abflussregimes zeigen deutlich, dass sich die Wasserverfügbarkeit über das Jahr stark verschieben wird – mit höheren Abflüssen im Winter und Frühling sowie reduzierten Abflüssen in den Sommermonaten. Vor diesem Hintergrund ist eine direkte Entnahme von Oberflächenwasser in den Sommermonaten – wenn der Bewässerungsbedarf am höchsten ist – nicht zu empfehlen. Eine zusätzliche Belastung der ohnehin abnehmenden Sommerabflüsse würde die Gewässerlebensräume weiter unter Druck setzen und die Konkurrenz mit anderen Nutzungen wie der Restwasserbereitstellung verschärfen.

Sinnvoller wäre es daher, die im Winter und Frühling vermehrt anfallenden Abflüsse zu speichern und diese Puffer in der Vegetationsperiode zu nutzen. Besonders interessant erscheint in diesem Zusammenhang die Mitnutzung bestehender Speicheranlagen der Wasserkraftnutzung, insbesondere des Stausees Albigna sowie des Ausgleichsbeckens Löbbia. Dabei ist zu beachten, dass das Ausgleichsbecken Löbbia nicht als Langzeitspeicher geeignet ist, sondern allenfalls zur gezielten Weiterleitung in separate Speicherbecken für die landwirtschaftliche Nutzung dienen könnte. Auf diese Weise könnte ein Beitrag zur Deckung einer allfälligen künftigen Bewässerungsmenge geleistet werden – unter Berücksichtigung der bestehenden Nutzungsansprüche sowie technischer und ökologischer Rahmenbedingungen.

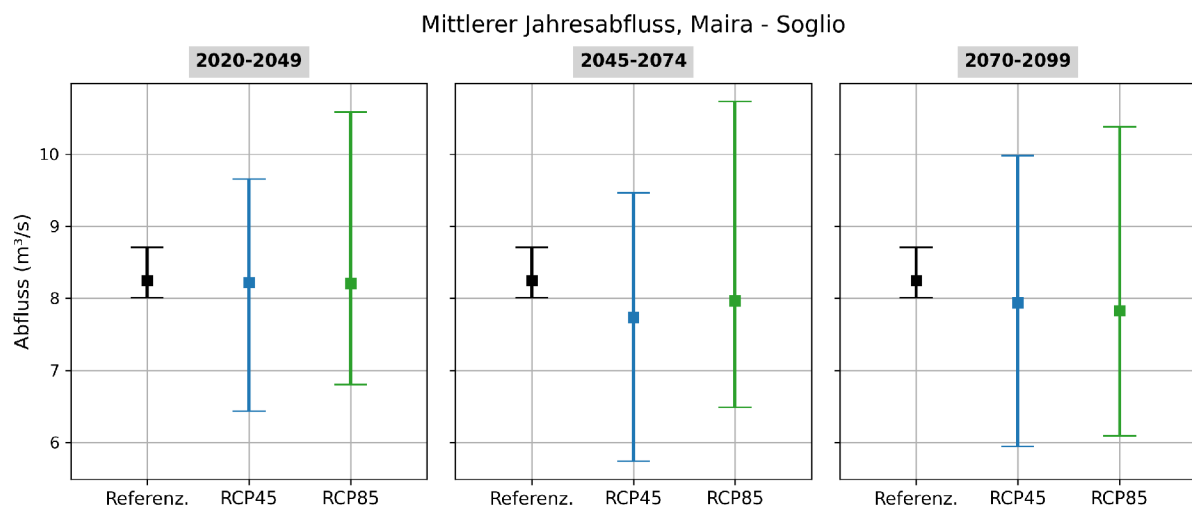


Abb. 6.1: Entwicklung des mittleren Jahresabflusses der Maira bei Soglio für unterschiedliche Zeithorizonte. Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne Klimaschutz für die jeweiligen Zeithorizonte. Zusätzlich sind jeweils der minimale und der maximale Jahresmittelwert über alle Klimamodelle und Simulationsjahre hinweg dargestellt. (CH2018, 2018)

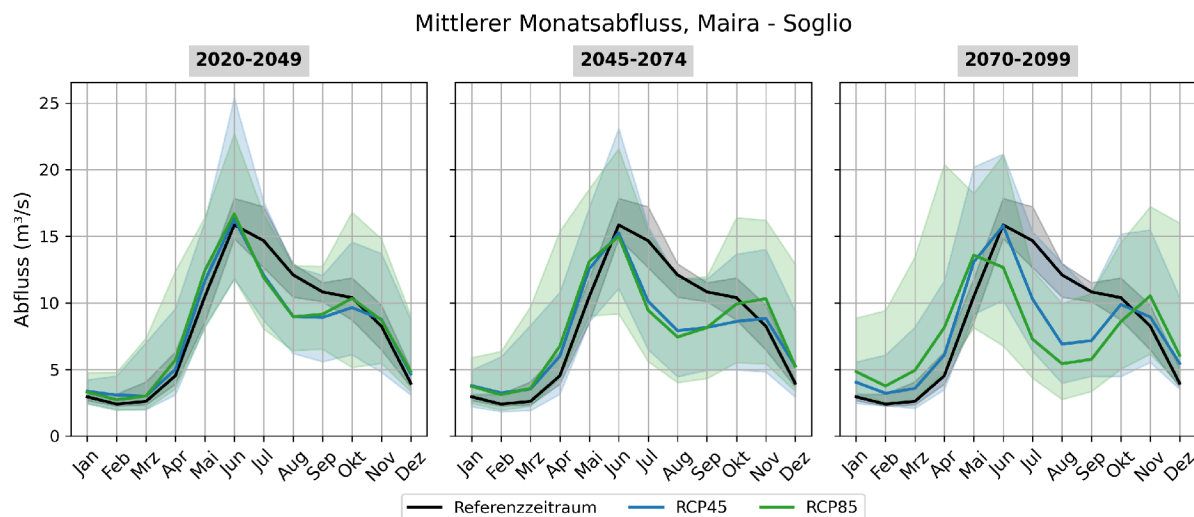


Abb. 6.2: Entwicklung des mittleren Monatsabflusses der Maira bei Soglio für unterschiedliche Zeithorizonte. Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5) für die jeweiligen Zeithorizonte. Zusätzlich sind jeweils der minimale und der maximale Jahreswert über alle Klimamodelle und Simulationsjahre hinweg dargestellt. (CH2018, 2018)

6.2 Grundwasser / Quellen

Der Klimawandel führt nicht nur zu einer deutlichen Abnahme des Oberflächenabflusses. Es wird auch erwartet, dass der fortschreitende Gletscherschwund, die höhere Verdunstung und die geringeren Niederschlagsmengen im Sommer zu einer Verringerung der Grundwasserneubildung führen. In den Sommermonaten ist daher mit einer geringeren Ergiebigkeit der Quellen und Grundwasserleiter zu rechnen. Aufgrund der Komplexität der geologischen Verhältnisse und der Wechselwirkungen zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser wurde auf eine umfangreiche Modellierung der zukünftigen Veränderungen verzichtet. Dies auch deshalb, weil das Grundwasser im Bergell für eine allfällige künftige landwirtschaftliche Bewässerung nur von untergeordneter Bedeutung sein dürfte: Einerseits ist die Verfügbarkeit begrenzt, andererseits hat die Trinkwasserversorgung Priorität. Hinzu kommt, dass die Auswirkungen einer zusätzlichen Nutzung auf die Grundwasserverhältnisse schwer vorhersehbar sind. Auch aus diesem Grund ist eine weitergehende Nutzung des Quellwassers für Bewässerungszwecke grundsätzlich zurückhaltend zu beurteilen. Die Nutzung der Quellen sollte also prioritär der Versorgung von Mensch und Vieh vorbehalten bleiben.

Gleichzeitig zeigen die Erhebungen, dass bei mehreren Quelfassungen erhebliche Überlaufmengen auftreten, also Wasser, das zwar gefasst, aber nicht genutzt wird (siehe Tabelle 3.2). Prinzipiell könnte geprüft werden, ob diese Überlaufmengen für eine landwirtschaftliche Bewässerung genutzt werden könnten, sofern die ökologischen und rechtlichen Rahmenbedingungen dies zulassen. Dazu gehören insbesondere die Einhaltung von Mindestabflussmengen, der Schutz wasserabhängiger Lebensräume und die Berücksichtigung bestehender Konzessionen.

Unabhängig von einer möglichen Nutzung der Quellen zur landwirtschaftlichen Bewässerung sollte geprüft werden, ob bei bestehenden Quelfassungen Optimierungsbedarf besteht. Insbesondere könnte eine gezieltere Regulierung der Fassungsmenge unter Umständen sinnvoll sein, um unnötige Überlaufmengen zu reduzieren und damit mehr Wasser im Quellbereich der Natur zur Verfügung zu stellen.

7 Resultate Wasserbedarf

7.1 Evapotranspiration

Abbildung 7.1 zeigt die berechnete Evapotranspiration (Evaporation + Transpiration) für die Referenzfläche (ET_0 Priestley-Taylor) und beispielhaft für Weideland und Apfelbäume. Diese Evapotranspirationswerte werden erreicht, wenn den Pflanzen beliebig viel Wasser zur Verfügung steht. Es ist zu erkennen, dass die Evapotranspiration in den Sommermonaten aufgrund der Klimaänderung (Temperatur, Sonneneinstrahlung) ansteigen wird.

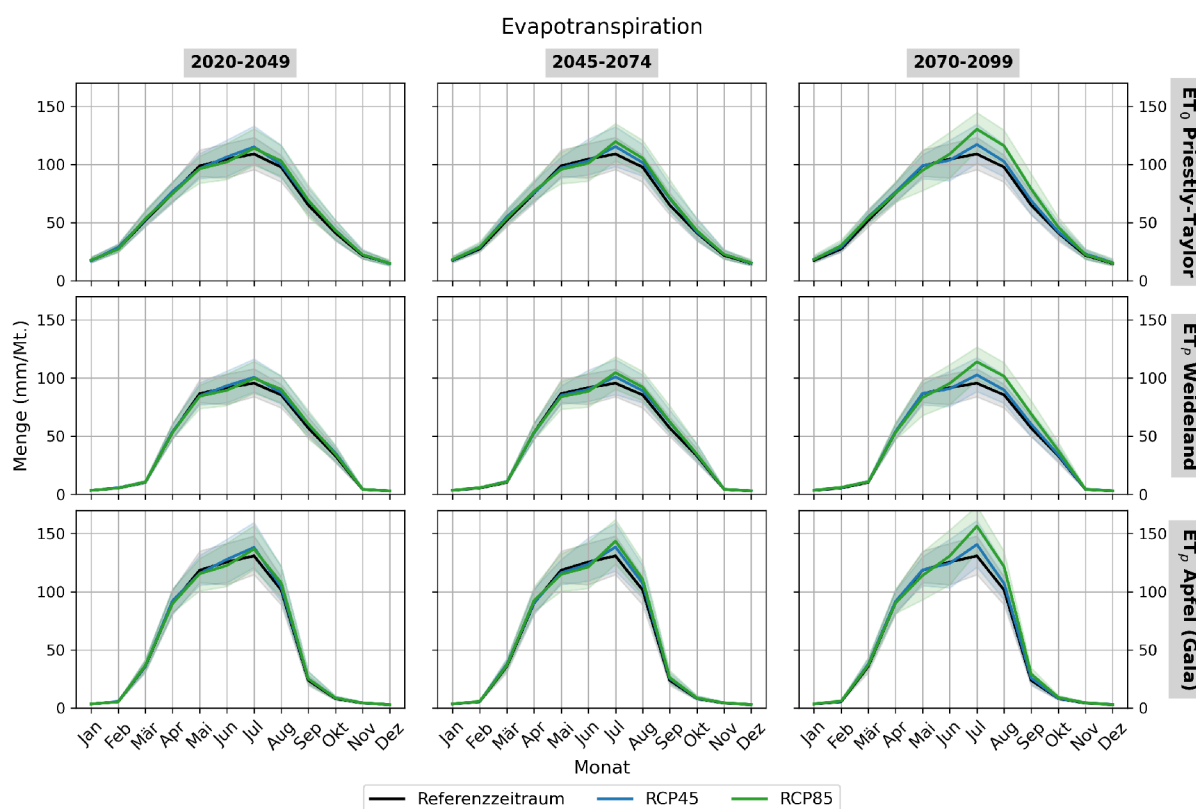


Abb. 7.1: Entwicklung der monatlichen Evapotranspiration für unterschiedliche Zeithorizonte. Die Abbildung zeigt die berechnete Evapotranspiration (Verdunstung + Transpiration) für die Referenzfläche (ET_0), Weideland und Apfelbäume. Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5) für die jeweiligen Zeithorizonte. Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatssummenwerte in den Zeitperioden (Extremwerte).

7.2 Bewässerungsbedarf Kulturen

Die Abbildungen 7.2 bis 7.5 zeigen den zu erwartenden Bewässerungsbedarf für die Kulturen Weideland, Naturwiese, Raigras und Apfelbäume für verschiedene Zeithorizonte (Anfang des Jahrhunderts, Mitte des Jahrhunderts, Ende des Jahrhunderts) in Abhängigkeit vom Bodentyp und vom Emissionspfad. Die durchgezogenen Linien zeigen die Medianwerte und die schraffierten Flächen die Bereiche zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatssummenwerte in den Zeit-

räumen. Die Ergebnisse hängen stark von der Wasserspeicherfähigkeit der Böden ab. Bodentyp 1 (mittelgründig) kann Regenwasser besser speichern und benötigt daher deutlich weniger Bewässerung als Bodentyp 2 (flachgründig) und insbesondere Bodentyp 3 (sehr flachgründig).

Beim Bodentyp 1 ist unter heutigen klimatischen Bedingungen (Referenzperiode) für die Kulturen Weideland, Naturwiese und Raigras in einem Normaljahr keine Bewässerung erforderlich – entsprechend zeigen die Medianwerte (schwarze Linie) für alle Monaten einen Wert von null. Nur in sehr trockenen Jahren wäre eine Bewässerung nötig, um den optimalen Ertrag ohne Wasserstress zu erzielen (erkennbar an der schwarz schraffierten Fläche, die über null liegt). Auch in der nahen Zukunft (2020–2049) und Mitte des Jahrhunderts (2045–2074) ist für Weideland und Naturwiese (siehe Abbildung 7.2 & 7.3) im Median weiterhin kein wesentlicher Bewässerungsbedarf zu erwarten (durchgezogene blaue (RCP 4.5) und grüne (RCP 8.5) Linien liegen weitgehend bei null). Erst gegen Ende des Jahrhunderts (2070–2099) zeigt sich ein leichter Anstieg des Medianbedarfs. In besonders trockenen Jahren nimmt der Bewässerungsbedarf jedoch deutlich zu, wie an den vergrößerten schraffierten Flächen für RCP 4.5 und RCP 8.5 erkennbar – sie übersteigen klar die heutige Schwankungsbreite. So steigt der Bedarf für Naturwiese gemäss Berechnungen im Juli in einem sehr trockenen Jahr (90%-Quantil) bis Ende des Jahrhunderts von aktuell rund 20 mm auf beinahe 60 mm. Bei der Kultur Raigras (entspricht etwa einer intensiv genutzten Kunstwiese) ist bereits in naher und mittlerer Zukunft in einem Normaljahr mit einer leichten Wasserlimitation zu rechnen (siehe Abbildung 7.4).

Beim Bodentyp 2 ist gemäss Berechnung unter den heutigen klimatischen Bedingungen in einem Normaljahr (Median) für die Kulturen Weideland und Naturwiese keine Bewässerung erforderlich, um optimale Erträge zu erzielen. Für die Kultur Raigras zeigt sich hingegen bereits ein geringer Bewässerungsbedarf, was sich in den durchgezogenen schwarzen Linien über null widerspiegelt. Bereits in naher Zukunft ist davon auszugehen, dass dieser Bodentyp bewässert werden müsste, um optimale Wachstumsbedingungen sicherzustellen – insbesondere bei intensiver genutzten Kulturen wie Raigras. Sowohl die Medianwerte (durchgezogene Linien) als auch die Schwankungsbreite (schraffierte Flächen) nehmen merklich zu, was auf eine stärkere und häufigere Wasserlimitation in den Sommermonaten hinweist.

Beim Bodentyp 3 wäre gemäss Berechnung bereits unter den heutigen klimatischen Bedingungen (Referenzperiode) für alle Kulturen eine Bewässerung erforderlich, um optimale Erträge zu erzielen. Dies liegt am sehr geringen Wasserspeichervermögen dieses Bodens: Schon wenige Tage ohne Niederschlag können bereits zu Wasserstress führen. In der Folge steigt die Bewässerungsbedürftigkeit in naher und mittlerer Zukunft nur begrenzt an, da dieser Bodentyp bereits heute kaum in der Lage ist, Niederschlagswasser zu speichern. Gegen Ende des Jahrhunderts zeigt sich jedoch trotzdem ein deutlich höherer Bewässerungsbedarf. Die Möglichkeiten, durch gezielte Bewässerung relevante Ertragseinbussen zu vermeiden, bleiben aufgrund der begrenzten Wasserspeicherfähigkeit dieses Bodens eingeschränkt.

Für die Kultur Apfel (Sorte Gala) ergibt die Modellierung bereits in der Referenzperiode einen Median-Bewässerungsbedarf von rund 10 mm im Juli, mit Spitzenwerten von bis zu 60 mm in besonders trockenen Jahren (siehe Abbildung 7.5).

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit des Wasserbedarfs von den Bodeneigenschaften. Dies unterstreicht die Bedeutung eines schonenden Umgangs mit den Böden, um die Wasserspeicherkapazität zu erhalten – oder je nach Bewirtschaftung sogar gezielt zu verbessern. Denn bei geringer Wasserspeicherkapazität ist auch eine Bewässerung nur eingeschränkt wirksam, da das Wasser nicht ausreichend im Boden gehalten werden kann.

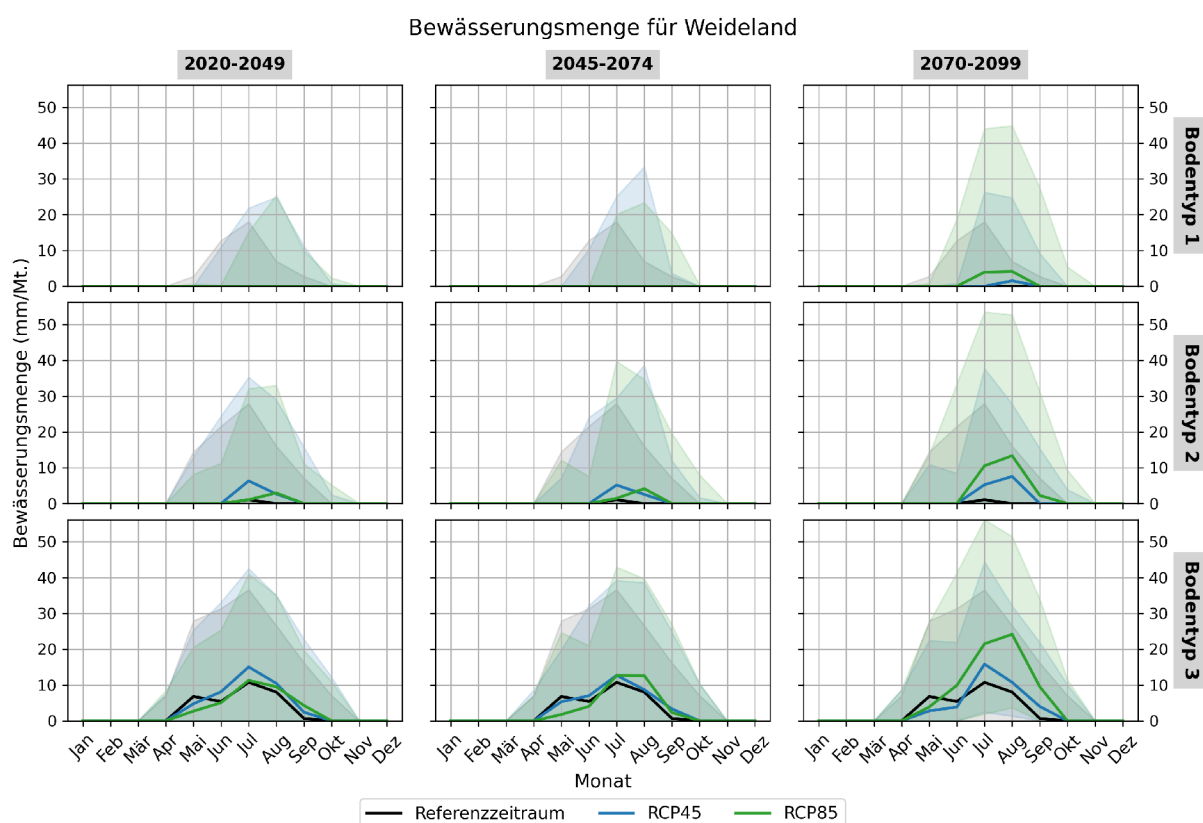


Abb. 7.2: Entwicklung des monatlichen Bewässerungsbedarfes von Weideland für unterschiedliche Zeithorizonte und die unterschiedlichen Bodentypen (Bodentyp 1: Mittelgründig, Bodentyp 2: Flachgründig, Bodentyp 3: Sehr flachgründig). Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden (Extremwerte).

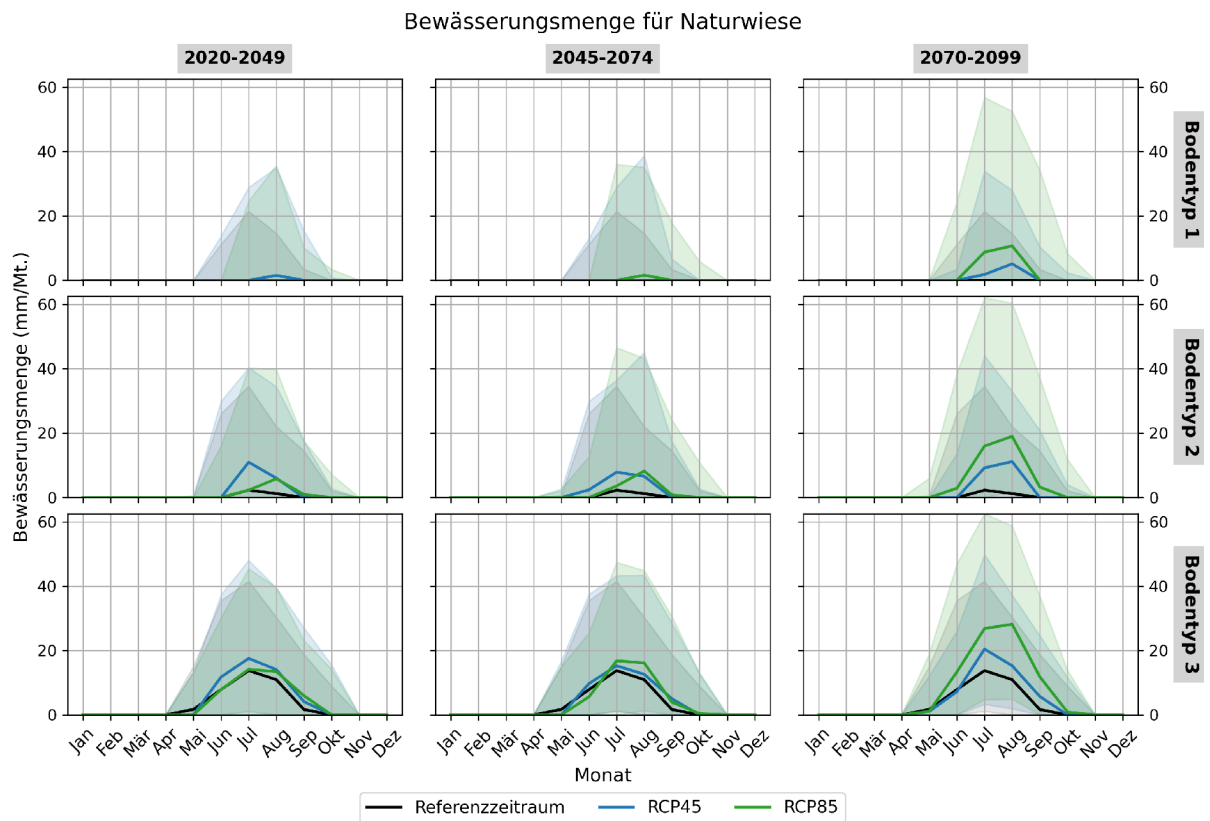


Abb. 7.3: Entwicklung des monatlichen Bewässerungsbedarfes von Naturwiese für unterschiedliche Zeithorizonte und die unterschiedlichen Bodentypen (Bodentyp 1: Mittelgründig, Bodentyp 2: Flachgründig, Bodentyp 3: Sehr flachgründig). Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden (Extremwerte).

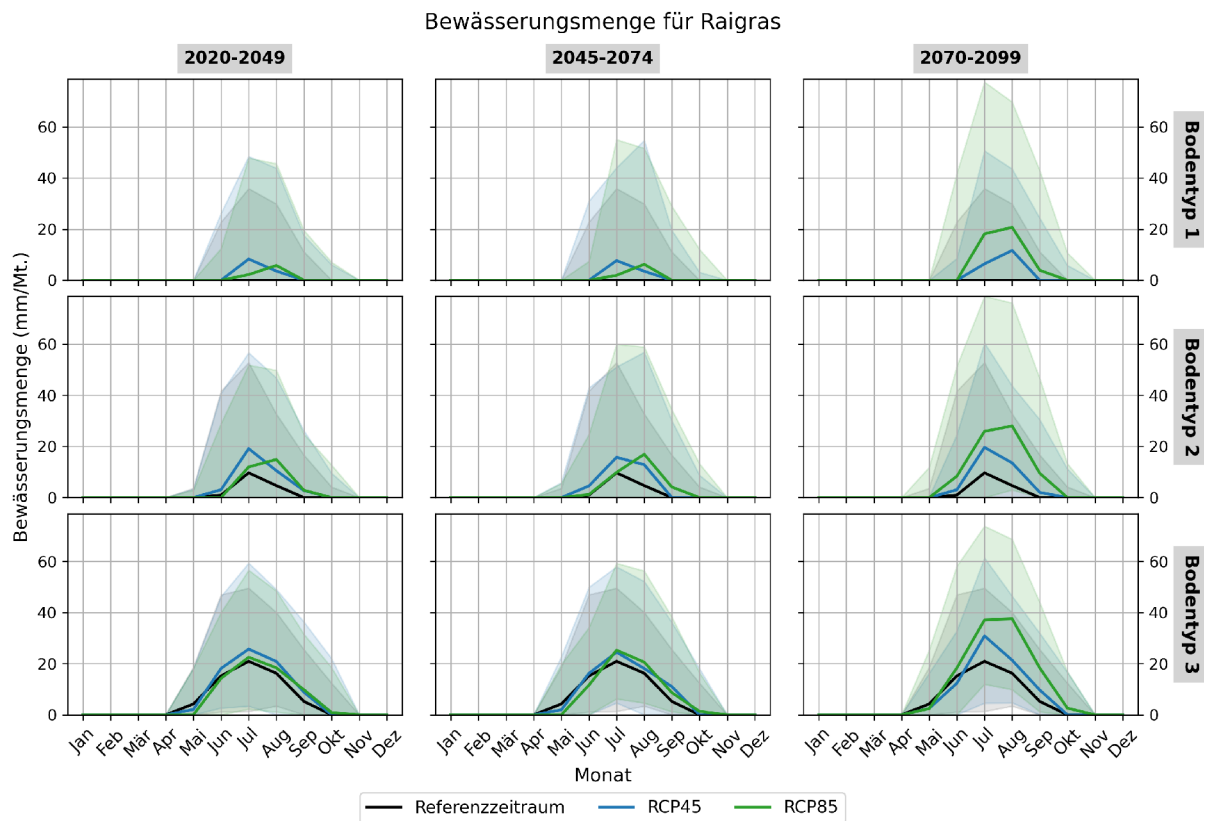


Abb. 7.4: Entwicklung des monatlichen Bewässerungsbedarfes von Raigras für unterschiedliche Zeithorizonte und die unterschiedlichen Bodentypen (Bodentyp 1: Mittelgründig, Bodentyp 2: Flachgründig, Bodentyp 3: Sehr flachgründig). Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden (Extremwerte).

