



Studie Wassernutzung und Wasserdargebot

***Zukünftige Veränderung von Wassernutzung und Wasserdargebot
im Kanton Solothurn vor dem Hintergrund des Klimawandels***



6/2021

Vorwort des Auftraggebers

Das Amt für Landwirtschaft und das Amt für Umwelt veröffentlichten im März 2021 den Bericht «Trockenheit in der Landwirtschaft». Dieser zeigt auf, dass die Landwirtschaft im Kanton Solothurn aufgrund des Klimawandels bis ins Jahr 2060 im Sommerhalbjahr vermehrt mit Trockenheit rechnen muss. Im Vorfeld der eidgenössischen Abstimmung zum CO₂-Gesetz, das die Basis für die Umsetzung von Klimaschutzmassnahmen in der Schweiz bilden sollte, kontaktierte mich eine Bewohnerin aus dem Kanton Solothurn. Bezüglich des Berichts zur Trockenheit bezweifelte sie, ob wir denn so sicher voraussehen können, was im Jahr 2060 passieren wird, wenn wir bei der Bewältigung der aktuellen Covid-Krise kaum die Situation in zwei Monaten einschätzen können.

Der vorliegende Bericht zeigt aber auf, dass es sehr klare Anzeichen für künftige Entwicklungen gibt, die zum sofortigen Handeln auffordern. Wir dürfen im Kanton Solothurn – glücklicherweise – einerseits davon ausgehen, dass sich die Jahresniederschlagsmenge nicht markant verändern wird. Trotzdem müssen wir uns andererseits darauf vorbereiten, dass im Sommer künftig mit deutlich weniger Niederschlägen gerechnet werden muss. Damit wird zumindest das oberflächlich verfügbare Wasserdargebot für alle ökologischen Notwendigkeiten und für die verschiedenen menschlichen Nutzungen knapper. Massnahmen sind deshalb zwingend.

Mit den eindrücklichen und klaren Aussagen des vorliegenden Berichts lässt sich sehr gut und nachvollziehbar begründen, warum sinnvolle Massnahmen, welche nicht von heute auf morgen realisierbar sind, jetzt angedacht werden müssen. Nur wenn wir deren Umsetzung zügig an die Hand nehmen, können wir zukünftige Konflikte um die Ressource Wasser vorsorglich und im Interesse des gesamten Kantons vermeiden. Was der Bericht ebenfalls klar aufzeigt: ohne Anstrengungen zum Schutz unseres Klimas werden die Massnahmen aufwändiger und kostenintensiver.

Massnahmen zum Schutz des Klimas lohnen sich also – packen wir's an! Für die Erarbeitung des Berichts danke ich Professor Rolf Weingartner und Jan Schwanbeck herzlich. Ebenso ein herzliches Merci richte ich an die kantonsinternen Mitarbeitenden, insbesondere Martin Heeb, für ihre Mitarbeit.

Gabriel Zenklusen, Chef Amt für Umwelt

Vorwort des Auftragnehmers

Wie sieht die hydrologische Zukunft aus? Die Beantwortung dieser Frage wird angesichts der weiter zunehmenden Temperaturen und aufgrund der Erfahrungen der Trockenjahre 2003, 2015 und 2018 immer dringender. Mit der Publikation neuer Klimaszenarien im Jahr 2018 durch das National Centre for Climate Services (NCCS) stehen nun räumlich und zeitlich hochauflösende Temperatur- und Niederschlagsdaten zur Verfügung, die eine hervorragende Grundlage zur Beantwortung dieser Frage bilden, auch für den Kanton Solothurn. Vor diesem Hintergrund beauftragte das Amt für Umwelt des Kantons Solothurn die Firma ecosfera gmbh, diese Daten für den Kanton Solothurn inwertzusetzen und in Kombination mit hydrologischen Analysen und Modellierungen ein möglichst detailliertes Bild der zu erwartenden Veränderungen beim Abfluss und deren Konsequenzen für die Wassernutzung zu erarbeiten. Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammen und entwirft ein Bild der hydrologischen Zukunft des Kantons.

Wir danken dem AfU für den Auftrag, der uns nicht nur spannende Einblicke in die hydrologische Vielfalt des Kantons ermöglichte, sondern auch erlaubte, aus methodischer Sicht sehr interessante Untersuchungen durchzuführen. Verschiedene Personen haben uns bei diesem Unterfangen unterstützt: Allen voran Martin Heeb, der das Projekt von Seiten des AfU begleitete und uns mit Rat und Tat zur Seite stand, dann die Begleitgruppe mit Gabriel Zenklusen (Chef des AfU), Lukas Egloff, Christian Hadorn und Philipp Staufer, welche das Projekt mit konstruktiven Vorschlägen förderten. Jennifer Jauch und Rainer Hug unterstützten uns dabei, zu den richtigen Daten zu gelangen. Norbert Emch ermöglichte uns tiefe Einsichten in die Landwirtschaft des Kantons. Zu guter Letzt sei hier Martin Würsten, der ehemalige Chef des AfU, erwähnt, der dieses Projekt initiierte. Es war eine grosse Freude, mit diesen Personen zusammenzuarbeiten. Vielen Dank! In diesen Dank schliessen wir Pascale Josi ein, welche die Korrekturlesung durchführte.

Rolf Weingartner und Jan Schwanbeck, ecosfera gmbh

Zusammenfassung

Im Kanton Solothurn verändert sich aufgrund des Klimawandels das hydrologische System und die Wechselbeziehungen zwischen Dargebot und Nutzung je nach Emissionsszenario – hier RCP 2.6 und 8.5 – unterschiedlich stark. In der vorliegenden Studie werden diese Veränderungen modelliert und bezüglich Hydrologie und Wassernutzung interpretiert. Dabei wird der Fokus aus räumlicher Sicht auf die Bezirke des Kantons und aus zeitlicher Sicht die beiden Perioden 2040–2069 und 2070–2099 gelegt.

Schlüsselbotschaften

1. Gelingt es, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und mittelfristig zu eliminieren (Emissionsszenario RCP 2.6), werden sich die hydrologischen Veränderungen im Kanton Solothurn im Vergleich zu heute kaum oder nur unwesentlich verändern.
2. Bei einem Szenario ohne Klimaschutz werden saisonal entscheidende Veränderungen eintreten, wobei die Abnahmen des nutzbaren Wassers im Sommer einschneidend sind. Eine integrierte Bewirtschaftung der kantonalen Fliessgewässer, der Grundwasserressourcen und der Zuflüsse von Aare und Emme ist die Voraussetzung, den zukünftigen Wasserbedarf im Sommer zu sichern. Günstiger Ausgangspunkt dafür sind die ergiebigen Grundwasserressourcen (vor allem im südlichen Kantonsteil), die unveränderten langjährigen mittleren Jahresabflüsse und die Erhöhung der langjährigen mittleren Abflüsse im Winter.
3. Mit einer pro-aktiven Massnahmenplanung beginnt man angesichts der möglichen hydrologischen Veränderungen besser heute als morgen. Denn: Die bisher beobachteten kumulativen CO₂-Emissionen stimmen weitgehend mit jenen des Szenarios ohne Klimaschutz (RCP 8.5) überein. Aber nicht nur das: Mit den aktuell von den Nationen deklarierten Emissionszielen verbleiben wir weiterhin auf diesem ungünstigen Emissionspfad des RCP 8.5-Szenarios.

Hinweis für die eilige Leserin oder den eiligen Leser

Das Kapitel 1 zeigt in kurzer Form die Problemstellung und Zielsetzung der vorliegenden Studie auf. Die Figur 1.2 steckt nicht nur den Gesamttrahmen der Untersuchungen ab, sondern gibt auch einen ersten Einblick in das methodische Vorgehen. Mit diesen Grundlagen ist es möglich, direkt in das Kapitel 6 mit den zusammenfassenden Karten und den Kernbotschaften der Untersuchungen einzusteigen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Verdankungen	iii
Zusammenfassung	vi
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Einordnung der Untersuchung	3
2 Hydro-geographische Grundlagen	5
2.1 Landschaftstypen	5
2.2 Rolle der Einzugsgebiete	5
2.3 Wasserdargebot heute	7
2.3.1 Solothurn und die Schweiz	7
2.3.2 Grundzüge des Wasserhaushalts mit besonderem Fokus auf den Abfluss	8
2.3.3 Zuflüsse von Aare und Emme	13
2.3.4 Reiche Grundwasservorkommen	15
2.4 Wassernutzung	17
2.4.1 Trink- und Brauchwassernutzung	18
2.4.2 Ökologischer Wasserbedarf	20
2.4.3 Wasserbedarf der Unterlieger	21
2.4.4 Landwirtschaftliche Bewässerung	21
2.4.5 Zusammenfassende Übersicht	23
3 Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz und im Kanton Solothurn	25
3.1 Emissionsszenarien und Modellierung von Niederschlag und Abfluss	25
3.2 Ergebnisse des Projekts CH2018-Hydro	27
3.3 Was wissen wir?	31
4 Methodik	32
4.1 Aufbereitung der CH2018-Klimaszenarien	32
4.2 Abflussmodellierung mit MoSO	33
4.2.1 Simulation der zukünftigen mittleren monatlichen Abflüsse	33
4.3 Beurteilung der Trockenheitsanfälligkeit	39
4.3.1 Hydrologische Trockenheitsanfälligkeit	39
4.3.2 Meteorologische Trockenheitsanfälligkeit	39
4.4 Methoden zur Datenauswertung	40
5 Resultate und Diskussion	41
5.1 Veränderungen des Wasserbedarfs	41
5.2 Veränderungen der Niederschläge	41
5.3 Beurteilung der Trockenheitsanfälligkeit und deren Veränderung	44

5.4	Veränderungen der monatlichen Abflüsse	46
5.4.1	Fallbeispiel	46
5.4.2	Übersicht über Bezirke	49
5.4.3	Beurteilung der Güte der hydrologischen Modellierungen	52
5.5	Beurteilung der Abflussveränderungen in den Bezirken	55
5.5.1	Hydrologie	55
5.5.2	Grundwasserneubildung	57
5.5.3	Nutzbares Wasser	60
5.6	Veränderungen bei Emme und Aare	69
5.6.1	Hydrologie	69
5.6.2	Nutzbares Wasser	71
6	Schlussfolgerungen	77
6.1	Synthese	77
6.1.1	Hydrologische Veränderungen	77
6.1.2	Veränderungen beim im Sommer nutzbaren Wasser	83
6.2	Kernbotschaften	85
6.3	Auf den Punkt gebracht	86

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Der Kanton Solothurn ist ein sehr wichtiger Agrarkantonen der Schweiz. Die Verfügbarkeit von Wasser ist nicht nur für die Landwirtschaft von grundlegender Bedeutung, sondern auch für Mensch, Industrie und Ökosysteme. Die Trockenjahre 2003, 2015 und 2018 haben gezeigt, dass das Wasser vor allem im Sommer knapp werden kann. So mussten viele Mittelland-Kantone 2018 Verbote für Wasserentnahmen aus Oberflächengewässern aussprechen, was die Landwirtschaft hart traf.

Aufgrund der neuesten Klimaszenarien CH2018-Hydro muss man damit rechnen, dass wir erst am Anfang einer Entwicklung stehen, bei der die sommerliche Trockenheit weiter zunehmen wird (Tab. 1.1). Die zukünftige Situation wird sich im Sommer – aber nicht nur dann – mit um bis zu 4 °C höheren mittleren Temperaturen und wesentlichen kleineren Niederschlägen deutlich von den heutigen Verhältnissen unterscheiden. Diese Werte beziehen sich *nota bene* auf mittlere und nicht auf extreme Jahre, welche noch weitaus heisser und trockener ausfallen dürften.

Tab. 1.1: Einzugsgebiet der Dünnern, Olten: Zukünftige mittlere Veränderungen von Temperatur [°C] und Niederschlag [%] bei den zwei Szenarien «mit Klimaschutz» (RCP 2.6) und «ohne Klimaschutz» (RCP 8.5, kursiv) (Daten: Hydrologischer Atlas der Schweiz)

Parameter/Zeitpunkt	Jahr	Sommer (JJA)	Winter (DJF)
Temperatur um 2060	1.2 / 2.4	1.4 / 2.7	1.5 / 2.4
Temperatur um 2085	1.1 / 3.1	1.3 / 4.4	1.4 / 4.1
Niederschlag um 2060	1 / 4	-7 / -8	8 / 15
Niederschlag um 2085	0 / 4	-5 / -20	7 / 22

Genau bei diesen Veränderungen von Niederschlag und Abfluss setzt die vorliegende Übersichtsstudie zu den hydrologischen Veränderungen im Kanton Solothurn an. Die Figur 1.1 steckt den Betrachtungsrahmen der Studie ab: Das Wasserdargebot bildet den Ausgangspunkt. Mit dem Wasserdargebot wird das zur Nutzung verfügbare erfasst, also der Abfluss in Bächen und Flüssen sowie das Grundwasser, wobei in der vorliegenden Untersuchung der Fokus auf den Abfluss gelegt wird. Auf der Nutzerseite stehen der Trinkwasserverbrauch, der Wasserbedarf von Industrie und Gewerbe und das Bewässerungswasser für die Landwirtschaft im Mittelpunkt. Aber auch das Ökosystem und die Unterlieger – also die Anrainer an Aare und Birs unterhalb des Kantons Solothurn – benötigen Wasser und sind damit der Nutzerseite zuzurechnen.

Durch den Einfluss des Klimawandels, der hier schwerpunktmässig betrachtet wird, und den sozio-ökonomischen Wandel verändert sich das hydrologische System und die Wechselbeziehungen zwischen Dargebot und Nutzung. Diese Veränderungen werden in dieser Studie untersucht, wobei aus räumlicher Sicht die Bezirke des Kantons und aus zeitlicher Sicht die beiden Perioden 2040–2069 und 2070–2099 im Mittelpunkt stehen. Es soll auf drei Hauptfragestellungen fokussiert werden:

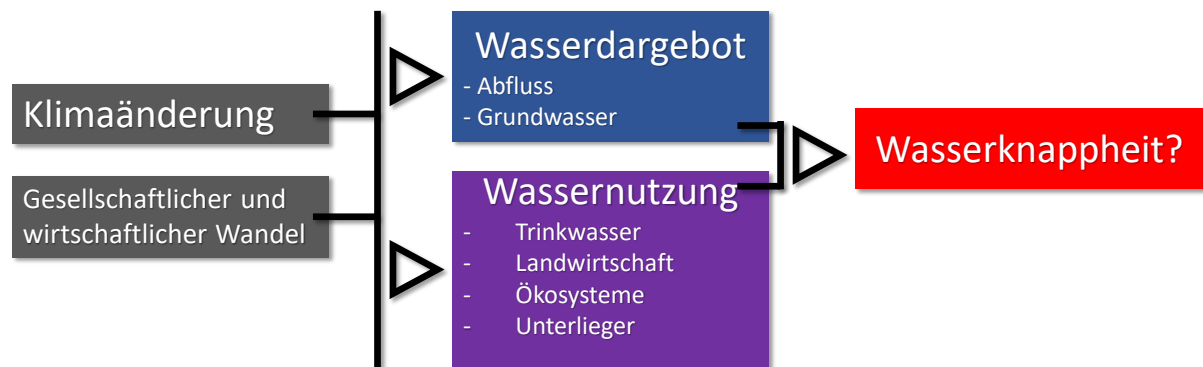


Fig. 1.1: Betrachtungsrahmen

1. Wie werden sich die hydrologischen Verhältnisse im Kanton Solothurn unter dem Einfluss des Klimawandels verändern?
2. Wie wird sich der Wasserverbrauch im Kanton Solothurn weiterentwickeln?
3. Welche Auswirkungen haben die Veränderungen von Wasserdargebot und -nutzung auf die Versorgungssituation im Kanton?

Der Kanton Solothurn ist sich der Herausforderungen durch den Klimawandel bewusst. In den Jahren 2015/16 wurde unter der Federführung des Amtes für Umwelt ein Bericht erarbeitet, in dem die Risiken und Chancen des Klimawandels im Kanton diskutiert und darauf basierend Handlungsfelder mit Anpassungsmassnahmen aufgezeigt wurden¹. In der Folge beauftragte der Regierungsrat die Verwaltung mit der Umsetzung der ausgewiesenen 36 Anpassungsmassnahmen². Mehrere dieser Massnahmen haben das Ziel, die Risiken in den Bereichen der sommerlichen Hitze und Trockenheit zu reduzieren. Eine im Kontext der vorliegenden Analyse wichtige Massnahme war die Erarbeitung einer detaillierten kantonalen Übersicht zur Bewässerungswürdigkeit der landwirtschaftlichen Flächen³. Die hier vorliegenden vom Amt für Umwelt veranlasste Untersuchungen vertieft den Aspekt der sommerlichen Trockenheit und ordnet letztere in einen gesamthydrologischen und wasserwirtschaftlichen Kontext ein, wie dies im nächsten Kapitel beschrieben wird.

¹https://klimageschichten.so.ch/fileadmin/klimageschichten/dokumente/Anpassung_Klimawandel_Schlussbericht.pdf

²https://klimageschichten.so.ch/fileadmin/klimageschichten/dokumente/Anpassung_Klimawandel_Aktionsplan.pdf

³Diese Analyse wird später im Text als Studie der «Egli Engineering AG» zitiert

1.2 Einordnung der Untersuchung

Mit der Veröffentlichung der neuen detaillierten Klimaszenarien CH2018⁴ mit räumlich-zeitlich detaillierten Informationen zur Veränderungen der Niederschläge in einem bisher nie dagewesen Ausmass und Detaillierungsgrad und in Abhängigkeit von verschiedenen Emissionsszenarien ergeben sich optimale Voraussetzungen, um einen genauen Blick auf die zu erwartenden zukünftigen hydrologischen Veränderungen in den Bezirken des Kantons Solothurn zu werfen und daraus mögliche Folgen für die Deckung des Wasserbedarfs der unterschiedlichen Nutzer abzuleiten. Und genau bei diesen Niederschlägen setzt die vorliegende Untersuchung an. Die Figur 1.2 verortet sie im System von Wasserdargebot und -bedarf des Kantons Solothurn.

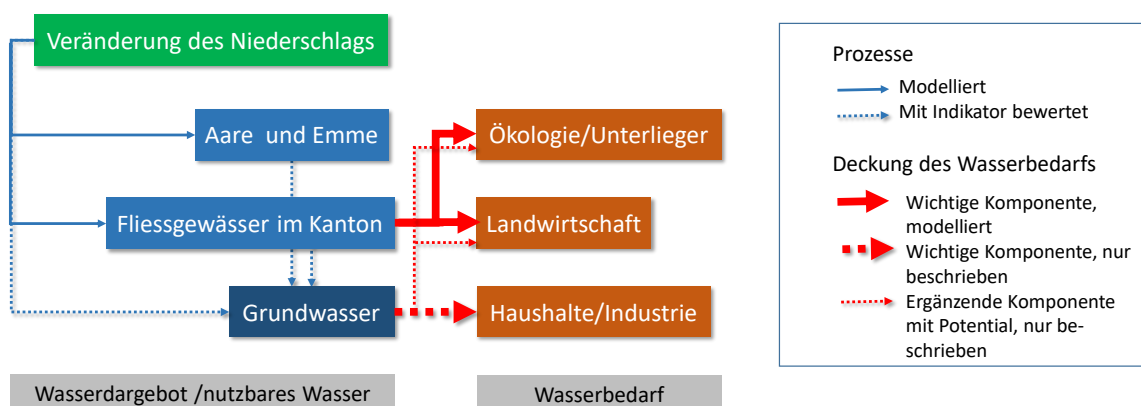


Fig. 1.2: Einordnung der Studie

Im Mittelpunkt stehen die Veränderungen der Abflüsse in den innerhalb des Kantons gelegenen Fliessgewässern. Sie sind essentiell zur Deckung des Wasserbedarfs von Ökologie und Unterlieger sowie der Landwirtschaft – vor allem in Trockenzeiten. Mit den hierzu vorgenommenen Modellierungen werden quantitative Angaben zu den zukünftigen Veränderung des Abflusses und daraus abgeleitet des nutzbaren Wassers differenziert für die einzelnen Bezirke gemacht.

Durch den südlichen Kantonsteil fließen die Emme und Aare, die dem Kanton nicht nur grosse Wassermengen zuführen, sondern auch ein voralpines bzw. alpines Abflussregime mit vergleichsweise grossen Abflüssen im Sommer aufweisen. Sie bilden mit ihrem zu den Solothurnern Fliessgewässern komplementären Abflussverhalten nicht nur eine wichtige Ergänzung des Wasserdargebots, sondern tragen auch massgeblich zur Erneuerung der reichen Grundwasservorkommen im südlichen Kantonsteil bei. Die Untersuchungen soll zeigen, ob und in welchem Ausmass allfällige Wasserengpässe in südlichen Kantonsteil durch Wasserentnahmen aus Emme und Aare gedeckt werden könnten.

Das Trink- und Brauchwasser stammt im Kanton Solothurn ausschliesslich aus dem Grundwasser. Auf diese Wechselbeziehung und deren Veränderung wird in der vorliegenden Studie

⁴<https://www.nccs.admin.ch>

nur indirekt eingegangen, indem grob abgeschätzt wird, ob und in welche Richtung sich die Grundwasserneubildung in Zukunft verändern könnte.

Zur Quantifizierung der Wechselbeziehung zwischen Wasserdargebot und Wasserbedarf ist es auch notwendig, die Veränderung des zukünftigen Wasserbedarfs von Ökologie, Haushalten und Industrie sowie der Landwirtschaft, gegenüber heute abzuschätzen. Dazu werden detaillierte Informationen erarbeitet.

2 Hydro-geographische Grundlagen

2.1 Landschaftstypen

Der grösste Teil des Kantons Solothurn, nämlich 77 %, gehören zum Jura, die restlichen 23 % zum Mittelland⁵. Der Kanton Solothurn ist politisch in zehn Bezirke gegliedert. Sie bilden die räumliche Grundlage der vorliegenden Analysen. Da der Stadtbezirk Solothurn flächenmässig relativ klein ist, wird er nicht separat betrachtet und dem Bezirk Lebernberg zugeordnet.

In der Tabelle 2.1 werden diese Bezirke auf der Basis der Landschaftstypologie der Schweiz⁶ charakterisiert. Die Bezirke Bucheggberg und Wasseramt gehören demselben Landschaftstyp an, wobei im Wasseramt der Anteil der Siedlungsgebiete wesentlich grösser ist. Die übrigen Bezirke am Jurasüdfuss sind heterogen aufgebaut und weisen Landschaftstypen sowohl des Mittellands als auch des Juras auf. In den jurassischen Bezirken dominieren die Hügellandschaften des Faltenjuras bzw. des Tafeljuras. Ein spezieller Landschaftstyp sind die Tal- und Beckenlandschaften im Bezirk Thal.

Tab. 2.1: Landschaftstypen der Bezirke im Kanton Solothurn. M: Mittelland, F: Faltenjura, T: Tafeljura, Bu: Bucheggberg, Wa: Wasseramt, Le: Lebern, Gu: Gäu, Ol: Olten, Gs: Gösigen, Ta: Thal, Th: Thierstein, Do: Dorneck. • • • : Landschaftstyp dominant, • • : mittlerer Anteil des Landschaftstyps, • : kleiner Anteil des Landschaftstyps (nach Landschaftstypologie des Bundesamts für Raumplanung)

Landschaftstyp	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
M: Hügelland., Ackerbau	• • •	• •							
M: Hügelland., Futterbau			•	•	•	• •			
Siedlungslandschaft		• •	•	• •	• •	•			
F: Hügellandschaft			• •	•	• •	• •	• •	• • •	•
F: Tal- und Beckenland							• •	•	
F: Berglandschaft			• •			•	•		
T: Hügellandschaft									• • •

2.2 Rolle der Einzugsgebiete

Wegen der oben erwähnten starken horizontalen Gliederung des Kantons ist eine Unterteilung in klassische hydrologische Einzugsgebiete, welche mittels Wasserscheiden begrenzt sind, nicht immer möglich, was hydrologische Analysen und Modellierungen erschwert. Lange Niederschlags- und Abflussmessreihen hingegen begünstigen aufgrund ihrer höheren Aussagekraft hydrologische Untersuchungen. Im Kanton Solothurn trifft das aber nur die Dünern, Balsthal und

⁵Gutersohn, H.(1968): Geographie der Schweiz - Mittelland. Band III, 1. Teil.

⁶<https://www.are.admin.ch/are/de/home/laendliche-raeume-und-berggebiete/grundlagen-und-daten/landschaftstypologie-schweiz.html>, besucht 31. März 2021

Dünnern, Olten zu⁷. Für die Untersuchungen im Jura wurde das Einzugsgebiet der Ergolz, Liestal, beigezogen, das an den Kanton Solothurn grenzt.

Die hydrologischen Daten dieser Stationen bzw. derer Einzugsgebiet wurden in der Folge verwendet, um die restlichen Bezirke zu analysieren und zu modellieren (vgl. Kap. 4). Die Landschaftstypen dieser repräsentativen Einzugsgebiete sind in Tabelle 2.2 zusammengestellt. Ideale Voraussetzungen für Analysen und Modellierungen bieten sich im Bezirk Thal, wo die Bezirksgrenzen mit den Einzugsgebietsgrenzen der Dünnern, Balsthal, nahezu identisch sind. Das Einzugsgebiet der Ergolz wird von der «Hügellandschaft des Tafeljuras» dominiert. Damit repräsentiert es die Verhältnisse im Bezirk Dornach sehr gut. Der prägende Landschaftstyp des Bezirks Thierstein hingegen ist die «Hügellandschaft des Faltenjuras». Da kein geeignetes Einzugsgebiet für diese landschaftliche Situation verfügbar ist, wird die Ergolz auch für diesen Bezirk als repräsentativ betrachtet. Die Bezirke Lebern, Gäu, Olten und Gösigen zeichnen sich durch eine landschaftliche Vielfalt aus, wie sie auch im Einzugsgebiet der Dünnern, Olten, zu beobachten ist. Aus landschaftlicher Sicht besteht hingegen zwischen den Bezirken Bucheggberg und Wasseramt auf der einen und der Dünnern, Olten, auf der andern Seite grössere Unterschiede. Trotzdem mussten wir mangels anderer geeigneter Einzugsgebiete auch hier wieder auf die Dünnern, Olten, als repräsentatives Gebiet zurückgreifen.

Tab. 2.2: Landschaftstypen der repräsentativen Einzugsgebiete mit langen Messreihen. M: Mittelland, F: Faltenjura, T: Tafeljura. •••: Landschaftstyp dominant, ••: mittlerer Anteil des Landschaftstyps, •: kleiner Anteil des Landschaftstyps (nach Landschaftstypologie des Bundesamts für Raumplanung)

Landschaftstyp	Dünnern, Balsthal	Dünnern, Olten	Ergolz, Liestal
M: Hügelland, Ackerbau			
M: Hügelland, Futterbau		•	
Siedlungslandschaft		•	•
F: Hügellandschaft	• •	• •	
F: Tal- und Beckenland	• •	• •	
F: Berglandschaft	•	•	
T: Hügellandschaft			• • •

⁷Das AfU betreibt ein eigenes Abflussmessnetz mit rund zwanzig Stationen. Sie messen den Abfluss von flächenmässig eher kleinen Einzugsgebieten mit einer eher kurzen Beobachtungsdauer. Einzelne Stationen weisen zudem unplausible Werte auf.

2.3 Wasserdargebot heute

2.3.1 Solothurn und die Schweiz

Der Kanton Solothurn erhält im schweizweiten Vergleich mit rund 1100 mm pro Jahr⁸ relativ wenig Niederschlag, nämlich 400 mm/a weniger als im schweizerischen Mittel. Im Vergleich mit den mitteleuropäischen Staaten ist diese Menge aber immer noch recht hoch. So beträgt der mittlere Niederschlag in Deutschland nur rund 800 mm/a.

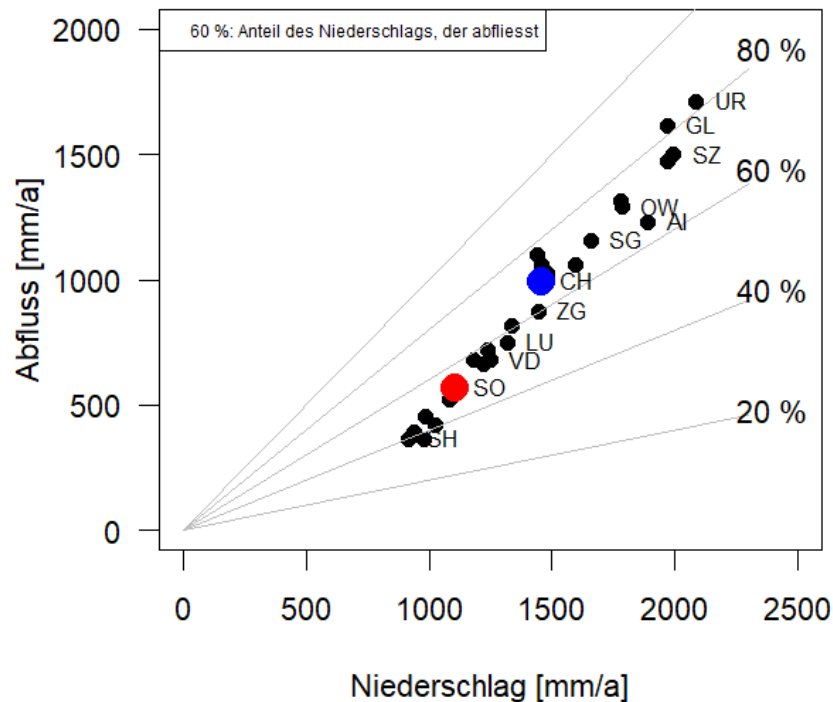


Fig. 2.1: Wasserhaushalt der Kantone: Vergleich der mittleren Jahresniederschläge und -abflüsse der Periode 1961–1990 (Daten: Hydrologischer Atlas der Schweiz)

Aus Sicht des Wasserdargebots, also des zur Nutzung grundsätzlich verfügbaren Wassers, ist aber nicht nur die Niederschlagsmenge entscheidend, sondern auch der Abfluss, der in Figur 2.1 beschrieben wird als der Prozentsatz des Niederschlags, der zum Abfluss gelangt. Im Vergleich mit den andern Kantonen gehört der Kanton Solothurn mit einem Anteil von rund 50 % am Niederschlag, der zum Abfluss gelangt, nicht gerade zu den «abflussfreudigsten». Dies im Gegensatz zu den alpin geprägten Kantonen wie Uri, Glarus oder Schwyz, wo rund 80 % des Niederschlags zum Abfluss gelangt. Der Prozentsatz von 50 % für den Kanton Solothurn bedeutet konkret, dass der Jahresniederschlag hälftig auf Abfluss und Verdunstung aufgeteilt

⁸In diesem Bericht verwenden wir für Niederschlag, Abfluss und Verdunstung, aber auch bei der Wassernutzung in der Regel die Dimension Millimeter pro Zeiteinheit [mm/a] (a = Jahr). 1 mm entspricht einer Wassermenge von einem Liter pro Quadratmeter. Eine mittlere Niederschlagsmenge von 1100 mm/a bedeutet also, dass auf jeden Quadratmeter im Kanton ein Wasservolumen von 1100 l fällt. Ein mittlerer landwirtschaftlicher Zusatzbedarf in einem Bezirk von 10 mm/Monat heisst, dass in diesen Bezirk (theoretisch) jeder Quadratmeter 10 l Wasser zur Verfügung stellen muss, um diesen Zusatzwasserbedarf zu decken.

wird. Niederschlag und Verdunstung sind also die wichtigsten Steuerfaktoren des Abflusses im Kanton.

2.3.2 Grundzüge des Wasserhaushalts mit besonderem Fokus auf den Abfluss

Beim Jahresniederschlag weichen die einzelnen Regionen nicht allzu stark vom Durchschnittswert 1100 mm/a ab. So liegt er im Jura über dem Mittelwert, im Mittelland leicht darunter, wie die Niederschlagskarte in Figur 2.2 und die folgenden Stationsdaten belegen:

Mittelland:

Gösgen (380 m ü.M.) 1009 mm/a,

Wangen bei Olten, (435 m ü.M.) 1025 mm/a,

Hessigkofen (580 m ü.M.), 1161 mm/a.

Übergang Mittelland / Jura:

Balsthal (523 m ü.M.): 1117 mm/a.

Jura:

Herbetswil (544 m ü.M.): 1247 mm/a,

Reigoldswil (BL, 602 m ü.M.): 1234 mm/a.

Die mittlere Jahresverdunstung beträgt im Kanton Solothurn rund 550 mm/a: Da die Verdunstung mit der Höhe abnimmt, sind die Verdunstungswerte im Jura kleiner als in den im Mittelland gelegenen Regionen.

Betrachten wir nun die Niederschlags- und Verdunstungsverhältnisse am Beispiel des Einzugsgebiets der Dünneren etwas genauer. Die Dünneren mit ihrem Ober- und Mittellauf im Jura und ihrem Unterlauf im Mittelland repräsentiert die hydrologischen Verhältnisse im Kanton Solothurn sehr gut. Im saisonalen Verlauf fallen im Sommerhalbjahr im langjährigen Mittel etwas mehr Niederschlag als im Winterhalbjahr (vgl. Fig. 2.3). Dabei ist allerdings zu beachten, dass das saisonale Niederschlagsgeschehen in einzelnen Jahren stark von diesem Mittelwert abweichen kann. Die Verdunstung weist mit sehr kleinen Werten im Winter, und grossen Werten im Sommer allerdings eine noch viel ausgeprägtere Saisonalität auf. Dafür sind die grossen saisonalen Unterschiede im Strahlungs- bzw. Wärmehaushalt verantwortlich.

Berechnet man nun für jeden Monat die Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung ($N - V$), dann erhält das theoretische Wasserdargebot in Form des (berechneten) Abflusses (Fig. 2.3). Im Winter ist Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung sehr gross; was zu einem grossen Abfluss bzw. Wasserdargebot führt. Im Sommer hingegen ist der Abfluss und damit das Wasserdargebot bereits bei durchschnittlichen Verhältnissen vergleichsweise klein. Daraus lässt sich ableiten, dass man sich in Jahren mit unterdurchschnittlichen Regenmengen rasch einer Trockenheit annähert, wie das in den letzten zwanzig Jahren einige Male der Fall war, insbesondere in den Jahren 2003, 2015 und 2018.

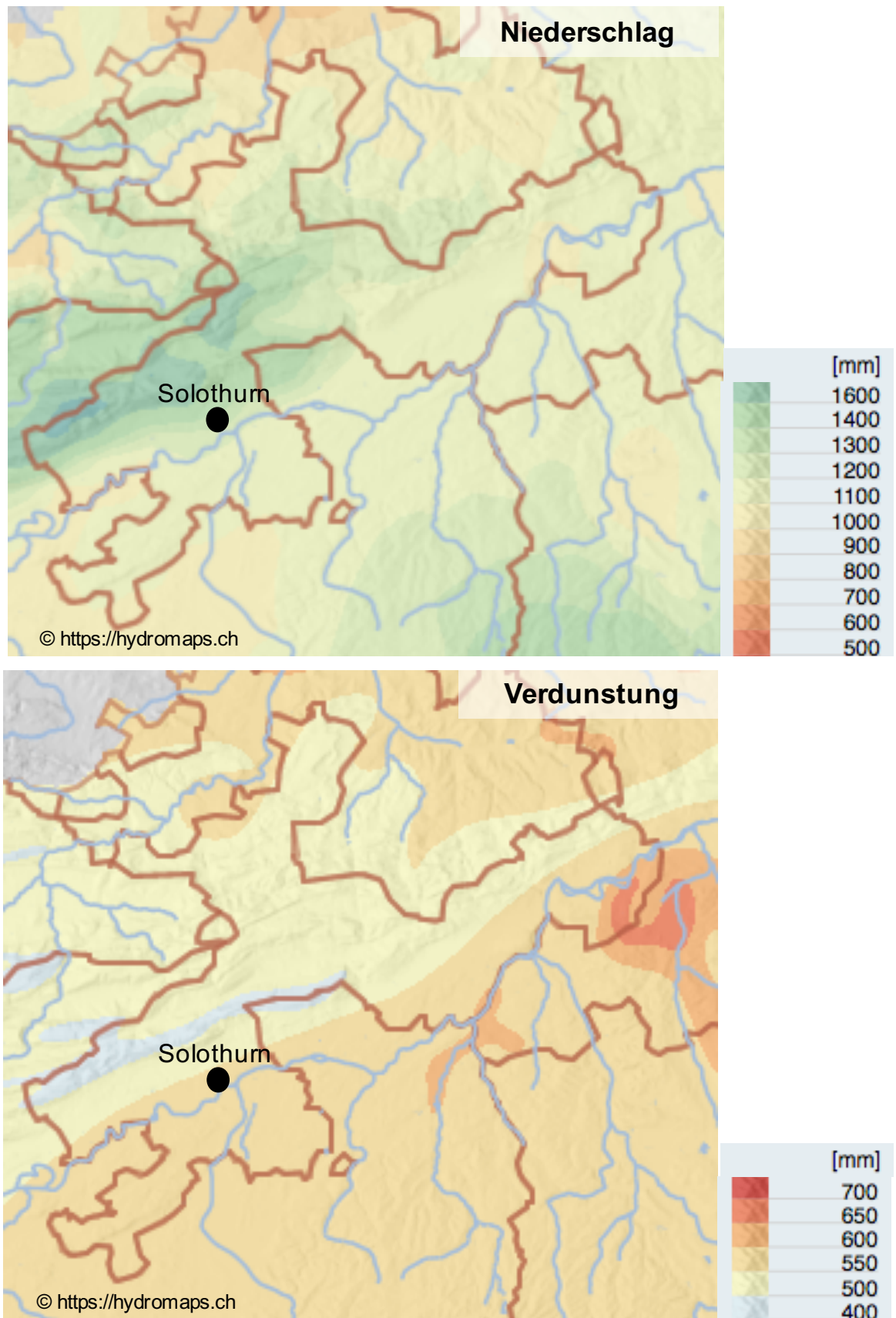


Fig. 2.2: Mittlere Niederschlags- und Verdunstungsverhältnisse 1981–2010 [mm/a] (aus: Hydrologischer Atlas der Schweiz)

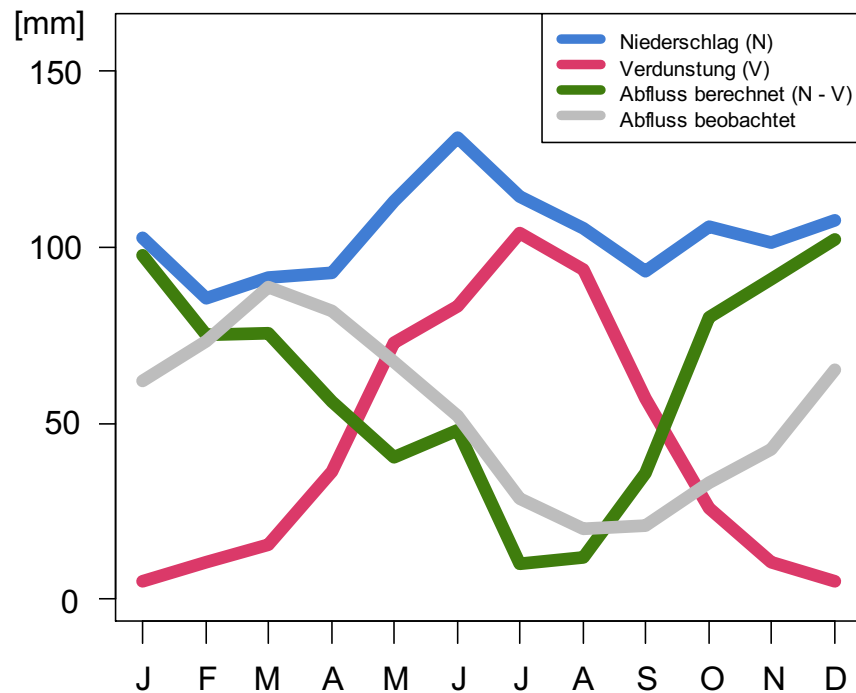


Fig. 2.3: Einzugsgebiet der Dünner, Olten: Mittlere saisonale Verteilung der Elemente des Wasserhaushalts (Daten: Hydrologischen Atlas der Schweiz und BAFU)

Der beobachtete Abfluss verhält sich im Jahresverlauf zwar ähnlich wie der berechnete, weicht aber in den einzelnen Monaten mehr oder weniger stark von ihm ab. Dafür ist das Grundwasser verantwortlich: Ab Spätherbst bis März trägt ein Teil des Wasserdargebots zur Grundwasserneubildung bei und entzieht dieses Wasser dem Abfluss. Im Frühling sowie in den Sommermonaten Juli und August ist der beobachtete Abfluss grösser als die berechnete Wassermenge. Die Exfiltration von Grundwasser in die Dünner, also der Übertritt von Grundwasser in den Fluss, erhöht den Abfluss und verhindert dadurch ein schnelles Austrocknen in Perioden mit wenig Niederschlag. Allein schon dieses Beispiel zeigt, welche Bedeutung das Grundwasser im Wasserhaushalt des Kantons Solothurn hat.

