

Heft 139, 2023

WSL Berichte

doi.org/10.55419/wsl:35308



+4 °C und mehr: Schweizer Landschaften im Klimawandel

Silvia Tobias
Elena G. Siegrist
Luca Bütikofer
Matthias Bürgi
Karina Liechti
Emmanuel Reynard
Antoine Guisan
Davnah Urbach
Christophe Randin



Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
CH-8903 Birmensdorf

Heft 139, 2023

WSL Berichte

doi.org/10.55419/wsl:35308

+4 °C und mehr: Schweizer Landschaften im Klimawandel

Silvia Tobias
Elena G. Siegrist
Luca Bütikofer
Matthias Bürgi
Karina Liechti
Emmanuel Reynard
Antoine Guisan
Davnah Urbach
Christophe Randin

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Verantwortlich für dieses Heft
Matthias Bürgi, Leiter Forschungseinheit Landschaftsdynamik WSL

Schriftleitung: Sandra Gurzeler, Teamleiterin Publikationen, WSL

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Biodiversität und Landschaft, CH-3003 Bern
Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
Auftragnehmer: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

Autoren/Autorinnen:

Silvia Tobias, Zentrum Landschaft, WSL

Elena G. Siegrist, Forschungseinheit Landschaftsdynamik, WSL

Luca Bütikofer, Centre alpin de phytogéographie (CAP) et Centre interdisciplinaire de recherche sur la montagne (CIRM), Université de Lausanne

Matthias Bürgi, Forschungseinheit Landschaftsdynamik, WSL

Karina Liechti, Stiftung Landschaftsschutz Schweiz

Emmanuel Reynard, Institut de géographie et durabilité et Centre interdisciplinaire de recherche sur la montagne (CIRM), Université de Lausanne

Antoine Guisan, Département d'écologie et évolution (DEE), Institut des dynamiques de la surface terrestre (IDYST), et Centre interdisciplinaire de recherche sur la montagne (CIRM), Université de Lausanne

Davnah Urbach, Global Mountain Biodiversity Assessment (GMBA), Université de Berne, et Centre interdisciplinaire de recherche sur la montagne (CIRM), Université de Lausanne

Christophe Randin, Centre alpin de phytogéographie (CAP), Fondation Jean-Marcel Aubert, Champex-Lac et Centre interdisciplinaire de recherche sur la montagne (CIRM), Université de Lausanne

Begleitung BAFU: Johann Dupuis, Matthias StremLOW, Gilles Rudaz, Guirec Gicquel
Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.
Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Layout: Jacqueline Annen, WSL

Zitiervorschlag:

Tobias S., Siegrist E., Bütikofer, L., Bürgi M., Liechti K., Reynard E., Guisan A., Urbach D., Randin C. (2023) +4°C und mehr: Schweizer Landschaften im Klimawandel. WSL Ber. 139. 53 S. doi.org/10.55419/wsl:35308 PDF Download: www.wsl.ch/berichte

ISSN 2296-3448 (Print)

ISSN 2296-3456 (Online)

Bildnachweis Umschlag:

Aktueller Zustand der Gletscher des Mont Blanc du Cheillon und des Pigne d'Arolla hinter der Staumauer Grande Dixence im Val d'Héremence (VS), modellierter Gletscherschwund bei fortschreitender Klimaerwärmung bis zu +4°C © Luca Bütikofer, UNIL; Heutige Landschaft im Seeland, Landschaft im Seeland bei +4°C unter reaktiver bzw. proaktiver Strategie zur Anpassung an den Klimawandel © Jonas Christen, Ikonaut GmbH

Forschung für Mensch und Umwelt: Die Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL überwacht und erforscht Wald, Landschaft, Biodiversität, Naturgefahren sowie Schnee und Eis. Sie ist ein Forschungsinstitut des Bundes und gehört zum ETH-Bereich. Das WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF ist seit 1989 Teil der WSL.