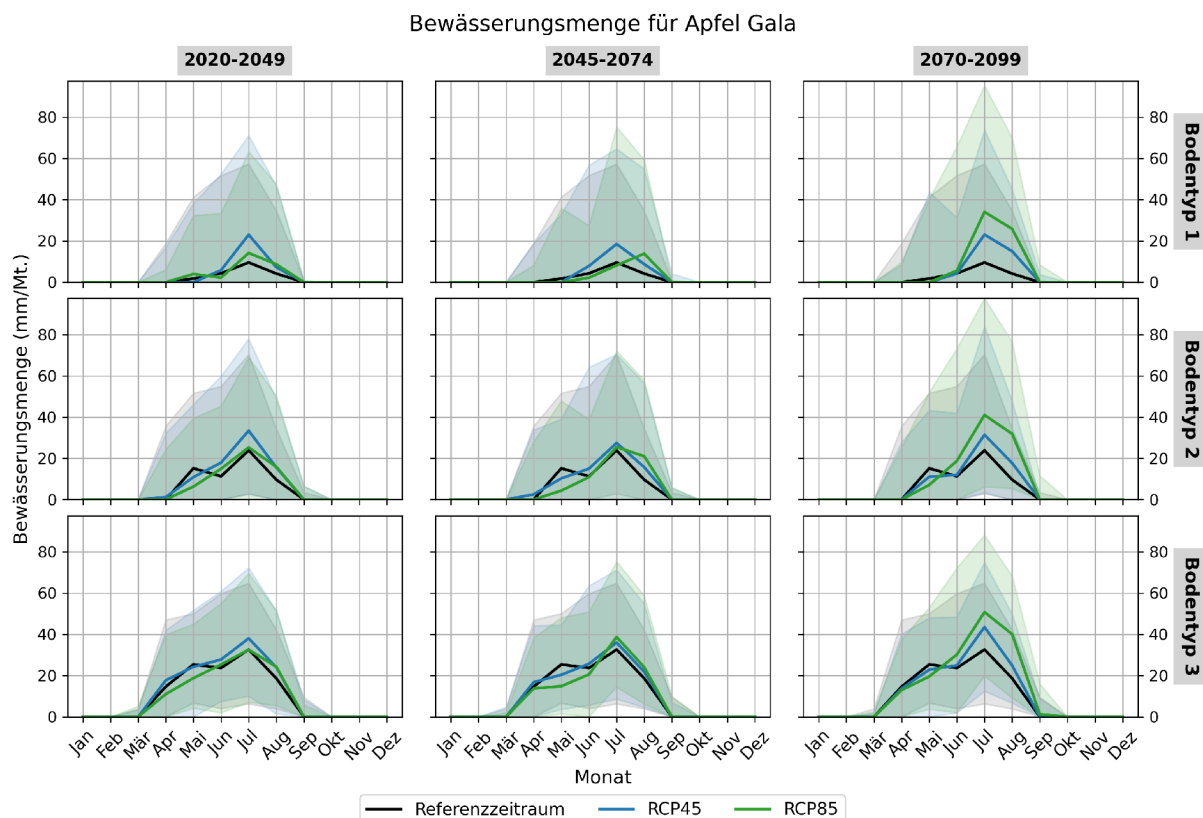


Abb. 7.5: Entwicklung des monatlichen Bewässerungsbedarfes von Apfelbaumkulturen für unterschiedliche Zeithorizonte und die unterschiedlichen Bodentypen (Bodentyp 1: Mittelgründig, Bodentyp 2: Flachgründig, Bodentyp 3: Sehr flachgründig). Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden (Extremwerte).

7.3 Bewässerungsbedarf Landwirtschaftsflächen Bergell

7.3.1 Gesamte Landwirtschaftsfläche Bergell

Abbildung 7.6 zeigt die Entwicklung der grob geschätzten jährlichen Bewässerungsmenge für das Bergell mittels Boxplots (siehe Abbildung 7.7). Für Anfang bis Mitte des Jahrhunderts ist gemäss Berechnung mit einer Zunahme des Medians um ca. 40–50% zu rechnen – von rund 130'000 m³ auf etwa 200'000 m³. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird im Falle ohne explizite Klimaschutzmassnahmen (RCP 8.5) beim Median beinahe eine Verdreifachung erwartet. Der Bedarf würde sich gemäss Berechnung auf ca. 350'000 m³ pro Jahr belaufen.

In sehr trockenen Jahren kann der Bewässerungsbedarf noch deutlich höher ausfallen – sogar bereits unter heutigen Klimabedingungen (Referenzzeitraum bzw. Ref.). Der maximale Bedarf steigt von derzeit etwa 450'000 m³ (90% Quantil) auf rund 700'000 m³ (Mitte des Jahrhunderts) bzw. auf beinahe 1 Mio. m³ (RCP 8.5, Ende des Jahrhunderts).

Die grösste Zunahme des Bewässerungsbedarfs erfolgt in den Sommermonaten (siehe Abbildung 7.8). Besonders im Juli zeigt sich ein markanter Anstieg: Der Medianbedarf steigt von rund 25'000 m³ (heute) auf etwa 50'000 m³ bis Mitte des Jahrhunderts und auf bis zu 100'000 m³ bis Ende des Jahrhunderts (RCP 8.5).

Entgegen der Erwartung resultiert im Emissionspfad 4.5 zu Beginn des Jahrhunderts ein etwas höherer Bewässerungsbedarf als im Emissionspfad 8.5, was auf die etwas höheren prognostizierten Niederschlagsmengen im Frühling zurückzuführen ist (siehe Abbildung 5.1). Ab Mitte des Jahrhunderts kehrt sich dieser Trend jedoch deutlich um. Der Median des Bewässerungsbedarfs liegt im Pfad RCP 8.5 Mitte des Jahrhunderts über jenem von RCP 4.5 und steigt in der zweiten Jahrhunderthälfte deutlich an, während er sich unter RCP 4.5 weitgehend stabilisiert.

Die hier berechneten Werte beziehen sich auf die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche im Tal. Eine flächendeckende Bewässerung ist jedoch weder wirtschaftlich, technisch noch ökologisch sinnvoll. Insbesondere auf den Flächen mit Bodentyp 2 und vor allem Bodentyp 3 ist eine Bewässerung fragwürdig, da die geringe Wasserspeicherfähigkeit die Wirksamkeit stark einschränkt. Diese beiden Bodentypen nehmen jedoch einen grossen Anteil der Gesamtfläche ein – entsprechend hoch ist auch ihr Anteil an der berechneten Gesamtbewässerungsmenge. Um realistischere Werte für die mögliche Dimensionierung eines künftigen Bewässerungssystems zu erhalten, wird im nächsten Kapitel der Bewässerungsbedarf für prioritäre Gebiete, bei denen eine Bewässerung am ehesten sinnvoll erscheint, separat ausgewiesen.

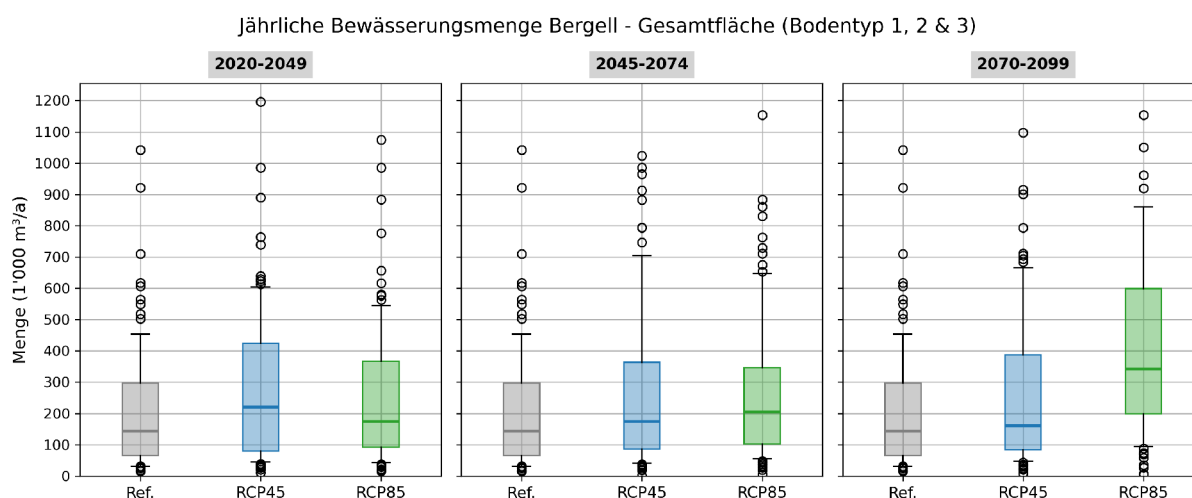


Abb. 7.6: Entwicklung der jährlichen Bewässerungsmenge im Bergell für verschiedene Zeithorizonte. Der schwarze Boxplot zeigt die Werte der Referenzperiode, der blaue Boxplot die Werte des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Boxplot der Daten des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Erläuterungen zum Boxplot sind in Abbildung 7.7 ersichtlich. Die dargestellten Werte beziehen sich auf die gesamte Landwirtschaftsfläche im Bergell.

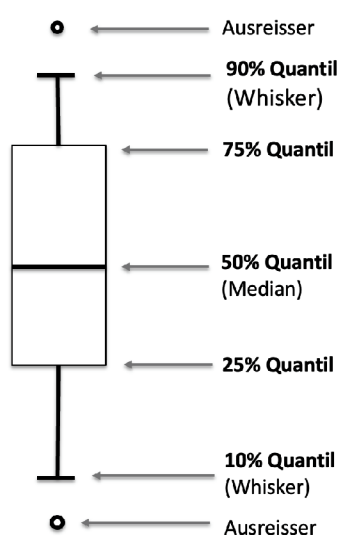


Abb. 7.7: Illustration des Boxplots zur Darstellung der jährlichen Bewässerungsmengen. Für jede Zeitperiode und jeden Emissionspfad wird jeweils ein Boxplot erstellt. Dabei werden die Resultate der verschiedenen Klimamodellketten als Datengrundlage verwendet. Ein Boxplot zeigt die statistische Verteilung von Werten: Die Box repräsentiert den Bereich zwischen dem 25 % und 75% Quantil, die horizontale Linie in der Box markiert den Median (50% Quantil). Die sogenannten "Whisker" reichen bis zum 10% bzw. 90% Quantil. Werte ausserhalb dieses Bereichs gelten als Ausreißer und werden als Punkte dargestellt.

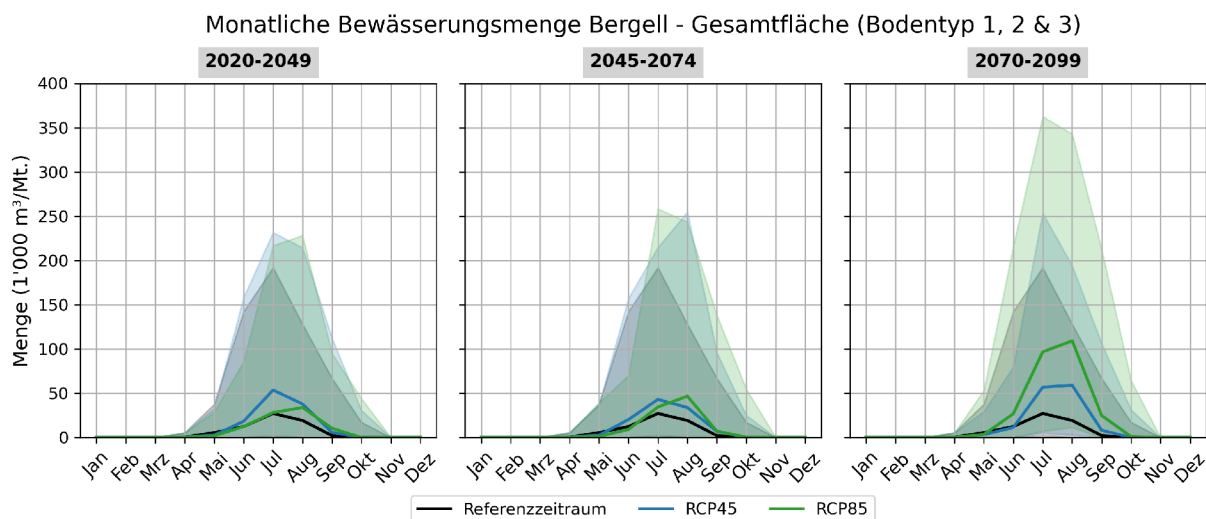


Abb. 7.8: Entwicklung der monatlichen Bewässerungsmenge im Bergell für unterschiedliche Zeithorizonte. Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden (Extremwerte). Die dargestellten Werte beziehen sich auf die gesamte Landwirtschaftsfläche im Bergell.

7.3.2 Prioritäre Gebiete

Die Gebiete, die sich künftig für eine Bewässerung eignen könnten, beschränken sich weitgehend auf ebene Flächen mit mittelgründigen Böden, die mindestens ein mässiges Wasserspeichervermögen aufweisen und weder staunass noch übermässig durchlässig sind. Auf solchen Flächen lässt sich ein vergleichsweise guter Ertrag erzielen, und das zugeführte Wasser kann angemessen im Boden gehalten werden – eine Bewässerung könnte sich dort also allenfalls lohnen. Abbildung 7.9 zeigt einen Überblick über diese Flächen, unterteilt in Priorität 1 (Gebiete, in denen eine Bewässerung künftig am ehesten sinnvoll erscheint) und Priorität 2 (Gebiete, in denen eine Bewässerung ebenfalls in Frage kommen könnte). Die Aus-

wahl erfolgte unter Berücksichtigung von Topografie, Bodeninformationen, Wasserbedarfsanalyse sowie in Absprache mit der Landwirtschaftskommission. In Tabelle 7.1 sind die Flächenausdehnungen der unterschiedlichen landwirtschaftlichen Nutzungsarten in diesen Gebieten aufgeführt. Diese Angaben sind für die Abschätzung des Bewässerungsbedarfs erforderlich.

Die jährliche Bewässerungsmenge für die prioritären Gebiete ist in Abbildung 7.10 (Priorität 1) und Abbildung 7.11 (Priorität 2) dargestellt. Die entsprechenden monatlichen Bewässerungsmengen sind in den Abbildungen 7.12 und 7.13 ersichtlich. Die Werte vermitteln einen Eindruck von der potenziell insgesamt benötigten Wassermenge. In einem Normaljahr wird voraussichtlich auch in Zukunft nur eine geringe Menge Wasser für die Bewässerung erforderlich sein. So liegt der berechnete Medianbedarf beispielsweise Anfang und Mitte des Jahrhunderts in den Gebieten mit Priorität 1 bei 0 bis ca. 3'000 m³ pro Jahr und Gebiet. In besonders trockenen Jahren kann der Bedarf jedoch stark ansteigen - bereits unter den heutigen Klimabedingungen auf ca. 10'000 bis 20'000 m³ (90% Quantil) pro Gebiet.

Anfang und Mitte des Jahrhunderts dürfte dieser Spitzenbedarf um bis zu ca. 50 % zunehmen und gegen Ende des Jahrhunderts im Extremfall (RCP 8.5) sogar bis zu ca. dreimal so hoch sein. Das bedeutet, dass Trockenperioden und die damit einhergehenden Phasen mit Wasserstress im Laufe dieses Jahrhunderts häufiger auftreten und stärker ausfallen werden. Dies gilt insbesondere, wenn kein ambitionierter Klimaschutz betrieben wird. Dies wird durch den markanten Unterschied zwischen RCP 4.5 und RCP 8.5 am Ende des Jahrhunderts verdeutlicht.

Die Gebiete mit Priorität 2 befinden sich auf flachgründigeren Böden (Bodentyp 2) als jene mit Priorität 1 (Bodentyp 1). Aufgrund des geringeren Wasserspeichervermögens ist die Bewässerung dort weniger effizient, sodass für die gleiche Fläche eine grössere Wassermenge erforderlich ist. Dies zeigt sich beispielhaft im Vergleich der Gebiete Crotto (Priorität 1) und Samarovan (Priorität 2): Obwohl beide Gebiete eine ähnliche Flächenausdehnung und Nutzungsverteilung aufweisen, ist der berechnete Bewässerungsbedarf für Samarovan höher.

Aufgrund der Unsicherheiten bei den Eingangsdaten – insbesondere den Bodeneigenschaften – sind die berechneten Werte lediglich als grobe Richtwerte zu verstehen. Für die konkrete Planung von Speichervolumen oder anderen Bewässerungsinfrastrukturen ist daher eine sorgfältige Überprüfung erforderlich – insbesondere unter Einbezug detaillierter Bodendaten und Bodenfeuchtemessungen. Nicht zuletzt wäre in einem nächsten Schritt auch eine vertieften Analyse der lokalen Erfahrungswerte zu Erträgen erforderlich. In der Praxis gilt Wieseland zum Zweck der Ertragsicherung üblicherweise nur dann als bewässerungswürdig, wenn der Ertragsausfall infolge von Trockenheit in durchschnittlich jedem dritten Jahr mehr als ein Drittel beträgt und die Bodenspeicherkapazität ausreichend ist (Marbot et al., 2013).

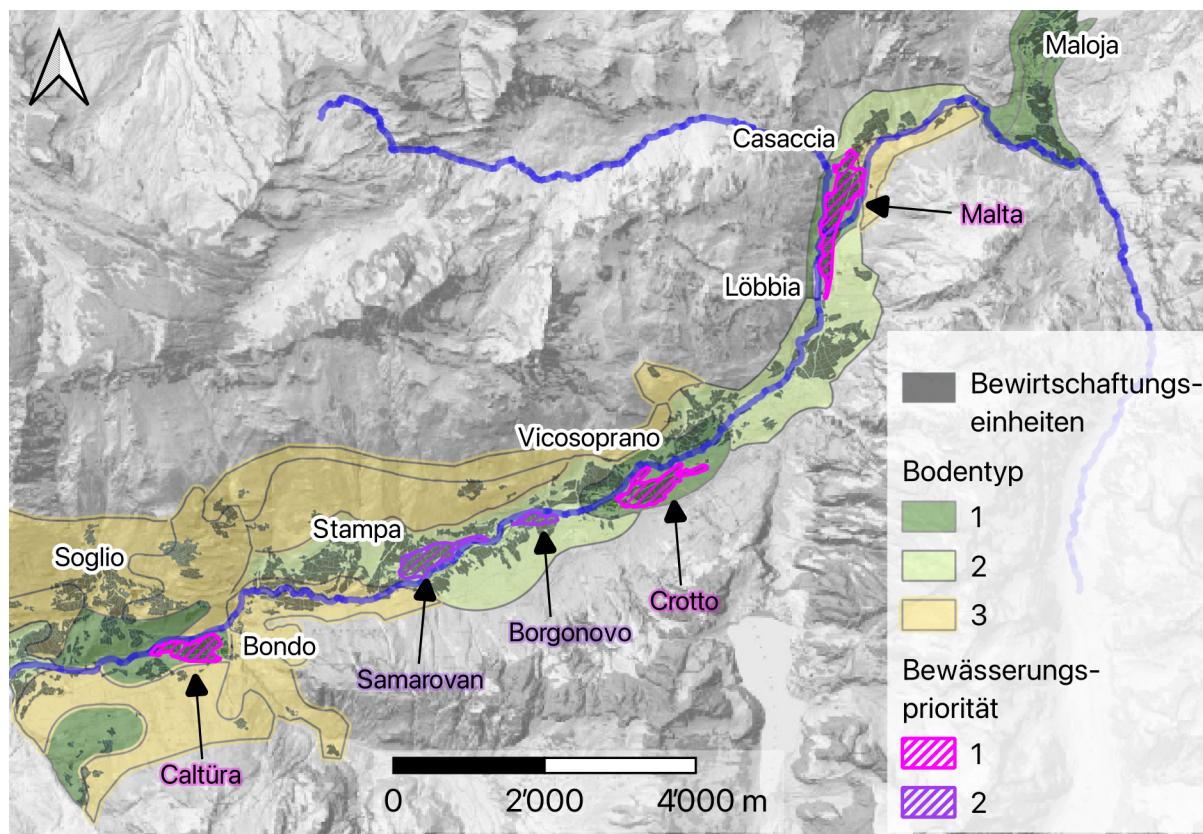


Abb. 7.9: Darstellung der Gebiete, die für eine allfällige Bewässerung priorisiert werden, gemäss Wasserbedarfsanalyse und Erfahrungswerten der Landwirte. Die Gebiete befinden sich im Wesentlichen auf ebenen Flächen der Bodentypen 1 (Priorität 1) und 2 (Priorität 2).

Tab. 7.1: Auflistung der für eine Bewässerung prioritären Gebiete gemäss Wasserbedarfsanalyse und Erfahrungswerten der Landwirte, sowie der Quantifizierung der dazugehörigen Landwirtschaftsflächen. Die Gebiete befinden sich im Wesentlichen auf den flachen Flächen der Bodentypen 1 (Priorität 1) und 2 (Priorität 2).

Gebiet	Bewässerungspriorität	LN-Flächen	Überlagernde Nutzung
Malta (Casaccia-Löbbia)	1	ca. 36 ha Dauerwiesen	-
Crotto (Vicosoprano)	1	ca. 18 ha Dauerwiesen ca. 1.8 ha Ackerfläche ca. 0.4 ha Dauerweiden	-
Caltüra (Bondo)	1	ca. 17 ha Dauerwiesen	ca. 8 ha Hochstamm-Feldobstbäume/ Nussbäume (ca. 30 Bäume)
Borgonovo	2	ca. 4.5 ha Dauerwiesen ca. 1 ha Ackerfläche	-
Samarovan (Stampa)	2	ca. 17.5 ha Dauerwiesen ca. 2.1 ha Ackerfläche ca. 1.7 ha Dauerweiden	-

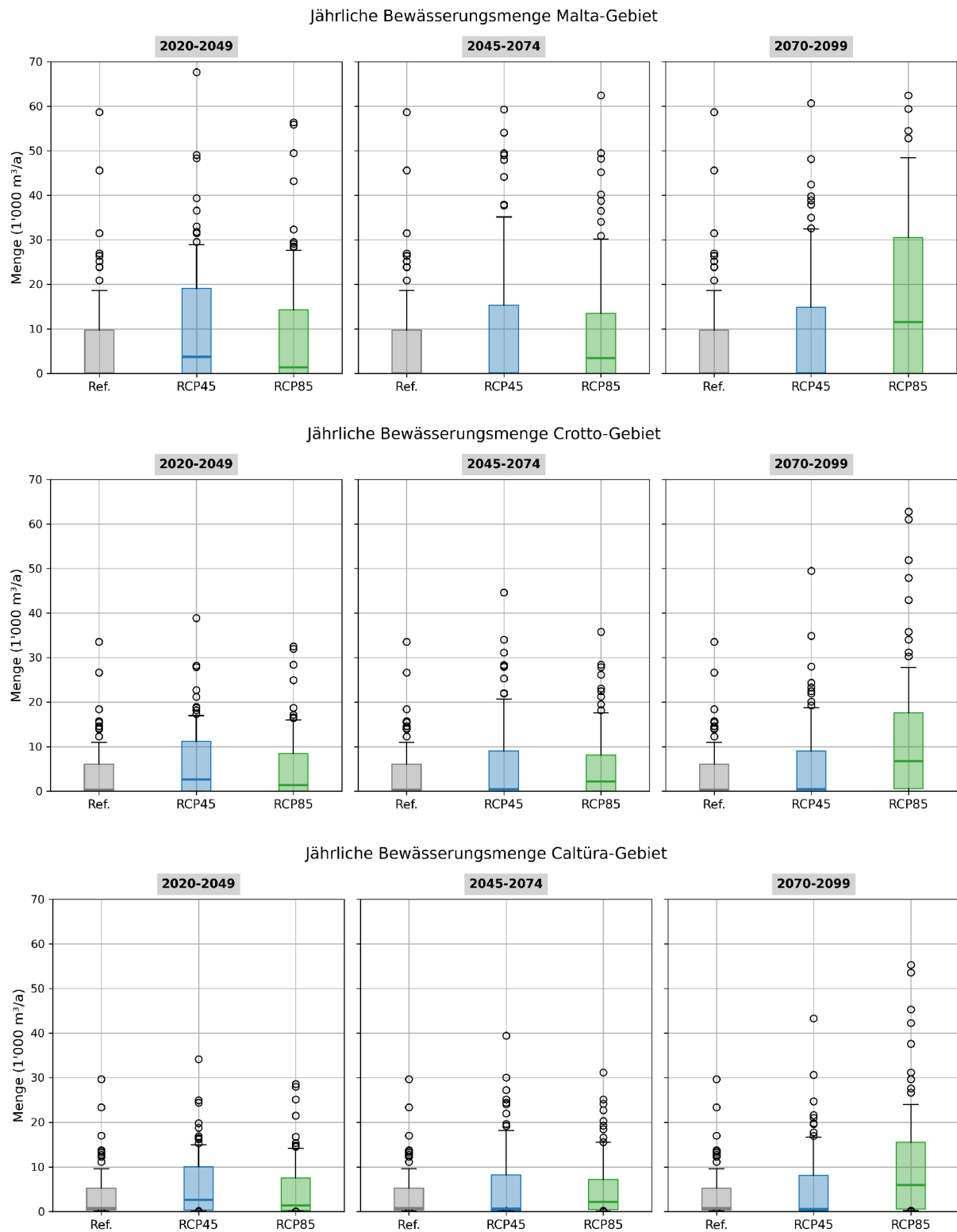


Abb. 7.10: Entwicklung der jährlichen Bewässerungsmenge in den Gebieten mit Priorität 1 für verschiedene Zeithorizonte. Der schwarze Boxplot zeigt die Werte der Referenzperiode, der blaue Boxplot die Werte des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Boxplot der Daten des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Erläuterungen zum Boxplot sind in Abbildung 7.7 ersichtlich.