Die saisonalen Schwankungen des Abflusses werden meist als Abflussregime bezeichnet. Wie wir eben diskutiert haben, besitzt die Dünner ein mittleres Abflussregime mit grossen Abflussmengen im Winter und kleinen im Sommer. Dieses Muster ist auch in den einzelnen Jahren mehr oder weniger erkennbar, wobei die Unterschiede beträchtlich sein können. Bei wasserhaushaltlichen Analysen müssen deshalb die Verhältnisse in den einzelnen Jahren stets mitberücksichtigt werden, wie dies auch in der vorliegenden Untersuchung der Fall ist.

Der langjährige mittlere Jahresabfluss ist die erste hydrologische Grundgrösse, die man bei der Beurteilung der hydrologischen Bedingungen berücksichtigen sollte. Er zeigt, wie viel Wasser ein Einzugsgebiet pro Jahr insgesamt erzeugt. In der Tabelle 2.3 sind die langjährigen mittleren

Jahresabflüsse der im Kanton gemessenen Einzugsgebiete mit einer Messreihenlänge von mehr als zehn Jahren nach der Abflusshöhe sortiert.

Tab. 2.3: Langjährige mittlere Abflusshöhen der vom AfU und BAFU gemessenen Einzugsgebiete mit einer Messreihenlänge von mehr als zehn Jahren. Die Einzugsgebiete sind nach der mittleren Jahresabflusshöhe der vorhandenen Messreihen geordnet.

Gebiet	Fläche [km ²]	mittlere Höhe [m ü.M.]	Jahresabfluss [mm]
Chastelbach, Himmelried	18.7	674	219
Stüsslingerbach, Lostorf	10.3	573	306
Ibach, Zullwil	7.1	713	444
Ergolz, Liestal	261	590	457
Lützel, Kleinlützel	64.6	679	464
Lostorferbach, Lostorf	5.9	643	481
Dünnern, Olten	234	711	483
Oesch, Kriegstetten	72.6	532	552
Dorfbach, Trimbach	11.1	657	568
Dünnern, Baslthal	141	794	568
Augstbach, Balsthal	62.7	780	573
Lüssel, Erschwil	27.7	805	91

Die kleinsten Abflüsse mit Werten um 300 mm/a oder darunter weisen der Chastelbach und der Stüsslingerbach auf, deren Einzugsgebiet im Jura liegt. Vermutlich führen hier karsthydrologische Phänomene zu diesen sehr tiefen Abflusshöhen.

Abflusshöhen zwischen 400 und 480 mm/a sind für den jurassischen Kantonsteil charakteristisch. In diesem Wertebereich liegt auch die Ergolz, welche in der vorliegenden Studie als Repräsentant des nördlichen im Jura gelegenen Kantonsteils eine wichtige Rolle einnimmt.

Wir haben vorhin erwähnt, dass die Dünnern, Olten, die mittleren hydrologischen Verhältnisse sehr gut repräsentiere. Diese Aussage bestätigt sich im Vergleich der Abflusswerte in der Tabelle, liegt doch die Dünnern, deren Einzugsgebiet sowohl Anteile im Jura wie im Mittelland besitzt, mit 483 mm/a ziemlich in der Mitte der betrachteten Stichprobe.

Abflusswerte zwischen 500 und 600 mm/a besitzen einerseits Einzugsgebiet im südlichen Teil des Juras oder am Jurasüdfuss und andererseits solche mit Wurzeln im Höheren Mittelland (Oesch).

Bei der Lüssel (Lü) beträgt die Abflusshöhe über 900 mm/a. Dieser Wert ist aussergewöhnlich hoch: Entweder handelt es sich um fehlerhafte Messungen, oder es bestehen beträchtliche unterirdische Zuflüsse im Karstsystem des Juras.

Die Abflussregimes beschreiben die saisonalen Schwankungen des Abflusses (vgl. Fig. 2.3). In Figur 2.4 sind diese Regimes der beim Jahresabfluss dargestellten Einzugsgebiete zusammengestellt. Sie sind sich sehr ähnlich: Alle Gewässer weisen im Winter überdurchschnittliche und im

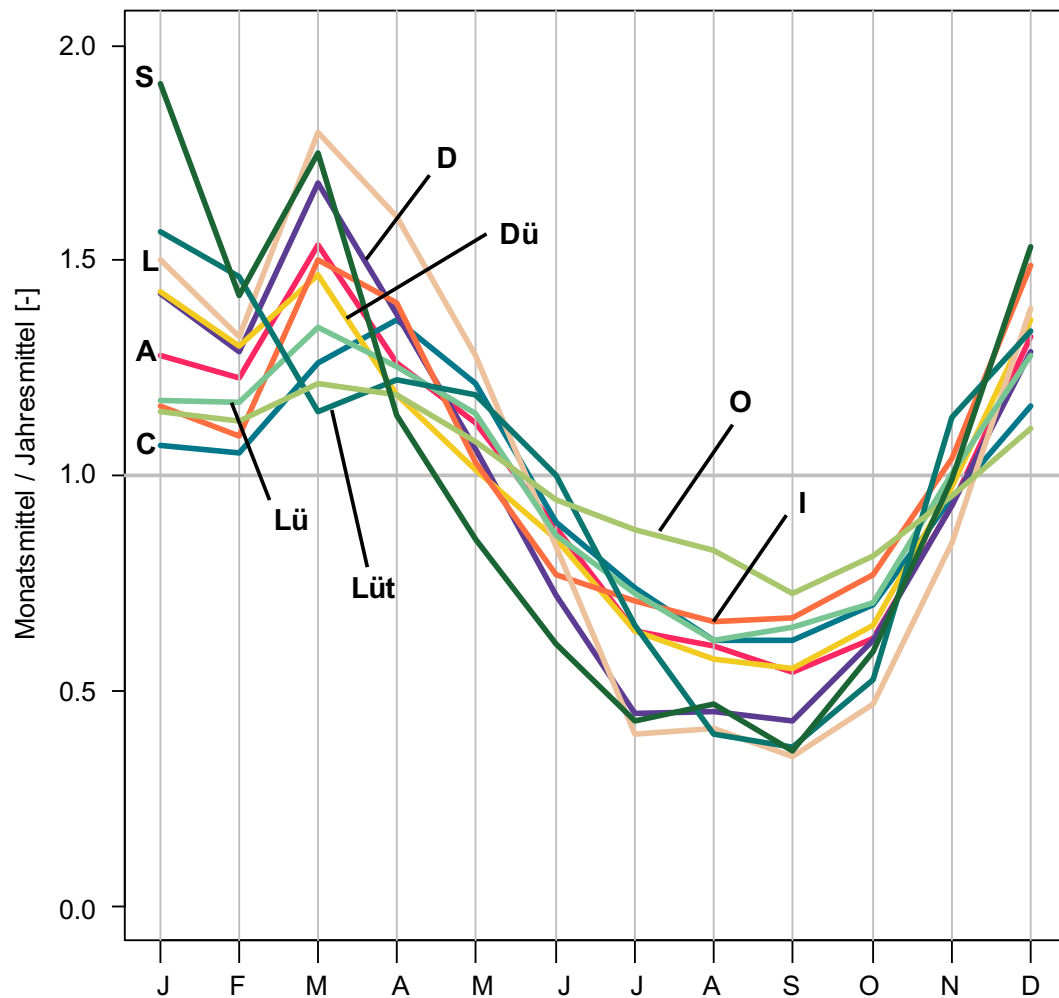


Fig. 2.4: Abflussregimes der Solothurner Bäche und Flüsse, deren Abfluss mindestens zehn Jahre vom Amt für Umwelt, Solothurn, gemessen wurde. A: Augstbach, C: Chastelbach, D: Dorfbach, Dü: Dünnern, O: Olten, I: Ibach, L: Losterferbach, LÜ: Lüssel, Lüt: Lützel, O: Ösch, S: Stüsslingbach

Sommer unterdurchschnittliche Abflüsse auf, wodurch erneut bestätigt wird, dass das Wasserdargebot im Sommer der limitierende Faktor ist, dem es besondere Aufmerksamkeit zu schenken gilt. Hier setzt eine kürzlich erschienene Analyse⁹ an, die untersucht, welche Bäche und Flüsse in Voralpen, Mittelland und Jura besonders trockenheitsanfällig sind. Die Ergebnisse sind in Figur 2.5 dargestellt. Für den Kanton Solothurn weist die Karte viele Gewässerabschnitte in Blau-, Grün- und Gelbtönen aus. Rottöne fehlen. Das heisst, die Gewässerabschnitte weisen unterschiedliche hydrologische Trockenheitsanfälligkeiten auf, von vergleichsweise kleinen bis zu relativ grossen. Einzig die Klasse mit einer sehr starken Anfälligkeit, welche vor allem in den Höheren Lagen der Ostschweiz auftritt, fehlt weitestgehend: Nur gerade ein Gewässerabschnitt im Bezirk Thierstein befindet sich in dieser Kategorie. Diese Karte bildet den Ausgangspunkt

⁹Weingartner, R., Schwanbeck, J. (2021): Trockenheit und Fließgewässer. Aqua & Gas 4/2021

für detailliertere Analysen zur hydrologischen und meteorologischen Trockenheitsanfälligkeit der Fliessgewässer im Kanton Solothurn (vgl. Kap. 4.3 und 5.3).

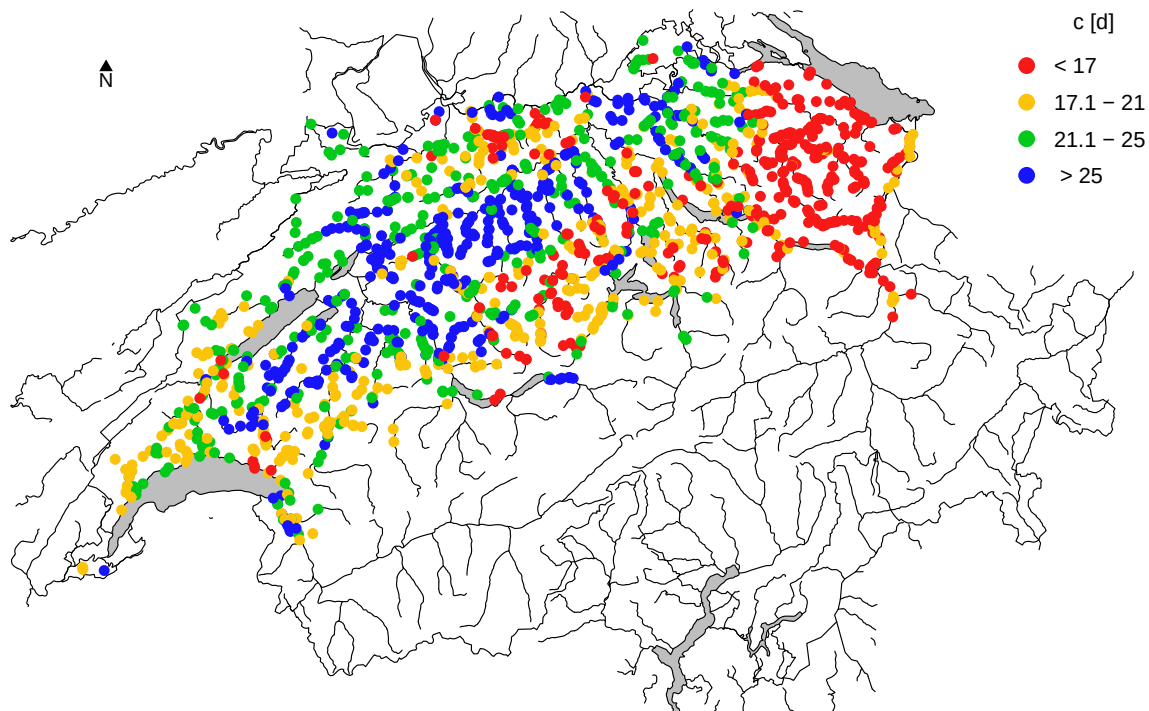


Fig. 2.5: Beurteilung der hydrologischen Trockenheitsanfälligkeit von rund 2000 Gewässerabschnitten in den Voralpen, im Mittelland und Jura. Der Parameter c beschreibt, wie trockenheitsanfällig ein Gewässer ist. Je kleiner c ist, desto grösser ist die Trockenheitsanfälligkeit. (Karte: Weingartner und Schwanbeck (2020))

2.3.3 Zuflüsse von Aare und Emme

Die Wasserdargebot des Kantons Solothurn basiert auf drei Standbeinen:

1. dem vor Ort aus dem Niederschlag gebildeten Abfluss, der im Zentrum dieser Analyse steht,
2. dem Grundwasser (vgl. Kap. 2.3.4)
3. den Zuflüssen der Aare und Emme.

Dieses diversifizierte Wasserdargebot ist aus wasserwirtschaftlicher Sicht ein grosser Vorteil, kann man sich doch auf unterschiedliche Bezugsquellen abstützen.

Aare und Emme sind die zentralen Fliessgewässer – Aare, die hydrologische Lebensader des Kantons – und speisen auch die ergiebigen Grundwasservorkommen. Die Werte in Tabelle 2.4 belegen eindrücklich, welche grosse Wassermengen dem Kanton Solothurn über Aare und Emme zufließen. Das Jahresvolumen der Aare von 9 km^3 entspricht immerhin mehr als einem Fünftel des in der ganzen Schweiz erzeugten Abflussvolumens!

Tab. 2.4: Mittlere Abflüsse von Aare und Emme (Daten: BAFU)

Fluss	Mittlerer Abfluss [m^3/s]	Mittleres Zuflussvolumen [km^3]
Aare	290	9
Emme	19	0.66

Beim Abflussregime der Aare sind dessen alpine Wurzeln deutlich erkennbar, obwohl der Abfluss durch die Regulierung in Briener-, Thuner- und Bielersee gedämpft wird (vgl. Fig. 2.6): in den Hochlagen der Alpen fällt der Niederschlag im Winter in Form von Schnee und gelangt damit nicht direkt zum Abfluss. Als Folge davon sind die Abflussmengen im Winter unterdurchschnittlich. Mit der Schneeschmelze im Frühling und der Gletscherschmelze im Sommer treten die grössten monatlichen Abflüsse zwischen Mai und August auf, also genau dann, wenn die Solothurner Flüsse wenig Wasser führen.

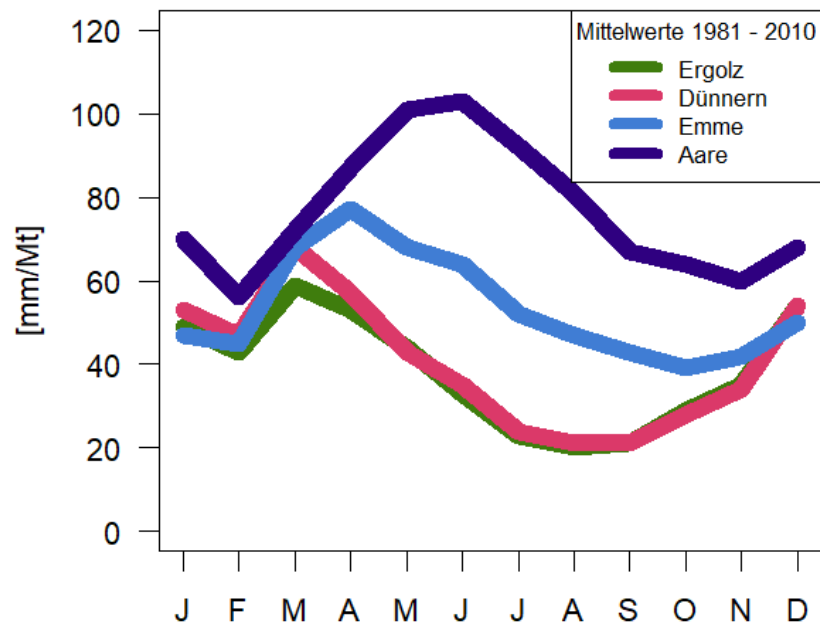


Fig. 2.6: Mittlere Abflussregimes der grossen gemessenen Fließgewässer

Bei der Emme ist die voralpine Prägung des Abflussregimes durch den schneeschnelzbedingten Anstieg des Abflusses im Frühjahr deutlich erkennbar. Die sommerlichen Abflüsse sind wegen des fehlenden Schmelzwassers der Gletscher wesentlich kleiner als bei der Aare, im Vergleich zu den Abflüssen der Dünern und Ergolz aber immer noch hoch.

Aare und Emme sind sehr bedeutend für die Speisung der im Kanton Solothurn reichlich vorhandenen Grundwasservorkommen, so zum Beispiel im Wasseramt, wo pro Sekunde durchschnittlich rund 3600 Liter Grundwasser gebildet wird¹⁰. Davon stammt ein Drittel aus der

¹⁰AfU (2010): Grundwasser im Wasseramt: Unerschöpfliche Reserve?

Infiltration von Flusswasser, die vor allem im Winterhalbjahr stattfindet. Im Sommerhalbjahr dagegen profitieren Aare und Emme vom exfiltrierenden Grundwasser. Auch im Niederamt spielt das Flusswasser der Aare mit einem Beitrag von 36 % bei der Grundwasserneubildung eine entscheidende Rolle¹¹. Die Pegelschwankungen des Grundwassers hängen ursächlich mit den Abflussverhältnissen bzw. Pegelständen der Aare zusammen, wie Fig. 2.7 am Beispiel des Jahres 2018 veranschaulicht. Charakteristisch ist dabei, dass die Schwankungen des Grundwassers gegenüber jenen des Abflusses gedämpft sind.

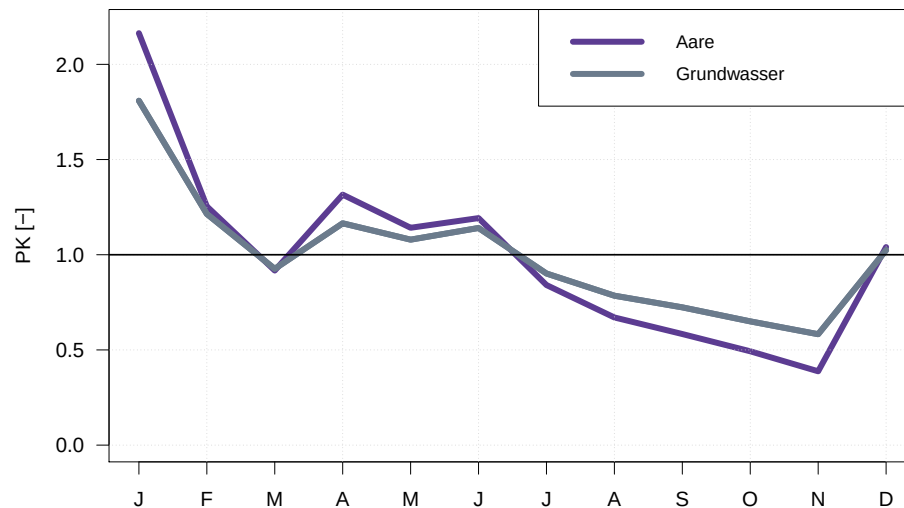


Fig. 2.7: Zusammenhang zwischen dem Abfluss der Aare und dem Grundwasserstand im Niederamt im Jahr 2018. Der Pardé-Koeffizient (PK) beschreibt das Verhältnis zwischen Monatsmittel und Jahresmittel. PK-Werte > 1 treten in Monaten mit Abflüssen bzw. Pegelständen auf, welche über dem Jahresmittel liegen (Daten: BAFU und AfU)

2.3.4 Reiche Grundwasservorkommen

Die im Kanton Solothurn verfügbaren Grundwasservorräte sind sehr gross. Es lassen sich drei Typen von Grundwasserleitern unterscheiden (vgl. Karte in Fig. 2.8):

1. Die bedeutendsten Grundwasservorkommen des Kantons sind die Schottergrundwasserleiter in den Talebenen der Aare, der Emme, der Dünnern, der Lüssel und der Birs. Allein im Wasseramt beträgt das jährlich nachhaltig nutzbare Wasservolumen rund 115 Mio. m³; davon werden nur gerade 26 % als Trink- und Brauchwasser durch die Kantone Solothurn und Bern genutzt. Im Niederamt werden von den ca. 30 Mio m³, welche nachhaltig nutzbar sind, aktuell rund ein Fünftel als Trink- und Brauchwasser gebraucht. Im Vergleich dazu: Der mittlere jährliche Trinkwasserverbrauch im Kanton Solothurn liegt bei rund 37 Mio m³, was das Potential dieser Grundwasservorkommen unterstreicht.

¹¹AfU (2015): Hydrogeologie Niederamt: Grundlagen für Schutz und Bewirtschaftung des Grundwassers

2. Im Jura zirkuliert das Wasser sowohl in schmalen Klüften und Gesteinsporen als auch in Karstrinnen und Höhlen von teilweise beachtlichem Ausmass¹². Dieses Karstgrundwasser besitzt lokal und regional eine grosse Bedeutung und liefert ein Drittel des Trink- und Brauchwassers.
3. In den Molasse-Sandsteinen des Bucheggbergs fliesst das Wasser in Klüften und Poren des Sandsteins. Dieser Porengrundwasserleiter ist für die lokale Wasserversorgung sehr wichtig.

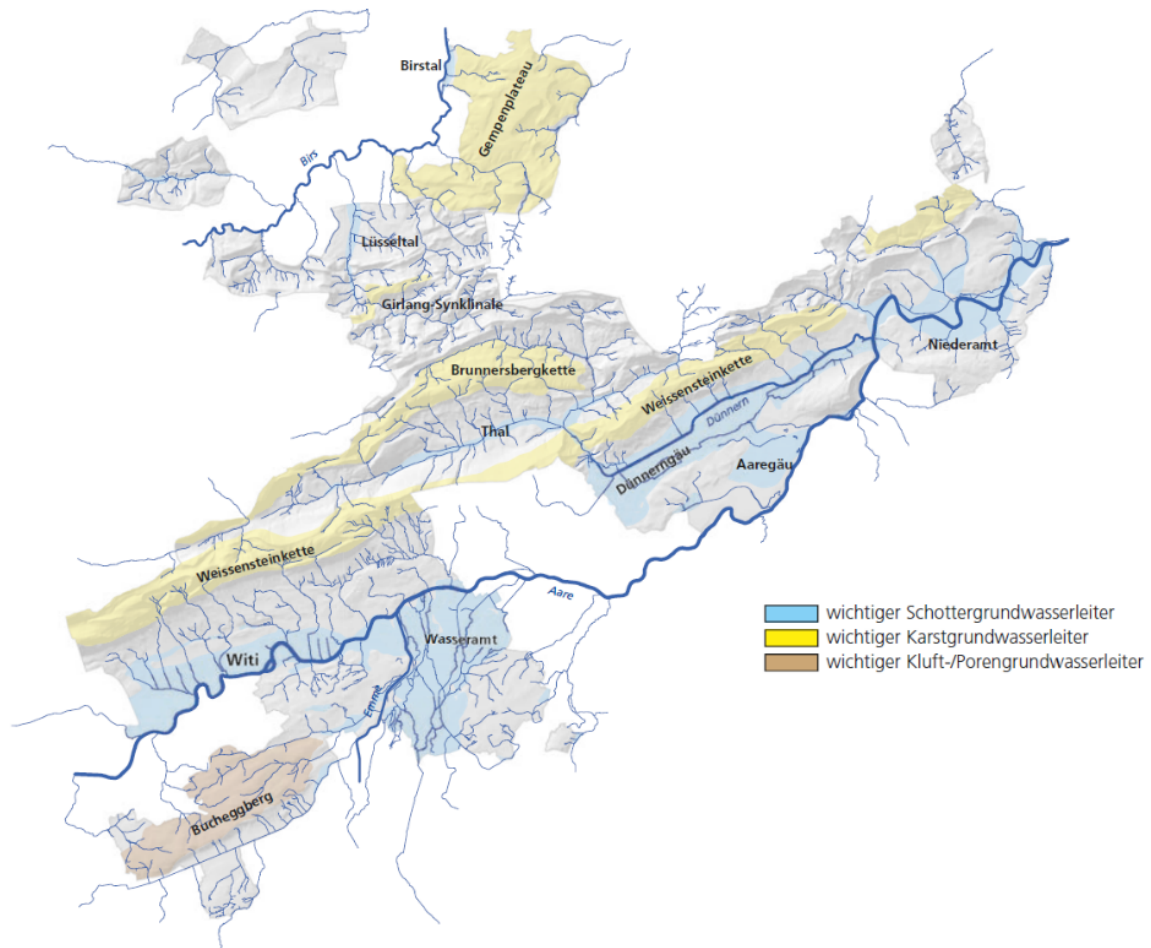


Fig. 2.8: Übersicht über die Grundwasservorkommen im Kanton Solothurn (Karte: Amt für Umwelt, Solothurn)

Bemerkung: In der vorliegenden Studie werden die Grundwasservorkommen und ihre Veränderungen nicht explizit mitberücksichtigt, da hier umfassende Simulationen notwendig sind, wie sie beim Amt für Umwelt des Kantons Solothurn in Planung sind. Aufgrund des engen Zusammenspiels zwischen Abfluss und Grundwasser lassen sich aber aus den zukünftigen Ab-

¹²vgl. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Druckversion, Tafel 8.4

flussveränderungen, welche hier im Mittelpunkt stehen, auch allgemeine Rückschlüsse auf die Grundwasserneubildung ziehen.

2.4 Wassernutzung

In einer kürzlich erschienenen Untersuchungen bezifferten Manuela Brunner und Kollegen den totalen Wasserbedarf der Schweiz auf 15 km^3 ¹³. Dabei wird das Wasser mehrheitlich nur genutzt und nicht verbraucht, also dem Wasserkreislauf nach der Nutzung wieder zurückgegeben. Eine Ausnahme bildet die Bewässerung, bei der ein Teil des Wassers verdunstet.

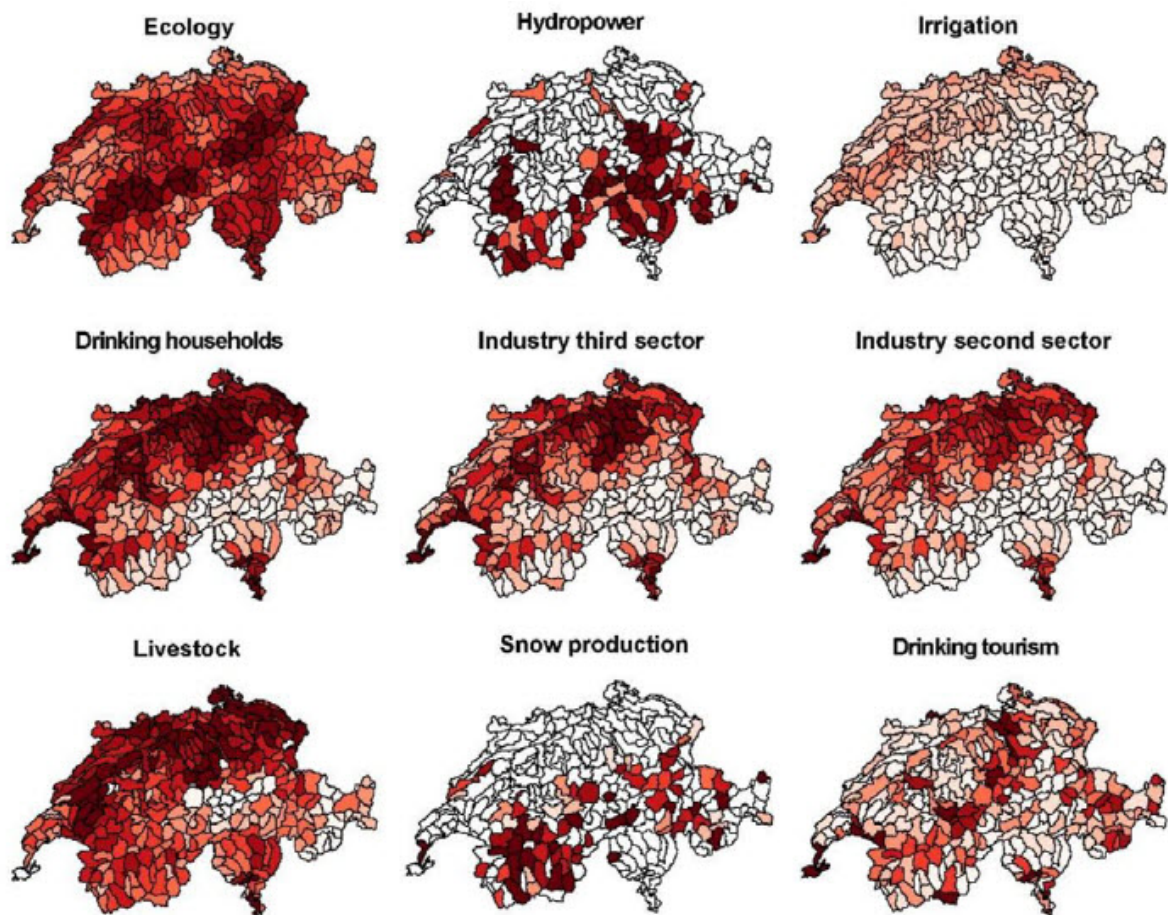


Fig. 2.9: Geschätzter jährlicher Wasserbedarf in 307 Einzugsgebieten der Schweiz. Je stärker der Rotton, um so höher der Verbrauch (aus: Brunner et al. (2019))

Die Figur 2.9 veranschaulicht, wer Wasser wo und wie nutzt. Bezogen auf den Kanton Solothurn sind folgende Nutzungen relevant: ökologischer Wasserbedarf, Trinkwasser und Brauchwasser für Industrie und Gewerbe sowie landwirtschaftlicher Zusatzwasserbedarf (Bewässerung). Im Folgenden werden diese für Solothurn relevanten Nutzungen detaillierter betrachtet und dabei auch ein Blick auch auf die zukünftigen Entwicklungen gelegt.

¹³Brunner, M. et al. (2019): Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.169

2.4.1 Trink- und Brauchwassernutzung

Aktuelle Situation

Das Trink- und Brauchwasser im Kanton Solothurn stammt ausschliesslich aus dem Grundwasser. Dabei spielen die grossflächigen und ergiebigen Schottergrundwasserleiter im Mittelland und in den Tallagen des Jura, aus denen insgesamt zwei Drittel des Trinkwassers stammen, eine herausragende Rolle (vgl. 2.3.4). Quellen im Festgestein – vor allem im Bezirk Buecheggberg und im Jura – tragen zu einem Drittel des Trinkwassers bei.

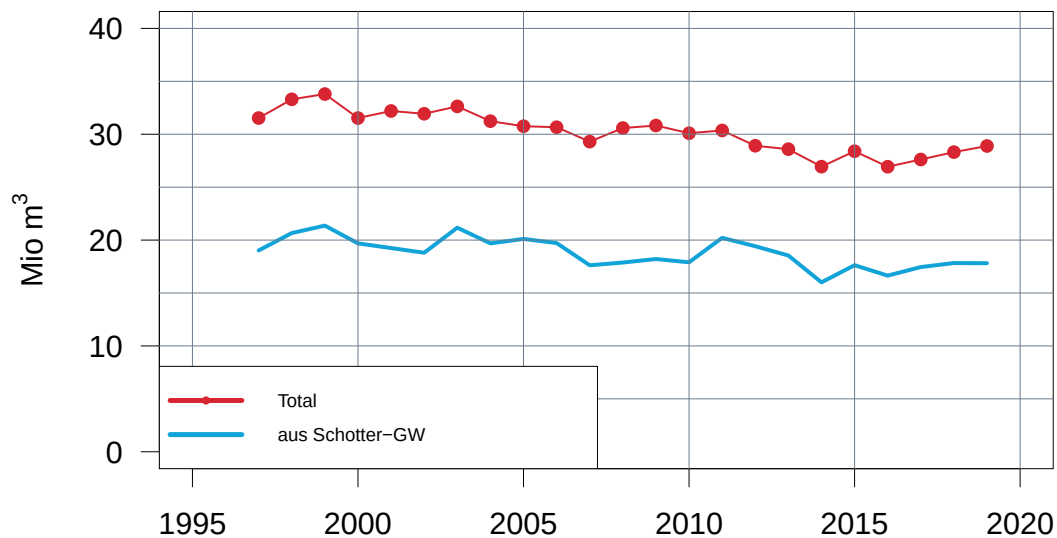


Fig. 2.10: Jährlicher Wasserverbrauch der öffentlichen Wasserversorgung im Kanton Solothurn (Daten: AfU)

Der mittlere jährliche Trinkwasserverbrauch betrug in der Periode 1995 - 2019 betrug 36.6 Mio. m³/Jahr¹⁴. Dieser Betrag setzt sich wie folgt zusammen (im Jahr 2007 beobachtet):

- öffentliche Wasserversorgung: 76 %
- private Wasserversorgung (Industrie, Gewerbe, Privatpersonen): 20 %
- ausserkantonaler Wasserbezug: 4%

Der Gesamtverbrauch von 36.6 Mio. m³/Jahr entspricht einem Pro-Kopf-Verbrauch von 363 l pro Einwohner und Tag. Betrachtet man nur den Wasserbezug über die öffentliche Wasserversorgung, so beträgt der langjährige Mittelwert 300 l pro Einwohner und Jahr und entspricht damit ziemlich genau dem schweizerischen Mittel. Wie aus Figur 2.10 hervorgeht, war der Wasserverbrauch in den letzten Jahren rückläufig.

¹⁴<https://so.ch/verwaltung/bau-und-justizdepartement/amt-fuer-umwelt/umweltdaten/wasser/grundwassernutzung/daten/>

Im Kontext der vorliegenden Studie ist bemerkenswert, dass der Wasserverbrauch in den Trockenjahren 2003, 2011, 2015, 2018 und 2019 besonders hoch war, also genau in Jahren, in denen sich das Wasserdargebot verknappte. Der grosse Verbrauch dürfte auch damit zusammenhängen, dass die Landwirtschaft das Bewässerungswasser teilweise aus der öffentlichen Wasserversorgung bezieht und diese Entnahmemengen in trockenen Perioden steigen. So haben Bauern im Wasseramt mit der öffentlichen Wasserversorgung Verträge zum Bezug von Bewässerungswasser abgeschlossen¹⁵. In Trockenjahren benötigt aber nicht nur die Landwirtschaft vermehrt Wasser, sondern im Siedlungsgebiet wird auch viel Wasser zum Rasensprengen bezogen.

Im Trockenjahr 2003 lag der Wasserbezug im Jahresmittel bei rekordverdächtigen 499 l pro Einwohner und Tag. Daraus kann abgeleitet werden, dass der Wasserbezug in den Sommermonaten Werte bis zu 1000 l pro Einwohner und Tag betrug. Dazu die Einschätzung des AfU¹⁶: «Da die grossen Grundwasservorkommen im Kanton Solothurn ausschliesslich durch versickerndes Niederschlagswasser und durch infiltrierende Fliessgewässer gespiesen werden und mit zunehmender Hitze die Wassernachfrage und damit die Grundwasserentnahmen stiegen, sank der Grundwasserspiegel bei den meisten Aquiferen kontinuierlich unter das langjährige Mittel. Bei Betrachtung der langjährigen Periodizitäten fiel der Grundwasserstand bei den meisten Messstationen daher in eine Defizitphase. Trotz dieser Situation war man bezüglich der allgemeinen Wasserversorgung weit von einer Katastrophe entfernt.» In einigen Gemeinden wurden die Einwohner aufgerufen, Wasser zu sparen. Prekär, so das AfU, sei es bei landwirtschaftlichen Betrieben im Jura geworden, die nicht an die öffentliche Wasserversorgung angeschlossen sind und deren hofeigenen Quellen versiegt.

Zukünftige Entwicklung

Es besteht ein sehr enger Zusammenhang zwischen der Bevölkerungszahl und dem Trink- und Brauchwasserverbrauch. Aufgrund von Prognosen des Bundesamtes für Statistik wurde – unter Annahme eines linearen Trends – die zukünftigen Bevölkerungszahlen im Kanton Solothurn geschätzt und daraus ein mittlerer und ein maximaler Wasserverbrauch abgeschätzt. Dem mittleren Wasserverbrauch wurde ein per-capita-Verbrauch von 363 l pro Tag, dem maximalen von 499 l pro Tag zu Grunde gelegt. Dies entspricht Erfahrungswerten von heute (s. oben). In Tabelle 2.5 sind die entsprechenden jährlichen Verbrauchswerte zusammengestellt. Der mittlere und der maximale Verbrauch werden demnach um rund 30 % bis 2060 und um rund 50 % bis 2085 zunehmen.

In der Tabelle 2.6 ist der heutige und zukünftige maximale Wasserverbrauch pro Bezirk zusammengestellt

¹⁵Mündliche Mitteilung von Herrn Emch, Amt für Landwirtschaft Solothurn

¹⁶AfU (2004): Bericht zum Trockenjahr 2003

Tab. 2.5: Geschätzte Entwicklung der Bevölkerung und des Wasserverbrauchs im Kanton Solothurn (Werte gerundet)

	um 2020	um 2060	um 2085
Einwohner	276'000	360'000	410'000
mittlerer Verbrauch [Mio. m ³]	37	48	54
maximaler Verbrauch [Mio. m ³]	50	65	75

Tab. 2.6: Trink- und Brauchwasserbedarf in den Bezirken

Bezirk	Fläche [km ²]	Bevölkerung			Mittlerer Verbrauch [mm]			Maximaler Verbrauch [mm]		
		heute	um 2060	um 2085	heute	um 2060	um 2085	heute	um 2060	um 2085
Buecheggberg	62.7	7955	10364	11775	17	22	25	23	30	34
Wasseramt	76.7	52375	68238	77523	90	118	134	124	162	184
Lebern und Solothurn	123.5	63396	82597	93836	68	89	101	93	122	138
Gäu	62.1	21724	28304	32155	46	60	69	64	83	94
Olten	80.6	55930	72870	82785	92	120	136	126	165	187
Gösgen	68.7	24710	32194	36575	48	62	71	66	85	97
Thal	139.4	14836	19329	21960	14	18	21	19	25	29
Thierstein	102.3	14775	19250	21869	19	25	28	26	34	39
Dorneck	74.7	20768	27058	30740	37	48	55	51	66	75
Kanton	790.7	276469	360203	409219	46	60	69	64	83	94

2.4.2 Ökologischer Wasserbedarf

Oftmals geht vergessen, dass auch die aquatischen Ökosysteme ein Wassernutzer sind. Sie erfüllen viele wichtige Funktionen: Sie bieten Lebensräume für Fauna und Flora – sind damit auch Fischgewässer – und weisen im natürlichen Zustand eine grosse Biodiversität auf. Sie sind als attraktive Naherholungsgebiete sehr beliebt. Damit die Gewässer diese vielfältigen Funktionen, welche gerade im dicht besiedelten Mittelland von grosser Bedeutung sind, erfüllen können, muss sichergestellt werden, dass die Abflussmengen genügend gross sind. Dies gilt in besonderem Masse während Trockenperioden. Bei zu kleinen Wassermengen werden die Wasserinhaltsstoffe (Nährstoffe, Schmutzstoffe, Pestizide) nur noch wenig verdünnt, sodass kritische Schwellenwerte oftmals überschritten werden mit nachteiligen Folgen für die Ökosysteme. In diesem Zusammenhang ist auf die Zuflüsse von Abwassereinigungsanlagen hinzuweisen, die bei kleinen Abflüssen oftmals nur noch wenig verdünnt werden: So trägt beispielsweise das Abwasser beim Limbach (Buecheggberg) bei Niedrigwasser bis zu 50 % zum Abfluss bei.

Die Wassermenge, die notwendig ist um die ökologischen Funktionen eines Fliessgewässers zu erhalten, ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Je nach Ausprägung des Gewässerbetts führt dieselbe Wassermenge beispielsweise zu ganz unterschiedlichen Wassertiefen. Und gerade diese Wassertiefe ist für Fauna und Flora sehr entscheidend. In der vorliegenden Übersichtstudie können diese ökologisch notwendigen Wassermengen nicht differenziert für jedes einzelne Fliessgewässer bestimmt werden. Um eine Grössenordnung des ökologischen Wasserbedarfs zu erhalten, verwenden wir hier die Abflussmenge Q_{347} , also jene Abflussmenge, die an 347 Tagen im Jahr (95 % der Tage) erreicht oder überschritten wird. Die Abflussmenge Q_{347} wird auch in anderen Studien verwendet, um den ökologischen Wasserbedarf zu bestimmen.

2.4.3 Wasserbedarf der Unterlieger

Bei einer nachhaltigen Wassernutzung sollte man neben der Ökologie stets auch die Wasserbedürfnisse der Unterlieger berücksichtigen. Würden die Oberlieger in einem Einzugsgebiet in Trockenzeiten alles Wasser verwenden, sässen die Unterlieger im wahrsten Sinne des Wortes auf dem Trockenen.

Es gibt unseres Wissens keine Untersuchungen, welche zeigen, wie dieser Bedarf der Unterlieger zu bemessen ist. Wir legen ihn hier pragmatisch auf Q_{292} fest, also auf jene Wassermenge, die an 292 Tagen im Jahr (80 % der Tage) erreicht oder überschritten wird. In dieser Wassermenge sind aber sowohl der Wasserbedarf der Ökologie (vgl. Kap. 2.4.2) als auch der Unterlieger miteinbezogen.