Diese Publikation ist Open Access und alle Texte und Fotos, bei denen nichts anderes angegeben ist, unterliegen der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0. Sie dürfen unter Angabe der Quelle frei vervielfältigt, verbreitet und verändert werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	5
2 Einleitung	7
2.1 Hintergrund	7
2.2 Ziele des Projekts	7
2.3 Auswahl der Fallbeispiele	8
2.4 Wahl der Klimaszenarien	8
3 Methodisches Vorgehen	11
3.1 Überblick über das Vorgehen	11
3.2 Qualitative Szenarientwicklung	11
3.2.1 Konzeptionelles Systemmodell	12
3.2.2 Storylines	14
3.3 Quantitative Modellierungen	16
3.3.1 Modell zur Vorhersage der Landnutzungen	17
3.3.2 Allokationsmodell für die Landnutzungen	17
3.3.3 Vorhersagemodell für Pflanzengesellschaften	19
3.3.4 Spezielle Auswertungen und Indikatoren	19
3.4 Visualisierungen	20
4 Resultate: die wichtigsten Landschaftsveränderungen der Schweiz als in Folge des Klimawandels	21
4.1 Grossräumige Landschaftsveränderungen in der ganzen Schweiz	21
4.2 Landschaftsveränderungen im Berggebiet	22
4.2.1 Graue und grüne an Stelle weisser Berggipfel	22
4.2.2 Berglandwirtschaft als landschaftsprägendes Element	25
4.3 Landschaftsveränderungen im Mittelland	27
4.3.1 Hitze und Trockenheit prägen die Landschaft	27
4.3.2 Gewässer: vom Rinnsal zur Sturzflut	28
5 Storylines zu den Landschaften im Klimawandel	29
5.1 Eine Wanderung im Seeland 2085	29
5.1.1 Dichtes Siedlungsgebiet	31
5.1.2 Agrarlandschaft	31
5.1.3 Flusslandschaft	34
5.1.4 Ländliche Zentrumsgemeinde	35
5.1.5 Feuchtgebiet	35
5.1.6 Wald	37
5.1.7 Am Aussichtsturm	38
5.2 Eine Wanderung im Entremont 2085	38
5.2.1 Bergdorf	40
5.2.2 Fluss	41
5.2.3 Wildbach	41
5.2.4 Wald	42
5.2.5 Mit der Seilbahn zum Aussichtspunkt	45
5.2.6 See im ehemaligen Gletschergebiet	45
5.2.7 Berglandwirtschaft	46
5.2.8 Aussicht zur grossen Tourismusdestination	48
6 Diskussion und Schlussfolgerung	49
7 Quellenverzeichnis	51

Link zu den Kurzvideos: <https://www.doi.org/10.16904/envidat.451>

Link zu den Panoramabildern: <https://viergrad.envidat.ch/>



1 Zusammenfassung

Landschaft ist in ihrer Vielfalt eine wichtige Ressource der Schweiz und eng verbunden mit einer guten Lebensqualität. Dennoch wurden die möglichen Veränderungen von Landschaften durch den Klimawandel bislang kaum thematisiert. Dieses Projekt hat Szenarien dazu entwickelt und visualisiert, wie sich der Klimawandel auf die Landschaft auswirken könnte. Das Ziel des Projekts war die Sensibilisierung der Gesellschaft für die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landschaft. Es wurde eine relativ starke Klimaerwärmung angenommen, die entsprechend hohe Risiken für den Menschen und die Umwelt birgt. Die Szenarien gehen von einem mittleren Temperaturanstieg von etwa 4 °C gegenüber der Durchschnittstemperatur im Zeitraum von 1981 bis 2010 aus. Sie bilden also Zustände ab, bei denen die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens von 2015 nicht erreicht worden sind.

Auf Basis einer Literaturrecherche und Experteninterviews erstellten wir einerseits ein qualitatives Wirkungsmodell, auf dessen Grundlage wir Szenarien für die Landschaft in einem wesentlich wärmeren Klima herleiteten. Andererseits modellierten wir die Veränderungen des Landnutzungspotenzials und der Artenzusammensetzungen von Pflanzengesellschaften mit quantitativen Methoden.

Im Fokus standen zwei Beispiele typischer Schweizer Landschaften im Berggebiet und im Mittelland. Als Berggebietslandschaft wählten wir die Region Entremont (VS) und für das Mittelland das Berner Seeland (BE). Die Modellierung erfolgte weitgehend für die ganze Schweiz. Detaillierte Betrachtungen bezogen sich jedoch auf die Fallregionen.

Als Grundlage unserer Landschaftsszenarien dienten die aktuellen Klimaszenarien für die Schweiz (CH2018) des National Centre for Climate Services (NCCS). Um insbesondere auf die Risiken infolge des Klimawandels aufmerksam zu machen, wählten wir das Szenario RCP8.5, worin eine allgemeine Erwärmung um 4 °C gegenüber der Periode 1981–2010 möglich ist. Zudem gingen wir von zwei verschiedenen Strategien zur Anpassung an den Klimawandel aus: einer rein reaktiven, kurzfristigen Planung von Massnahmen und einer proaktiven, vorausschauenden Planung von Massnahmen.