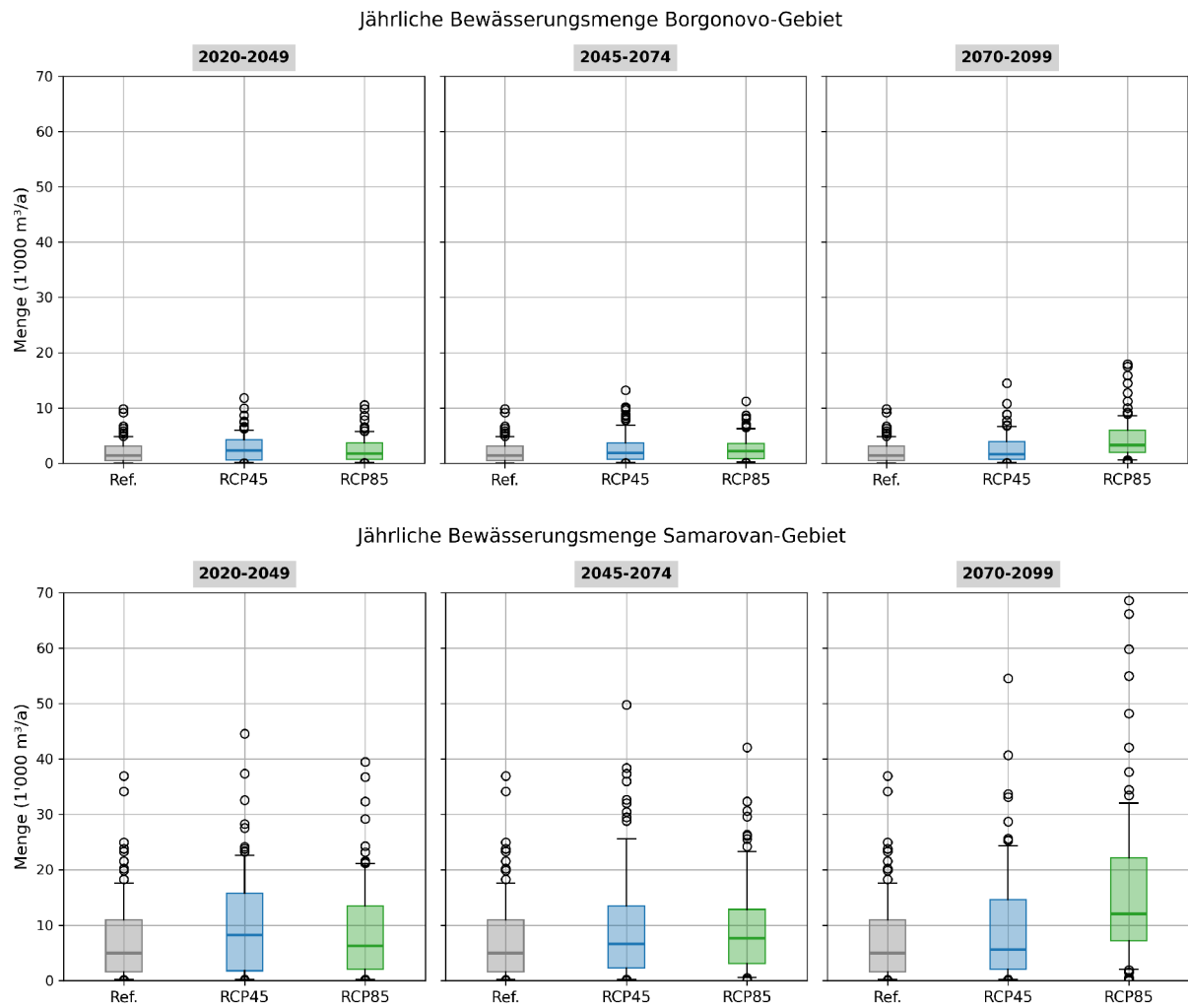


Abb. 7.11: Entwicklung der jährlichen Bewässerungsmenge in den Gebieten mit Priorität 2 für verschiedene Zeithorizonte. Der schwarze Boxplot zeigt die Werte der Referenzperiode, der blaue Boxplot die Werte des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Boxplot der Daten des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Erläuterungen zum Boxplot sind in Abbildung 7.7 ersichtlich.

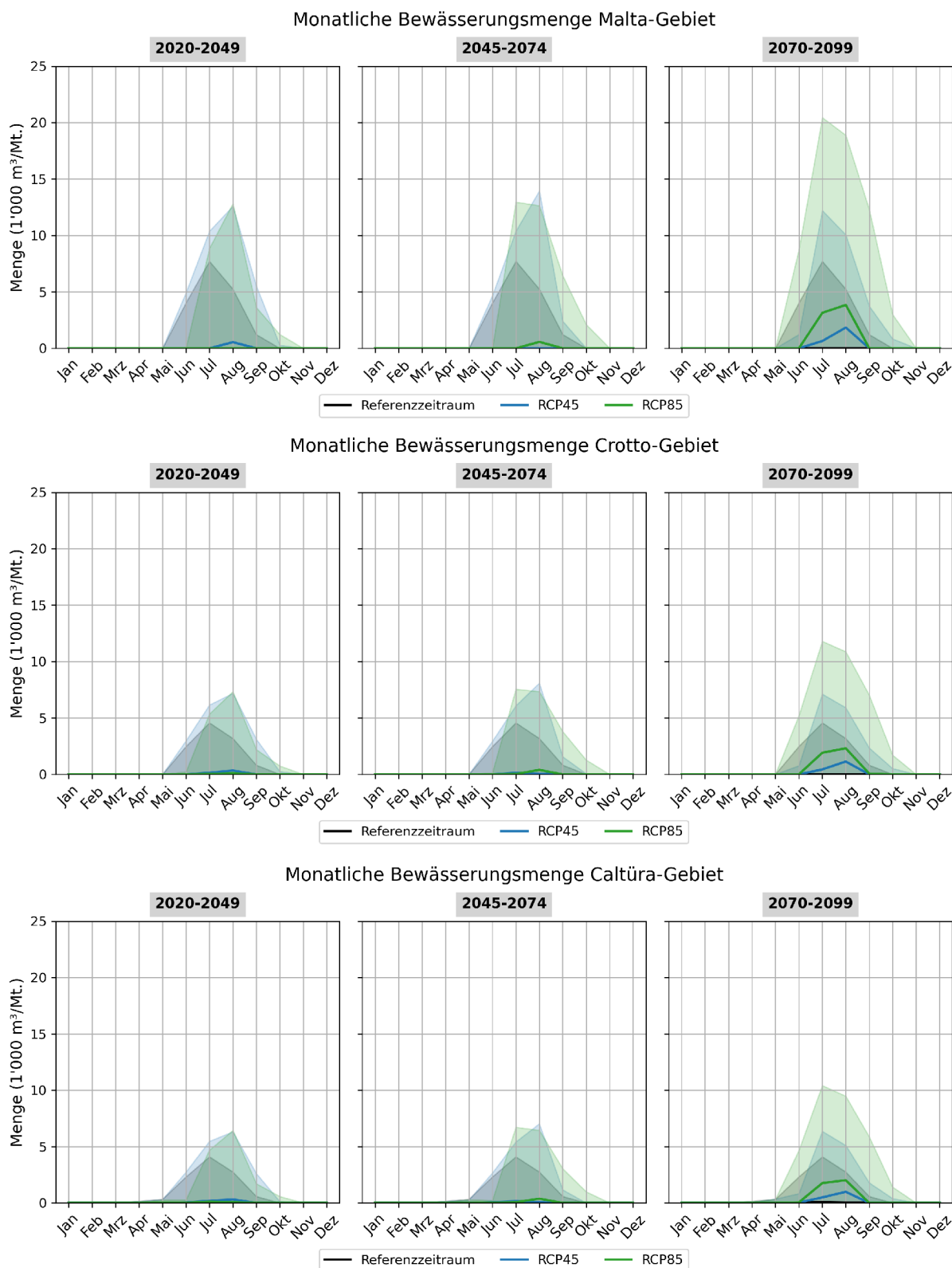


Abb. 7.12: Entwicklung der monatlichen Bewässerungsmenge in den Gebieten mit Priorität 1 für unterschiedliche Zeithorizonte. Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden.

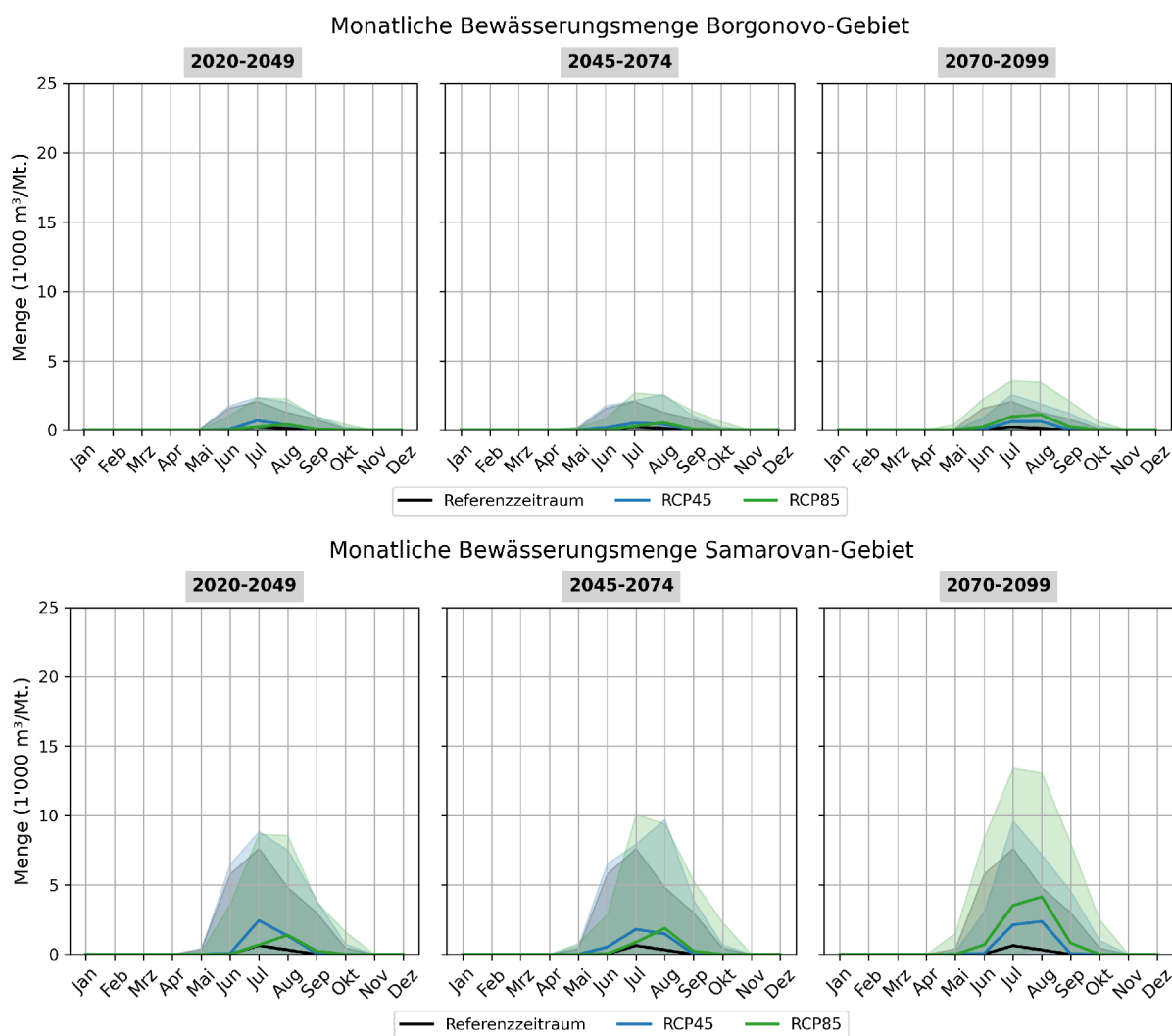


Abb. 7.13: Entwicklung der monatlichen Bewässerungsmenge in den Gebieten mit Priorität 2 für unterschiedliche Zeithorizonte. Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden.

7.4 Vieh Talboden

Nach Angaben der Landwirtschaftskommission wird der Viehbestand in absehbarer Zeit in etwa gleich bleiben. Da der Trinkwasserbedarf im Vergleich zu einer möglichen Bewässerung sehr gering ist, wurden keine genaueren Untersuchungen durchgeführt. Da die Ergiebigkeit der Quellen in Zukunft abnehmen wird, ist nicht auszuschließen, dass es lokal – beispielsweise bei einzelnen Betrieben, insbesondere bei Alpbetrieben (vgl. Kap. 7.4) – zu Engpässen kommen kann.

7.5 Alpen

Schneesmelze	<p>Die Nullgradgrenze von ca. 850 m ü. M. (Referenzperiode 1981 - 2010) steigt Mitte des Jahrhunderts im Winter um 400 m bis 650 m auf eine Höhe von bis zu 1'500 m ü. M. und Ende des Jahrhunderts um 700 m bis 1'050 m auf bis zu 1'900 m ü. M. (CH2018, 2018, Schweizweit). Unterhalb von 1'000 m ü. M. wird die Schneebedeckung bis Mitte des Jahrhunderts um etwa die Hälfte abnehmen und bis Ende des Jahrhunderts wahrscheinlich sogar um mehr als 80 Prozent (CH2018, 2018, Schweizweit). Aber auch höhere Lagen sind betroffen. Abbildung 7.14 zeigt eine grobe Abschätzung der Auswirkungen der Veränderung der Schneesmelze auf die Alpenbetriebe. Eher tiefer gelegene Betriebe auf der sonnenexponierten Talseite werden von der Veränderung am frühesten und stärksten betroffen sein.</p>
Geletscher	<p>Abbildung 7.15 zeigt eine grobe Abschätzung der Auswirkungen des Gletscherschwundes auf die Alpbetriebe. Betriebe, die heute im Einzugsgebiet eines Gletschers liegen, werden von den veränderten Abflussverhältnissen der Gewässer am stärksten betroffen sein.</p>
Beurteilung Betriebe	<p>Die potenzielle Wasserknappheit wurde für jeden Alpbetrieb gutachterlich eingeschätzt. Dabei wurden der Rückgang der Schneesmelze, das Abschmelzen der Gletscher, der spezifische Wasserbedarf sowie die Erfahrungen der Betriebsleitenden berücksichtigt. Auf dieser Grundlage erfolgte eine Einteilung in die drei Kategorien "gering", "mittel" und "gross" (siehe Abbildung 7.16, Tabelle 7.2).</p> <p>Bei Betrieben mit der Einstufung "gross" ist in naher Zukunft mit einer ausgeprägten Wasserknappheit zu rechnen. Soll die Bewirtschaftung weiterhin sichergestellt werden, sind möglichst frühzeitig konkrete Massnahmen zum Wasserrückhalt zu planen und umzusetzen.</p> <p>Betriebe, die der Kategorie "mittel" zugeordnet wurden, weisen ein moderates Risiko auf. Hier sollten mögliche Massnahmen geprüft und in der mittelfristig vorbereitet werden.</p> <p>Bei Betrieben mit der Einstufung "gering" ist Wasserknappheit voraussichtlich nur in sehr trockenen Jahren ein Thema. In der mittelfristigen Planung sind für diese Betriebe voraussichtlich keine Massnahmen erforderlich.</p>

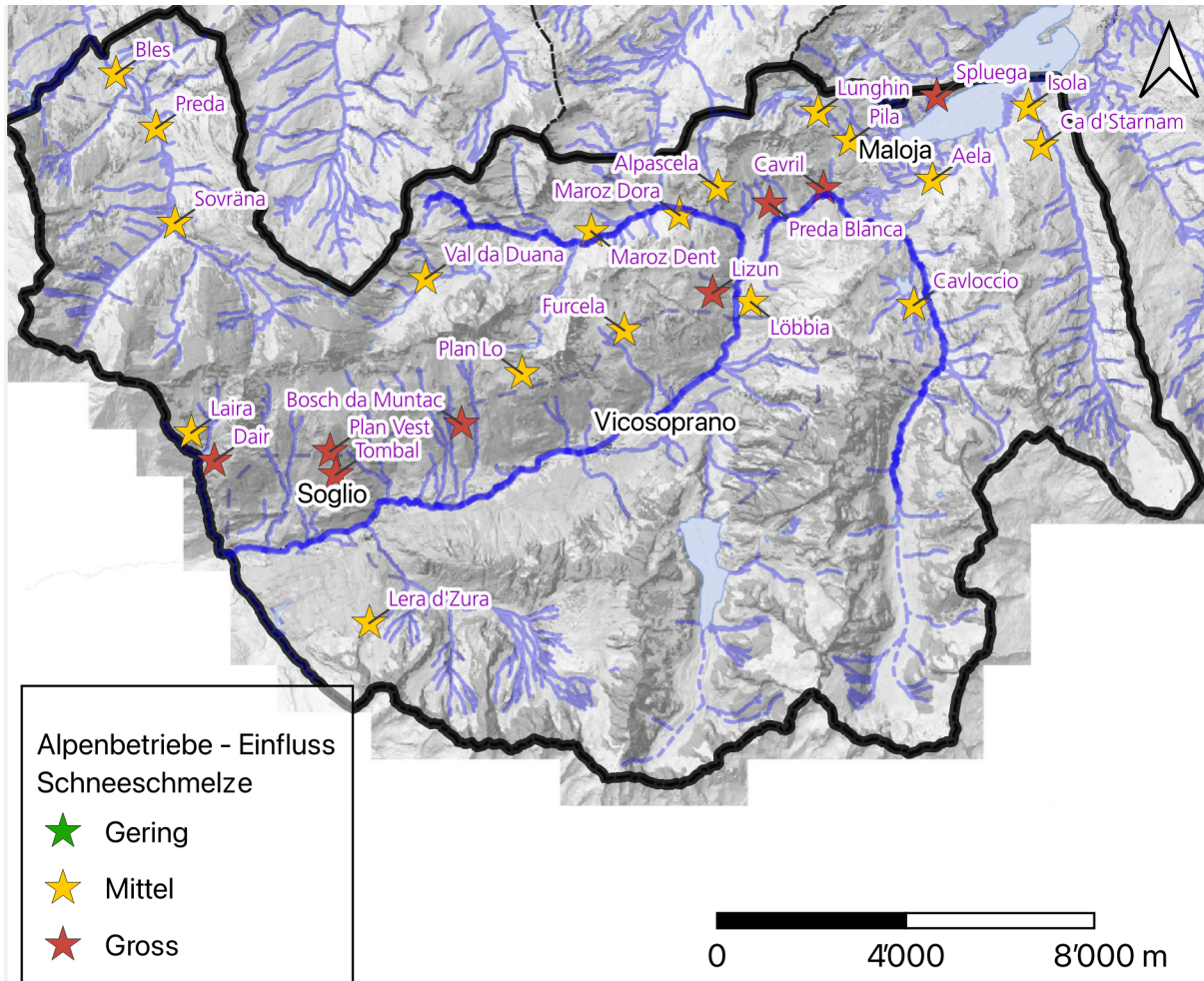


Abb. 7.14: Bewertung der Betroffenheit der Alpenbetriebe durch die Abnahme der Schneeschmelze.

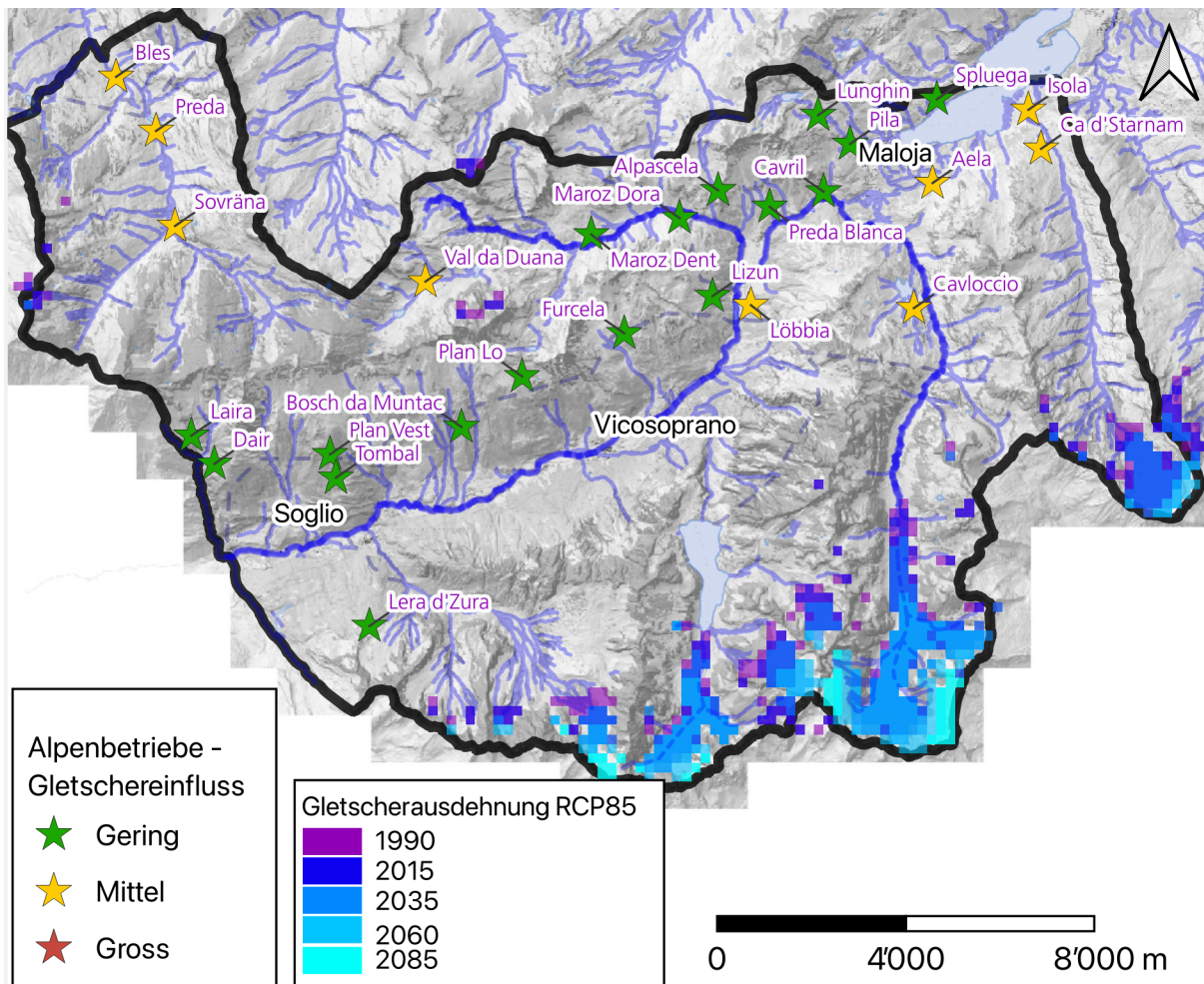


Abb. 7.15: Bewertung der Betroffenheit der Alpenbetriebe durch die Abnahme der Gletscher. Dargestellt ist auch die Gletscherentwicklung gemäss Emissionspfad RCP 8.5.

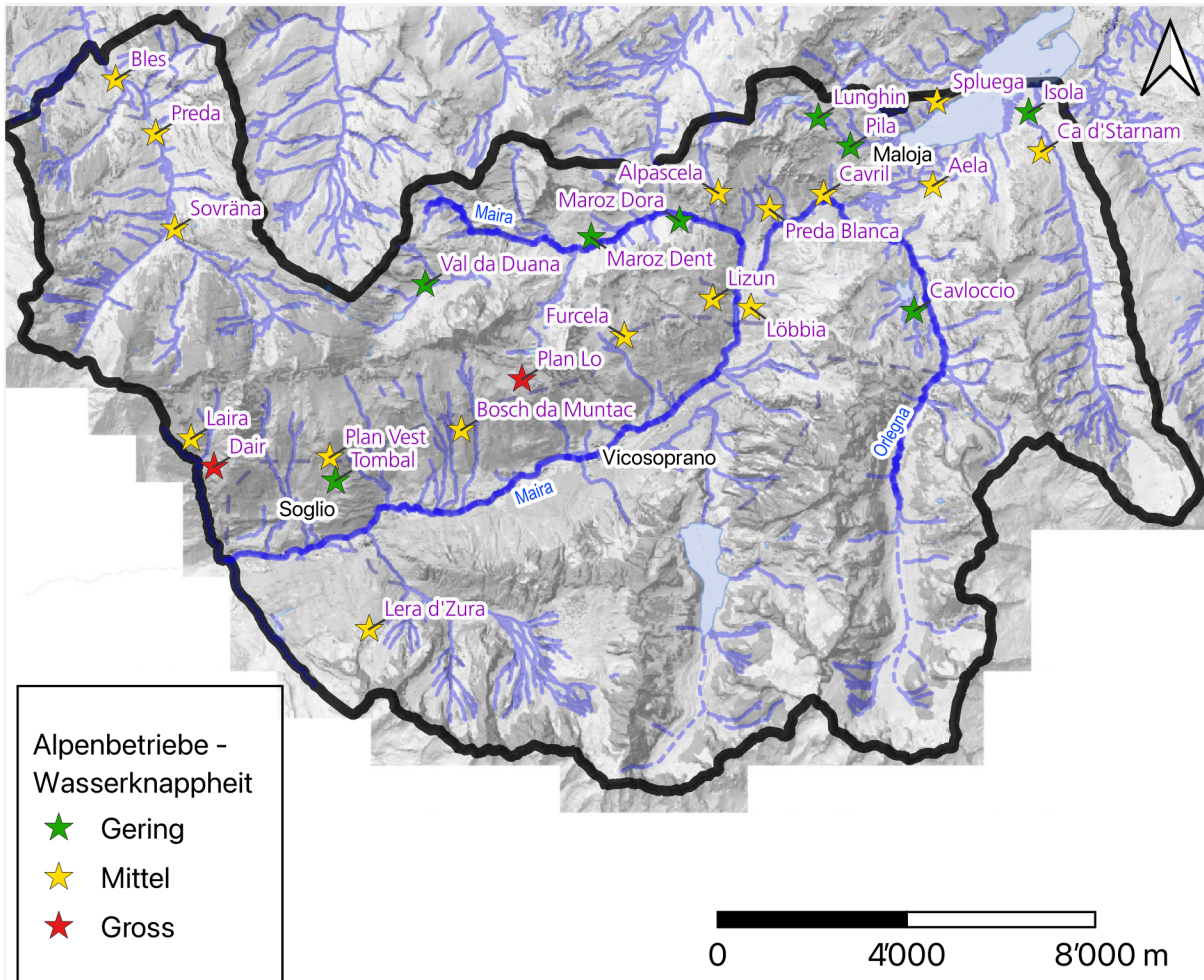


Abb. 7.16: Die Karte veranschaulicht, wie stark die Alpenbetriebe in mittlere Zukunft von Wasserknappheit und deren Folgen betroffen sein werden. Es handelt sich um das Ergebnis einer gutachterlichen Einschätzung, die in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftskommission erstellt wurde.

Tab. 7.2: In der Tabelle sind der geschätzte aktuelle Wasserbedarf und die Bewertung der Betroffenheit der Alpbetriebe durch künftige Wasserknappheit ersichtlich. Es handelt sich um das Ergebnis einer gutachterlichen Einschätzung, die in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftskommission erstellt wurde.