2.4.4 Landwirtschaftliche Bewässerung

Der Kanton Solothurn weist eine Fläche von 790 km² auf. Davon werden rund 41 %, also rund 325 km² durch die Landwirtschaft genutzt. Rund zwei Drittel dieser landwirtschaftlichen Fläche sind Natur- und Kunstwiesen sowie Weiden und ein Drittel Ackerflächen (Stand 2019¹⁷). Auf den insgesamt 107 km² Ackerflächen dominiert der Anbau und Mais mit 47%, gefolgt von Brotgetreide mit 30 %. Raps, Soja und Sonnenblumen erreichen einen Anteil von 10 % und Kartoffeln zusammen mit Zuckerrüben 8 %. Die verbleibenden 5 % teilen sich die Flächen für Gemüse, Obst und Reben. Insgesamt befinden sich im Kanton 1224 Betriebe; davon liegen 924 im Tal- und Hügelland (Stand: 2019). Ein durchschnittlicher Betrieb bewirtschaftet rund 25 ha landwirtschaftliche Nutzfläche.

In einer detaillierten Analyse hat die Egli Engineering AG¹⁸ die landwirtschaftlichen Flächen nach ihrer Bewässerungswürdigkeit (s. Fig. 2.11) beurteilt und daraus den Zusatzwasserbedarf ermittelt. Diese Analyse geht von folgenden Annahmen bzw. Definitionen aus:

«Bewässerungswürdig sind nur Kulturen, welche direkt der Lebensmittelproduktion dienen und einige typische Futtermittel-Kulturen wie der Körnermais [aufweisen]. Diese Kulturen weisen eine gute Wassereffizienz auf.» Beim Prozentsatz bewässerungswürdiger Flächen wird zwischen dem Flächenanteil von «Ackerflächen und Kunstwiesen» und dem Flächenanteil der «Ackerflächen» unterschieden. Wir betrachten im Folgenden den Flächenanteil von «Ackerflächen und Kunstwiesen», fokussieren uns also auf den grösstmöglichen Wasserbedarf.

Als Zusatzwasserbedarf wird jene Wassermenge definiert, welche «die Kultur zusätzlich zum Niederschlag für das optimale Wachstum braucht» (Egli Engineering AG). Der Zusatzwasserbedarf wurde von Egli AG nach der in der Schweiz verbreiteten Methode von Fuhrer und Smith (2015) berechnet. Es wird zwischen drei Szenarien unterschieden (nach Egli Engineering AG):

¹⁷https://so.ch/uploads/tx_bcpagflip/Kantonsbroschuere_Solothurn_01.pdf

¹⁸Egli Engineering AG (2019): Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel – Resultatebericht (unveröffentlicht)

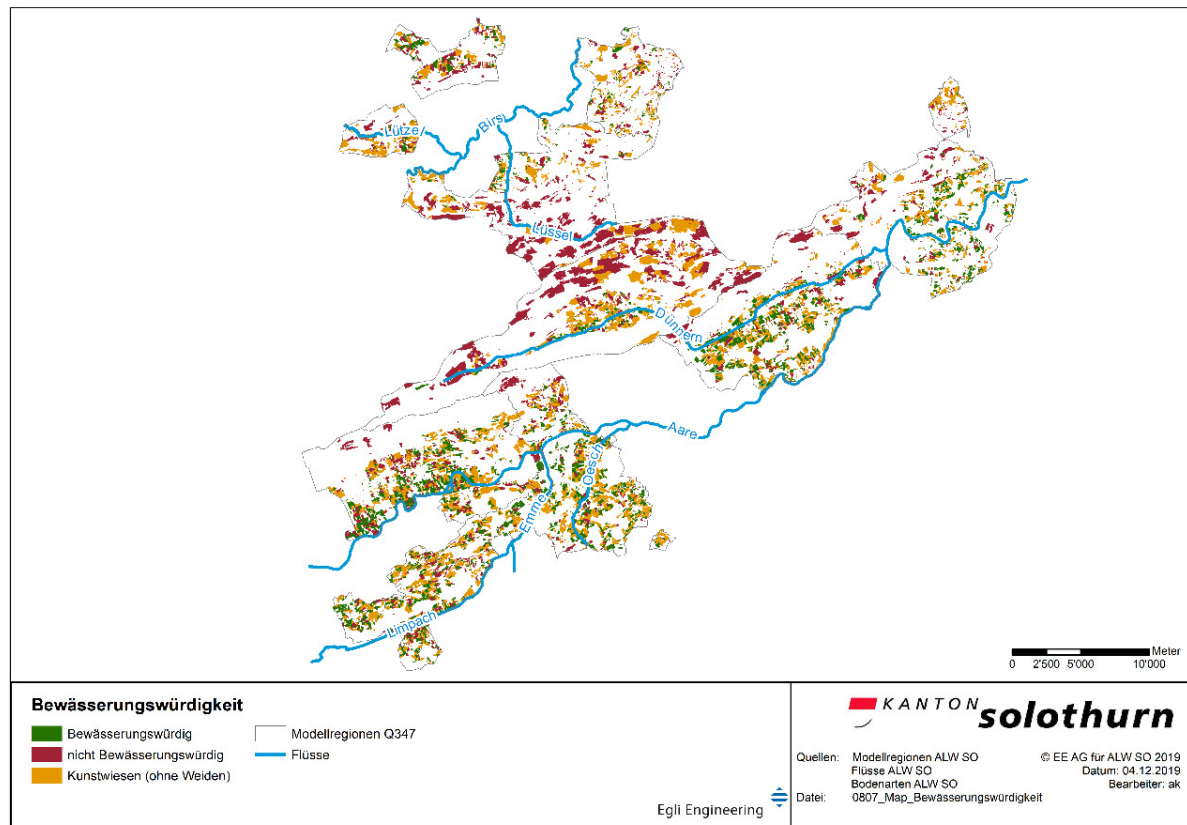


Fig. 2.11: Bewässerungswürdige Flächen im Kanton Solothurn

1. REF: Das Referenzszenario beschreibt das Klima von heute mit den heutigen Niederschlagsbedingungen.
2. MAX: Das Maximalszenario beschreibt die klimatischen Bedingungen des Jahres 2060.
3. EXT: Das Extremszenario beschreibt ein trockenes Jahr 2060.

In der Tabelle 2.7 sind die bewässerungswürdigen Flächen und der Zusatzwasserbedarf der drei Szenarien ausgewiesen. Die in dieser Tabelle angegebenen Werte repräsentieren den Kenntnisstand im Jahr 2012,

Leider sind die Modellregionen nach Egli Engineering AG nicht mit den Bezirken identisch, so dass wir die Daten flächenproportional umrechneten. Allerdings liegen die Flächendifferenzen zwischen den Modellregionen und den Bezirken in der Regel unter 5 %. Die Werte der Bezirke Gäu, Olten und Gösgen mussten auf der Basis der Modellregionen Gäu/Olten und Olten/Gösgen angepasst werden.

Ausgehend vom monatlichen Zusatzbedarf in der Dimension m^3 haben wir anschliessend den Zusatzwasserbedarf in die Dimension mm bestimmt, um ihn direkt mit dem nutzbaren Wasser vergleichen zu können¹⁹.

Tab. 2.7: Bewässerungswürdige Flächen (in Prozent der Gesamtfläche eines Bezirks) und Zusatzwasserbedarf im Sommer [mm] bei unterschiedlichen Szenarien bezogen auf die Fläche der Bezirke (Daten: Egli Engineering AG 2012.)

Allg. Angaben		davon bewässerungswürdig [%]	Bedarf Juni [mm]			Bedarf Juli [mm]			Bedarf August [mm]		
Bezirk	Fläche [km ²]		REF	MAX	EXT	REF	MAX	EXT	REF	MAX	EXT
Buecheeggberg	62.7	28	4	6	31	5	9	7	3	9	15
Wasseramt	76.7	22	3	4	23	3	6	5	3	8	13
Lebern	117.2	18	1	2	21	1	2	6	1	3	5
Gäu	62.1	14	1	2	12	1	3	3	1	4	6
Olten	80.6	14	1	2	12	1	3	3	1	4	6
Gösigen	68.7	14	1	2	12	1	3	3	1	4	6
Thal	139.4	5	1	1	7	1	2	2	1	2	3
Thierstein	102.3	4	1	1	4	1	2	2	1	2	2
Dorneck	74.7	13	3	5	21	4	9	11	3	6	9

Nach Tabelle 2.7 schwanken die bewässerungswürdigen Flächen zwischen 4 % (Thierstein) und 28 % (Buecheeggberg). Im Mittelland sind sie höher als im Jura, wobei der Bezirk Dorneck den Werten im Mittelland sehr nahe kommt. Diese Unterscheidung zwischen Mittelland und Jura ist auch beim Wasserbedarf erkennbar.

Der Wasserbedarf der Szenarien REF und MAX unterscheidet sich in den einzelnen Monaten um den Faktor 2 bis 3. Beim Szenario EXT fällt auf, dass

- sich der Wasserbedarf im Juni deutlich von jenem der Szenarien REF und MAX unterscheidet und
- die Unterschiede zu den Szenarien REF und MAX im Juli und auch im August wesentlich kleiner sind.

2.4.5 Zusammenfassende Übersicht

In der dieses Kapitel zum Wasserverbrauch abschliessenden Grafik (Fig. 2.12) wird der gesamte Wasserbedarf bei den drei Szenarien REF, MAX, EXT ausgewiesen. Diese Szenarien lehnen sich an die Untersuchungen der Egli Engineering AG an. Die Unterschrift zur Grafik erläutert, auf welchen Annahmen diese Szenarien basieren. Dabei ist zu beachten, dass diese Szenarien nicht auf den sonst in dieser Untersuchung verwendeten Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 beruhen.

Die Grafik lässt einen grossen Unterschied zwischen den Szenarien REF und MAX auf der einen Seite und dem Szenario EXT auf der andern Seite erkennen. Letzteres ist auf sehr trockene Jahre zugeschnitten. Sie zeigt im Weiteren, dass der Wasserbedarf von Ökologie und Unterlieger

¹⁹Diese mm-Werte weichen von den Angaben von Egli Engineering AG ab, weil letzterer den Zusatzwasserbedarf [m³] auf die bewässerungswürdige Fläche und nicht den Bezirk umrechnete

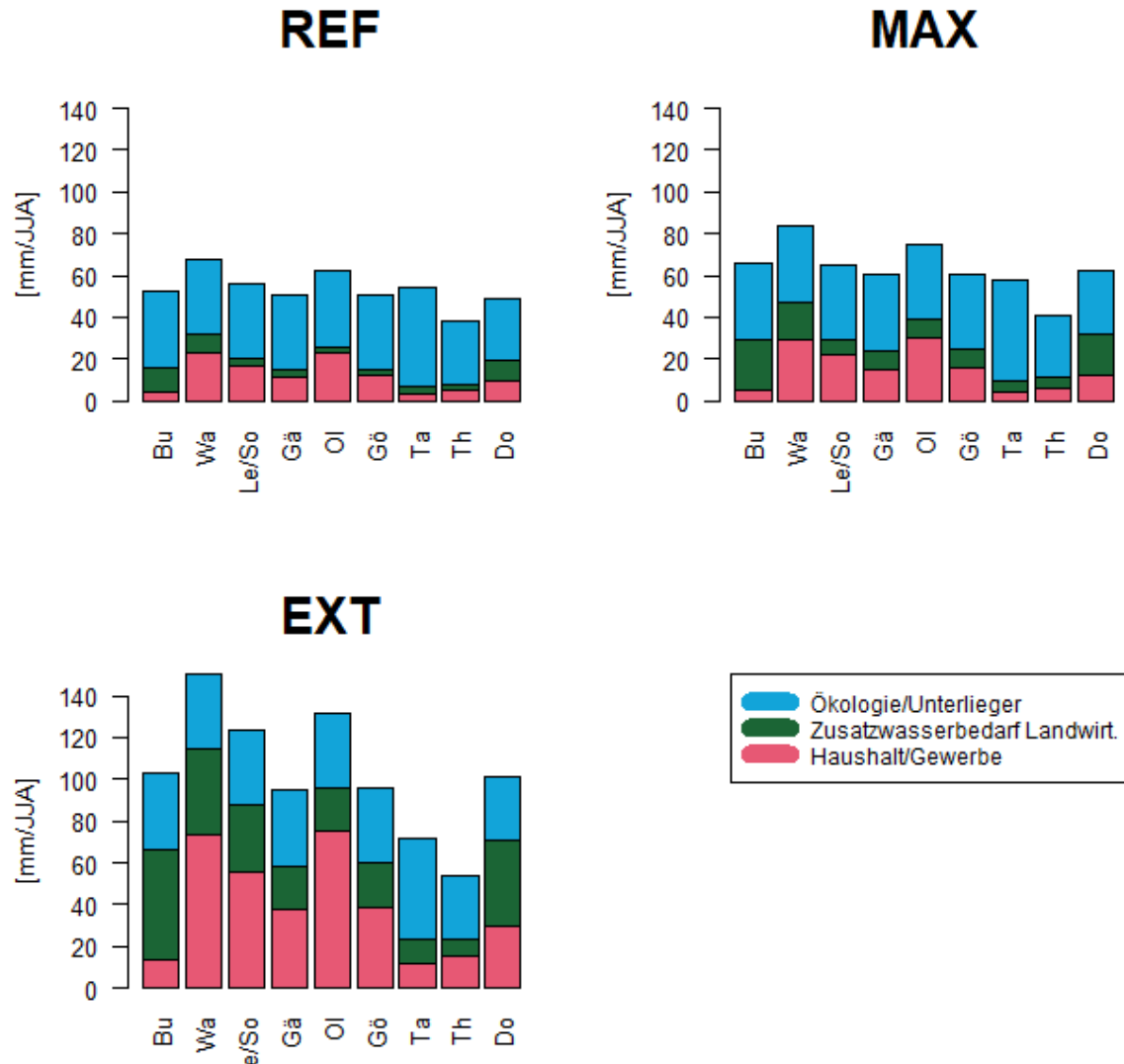


Fig. 2.12: Sommerlicher Wasserbedarf (Summe JJA) in den Bezirken nach verschiedenen Szenarien. **REF**: Ökologie $\equiv Q_{292}$, Bewässerung: Szenario REF, Haushalt/Gewerbe: mittlerer Wasserverbrauch heute ; **MAX**: Ökologie $\equiv Q_{292}$, Bewässerung: Szenario MAX, Haushalt/Gewerbe: mittlerer Wasserverbrauch 2060; **EXT**: Ökologie $\equiv Q_{292}$, Bewässerung: Szenario EXT; Haushalt/Gewerbe: extremer Wasserverbrauch 2060

bei den Szenarien REF und MAX am grössten ist, gefolgt vom Trink- und Brauchwasser. Der Zusatzwasserbedarf ist vergleichsweise klein, wächst aber verständlicherweise, wenn die Sommer heisser und trockener werden, wie das beim Szenario REF und EXT der Fall ist.

3 Hydrologische Auswirkungen der Klimaänderung in der Schweiz und im Kanton Solothurn – Stand der Kenntnisse

3.1 Emissionsszenarien und Modellierung von Niederschlag und Abfluss

Im März 2021 veröffentlichte das Bundesamt für Umwelt in Zusammenarbeit mit der MeteoSchweiz und mit Schweizerischen Universitäten die Ergebnisse der Untersuchungen im Rahmen des Projekts «Hydro-CH2018», bei dem die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in der Schweiz räumlich und zeitlich detailliert untersucht wurden²⁰. Dazu waren umfangreiche Simulationen notwendig. Die grundsätzliche Vorgehensweise ist in Figur 3.1 skizziert:

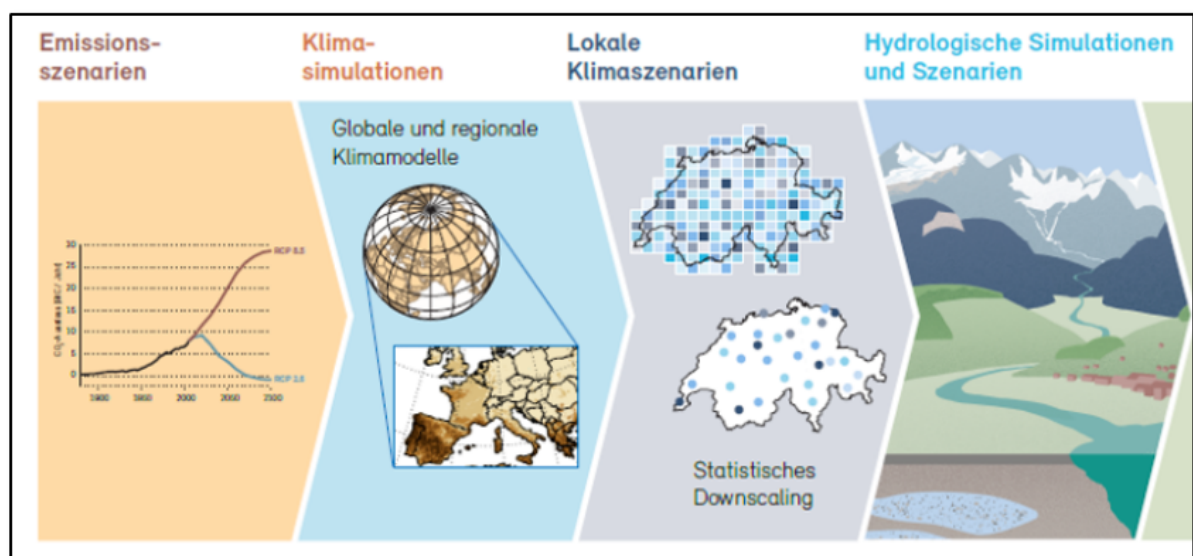


Fig. 3.1: Schematische Darstellung der gesamten Modellkette zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrologie (aus: Hydrologischer Atlas der Schweiz (2021))

Am Anfang der Simulationen stehen sog. Emissionsszenarien, die mögliche Verläufe des Treibhausgasausstosses in Zukunft auf globaler Ebene beschreiben.²¹ Treibhausgase werden durch den Menschen ausgestossen. Insbesondere sind dies

- CO₂, das bei der Verbrennung von fossilen Treib- und Brennstoffen und auch bei der Abholzung von Wäldern entsteht,
- *Methan*, welches sich durch Vergärung bildet, etwa in Sümpfen, auf Reisfeldern, aber auch in Mägen von Wiederkäuern wie Kühe und Schafe sowie

²⁰<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-hydroszenarien.html>

²¹Die folgenden Ausführungen zu den Treibhausgasen lehnen sich an Veröffentlichungen des Hydrologischen Atlas der Schweiz und der MeteoSchweiz an.

- *Lachgas* und weitere Gase

Diese Gase reichern sich in der Erdatmosphäre an und verstärken dort den natürlichen Treibhauseffekt. Vom Verhalten der Menschen hängt es ab, ob und wie schnell die Konzentrationen der Treibhausgase in der Atmosphäre weiter zunehmen. Zur Charakterisierung möglicher Entwicklungen der Treibhausgasemissionen dienen die sog. Repräsentativen Konzentrationspfade RCP (Representative Concentration Pathways). Um die Bandbreite möglicher zukünftigen Veränderungen zu erfassen, werden in der Regel drei Konzentrationspfade gewählt:

- RCP 2.6: Die Menschheit führt einen konsequenten Klimaschutz durch. Mit einer drastischen Senkung der Emissionen wird die globale Erwärmung auf weniger als zwei Grad gegenüber der vorindustriellen Zeit begrenzt, wie es das Abkommen von Paris (2017) vorsieht.
- RCP 4.5: Mit einem begrenzten Klimaschutz wird der Ausstoss von Treibhausgasen zwar eingedämmt, aber der Gehalt in der Atmosphäre wird noch weitere 50 Jahre ansteigen. Das Zwei-Grad-Ziel wird verfehlt.
- RCP 8.5: Ohne wirksame Klimaschutzmassnahmen werden die globalen Treibhausgasemissionen weiterhin stark ansteigen und die globale Erwärmung wird bis Ende des Jahrhunderts 4 bis 5 Grad erreichen.

Durch Kombination dieser Emissionsszenarien mit globalen und schliesslich regionalen Klimamodellen wurden unter Verwendung von statistischen Verfahren die lokalen Klimaszenarien für die Schweiz (CH2018) erstellt²², welche der kleinräumigen und gebirgigen Schweiz Rechnung tragen. Dazu stehen mehrere globale und regionale Klimamodelle zur Verfügung.

In der Schweiz liegen nun für die Periode 1981 - 2099 durchgehende (transiente) Zeitreihen in einer räumlichen Auflösung von 2 km · 2 km als Tageswerte vor, und zwar pro Emissionsszenario auf der Grundlage von rund zwanzig Modellketten, die sich in Bezug auf die Initialbedingungen und der verwendeten Kombinationen zwischen globalen und regionalen Modellen unterscheiden. Dies erlaubt nicht nur eine profunde Abstützung der ausgewiesenen Werte, sondern ermöglicht es auch, die Unsicherheiten der Abschätzungen zu beziffern. Aus den gesamtschweizerisch verfügbaren Datensätzen wurde der Kanton Solothurn und die Einzugsgebiete der Aare und Emme «herausgebrochen». Somit stehen für diese Studie im Bezug auf den Kanton Solothurn folgende Klimadaten zur Verfügung:

- Emissionsszenarien: 3
- Tageswerte 1981 - 2099: 119 Jahre · * 365 Tage = 43345 Werte
- Modellketten: im Mittel 20 pro Szenario
- Pixel 2 km · 2 km: $790 \text{ km}^2 / 4 \text{ km}^2 = 198 \text{ Pixel}$

²²NCCS (2018): CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. CH2018. National Centre for Climate Services, Zürich

- Parameter (Temperatur, Niederschlag): 2

Dies ergibt insgesamt rund 1 Milliarde Werte alleine für den Kanton Solothurn. Um daraus die für diese Studie wesentlichen Informationen zu gewinnen, musste die Datenmenge in mehreren Schritten reduziert werden, so dass nun für jeden Bezirk und für jeden Monat zwischen 1981 und 2099 Monatsmittel für Temperatur und Niederschlag vorhanden sind²³. Dabei ist zu beachten, dass diese Werte mögliche Realisationen sind, welche unter den gegebenen Rahmenbedingungen zustande kommen. Ein Niederschlagswert von 30 mm für Juli 2047 heisst demnach nicht, dass genau in diesem Monat ein Wert von 30 mm erwartet werden kann, aber dass das Auftreten dieses Werts unter den gegebenen Rahmenbedingungen (Emissionsszenario) möglich ist.

Diese Daten wurden in einem Folgeschritt verwendet, um mit dem einfachen hydrologischen Modell MoSO die Entwicklung und Veränderung der Abflüsse zu simulieren (vgl. Abb. 3.1). Das methodische Vorgehen dieser Simulationen wird in Kap. 4 vorgestellt.

3.2 Ergebnisse des Projekts CH2018-Hydro

Im März 2021 sind die Ergebnisse des Projekts CH2018-Hydro erschienen²⁴. In aller Kürze lassen sich aus unserer Sicht vier Schlüsselpunkte ableiten, welche hier mit kurzen Erläuterungen vertieft werden²⁵. Dabei wird auch deren Bedeutung für den Kanton Solothurn beurteilt.

1. Der Einfluss des Klimawandels ist bereits heute in den hydro-meteorologischen Messreihen erkennbar.

Bedeutung für den Kanton Solothurn: hoch

Betrachten wir dazu beispielhaft die Veränderungen der Abflussregimes, konkret der saisonalen Abflüsse in den letzten Jahrzehnten²⁶. Die beobachteten Veränderungen sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Regional erkennt man die starken Veränderungen im Alpenraum und saisonal im Winter und im Sommer. Im Mittelland und Jura sind tendenzielle Veränderungen erkennbar, die sich in Zukunft massiv verstärken werden, wie die Ergebnisse dieser Studie erkennen lassen.

2. Schnee und Gletscher als zentrale Elemente des Wasserhaushalts werden ihre Rolle im Wasserhaushalt allmählich und gegen Ende des Jahrhunderts immer mehr verlieren.

Bedeutung für Solothurn: mittel → Aare, Emme

Die Abbildung 3.2 zeigt das drastische Ausmass des Gletscherrückgangs und lässt die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt erahnen. Beispielsweise ist das Einzugsgebiet der

²³Konkret: Für jeden Monat der 119-jährigen Periode liegen pro Szenario rund 20 Monatsmittelwerte vor

²⁴<https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-hydroszenarien.html>

²⁵Für vertiefte Einblick sei auf <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/das-nccs/themenschwerpunkte/hydro-ch2018.html> verwiesen.

²⁶Weingartner, R. (2019): Veränderungen der Abflussregimes der Schweiz in den letzten 150 Jahren. Bericht im Rahmen des Projekts CH2018-Hydro im Auftrag des BAFU)

Tab. 3.1: Regionale Veränderung der mittleren saisonalen Abflüsse und des Jahresabflusses in der Periode 1961–2015. DJF: Winter, MAM: Frühling, JJA: Sommer, SON: Herbst (aus: Weingartner (2019))

Region	DJF	MAM	JJA	SON	Jahr
Mesoskalige Gebiete					
Mittelland/Jura	↑	↓	↓	↑	→
Alpen (ohne glaz. Gebiete)	↑↑	↑	↓↓	↑	→
Alpen (nur glaz. Gebiete)	↑↑	↑↑↑	↑↑↑	→	↑↑↑
Alpensüdseite	↑	→	↓	↑	↓
Makroskalige Gebiete	↑	↓	↓	↑	→

↑: Regionale Tendenz zur Zunahme
 ↑↑: Mittlerer regionaler Trend zur Zunahme
 ↑↑↑: Starker regionaler Trend zur Zunahme
 ↓: Die Abnahme wird analog beurteilt
 →: Keine Veränderung

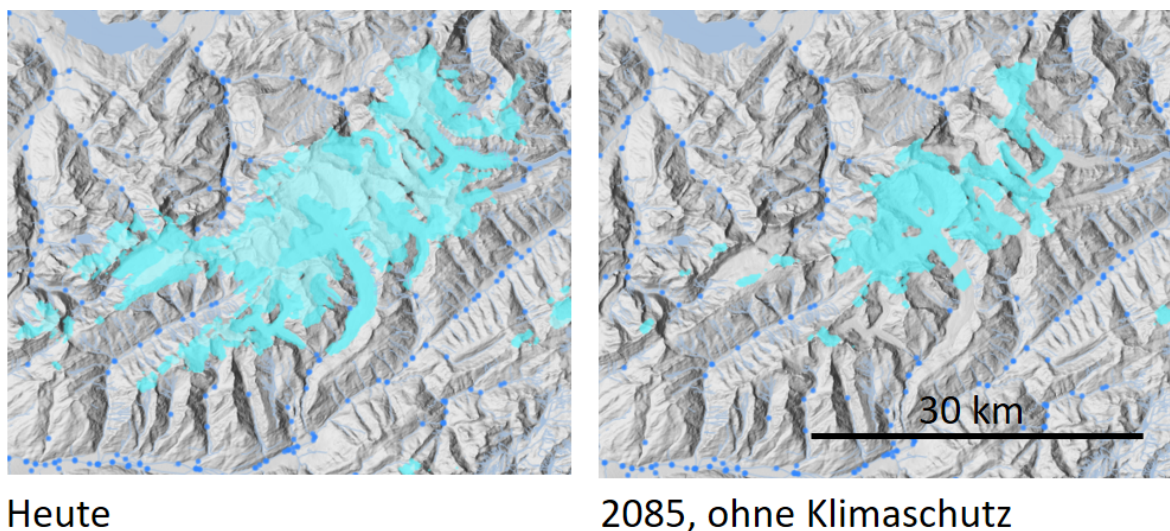


Fig. 3.2: Veränderung der Gletscherflächen im östlichen Berner Oberland (aus: Hydrologischer Atlas der Schweiz)

Heute zu 16.8 % vergletschert. Dieser Vergletscherungsgrad wird unter Annahme eines Szenarios ohne Klimaschutz auf 3.4 % zurückgehen, wie die neue Klimaszenarienplattform des Hydrologischen Atlases der Schweiz aufzeigt²⁷. Heute tragen die Gletscher rund 13 % zum Gesamtabfluss bei²⁸. Dieser Anteil wird sich unter einem solchen Szenario also dramatisch verkleinern, was zu einem starken Rückgang der sommerlichen Schmelz-

²⁷hydromapscc.ch

²⁸KHR (2016): Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels. Synthesebericht

wasserabflüsse führen wird und auch Auswirkungen auf die Aare-Anrainer (Solothurn!) im Mittel- und Unterlauf haben wird. Das Einzugsgebiet der Aare in Murgenthal weist heute (2021) ein Vergletscherungsgrad von 1.7 % auf²⁹. Er wird um 2080 nur noch 0.1 % betragen (unter RCP 8.5)³⁰. Der Rückgang der Gletscher ist offensichtlich. Allerdings sind die Auswirkungen der Veränderung der Schneedecke auf den Wasserhaushalt noch viel bedeutender. Im Einzugsgebiet des Rheins stammen heute rund 40 % des Abflusses aus der Schneedecke, gegen Ende des Jahrhunderts wird dieser Anteil beim Szenario ohne Klimaschutz auf rund 20 - 25 % zurückgehen³¹.

3. Die Sommertrockenheit wird zu einer der grössten Herausforderung.

Bedeutung für Solothurn: sehr hoch

Steigende Wassertemperatur und verminderter Abfluss werden zu Nutzungsbeschränkungen vor allem in der Landwirtschaft führen und die Gewässerökosysteme mit zum Teil drastischen Auswirkungen auf Tiere und Pflanzen verändern.

Heute werden gerade einmal 4 % der Landwirtschaftsfläche der Schweiz künstlich bewässert. Es bestehen allerdings grosse regionale Unterschiede. In den trockenen Jahren 2003, 2015 und 2018 vergrösserte sich die bewässerte Fläche jeweils erheblich, was einen grossen Druck auf die Fliessgewässer ausübte. Dabei ist allerdings zu beachten, dass bei Wasserentnahmen aus Fliessgewässern für landwirtschaftliche Zwecke die Restwassermengen eingehalten werden müssen. Die Kantone können allerdings bei sehr grosser Trockenheit die Restwassermengen etwas reduzieren, um der Landwirtschaft mehr Bewässerungswasser zur Verfügung zu stellen. Charakteristisch für solche Situationen ist, dass das Wasserdargebot viel kleiner ist als die Nachfrage nach Wasser, wie das Beispiel in Figur 3.3 verdeutlicht.

Mit dem Klimawandel wird die Nachfrage der Landwirtschaft nach Bewässerungswasser weiter zunehmen, weil die potentielle Verdunstung und damit der Wasserbedarf der Kulturpflanzen zunimmt. In Fig 3.4 wird die Wasserknappheit bei einer Trockenheit, welche im Mittel einmal in zehn Jahren auftritt, für die Schweiz beurteilt³². Heute (Referenzperiode) sind vor allem das westliche Mittelland und die Nordschweiz betroffen, wobei auch der Kanton Solothurn tangiert wird. Gegen Endes des Jahrhunderts bei einem Szenario ohne Klimaschutz verstärken sich diese Hotspots und dehnen sich gleichzeitig aus. Die Trockenheitsgefahr wird im Kanton Solothurn signifikant zunehmen.

4. Intensivere Niederschläge und eine steigende Nullgradgrenze werden grössere Hochwasser als heute verursachen .

Bedeutung für Solothurn: mittel

²⁹Hydrologisches Jahrbuch des BAFU

³⁰hydromapscc.ch

³¹Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) 2012: Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Umwelt-Wissen Nr. 1217

³²NCCS [Hrsg.] (2021): Schweizer Gewässer im Klimawandel. National Centre for Climate Services, Zürich.

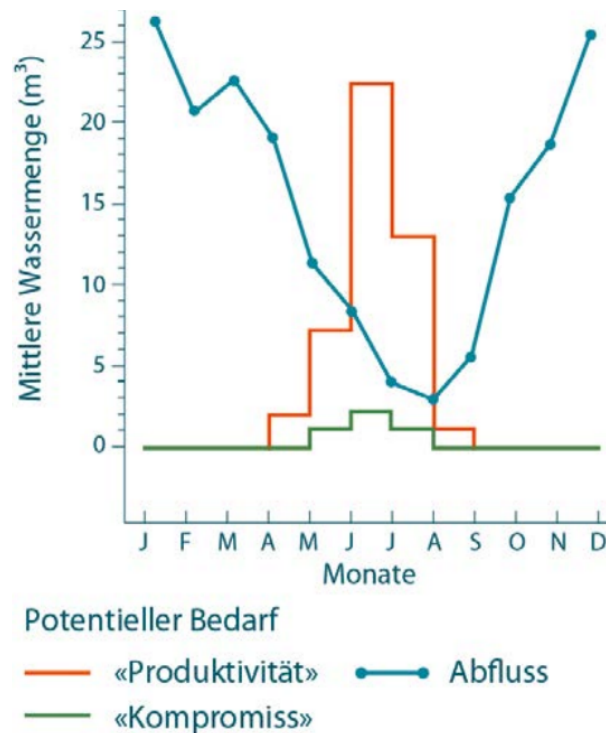


Fig. 3.3: Jahresgang des durchschnittlichen monatlichen Wasserbedarfs für die Bewässerung in der Broye-Region unter den beiden Strategien «Produktivität» und «Kompromiss» der Landnutzung im Zeithorizont 2050: Aus: NFP61 (2015): Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz, Gesamtsynthese

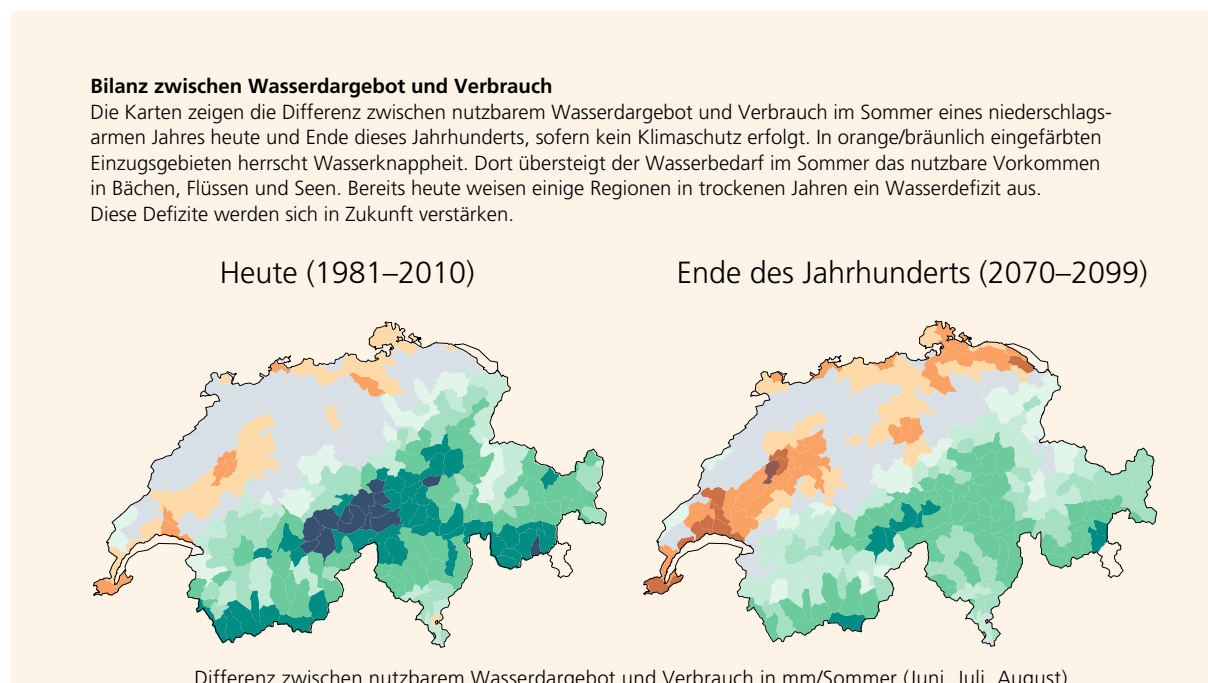


Fig. 3.4: Wasserknappheit im Sommer (aus NCCS (2021)).

Für die Veränderung der Hochwasser in der Zukunft sind zwar verschiedene Faktoren verantwortlich, aber die Temperaturerhöhung ist ein grundlegender Faktor: Sie führt zu mehr Feuchte und Energie in der Atmosphäre und damit zu intensiveren Niederschlägen, erhöht die Nullgradgrenze und vermindert die Bodenfeuchte. Die grössten Veränderungen sind im Alpenraum zu erwarten. Für die Hochwassersituation im Kanton Solothurn wird die Intensivierung der Niederschläge entscheidend sein.

3.3 Was wissen wir?

Wie aus diesen vier Schlüsselpunkten ersichtlich ist, spielt die Lufttemperatur bei diesen Veränderungen eine sehr entscheidende Rolle. Was heisst das? Es ist gewiss, dass es wärmer wird. Wie stark sich das Klima erwärmen wird, hängt vom Emissionspfad ab. Aufgrund der starken Temperatursteuerung vieler hydrologischer Prozesse kennt man daher bereits heute Art und Richtung der hydrologischen Veränderungen, unsicher ist man vor allem über den Zeitpunkt und das Ausmass dieser Veränderungen.

Wie diese Schlüsselpunkte zudem verdeutlichen, übt der Klimawandel einen grossen Einfluss auf die hydrologischen Verhältnisse des Kantons Solothurn aus. In der vorliegenden Untersuchung werden diese Veränderungen auf der Basis der Solothurner Bezirke genauer betrachtet.

4 Methodik

4.1 Aufbereitung der CH2018-Klimaszenarien

Grundlage für die Studie sind die CH2018-Klimaszenarien für die Schweiz³³, welche bereits in Kapitel 3.1 vorgestellt wurden. Diese Klimaszenarien decken die Periode 1981 bis 2099 ab und sind u.a. als gegitterte Datensätze mit einer räumlichen Auflösung von ca. 2 km x 2 km verfügbar. Insgesamt liegen 68 unterschiedliche Klimasimulationen vor: 12 beschreiben ein Klima mit Klimaschutz (RCP 2.6), 31 ein Klima ohne Klimaschutz (RCP 8.5) und 25 ein Klima mit teilweisem Klimaschutz (RCP 4.5). Da die Szenarien mit und ohne Klimaschutz die Spannweite der möglichen zukünftigen Entwicklung bereits abdecken, wurden die Daten der Szenarien für ein Klima mit teilweisem Klimaschutz zwar mit aufbereitet, aber im Rahmen dieser Studie nicht weiter ausgewertet.

In einem ersten Schritt werden, wie in Figur 4.1 skizziert, die Niederschlagsgitter mit den Flächen ausgewählter Einzugsgebiete und der Bezirke des Kantons Solothurn mit Hilfe der statistischen Programmiersprache R³⁴ verschnitten. Aus diesem Verschnitt und der anschliessenden räumlichen Mittelwertbildung resultieren je 68 tägliche Zeitreihen für die Einzugsgebiete und Bezirke, welche ebenfalls die gesamte Periode 1981 bis 2099 abdecken.

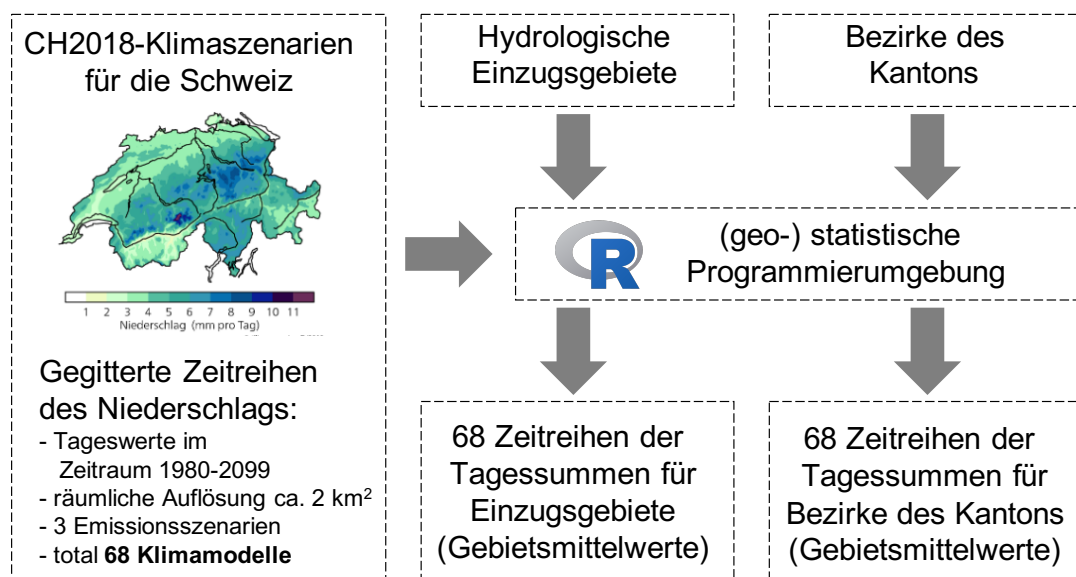


Fig. 4.1: Vorgehen bei der Verarbeitung des gegitterten Datensatzes der CH2018-Klimaszenarien zu Zeitreihen mit Gebietsmittelwerten für Einzugsgebiete und Bezirke.