Alp	Geschätzter Wasserverbrauch (m ³ /Alpsaison)	Beurteilung Wasserknappheit	Bezug
Isola	187.5	Gering	Dank dem Silsersee und Fedoz-Bach gut versorgt.
Cavril	60	Mittel	Wird vom Fluss Orlegna und/oder Val da Pila versorgt.
Ca d'Sarnam	465	Mittel	Quelle (aus Gebiet Cavörga d'Ora)
Löbbia	225	Mittel	Quelle (aus Gebiet Bleis dal Glacc/ Splüga)
Spluega	76.5	Mittel	Quelle (aus Gebiet Ganda Grossa)
Aela (Maloja- / Aela-Gebiet)	517.5	Mittel	Quelle (aus dem Gebiet Aela). Ein Teich wird von dieser Quelle versorgt, ist allerdings teilweise trocken.
Pila	45	Gering	Fluss Inn
Lunghin	117	Gering	Dank Longhin-See gut versorgt.
Cavloccio	362.25	Gering	Dank dem Cavloccio-See und Forno-Gletscher gut versorgt.
Preda Blanca	222	Mittel	Quelle (aus Gebiet Val Verda)
Maroz Dora	225	Gering	Fluss Maira
Alpascela	127.5	Mittel	Bach aus Gebiet Alpascela
Maroz Dent	294	Gering	Fluss Maira und Nebenbäche
Lizun	37.5	Mittel	Quelle (aus Gebiet Plan d'Zura)
Furcela	222	Mittel	Quelle (aus Val Furcela/Piz da Maroz)
Plan Lò	179.25	Gross	Quelle (aus Gebiet Plan Lo d'Zura / Sascia Älta)
Bosch da Muntac	57.75	Mittel	Quelle (aus Gebiet Fraggia)
Tombal	503.25 mit Plan Vest und Val da Duana	Gering	Aus einer Quelle bzw. einem Wasserbecken, das für die Waldbrandbekämpfung errichtet wurde.
Plan Vest	"	Mittel	Quelle (aus Gebiet Vola d'Zott)
Val da Duana	"	Gering	Dank See Lagh pitt da la Duana gut versorgt.
Laira	38.25 mit Dair	Mittel	Quelle (aus Gebiet Sascia Älta)
Dair	"	Gross	Quelle (aus Gebiet Dair)
Lera d'Zura	36	Mittel	Quelle (aus Gebiet Mott da la Crusc)
Preda / Souvräna	1'185	Mittel	Fluss Äqua da Madris (Madrischer Rhein)
Bles	585	Mittel	Fluss Äqua da Madris (Madrischer Rhein)
Total	ca. 6'000		

8 Mögliche Massnahmen

8.1 Massnahmen Landwirtschaftsflächen (Talboden)

8.1.1 Bewässerung

Wasserspeicherung

In Kapitel 7.3 wurde der zukünftige Wasserbedarf der landwirtschaftlichen Flächen im Bergell unter Berücksichtigung des Klimawandels abgeschätzt und die Bewässerungsbedürftigkeit analysiert. Dabei zeigte sich, dass sich potenziell bewässerungswürdige Flächen vorwiegend auf ebene Standorte mit Bodentyp 1 beschränken (vgl. Kapitel 7.3.2). Für diese prioritären Flächen wurde der Bewässerungsbedarf separat ausgewiesen. Für die konkrete Dimensionierung eines Speicherbeckens wäre – wie in Kapitel 7.3.3 erläutert – jedoch eine vertiefte Analyse erforderlich. Die vorliegenden Berechnungen liefern dennoch eine grobe Grössenordnung, die als Grundlage dienen kann, um weiterführende Planungsschritte zu prüfen bzw. mögliche langfristige Massnahmen in Betracht zu ziehen. Eine denkbare Option wäre beispielsweise die Planung eines oder mehrerer Speicherbecken – etwa je eines für die prioritären Gebiete Malta, Crotto und Caltüra. Aus diesen könnten die jeweils angrenzenden bewässerungsbedürftigen Flächen versorgt werden.

Wasserbezug

Wie in Kapitel 6.1 dargelegt, könnte die Einbindung in das bestehende Kraftwerkssystem der ewz verschiedene Vorteile mit sich bringen – wie dies beispielsweise in der Gemeinde Domleschg praktiziert wird. Eine mögliche Option wäre die Nutzung des Ausgleichsbeckens Löbbia. Dadurch wäre es möglich, Wasser gezielt aus dem Becken in ein oder mehrere Speicherbecken weiterzuleiten. So wäre auch eine Mehrfachbefüllung pro Saison möglich. Dies würde eine kleinere Dimensionierung der Speicherbecken ermöglichen und gleichzeitig eine hohe betriebliche Flexibilität gewährleisten. Unter Umständen könnte so bereits ein Speichervolumen von wenigen Tausend Kubikmetern pro Gebiet ausreichen – oder, sofern eine direkte Wasserentnahme realisierbar ist, ganz auf Speicherbecken verzichtet werden. Eine solche Option könnte allenfalls im Rahmen der Rekonzessionierung vertraglich offen gehalten werden, um sie zu einem späteren Zeitpunkt gegebenenfalls umsetzen zu können. In der Gemeinde Sent wurde beispielsweise bereits in den 1950er-Jahren die Wassernutzung zwischen Wasserkraft und der Landwirtschaft vertraglich geregelt: Im betreffenden Vertrag wurde festgehalten, dass die Landwirtschaft bei Bedarf eine bestimmte Wassermenge für die Wiesensbewässerung nutzen darf.

Denkbar wäre auch ein direkter Bezug aus Oberflächengewässern. Aus ökologischer Sicht und aufgrund Restwasserbestimmungen ist dies jedoch grundsätzlich nicht zu empfehlen – insbesondere, da in Zukunft im Sommer und Spätsommer mit noch tieferen Niedrigabflüssen zu rechnen ist.

Ebenfalls zu prüfen wäre die Nutzung aus Quelfassungen. Aufgrund der hohen Priorität der Trink- und Viehversorgung und der komplexen Auswirkungen sollte eine solche Nutzung – wie in Kapitel 6.2 erläutert – jedoch mit Zurückhaltung beurteilt werden.

Alternativ oder ergänzend könnte Oberflächenabfluss nach Starkniederschlägen gespeichert werden. Durch geeignete Standortwahl von Speichervolumen und allenfalls ergänzende wasserlenkende Massnahmen – inspiriert etwa von den Walliser Suonen oder durch Entwässerungsgräben – könnte sich dieses Potenzial im

	<p>Bergell möglicherweise erhöhen lassen. Dabei käme auch eine dezentrale Lösung mit mehreren kleineren Speicherteichen in Betracht, welche an unterschiedlichen Stellen im Talboden platziert werden könnten.</p>
Augestaltung Speicher	<p>Für die konkrete Umsetzung von Speicherbecken bzw. -teichen ist eine sorgfältige, idealerweise multikriterielle Planung erforderlich. Aus landschaftlicher und ökologischer Sicht sind naturnah gestaltete Teichanlagen zur Wasserspeicherung am verträglichsten. Eine begrünte Ufergestaltung ohne Hartverbau, insbesondere mit standortangepassten Pflanzen, kann zur Einbindung in die Umgebung beitragen und gleichzeitig die Verdunstung reduzieren. Gerade im Bergell, wo das Landschaftsbild auch für den Tourismus von grosser Bedeutung ist, sollte auf eine gestalterisch sorgfältige Integration geachtet werden. Eine naturnahe Ausgestaltung kann zudem die funktionelle Biodiversität fördern – etwa durch die Ansiedlung von Nützlingen, die auch für die Landwirtschaft einen Vorteil haben.</p>
Nebeneffekte	<p>Bei der Wiesenbewässerung sind mögliche unerwünschte Nebeneffekte zu berücksichtigen. Eine zusätzliche Wasserzufuhr kann unter Umständen die Ausbreitung bestimmter Pflanzenarten begünstigen und damit die Futterqualität sowohl positiv als auch negativ beeinflussen. Um unerwünschte Veränderungen zu vermeiden, ist es wichtig, Wiesen nur bei tatsächlichem Bedarf zu bewässern (Peratoner et al., 2009). Gleichzeitig ist zu beachten, dass die Bewässerung nur eine von vielen Einflussgrössen auf die Artenzusammensetzung darstellt (Marbot et al., 2013). Faktoren wie Nutzungshäufigkeit (Schnittzyklus) und Düngung wirken oftmals deutlich stärker – und die Wechselwirkungen mit der Bewässerung sind komplex. Daher kann es sinnvoll sein, zunächst auf einzelnen Flächen Erfahrungen mit der Bewässerung zu sammeln, bevor grössere Flächen einbezogen werden.</p> <p>Im Hinblick auf die Biodiversität ist insbesondere der Schutz ökologisch wertvoller Trockenwiesen (TWW) von Bedeutung. Im Bergell sind viele solche Flächen im Bundesinventar der Trockenwiesen und -weiden aufgeführt. Die Bewässerung zählt – neben Düngung und intensiverer Nutzung – zu den Bewirtschaftungsmassnahmen, welche diese schützenswerten Wiesen potenziell gefährden können. Durch die zusätzliche Wasserzufuhr werden Nährstoffe im Boden mobilisiert, was zu einer Veränderung der Vegetationszusammensetzung führen kann – weg von einem typisch trockenmageren Charakter hin zu artenärmeren Beständen. Eine Intensivierung der Nutzung hat ebenfalls potenziell negative Auswirkungen auf die Artenvielfalt der Fauna, beispielsweise auf Brutvögel, Tagfalter und Heuschrecken. Auch aus diesem Grund sollte sich eine allfällige Bewässerung auf die ebenen Talflächen mit dem Bodentyp 1 beschränken.</p>
Rechtl. Rahmenbedingung	<p>Der Bau sowie die Instandsetzung von Bewässerungsinfrastrukturen wird im Berggebiet häufig durch öffentliche Strukturverbesserungsbeiträge unterstützt (gemäss SVV; SR 913.1). In bestimmten Fällen ist jedoch auch eine Realisierung auf privater Basis möglich. Damit eine finanzielle Unterstützung durch Bund und Kanton gewährt werden kann, müssen gesetzliche Vorgaben eingehalten und die Wirtschaftlichkeit der geplanten Bewässerungsanlage nachgewiesen werden. Daher sollten zu Beginn des Planungsprozesses gemeinsam mit der zuständigen kantonalen Behörde die geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen, die zu erfüllenden Voraussetzungen und das konkrete Vorgehen abgeklärt werden.</p> <p>Im Kanton Graubünden dient grundsätzlich die Studie von Göpfert (2007) als Entscheidungsgrundlage zur Bestimmung bewässerungsbedürftiger Gebiete. Das</p>

Bergell wurde in dieser Studie als nicht bewässerungsbedürftig eingestuft. Allerdings beruhte die damalige Einschätzung auf einer deutlich weniger detaillierten Analyse als die vorliegenden Berechnungen, welche den zukünftigen Wasserbedarf unter Einbezug des Klimawandels, der spezifischen Bodeneigenschaften und einer tagesbasierten Wasserbilanzierung quantifiziert.

Sollten Bewässerungsanlagen für Flächen ausserhalb der in der Göpfert-Studie ausgewiesenen Gebiete beantragt werden, muss die Bewässerungsbedürftigkeit im Rahmen des Gesuchs entsprechend fundiert belegt werden. Die vorliegende Studie kann hierfür eine wichtige Grundlage bilden. Ergänzend dazu wäre eine Analyse der Ertragseinbussen infolge von Trockenheit erforderlich – insbesondere mit Blick auf Häufigkeit und Ausmass solcher Einbussen. Dazu wäre eine standortspezifische Erhebung der Bodeneigenschaften notwendig, um die effektive Wasserspeicherfähigkeit der Böden und damit den Bewässerungsbedarf und die Wirksamkeit einer Bewässerung noch präziser bestimmen zu können. Die vorliegenden Modellierungen könnten bei Bedarf also mit detaillierteren Bodendaten erneut durchgeführt und um eine Abschätzung potenzieller Ertragsausfälle bei ausbleibender Bewässerung ergänzt werden. Ergänzt durch Erfahrungswerte zu Ertragseinbussen aus früheren Trockenjahren könnte so eine plausiblere und besser nachvollziehbare Entscheidungsgrundlage geschaffen werden. Die genauen Vorgaben wären vorgängig durch den Kanton festzulegen.

Unter Umständen besteht auch die Möglichkeit, über das Förderprogramm "Adapt+" einen Beitrag zu erhalten. Damit unterstützt der Bund unter Federführung des Bundesamts für Umwelt (BAFU) die Umsetzung von Klimaanpassungsmassnahmen, zu denen auch "Bewässerungskonzepte zum Umgang mit Sommertrockenheit" gehören.

Weiteres Vorgehen

Für die vertiefte Planung und Umsetzung einer Bewässerungslösung sollten folgende Punkte berücksichtigt werden:

1. Frühzeitiger Austausch mit kantonalen Behörden zur Einstufung der Flächen als bewässerungswürdig, zu rechtlichen Anforderungen sowie zu möglichen Beiträgen im Rahmen der Strukturverbesserung.
2. Datenbasis verbessern durch Erhebung von Bodendaten und ggf. Bodenfeuchtemessungen in den prioritären Gebieten sowie durch Zusammentragung von Informationen zu Ertragseinbussen in Trockenjahren.
3. Auf Grundlage der detaillierteren Datenbasis die Bewässerungsbedürftigkeit bzw. Wirtschaftlichkeit beurteilen.
4. Variantenstudium zu zentralen vs. dezentralen Speicherlösungen und möglichen Bezugsquellen.

8.1.2 Alternative Massnahmen

Ein Bewässerungssystem stellt nur eine von mehreren möglichen Massnahmen dar, um den zunehmenden Trockenperioden im Bergell zu begegnen. Da eine Bewässerung mit Kosten verbunden ist und potenziell negative Auswirkungen auf die Biodiversität haben kann, sollten alternative Ansätze in Betracht gezogen werden. Zu den möglichen Massnahmen zählen:

- Bodennahe Versickerungsstrukturen wie Mulden oder Gräben können bei Starkniederschlägen das Oberflächenwasser verlangsamen, verteilen und so

die Infiltration fördern. Dadurch verbessert sich der Wasserhaushalt im Boden.

- Der Anbau von robusten, früh reifenden und tief wurzelnden Grassorten und -sorten könnte unter den künftig veränderten Klimabedingungen stabile Erträge liefern. Diese Möglichkeit könnte für die ebenen Talflächen geprüft werden.
- Eine vielfältige betriebliche Ausrichtung mit mehreren Standbeinen stärkt die Widerstandsfähigkeit gegenüber Veränderungen. So kann etwa ein Bergbetrieb, der neben Milchkühen auch extensivere Tierarten wie Schafe oder Ziegen hält, flexibler auf schwankende Futterqualitäten reagieren. Dadurch lassen sich Auswirkungen längerer Trockenperioden besser abfedern (Schneider et al. 2009). Unterschiedliche Tierarten ermöglichen zudem eine differenzierte Nutzung der Betriebsflächen, was die Anfälligkeit gegenüber Trockenheit weiter reduziert (Dobremez et al. 2011). Bei Kleinvieh ist jedoch der höhere Aufwand für den Herdenschutz zu berücksichtigen
- Ein weiterer Ansatz zur Erhöhung der Resilienz liegt in der Ausweitung von Spezialkulturen – wie im Wallis oder Puschlav. Auch im Bergell könnte eine Zunahme solcher Kulturen sinnvoll sein. Mögliche geeignete Kulturen sollten in Zusammenarbeit mit Fachstellen wie zum Beispiel dem FiBL oder dem Plantahof geprüft werden.
- Zudem lässt sich durch gezielte Veredelung und Vermarktung hochwertiger Regionalprodukte – etwa unter einer Bergell-Marke mit Fokus auf Bioqualität – die Wertschöpfung im Tal steigern, wie das Beispiel der Latteria Bregaglia zeigt.
- Auch im Tourismus bieten sich Chancen: Alte Ställe oder Rustici könnten sanft renoviert und touristisch genutzt werden. Angebote für ortsunabhängiges Arbeiten („Workation“) könnten neue Zielgruppen ansprechen.
- Anpassungen in der Bewirtschaftung auf Ackerflächen, etwa durch schonende Bodenbearbeitung, reduzierte Bodenverdichtung, Mulchen, Unter- oder Zwischensaaten sowie eine standortangepasste Fruchtfolge. Diese Massnahmen tragen zur Erhaltung der Bodenstruktur und zum Humusaufbau bei, was wiederum zu einem besseren Wasserspeichervermögen führt. Da im Bergell nur wenige Ackerflächen bestehen, sind solche Massnahmen wohl nur punktuell von Bedeutung.
- Agroforstsysteme oder Heckenpflanzungen können durch Beschattung, Windschutz und bessere Wasserinfiltration lokal positive Effekte haben. Aufgrund der im Bergell bereits fortschreitenden Verwaldung wäre der Einsatz solcher Massnahmen nur auf den ebenen Talflächen zu prüfen.

Ein relevantes Referenzprojekt im Zusammenhang mit Wasserrückhalt auf landwirtschaftlichen Flächen ist das Ressourcenprojekt "Slow Water", das sich zum Ziel setzt, durch hydro- und bewirtschaftungstechnische Massnahmen die Wasserrückhaltung in Böden und Grundwasserleitern zu erhalten und zu fördern. Darüber hinaus unterstützt das Forum nachhaltiges Wassermanagement in der Landwirtschaft den landesweiten Wissens- und Erfahrungsaustausch. Es wird vom Verein "Nachhaltiges Wassermanagement in der Landwirtschaft" getragen, der sich für eine koordinierte Weiterentwicklung des Themas einsetzt. Die Wissens-

	<p>plattform wird von der AGRIDEA betrieben und umfasst eine zentrale Webplattform zur Unterstützung der landwirtschaftlichen Praxis.</p>
Rechtl. Rahmenbedingung	<p>Auch für solche alternativen Massnahmen kann abgeklärt werden, welche Beiträge vom Kanton und Bund gesprochen werden können und unter welchen Voraussetzungen diese gewährt werden. Auch hier ist eine Unterstützung durch Strukturverbesserungsbeiträgen denkbar (gemäss SVV; SR 913.1). Ebenfalls können solche Massnahmen unter Umständen die Direktzahlungen erhöhen.</p> <p>Zusätzlich besteht auch hier allenfalls die Möglichkeit, einen Beitrag aus dem Förderprogramm "Adapt+" (Schwammlandkonzepte/-massnahmen) oder aus einem Ökofonds zu erhalten.</p>
Weiteres Vorgehen	<p>Die vorgestellten alternativen Massnahmen bieten ein breites Spektrum an Möglichkeiten zur Anpassung an zunehmende Trockenperioden. Nächste Schritte zur Planung einer konkreten Umsetzung könnten wie folgt aussehen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Austausch mit Fachstellen und Beratung: Kontakt mit der landwirtschaftlichen Beratung (z. B. Plantahof), kantonalen Behörden oder anderen Fachorganisationen, um Machbarkeit und Eignung der verschiedenen Massnahmen zu besprechen – etwa zur Anpassung in der Bewirtschaftung, zu geeigneten Spezialkulturen oder zur Frage, welche Systeme sich für die Förderung der gezielten Wasserretention eignen. - Praxistests und Erfahrungssammlung: In ausgewählten Betrieben oder Teilgebieten gezielt verschiedene Klimaanpassungsmassnahmen testen, um praktische Erfahrungen zu sammeln und Erkenntnisse für eine breitere Umsetzung zu gewinnen.

8.2 Massnahmen Alpbetriebe

Wasserspeicherung	<p>Wie in Kapitel 7.5 erläutert, ist insbesondere bei zwei Alpbetrieben mit der Einstufung "gross" in naher Zukunft mit ausgeprägter Wasserknappheit zu rechnen. Um die Bewirtschaftung langfristig sicherzustellen, sollten möglichst frühzeitig konkrete Massnahmen zur Wasserspeicherung geprüft und umgesetzt werden. Dafür stehen verschiedene Speichersysteme zur Verfügung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Natürlich gestaltete Teichanlagen - Wasserspeicherbecken mit natürlicher oder künstlicher Abdichtung - Kleine Dachwassertanks oder Reservoirs - Unterirdische Zisterne - Mobile Speicher <p>Jede dieser Lösungen weist spezifische Vor- und Nachteile auf (vgl. Merkblatt "Massnahmen zur Wasserversorgung auf den Alpen", Prométerre, Montanum, Société vaudoise d'économie alpestre, 2024). Im Bergell bietet sich – nicht zuletzt aus landschafts- und naturschutzfachlicher Sicht – eine naturnahe Variante besonders an. Für die Ausgestaltung solcher Teichsysteme stellt das Merkblatt "Anlegen von agrarökologischen Teichen" (Naturpark Jura vaudois, info fauna) eine nützliche Grundlage dar.</p>
Wasserbezug	<p>Für den Wasserbezug gibt es folgende Möglichkeiten:</p>

- Quellanutzung, sofern die Schüttmengen sowie der saisonale Verlauf bekannt und ausreichend sind und keine Zielkonflikte mit anderen Nutzungen (z. B. Trinkwasser oder Ökologie) bestehen.
- Wasserentnahme aus Bächen (z. B. Coanda-Rechen, Tirolerwehr oder ohne feste Einbauten), sofern die Wasserführung und rechtliche Voraussetzungen dies zulassen.
- Die Einleitung von Oberflächenabfluss in Speicherteiche – insbesondere während Starkniederschlägen – könnte eine mögliche Option darstellen. Durch eine geeignete Standortwahl für das Speichervolumen sowie ergänzende wasserlenkende Massnahmen, etwa gezielte Geländeanpassungen, liesse sich dieses Potenzial allenfalls erhöhen.

Rechtl. Rahmenbedingung Die Voraussetzungen für die Bewilligung von Wasserentnahmen und Bauvorhaben sowie für Strukturverbesserungsbeiträge sind mit der kantonalen Behörde abzuklären.

Weiteres Vorgehen Für eine schrittweise Planung und Umsetzung empfiehlt sich folgender Ablauf:

1. Grundlagenanalyse:
 - Gibt es neben dem Bedarf für die Viehversorgung (Kap. 7) noch weiteren Wasserbedarf? Bedarf für Menschen? Alpkäserei?
 - Wie viele Tränkestellen sind betroffen, wo liegen diese?
 - Welche Anforderungen bestehen an Wassermenge und -qualität?
 - Informationen über derzeitigen Wasserbezug? Erfahrungen mit Trockenjahren?
 - Ist-Zustand bestehende Infrastruktur?
 - Welche Möglichkeiten zum Wasserbezug gibt es?
 - Werden zusätzliche Daten benötigt, beispielsweise periodische Messungen der Schüttmengen von Quellen?
 - Gibt es Möglichkeiten für Synergien mit den Nachbaralpen, mit Bergrestaurants oder mit anderen Nutzungen, beispielsweise mit einem Löschwasserspeicher?
2. Kontakt mit landwirtschaftlicher Beratung (z. B. Plantahof) oder kantonalen Behörden:
 - Infos zu Verfahren zusammentragen: Baugesuchsverfahren, Meliorationsverfahren, Wasserkonzessionsverfahren. Erst anschliessend konkrete Planung um unnötige Kosten zu vermeiden.
3. Variantenvergleich Wasserspeicherung und Wasserbezug:
 - Vergleich hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Betriebssicherheit, Unterhaltsaufwand, Umweltverträglichkeit sowie Auswirkungen auf das Landschaftsbild.
4. Detailplanung und Umsetzung

9 Fazit

Die Analyse zeigt, dass der Klimawandel im Bergell deutliche Auswirkungen auf das Wasserdargebot und den Wasserbedarf haben wird. Während die winterlichen Abflüsse zunehmen, sind im Sommer deutliche Abnahmen zu erwarten, insbesondere durch die Abnahme der Schneeschmelze und den Rückgang der Gletscher. Höhere Temperaturen und geringere Niederschläge im Sommer führen langfristig zu einem höheren Wasserbedarf der landwirtschaftlichen Kulturen, insbesondere in Trockenjahren.

Ob in Zukunft tatsächlich eine Bewässerungsinfrastruktur realisiert wird, hängt auch wesentlich von der zukünftigen Ausrichtung der landwirtschaftlichen Betriebe, den angebauten Kulturen und vor allem von der Wirtschaftlichkeit einer möglichen Bewässerungsinfrastruktur ab. Eine genaue Planung sollte daher die lokalen Rahmenbedingungen und wirtschaftlichen Aspekte berücksichtigen. Für eine zielgerichtete Planung einer zukünftiger Bewässerungsinfrastrukturen wären deshalb detailliertere Untersuchungen der Bodenbeschaffenheit und Erfahrungswerte von Ertragseinbussen aufgrund Trockenheit notwendig, vor allem in den prioritären Gebieten mit ebenen Flächen und Bodentyp 1, wo eine Bewässerung am ehesten in Frage kommt.

Neben technischen Lösungen wie der Bewässerung stehen auch alternative Ansätze zur Verfügung, etwa bodenschonende Bewirtschaftungsformen, lokale Wasserrückhaltmassnahmen oder eine Diversifizierung der Kulturen und Tierhaltung. Diese Massnahmen können die betriebliche Resilienz gegenüber Trockenperioden erhöhen – oft mit geringeren Eingriffen in Naturhaushalt und Landschaft.

Der vorliegende Bericht bietet eine fachliche Grundlage, um den Wasserbedarf der Landwirtschaft bei der Rekonzeptionierung der Wasserkraftwerke zu berücksichtigen. Darüber hinaus soll er den Anstoss geben, mit den kantonalen Behörden, der landwirtschaftlichen Beratung und weiteren relevanten Akteuren in den Dialog zu treten und gemeinsam geeignete Klimaanpassungsstrategien für das Bergell zu entwickeln. Ein nächster sinnvoller Schritt könnte darin bestehen, einzelne Massnahmen gezielt zu prüfen, in Pilotprojekten zu erproben und so langfristig passende Lösungen für die Landwirtschaft unter veränderten klimatischen Bedingungen zu entwickeln.

10 Literaturverzeichnis

- Allen, R.G. ; Pereira, L.S. ; Raes, D. ; Smith, M. (1998): Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rom. 300 S.
- Allen, R. G., Walter, I. A., Elliot, R. L., Howell, T. A., Itenfisu, D., Jensen, M. E. and Snyder, R. 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. ASCE and American Society of Civil Engineers.
- Bassin, S., Calanca, P., Weidinger, T., Gerosa, G., & Fuhrer, J. (2004). Modeling seasonal ozone fluxes to grassland and wheat: model improvement, testing, and application. *Atmospheric Environment*, 38(15), 2349-2359.
- Calanca, P., Smith, P., Holzkämper, A., & Ammann, C. (2011). Die Referenzverdunstung und ihre Anwendung in der Agrarmeteorologie. *Agrarforschung Schweiz*, 2(4), 176-183.
- Chaix, O., Wehse, H., Gander, Y., & Zahner, S. (2016). Bestimmung von Regionen mit Handlungsbedarf bei Trockenheit. Expertenbericht zum Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz. Hunziker Betatech AG Bern (mit INTEGRALIA AG, Bern). Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAUF). Bern, 100.
- CH2018, C. (2018). Climate scenarios for Switzerland. Technical Report.
- ecowert AG (2020). Bergeller Kraftwerke - Hydrologische Untersuchungen im Bergell- Zuflüsse Wasserfassungen und Plausibilisierung KW-Daten 2012 – 2018. Fachbericht im Auftrag von ewz.
- ecowert AG (2023). Bergeller Kraftwerke - Hydrologische Untersuchungen im Bergell- Zuflüsse Wasserfassungen und Plausibilisierung KW-Daten 2012 – 2021. Fachbericht im Auftrag von ewz.
- ecowert AG (2023). Rekonzessionierung Bergeller Kraftwerke - Voruntersuchung / Pflichtenheft Version 2.0. Im Auftrag von ewz.
- Freudiger, D., Marc Vis, M. & Seibert, J. (2021). Mittlere Abflüsse vergletscherter Einzugsgebiete". In *Hydro-CH2018: Szenarien bis 2100. Hydrologischer Atlas der Schweiz*. [https://hydromapscc.ch/#de/8/46.830/8.190/bl_hds--I03_standorte\\$0/NULL](https://hydromapscc.ch/#de/8/46.830/8.190/bl_hds--I03_standorte$0/NULL).
- Dobremez, L., Nettier, B., Coussy, J.L. & Romagny, T. (2011). Attitudes of livestock farmers and sensitivity of livestock farming systems to drought conditions in the French Alps. *Journal of Alpine Research*, 15.
- Eisenring, S., Holzkämper, A., & Calanca, P. (2021). Berechnung der Bewässerungsbedürfnisse unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen in der Schweiz. *Agroscope Science*, 107, 55.
- Feigenwinter I, Kotlarski S, Casanueva A, Fischer AM, Schwierz C, Liniger MA, 2018: Exploring quantile mapping as a tool to produce user-tailored climate scenarios for Switzerland, Technical Report MeteoSwiss, 270, 44 pp.
- Fuhrer, J.; Smith, P.C. (2015): Grundlagen für die Abschätzung des Bewässerungsbedarfs im Kanton Basel-Landschaft: Agroscope im Auftrag des Kantons Basel-Landschaft, 28 S.

10 Literaturverzeichnis

- Allen, R.G. ; Pereira, L.S. ; Raes, D. ; Smith, M. (1998): Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rom. 300 S.
- Allen, R. G., Walter, I. A., Elliot, R. L., Howell, T. A., Itenfisu, D., Jensen, M. E. and Snyder, R. 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. ASCE and American Society of Civil Engineers.
- Bassin, S., Calanca, P., Weidinger, T., Gerosa, G., & Fuhrer, J. (2004). Modeling seasonal ozone fluxes to grassland and wheat: model improvement, testing, and application. *Atmospheric Environment*, 38(15), 2349-2359.
- Calanca, P., Smith, P., Holzkämper, A., & Ammann, C. (2011). Die Referenzverdunstung und ihre Anwendung in der Agrarmeteorologie. *Agrarforschung Schweiz*, 2(4), 176-183.
- Chaix, O., Wehse, H., Gander, Y., & Zahner, S. (2016). Bestimmung von Regionen mit Handlungsbedarf bei Trockenheit. Expertenbericht zum Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz. Hunziker Betatech AG Bern (mit INTEGRALIA AG, Bern). Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAUF). Bern, 100.
- CH2018, C. (2018). Climate scenarios for Switzerland. Technical Report.
- ecowert AG (2020). Bergeller Kraftwerke - Hydrologische Untersuchungen im Bergell- Zuflüsse Wasserfassungen und Plausibilisierung KW-Daten 2012 – 2018. Fachbericht im Auftrag von ewz.
- ecowert AG (2023). Bergeller Kraftwerke - Hydrologische Untersuchungen im Bergell- Zuflüsse Wasserfassungen und Plausibilisierung KW-Daten 2012 – 2021. Fachbericht im Auftrag von ewz.
- ecowert AG (2023). Rekonzessionierung Bergeller Kraftwerke - Voruntersuchung / Pflichtenheft Version 2.0. Im Auftrag von ewz.
- Freudiger, D., Marc Vis, M. & Seibert, J. (2021). Mittlere Abflüsse vergletscherter Einzugsgebiete". In *Hydro-CH2018: Szenarien bis 2100. Hydrologischer Atlas der Schweiz*. [https://hydromapscc.ch/#de/8/46.830/8.190/bl_hds--103_standorte\\$0/NULL](https://hydromapscc.ch/#de/8/46.830/8.190/bl_hds--103_standorte$0/NULL).
- Dobremez, L., Nettier, B., Coussy, J.L. & Romagny, T. (2011). Attitudes of livestock farmers and sensitivity of livestock farming systems to drought conditions in the French Alps. *Journal of Alpine Research*, 15.
- Eisenring, S., Holzkämper, A., & Calanca, P. (2021). Berechnung der Bewässerungsbedürfnisse unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen in der Schweiz. *Agroscope Science*, 107, 55.
- Feigenwinter I, Kotlarski S, Casanueva A, Fischer AM, Schwierz C, Liniger MA, 2018: Exploring quantile mapping as a tool to produce user-tailored climate scenarios for Switzerland, Technical Report MeteoSwiss, 270, 44 pp.
- Fuhrer, J.; Smith, P.C. (2015): Grundlagen für die Abschätzung des Bewässerungsbedarfs im Kanton Basel-Landschaft: Agroscope im Auftrag des Kantons Basel-Landschaft, 28 S.
- Göpfert, R. (2007). Ermittlung der Bewässerungsbedürftigkeit landwirtschaftlicher

ANHANG A

Bodeneignungskarte Schweiz



A.1 Digitale Bodeneignungskarten Schweiz

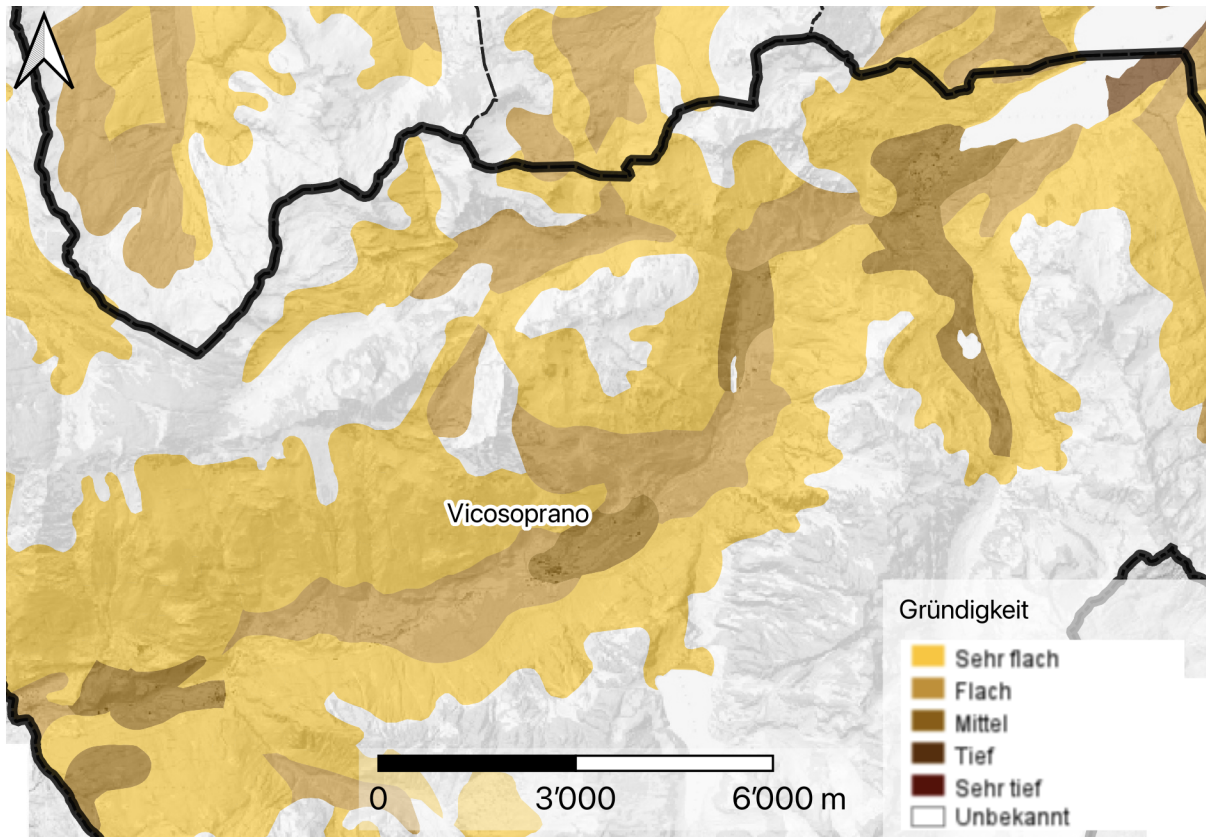


Abb. A.1: Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Gründigkeit (Bundesamt für Landwirtschaft BLW) Die Karte wurde im Jahr 1980 auf der Basis eines Massstabs 1:200'000 erstellt.

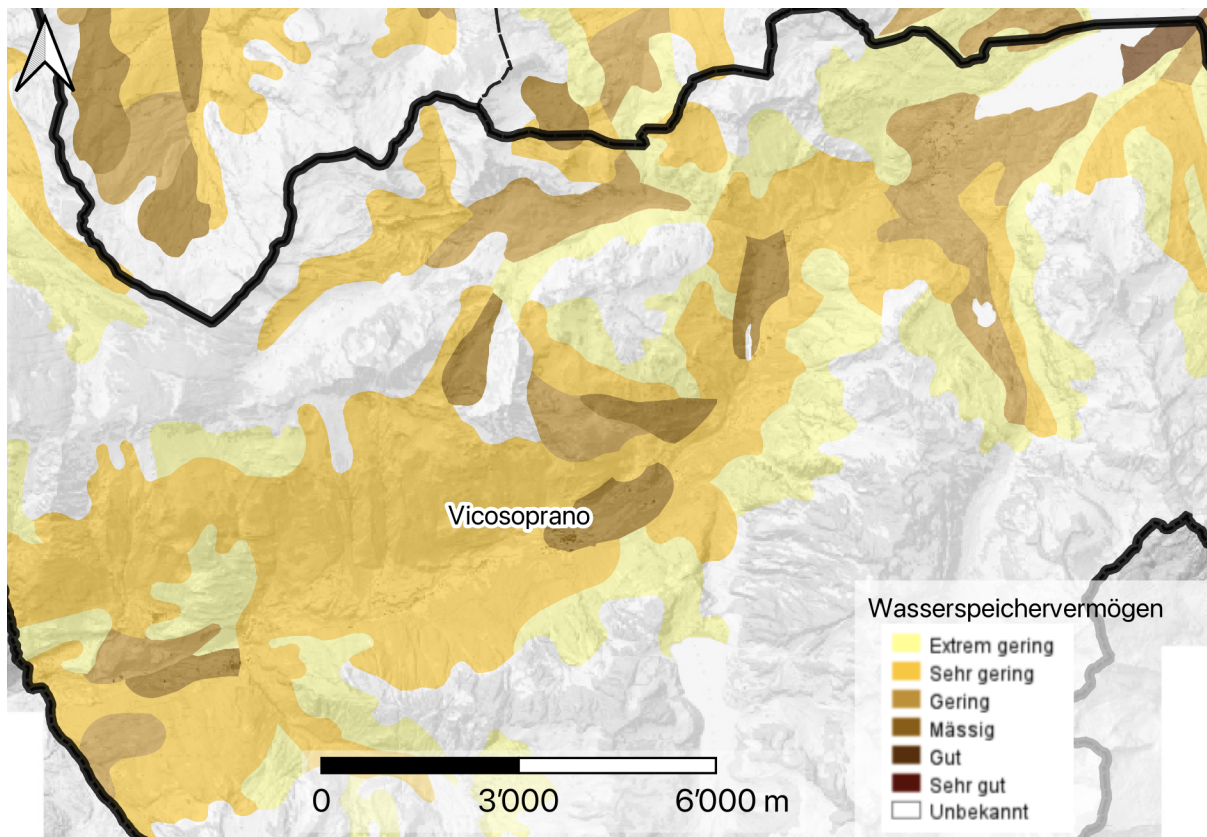


Abb. A.2: Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Wasserspeichervermögen (Bundesamt für Landwirtschaft BLW). Die Karte wurde im Jahr 1980 auf der Basis eines Maßstabs 1:200'000 erstellt.

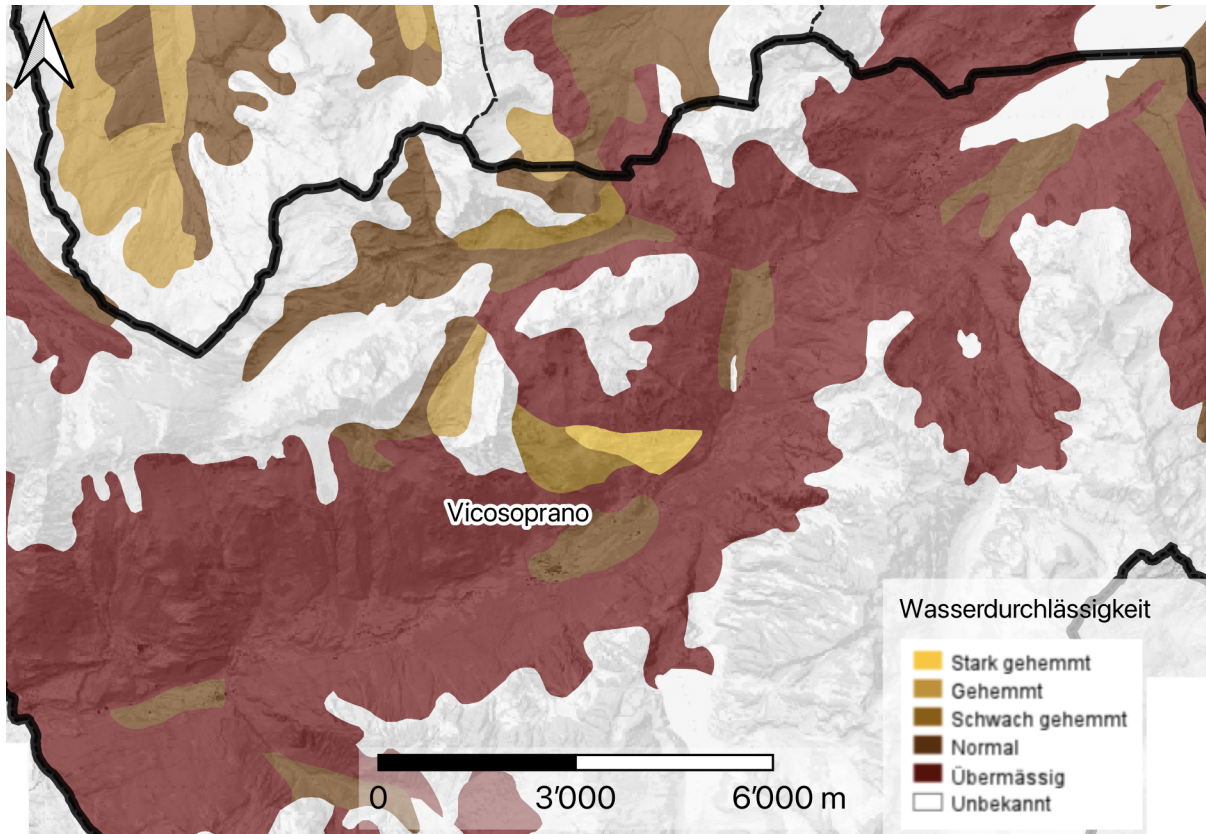


Abb. A.3: Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Wasserdurchlässigkeit (Bundesamt für Landwirtschaft BLW). Die Karte wurde im Jahr 1980 auf der Basis eines Maßstabs 1:200'000 erstellt.

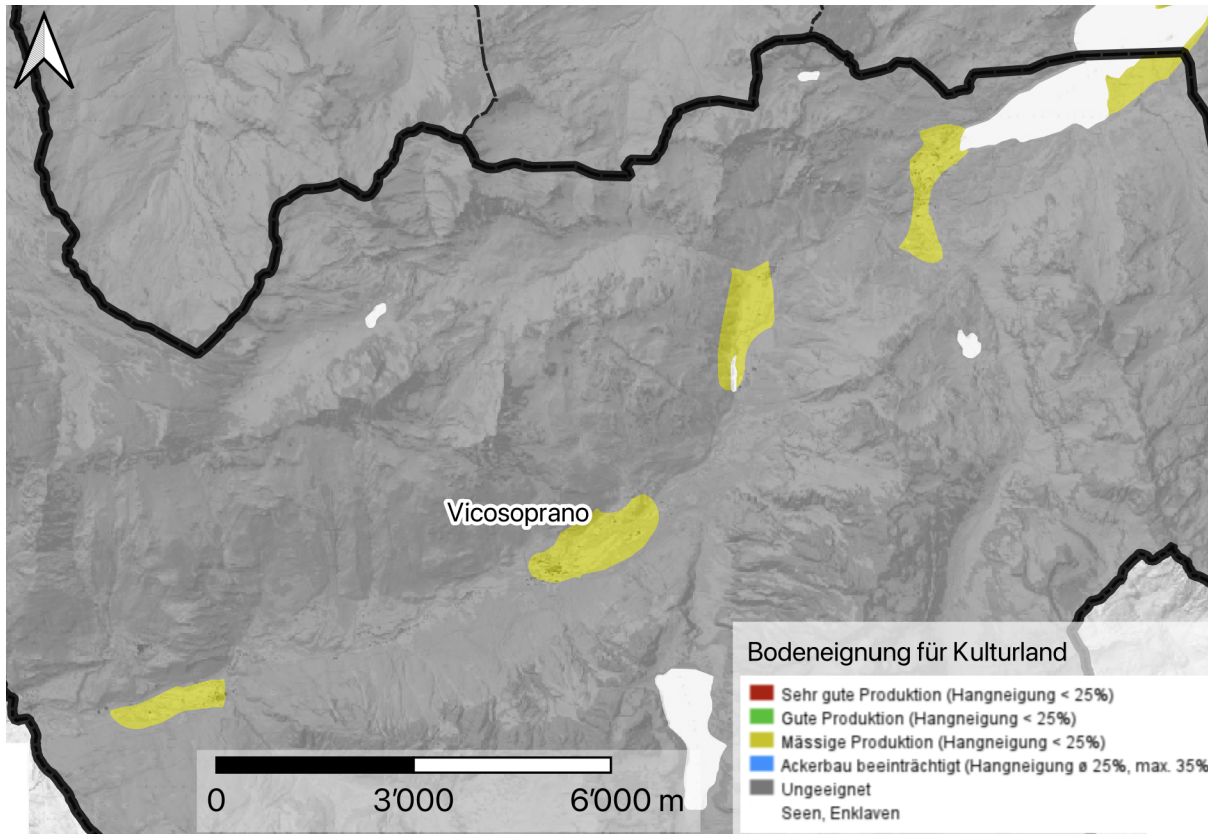


Abb. A.4: Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Kulturland (Bundesamt für Landwirtschaft BLW). Die Karte wurde im Jahr 1980 auf der Basis eines Massstabs 1:200'000 erstellt.

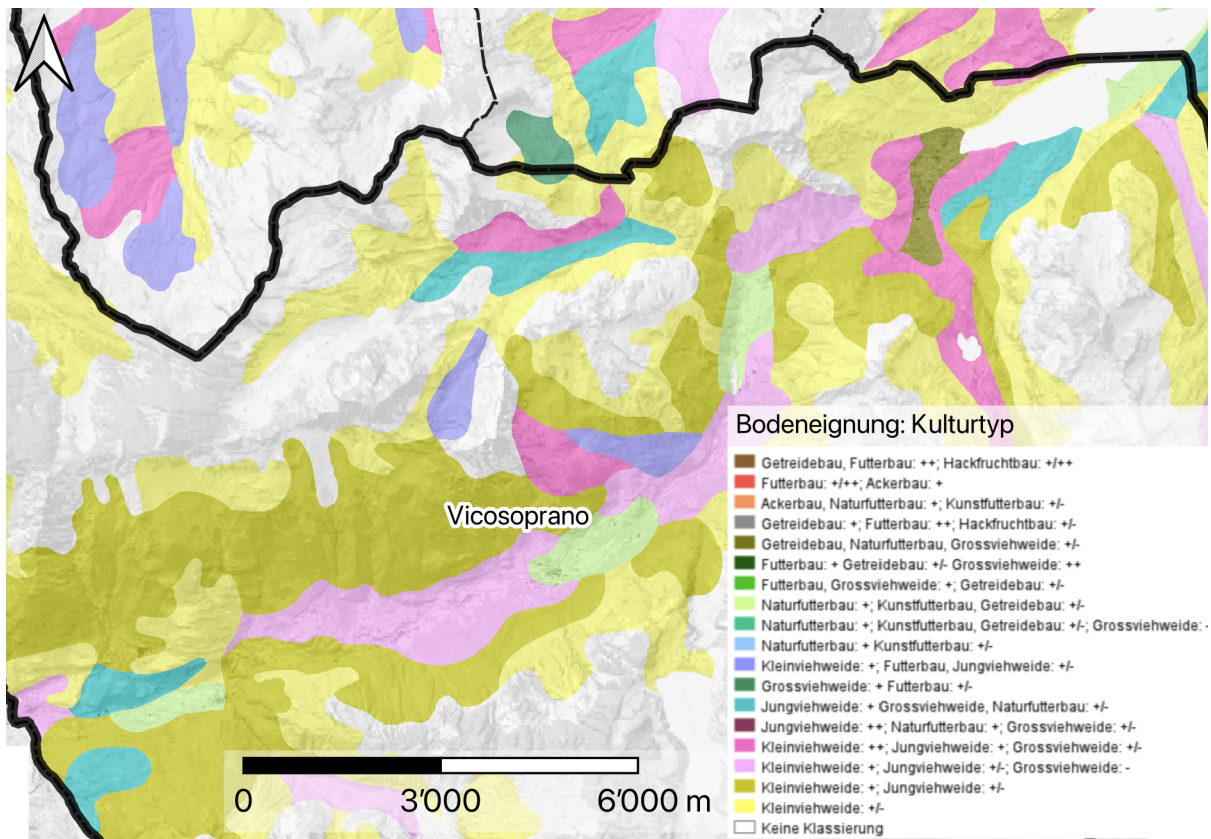


Abb. A.5: Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Kulturtyp (Bundesamt für Landwirtschaft BLW). Die Karte wurde im Jahr 1980 auf der Basis eines Massstabs 1:200'000 erstellt.

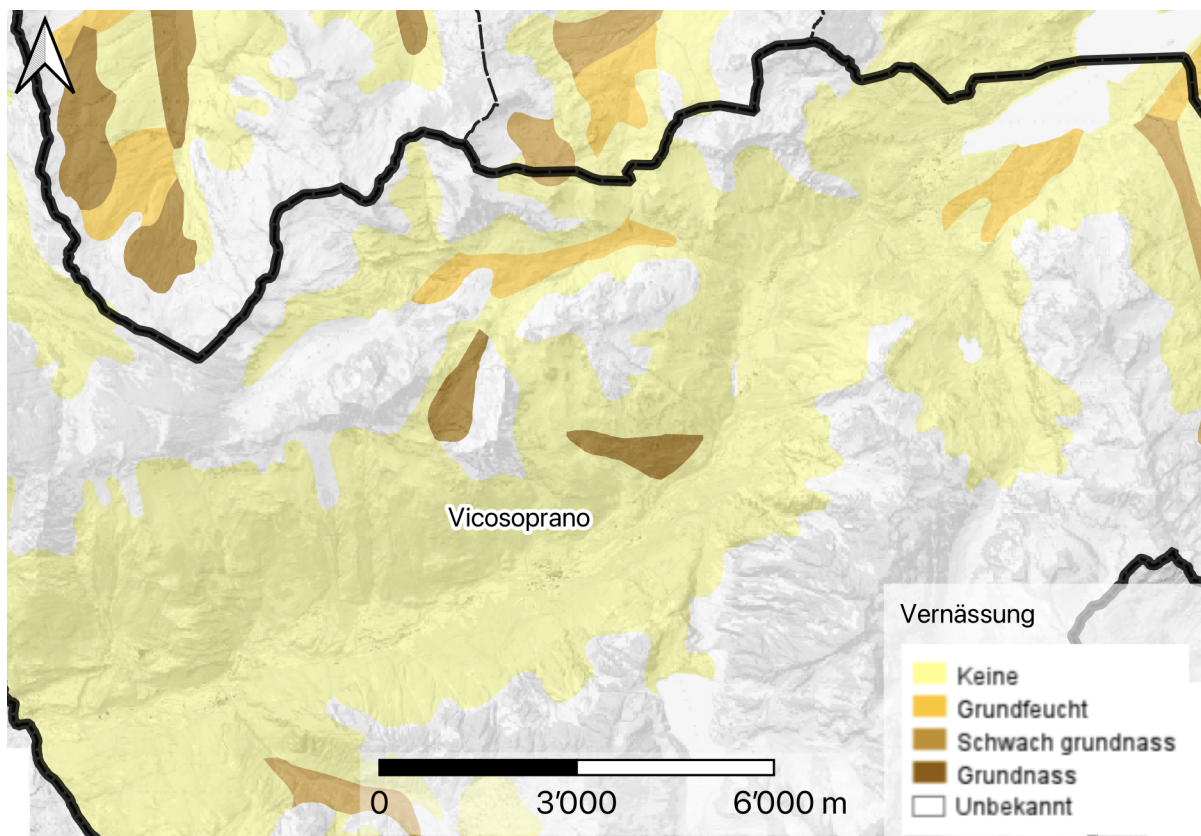


Abb. A.6: Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Vernässung (Bundesamt für Landwirtschaft BLW). Die Karte wurde im Jahr 1980 auf der Basis eines Maßstabs 1:200'000 erstellt.

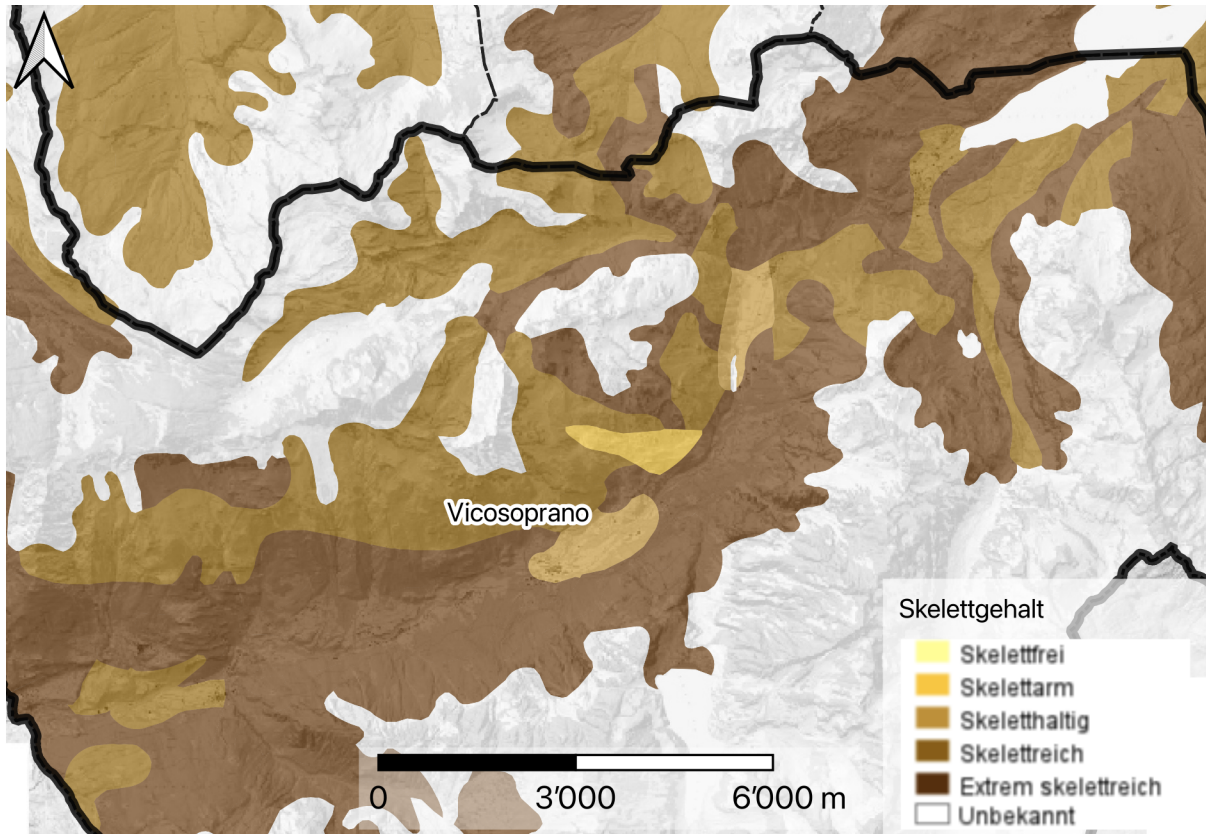


Abb. A.7: Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Skelettgehalt (Bundesamt für Landwirtschaft BLW). Die Karte wurde im Jahr 1980 auf der Basis eines Maßstabs 1:200'000 erstellt.