Die Zeitreihen mit Tageswerten werden in einem zweiten Schritt zu Zeitreihen mit Monatssummen des Niederschlags verdichtet. Diese bilden nun die Grundlage für alle weiteren Analysen und Auswertungen dieser Studie.

³³NCCS (2018): CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. CH2018. National Centre for Climate Services, Zürich

³⁴R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://r-project.org>.

4.2 Abflussmodellierung mit MoSO

Der Abfluss, also die Wassermenge die in einem Einzugsgebiet gebildet wurde und dann in den Bächen und Flüssen abfließt, ist die zentrale Grösse des Wasserdargebots und ein sensibler und aussagekräftiger Indikator für Veränderungen beim Wasserdargebot. Seine räumliche und zeitliche Verteilung entscheidet letztlich, wann und wo wieviel Wasser genutzt werden kann (vgl. Fig. 1.1).

In diesem Abschnitt wird nun dargestellt, wie der Abfluss – im Mittelpunkt stehen hier die mittleren monatlichen Abflüsse – für die zukünftigen Zeiträume mit einem einfachen deterministischen Modell abgeschätzt werden.

Ausschlaggebend für die Wahl eines einfachen deterministischen Modells waren folgende Punkte:

- Für den zeitlichen Analysehorizont 1981 - 2099 stehen vor allem Niederschlag und Temperatur zur Verfügung, diese dann allerdings in einer hervorragenden räumlichen und zeitlichen Auflösung (vgl. Kap. 3.1). Komplexere hydrologische Modelle würden aber weitere Inputparameter, z.B. Strahlung, benötigen.
- Das Amt für Umwelt des Kantons Solothurn betreibt zwar einige Abflussmessstationen, so dass in deren Einzugsgebieten auch komplexere hydrologische Modelle grundsätzlich geeicht werden könnten. Allerdings sind die Gebiete eher klein und die Messreihen kurz, was eine Modelleichung erschwert. Des weiteren fehlen für die kleinen Gebiete verlässliche Informationen zum Gebietsniederschlag.
- Im eher flachen mittelländischen Kantonsteil ist es schwierig, klassische Einzugsgebiete, welche durch eine Wasserscheide begrenzt sind, abzugrenzen. Solche Gebiete, die dann auch noch repräsentativ für einen Kantonsteil oder die Bezirke sein müssten, werden aber benötigt, um ein klassisches Modell einzusetzen.

4.2.1 Simulation der zukünftigen mittleren monatlichen Abflüsse

In den Kapiteln 3.1 und 4.1 wurde aufgezeigt, wie aus einer riesigen Datenmenge die mittleren Monatsniederschläge hergeleitet wurden. Diese Daten werden nun verwendet, um ein einfaches deterministisches hydrologisches Modell anzutreiben.

Bei einem deterministischen Modell erfolgt die Übertragung des Niederschlags in Abfluss durch physikalisch erklärbare Parameter. Bei unserem einfachen Modell MoSO verwenden wir nur einen Parameter, nämlich den Abflussbeiwert. Dieser beschreibt, welcher Anteil des Monatsniederschlags zum Abfluss gelangt. Ein Wert von 0.4 bedeutet beispielsweise das 40 % des Niederschlags zum Abfluss gelangen. Der Abflussbeiwert konnte aus den heute verfügbaren Messungen zu Niederschlag und Abfluss abgeleitet werden. Figur 4.2 beschreibt den Verlauf des Beiwerts bei der Dünnern.

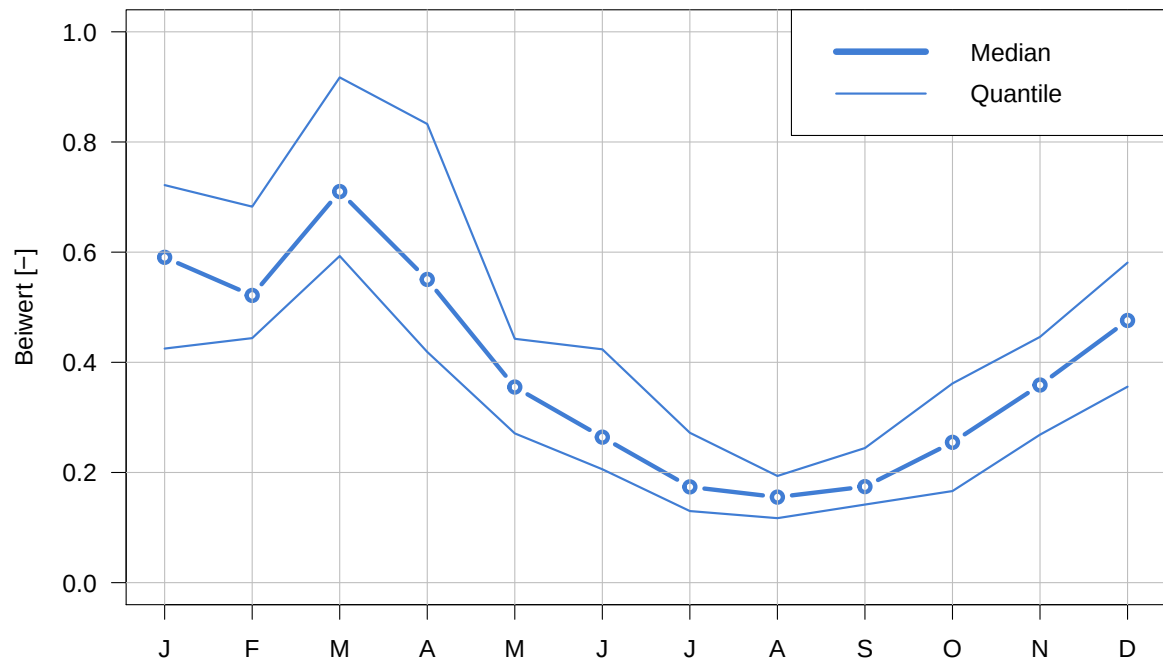


Fig. 4.2: Dünneren, Olten: Mittlere monatliche Schwankungen des Abflussbeiwerts in der Periode 1981–2010. Zwischen den Kurven der Quantile liegen 50 % der Werte der einzelnen Jahre.

Der Abflussbeiwert hängt von verschiedenen Faktoren wie der Niederschlags- und Verdunstungsmenge, der Ausprägung des Reliefs, von den Bodenverhältnissen und vom geologischen Untergrund in einem Einzugsgebiet ab. Er integriert die Wirkungsweise dieser Faktoren in einem einzigen für ein bestimmtes Einzugsgebiet charakteristischen Wert, der allerdings einen starken saisonalen Gang aufweist, wie das Beispiel in Figur 4.2 belegt. Die hohen Werte im Winter sind auf relativ hohe Monatsniederschläge, auf die geringe bis fehlende Verdunstung und auf die Schneeschmelze zurückzuführen. Die geringeren Niederschläge im Sommer in Kombination mit der hohen Verdunstung und den ungesättigten Böden führen dazu, dass die Beiwerte im Sommer viel kleiner sind als im Winter. Der Beiwert ist also ein charakteristisches Merkmal jedes Einzugsgebiets. Wir verwenden ihn deshalb, um aus den Niederschlagsmengen der CH2018-Szenarien monatliche Abflussmengen herzuleiten.

$$MQ_{Monat} = \phi_{Monat} \cdot N_{Monat} \quad (4.1)$$

MQ Mittlerer Monatsabfluss
 ϕ Abflussbeiwert
 N Niederschlag

Am Beispiel der Ergolz, Liestal, wurde dieser Ansatz (Modell MoSO) validiert. Dazu soll der Augustabfluss der einzelnen Jahre in der Periode 1961 - 2000 mit MoSO abgeschätzt und mit den beobachteten Abflüssen verglichen werden. Dabei wurde konkret wie folgt vorgegangen:

- Aufsetzen des einfachen Modells MoSO: Berechnung des mittleren monatlichen Abflussbeiwerts für den August auf der Basis der Niederschlags- und Abflussdaten der Jahre 1981–2010:
- Anwendung des Modells (Formel 4.1) mit dem im ersten Schritt berechneten Abflussbeiwert sowie den monatlichen Niederschlagsdaten als Input. Letztere sind im Hydrologischen Atlas der Schweiz verfügbar.
- Vergleich der modellierten mit den tatsächlich beobachteten Abflusswerten zur Beurteilung der Modellgüte.

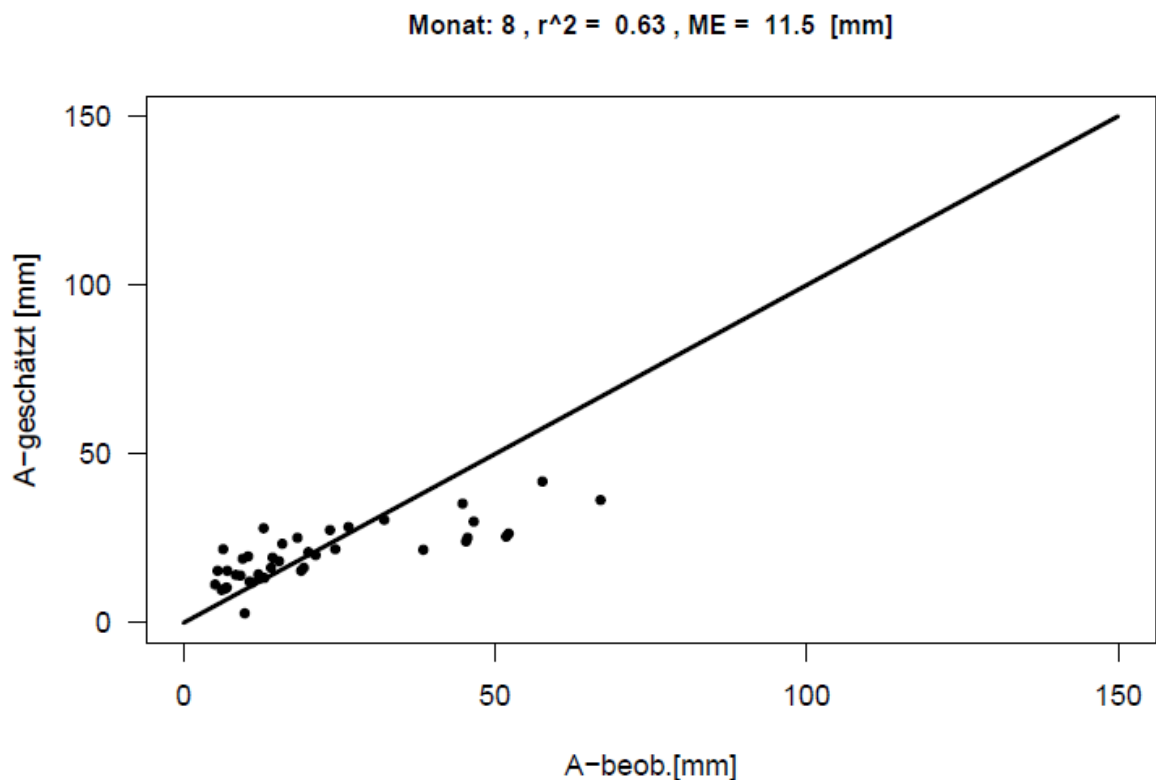


Fig. 4.3: Ergolz, Liestal: Validierung des in dieser Untersuchung verwendeten einfachen hydrologischen Modells MoSO. Gegenüberstellung der beobachteten und der modellierten Monatsabflüsse im August

Der Vergleich zwischen modellierten und beobachteten Monatsabflüssen in Figur 4.3 bestätigt, dass es der einfache deterministische Modellansatz erlaubt, die beobachteten Abflusswerte zufriedenstellend abzuschätzen. Der mittlere Schätzfehler ME beträgt 11.5 mm. Zieht man alle Monate in die Betrachtung ein, so variiert ME zwischen 11 und 22 mm.

Da jedoch die Niederschläge der CH2018-Klimaszenarien auch für die Referenzperiode 1981–2010 nicht direkt mit den beobachteten Niederschlägen vergleichbar sind³⁵, werden – wie in Figur 4.4 dargestellt – für eine zweite Eichung des Modells MoSO die Modellniederschläge der CH2018-Klimaszenarien verwendet. Mit diesen langjährigen Modellniederschlägen und den langjährigen beobachteten Monatsabflüssen werden für jeden Monat des Jahres ein Abflussbeiwert bestimmt (Fig. 4.4).

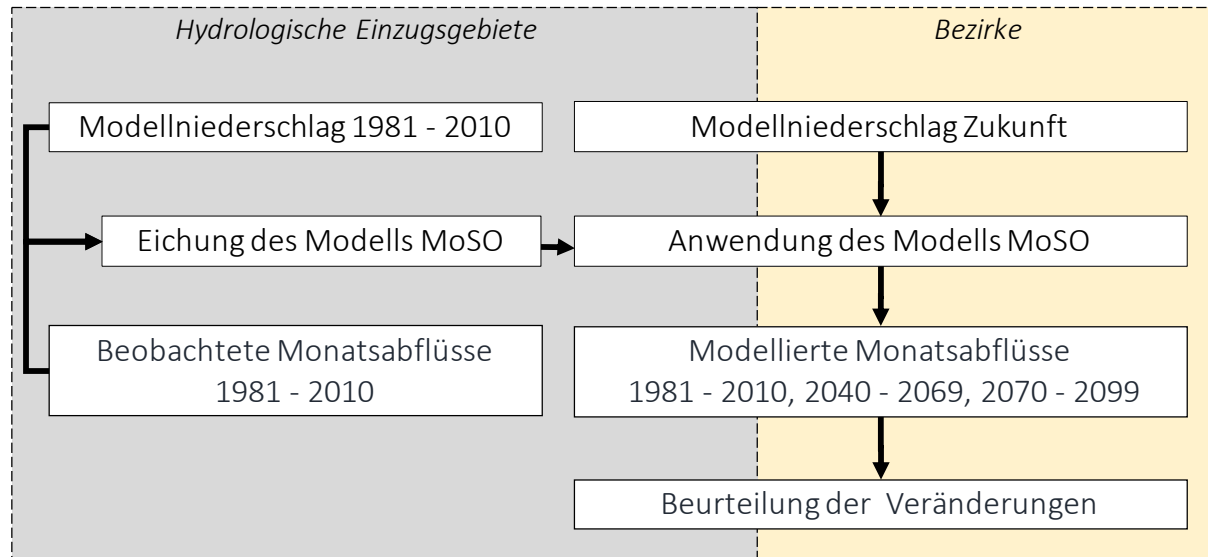


Fig. 4.4: Überblick über das methodische Vorgehen

Der Abflussbeiwert wird sich im Zuge des Klimawandels verändern. Mit spezifischen Analysen, welche auf komplexen hydrologischen Modellen, die in der Dünnern und der Ergolz im Rahmen des Projekts CH2018-Hydro aufgesetzt wurden, konnten die zukünftigen Veränderungen des Abflussbeiwerts untersucht und die Werte entsprechend angepasst. Die Figuren 4.5 bis 4.8 zeigen den charakteristischen Jahresgang der verwendeten Abflusskoeffizienten für die in dieser Studie verwendeten Einzugsgebiete Ergolz, Liestal (Fig. 4.5), Dünnern, Olten (Fig. 4.6), Emme, Wiler (Fig. 4.7) und Aare, Murgenthal (Fig. 4.8).

Der Abflussbeiwert unterliegt nicht nur zeitlichen, sondern auch räumlichen Schwankungen. Deshalb wurde für jeden Bezirk ein möglichst repräsentatives Einflussgebiet mit berechneten Abflussbeiwerten ausgewählt. Diese Werte wurden dann auf den ganzen Bezirk übertragen. Auf diese Weise können nun, entsprechend Figur 4.4, die Modellniederschläge der Bezirke zu modellierten Monatsabflüssen umgesetzt werden. Im Untersuchungsperimeter liegen jedoch nur für die Einzugsgebiete der Dünnern und der Ergolz alle notwendigen Daten zur vollständigen Eichung des Modells MoSO vor. Die Abflussbeiwerte der Ergolz wurden daher auf die Bezirke Dorneck und Thierstein im Solothurner Jura übertragen. Für alle anderen Bezirke wurden die Abflussbeiwerte der Dünnern verwendet.

³⁵CH2018 (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, ISBN: 978-3-9525031-4-0

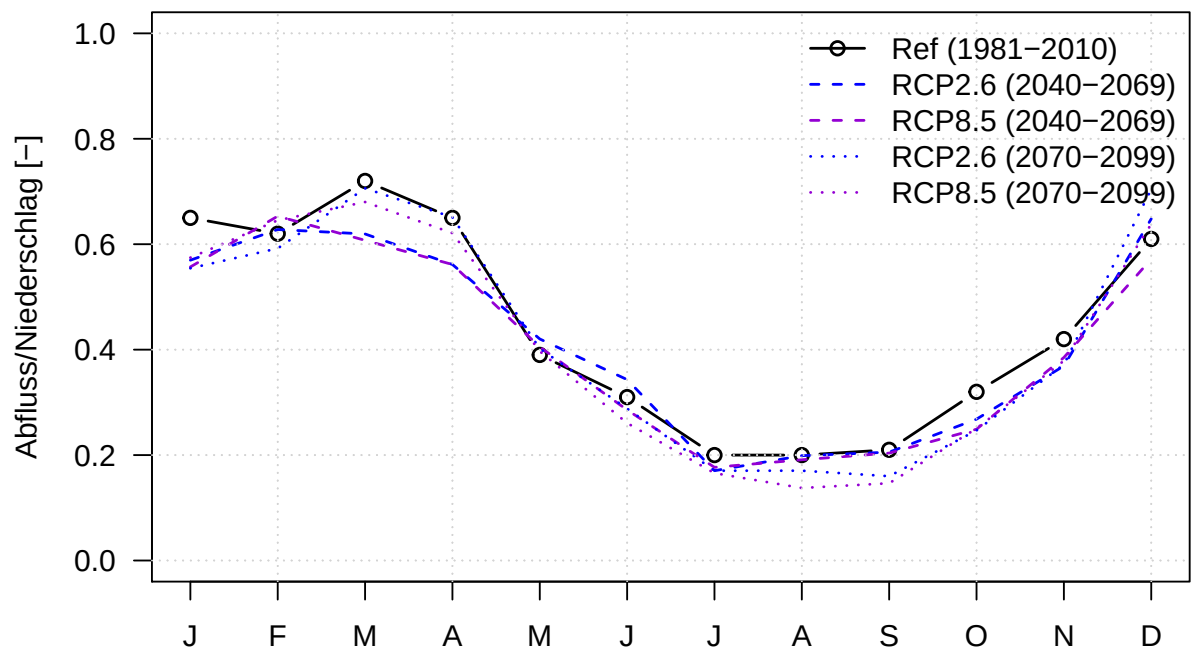


Fig. 4.5: Abflussbeiwerte des Einzugsgebiets Ergolz, Liestal für die Referenzperiode 1981–2010 sowie die betrachteten Zukunftsperioden mit den Emissionsszenarien RCP 2.6 und 8.5.

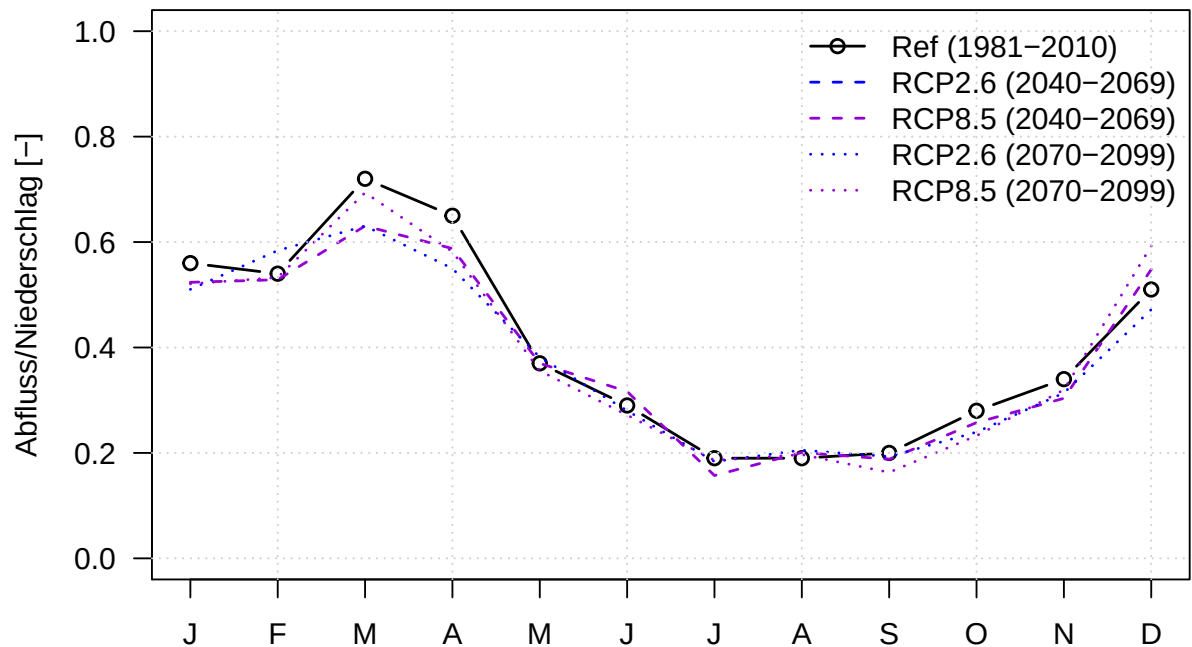


Fig. 4.6: Abflussbeiwerte des Einzugsgebiets Dünneren, Olten für die Referenzperiode 1981–2010 sowie die betrachteten Zukunftsperioden mit den Emissionsszenarien RCP 2.6 und 8.5.

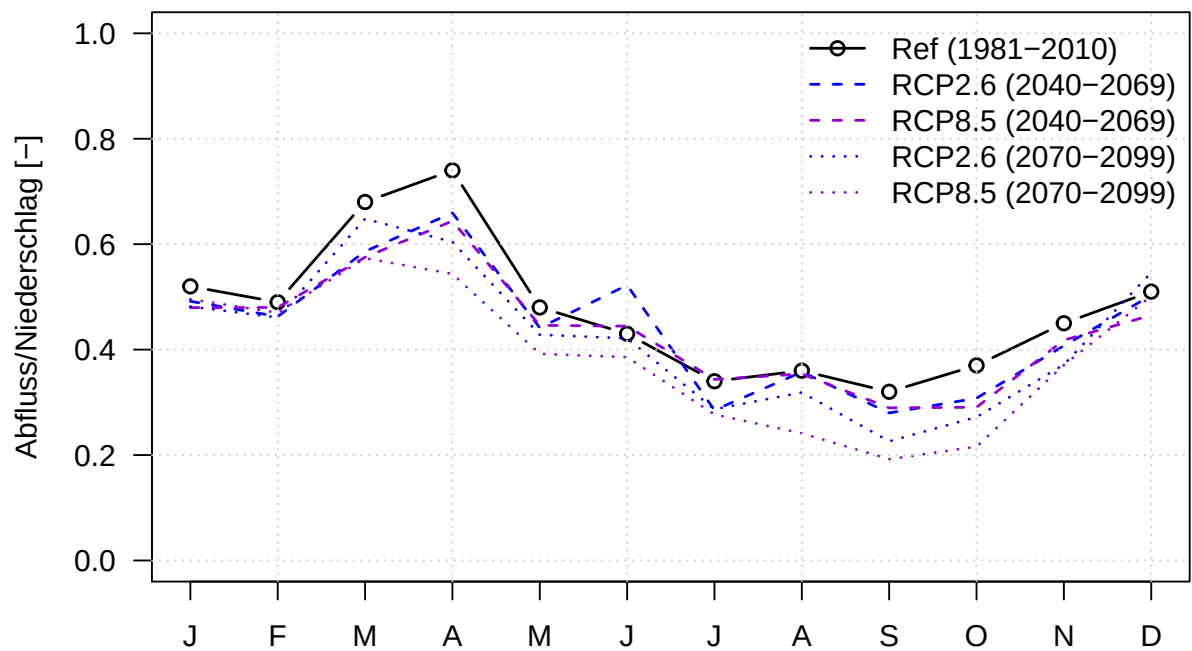


Fig. 4.7: Abflussbeiwerte des Einzugsgebiets Emme, Wiler für die Referenzperiode 1981–2010 sowie die betrachteten Zukunftsperioden mit den Emissionsszenarien RCP 2.6 und 8.5.

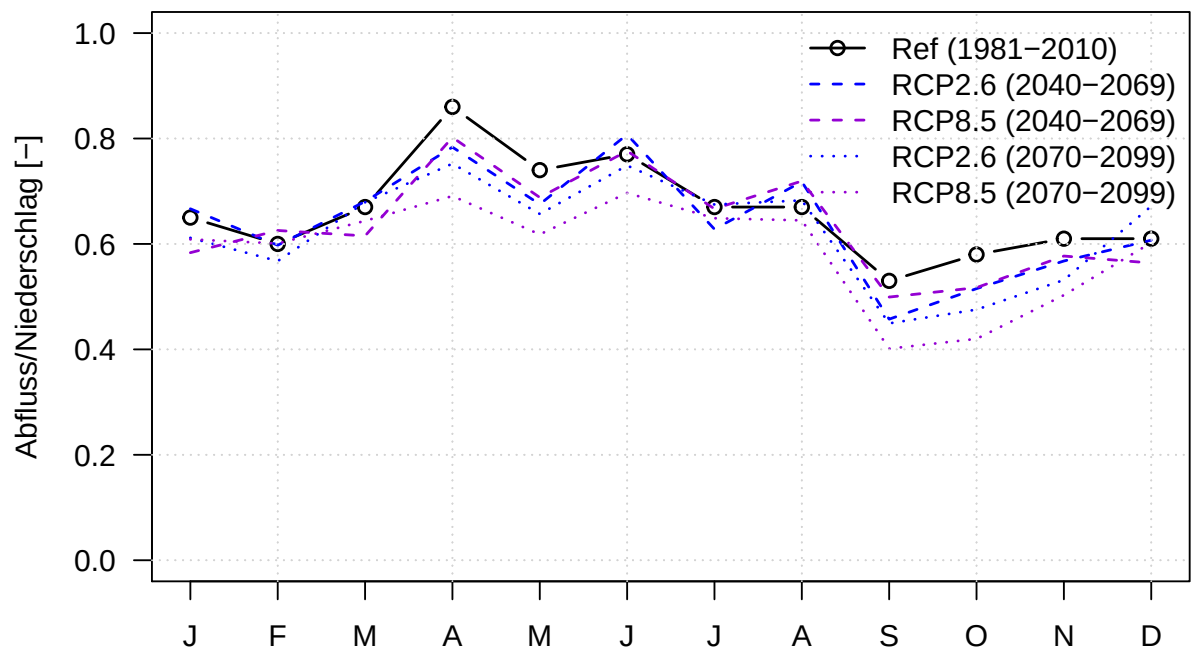


Fig. 4.8: Abflussbeiwerte des Einzugsgebiets Aare, Murgenthal für die Referenzperiode 1981–2010 sowie die betrachteten Zukunftsperioden mit den Emissionsszenarien RCP 2.6 und 8.5.

4.3 Beurteilung der Trockenheitsanfälligkeit

4.3.1 Hydrologische Trockenheitsanfälligkeit

Zur Beurteilung, in welchem Ausmass ein Fliessgewässer trockenfallen kann, bestehen zwei sich ergänzende Möglichkeiten:

1. Simulation des Abflussverhaltens in niederschlagsarmen Perioden mittels eines hydrologischen Modells, im vorliegenden Fall mittels des Modells MoSO. Dieser Ansatz führt zu quantitativen Angaben zum Beispiel in Bezug auf das nutzbare Wasser
2. Eine Beurteilung der Trockenheitsanfälligkeit der Bezirke. Dieser Ansatz führt zu halbquantitativen Angaben, erlaubt einen direkten Vergleich zwischen den Bezirken und ergänzt die modellbezogene Beurteilung.

Wir konzentrieren uns hier auf den zweiten Aspekt. «Trockenheitsanfälligkeit» wird definiert als die Anfälligkeit eines Gewässerabschnitts trockenzufallen. Sie ergibt sich aus dem Zusammenspiel von hydrologischer Trockenheit und meteorologischer Trockenheit.

Die hydrologische Trockenheitsanfälligkeit beruht auf einer Beurteilung der unveränderlichen, also invarianten Eigenschaften sowie der anthropogenen Beeinflussung in einem Einzugsgebiet. Meteorologische Ursachen bleiben demnach unberücksichtigt. Es wird also beurteilt, wie sensitiv ein Einzugsgebiet auf Trockenperioden reagiert, ohne aber eine Aussage zu machen, wie wahrscheinlich es ist, dass Trockenperioden eintreten oder eintreten werden.

Weingartner und Schwanbeck³⁶ haben diese hydrologische Trockenheitsanfälligkeit für rund 2000 Gewässerabschnitte in Voralpen, Mittelland und Jura räumlich detailliert untersucht (vgl. Fig. 2.5). Ihre Beurteilung der Trockenheitsanfälligkeit beruht auf einem Parameter c , welcher die Dimension Tage besitzt. Er gibt die Zeit an, die benötigt wird, bis der Abfluss bei einer Trockenwettersituation auf ca. einen Drittel des Startwertes zurückgeht. Je kleiner also der Parameter c ist, umso grösser ist die Trockenheitsanfälligkeit. Für jeden Bezirk wird ein charakteristischer c -Wert auf der Basis jenes Einzugsgebietes oder jener Einzugsgebiete bestimmt, welche die grössten Gebietsflächen besitzen. Über diesen charakteristischen Wert lässt sich dann die hydrologische Trockenheitsanfälligkeit der Bezirke bewerten und vergleichen.

4.3.2 Meteorologische Trockenheitsanfälligkeit

Meteorologische Trockenheit entsteht, wenn über einen längeren Zeitraum unterdurchschnittlich wenig Niederschlag fällt. Die Bewertung dieser Trockenheit führt zur meteorologischen Trockenheitsanfälligkeit. Dazu muss ein Niederschlagschwellenwert eingeführt werden, der die unterdurchschnittliche Niederschlagsmenge definiert. Zur Herleitung dieses Schwellenwerts können wir uns von historischen Ereignissen leiten lassen. In Tabelle 4.1 sind die Sommerniederschläge der Dünern und Ergolz in den beiden Trockenjahren 2003 und 2015 zusammengestellt.

³⁶Weingartner, R., Schwanbeck, J. (2021): Trockenheit und Fliessgewässer – wie anfällig sind sie? zur Situation in den Voralpen, im Mittelland und im Jura. Aqua & Gas 4/2021.

Es zeigt sich, dass die kritischen Niederschlagswerte im Bereich von 200 mm liegen. Zur Beurteilung und zum Vergleich der meteorologischen Trockenheit der Bezirke wird deshalb in den unterschiedlichen Betrachtungsperioden und für beide Klimaszenarien die Anzahl der Jahre berechnet, deren Sommerniederschläge unter dieser Schwelle liegen.

Tab. 4.1: Sommerniederschläge (JJA) [mm] in den Trockenjahren 2003 und 2015 in den Einzugsgebieten der Dünnern und der Ergolz (Daten: Hydrologischer Atlas der Schweiz)

Jahr	Dünnern, Olten	Ergolz, Liestal
2003	203	175
2015	213	200

4.4 Methoden zur Datenauswertung

Die Zeitreihen der monatlichen Abflussmittelwerte bilden die Grundlage für spezifische Analysen zur Beurteilung der zukünftigen Veränderungen der hydrologischen Verhältnisse und des nutzbaren Wassers. Das jeweils zur Beurteilung gewählte Vorgehen wird im Resultateteil (Kapitel 5) beschrieben. Das schien uns aus Sicht der Verständlichkeit zielführend zu sein.

5 Resultate und Diskussion

5.1 Veränderungen des Wasserbedarfs

Der Wasserbedarf der unterschiedlichen Nutzer und die zu erwartenden zukünftigen Veränderungen wurden in Kapitel 2.4 ausführlich diskutiert. Das Wasserdargebot wird in der vorliegenden Studie auf der Grundlage des Abflusses ermittelt. Aus diesem Grund liegt für den Vergleich zwischen Wasserdargebot und Wasserbedarf der Fokus auf dem Bedarf der Landwirtschaft sowie jener der Ökologie und Unterlieger, weil dieser direkt von Abflussveränderungen betroffen ist. Eine umfassende Zusammenstellung des Wasserbedarfs der Landwirtschaft zeigt Tabelle 2.7; eine Beschreibung und Quantifizierung des Wasserbedarfs von Ökologie und Unterlieger findet sich in Kap. 2.4.2.

Aus quantitativer Sicht bedeutende Wassernutzer sind die Haushalte, Industrie und Gewerbe (vgl. Kap. 2.4.1). Sie decken ihren Wasserbedarf aber ausschliesslich aus Grundwasser, so dass ein direkter Vergleich zwischen dem hier über den Abfluss ermittelten Wasserdargebot und diesem aus dem Grundwasser entnommenen Wasserbedarf nicht aussagekräftig ist (vgl. Fig. 1.2).

5.2 Veränderungen der Niederschläge

Im Zug des Klimawandels werden sich die saisonalen Niederschläge im Kanton Solothurn in Abhängigkeit des Emissionsszenarios teilweise stark verändern (vgl. Kap. 3.2), wie Figur 5.1 belegt, welche die Modellniederschläge abbildet.

In dieser Figur ist auch das mittlere Emissionsszenario RCP 4.5, also ein Szenario, bei dem teilweise Klimaschutzmassnahmen ergriffen werden, aufgeführt. Dieses Szenario liegt, was die Veränderungen und Auswirkungen betrifft, zwischen den beiden Szenarien mit Klimaschutz (RCP 2.6) und ohne Klimaschutz (RCP 8.5). Wir haben in der vorliegenden Analyse vor allem aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Darstellung dieses mittleren Szenarios verzichtet. Mit den Ergebnissen, welche aus den beiden Szenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 abgeleitet werden, wird aber die ganze Spannbreite möglicher Veränderungen sehr gut erfasst.

Die farbigen Boxen der Boxplots zeigen den Bereich, in dem sich 50 % der mittleren saisonalen Niederschläge befinden. Sie streuen um den mit einem Querstrich markierten Medianwert³⁷. Die saisonalen Niederschläge sind als Punkte im Diagramm eingetragen. Durch die sog. Antennen wird der Bereich gekennzeichnet, in welchem die meisten ausserhalb der Box liegenden Werte auftreten. Selten auftretende Extremwerte befinden sich ober- oder unterhalb der Antennen und sind als einzelne Punkte eingetragen.

³⁷50 % der Werte liegen oberhalb und 50 % der Werte unterhalb des Medianwertes. Er ist mit dem Mittelwert einer Verteilung vergleichbar, reagiert aber weniger stark auf extrem hohe oder tiefe Werte)

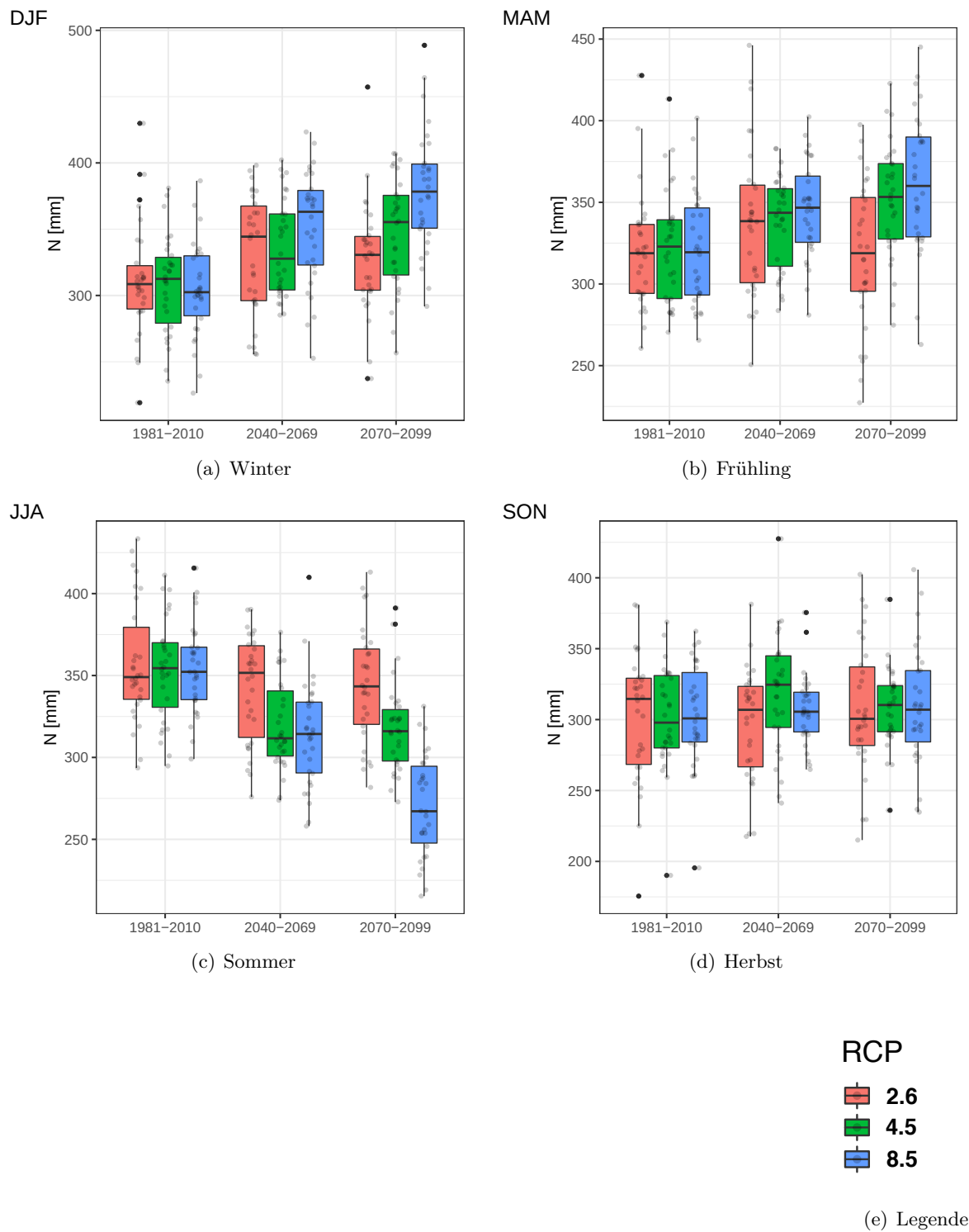


Fig. 5.1: Niederschlagsveränderungen im Bezirk Thal bei drei Klimaszenarien mit (RCP 2.6), mit teilweisem (RCP 4.5) und ohne Klimaschutz (RCP 8.5)

Aus der Figur lassen sich wichtige Grundzüge der zukünftigen Niederschlagsveränderungen, aber auch bezüglich der «Eigenschaften» der Modellniederschläge ableiten:

- Generell sind die Unterschiede der Niederschläge zwischen den Szenarien um die Jahrhundertmitte weniger gross als gegen Ende des Jahrhunderts, wo sich das Szenario ohne Klimaschutz vor allem im Winter und Sommer markant von den anderen Szenarien abhebt.
- Im Winter zeichnet sich eine generelle Erhöhung des saisonalen Niederschlags ab.
- Diese Erhöhung ist auch im Frühling erkennbar. Bemerkenswert ist die Abnahme des medianen Niederschlags gegen Ende des Jahrhunderts.
- Im Sommer fällt auf, dass beim Szenario mit Klimaschutz eher geringfügige Veränderungen zu erwarten sind, während die Niederschlagsabnahme bei den anderen Szenarien deutlich erkennbar ist. So nimmt der mediane Niederschlag beim Szenario ohne Klimaschutz von aktuell rund 360 mm auf rund 270 mm gegen Ende des Jahrhunderts ab, also um 25 %.
- Die kleinsten Niederschlagsveränderungen sind im Herbst zu erwarten.
- Die jährlichen Niederschläge – in der Figur nicht dargestellt – werden sich hingegen kaum verändern.
- Es mag auf den ersten Blick erstaunen, dass sich die Verteilungen der Monatsniederschläge sich auch für die aktuelle Periode 1981–2010 leicht unterscheiden. Dies hängt damit zusammen, dass jedes Emissionsszenario eine unabhängige Modellkette bildet.

Die Tabelle 5.1 erweitert die im Bezirk Thal gewonnenen Informationen auf alle Bezirke des Kantons.

Beim Szenario mit Klimaschutz ergeben sich gemäss den Modellrechnungen nur geringfügige Niederschlagsveränderungen. Keine dieser Veränderungen sind statistisch signifikant, d.h., sie unterscheiden sich in ihrer Gesamtheit nicht oder nicht eindeutig von der heutigen Situation.

Ganz andere Niederschlagsverhältnisse sind unter einem Szenario ohne Klimaschutz zu erwarten. Ausser im Herbst und in Einzelfällen beim Jahresniederschlag sind alle Veränderungen hier statistisch signifikant. Die Unterschiede zwischen den Bezirken sind sehr klein.

Die Jahresniederschlagshöhe wird sich nur unwesentlich verändern, nämlich um weniger als 5 % zunehmen. Dies im Gegensatz zu den deutlichen Veränderungen im Winter, Frühling und Sommer. Den Zunahmen im Winter und Frühling stehen Abnahmen im Sommer gegenüber. Diese gegenläufigen Veränderungen «neutralisieren» sich mehr oder weniger, weshalb letztlich beim Jahresniederschlag nur ein geringfügige Zunahme zu verzeichnen ist.

Tab. 5.1: Veränderungen [%] der jährlichen und saisonalen Niederschläge in den Bezirken im Vergleich zur Periode 1981–2010 für zwei Emissionsszenarien und zwei Zeitperioden (um 2060: 2040–2069, um 2085: 2070–2099). Bu: Bucheggberg, Wa: Wasseramt, Le: Lebern, Gu: Gäu, Ol: Olten, Gs: Gösgen, Ta: Thal, Th: Thierstein, Do: Dorneck. In Fettschrift sind die statistisch signifikanten Veränderungen hervorgehoben.

		Mit Klimaschutz (RCP 2.6)									Ohne Klimaschutz (RCP 8.5)								
		Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
Jahr	um 2060	1.5	1.2	3	2.4	2.6	2.3	2.8	3.1	2.9	2.3	2	2.5	3.2	4.2	4.4	3	2.5	3
	um 2085	0.8	0.2	1.5	0.2	0.9	0.8	1	1.2	1.1	3.6	3.3	3.9	3.8	4.4	4.4	3.8	2.9	3.5
		Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
DJF	um 2060	9.8	11	12	10	9.1	8	12	11	13	19	19	18	20	19	21	20	21	23
	um 2085	4.1	4.6	6.7	5.8	7.3	6.3	7.1	8.6	9.5	23	21	22	26	26	28	25	26	29
		Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
MAM	um 2060	5.8	6.1	7.1	4.3	0.7	1	6.2	3.3	3.1	9.2	8.7	9.4	10	12	12	8.5	8.1	8.7
	um 2085	-1.4	-0.9	-0.4	-0.6	-0.5	0.1	0.0	0.0	-0.4	14	14	13	14	16	18	13	12	14
		Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
JJA	um 2060	-2.5	-3.1	-2.3	3.0	0.1	-0.7	0.7	2.5	4.2	-13	-12	-11	-11	-8.7	-10	-11	-12	-10
	um 2085	-4.3	-4.8	-1.5	-1.2	-0.2	-1.4	-1.6	0.7	1.4	-24	-21	-25	-22	-22	-22	-24	-22	-21
		Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
SON	um 2060	-1.7	-2.2	-2.5	-2.7	-3.3	-3.5	-2.4	-1.1	-2.0	-0.2	-0.2	0.9	1.2	2.4	2.1	1.6	2.6	1.9
	um 2085	-3.4	-4.0	-3.9	-4.8	-2.7	-3.2	-4.5	-3.1	-3.1	-0.8	-1.0	1.1	3.0	3.4	4.1	2.0	1.7	2.0

Abweichung von Referenzperiode

-20 -10 +10 +20 [%]

Markant sind die Niederschlagszunahmen im Winter mit bis rund 25 % zur Jahrhundertmitte und mit bis zu 30 % zum Ende des Jahrhunderts. Verhältnismässig klein fallen die Zunahmen im Frühling aus, wiederum mit einer Verstärkung gegen Ende des Jahrhunderts.

Auch im Sommer sind Unterschiede zwischen den beiden Betrachtungsperioden sichtbar. Bis Mitte des Jahrhunderts ergeben die Modellierungen Abnahmen im Bereich von -10 %, Ende des Jahrhunderts liegen diese Abnahmen zwischen -20 und -25 % gegenüber heute.

5.3 Beurteilung der Trockenheitsanfälligkeit und deren Veränderung

Die Figur 5.2 zeigt den den Kanton Solothurn betreffenden Ausschnitt der Karte der hydrologischen Trockenheitsanfälligkeit aus Figur 2.5. Darauf basierend wurde für jeden Bezirk die charakteristische hydrologische und meteorologischen Trockenheitsanfälligkeit bestimmt (vgl. Kap. 4.3), deren Kombination zur gesamten Trockenheitsanfälligkeit führt. Die Tabelle 5.2 zeigt die Resultate für die einzelnen Bezirke.

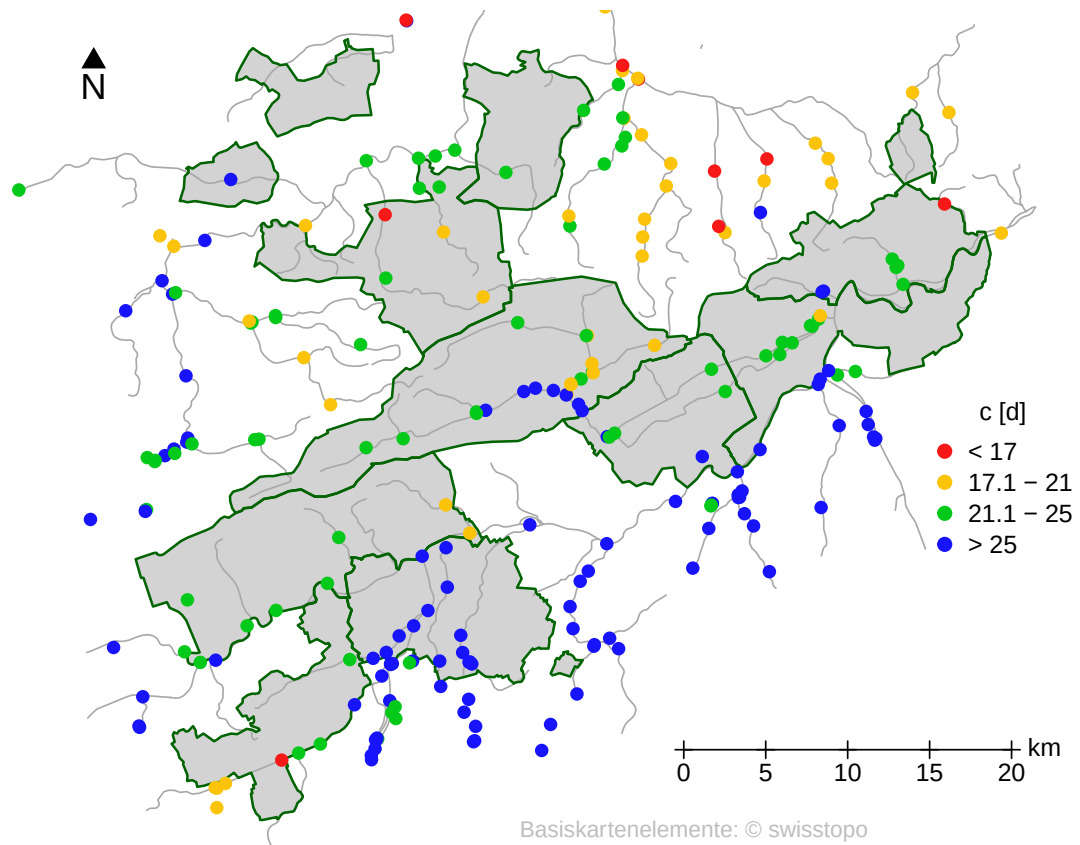


Fig. 5.2: Hydrologische Trockenheitsanfälligkeit der Fliessgewässer im Kanton Solothurn. Ausschnitt aus der Karte in Figur 2.5. Je kleiner der c -Wert ist, desto höher ist die hydrologische Trockenheitsanfälligkeit (nach Weingartner und Schwanbeck (2021))

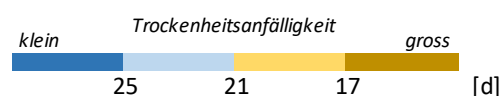
Zur Bewertung wurde ein Punktesystem aufgebaut. Jeder Farbklasse in der Tabelle wird ein Punktwert zugeordnet. Je kleiner die Trockenheitsanfälligkeit, um so geringer der Punktwert, z.B. 1 für die Klasse < 25 % bei der hydrologischen Trockenheitsanfälligkeit oder 4 für die Klasse > 25 % bei der meteorologischen Trockenheitsanfälligkeit. Zur Gesamtbeurteilung werden diese Punkte pro Bezirk addiert, wobei die meteorologische Trockenheitsanfälligkeit, welche für die Ausprägung einer Trockenheit weit wichtiger ist als die hydrologische, mit dem Faktor 3 gewichtet wurde. Somit bewegen sich die Werte im Bereich 4 bis 16. Diese wurden wiederum klassiert, und es resultieren vier Klassen: sehr kleine, kleine, grosse und sehr grosse Trockenheitsanfälligkeit.

Aus der Sicht der hydrologischen Trockenheit sind Fliessgewässer in den Bezirken Bucheggberg, Wasseramt und Thal am wenigsten trockenheitsanfällig. Hier scheinen die grossen Speicher eine entscheidende Rolle zu spielen. Die grösste hydrologische Trockenheitsanfälligkeit wird für den Bezirk Dorneck ausgewiesen. Beim Ausbleiben von Niederschlag würde es hier im Mittel nur rund zwei Wochen (16 Tage) dauern, bis der Abfluss einen Drittel seines Ausgangswertes erreicht. Im Gegensatz dazu verläuft die Abflussnahme im Bezirk Wasseramt weit weniger schnell.

Tab. 5.2: Beurteilung der hydrologischen und meteorologischen Trockenheitsanfälligkeit und deren Zusammenführen zur Gesamtbeurteilung der Bezirke

Indikator für hydrologische Trockenheitsanfälligkeit (c-Wert)

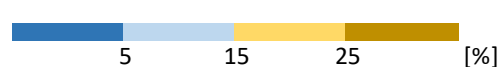
	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
heute	27	36	21	23	19	25	30	21	16

**Indikator für meteorologische Trockenheitsanfälligkeit**

	Mit Klimaschutz (RCP 2.6)								
	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
heute	8	6	2	5	6	6	1	4	7
um 2060	12	10	4	6	8	8	4	5	8
um 2085	15	11	6	8	9	8	4	8	9

	Ohne Klimaschutz (RCP 8.5)								
	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
heute	10	8	3	6	7	6	3	4	7
um 2060	21	18	10	13	15	13	7	12	15
um 2085	37	30	22	25	27	24	18	24	28

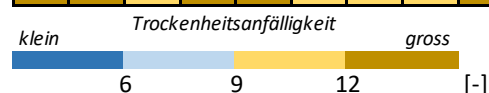
Anteil der Jahre mit Niederschlagssumme kleiner als 200mm/JJA (Summe der Monate Juni, Juli und August)

**Gesamtbeurteilung**

	Mit Klimaschutz (RCP 2.6)								
	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
heute	7	7	6	8	9	8	4	6	10
um 2060	7	7	6	8	9	8	4	9	10
um 2085	7	7	9	8	9	8	4	9	10

	Ohne Klimaschutz (RCP 8.5)								
	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
heute	7	7	6	8	9	8	4	6	10
um 2060	10	10	9	8	9	8	7	9	10
um 2085	13	13	12	14	15	11	10	12	16

Kombinierte hydro-meteorologische Trockenheitsanfälligkeit



Erst nach rund fünf Wochen (36 Tagen) würde der Abfluss hier ein Drittel des Ausgangswertes erreichen.

Bei der meteorologischen Trockenheitsanfälligkeit sind wiederum grosse Unterschiede zwischen den beiden Klimaszenarien vorhanden. Beim Szenario ohne Klimaschutz akzentuieren sich die räumlichen und zeitlichen Unterschiede. Gegen Ende des Jahrhunderts wird sie sich im Allgemeinen verstärken. Besonders betroffen sind die Bezirke Bucheggberg, Wasseramt, Gäu, Olten sowie Dorneck.

In der Gesamtbewertung der Trockenheitsanfälligkeit sind aus der Sicht des Kantons Solothurn zwei Gruppen erkennbar³⁸: Die erste Gruppe mit einer vergleichsweise hohen Anfälligkeit umfasst die Bezirke Dorneck, Olten, Gäu, Wasseramt und Bucheggberg; die zweite die restlichen Bezirke.

5.4 Veränderungen der monatlichen Abflüsse

5.4.1 Fallbeispiel

Aus den Ergebnissen der hydrologischen Modellierungen lassen sich für jeden Bezirk die zukünftigen Veränderungen der Monatsabflüsse ableiten. Bevor auf diese Ergebnisse eingetreten wird,

³⁸gegliedert nach der Gesamtpunktzahl beim Szenario ohne Klimaschutz

werden hier nun am Beispiel des Bezirks Gäu die Resultate der Simulationen exemplarisch für das Emissionsszenario 8.5 vorgestellt (Fig. 5.3).

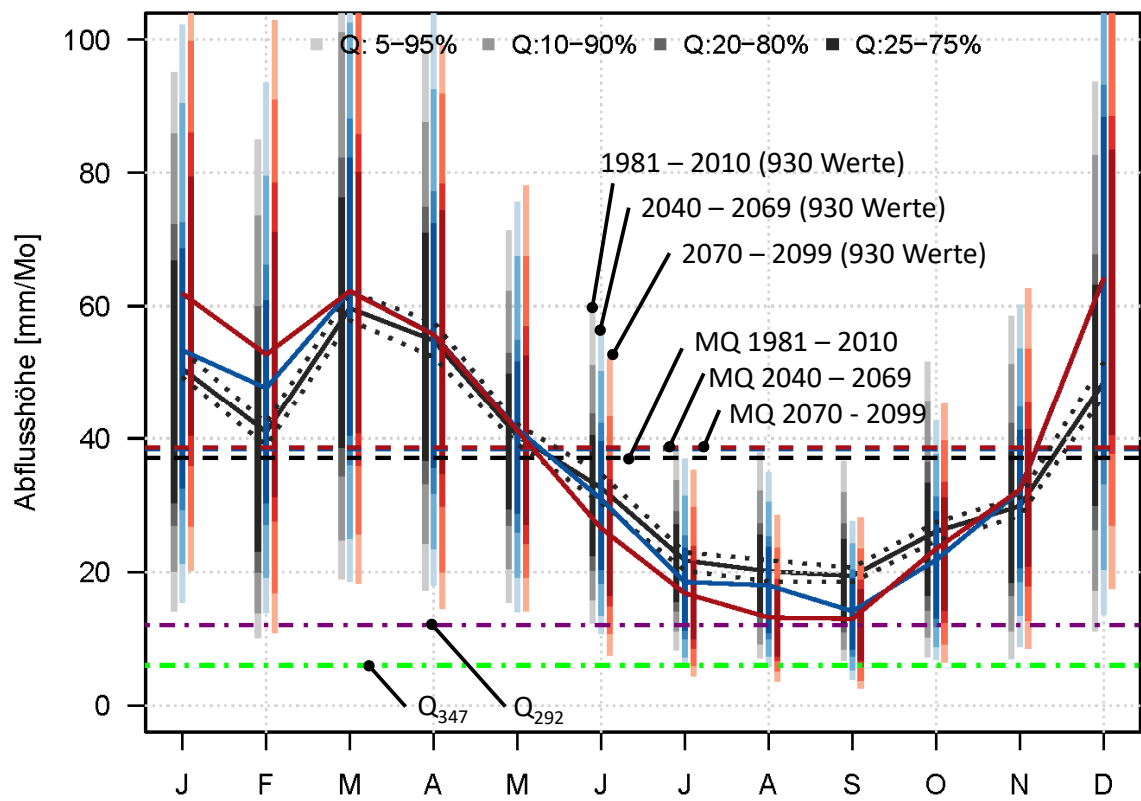


Fig. 5.3: Zukünftige Veränderungen der Monatsabflüsse im Bezirk Gäu unter der Annahme eines Szenarios ohne Klimaschutz (RCP 8.5). Schwarz: 1981–2010, Blau: 2040–2069, Rot: 2070–2099. Gestrichelt: Interquartilsabstand der Mediane der heutigen Periode

Die dargestellten Abflüsse beziehen sich auf den ganzen Bezirk. Wie lassen sie sich interpretieren? Gehen wir von einem Wert von 50 mm pro Monat aus. Er besagt, dass von jedem Quadratmeter des Bezirks pro Monat 50 l abfließen, d.h., dem nächstgelegenen Fließgewässer zufließen und über dieses dann den Bezirk verlassen.

Aus der Figur 5.3 lassen sich folgende Informationen ableiten:

- Die Veränderungen der medianen Monatsabflüsse zwischen den drei Betrachtungsperioden 1981-2010, 2040-2069 und 2070-2099: Diese medialen Abflüsse sind durch Linien verbunden, deren Farbgebung sich auf die Betrachtungsperiode bezieht.
- Interquartilsabstand der Mediane der heutigen Periode: Für jede Periode stehen – je nach RCP – monatliche Abflussdaten von 12 (RCP 2.6) bzw. 31 Modellsimulationen (RCP 8.5) zur Verfügung, also z.B. beim RCP 8.5 31 Monatsmittelwerte für den Januar, für den Februar usw. Aus der Verteilung dieser Mittelwerte lässt sich der Interquartilsabstand ableiten. Bezogen auf die aktuelle Periode 1981–2010 zeigt er, in welchem Bereich sich

50 % der Mittelwerte, welche um den zentralen Mittelwert aller Simulationen streuen, befinden. Liegt der zentrale Mittelwert einer zukünftigen Periode ausserhalb dieses interquartilsabstand, ist das ein visueller Indikator, dass sich die hydrologischen Verhältnisse verändern werden (z.B. im Januar und Februar (Fig. 5.3)).

- Langjähriger mittlerer Jahresabfluss: Dabei handelt es sich um den Mittelwert aller Modellsimulationen. Der langjährige mittlere Abfluss wurde auf die Monate umgerechnet und hat die Dimension mm/Monat. Mit der Multiplikation dieses Wertes mit 12 erhält man den Jahresabfluss [mm/Jahr].
- Die Verteilung der monatlichen Abflüsse: Die vertikalen Balken, eingefärbt nach dem jeweiligen Betrachtungszeitraum, stellen die Verteilung der Monatsabflüsse dar, welche aus den 12 respektive 31 Modellsimulationen abgeleitet wurden. Sie enthalten also im vorliegenden Fall des RCP 8.5 (Fig. 5.3) 930 Werte pro Monat und Zeitperiode (31 Modelle mal 30 Betrachtungsjahre). Die unterschiedliche Farbdichte der Balken ist ein Indikator, in welchem Perzentil die Verteilung der Abflusswerte liegen. Diese Abflusswerte sind mit 12 bzw. 31 Modellen also breit abgestützt und umfassen somit ein breites Wertespektrum der in einem zukünftigen Klima bei einem gegebenen Emissionszenario möglichen Monatsabflüsse. Insbesondere erhalten sie auch – am unteren Ende des Spektrums – die Monatsabflüsse in sehr trockenen Jahren.
- Die Abflusshöhe der Parameter Q_{292} und Q_{347} . Q_{347} ist ein Indikator für den Wasserbedarf der Ökologie und Q_{292} zeigt wieviel Wasser insgesamt für Ökologie und Unterlieger benötigt wird. Diese Werte beziehen sich auf die aktuelle Periode 1981–2010 und gelten auch für die zukünftigen Perioden (Vergleiche dazu Kap. 5.1).

Wie die Figur 5.3 erkennen lässt, unterscheiden sich die mittleren Jahresabschlüsse zwischen den drei Betrachtungsperioden nur unwesentlich. Der Klimawandel führt also nicht dazu, dass sich das gesamte Wasserdargebot massgeblich verändert. Saisonal lassen sich aber deutliche Umverteilungen erkennen, insbesondere eine Zunahme im Winter und eine Abnahme im Sommer. Dies saisonalen Veränderungen verstärken sich gegen Ende des Jahrhunderts. Im Weiteren ist klar erkennbar, dass die aus ökologischer Sicht wichtige Abflussmenge Q_{347} nur im Sommer unterschritten wird und dass die Häufigkeit dieser Unterschreitung gegen Ende des Jahrhunderts zunimmt.

In Figur 5.4 können schliesslich die Veränderungen der Monatsabflüsse, welche sich bei dem Szenario mit und einem Szenario ohne Klimaschutz ergeben, verglichen werden. Dabei ist klar ersichtlich, dass die Veränderungen beim Szenario mit Klimaschutz wesentlich kleiner sind als beim Szenario ohne Klimaschutz. Auch sind die Abnahmen der sommerlichen Abflüsse beim Szenario mit Klimaschutz wesentlich kleiner als beim Szenario ohne Klimaschutz.

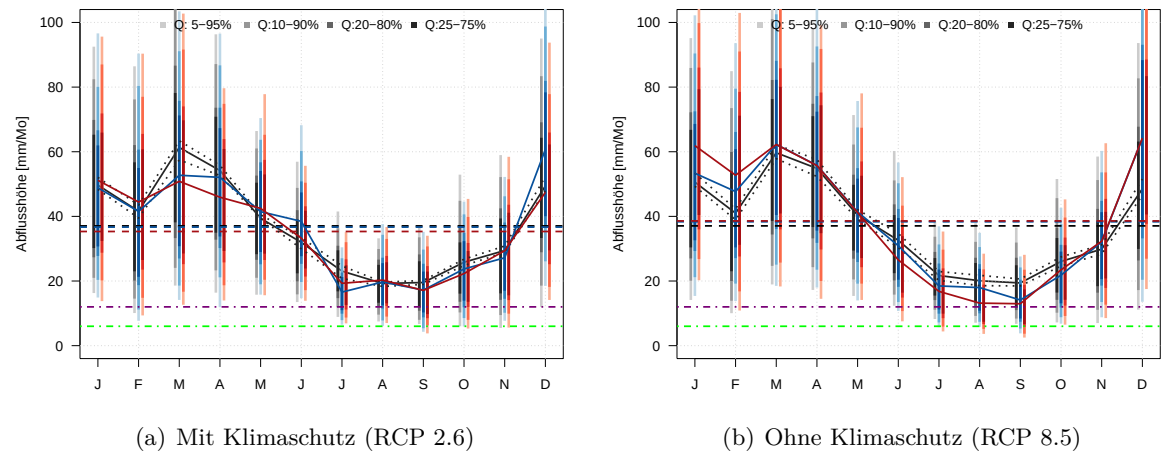


Fig. 5.4: Zukünftige Veränderungen der Monatsabflüsse im Bezirk Gäu unter einem Szenario mit (RCP 2.6) und einem ohne Klimaschutz (RCP 8.5). Schwarz: 1981–2010, Blau: 2040–2069, Rot: 2070–2099. Gestrichelt: Interquartilsabstand der Mediane der heutigen Periode. (Vollständige Legende s. Fig. 5.3)

5.4.2 Übersicht über Bezirke

In den Figuren 5.5 bis 5.13 sind die Abflussveränderungen in den einzelnen Bezirken dargestellt. Diese Grafiken bilden die Grundlage für die Kapitel 5.5.1 bis 5.5.3, in denen die hier graphisch dargestellten Abflussverhältnisse der verschiedenen Zeitperioden aus verschiedenen Blickwinkeln analysiert, verglichen und bewertet werden, um so zu einem möglichst umfassenden Bild der hydrologischen Veränderungen und deren Auswirkungen im Kanton Solothurn zu gelangen.

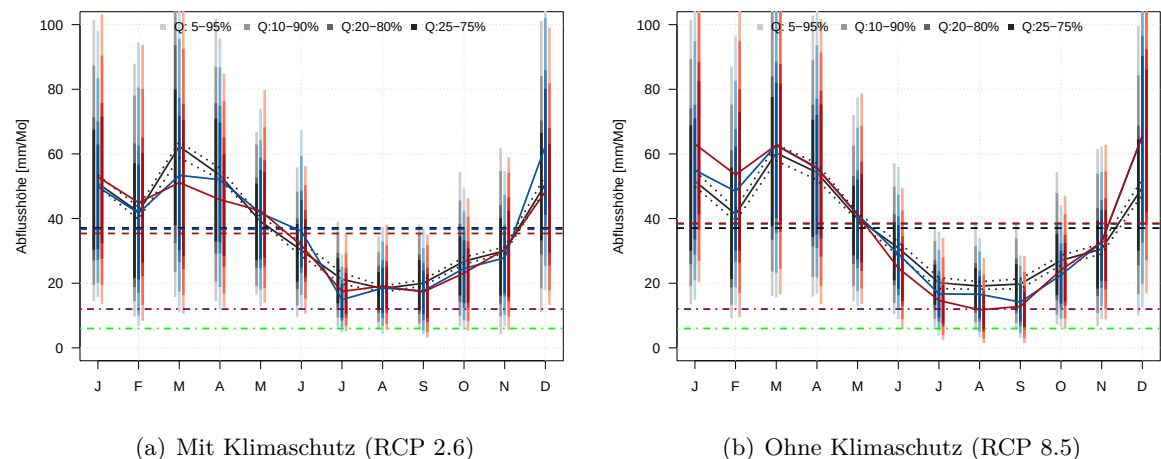


Fig. 5.5: Abflussveränderungen im Bezirk Buecheggberg. Legende s. Fig. 5.3.

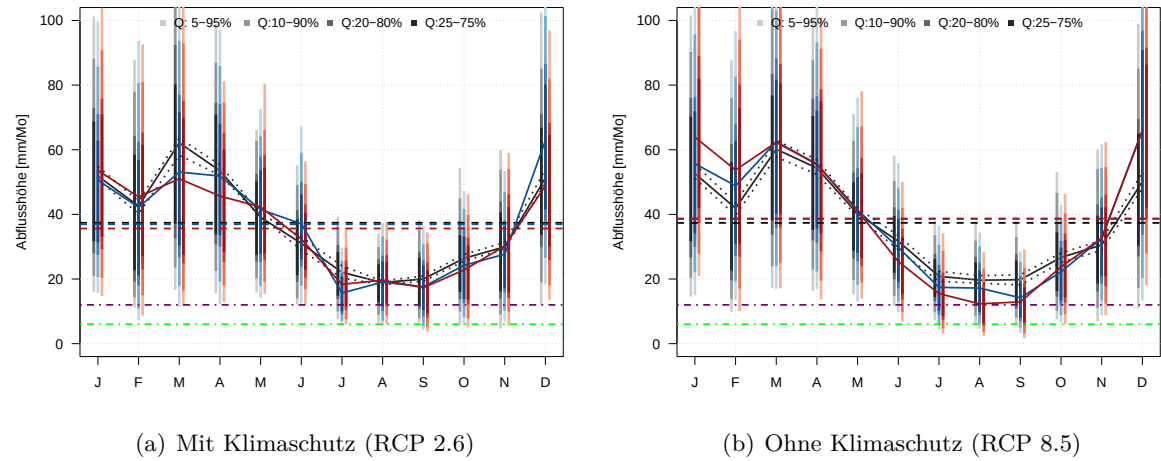


Fig. 5.6: Abflussveränderungen im Bezirk Wasseramt. Legende s. Fig. 5.3.

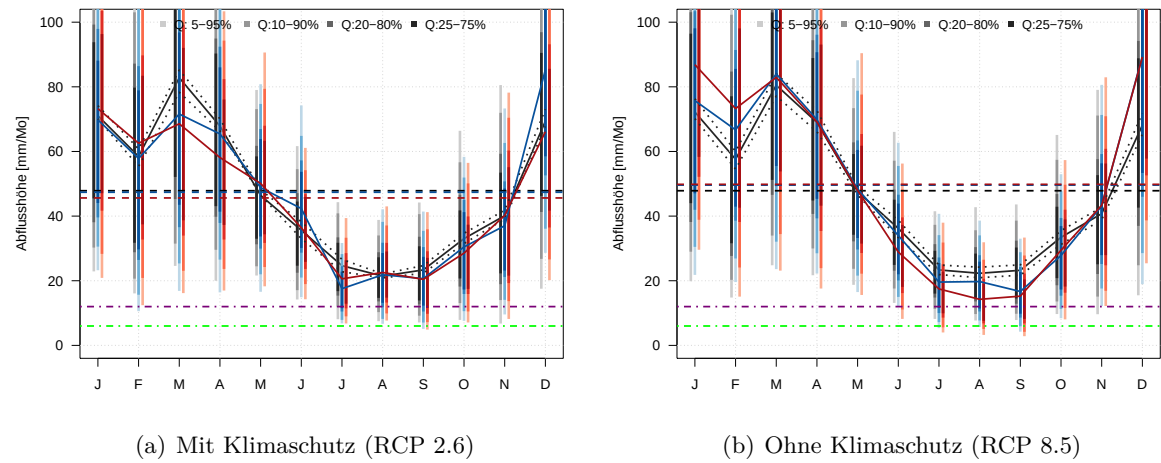


Fig. 5.7: Abflussveränderungen im Bezirk Lebern. Legende s. Fig. 5.3.

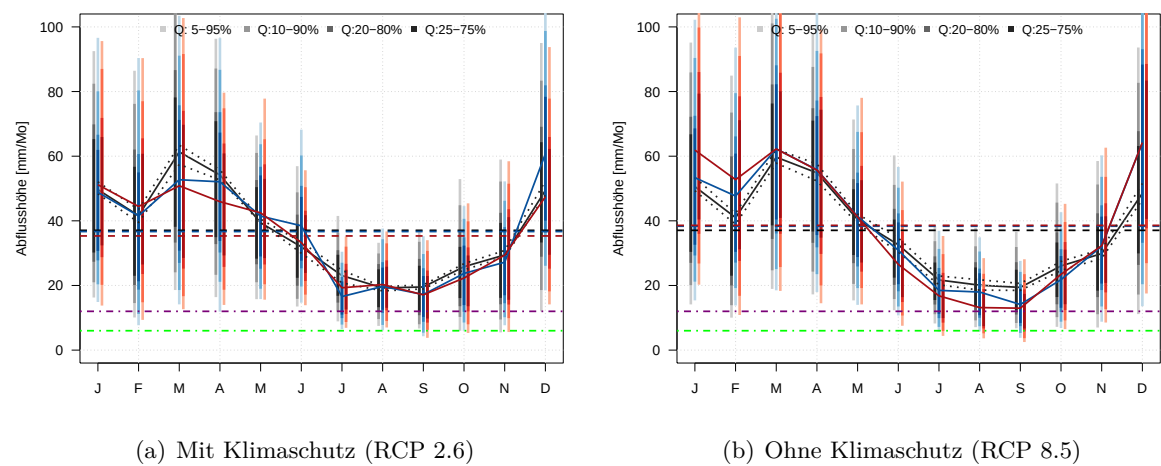


Fig. 5.8: Abflussveränderungen im Bezirk Gäu. Legende s. Fig. 5.3.

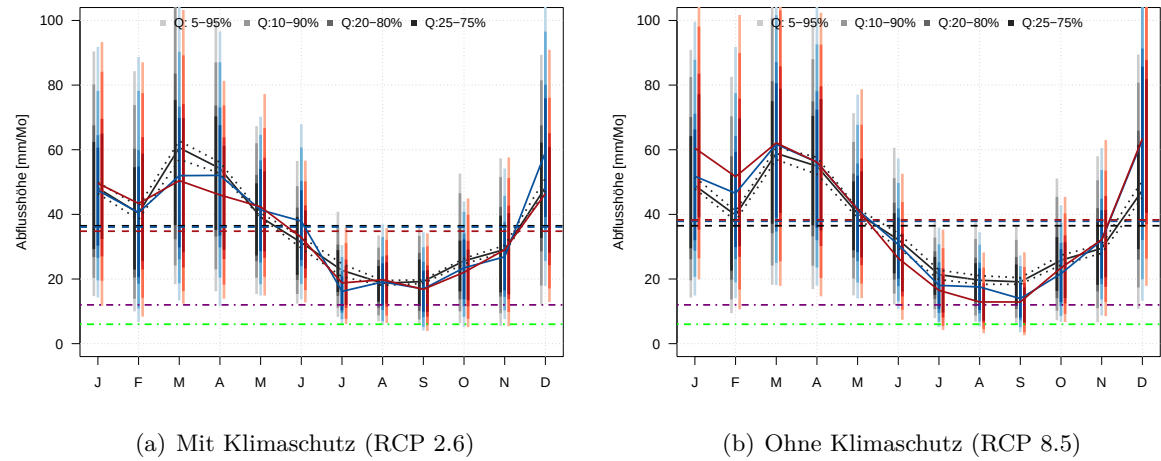


Fig. 5.9: Abflussveränderungen im Bezirk Olten. Legende s. Fig. 5.3.

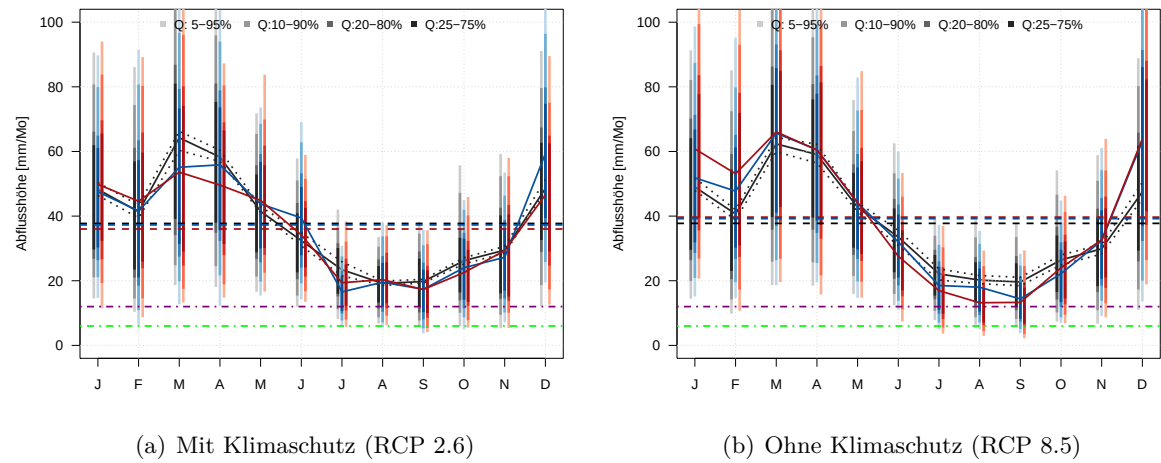


Fig. 5.10: Abflussveränderungen im Bezirk Gösgen. Legende s. Fig. 5.3.

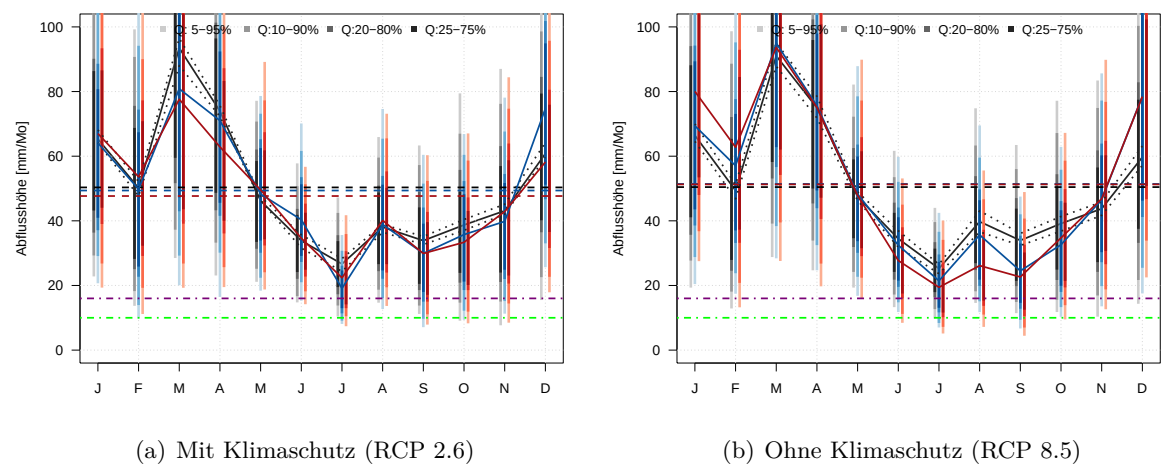


Fig. 5.11: Abflussveränderungen im Bezirk Thal. Legende s. Fig. 5.3.

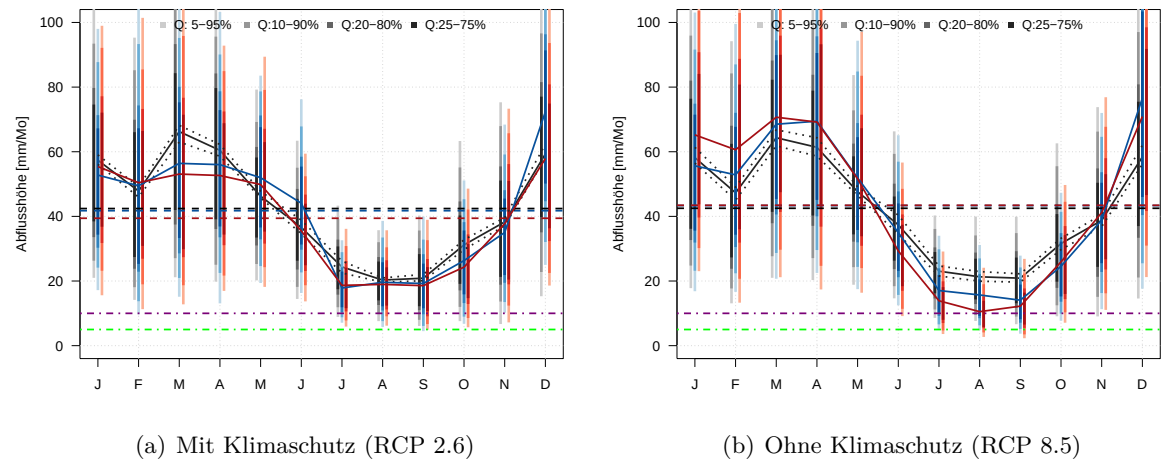


Fig. 5.12: Abflussveränderungen im Bezirk Thierstein. Legende s. Fig. 5.3.

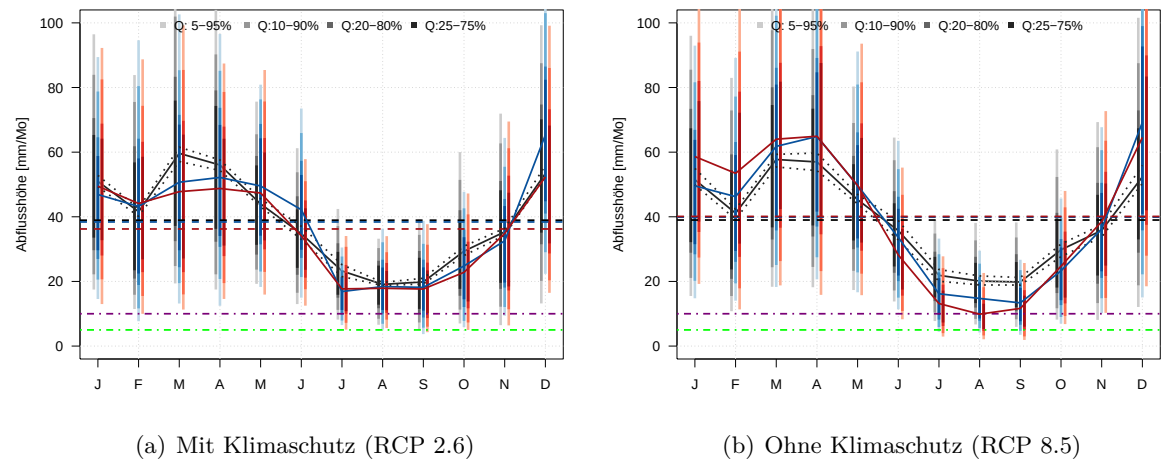


Fig. 5.13: Abflussveränderungen im Bezirk Dorneck. Legende s. Fig. 5.3.

5.4.3 Beurteilung der Güte der hydrologischen Modellierungen

Die in den Figuren 5.5 bis 5.13 dargestellten Abflussveränderungen sind das Ergebnis von Simulationen in einer sogenannten «Modellwelt». Die Niederschläge der drei Zeitperioden 1981–2010, 2040–2069 und 2070–2099 entstammen den CH2018-Szenarien. Das heisst, dass es sich bei den Niederschlägen der Perioden 1981–2010 um modellierte und nicht um aus Stationsdaten abgeleitete Gebietsniederschläge handelt. Mit der Kalibrierung des Beiwerts, also des Modellparameters des einfachen hydrologischen Modells, wird die Verbindung zwischen der Modellwelt der Niederschläge und der realen Welt der Abflüsse geschaffen, und zwar für die 30-jährige Periode 1981–2010. Dieser mittlere Beiwert wird aus den mittleren Modellniederschlägen und den mittleren Abflüssen abgeleitet.

Für Einzugsgebiete mit Abflussmessreihen, welche den Zeitraum 1981–2010 abdecken, – im vorliegenden Fall für die Dünnern, Olten, und die Ergolz, Liestal –, lässt sich nun beurteilen, wie gut sich die monatlichen und saisonalen Abflüsse mit dieser Modellkonfiguration abbilden lassen. Dabei ist zu beachten, dass es sich um keine eigentliche Modellvalidierung handelt, eine solche ist aufgrund der spezifischen Datenlage gar nicht möglich.