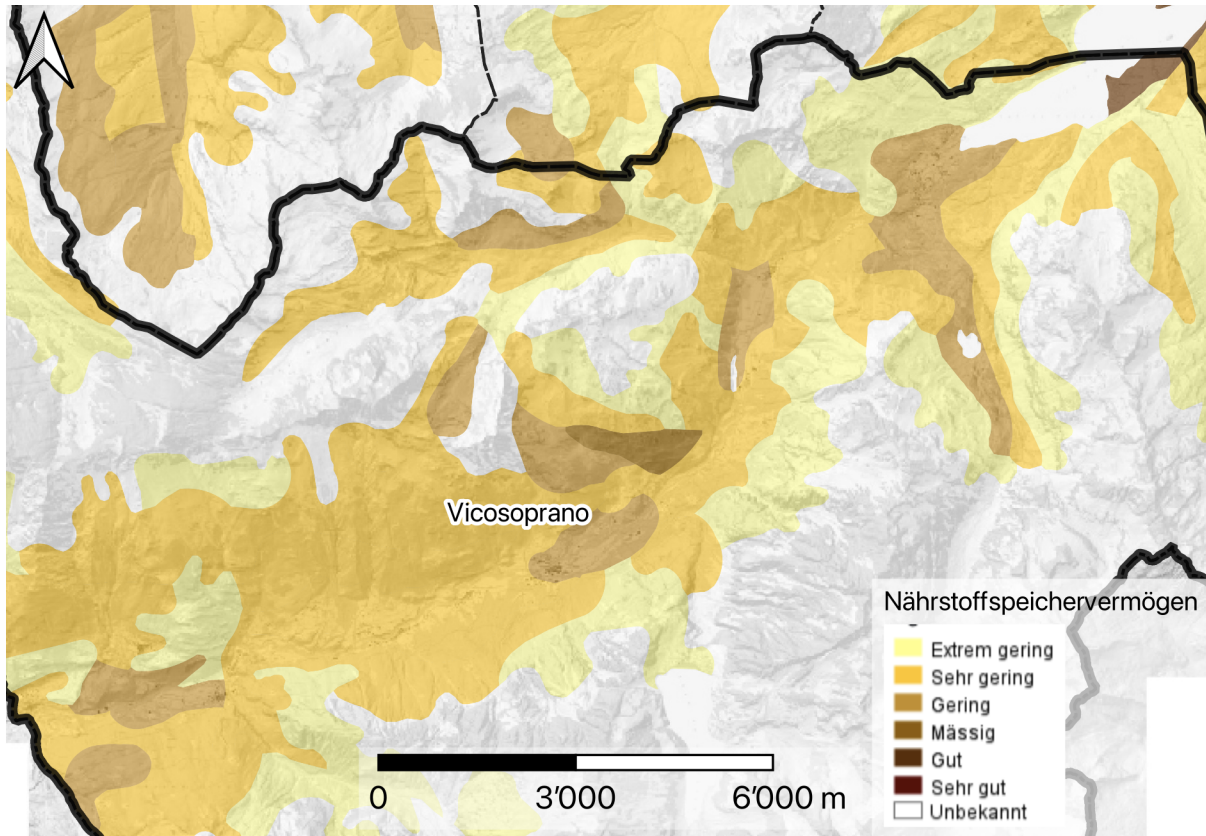


Abb. A.8: Digitale Bodeneignungskarte der Schweiz - Nährstoffspeichervermögen (Bundesamt für Landwirtschaft BLW). Die Karte wurde im Jahr 1980 auf der Basis eines Massstabs 1:200'000 erstellt.

ANHANG B

Referenz-Evapotranspiration



B.1 Berechnung Referenz-Evapotranspiration

Bei der Evapotranspiration nach Penman-Monteith handelt es sich um die uneingeschränkte Evapotranspiration einer Referenz-Kultur (idealisierte Grasbestand, vollständige Bodenbedeckung, ohne Beschränkung von Wasser- und Stickstoffangebot). Sie wird mit folgender Formel berechnet:

FAO Penman-Monteith

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_N - G) + \gamma \frac{900}{T + 273,15} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

- mit:
- R_N = Nettostrahlung ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
 - G = Bodenwärmefluss ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
 - T = Mittlere Tages-Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$) = $(T_{\min} + T_{\max})/2$
 - T_{\min} = Minimale Lufttemperatur auf 2 m über dem Boden ($^{\circ}\text{C}$)
 - T_{\max} = Maximale Lufttemperatur auf 2 m über dem Boden ($^{\circ}\text{C}$)
 - e_s = Sättigungsdampfdruck (kPa)
 - e_a = Aktueller Dampfdruck (kPa)
 - u_2 = Windgeschwindigkeit auf 2 m über dem Boden (m s^{-1})
 - Δ = Sättigungsdampfdruckkurve als Funktion der Temperatur
 - γ = psychometrische Konstante ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Die empirische Formel nach Priestley-Taylor (1972) zur Berechnung der Evapotranspiration lautet:

Priestley-Taylor (1972)

$$ET_{PT} = 1,26 \frac{1}{\lambda} \left\{ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_N - G) \right\}$$

- mit:
- $\lambda = 2.5 \text{ MJ kg}^{-1}$ (latente Wärme der Verdampfung)
 - Δ = Sättigungsdampfdruckkurve als Funktion der Temperatur
 - γ = psychometrische Konstante ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 - R_N = Nettostrahlung ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
 - G = Bodenwärmefluss ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

Die empirische Formel nach Turc (1961) zur Berechnung der Evapotranspiration lautet:

Turc (1961)

$$ET_{Tu} = \frac{0,4}{30} (23,9 R_s + 50) \left(\frac{T}{T + 15} \right)$$

- mit:
- R_s = Globalstrahlung ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
 - T = Mittlere Tages-Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$) = $(T_{\min} + T_{\max})/2$

T_{\min} = Minimale Lufttemperatur auf 2 m über dem Boden (°C)

T_{\max} = Maximale Lufttemperatur auf 2 m über dem Boden (°C)

Für die Nettostrahlung R_N wird eine lineare Beziehung zur Globalstrahlung gemäss Davies (1967) bzw. Calanca et al. (2011) angenommen:

$$R_N = 0.529 R_S - 0.466$$

mit: R_S = Globalstrahlung ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Der Bodewärmefluss G wird gemäss Empfehlung von Allen et al. (1998) bei der Berechnung von ET_0 auf Tagesbasis gleich Null gesetzt.

Die psychometrische Konstante γ ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) wird durch folgende Formel berechnet:

$$\gamma = \frac{C_p p}{\epsilon \lambda}$$

mit: p = atmosphärischer Druck (kPa)

C_p = 1.004×10^{-3} ($\text{MJ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{kg}^{-1}$) (spezifische Wärme)

ϵ = 0.622 (Verhältnis der Molmassen)

λ = 2.5 MJ kg^{-1} (latente Wärme der Verdampfung)

Der Sättigungsdampfdruck wird in Abhängigkeit von der mittleren Lufttemperatur berechnet:

$$\Delta = \frac{4096 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T+237.3} \right) \right]}{(T+237.3)^2}$$

B.2 Methodenvergleich Referenz-Evapotranspiration

Die Referenz-Evapotranspiration wurde für die historischen Messdaten bei der Station Vicosoprano für die Zeitperiode 2013-2023 mit verschiedenen Methoden berechnet. Allen et al. (1998) empfehlen die Anwendung der FAO Penman-Monteith-Gleichung, die die Evapotranspiration physikalisch gut wiedergibt. Diese Methodik ist allerdings von einer Vielzahl von Klimaparametern abhängig wie Lufttemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchtigkeit. Klimaszenarien für die Zukunft (CH-2018) liegen für das Bergell derzeit nur für die Parameter Niederschlag und Temperatur vor. Die weit verbreiteten empirischen Formeln nach Priestley-Taylor (1972) und Turc (1972) sind nur von der Lufttemperatur und der Globalstrahlung abhängig. Wie in Abbildung **B.1** ersichtlich, liefern diese Methoden trotzdem ähnliche Evapotranspirationswerte wie die Penman-Monteith Gleichung. Für die vorliegende Studie (Wasserbedarf Bergell) wird deshalb die Formel von Priestley-Taylor (1972) verwendet. Für die Zukunftsszenarien wird die Temperatur aus dem Datensatz CH-2018 "DAILY-GRIDDED" in der Rasterzelle, in der Vicosoprano liegt, verwendet. Die Globalstrahlung wird von der nahe gelegenen Station Samedan verwendet, für welche Globalstrahlungswerte im Datensatz "DAILY-LOCAL" verfügbar sind.

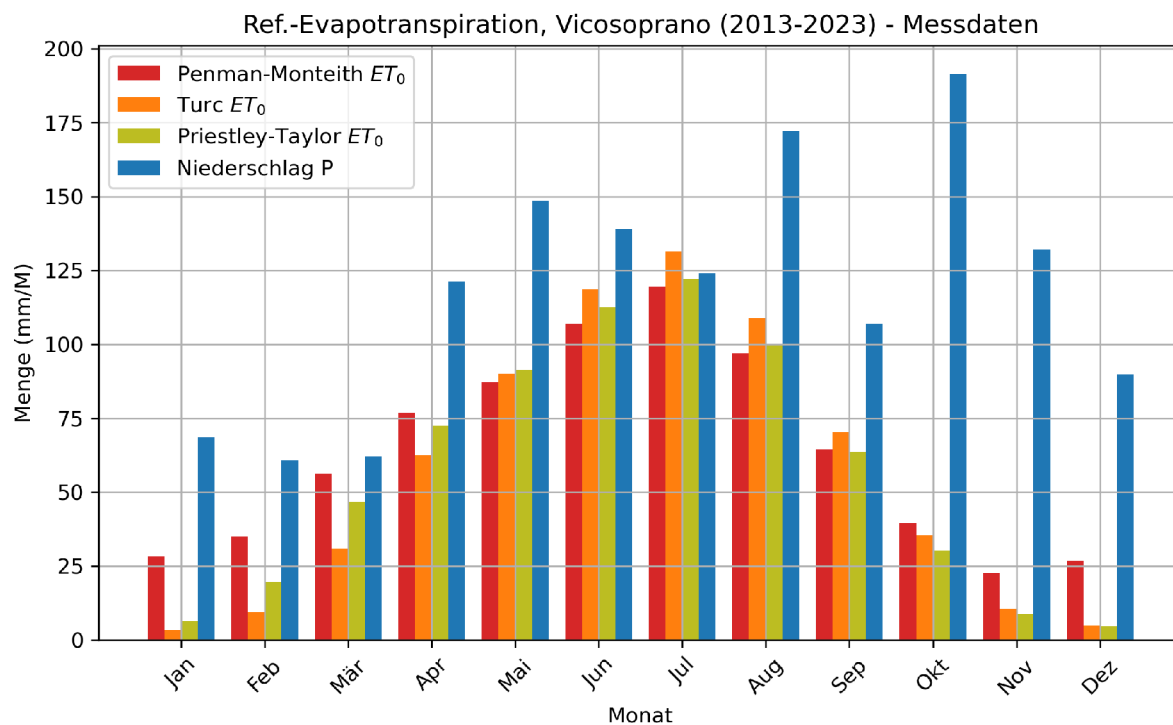


Abb. B.1: Methodenvergleich Referenz-Evapotranspiration. Berechnung der monatlichen Referenz-Evapotranspiration ET_0 nach FAO Penman-Monteith, Turc (1961) und Priestley-Taylor (1972), gemittelt über die Periode 07.02.2013 bis 31.12.2023 an der Messstation Vicosoprano der MeteoSchweiz. Zusätzlich ist der Mittelwert der monatlichen Niederschlagsmengen P dargestellt.

ANHANG C

Plausibilisierung Referenzklima



C.1 Vergleich Messwerte mit Klimamodell CH-2018

Wie im Hauptteil des Berichts erläutert, wird für das Referenzklima (1981-2010) das Klimamodell CH-2018 verwendet. Dies, weil im Bergell für die meisten Klimaparameter erst seit 2013 Messungen vorliegen.

Im Folgenden werden die Monatsmittelwerte der gemessenen Klimaparameter mit den Werten der Klimamodelle CH-2018 für den Beobachtungszeitraum verglichen, um die Verwendung der Klimamodelle als Referenzklima zu rechtfertigen.

Bei den Messdaten von 2013 bis 2023 fehlen an ein paar einzelnen Tagen Messdaten. Diese wurden mittels einem Autoregressiven Model (AR) der 2'Ordnung gefüllt.

C.1.1 Temperatur

Die CH-2018 Temperaturdaten wurde vom Rasterdatensatz "DAILY-GRIDDED" extrahiert da im Datensatz "DAILY-LOCAL" (Stationsdaten) für das Bergell keine Temperaturdaten vorhanden sind. Die Daten stammen aus der Rasterzelle im untersten Teil des Bergells (bzw. kurz nach der Grenze zu Italien) - Mittelpunkt: Longitude: 9.48, Latitude: 46.33. Wie in Abbildung **C.1** bis **C.3** ersichtlich, stimmen diese Temperaturwerte relativ gut mit den gemessenen Temperaturwerten überein. Es wird angenommen, dass dies auch in Zukunft der Fall sein wird. Generell scheint die Temperatur mit dem CH-2018 Modell leicht überschätzt zu werden, was zu einer leichten Überschätzung der Evapotranspiration und damit des Bewässerungsbedarfs führen könnte. Angesichts der Modell- und Prognoseunsicherheiten wird dies jedoch als wenig relevant erachtet.

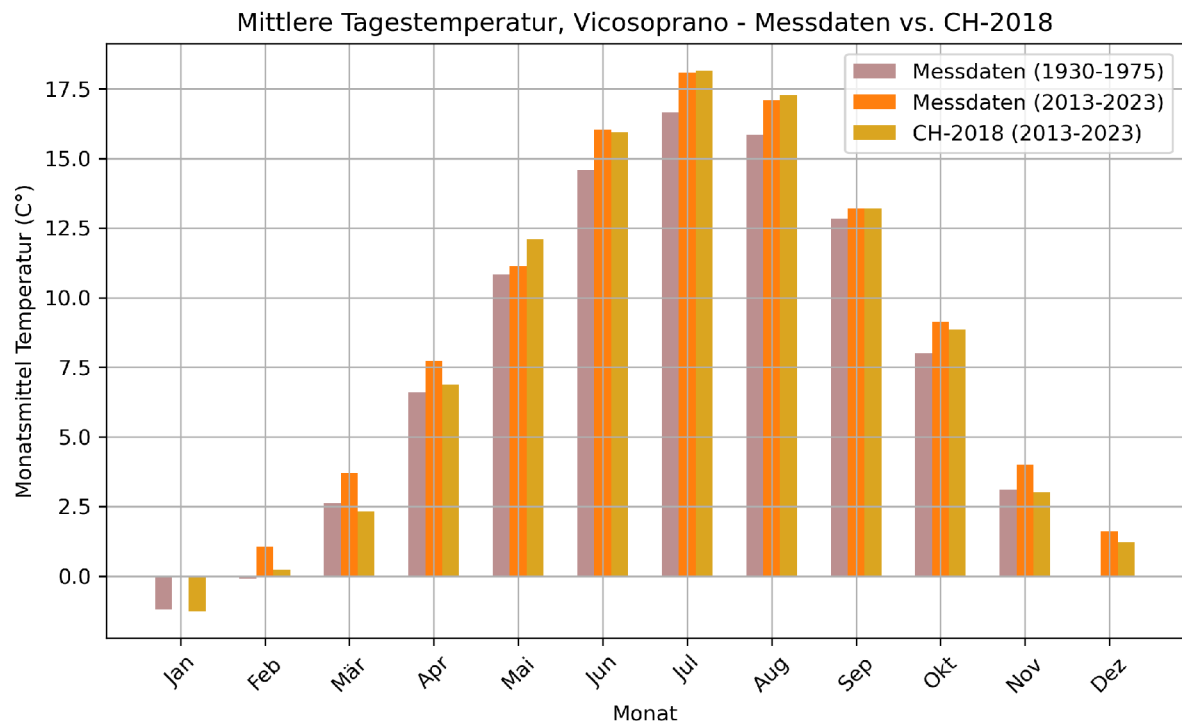


Abb. C.1: Vergleich vom Monatsdurchschnitt der gemessenen mittlere Tagestemperatur mit der modellierten mittleren Tagestemperatur (CH-2018) für die Zeitperiode 2013-2023.

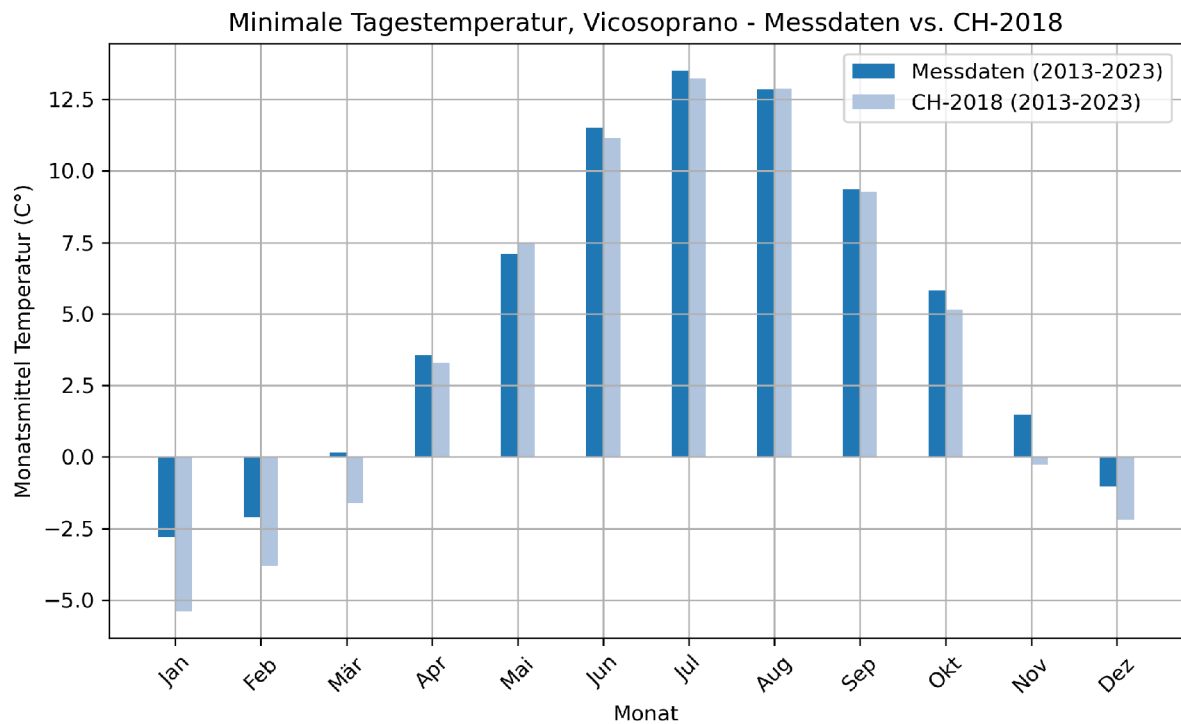


Abb. C.2: Vergleich vom Monatsdurchschnitt der gemessenen minimalen Tagestemperatur mit der modellierten minimalen Tagestemperatur (CH-2018) für die Zeitperiode 2013-2023.

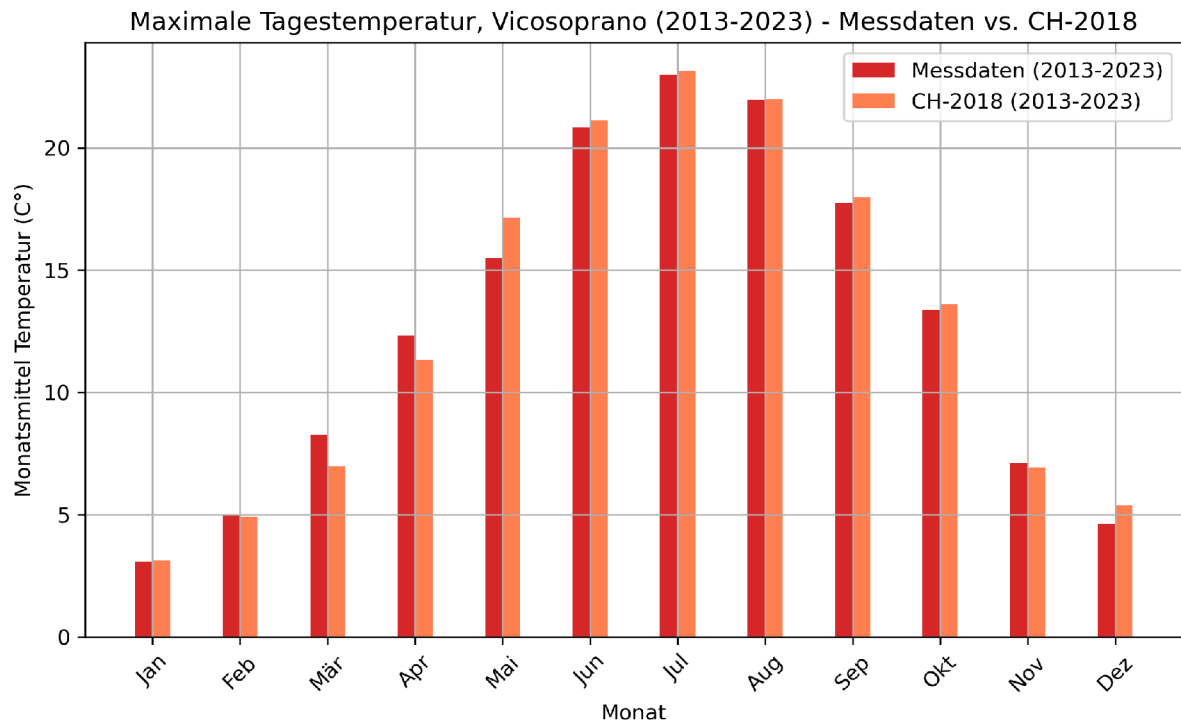


Abb. C.3: Vergleich vom Monatsdurchschnitt der gemessenen maximalen Tagestemperatur mit der modellierten maximalen Tagestemperatur (CH-2018) für die Zeitperiode 2013-2023.

C.1.2 Globalstrahlung

Für das Bergell sind im Datensatz CH-2019 (DAILY-LOCAL & DAILY-GRIDDED) keine Globalstrahlungsdaten verfügbar. Deshalb wurden die Globalstrahlungsdaten CH-2018 für die Station Samedan (DAILY-LOCAL) verwendet. Wie in Abbildung C.4 ersichtlich, sind diese Werte für die Zeitperiode 2013-2023 relativ ähnlich wie die bei der Station Vicosoprano gemessenen Werte. Der Grund dafür ist, dass die Bewölkung in Samedan und Vicosoprano in der Regel relativ ähnlich ist. Es wird angenommen, dass dies auch in Zukunft der Fall sein wird. Generell scheint die Globalstrahlung in den Monaten Juni bis September mit den CH-2018 Daten leicht unterschätzt und in den übrigen Monaten etwas überschätzt zu werden.

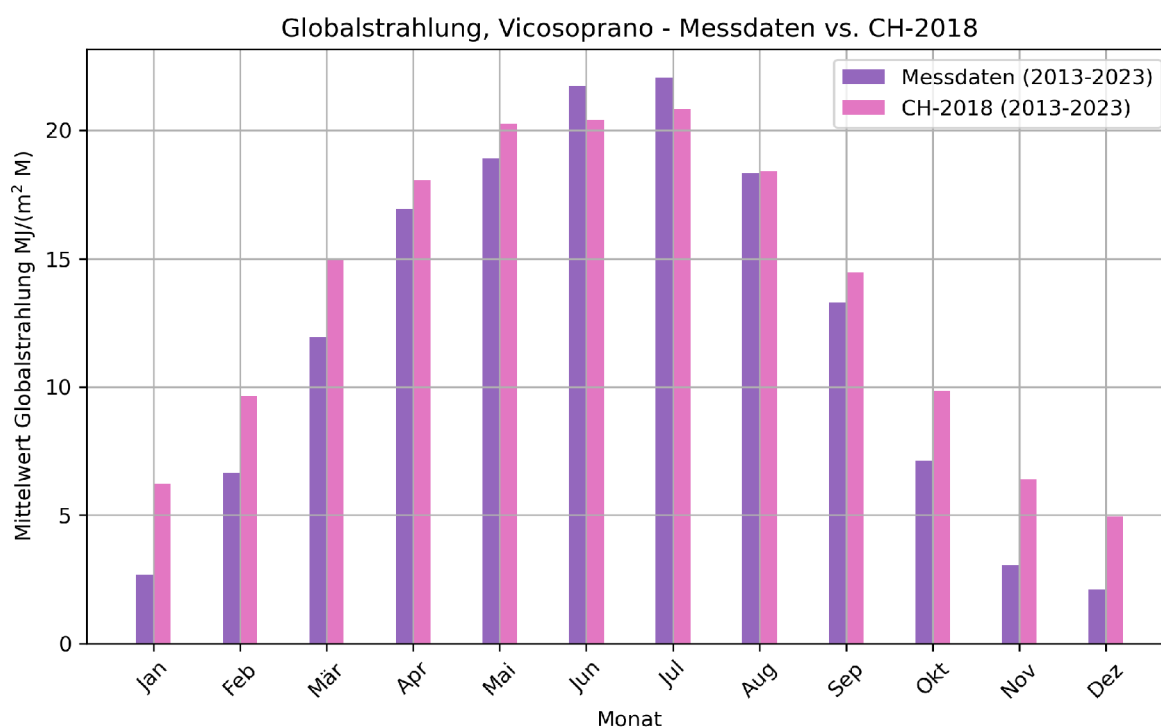


Abb. C.4: Vergleich des Mittelwertes der gemessenen Monatssumme der Globalstrahlung mit der modellierten Globalstrahlung (CH-2018) für den Zeitraum 2013-2023.

C.1.3 Referenz-Evapotranspiration

Die mittels den Messdaten und CH-2018-Daten berechneten Referenz-Evapotranspirationswerte für die Periode 2013-2023 sind vergleichbar und unter Berücksichtigung der Methoden- und Prognoseunsicherheiten akzeptabel (Abbildung C.5 & C.6). Die Unterschiede sind auf die unterschiedlichen Temperatur- und insbesondere Globalstrahlungswerte zurückzuführen.

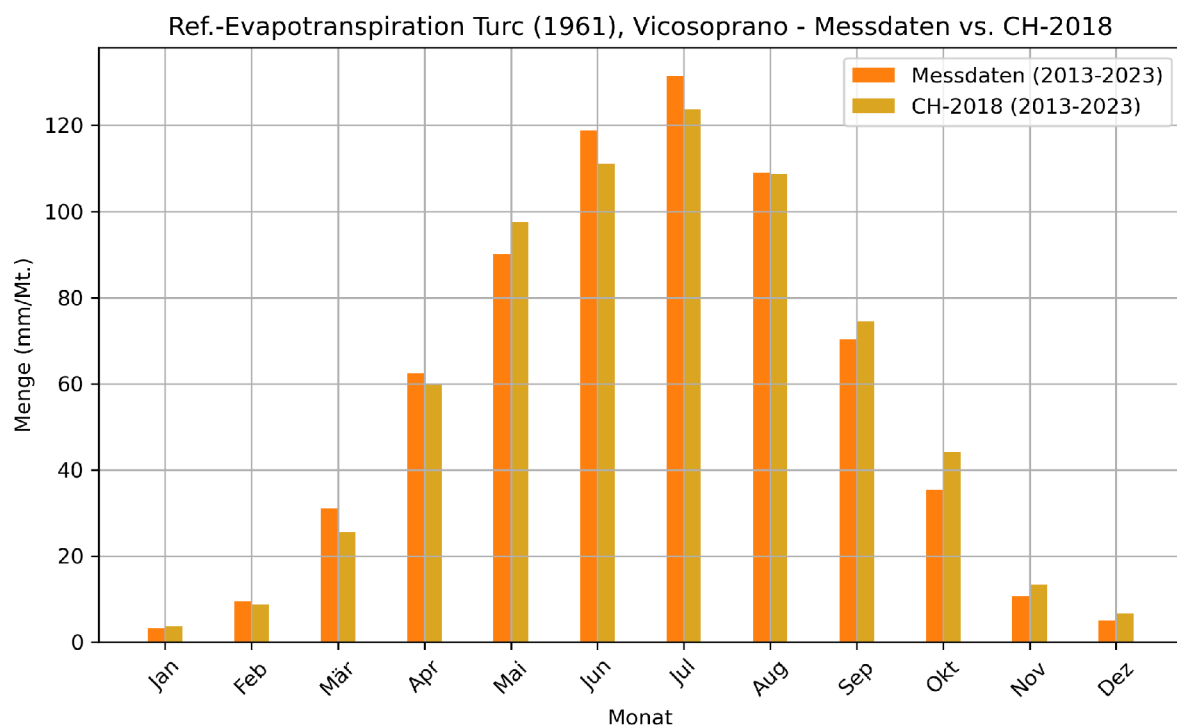


Abb. C.5: Vergleich der mittels dem gemessenen Klima berechneten Evapotranspiration nach Turc (1961) mit der aus dem modellierten Klima (CH-2018) berechneten Evapotranspiration nach Turc (1961) für den Zeitraum 2013-2023.

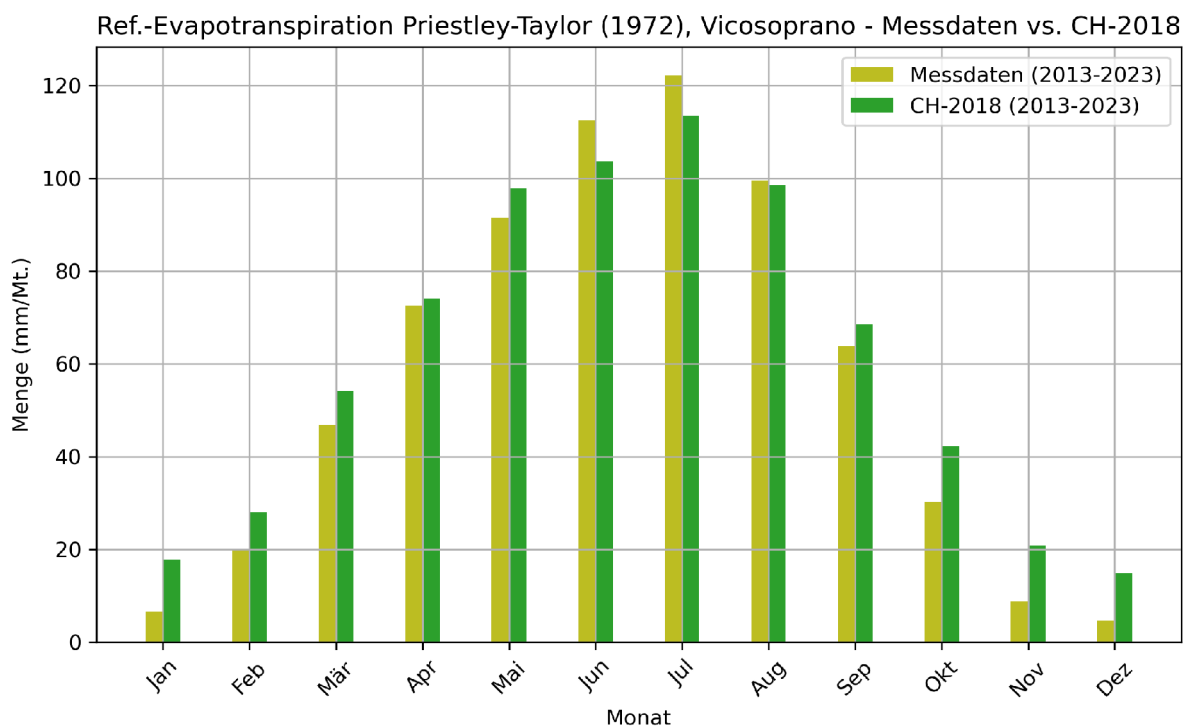


Abb. C.6: Vergleich der mittels dem gemessenen Klima berechneten Evapotranspiration nach Priestley-Taylor (1972) mit der aus dem modellierten Klima (CH-2018) berechneten Evapotranspiration nach Priestley-Taylor (1972) für den Zeitraum 2013-2023.

C.1.3 Niederschlag

Es wurden die Niederschlagsdaten CH-2018 für die Station Samedan (DAILY-LOCAL) verwendet. Die Unterschiede zwischen den Messdaten und den CH-2018-Daten sind beim Niederschlag am grössten (Abbildung C.7). Die CH-2019 Daten scheinen die Niederschläge im Frühling (Mai, Juni) zu überschätzen und im Herbst (Oktober, November) zu unterschätzen. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Zeitreihe der Messdaten (10 Jahre) für den Niederschlag eher gering ist und somit die statistische Relevanz der Jahre 2013-2023 fraglich ist. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die CH-2018 sowohl für die Zukunft als auch für den Beobachtungszeitraum repräsentativ sind.

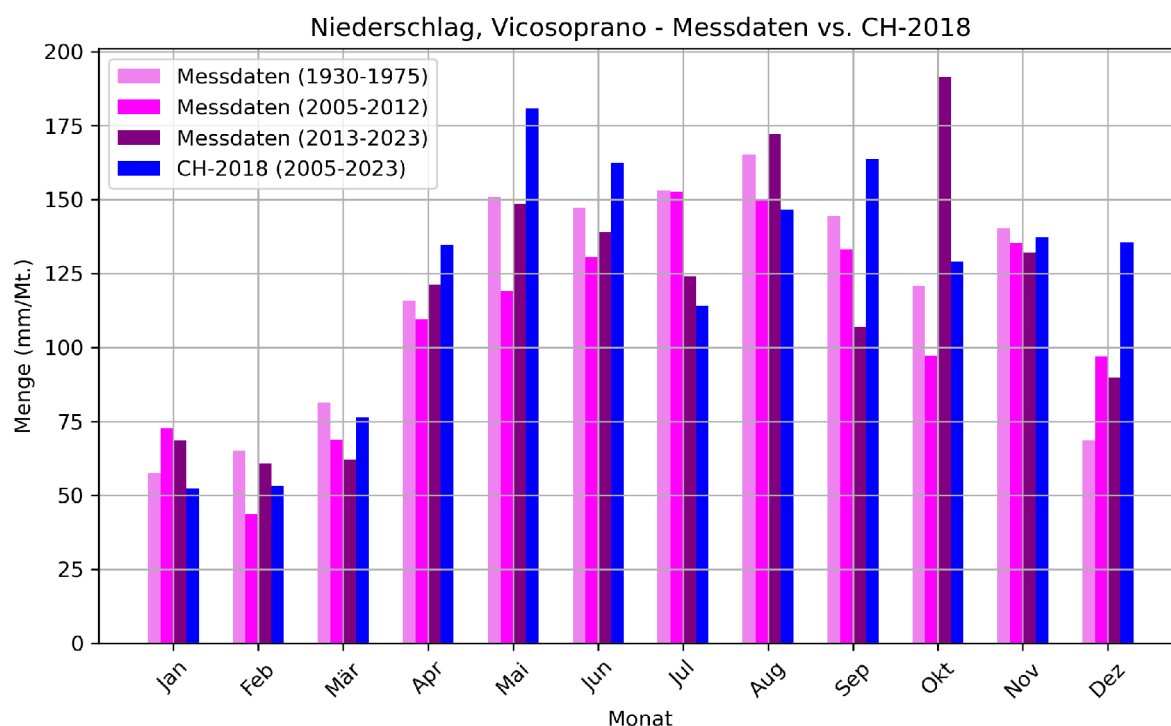


Abb. C.7: Vergleich vom Monatsdurchschnitt der gemessenen Niederschlagsmenge mit der modellierten Niederschlagsmenge (CH-2018) für die Zeitperiode 2013-2023.

ANHANG D

Einfluss der Kultur und des Bodens



D.1 Einfluss der Kultur

Für jede Kultur wurden folgende Parameter gemäss Allen et al. (1998) bestimmt: Z_r - Maximale Durchwurzelungstiefe; $K_{c,in}$, $K_{c,dev}$, $K_{c,mid}$, $K_{c,end}$ - Kulturkoeffizienten während der vier vegetativen Wachstumsphasen. $K_{c,ng}$ - Kulturkoeffizient ausserhalb der Kulturzeit; p_5 - Faktor der angibt wie viel Bodenwasserdefizit toleriert wird; h - Maximale Pflanzenhöhe; L_{in} , L_{dev} , L_{mid} , L_{end} - Länge der vier vegetativen Wachstumsphasen; DP - Saattermin (Tag im Jahr); DH - Erntetermin (Tag im Jahr). Die Parameterwerte in Tabelle D.1 wurden mit Hilfe von Angaben aus der Literatur abgeleitet (Allen et al. 1998; Geyer, et al. 2020; Bregy et al. 2017; Smith, Calanca, & Fuhrer 2012; Agrometeo; Agroscope).

Tab. D.1: Eigenschaften der Kulturen (Kulturkoeffizienten). Jeder Kultur werden die folgenden Eigenschaften zugeordnet. Die Werte wurden aus der Literatur abgeleitet (Allen et al. 1998; Geyer, et al. 2020; Bregy et al. 2017; Smith, Calanca, & Fuhrer 2012; Agrometeo; Agroscope).

Kulturen	Z_r (mm)	$K_{c, in}$	$K_{c, dev}$	$K_{c, mid}$	$K_{c, end}$	$K_{c, ng}$	p_5	h_{max} (m)
Weideland	1000	0.88	0.88	0.88	0.8	0.2	0.6	0.225
Naturwiese	800	0.9	0.95	0.95	0.9	0.2	0.6	0.25
Körnermais	1350	0.3	1.2	1.2	0.35	0.2	0.55	2
Zuckermais	1000	0.3	1.15	1.15	1.05	0.2	0.5	1.5
Raigras	800	0.95	1.1	1.1	0.95	0.2	0.6	0.3
Klee	700	0.95	1	1	0.95	0.2	0.5	0.3
Kartoffeln	500	0.5	1.15	1.15	0.75	0.2	0.35	0.6
Zuckerrüben	950	0.35	1.2	1.2	0.7	0.2	0.55	0.5
Lagerkarotten	750	0.7	1.05	1.05	0.95	0.2	0.35	0.3
Apfel (Gala)	1500	0.5	1.2	1.2	0.95	0.2	0.5	4

Kulturen	L_{in}	L_{dev}	L_{mid}	L_{end}	DP	DH
Körnermais	30	40	50	50	122	292
Zuckermais	30	30	30	20	106	216
Kartoffeln	31	36	52	31	101	251
Zuckerrüben	50	40	50	40	92	272
Lagerkarotten	24	32	48	16	167	287
Apfel (Gala)	18	62	79	26	65	250

Für Grünland wurden zudem die folgenden Wachstumsparameter bestimmt: ED - Start der ersten Wachstumsphase (Tag im Jahr); DD - Ende der letzten Wachstumsphase (Tag im Jahr); T_{ref} - Basistemperatur; GDD_0 - Grenzwert für "Growing Degree Days", der die Wachstumsrate zu Beginn der Wachstumsperiode bestimmt; LAI_{min} - Minimaler Blattflächenindex (Startwert nach Schnitt); LAI_{max} - Maximaler Blattflächenindex der Kultur; LAI_{cut} - Blattflächenindex bei welchem

der Schnitt erfolgt; β - Koeffizient. Diese werden benötigt um den Blattflächenindex zu bestimmen und einen Schnitt des Grünlands zu simulieren. Die Parameterwerte in Tabelle **D.2** wurden initial aus Literaturangaben abgeleitet (Bassin, Calanca, Weidinger, Gerosa & Fuhrer 2004; Smith, Calanca & Fuhrer 2012; Vuffray, et al. 2017) und anschliessend noch leicht angepasst um mit den Informationen der Landwirtschaftskommission übereinzustimmen.

Für Raingras und Klee wird die Gleichungen nach Bassin, Calanca, Weidinger, Gerosa & Fuhrer 2004 zur Berechnung des Blattflächenindex verwendet:

LAI Raingras & Klee

$$LAI_{Bassin} = LAI_{min} + \frac{LAI_{min} * (LAI_{max} - LAI_{min})}{LAI_{min} + (LAI_{max} - LAI_{min}) * \exp [-\beta * (GDD - GDD_0)]}$$

Für das Weideland wird die Gleichung nach Smith, Calanca & Fuhrer 2012 verwendet:

LAI Weideland

$$LAI_{Smith} = 0.008 * GDD$$

Dabei wird der Wert GDD mit folgender Formel berechnet, sofern T_a (mittlere Tagestemperatur) $> T_{ref}$:

$$GDD_i = GDD_{i-1} + (T_a - T_{ref})$$

Die jeweiligen Längen der Wachstumsphasen sind wie folgt definiert: L_{in} entspricht der Anzahl Tage zwischen LAI_{min} und einem LAI-Wert von 0.8. L_{dev} entspricht der Anzahl Tage zwischen $LAI = 0.8$ und $LAI = 2$. Mit einem LAI-Wert von 2 beginnt L_{mid} , welches der Anzahl Tage zwischen $LAI = 2$ und LAI_{cut} entspricht. Für L_{end} wird der Wert 1 verwendet.

Die Parameterwerte für das Grünland wurden so angepasst, dass sie gut mit den von der Landwirtschaftskommission angegebenen bzw. aus der Literatur stammenden LAI-Jahresverläufen (Schnittzyklen) übereinstimmen. Die Vegetationsphase wurde der Einfachheit halber als konstant über die Zeit angenommen. Bei der Kalibrierung wurden folgende Informationen berücksichtigt:

- Kunstwiese (Annahme ca. Eigenschaften von Raingras): Aussaat Anfang Mai, ca. zwei Wochen später beginnt das Wachstum, also ca. Mitte/Ende Mai. Aufgrund der Klimaänderung wird der Zeitpunkt in Zukunft etwas früher liegen, weshalb Anfang Mai als Beginn gewählt wurde (ca. 120. Tag des Jahres). Das Wachstumsende ist üblicherweise Mitte/Ende Oktober (ca. 300. Tag des Jahres). Es gibt normalerweise drei Schnittzyklen. In Abbildung **D.1** ist der berechnete Jahresverlauf für Raingras für die Jahre 2010-2020 (aktuell) und für die Jahre 2050-2060 ersichtlich. Wie ersichtlich ist damit zu rechnen, dass in Zukunft aufgrund des schnelleren Wachstums ein zusätzlicher Schnitt sinnvoll werden könnte.
- Naturwiese: Es wird angenommen, dass die Wachstumsphase etwa gleich lang ist wie bei einer Kunstwiese. Aufgrund des langsameren Wachstums gibt es nicht immer drei, sondern manchmal nur zwei Schnittzyklen. Abbildung **D.2** zeigt den berechneten Jahresverlauf für eine Naturwiese in einem

typischen Jahr. Auch hier ist ersichtlich, dass in Zukunft aufgrund des schnelleren Wachstums ein zusätzlicher Schnitt sinnvoll werden könnte.

- Für Weideland wurde der Jahresverlauf gemäss Vuffray et al. (2017) abgeschätzt. Als Start des Wachstums wurde Anfang April (ca. 100. Tag des Jahres) gewählt und das Ende ca. Ende Oktober (ca. 300. Tag des Jahres). Diese Zeitspanne entspricht den Beobachtungen für Standorte auf ca. 800-1.000 m ü. M. Für Weideland wird eine kontinuierliche Abgrasung angenommen, weshalb der Jahresverlauf mit vielen Zyklen simuliert wird (siehe Abbildung **D.3**).

Zudem wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, die gezeigt hat, dass die Sensitivität im Vergleich zu den Bodenparametern eher gering ist.

Tab. D.2: Wachstumsparameter für Grünland. Die Werte wurden aus der Literatur abgeleitet (Bassin, Calanca, Weidinger, Gerosa & Fuhrer 2004; Smith, Calanca & Fuhrer 2012; Vuffray, et al. 2017)

Kulturen	ED (Tag)	DD (Tag)	T _{ref} (°C)	GDD ₀ (Tage)	LAI _{min} (m ² /m ²)	LAI _{max} (m ² /m ²)	LAI _{cut} (m ² /m ²)	β (-)
Raigras (1. Wachstum)	130	300	5	116	0.5	4	3.98	0.015
Raigras (nach 1. Schnitt)	"	"	"	100	"	3	2.9	0.009
Klee (1. Wachstum)	130	300	5	116	0.5	4	3.98	0.015
Klee (nach 1. Schnitt)	"	"	"	100	"	3	2.9	0.009
Naturwiese (1. Wachstum)	130	300	5	116	0.5	4	3.98	0.01
Naturwiese (nach 1. Schnitt)	"	"	"	100	"	3	2.9	0.008
Weideland	100	300	2.5	-	0.5	-	2.5	-

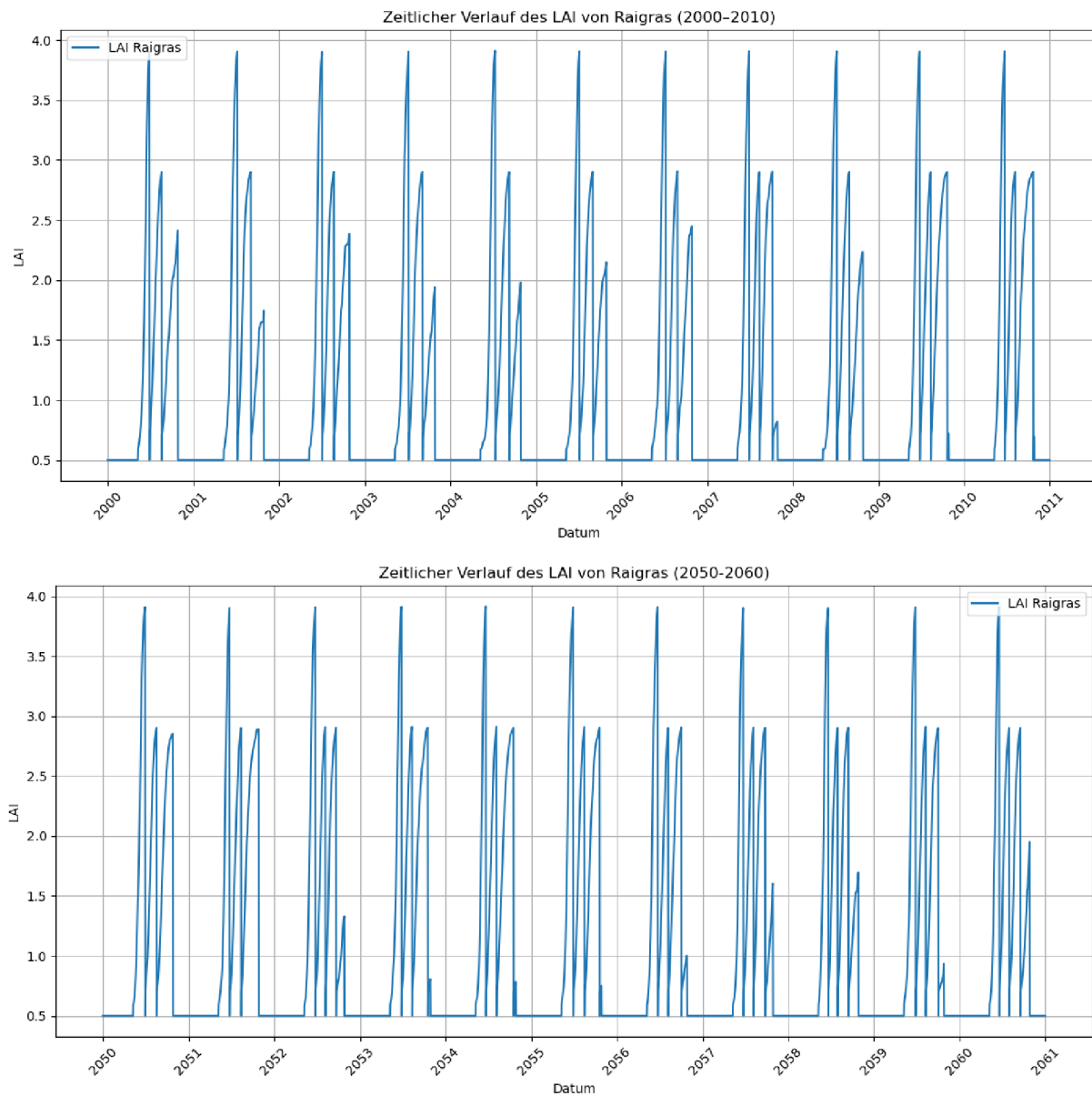


Abb. D.1: Entwicklung des modellierten LAI-Verlaufs von Raigras für die Jahre 2000-2010 (obere Grafik) und 2050-2060 (untere Grafik)

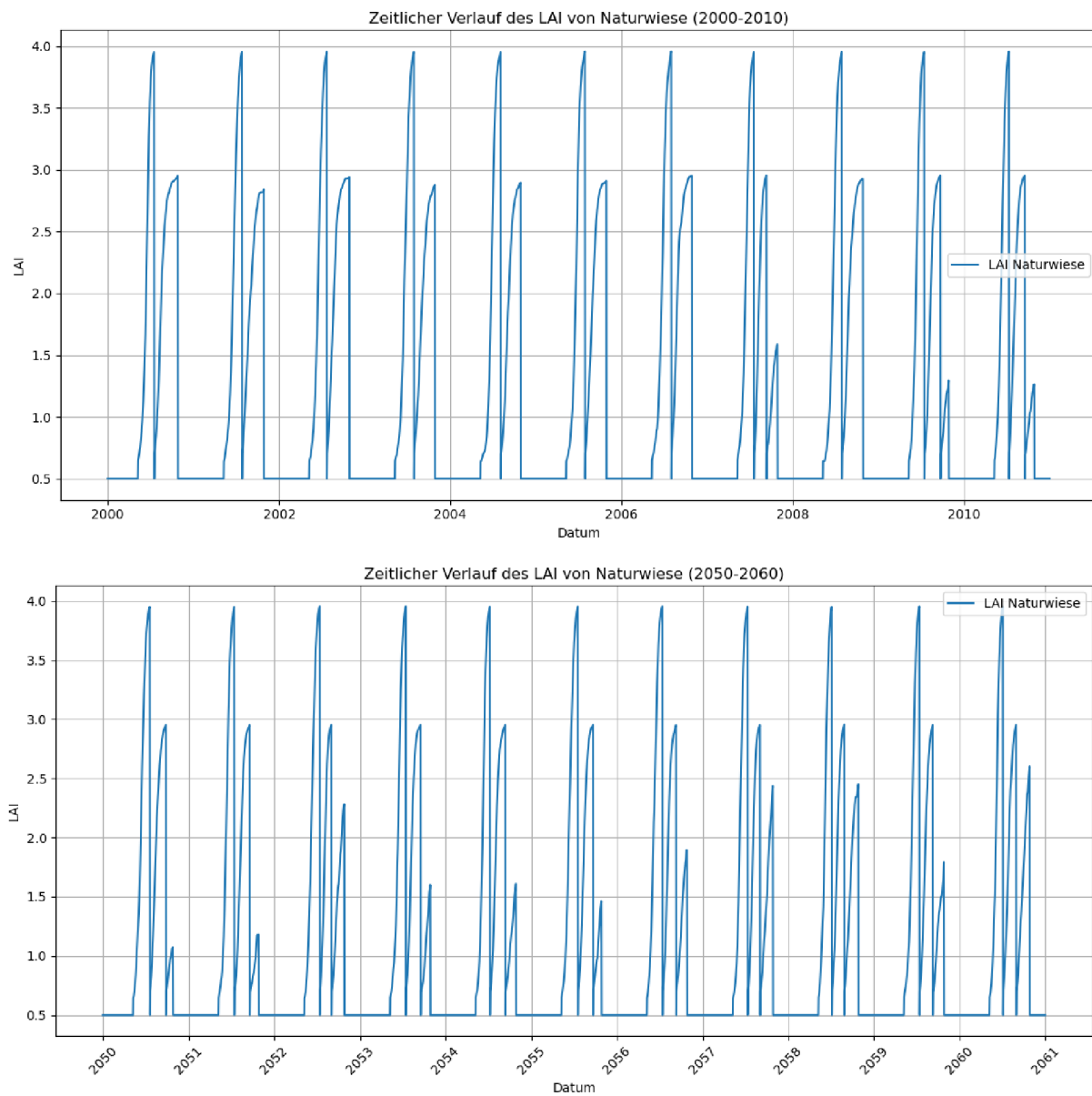


Abb. D.2: Entwicklung des modellierten LAI-Verlaufs von Naturwiese für die Jahre 2000-2010 (obere Grafik) und 2050-2060 (untere Grafik)

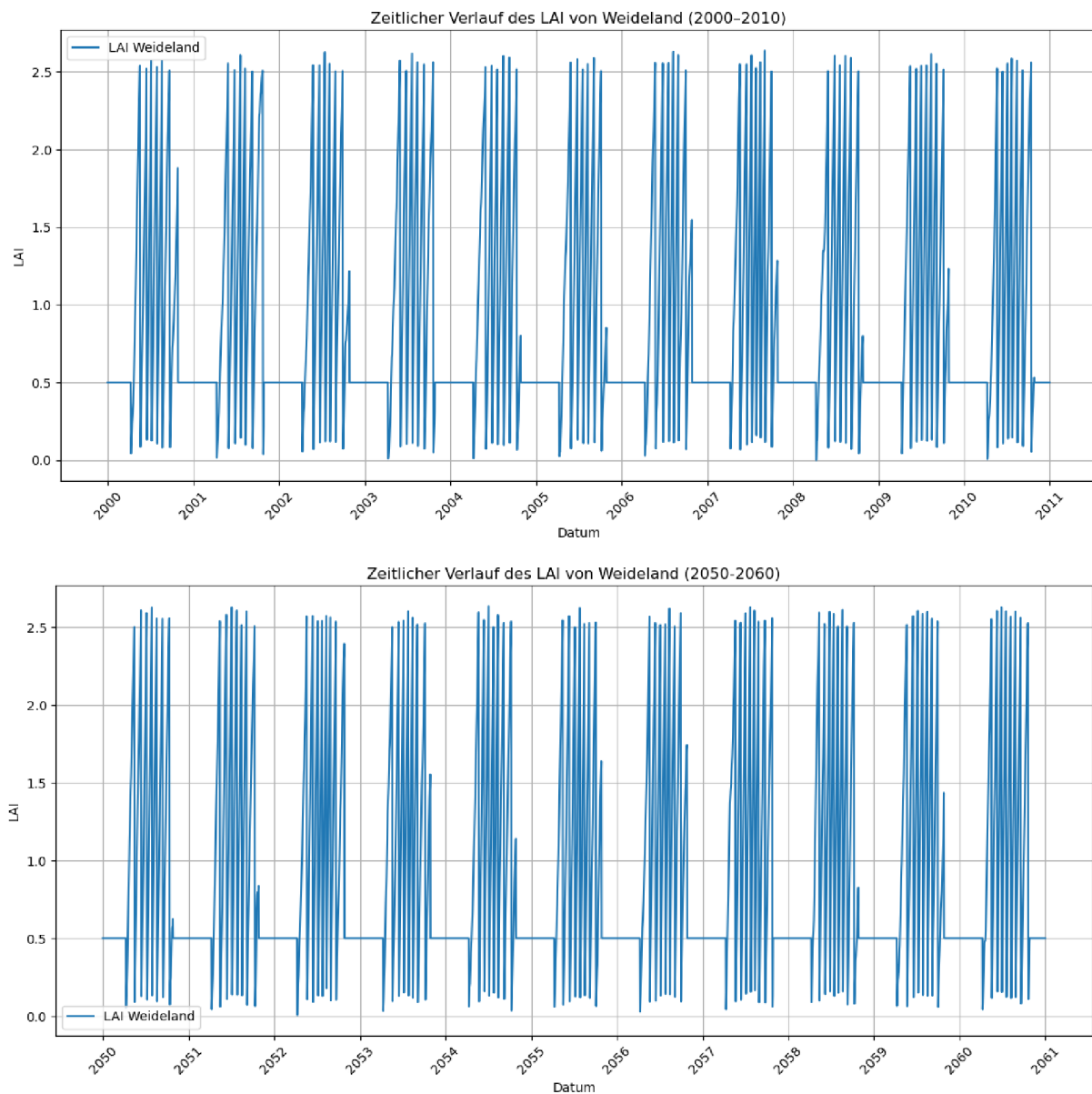


Abb. D.3: Entwicklung des modellierten LAI-Verlaufs von Weideland für die Jahre 2000-2010 (obere Grafik) und 2050-2060 (untere Grafik)

D.2 Einfluss des Bodens

Den drei berücksichtigten Bodentypen werden die in Tabelle **D.3** aufgeführten Eigenschaften zugeordnet. Die Werte wurden aus der Literatur abgeleitet (Allen et al. 1998; Clapp & Hornberger 1978; Muth 1991) und mit der Landwirtschaftskommission abgesprochen.