Gemäss der Tabelle 5.3 sind die Abweichungen zwischen den gemessenen mittleren saisonalen Abflüssen und den mit dem hier verwendeten Modell (MoSO) modellierten Abflüssen sehr klein. Sie bewegen sich im Intervall [3 %, -2 %] und sind grossmehrheitlich kleiner als die Abweichungen beim Modell HADES³⁹. Bei letzterem handelt es sich um ein weit komplexeres Modell mit elf zu kalibrierenden Modellparametern.

Die bei dieser Modellüberprüfung festgestellten Abweichungen zwischen modelliertem und realem Abfluss werden bei der Abschätzung des nutzbaren Wassers in Kap. 5.5.3 verwendet, um dort auf die Unsicherheit dieser Abschätzungen hinzuweisen.

Tab. 5.3: Beurteilung der Güte der Modellkalibrierung in den beiden für diese Studie sehr wichtigen Einzugsgebieten. HADES: Modellierungen von Mülchi und Kollegen. MoSO: In dieser Untersuchung verwendetes hydrologisches Modell.

Ergolz, Liestal	Abweichung	DJF	MAM	JJA	SON	ANN
	HADES zu Messung [%]	7	-2	9	10	5
	MoSO zu Messung [%]	3	2	1	-2	1
Dünnern, Olten	Abweichung	DJF	MAM	JJA	SON	ANN
	HADES zu Messung [%]	5	-7	-3	13	1
	MoSO zu Messung [%]	3	3	-1	-2	2

Wie bereits erwähnt, ist diese Güteabschätzung nicht abschliessend und insbesondere keine eigentliche Modellvalidierung. Immerhin zeigt sie, dass die «Modellwelt» die heutige reale Welt zufriedenstellend abzubilden vermag. Diese Aussage wird durch das Beispiel der Emme in Fig. 5.14 bestätigt. Insbesondere die kleinsten Monatsabflüsse bei den für diese Untersuchung wichtigen Sommermonaten werden gut modelliert. Grössere Abweichungen sind zwischen Dezember und März erkennbar. Das hängt vor allem damit zusammen, dass das Modell MoSO den Schnee nicht direkt berücksichtigt. Auch die grössten sommerlichen Abflüsse werden vom Modell nicht gut erfasst. Diese sehr grossen Monatsabflüsse werden vermutlich durch kürzere, also wenige Stunden dauernde Regenereignisse, wie sie für das Emmental typisch sind, verursacht, die aber in der monatlichen Auflösung der Modellniederschläge nicht entsprechend abgebildet sind.

³⁹Mülchi, R. et al. (2021): Mittlere Abflüsse mesoskaliger Einzugsgebiete. In Hydro-CH2018: Szenarien bis 2100. Hydrologischer Atlas der Schweiz. <https://hydromapscc.ch>, Aufruf am 2.04.2021.

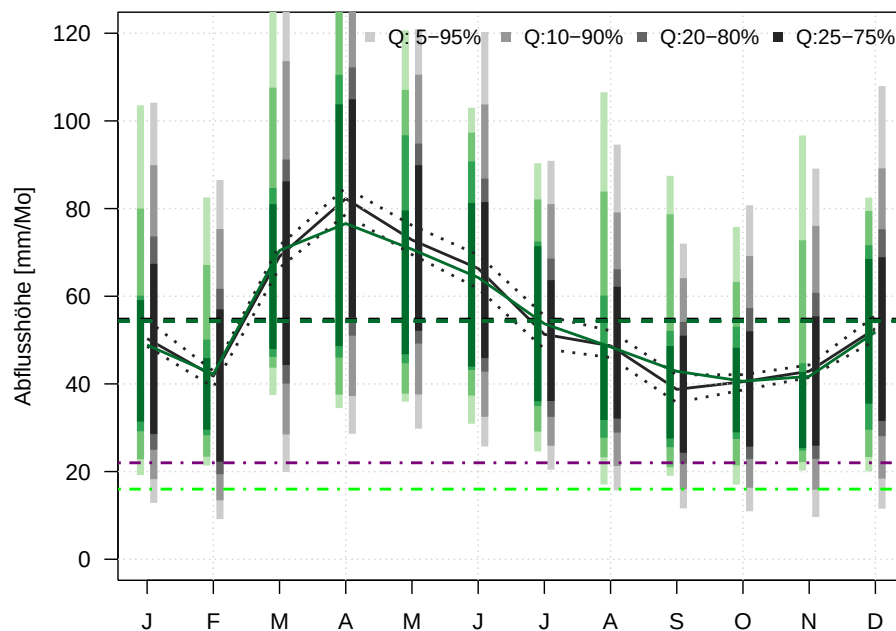


Fig. 5.14: Vergleich der beobachteten (grün) und mit MoSO modellierten (schwarz) Monatsabflüsse der Periode 1981–2010 bei der Emme, Wiler (Fläche: 924 km²)

Eine weitere Möglichkeit zur Beurteilung des hier verwendeten Modells MoSO zeigt die Tabelle 5.4, wo die mit MoSO simulierten Abflüssen mit jenen des Modell HADES verglichen werden. Dabei handelt es sich allerdings nur um einen Vergleich von Resultaten zweier Modell, welche auf einem nahezu gleichen Niederschlagsinput, aber unterschiedlichen hydrologischen Modellen beruhen. Dabei zeigt es sich, dass die Abweichungen zwischen den beiden Modellen auf Jahresbasis sowie im Winter und Sommer eher klein, im Frühling und besonders im Herbst aber etwas grösser sind. Damit werden genau jene Jahreszeiten, in denen sich offenbar die grössten zukünftigen Abflussveränderungen ergeben werden, von beiden Modell etwa gleich gut erfasst. Etwas salopp könnte man sagen, dass eine zweite Meinung (Modell HADES) zu einem ähnlichen Ergebnis führt wie das einfache Modell MoSO.

Tab. 5.4: Prozentuale Abweichung der mit dem hier verwendeten Modell (MoSO) berechneten saisonalen Abflüssen von jenen Abflüssen, welche mit dem Modell HADES bestimmt wurden

RCP 2.6

	DJF	MAM	JJA	SON	Ann
Ergolz, Liestal					
2060	-4	4	-3	-11	-3
2085	-7	1	-4	-11	-5
Dünneren, Olten					
2060	1	10	7	-15	2
2085	-4	8	7	-14	-1

RCP 8.5

	DJF	MAM	JJA	SON	Ann
Ergolz, Liestal					
2060	-4	7	-5	-11	-1
2085	-7	6	-6	-9	-3
Dünneren, Olten					
2060	1	12	5	-15	2
2085	-1	11	3	-14	1

5.5 Beurteilung der Abflussveränderungen in den Bezirken

Die Figuren 5.5 bis 5.13 stellen die simulierten Veränderungen der Monatsabflüsse detailliert und quantitativ dar. Eine abschliessende Einordnung und Beurteilung der Abflussveränderungen und ein direkter Vergleich der Veränderungen in den Bezirken ist so aber nur bedingt möglich. Mit den nachfolgenden Beurteilungen soll diese Interpretationslücke geschlossen werden. Dazu dienen Tabellen, welche die Resultate so zusammenfassen, dass auf einen Blick räumliche (über alle Bezirke) und zeitliche (über die Betrachtungsperioden) Aspekte erfasst werden können und zusätzlich ein Vergleich zwischen den beiden Szenarien «Mit Klimaschutz» und «Ohne Klimaschutz» ermöglicht wird.

5.5.1 Hydrologie

Die grundlegendste Frage vor dem Hintergrund ist sicherlich, ob und wie sich die Abflüsse in Zukunft verändern werden. In den Figuren 5.5 bis 5.13 lässt sich das Ausmass möglicher Veränderungen visuell beurteilen, wie dies in Kap. 5.4.1 bereits erläutert wurde. Wir verwenden hier nun aber einen quantitativen Ansatz, in dem die prozentualen Veränderungen der Abflüsse gegenüber den Verhältnissen in der Referenzperiode 1981–2010 ausgewiesen werden. Aufgrund der beträchtlichen saisonalen Unterschiede in den Abflusshöhen werden diese Abweichungen sowohl für das ganze Jahr als auch für die vier Saisons bestimmt. Die relativen (prozentualen) Abweichungen sind als Zahlenwerte in der Tabelle aufgeführt. Zur besseren Visualisierung der numerischen Daten wurden die Zellen der Tabelle entsprechend der Legende eingefärbt.

Die Resultate in der Tabelle 5.5 ergeben ein klares, in sich konsistentes Bild der zu erwartenden Veränderungen der mittleren saisonalen und jährlichen Abflüsse:

- Auch für die Hydrologie im Kanton Solothurn gilt: Wenn es der «Welt» gelingt, die Treibhausgasemissionen zu verringern und dann auf «Netto-Null» herunterzufahren (Szenario mit Klimaschutz), werden sich die zukünftigen hydrologischen Verhältnisse nur unwesentlich von den heutigen unterscheiden. Die meisten zukünftigen saisonalen Abflusswerte in den Bezirken bewegen sich in einem Bereich von ± 10 % des heutigen Mittelwerts. Insbesondere in den Sommermonaten, die heute schon relativ wenig Abfluss aufweisen, sind keine wesentlichen Veränderungen ersichtlich. Eine Ausnahme machen hier die im Jura gelegenen Bezirke Thierstein und Dorneck. Interessant sind die Veränderungen im Herbst. In dieser Jahreszeit nehmen alle Abflussmittelwerte ab, in der ersten Periode sogar etwas stärker als in der zweiten. Allerdings sind die prozentualen Unterschiede zu heute ebenfalls eher klein.
- Beim Szenario ohne Klimaschutz unterscheiden sich die zukünftigen mittleren Abflüsse – mit Ausnahme des Frühjahrs – deutlich von der Periode 1981–2010.
 - Im Winter liegen die Zunahmen gegenüber heute im Bereich von +20 % bis mehr als +30 %. Die im saisonalen Vergleich bereits heute hohen Abflüsse werden weiter zunehmen, in der fernen Zukunft noch stärker als in der Mitte des Jahrhunderts.

Tab. 5.5: Abflussveränderungen [%] in den Bezirken im Vergleich zur Periode 1981–2010 für zwei Emissionsszenarien und zwei Zeitperioden (um 2060: 2040–2069, um 2085: 2070–2099). Bu: Bucheggberg, Wa: Wasseramt, Le: Lebern, Gu: Gäu, Ol: Olten, Gs: Gösgen, Ta: Thal, Th: Thierstein, Do: Dorneck. Lesebeispiel: Im Bezirk Bucheggberg wird der mittlere Jahresabfluss in der Periode 2040–2069 (um 2060) bei einem Szenario mit Klimaschutz um 0.2 % zunehmen. Damit liegt dieser Wert in der Klasse -10 bis +10 (kaum Veränderungen gegenüber heute) und die Zelle wurde entsprechend grau eingefärbt.

		Mit Klimaschutz (RCP 2.6)									Ohne Klimaschutz (RCP 8.5)								
		Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
Jahr	um 2060	0.2	0.3	1.4	0.3	-0.1	0.4	-0.6	0.5	0.4	5.4	4.7	4.9	4.6	5.0	5.5	3.4	3.1	3.8
	um 2085	-4.8	-4.5	-4.1	-5.0	-4.9	-4.3	-5.1	-6.6	-6.8	6.2	5.2	6.1	5.6	6.5	6.9	2.9	3.1	3.8
DJF	um 2060	9.9	11	12	9.9	8.9	8.3	12	9.1	11	22	22	22	24	22	25	22	19	20
	um 2085	0.8	0.8	3.5	2.4	3.1	3.0	3.8	1.7	3.0	29	26	28	31	30	33	30	25	28
MAM	um 2060	-1.4	-2.9	-3.6	-3.3	-4.4	-6.7	-1.3	-3.5	-4.4	6.0	4.8	4.3	3.7	4.9	5.6	5.0	10	11
	um 2085	-11	-12	-13	-12	-9.4	-9.9	-11	-11	-10	4.9	3.7	2.7	2.3	1.5	2.6	2.7	12	12
JJA	um 2060	0.3	0.6	0.5	4.0	2.4	0.2	2.8	3.7	4.4	-15	-13	-14	-13	-11	-12	-13	-20	-17
	um 2085	-2.9	-3.2	-1.4	-0.9	-0.9	-1.5	-0.3	-7.4	-6.8	-28	-27	-29	-27	-26	-27	-31	-35	-35
SON	um 2060	-9.2	-7.9	-8.5	-9.2	-11	-12	-8.2	-9.7	-11	-9.2	-10	-8.9	-10	-8.1	-8.5	-9.5	-13	-12
	um 2085	-8.8	-8.3	-6.9	-7.4	-7.3	-8.2	-9.7	-10	-12	-9.3	-8.0	-7.6	-8.0	-6.5	-7.3	-11	-10	-10

Abweichung von Referenzperiode

 -30 -20 -10 +10 +20 +30 [%]

- Im Sommer ist in der fernen Zukunft mit Abflussabnahmen von bis zu -35 % zu rechnen. Bemerkenswert ist die grosse Abnahme der Abflüsse von der Periode 2040–2069 zur Periode 2070–2099. Der Sommer dürfte sich ohne Klimaschutz zum eigentlichen saisonalen Hotspot entwickelt. Davon werden alle Bezirke betroffen sein, am stärksten aber die Bezirke im Jura.
- Die sommerliche Abflussabnahme wird sich im Herbst nahtlos fortsetzen mit häufigen Abflussabnahmen in den Bezirken um -10 % sowohl in der mittleren als auch in der fernen Zukunft. Dadurch wird sich der Herbst als jene Jahreszeit etablieren, in welcher die kleinsten Abflüsse auftreten werden (vgl. dazu Fig. 5.15⁴⁰).

Der Abflusszunahme im Winter stehen also z.T. beträchtlich Abflussabnahmen im Sommer und Herbst gegenüber, so dass sich für den Jahresabfluss nur geringe Veränderungen ergeben. Mit

⁴⁰Mülchi et al. (2021): Moderate runoff extremes in Swiss rivers and their seasonal occurrence in a changing climate. (preprint under review) <https://doi.org/10.5194/hess-2020-667>.

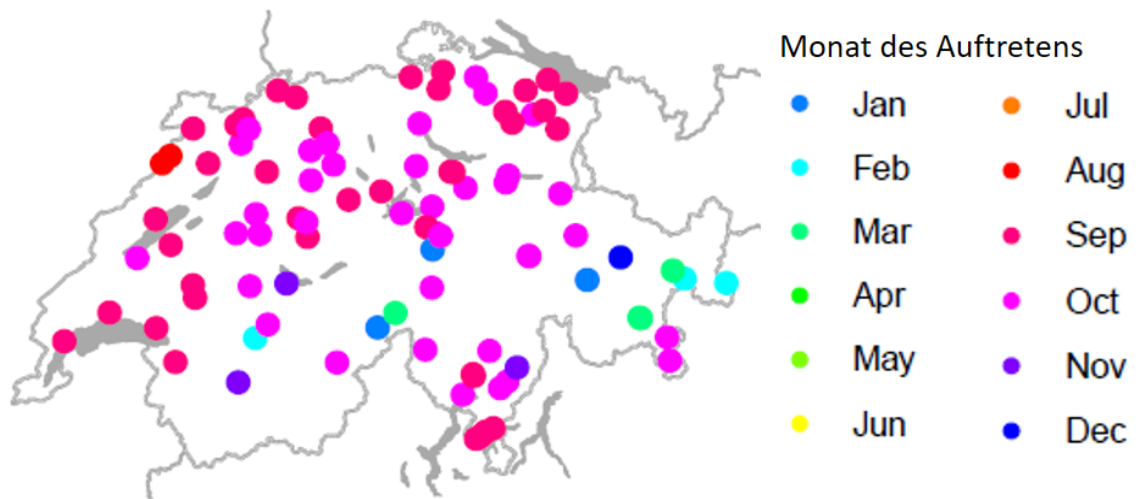


Fig. 5.15: Mittleres monatliches Auftreten des jährlichen Niedrigwassers in der Periode 2070–2099 unter einem Szenario ohne Klimaschutz (Aus: Mülchi u.a. (2021))

Klimaschutz nimmt der Jahresabfluss leicht ab und ohne Klimaschutz ist eine leichte Zunahme des Jahresabflusses zu verzeichnen. Angesichts dieser sehr kleinen Veränderungen und unter Berücksichtigung der Modellunsicherheiten darf man annehmen, dass das jährlich verfügbare Abflussvolumen auch in Zukunft nahezu gleich bleiben wird.

Aus der Sicht der Massnahmenplanung muss hervorgehoben werden, dass die Vorzeichen der Veränderungen bei beiden Szenarien in drei von vier Jahreszeiten identisch sind, die Richtung der Veränderungen also unabhängig vom Szenario sind, und dadurch die «Stossrichtung» der Massnahmen übereinstimmt. Eine Ausnahme bilden der Frühling und die Periode um 2060 im Sommer. Im Sommer um 2060 sind die Veränderungen beim Szenario mit Klimaschutz sehr klein: Die absoluten Abweichungen des saisonalen Abflusses sind für alle Bezirke im Bereich ± 1 mm/JJA.

5.5.2 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserressourcen sind im Kanton Solothurn von hervorragender Bedeutung, wie dies in Kapitel 2.3.4 erläutert wurde. Damit ist die Frage, ob sich die Grundwasserneubildung mit der Klimaänderung verändern wird, essentiell.

Saisonalität der Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung kann über die Wasserbilanz auf monatlicher Basis approximativ quantifiziert werden (Formel 5.1). Es handelt sich um eine approximative Quantifizierung, weil Einflussfaktoren wie Schnee, Austauschprozesse zwischen Grundwasser und Oberflächengewässer, aber auch Wasserentnahmen nicht berücksichtigt werden.

$$I_{i,j} = N_{i,j} - A_{i,j} - V_{i,j} \quad (5.1)$$

- I Grundwasserneubildung [mm/Mt]
 N Monatsniederschlag [mm/Mt]
 A Monatsabfluss [mm/Mt]
 V Monatsverdunstung [mm/Mt]
 i i -ter Monat, mit $i = 1, 2, \dots, 12$
 j j -tes Jahr, mit $j = 1981, 1982, \dots, 2010$

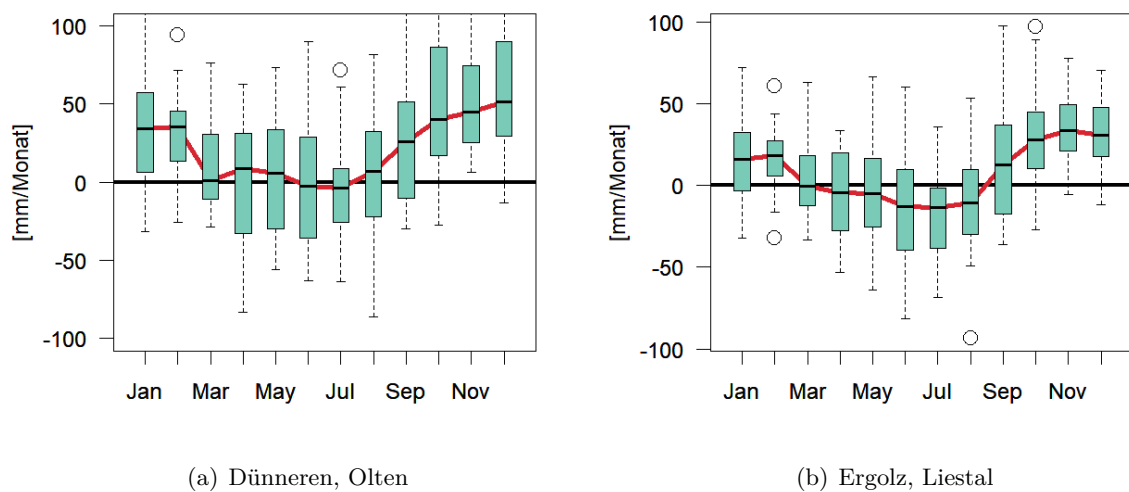


Fig. 5.16: Verteilung der aus der Wasserbilanz der Einzeljahre der Periode 1981–2010 bestimmten Grundwasserneubildungsrate I der Dünneren und der Ergolz. Im farbigen Bereich der Säulen liegen 50 % der Werte. Der horizontale rote Strich bezeichnet den Medianwert.

Die Darstellung in Figur 5.16 beruht auf dieser Gleichung. In den Boxplots der einzelnen Monate sind jeweils die Werte der Jahre zwischen 1981 und 2010 enthalten. Zur Interpretation fokussieren wir auf den Median, also auf jenen Wert, bei dem 50 % der Werte oberhalb und 50 % unterhalb liegen. Ein positiver Wert des Medians bedeutet, dass in diesem Monat in mehr als 50 % der Fälle Grundwasserneubildung stattfindet. Wie die Beispiele der Dünneren und Ergolz belegen, findet die Grundwasserneubildung vor allem im Winterhalbjahr statt.

Indikatoren zur Beurteilung der Veränderung der Grundwasserneubildung

Zur Beantwortung der Frage, ob sich die Grundwasserneubildung in Zukunft verändern wird, wählen wir einen simplen, auf die Datenlage zugeschnittenen Ansatz, der aus zwei Schritten besteht:

Als erstes wird der Indikator GN bestimmt:

$$GN_{i,p} = MQ_{i,p} - \left(\frac{MQ_{Ann,81-10}}{12} \right) \quad (5.2)$$

GN :	Indikator zur Beurteilung, ob Grundwasserneubildung stattfindet [mm/Mt]
MQ_i :	Mittlerer Monatsabfluss in der p -ten Periode [mm/Mt]
$\frac{MQ_{Ann,81-10}}{12}$:	Mittlerer Monatsabfluss der Periode 1981–2010 [mm/a]
i :	i -ter Monat, mit $i = 1, 2, \dots, 12$
p :	p -te Periode, mit $p = 1981\text{--}2010, 2040\text{--}2079, 2070\text{--}2099$

Die monatlichen Indikatoren GN werden sowohl für die aktuelle Periode 1981–2010, als auch für die zukünftigen Perioden 2040–2079 und 2070–2099 unter RCP 2.6 und RCP 8.5 berechnet, wobei die mittleren Monatsabflüsse der betrachteten Periode p stets mit jenen der Periode 1981–2010 verglichen werden. Dies unter der Annahme, dass in dieser Periode (81/10) optimale Bedingungen für die Grundwasserneubildung vorhanden sind. Ist der Indikator GN positiv, bedeutet das, dass im betreffenden Monat Grundwasserneubildung stattfindet, da die Wasserstände in den Flüssen und Bächen überdurchschnittlich sind, was die Grundwasserneubildung begünstigt.

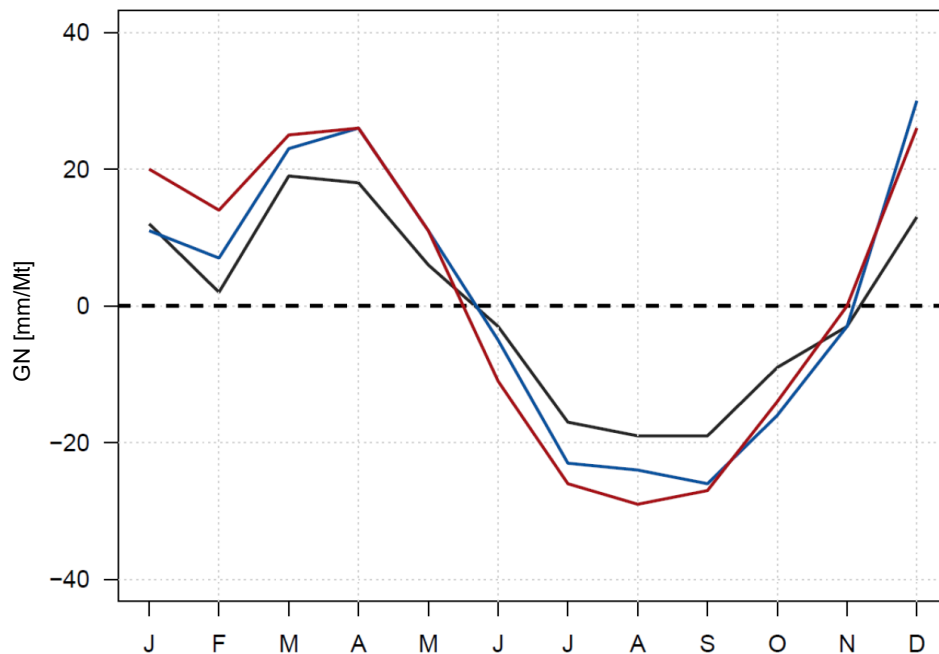


Fig. 5.17: Indikator GN zur Beurteilung der Veränderung der Grundwasserneubildung im Bezirk Dorneck unter einem Szenario ohne Klimaschutz (RCP 8.5). Schwarz: 1981–2010, Blau: 2040–2069, Rot: 2070–2099.

Figur 5.17 illustriert den saisonalen Verlauf des Indikators GN am Beispiel des Bezirks Dorneck. Wir erkennen im Vergleich mit Figur 5.16, dass der Indikator GN die Grundzüge der Grundwasserneubildung gut erfasst, dass er aber die Neubildung im Herbst wesentlich unterschätzt.

Mit dem Indikator GN können nun die generellen Veränderungen der Grundwasserneubildung beschrieben werden. So kann beurteilt werden, ob sich die Saisonalität der Grundwasserneubildung in Zukunft verändern wird. Das Beispiel des Bezirks Dorneck verdeutlicht, dass sich der Zeitraum, in dem Grundwasserneubildung stattfindet, auch in Zukunft nicht verändern wird. Diese Aussage gilt für alle Bezirke des Kantons Solothurn.

Aus den zwölf monatlichen Indikatoren GN leiteten wir in einem zweiten Schritt den finalen Indikator GN_{Ann} ab, und zwar als Summe der GN jener Monate, in denen der Indikator positiv ist und damit Grundwasserneubildung stattfindet. Der finale Indikator erlaubt schliesslich eine relative Aussage, ob und in welchem Ausmass die Grundwasserneubildungsrate zu- oder abgenommen hat (vgl. Tab. 5.6). Absolute Aussagen wie «Die Neubildungsrate wird um 77 mm/a zunehmen» sind allerdings nicht möglich.

Tab. 5.6: Beurteilung der Veränderung des Indikators GN_{Ann} [%] in den Bezirken. Vergleich zur Periode 1981–2010 für zwei Emissionsszenarien und zwei Zeitperioden (um 2060: 2040–2069, um 2085: 2070–2099). Bu: Bucheggberg, Wa: Wasseramt, Le: Lebern, Gu: Gäu, Ol: Olten, Gs: Gösgen, Ta: Thal, Th: Thierstein, Do: Dorneck

	mit Klimaschutz (RCP 2.6)									ohne Klimaschutz (RCP 8.5)								
	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
um 2060	4	1	1	4	4	1	-2	5	7	43	38	37	40	44	41	36	43	54
um 2085	-17	-18	-18	-19	-18	-19	-26	-23	-22	60	55	49	59	67	61	52	60	74

Abweichung von Referenzperiode

-20 -10 +10 +20 +30 +40 +50 [%]

Wie die Tabelle verdeutlicht, verändert sich die Grundwasserneubildung beim Szenario mit Klimaschutz bis Mitte Jahrhundert kaum und nimmt dann gegen Ende des Jahrhunderts eher etwas ab.

Das Szenario ohne Klimaschutz suggeriert schon bis Mitte Jahrhundert eine starke Zunahme der Grundwasserneubildung. Grund dafür ist die Abflusszunahme im Winter. Mit einer weiteren Zunahme gegen Ende des Jahrhunderts ist zu rechnen. Unklar ist allerdings, ob die Verbesserung der Grundwasserneubildung im Winter einen positiven Effekt auf Grundwasserstände im Sommer haben wird. Diese Frage kann nur mit einer detaillierten Grundwassermodellierung beantwortet werden. Trotzdem ist das Ergebnis, dass sich die Grundwasserneubildung im Winterhalbjahr tendenziell verbessert, für den Kanton Solothurn mit seinen reichen Grundwasserressourcen als sehr positiv zu bewerten und unterstreicht die Bedeutung der Grundwasserressourcen bei der Bewältigung der Klimaänderung.

5.5.3 Nutzbares Wasser

Die Analyse der Wasserverfügbarkeit ist ein zentrales Anliegen dieser Untersuchung. Grundlage dazu bilden die simulierten Monatsabflüsse der Einzeljahre in den drei Betrachtungsperioden 1981–2010, 2040–2069, 2070–2099. Wie im Kapitel 5.4.1 und in Figur 5.3 illustriert, wird jeder

Monat der einzelnen Jahre durch rund 20 Werte⁴¹ beschrieben. Durch das Sortieren dieser Werte nach ihrer Grösse lässt sich die sogenannte Dauerkurve ableiten, deren Prinzip und Aussagekraft die Figur 5.18 erläutert.

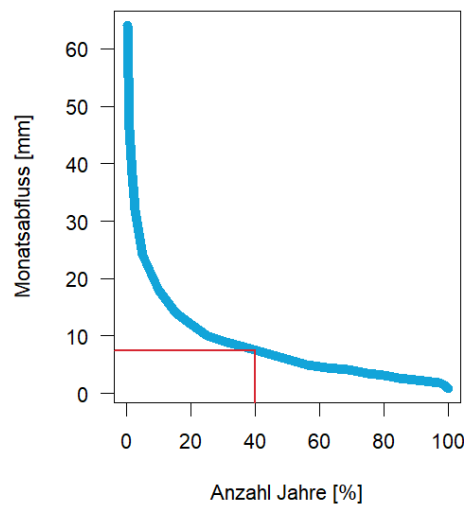


Fig. 5.18: Prinzipskizze zur Dauerkurve der Monatsabflüsse einer 30-jährigen Periode. Lesebeispiel: In 40 % der Jahre wird eine Abflusshöhe von 7.5 mm/Monat erreicht oder überschritten und in 60 % der Jahre (100 % - 40 %) wird sie unterschritten

Für die Analyse und Bewertung der Wasserverfügbarkeit beschränken wir uns auf die Sommermonate Juni, Juli, August, weil in diesem Zeitraum einerseits am häufigsten Trockenphasen auftreten und andererseits die Wasserverfügbarkeit in diesen Monaten für die Wassernutzung entscheidend ist. Wir verzichten hier – der Übersichtlichkeit halber – auf eine Darstellung der einzelnen Monate und betrachten nur das gesamthaft im Sommer nutzbare Wasser. Dazu wird eine zweistufige Vorgehensweise gewählt, welche in den folgenden Unterkapiteln beschrieben wird:

Wasserbedarf von Ökologie und Unterlieger

Die folgende Bewertung des nutzbaren Wassers folgt dem Prinzip der Nachhaltigkeit, das bedeutet, dass Wasser erst dann durch andere Nutzer bezogen werden kann, wenn der minimale Bedarf von Ökologie und Unterlieger gedeckt ist.

Die Bemessung des Wasserbedarf der Ökologie basiert – wie dies in der Schweiz bei den wenigen dazu existierenden Untersuchungen üblich ist – auf der Abflussmenge Q_{347} ⁴². Sie wird – wo möglich – aus den Tagesmitteln der Periode 1981–2010 berechnet. Sonst wird sie aus den bestehenden kürzeren Messreihen abgeleitet. Diese ökologisch notwendige Wassermenge wird auch unverändert für die zukünftigen Perioden übernommen.

⁴¹ca. 20 Simulationen pro Emissionsszenario. Die Anzahl der Simulationen variiert zwischen den einzelnen Szenarien

⁴²Es ist die Wassermenge, die an 5 % der Tage eines Kalenderjahrs unterschritten wird.

Für die Bemessung des gesamten Wasserbedarfs der Ökologie und der Unterlieger wird die Abflussmenge Q_{292} ⁴³ verwendet. Sie wurde gutachterlich und pragmatischer festgelegt⁴⁴.

Q_{347} und Q_{292} wurden ausgehend von den Abflussdaten der Dünnern, Olten, und Ergolz, Liestal, für jeden Bezirk abgeschätzt.

Nutzbare Wasser für Landwirtschaft und weitere Nutzer

Das im Sommer in der Landwirtschaft und für weitere Nutzer verfügbare Wasservolumen (V_{nutz}) wird aus der Differenz zwischen dem Monatsabfluss und dem Wasserbedarf von Ökologie und Unterlieger bestimmt. Die Dimension des nutzbaren Wasservolumens ist mm/JJA. Sie gibt an, wieviele mm Wassersäulenhöhe pro m^2 im Juni, Juli und August nutzbar sind. Multipliziert man diese Zahl mit der Fläche des betreffenden Bezirks [m^2] erhält man das verfügbare Wasservolumen in der Dimension Liter.

$$V_{nutz,JJA} = MQ_{JJA} - Q_{292} \quad (5.3)$$

$V_{nutz,JJA}$	Nutzbare Wasser [mm/Saison]
MQ_{JJA}	Monatsabfluss [mm/Saison]
Q_{292}	Abflussmenge, die an 80 % der Tage erreicht oder überschritten wird [mm/Saison]

Das im Sommer nutzbare Wasservolumen der drei Betrachtungsperioden wird wiederum mittels Dauerkurven dargestellt, wie das die Figur 5.19 auf der Basis des Bezirks Buecheggberg exemplarisch zeigt. Welche Informationen lassen sich aus diesem Diagramm ableiten?

- Das nutzbare Wasservolumen wird sich gegenüber heute vermindern (→ Abfolge der Dauerkurven).
- Der Prozentsatz der Jahre ohne nutzbares Wasser wird sich von heute mit weniger als 5 % der Jahre auf 10 % in der Mitte des Jahrhunderts und dann auf 26 % verringern (→ Prozentsatz der Jahre, in denen die Dauerkurve auf oder über der horizontalen 0-Linie liegt).
- Im Ausmass, wie sich der Prozentsatz der Jahre mit nutzbarem Wasser verringern wird, wird sich der Prozentsatz der Jahre, in denen der Wasserbedarf von Ökologie und Unterlieger nicht gedeckt werden kann, erhöhen (→ Anzahl der Jahre, in denen die Dauerkurve unter der horizontalen 0-Linie liegt)

⁴³Es ist die Wassermenge, die an 20 % der Tage eines Kalenderjahrs unterschritten wird.

⁴⁴In der wissenschaftlichen Literatur findet man einige Aufsätze, welche bei der Wassernutzung die Verantwortung der Oberlieger für die Unterlieger diskutieren, aber konkrete Ansätze, wie dieser Beitrag zu bemessen ist, fehlen.

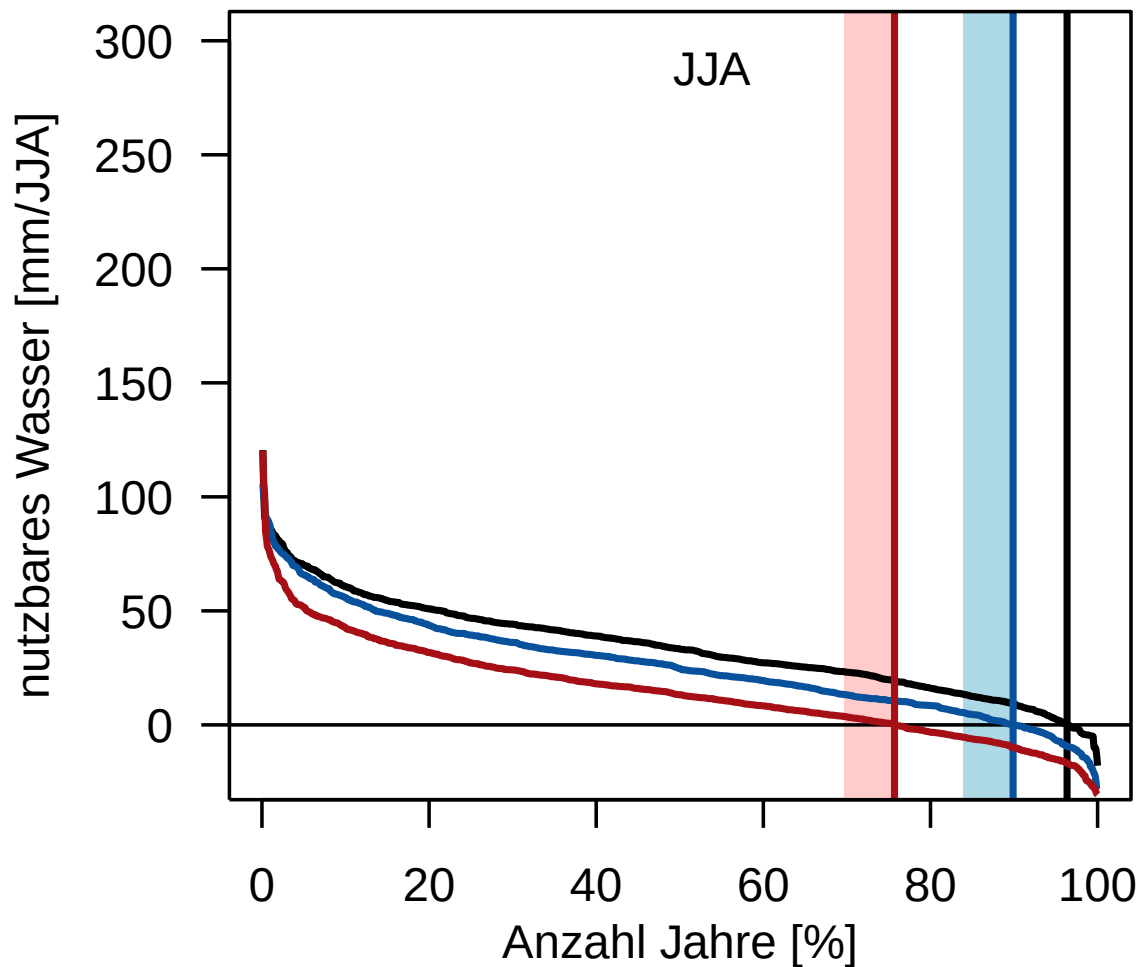


Fig. 5.19: Dauercurve des nutzbaren Wassers im Bezirk Bucheggberg bei einem Szenario ohne Klimaschutz (RCP 8.5). Schwarz: 1981 -2010, Blau: 2040–2069, Rot: 2070–2099. Vertikale Linie: Grenze des nutzbaren Wassers (Lesebeispiel zur blauen vertikalen Linie: In 10 % der Jahre (100 % - 90 %) steht in der Periode 2040–2069 kein nutzbares Wasser zur Verfügung). Die semi-transparenten vertikalen Flächen bezeichnet den jeweiligen bekannten Unsicherheitsbereich der Abschätzung.

- Der Bereich der bekannten Unsicherheit der Abschätzungen liegt bei rund 8 % (→ vertikale Linien)

Situation in den Bezirken

Die nutzbaren Wasservolumina in den Bezirken sind in den Figuren 5.20 - 5.28 dargestellt, und zwar für die beiden Emissionsszenarien. Es fällt dabei sofort auf, dass grosse Unterschiede zwischen den beiden Szenarien bestehen. Während sich die Verhältnisse beim Szenario mit Klimaschutz nur geringfügig verändern werden, sind die Unterschiede zur Periode 1981–2010 beim Szenario ohne Klimaschutz beträchtlich, insbesondere gegen Ende des Jahrhunderts. Diese Veränderungen und Unterschiede werden im nächsten Unterkapitel quantifiziert und bewertet.

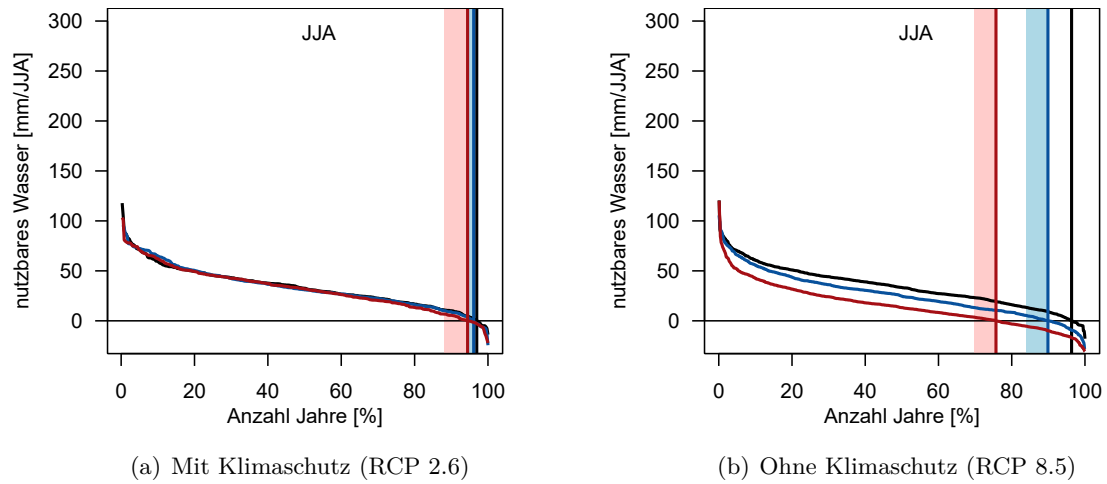


Fig. 5.20: Nutzbares Wasser im Bezirk Buecheggberg

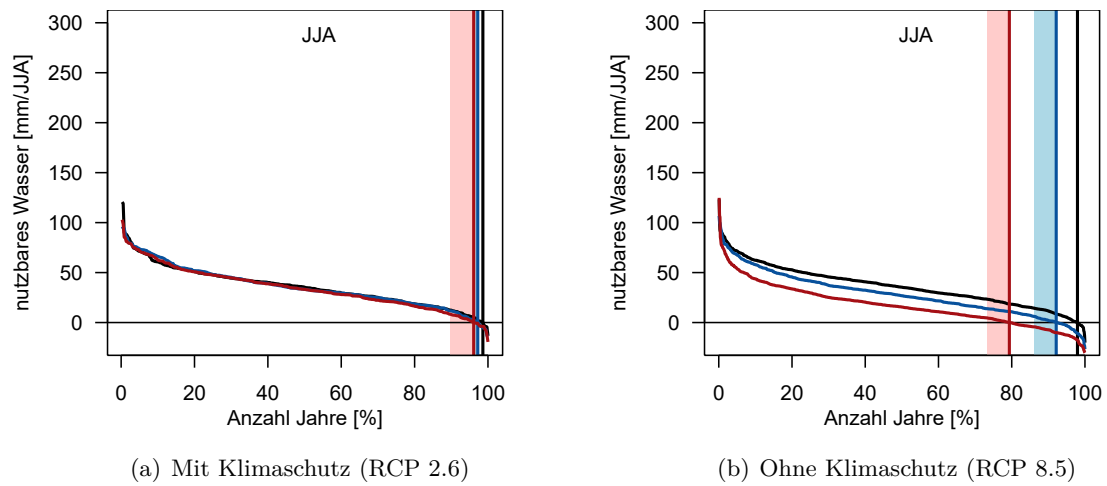


Fig. 5.21: Nutzbares Wasser im Bezirk Wasseramt

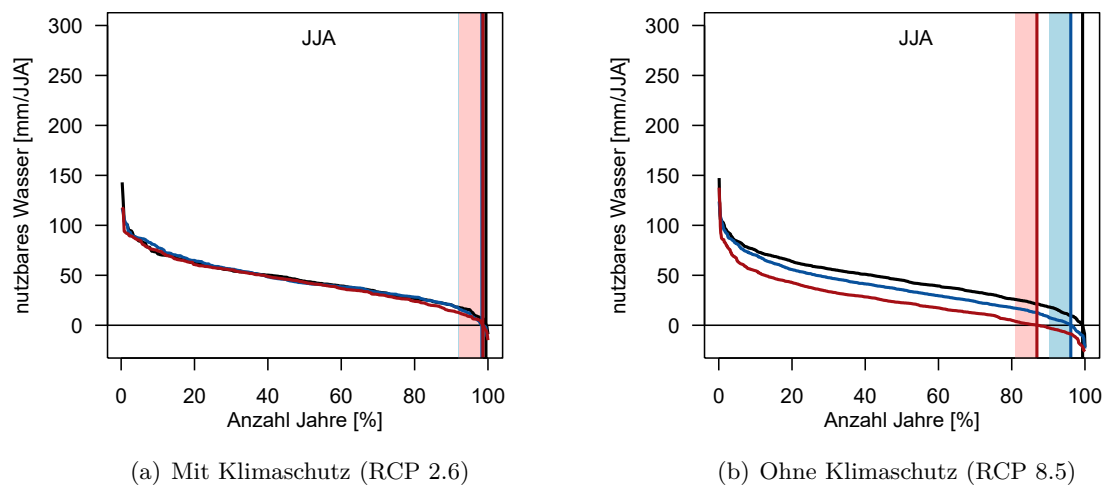


Fig. 5.22: Nutzbares Wasser im Bezirk Lebern

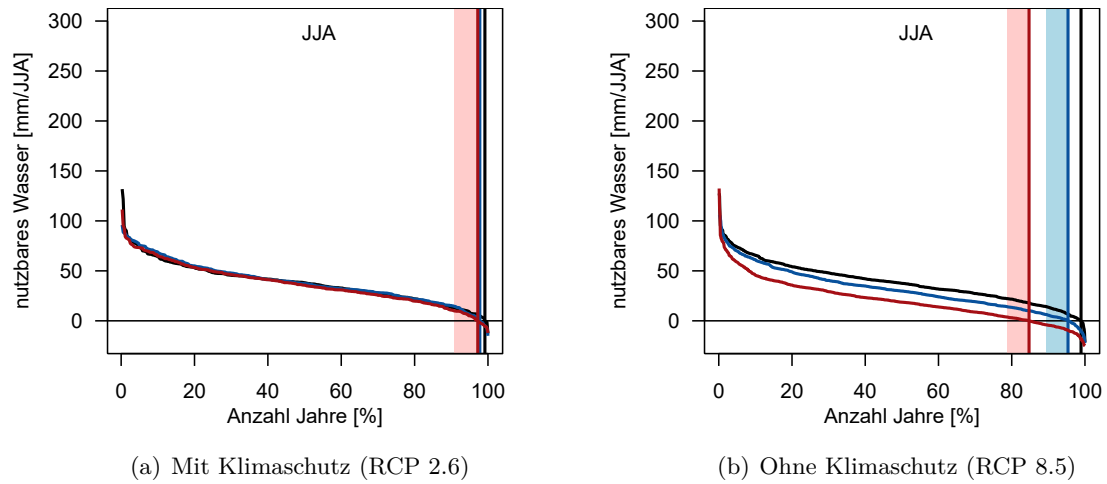


Fig. 5.23: Nutzbares Wasser im Bezirk Gäu

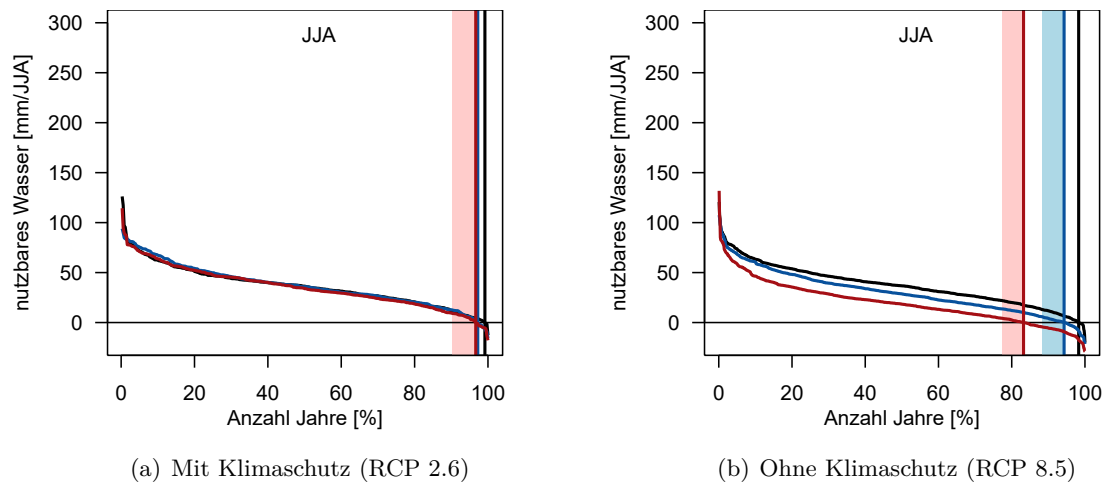


Fig. 5.24: Nutzbares Wasser im Bezirk Olten

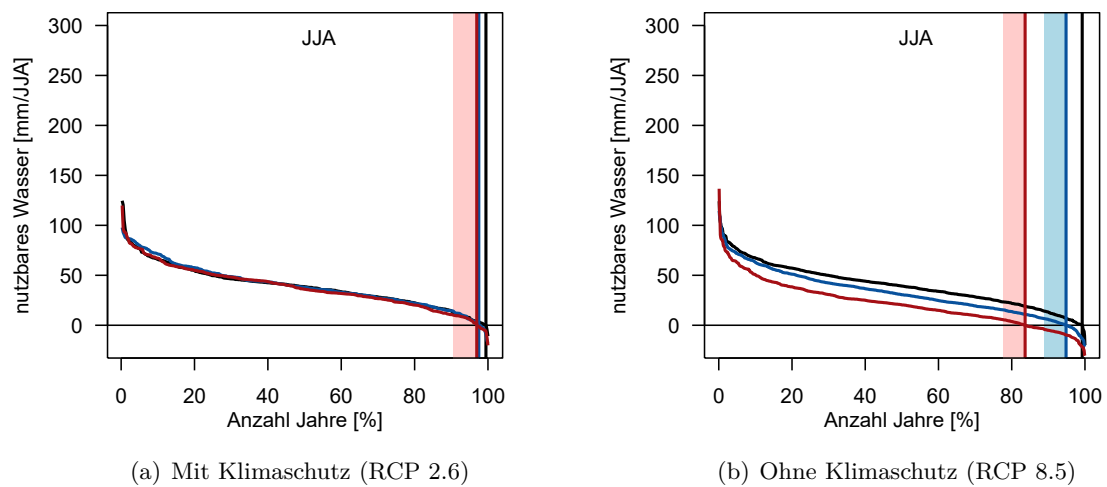


Fig. 5.25: Nutzbares Wasser im Bezirk Gösigen

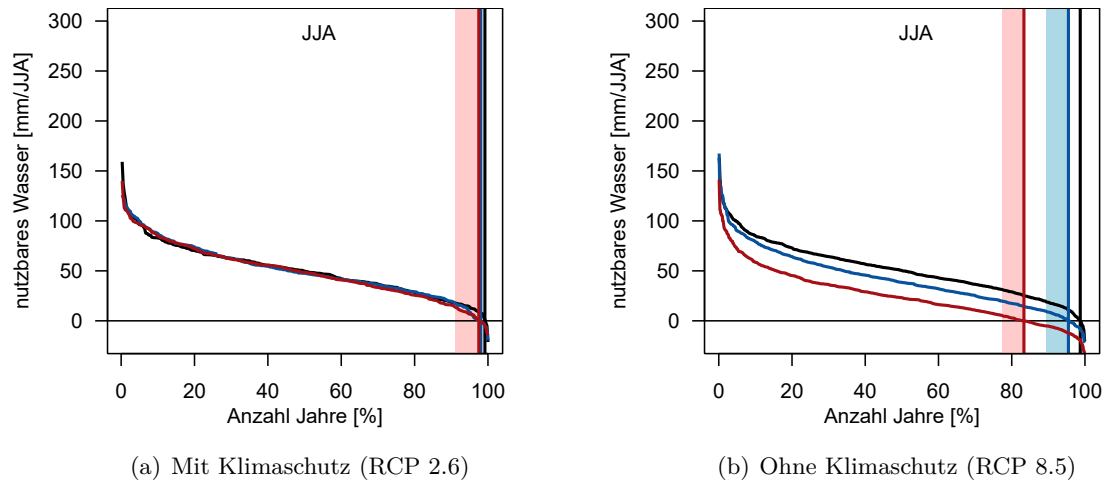


Fig. 5.26: Nutzbares Wasser im Bezirk Thal

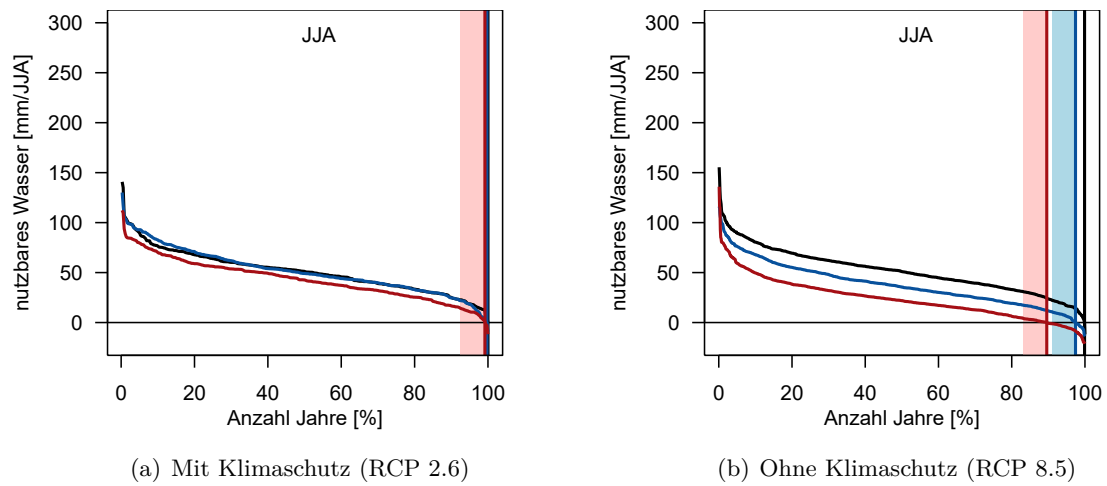


Fig. 5.27: Nutzbares Wasser im Bezirk Thierstein

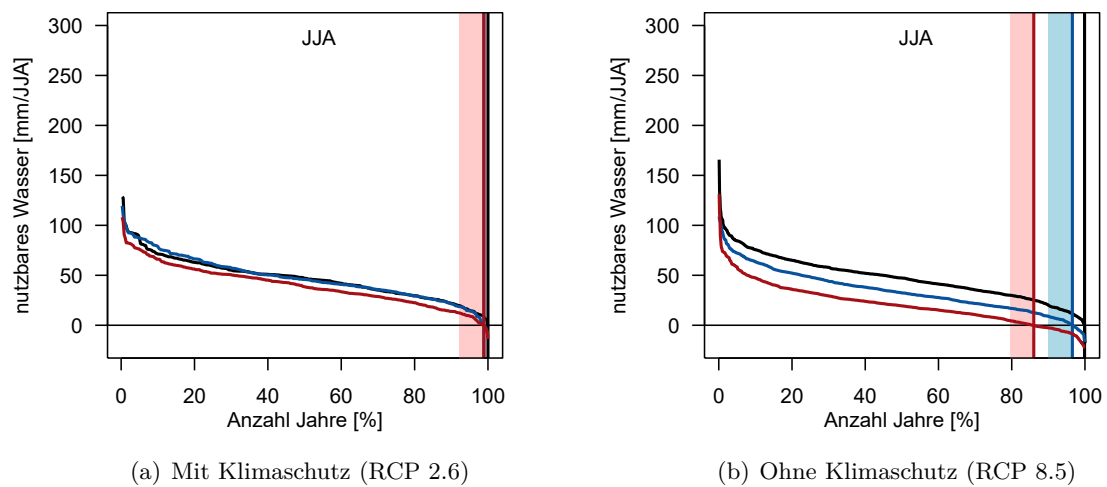


Fig. 5.28: Nutzbares Wasser im Bezirk Dorneck

Beurteilung der Situation

Die Tabelle 5.7 vermittelt ein nach Bezirken und Zeitperioden differenzierten Überblick über das im Kanton Solothurn nutzbare Wasser. Dabei wird zwischen drei Situationen unterschieden.

1. Anzahl der Jahre, in denen ausreichend Wasser für die Ökologie zur Verfügung steht, wobei hier die Ökologie über die Abflussmenge Q_{347} definiert ist (s. oben).
2. Anzahl der Jahre mit ausreichend Wasser für Ökologie und Unterlieger. Die massgebliche Wassermenge ist hier das Q_{292} (s. oben)
3. Anzahl der Jahre mit ausreichend nutzbarem Wasser für Ökologie, Unterlieger und Landwirtschaft. Dabei handelt es sich um eine abschliessende Gesamtbeurteilung. Der Zusatzbedarf der Landwirtschaft (vgl. Kap. 2.4.4) wurde für jeden Bezirk einzeln bestimmt. Er bezieht sich auf den sogenannten Referenzwert REF der Studie der Egli AG, also auf die heutige Situation. Dabei ist zu beachten, dass sich dieser Referenzwert nur unwesentlich vom Szenario MAX unterscheidet, welches sich auf eine Situation im Jahr 2060 bezieht (vgl. Tab. 2.7). Einen weit höheren Wasserbedarf wird beim Szenario EXT benötigt. Dieses extreme Szenario wird den durchschnittlichen Verhältnissen auch in Zukunft zu wenig gerecht.

Wie es aufgrund der bisherigen Ergebnissen zu erwarten war, unterscheidet sich die Situation beim nutzbaren Wasser wiederum deutlich zwischen einem Szenario mit und einem Szenario ohne Klimaschutz. Beim Szenario mit Klimaschutz ergeben sich einzig in den Bezirken Bucheggberg und Wasseramt gewisse negative Veränderungen, und zwar nur dann, wenn man das ganze Nutzungsspektrum betrachtet, also den Bedarf von Ökologie, Unterlieger und Landwirtschaft miteinbezieht. Wir konzentrieren uns deshalb im folgenden auf die Situation für das Szenario ohne Klimaschutz, bei dem zum Teil markante Veränderungen in Erscheinung treten:

- Für die Ökologie wird den Simulationen nach auch in Zukunft in mehr als 93 % der Jahre genügend Wasser zur Verfügung stehen.
- Bezieht man zusätzlich den minimalen Wasserbedarf der Unterlieger mit ein, so wird die Anzahl der Jahre, in denen dieser erweiterte Bedarf gedeckt werden kann, auf etwa 90 % zurückgehen; Ende des Jahrhunderts werden es noch rund 75 - 85 % der Jahre sein.
- Betrachtet man den Gesamtwasserbedarf, so erkennt man bereits heute in den Bezirken Bucheggberg und Wasseramt gewisse Defizite. Diese Defizitjahre erhöhen sich gegen Mitte des Jahrhunderts in vielen Bezirken auf etwa 10 %, in einzelnen Bezirken sogar auf 15 bis über 30 % und gegen Ende des Jahrhunderts werden es schon zwischen rund 20 und 40 % aller Jahre sein. Dabei handelt es sich eher um eine konservative Schätzung, da – wie oben erwähnt – der Zusatzwasserbedarf der heutigen Referenzperiode in die Berechnungen eingeflossen ist.

Tab. 5.7: Nutzbares Wasser: Anteil der Jahre mit ausreichend Wasser für verschiedene Bedürfnisse differenziert nach den Betrachtungsperioden und für zwei Emissionsszenarien. Bu: Bucheggberg, Wa: Wasseramt, Le: Lebern, Gu: Gäu, Ol: Olten, Gs: Gösgen, Ta: Thal, Th: Thierstein, Do: Dorneck. Lesebeispiel: Im Bezirk Bucheggberg ist heute (1981–2010) in 97 % der Jahre ausreichend Wasser für die Ökologie verfügbar.

Anteil Jahre [%] mit ausreichend Wasser für Ökologie

mit Klimaschutz (RCP 2.6)										ohne Klimaschutz (RCP 8.5)									
	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do		Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
heute	97	97	97	97	97	97	97	97	97	0	97	97	97	97	97	97	97	97	97
um 2060	97	97	97	97	97	97	97	97	97	0	96	97	97	97	97	97	97	97	97
um 2085	97	97	97	97	97	97	97	97	97	0	94	95	95	96	95	95	95	96	95

Mittelwerte im Unsicherheitsbereich von +/- 3%

Anteil Jahre [%] mit ausreichend Wasser für Ökologie & Unterlieger

mit Klimaschutz (RCP 2.6)										ohne Klimaschutz (RCP 8.5)									
	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do		Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
heute	94	95	96	96	96	96	96	97	97		93	95	96	96	95	96	96	97	97
um 2060	93	94	95	95	94	94	95	96	96		87	89	93	92	91	92	93	94	93
um 2085	91	93	95	94	94	94	94	96	96		73	76	84	82	80	81	80	86	83

Mittelwerte im Unsicherheitsbereich von +/- 3%

Anteil Jahre [%] mit ausreichend Wasser für Ökologie & Unterlieger & Zusatzbedarf der Landwirtschaft (REF)

mit Klimaschutz (RCP 2.6)										ohne Klimaschutz (RCP 8.5)									
	Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do		Bu	Wa	Le	Gu	Ol	Gs	Ta	Th	Do
heute	84	90	96	95	95	95	96	96	95		83	89	96	95	94	95	95	96	94
um 2060	83	89	95	94	93	94	93	96	94		69	79	92	90	88	90	91	93	85
um 2085	79	86	95	93	92	93	94	95	91		49	61	79	77	77	78	77	82	68

Mittelwerte im Unsicherheitsbereich von +/- 3%

Anteil an Jahren  50 75 90 95 [%]

- Hinsichtlich der räumlichen Verteilung sind im südlichen Kantonsteil vor allem die Bezirke Bucheggberg und Wasseramt von grösseren Abnahmen des nutzbaren Wassers betroffen. Die beiden Bezirke im nördlichen Kantonsteil (Jura) sind stärker betroffen als die meisten im südlichen Teil; dies gilt im besonderen Masse für den Bezirk Dorneck.

Die Bewertung des nutzbaren Wassers lässt somit deutliche räumliche Hotspots erkennen und belegt, dass sich die Situation ab Mitte des Jahrhunderts signifikant verschlechtern wird, wenn es nicht gelingt, die Treibhausgasemissionen markant zu reduzieren und damit die Erwärmung zu stoppen.

5.6 Veränderungen bei Emme und Aare

Aare und Emme bilden ein sehr wichtiges Standbein für das Wasserdargebot im südlichen Kantonsteil (vgl. Kap. 2.3.4). Sie ergänzen die kantonsinternen Wasserressourcen und besitzen für Solothurn gleichzeitig einen hohen Identifikationswert. Von grundlegender Bedeutung ist auch die Speisung der Lockergesteinsgrundwasserleiter, aus welchen der grössere Anteil des Solothurner Trink- und Brauchwassers stammt.

5.6.1 Hydrologie

Die Figur 5.29 beschreibt die heutigen und zukünftigen Abflussverhältnisse der Emme, Wiler, die ein charakteristisches voralpines Einzugsgebiet besitzt. Die Abflüsse im Winter sind vergleichsweise tief, weil ein Teil der Niederschläge noch als Schnee fällt. Dieser Anteil nimmt im Zuge der Klimaerwärmung stetig ab, womit sich die Winterabflüsse erhöhen. Gleichzeitig nehmen die Abflüsse im Frühjahr infolge der allmählich geringer ausfallenden Schneeschmelze ab. Bedeutend fällt die Abflussabnahme im Sommer aus. Beim Szenario ohne Klimaschutz sind nun Sommer und Frühherbst ganz klar jene Jahreszeiten, in denen die kleinsten Abflüsse auftreten werden. Wie die Verteilung der Monatsabflüsse der Einzeljahre belegt, werden kritische, für die Ökologie und Unterlieger wichtige Abflussschwellenwerte immer häufiger unterschritten. Dies in besonderem Masse beim Szenario ohne Klimaschutz. Erinnerungen an die Sommertrockenheiten von 2003, 2015 und 2018 werden wach (Fig. 5.30).

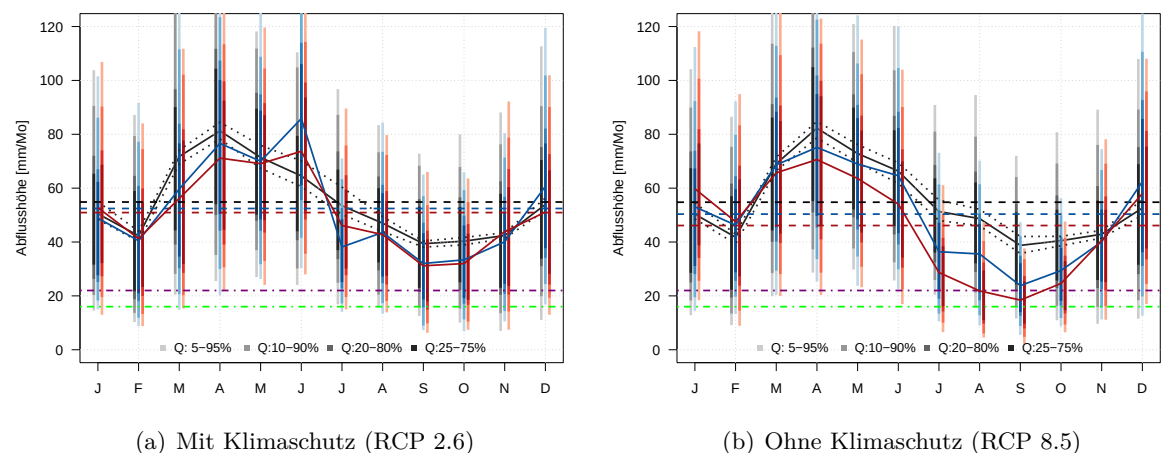


Fig. 5.29: Zukünftige Veränderungen der Monatsabflüsse der Emme, Wiler, unter der Annahme eines Szenarios mit und ohne Klimaschutz (unten). Schwarz: 1981–2010, Blau: 2040–2069, Rot: 2070–2099. Durchgezogene Linie: Abflussregime basierend auf den langjährigen Medianwerten der Monatsabflüsse; gestrichelte horizontale Linien: langjähriges Jahresmittel; gestrichelt-punktierte Linien im unteren Bereich: Wasserbedarf der Ökologie (grün) sowie von Ökologie und Unterlieger insgesamt (pink). Eine ausführliche Beschreibung des Inhalts der Grafik findet sich in Kap. 5.4.1.

Die visuell feststellbaren grossen Unterschiede zwischen den beiden Emissionsszenarien werden in der Tabelle 5.8 quantifiziert: Im Szenario ohne Klimaschutz liegen die Veränderungen ge-

Tab. 5.8: Abflussveränderungen [%] bei der Emme, Wiler, und der Aare, Murgenthal, im Vergleich zur Periode 1981–2010 für zwei Emissionsszenarien und zwei Zeitperioden (um 2060: 2040–2069, um 2085: 2070–2099).

		Mit Klimaschutz (RCP 2.6)		Ohne Klimaschutz (RCP 8.5)	
		Aare-Murgenthal	Emme-Wiler	Aare-Murgenthal	Emme-Wiler
Jahr	um 2060	-1.3	-4.6	-5.9	-8.8
	um 2085	-2.3	-7.1	-11	-15
		Aare-Murgenthal	Emme-Wiler	Aare-Murgenthal	Emme-Wiler
DJF	um 2060	11	0.8	13	14
	um 2085	1.4	-2.2	14	13
		Aare-Murgenthal	Emme-Wiler	Aare-Murgenthal	Emme-Wiler
MAM	um 2060	-2.2	-7.6	-3.3	-5.1
	um 2085	-7.2	-13	-5.5	-13
		Aare-Murgenthal	Emme-Wiler	Aare-Murgenthal	Emme-Wiler
JJA	um 2060	-4.0	-3.0	-12	-21
	um 2085	-0.5	-6.9	-30	-41
		Aare-Murgenthal	Emme-Wiler	Aare-Murgenthal	Emme-Wiler
SON	um 2060	-10	-9.8	-16	-21
	um 2085	-8.6	-12	-22	-30
		Abweichung von Referenzperiode			
		-40 -30 -20 -10 +10 +20 [%]			

genüber der Periode 1981–2010 im Bereich von ± 15 %, mehrheitlich sogar unter ± 10 %. Sie sind also verhältnismässig klein. Beim Szenario ohne Klimaschutz sticht die über 40-prozentige Abnahme im Sommer gegen Ende des Jahrhunderts hervor, eine Abnahme, die schon Mitte des Jahrhunderts -20 % beträgt. Auch im Herbst wird der Abflussrückgang substantiell sein. Dem gegenüber steht eine Abflusszunahme im Winter, welche allerdings die sommerlichen und herbstlichen Abnahmen nicht zu kompensieren vermag, so dass insgesamt auch der mittlere Jahresabfluss um 10 - 15 % abnimmt.

Die alpinen Wurzeln der Aare, Murgenthal sind im Abflussregime 5.31 durch die grössten Monatsabflüsse im Mai und Juni und – in der heutigen Perioden – durch die kleinsten Monatsabflüsse im Februar klar erkennbar, auch wenn die Unterschiede zwischen Sommer- und Winterabflüssen durch die Seen im Einzugsgebiet weniger stark ausfallen als in einem Einzugsgebiet ohne ausgleichend wirkende Seen im Oberlauf. Beim Szenario mit Klimaschutz nehmen die Unterschiede zwischen Sommer und Winter eher zu, der Juni wird zum Monat mit dem grössten Monatsmittel, die minimalen Monatsabflüsse im Winter und Sommer nähern sich an, wobei jene im Sommer in Zukunft tendenziell kleiner sein werden. Beim Szenario ohne Klimaschutz werden die zukünftigen Sommerabflüsse eindeutig die kleinsten innerhalb eines Jahres sein und lösen damit den Winter als Zeitraum mit den kleinsten Abflüssen ab. Quantitativ sieht

das Ende des Jahrhunderts so aus (vgl. Tab. 5.8): Einer mittleren Abflusszunahme von 14 % im Winter steht eine Abnahme von 30 % im Sommer gegenüber. Insgesamt – also auch unter Berücksichtigung der Abflussabnahmen im Frühling und Herbst – resultiert beim mittleren Jahresabfluss eine Abnahme von 11 %.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die Abflussverhältnisse vor allem beim Szenario ohne Klimaschutz beträchtlich verändern werden. Dies gilt im besonderen Masse für den Sommer, also genau dann, wenn auch die Fliessgewässer im Kanton Solothurn wenig Wasser führen bzw. führen werden.

5.6.2 Nutzbares Wasser

Aare und Emme könnten in den zunehmend abflussarmen Sommern bei der Deckung des Wasserbedarfs im Kanton Solothurn eine wichtige ergänzende und unterstützende Rolle spielen. Aber auch ihre Abflüsse nehmen ab. Somit stellt sich die Frage, in wie vielen Jahren Wasser aus Emme und Aare in Zukunft potentiell genutzt werden kann. Zur Beantwortung dieser Frage werden die in Kap. 5.5.3 eingeführten Dauerkurven der Monatsabflüsse beigegezogen, aus denen der Prozentsatz der Jahre mit nutzbarem Wasser bzw. jener ohne nutzbares Wasser herausgelesen werden kann. Es werden die Dauerkurven für die einzelnen Sommermonate dargestellt, da zwischen den Monaten beträchtliche Unterschiede bestehen. Zunächst wird die Aare betrachtet, welche mit einem mittleren Sommerabfluss von rund $330 \text{ m}^3/\text{s}$ (1981–2010) über sechzehnmal ergiebiger ist als die Emme mit rund $20 \text{ m}^3/\text{s}$.

Bei der Aare, dargestellt in Figur 5.32 und in Tabelle 5.9 bestehen beträchtliche Unterschiede zwischen den beiden Emissionsszenarien, dies vor allem in den Monaten Juli und August. Heute kann Aarewasser im Juni in mehr als 95 % der Jahre genutzt werden, im Juli und August sind es rund 90 %. Beim Szenario mit Klimaschutz (RCP 2.6) verringert sich dieser Anteil im Juni nur unwesentlich, im Juli und August liegen die Abnahmen deutlich unter 20 %; das heisst, in mehr als 80 % der Jahre könnte Wasser der Aare allerdings in unterschiedlichem Ausmass genutzt werden.

Deutlich anders präsentiert sich die Situation beim Szenario ohne Klimaschutz (RCP 8.5). Gegen Ende des Jahrhunderts steht im Juli in etwa 35 % und im August in etwa 45 % der Jahre kein nutzbares Wasser zur Verfügung, so das Ergebnis der Modellierung (vgl. blaue und rote vertikale Linie in der Figur). Dies scheint allerdings eine pessimistische Schätzung zu sein. Vergleicht man nämlich die modellierte nutzbare Wasserhöhe der Periode 1981–2010 (schwarze Linie in Fig. 5.32) mit der beobachteten (gepunktete Linie), erkennt man namhafte Differenzen. Somit bestehen grosse Unsicherheiten bezüglich des ausgewiesenen Werts, worauf auch die Unsicherheitsbänder in der Figur hinweisen. Diese grossen Unsicherheiten sind vor allem auch darauf zurückzuführen, dass das simple Modell MoSO die ausgleichende Speicherwirkung der Oberländer Seen und der Jurarandseen nicht erfasst. Die Modellierungen mit unserem sehr

einfachen – für das komplexe Einzugsgebiet der Aare vermutlich zu einfachem – Modell MoSO zeigen, dass in einer Zukunft ohne Klimaschutz selbst die Aare nicht uneingeschränkt als Notreserve angesehen werden kann.

Tab. 5.9: Nutzbares Wasser für Aare, Murgenthal und Emme, Wiler: Anteil der Jahre mit ausreichend Wasser für Ökologie und Unterlieger differenziert nach Monaten, den Betrachtungsperioden und für zwei Emissionsszenarien.

Anteil Jahre [%] mit ausreichend Wasser für Ökologie und Unterlieger

Jun	mit Klimaschutz (RCP 2.6)		ohne Klimaschutz (RCP 8.5)	
	Aare-Murgenthal	Emme-Wiler	Aare-Murgenthal	Emme-Wiler
heute	92 - 100	96 - 100	94 - 100	97 - 100
um 2060	95 - 100	100	92 - 99	95 - 98
um 2085	94 - 100	99 - 100	85 - 91	90 - 93

Jul	mit Klimaschutz (RCP 2.6)		ohne Klimaschutz (RCP 8.5)	
	Aare-Murgenthal	Emme-Wiler	Aare-Murgenthal	Emme-Wiler
heute	87 - 100	93 - 97	91 - 100	94 - 97
um 2060	81 - 93	82 - 86	77 - 87	75 - 78
um 2085	84 - 93	82 - 87	62 - 72	59 - 62

Aug	mit Klimaschutz (RCP 2.6)		ohne Klimaschutz (RCP 8.5)	
	Aare-Murgenthal	Emme-Wiler	Aare-Murgenthal	Emme-Wiler
heute	86 - 100	89 - 90	85 - 100	89 - 90
um 2060	82 - 96	83 - 84	75 - 90	73 - 74
um 2085	85 - 99	84 - 86	55 - 70	43 - 44

Anteil an Jahren  [%]

Das Modell MoSO erfasst die (heutigen) Abflussbedingungen der Emme wesentlich besser als jene der Aare. Die Unterschiede zwischen Modell und Beobachtung sind besonders im Bereich kleiner Abflüsse, welche für die Beurteilung des nutzbaren Wassers wesentlich sind, klein. Entsprechend klein sind die Unsicherheitsbereiche.

Bei der Emme sind die Unterschiede zwischen den beiden Emissionsszenarien frappant. Geringen Differenzen beim Szenario mit Klimaschutz stehen im Juli und August grosse Unterschiede beim Szenario ohne Klimaschutz gegenüber. Im Juli wird je nach Betrachtungszeitraum in 20 bis 40 % der Jahre kein nutzbares Wasser verfügbar sein, im August sogar in 20 bis 60 % der Jahre (vgl. Tab. 5.9).

Einschätzung der Rolle von Aare und Emme

Insgesamt und vor allem beim Szenario ohne Klimaschutz werden die Emme und möglicherweise auch die Aare in einer doch namhaften Anzahl Jahre hauptsächlich im Juli und August über kein nutzbares Wasser mehr verfügen. In diesen beiden Monaten können aber in Zukunft

vermehrt Wasserengpässe auftreten. Diese Einschränkung muss bei einer wasserwirtschaftlichen Gesamtplanung unbedingt mitberücksichtigt werden.

Andererseits scheint die Grundwasserneubildung durch Aare und Emme im Winterhalbjahr auf einem ähnlichen Niveau wie heute gewährleistet zu sein. Dies verstärkt die Bedeutung der Grundwasserressourcen weiter, von denen heute *nota bene* nur ein kleiner Anteil des nachhaltig nutzbaren Grundwassers auch tatsächlich genutzt wird.



Fig. 5.30: Streckenweise trockengefallene Emme bei Bätterkinden, 27. Juli 2018. Foto: BAFU

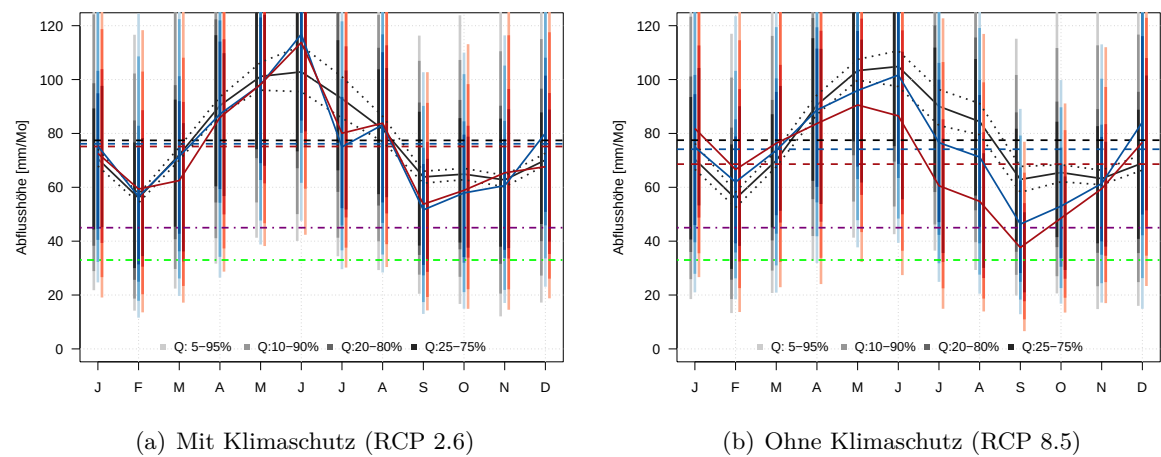


Fig. 5.31: Zukünftige Veränderungen der Monatsabflüsse der Aare, Murgenthal, unter der Annahme eines Szenarios mit Klimaschutz (links) und ohne Klimaschutz (rechts). Schwarz: 1981–2010, Blau: 2040–2069, Rot: 2070–2099. Durchgezogene Linie: Abflussregime basierend auf den langjährigen Medianwerten der Monatsabflüsse; gestrichelte horizontale Linien: langjähriges Jahresmittel; gestrichelt-punktierte Linien im unteren Bereich: Wasserbedarf der Ökologie (grün) sowie von Ökologie und Unterlieger insgesamt (pink). Eine ausführliche Beschreibung des Inhalts der Grafik findet sich in Kap. 5.4.1.