Tab. D.3: Eigenschaften der Bodentypen. Jedem Bodentyp werden Eigenschaften zugeordnet. Die Werte wurden aus der Literatur abgeleitet (Allen et al. 1998; Clapp & Hornberger 1978). Z_{max} : Bodentiefe, Q_{FC} : Feldkapazität, Q_{WP} : Welkepunkt; Q_{sat} : Porosität. Die maximal nutzbare Feldkapazität (TAW_{max}) wurde gemäss Formel $Z_{max} \times (Q_{FC} - Q_{WP})$ berechnet.

Bodentyp	Z_{max} (mm)	Q_{FC} (-)	Q_{WP} (-)	Q_{sat} (-)	TAW_{max} (-)
Bodentyp 1 (z. B. sandig-lehmige Braunerde)	700	0.25	0.08	0.42	119
Bodentyp 2 (z. B. sandige Braunerde oder Ranker)	450	0.25	0.07	0.40	81
Bodentyp 3 (z. B. sandig-kiesiger Rankerl)	300	0.2	0.05	0.35	45

Für jede Kombination von Kultur und Bodenart wird von den beiden Grössen ‚Durchwurzelungstiefe‘ Z_r und ‚Bodentiefe‘ Z_{max} die limitierende Grösse ($Z = \min(Z_r, Z_{max})$) zur Berechnung des Bodenvolumens herangezogen, aus dem die Kultur das erforderliche Wasser beziehen kann. Die nutzbare Feldkapazität berechnet sich wie folgt:

nutzbare Feldkapazität

$$TAW = Z \times (Q_{FC} - Q_{WP}) \text{ [mm]}$$

mit: $Z = \min(\text{Durchwurzelungstiefe } Z_r, \text{ Bodentiefe } Z_{max})$ in mm

Q_{FC} = Feldkapazität

Q_{WP} = Permanenter Welkepunkt

Der Wassergehalt des Bodens wird für jede Kombination aus Kultur und Bodentyp auf die TAW initialisiert.

In Abhängigkeit des Bodenwassergehalts und der nutzbaren Feldkapazität berechnet sich der Trockenstresskoeffizienten durch folgende Gleichung:

Trockenstresskoeffizient

$$K_s = \begin{cases} 1 & \text{if } (TAW - D_r) \geq (1 - p) \cdot TAW \\ \frac{TAW - D_r}{(1 - p) \cdot TAW} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Der Faktor p wird in Abhängigkeit vom kulturspezifischen Parameter p_5 bestimmt:

$$p = p_5 + 0.04 \times (5 - ET_p) \text{ [mm]}$$

D.3 Bewässerungsbedürftigkeit

Die Bewässerung der Kultur wird ausgelöst, wenn das Bodenwasserdefizit D_r den Schwellenwert $D_{r, \text{trig}}$ überschreitet. Dieser Schwellenwert ist wie folgt definiert:

$$D_{r, \text{trig}} = (0.2 + 0.8 * p) * TAW$$

Der Faktor p beschreibt den Anteil der nutzbaren Feldkapazität, der abgebaut werden kann, bis die Pflanze unter Trockenstress gerät. Je grösser p ist, desto widerstandsfähiger ist die Pflanze gegen Trockenstress. $D_{r, \text{trig}}$ entspricht einem K_s -Wert von 0.8. Die Bewässerungsmenge entspricht der Menge an Wasser, um K_s von 0.8 zurück auf 1 zu bringen:

$$IWR = D_r - p * TAW$$

ANHANG E

Bewässerungsbedarf Kulturen



E.1 Bewässerungsbedarf Kulturen

Im Hauptteil des Berichtes wurde der Bewässerungsbedarf von Weideland, Raigras und Apfelbäumen präsentiert. Im Folgenden wird der Bewässerungsbedarf weiterer Kulturen dargestellt.

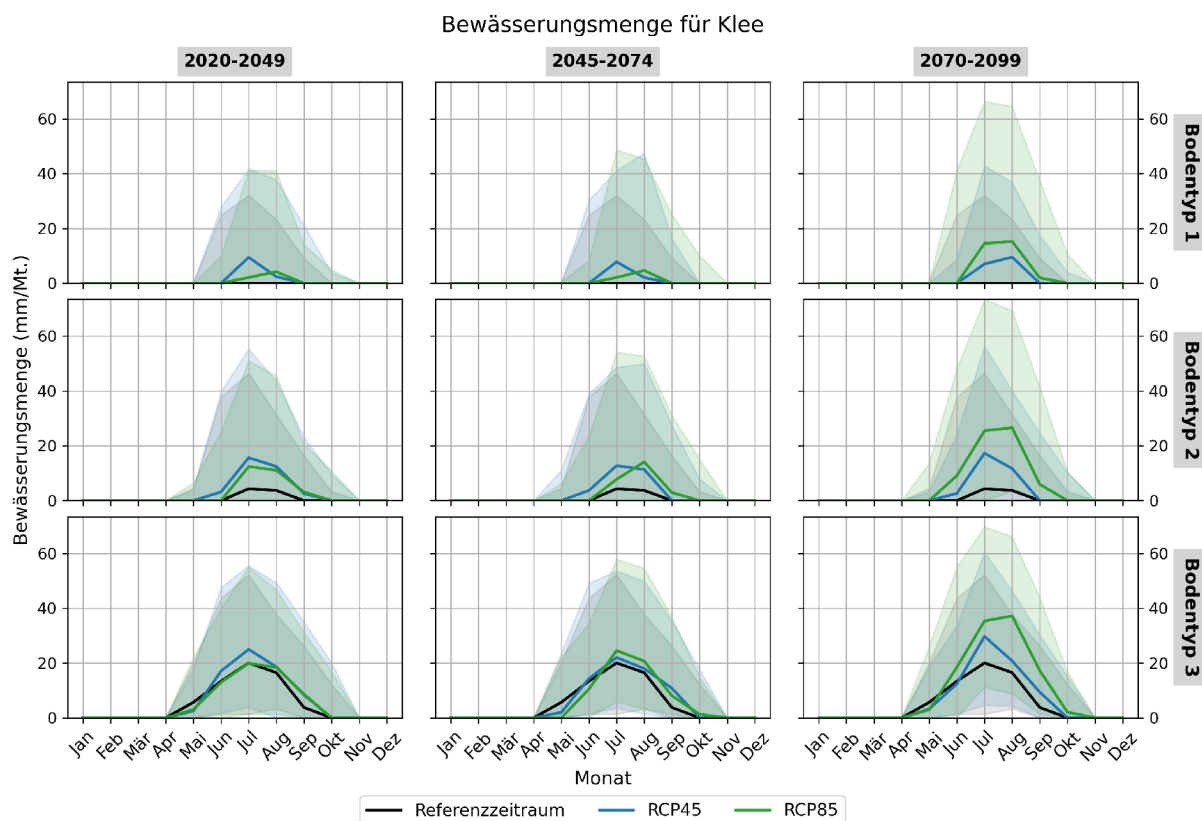


Abb. E.1: Entwicklung des Bewässerungsbedarfes von Klee für unterschiedliche Zeithorizonte und die unterschiedlichen Bodentypen (Bodentyp 1: Mittelgründig, Bodentyp 2: Flachgründig, Bodentyp 3: Sehr flachgründig). Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden (Extremwerte).

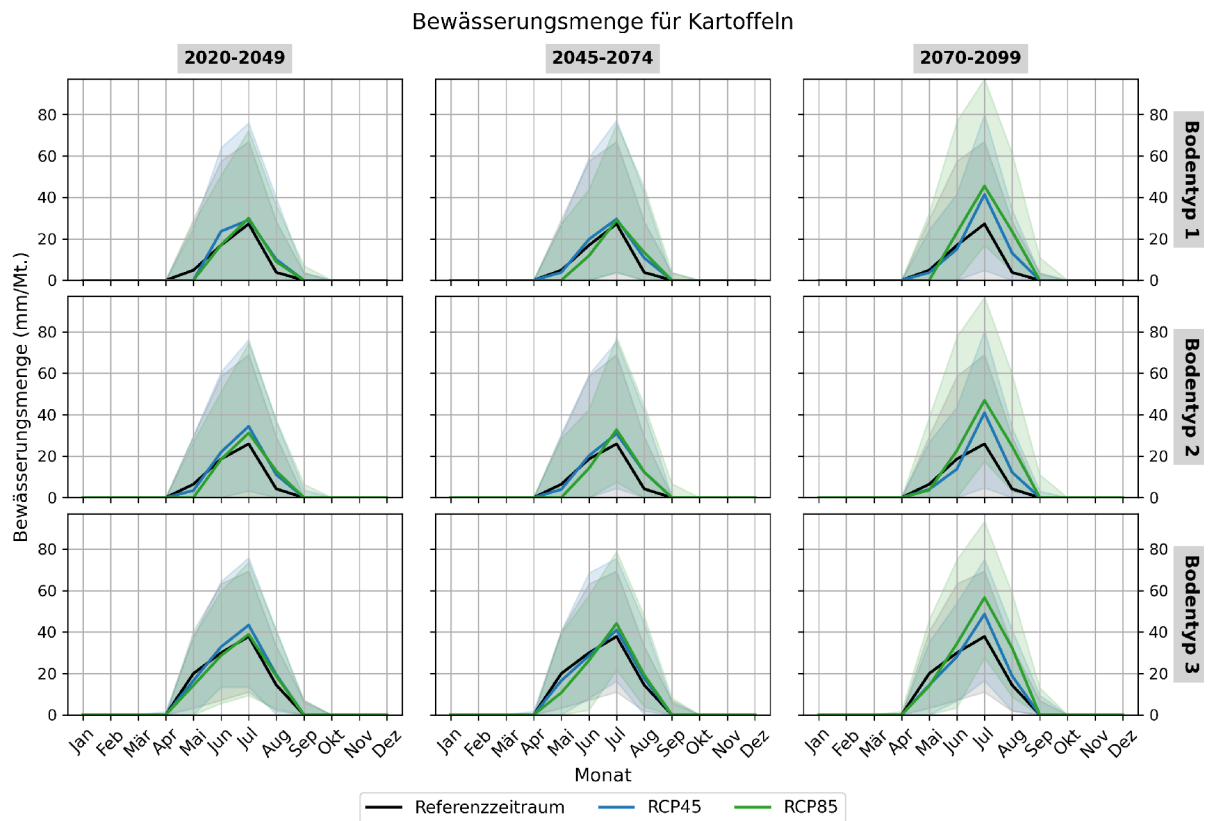


Abb. E.2: Entwicklung des Bewässerungsbedarfes von Kartoffeln für unterschiedliche Zeithorizonte und die unterschiedlichen Bodentypen (Bodentyp 1: Mittelgründig, Bodentyp 2: Flachgründig, Bodentyp 3: Sehr flachgründig). Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden (Extremwerte).

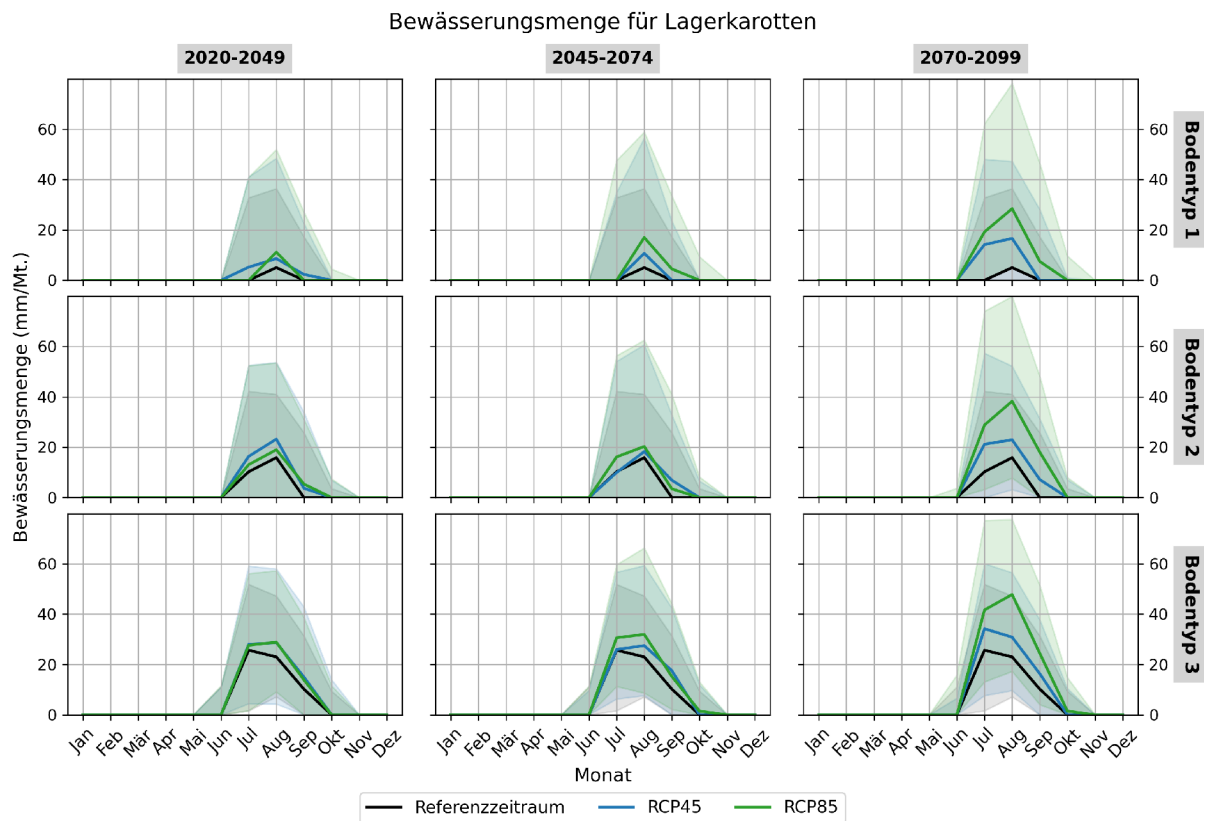


Abb. E.3: Entwicklung des Bewässerungsbedarfes von Lagerkarotten für unterschiedliche Zeithorizonte und die unterschiedlichen Bodentypen (Bodentyp 1: Mittelgründig, Bodentyp 2: Flachgründig, Bodentyp 3: Sehr flachgründig). Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden (Extremwerte).

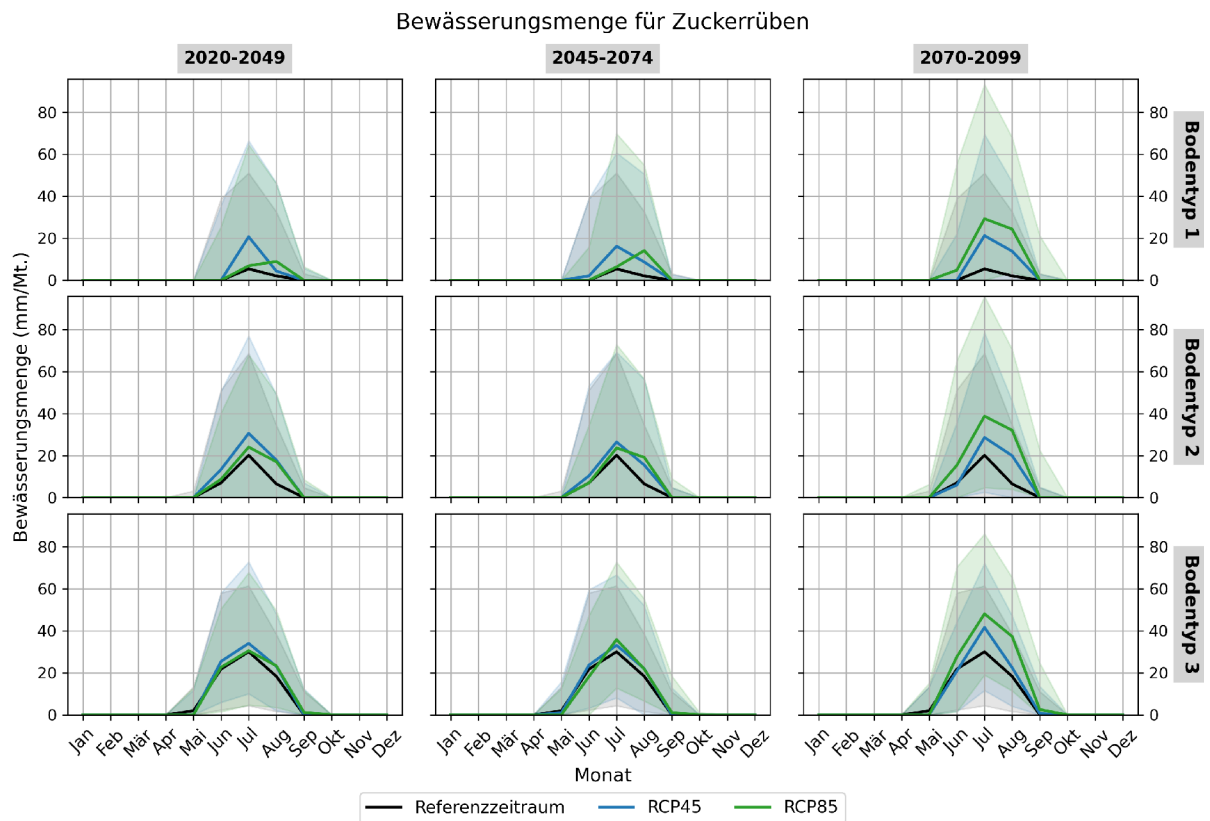


Abb. E.4: Entwicklung des Bewässerungsbedarfes von Zuckerrüben für unterschiedliche Zeithorizonte und die unterschiedlichen Bodentypen (Bodentyp 1: Mittelgründig, Bodentyp 2: Flachgründig, Bodentyp 3: Sehr flachgründig). Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden (Extremwerte).

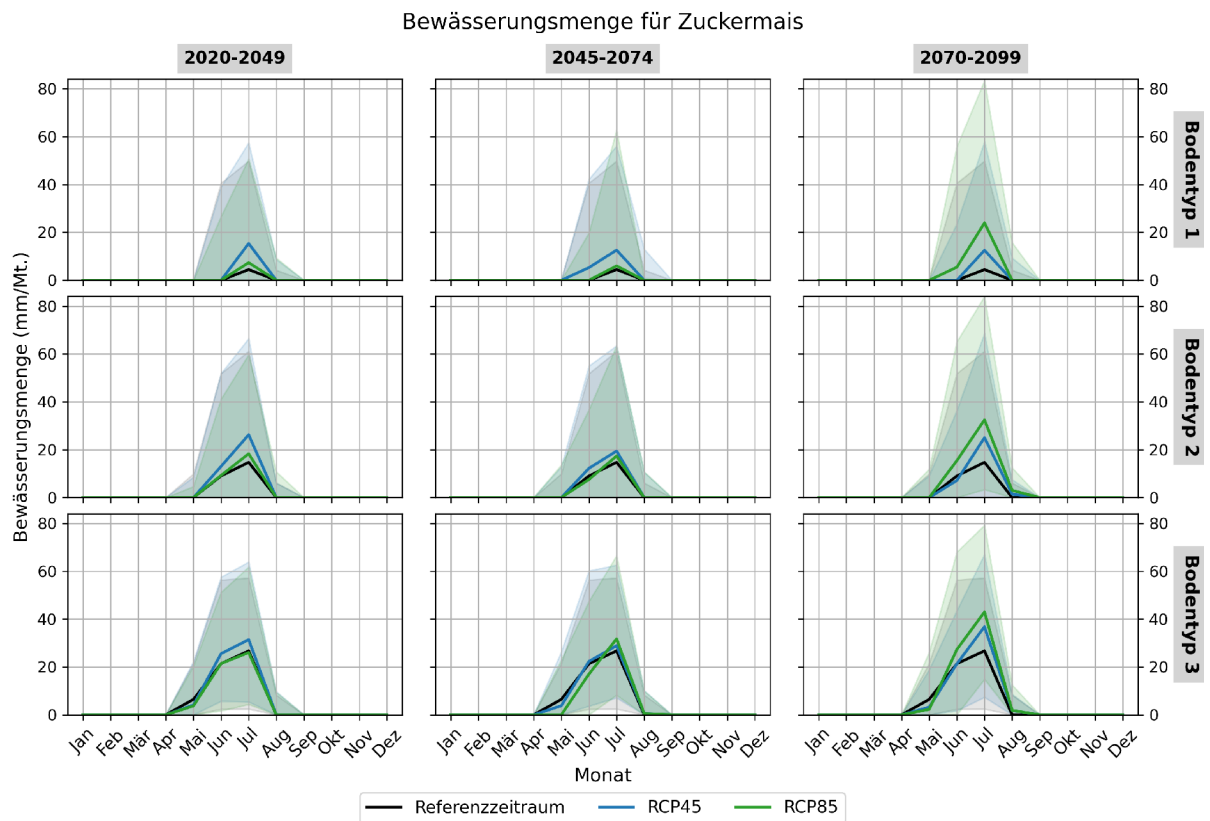


Abb. E.5: Entwicklung des Bewässerungsbedarfes von Zuckermais für unterschiedliche Zeithorizonte und die unterschiedlichen Bodentypen (Bodentyp 1: Mittelgründig, Bodentyp 2: Flachgründig, Bodentyp 3: Sehr flachgründig). Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden (Extremwerte).

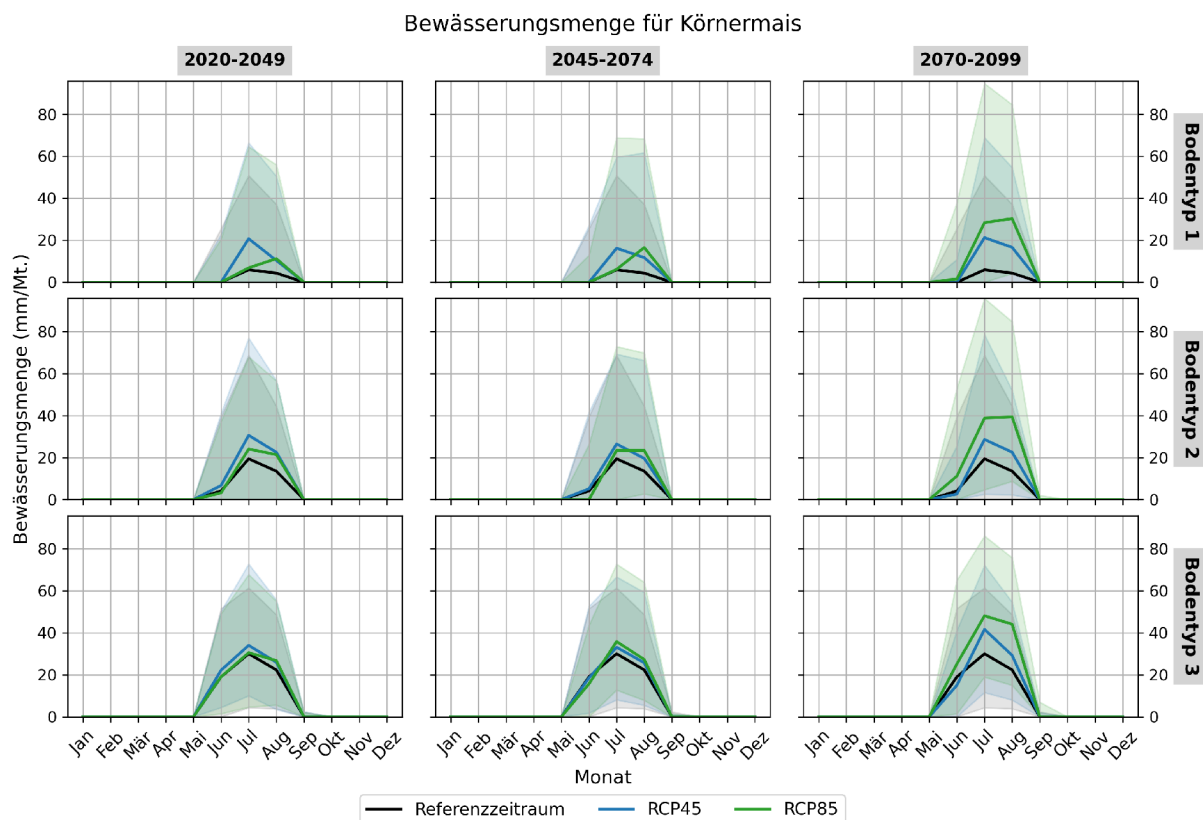


Abb. E.6: Entwicklung des Bewässerungsbedarfes von Körnermais für unterschiedliche Zeithorizonte und die unterschiedlichen Bodentypen (Bodentyp 1: Mittelgründig, Bodentyp 2: Flachgründig, Bodentyp 3: Sehr flachgründig). Die schwarze Linie zeigt den Medianwert der Referenzperiode, die blaue Linie den Medianwert des mittleren Szenarios (RCP 4.5) und die grüne Linie den Medianwert des Szenarios ohne expliziten Klimaschutz (RCP 8.5). Die schraffierte Fläche zeigt jeweils den Bereich zwischen dem 10% und 90% Quantil der Monatswerte in den Zeitperioden (Extremwerte).