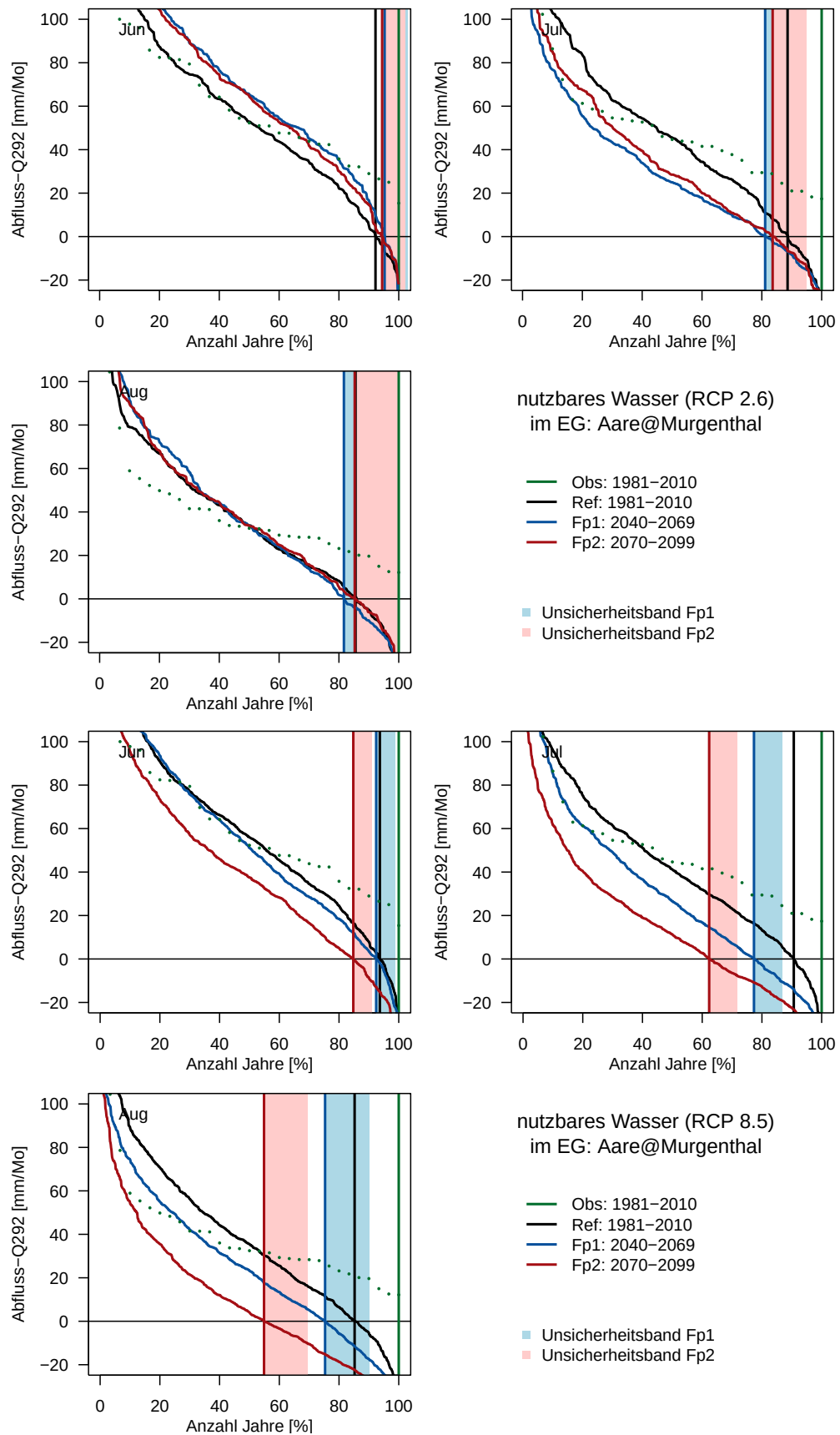


Fig. 5.32: Nutzbares Wasser der Aare in Murgenthal in den Sommermonaten. Gepunktete Linie: Beobachtete Abflussmengen 1981-2010

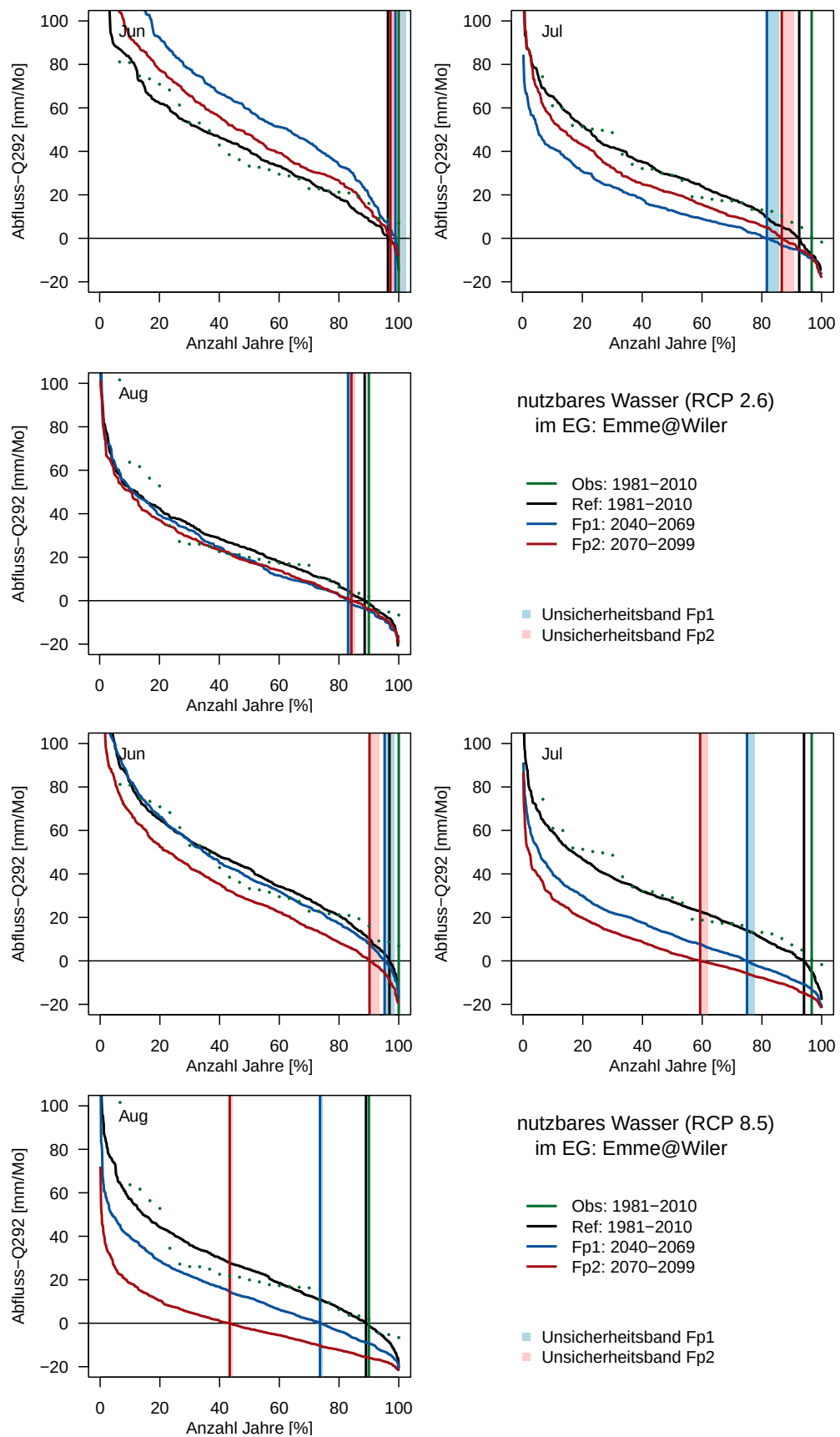


Fig. 5.33: Nutzbares Wasser der Emme in Wiler den Sommermonaten

6 Schlussfolgerungen

6.1 Synthese

Die wichtigsten Ergebnisse der vorliegenden Studie – also die zu erwartenden Veränderungen bei den hydrologischen Verhältnissen und beim nutzbaren Wasser – werden hier in Synthese- und Übersichtskarten dargestellt und zwar räumlich differenziert nach den neun Bezirken des Kantons⁴⁵.

Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass die hier dargestellten Ergebnisse aus Modellierungen resultieren, die auf zwei Emissionsszenarien beruhen und von den aktuell verfügbaren Klimasimulationen ausgehen. Diese Resultate beschreiben die zukünftigen Zustände unter der Annahme, dass konsequenter Klimaschutz betrieben wird (RCP 2.6) und andererseits, dass es nicht gelingt die Emissionen zu reduzieren (RCP 8.5). Aus dieser Konfiguration ergeben sich zwei Interpretationsmöglichkeiten: Sie zeigt auf der einen Seite die Bandbreite möglicher Entwicklungen im Kanton Solothurn auf und deckt auf der anderen Seite den Zusammenhang zwischen Treibhausgasemissionen und den zu erwartenden hydrologischen Veränderungen im Kanton auf.

6.1.1 Hydrologische Veränderungen

In den Figuren 6.1 bis 6.4 dokumentieren jeweils fünf Karten pro Zeitraum und Emissionsszenario die hydrologischen Veränderungen. Bei der obersten Karte handelt es sich jeweils um die finale Synthesekarte. In diese Synthesekarte fliessen die Kriterien Sommerabfluss und Trockenheitsanfälligkeit ein, welche neben dem Jahresabfluss und Winterabfluss in vier Karten im unteren Teil der Figuren abgebildet sind. Sommerabfluss sowie Trockenheitsanfälligkeit wurden für die Synthese ausgewählt, weil sie aus wasserwirtschaftlicher Sicht besonders relevant sind. Um trotzdem ein möglichst komplettes Bild zu vermitteln, sind stets auch der sich kaum verändernde Jahresabfluss und der zunehmende Winterabfluss dargestellt. Die Abflusszunahme im Winter wurde für die Synthesekarte nicht mit einbezogen, da nicht klar ist, inwieweit Überschüsse aus dem Winter Defizite im Sommerhalbjahr ausgleichen können.

Zur Herleitung der Synthesekarte entwickelten wir ein einfaches Punktesystem: Bei den gewählten zwei Kriterien wurden den einzelnen Klassen Punkte zugeordnet. Beim Sommerabfluss wurde die 1 vergeben für die Klasse, welche Abflussveränderungen zwischen -10 und +10 % enthält oder die 3 für die Klasse mit Veränderungen im Bereich zwischen -30 und -20 %. Bei der Trockenheitsanfälligkeit erhielt beispielsweise die Klasse «sehr klein» eine 1 und die Klasse «sehr gross» eine 4. Aus der Addition der Punkte der beiden Kriterien pro Bezirk ergibt sich dann die Bewertung in der Synthesekarte.

⁴⁵Der Bezirk Solothurn wurde dem Bezirk Wasseramt zugeordnet.

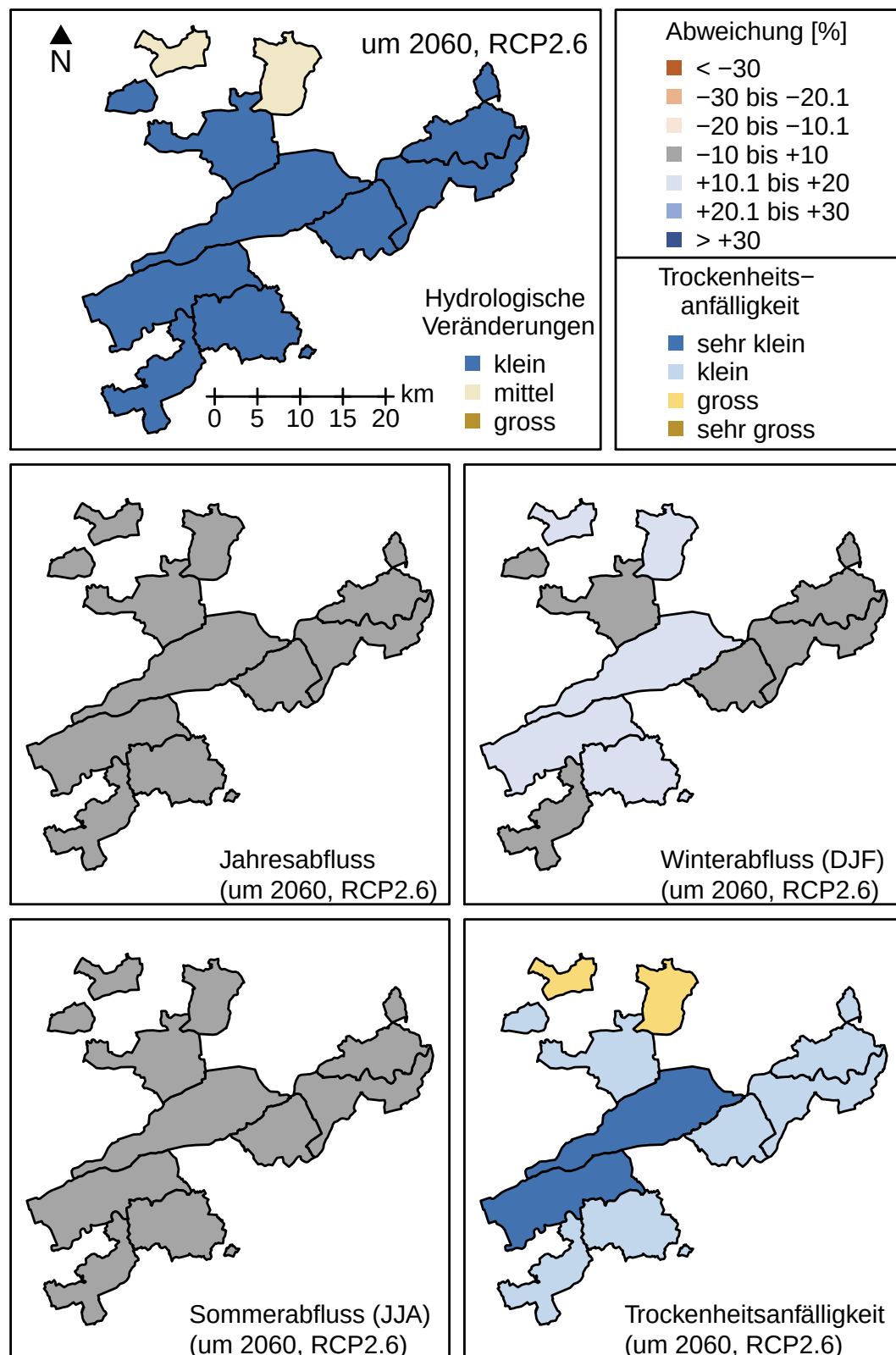


Fig. 6.1: Synthese Hydrologie 2060 für Szenario mit Klimaschutz (RCP 2.6). Dargestellt sind die Abweichungen und Veränderungen gegenüber der Periode 1981–2010

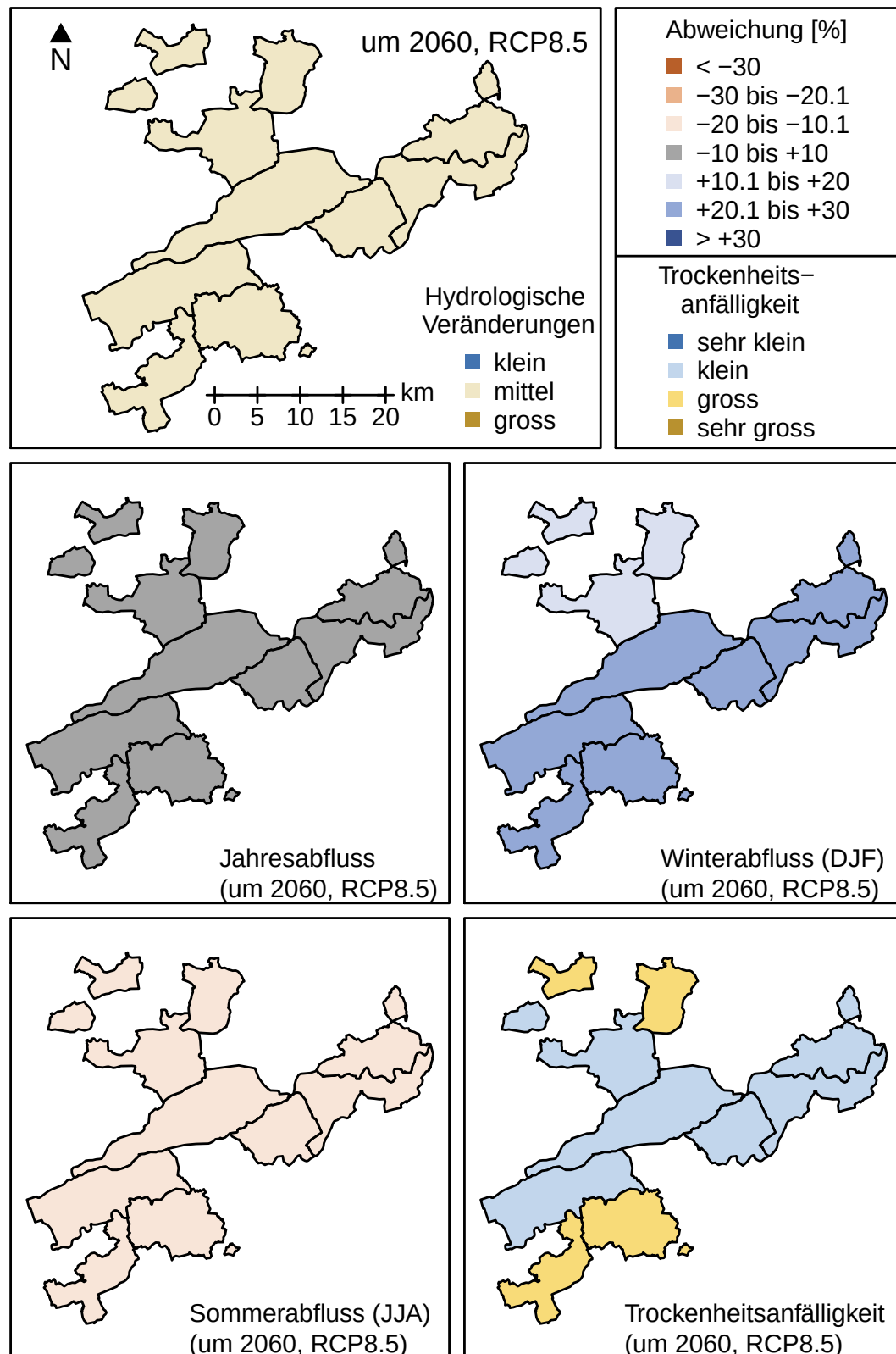


Fig. 6.2: Synthese Hydrologie 2060 für Szenario ohne Klimaschutz (RCP 8.5). Dargestellt sind die Abweichungen und Veränderungen gegenüber der Periode 1981–2010

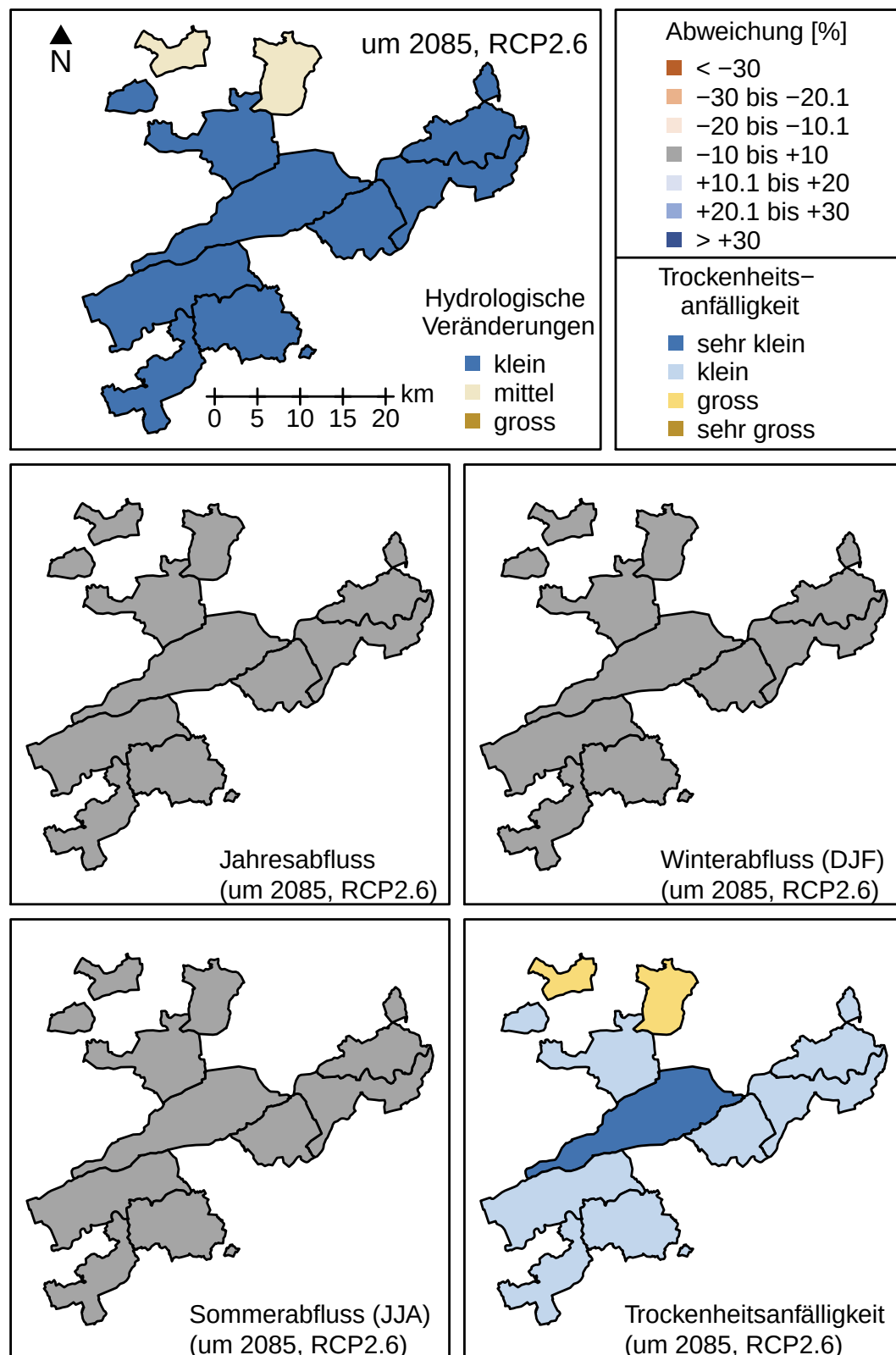


Fig. 6.3: Synthese Hydrologie 2085 für Szenario mit Klimaschutz (RCP 2.6). Dargestellt sind die Abweichungen und Veränderungen gegenüber der Periode 1981–2010

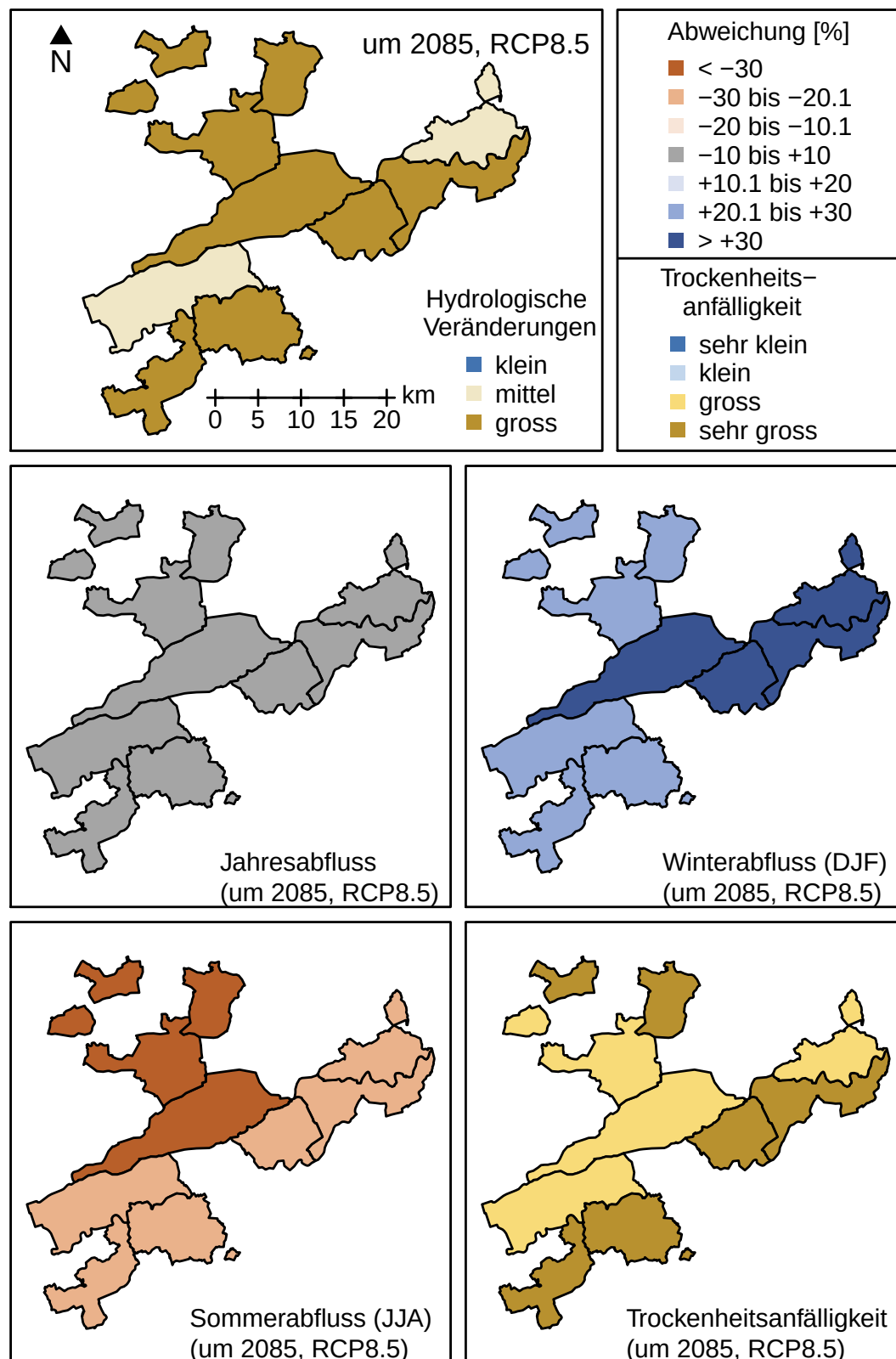


Fig. 6.4: Synthese Hydrologie 2085 für Szenario ohne Klimaschutz (RCP 8.5). Dargestellt sind die Abweichungen und Veränderungen gegenüber der Periode 1981–2010

Veränderung um 2060

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Figuren 6.1 und 6.2. Beim Szenario mit Klimaschutz (RCP 2.6) sind in der Gesamtbeurteilung nur kleine Veränderungen gegenüber heute erkennbar. Einzig beim Bezirk Dorneck wird die Veränderung aufgrund der erhöhten Trockenheitsanfälligkeit als «mittel» eingestuft. Bei den Abflüssen sind gegenüber heute in einzelnen Bezirken leicht erhöhte Winterabflüsse zu erwarten.

Hingegen werden sich die hydrologischen Verhältnisse beim Szenario ohne Klimaschutz (RCP 8.5) in allen Bezirken gegenüber 1981–2010 verändern, und zwar vor allem aufgrund der Zunahme der mittleren winterlichen Abflüsse um mehr als 10 % und der Abnahme der mittleren sommerlichen Abflüsse um 10 bis 20 %. Der mittlere Jahresabfluss wird sich aber nicht oder höchstens geringfügig verändern. Im Vergleich zum Szenario RCP 2.6 ist in einigen Bezirken die Trockenheitsanfälligkeit aufgrund einer Zunahme der meteorologischen Trockenheitsanfälligkeit erhöht. Es handelt sich dabei um die Bezirke Bucheggberg, Wasseramt und Thal.

Hydrologische Veränderungen um 2085

Die Figuren 6.3 und 6.4 vermitteln einen Überblick über die Situation um 2085. Beim Szenario mit Klimaschutz ist die Gesamtbeurteilung (Synthesekarte) der beiden Zeiträume um 2060 und um 2085 nicht nur identisch, sondern sie zeigt auch, dass sich bei diesem Szenario in den kommenden achtzig Jahren wenig verändern wird. Es ist bemerkenswert, dass die mittleren Abflüsse im Winter, die um 2060 in den Bezirken Bucheggberg, Wasseramt, Thal und Dorneck gegenüber 1981–2010 leicht erhöht sind, um 2085 wieder auf dem heutigen Niveau sein werden.

Ein aus hydrologischer Sicht völlig verändertes Bild des Kantons Solothurn ergibt sich, wenn das Szenario ohne Klimaschutz (RCP 8.5) eintreten sollte:

- In sieben von neun Bezirken sind die hydrologischen Veränderungen gross. Die beiden Ausnahmen bilden Lebern und Gösgen mit mittleren Veränderungen.
- Die mittleren Winterabflüsse werden in den Bezirken Bucheggberg, Wasseramt, Lebern, Thierstein und Dorneck um etwa 20 - 30 % gegenüber 1981–2010 zunehmen, in den Bezirken Thal, Gäu, Olten und Gösgen sogar um mehr als 30 % gegenüber heute.
- Sehr grosse Abnahmen sind bei den mittleren sommerlichen Abflüssen zu erwarten. Im nördlichen Kantonsteil (Thal, Thierstein, Doreck) betragen sie über 30 %; im südlichen Kantonsteil liegen sie zwischen 20 und 30 %.
- Als Folge der gegenüber heute stark erhöhten meteorologischen Trockenheitsanfälligkeit ist die Trockenheitsanfälligkeit im ganzen Kanton hoch bis sehr hoch. Am stärksten sind die Bezirke Bucheggberg, Wasseramt, Gäu, Olten und Dorneck betroffen.

- Einzig der mittlere Jahresabfluss wird sich im Vergleich zu heute nur wenig verändern. Dies ist sowohl aus hydrologischer als auch aus wasserwirtschaftlicher Sicht ein sehr bedeutender Punkt!

6.1.2 Veränderungen beim im Sommer nutzbaren Wasser

In den Figuren 6.5 und 6.6 sind die Resultate der Tabellen 5.7 und 5.9 kartographisch für die Bezirke bzw. in Säulendiagrammen für Aare und Emme umgesetzt. Bei den Bezirken wird die Verfügbarkeit von Wasser für Ökologie, Unterlieger und Landwirtschaft im Sommer (Juni, Juli, August) ausgewiesen. Eine grosse Verfügbarkeit bedeutet beispielsweise, dass der gemeinsame Wasserbedarf dieser drei Nutzer sehr oft (in 90–95 % der Fälle, s. Tab. 5.7) gedeckt werden kann. Bei Aare und Emme wird der Prozentsatz der Jahre der jeweiligen 30-jährigen Periode ausgewiesen, in denen im Sommer Wasser nach Abzug des Bedarfs von Ökologie und Unterlieger beispielsweise für die landwirtschaftliche Bewässerung nutzbar ist.

Veränderungen um 2060

Die Verfügbarkeit von Wasser ist bei beiden Szenarien in der Periode 2040–2069 mittel bis gross. Ausnahmen machen der Bezirk Thal beim Szenario mit Klimaschutz durch eine sehr grosse Verfügbarkeit von Wasser und der Bezirk Bucheggberg beim Szenario ohne Klimaschutz durch eine kleine Verfügbarkeit von Wasser. Im Allgemeinen ist die Wasserverfügbarkeit aber beim Szenario mit Klimaschutz besser. In dieser Periode kann Aare- und Emmewasser beim Szenario mit Klimaschutz in 80–90 % der Jahre, beim Szenario ohne Klimaschutz in 70–90 % der Jahre genutzt werden. Dieses an sich günstige Bild, das die mittleren Verhältnisse charakterisiert, darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass gerade in trockenen oder sehr trockenen Jahren, wenn der Wasserbedarf gross ist, unter Umständen kein oder nur wenig Wasser aus Aare und Emme bezogen werden kann, da vermutlich auch diese von Trockenheit betroffen sind.

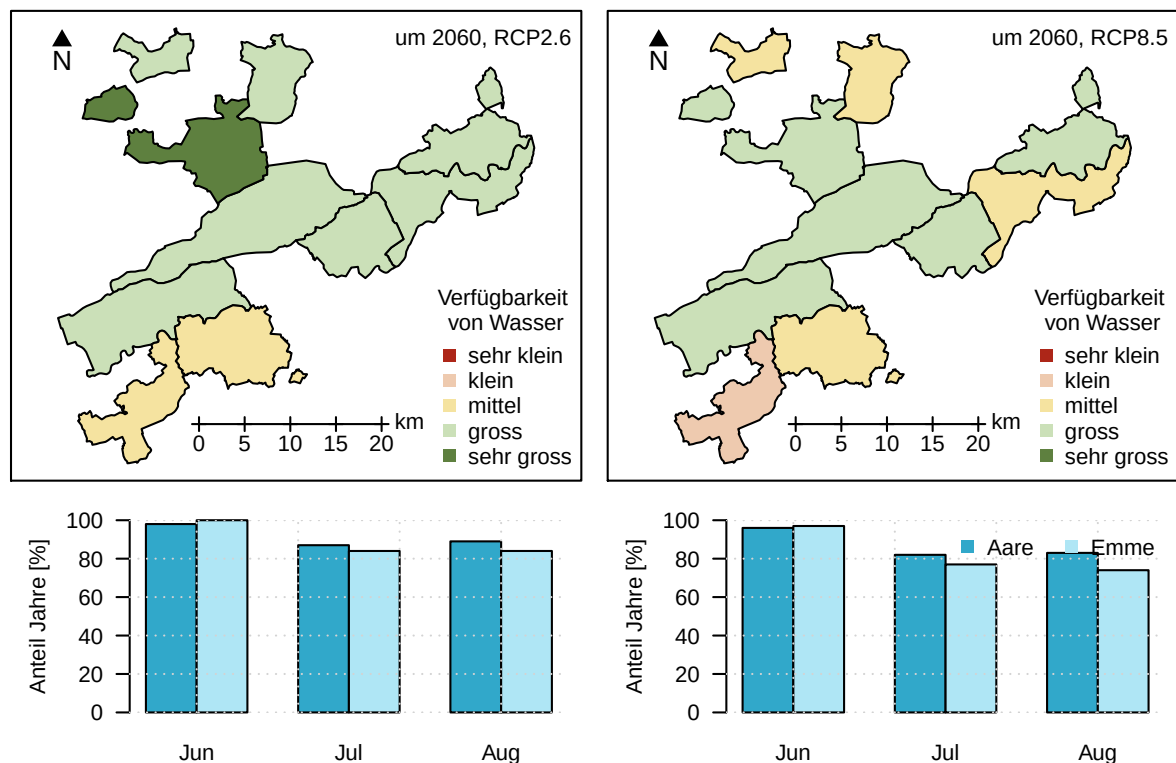


Fig. 6.5: Synthese zum im Sommer nutzbaren Wasser 2060 für Szenario mit (RCP 2.6) und ohne Klimaschutz (RCP 8.5). Dargestellt sind die Verfügbarkeit von Wasser in den Bezirken und der Prozentwert der Jahre, in denen Aare- und/oder Emme-Wasser genutzt werden kann.

Veränderungen um 2085

Bei einem Emissionspfad mit Klimaschutz wird sich im Kanton Solothurn im Laufe dieses Jahrhunderts wenig verändern. Gegen Ende des Jahrhunderts wird die Verfügbarkeit von Wasser in den Bezirken – mit Ausnahme von Bucheggberg und Wasseramt – zufriedenstellend sein. In den beiden erwähnten Bezirken werden häufiger Situationen mit beschränkter Wasserverfügbarkeit auftreten.

Kritisch zeigt sich die Situation bei einem Szenario ohne Klimaschutz. Die Veränderungen, welche bereits um 2060 erkennbar sind, haben sich verstärkt. Jeder Bezirk ist um eine Klasse nach unten gerutscht, zum Beispiel Gäu von «gut» zu «mittel» oder Bucheggberg von «klein» zu «sehr klein». Die im Vergleich mit den anderen Bezirken schlechteste Wasserverfügbarkeit weisen die Bezirke Bucheggberg, Wasseramt und Dorneck auf. Bei diesem Szenario muss auch damit gerechnet werden, dass in trockenen Jahren kein Wasser aus den beiden Zuflüssen Emme und Aare bezogen werden kann, weil sie im Juli und August nur noch in 40–70 % der Jahre über nutzbares Wasser verfügen.

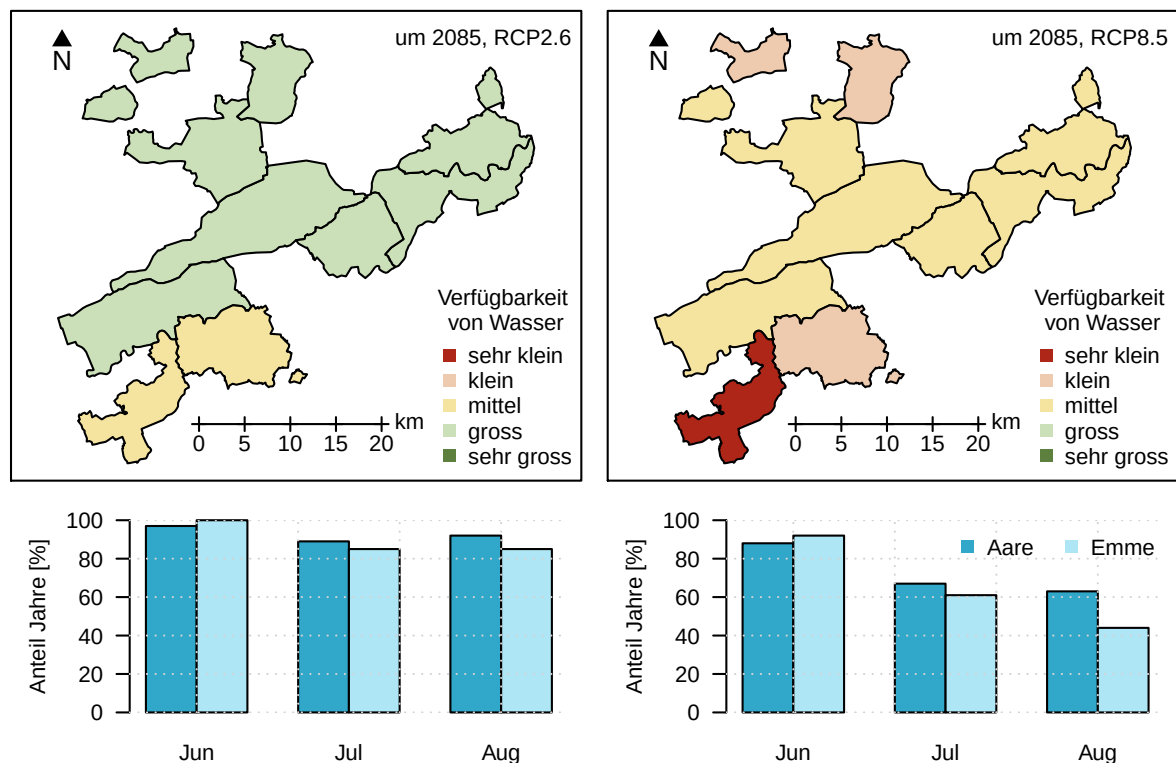


Fig. 6.6: Synthese zum im Sommer nutzbaren Wasser 2085 für Szenario mit (RCP 2.6) und ohne Klimaschutz (RCP 8.5). Dargestellt sind die Verfügbarkeit von Wasser in den Bezirken und der Prozentwert der Jahre, in denen Aare- und/oder Emme-Wasser genutzt werden kann.

6.2 Kernbotschaften

1. Der Emissionspfad, also die Art und Weise, wie sich die globalen Treibhausgasemissionen weiter entwickeln werden, ist alles entscheidend für das Ausmass der hydrologischen Veränderungen und der Veränderungen hinsichtlich des nutzbaren Wassers im Kanton Solothurn.
 - Das Szenario mit Klimaschutz (RCP 2.6) führt zu einer zukünftigen hydrologischen Welt, die der heutigen sehr ähnlich ist.
 - Beim Szenario ohne Klimaschutz (RCP 8.5) sind signifikante Veränderungen zu erwarten, die sich im Laufe dieses Jahrhunderts laufend verstärken werden. Für den Sommer zeichnen sich kritische Verhältnisse ab. Alle Bezirke werden von Veränderungen betroffen sein, besonders aber die Bezirke Bucheggberg, Wasseramt und Dorneck.
2. Bei den langjährigen mittleren jährlichen Abflüssen sind in Zukunft kaum Zu- oder Abnahmen zu erwarten. Zusammen mit der Zunahme der Winterabflüsse (vor allem RCP 8.5)

ist dies eine günstige Ausgangslage für Anpassungsmassnahmen zur Abminderung der Auswirkungen sommerlicher Trockenheiten (z.B. durch den Bau lokaler Bewässerungsspeicher).

3. Ausser im Frühling sind die Vorzeichen der hydrologischen Veränderungen – aber nicht deren Ausmass – bei allen Emissionsszenarien gleich. Beispielsweise nehmen die Winterabflüsse bei beiden Emissionsszenarien zu und die Sommerabflüsse ab. Einzig die Stärke der Zu- bzw. Abnahmen ist unterschiedlich. Dies erleichtert die Massnahmenplanung aufgrund der gleichgerichteten, vom Emissionsszenario unabhängigen Entwicklung.
4. Durch die weiterhin intakte oder gar erhöhte Grundwasserneubildung im Winter gewinnt das Grundwasser noch weiter an Bedeutung.
5. Aare- und Emme-Wasser kann auch in Zukunft genutzt werden; allerdings kann man sich in Trockenjahren nicht immer auf dieses Zusatzwasser verlassen.

6.3 Auf den Punkt gebracht

1. Gelingt es, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren und mittelfristig zu eliminieren (Emissionsszenario RCP 2.6), werden sich die hydrologischen Veränderungen im Kanton Solothurn im Vergleich zu heute kaum oder nur unwesentlich verändern.
2. Bei einem Szenario ohne Klimaschutz werden saisonal entscheidende Veränderungen eintreten, wobei die Abnahmen des nutzbaren Wassers im Sommer einschneidend sind. Eine integrierte Bewirtschaftung der kantonalen Fliessgewässer, der Grundwasserressourcen und der Zuflüsse von Aare und Emme ist die Voraussetzung, den zukünftigen Wasserbedarf im Sommer zu sichern. Günstiger Ausgangspunkt dafür sind die ergiebigen Grundwasserressourcen (vor allem im südlichen Kantonsteil), die unveränderten langjährigen mittleren Jahresabflüsse und die Erhöhung der langjährigen mittleren Abflüsse im Winter.
3. Mit einer pro-aktiven Massnahmenplanung beginnt man angesichts der möglichen hydrologischen Veränderungen besser heute als morgen. Denn: Die bisher beobachteten kumulativen CO₂-Emissionen stimmen weitgehend mit jenen des Szenarios ohne Klimaschutz (RCP 8.5) überein. Aber nicht nur das: Mit den aktuell von den Nationen deklarierten Emissionszielen verbleiben wir weiterhin auf diesem ungünstigen Emissionspfad des RCP 8.5-Szenarios⁴⁶.

⁴⁶<https://www.sciencedaily.com/releases/2020/08/200804085912.htm>

Impressum

Herausgeber, Bezugsquelle Amt für Umwelt

Greibenhof
Werkhofstrasse 5
4509 Solothurn
Telefon +41 32 627 24 47
afu@bd.so.ch
afu.so.ch

Projektleitung

Dr. Martin Heeb, Amt für Umwelt (AfU)

Projektbegleitung

Gabriel Zenklusen (AfU)
Dr. Philipp Staufer (AfU)
Christoph Dietschi (AfU)
Norbert Emch (ALW)
Jennifer Jauch (ALW)

Text und Konzept

Dr. Rolf Weingartner, Prof. em. Universität Bern, ecosfera gmbh, Courtelary
Jan Schwanbeck, ecosfera gmbh, Courtelary

© by

Amt für Umwelt 2021