Die im Projekt entwickelten Modelle ergaben, dass sich die Schweizer Landschaften infolge des Klimawandels erheblich verändern werden. Im Berggebiet werden das Verschwinden der Gletscher und das Ansteigen der Baum- und Vegetationsgrenze die markantesten Landschaftsveränderungen darstellen. Wegen der veränderten Vegetationsbedingungen wird sich die Artenzusammensetzung der Wälder überall verändern. Buchen und Nadelhölzer werden im Mittelland infolge Trockenheit nur noch schlechte Lebensbedingungen vorfinden und daher in höhere Lagen wandern. In den Mittellandwäldern sollten Laubgehölze als zukünftige Hauptbaumarten gewählt werden. Wenn sich leicht entzündliche Nadelhölzer (z. B. Kiefern) in höheren Lagen ansiedeln, kann das Risiko für Waldbrände im Jura und Alpenraum ansteigen.

Die Naturgefahrensituation wird sich allgemein ändern. Im Berggebiet ist vermehrt mit Hangrutschen und Bergstürzen, aber weniger Lawinenabgängen zu rechnen, während im Mittelland Hochwasser die Siedlungen, Infrastrukturen und Landwirtschaftsflächen häufiger bedrohen. Welchen Einfluss das Naturgefahrenrisiko auf die Landschaft haben wird, hängt davon ab, welche Strategie zum Schutz vor diesen Gefahren gewählt wird. Massive Stützmauern und hohe Dämme ergeben ein anderes Landschaftsbild als Hänge mit Schutzwäldern und Gewässeraufweitungen, wobei letztere grössere Flächen in Anspruch nehmen werden.

Auch das zukünftige Aussehen des Siedlungsraums und Landwirtschaftslands hängt stark davon ab, wie sich Politik und Gesellschaft an den Klimawandel anpassen. Die Siedlungen können mit Grünräumen und offenen Wasserflächen durchsetzt werden, um die Hitze abzumildern. Oder es wird auf gekühlte Innenräume gesetzt, was an den Klimaanlagen an den Gebäuden erkennbar wird. Auf den Landwirtschaftsflächen werden die Strategien zur Anpassung an den Klimawandel ausschlaggebend sein für das zukünftige Erscheinungsbild. Die Umstellung auf trockenheitsresistente Kulturen, umfangreiche Bewässerungssysteme und ausgedehnte Gewächshausanlagen für den geschützten Anbau werden die Landschaft stark beeinflussen.

Viele dieser landschaftswirksamen Massnahmen zur Anpassung an den Klimawandel müssen frühzeitig geplant und umgesetzt werden damit sie in einem veränderten Klima ihre Wirksamkeit entfalten können. Dazu gehören insbesondere Massnahmen zur Anpassung des Waldes an den Klimawandel, die Umgestaltung der Siedlungen sowie die Massnahmen zum Schutz vor Naturgefahren. Daher sollten wir uns bereits heute mit der Anpassung an den Klimawandel auseinandersetzen. Es ist allerdings anzumerken, dass in diesem Projekt von einem weiterhin ansteigenden Treibhausgasausstoss ausgegangen wurde. Massnahmen zur Abmilderung des Klimawandels und deren Auswirkungen auf die Landschaft wurden nicht berücksichtigt, sind aber ebenso wichtig wie die Anpassungsmassnahmen.

Um dem Anspruch der Sensibilisierung für die Folgen des Klimawandels gerecht zu werden, wurden die Szenarien als Geschichten (Storylines) verfasst. Diese beschreiben Spaziergänge durch Sommerlandschaften im Berggebiet und Mittelland in einer wesentlich wärmeren Zukunft. Zudem legten wir Wert auf die Visualisierung möglicher zukünftiger Landschaften. Neben verschiedenen Karten, die aus der quantitativen Modellierung resultierten, wurden für beide Falllandschaften interaktive 360°-Panoramabilder erstellt. Diese zeigen eine Rundumansicht möglicher zukünftiger Landschaftszustände je nachdem, ob eine reaktive oder proaktive Strategie zur Anpassung an den Klimawandel gewählt wird. Einzelne Details werden in Infoboxen, die sich beim Anklicken öffnen, erläutert. Schliesslich wurde für das Mittelland und Berggebiet je ein Kurzvideo gedreht. Diese Videos sollten in erster Linie auf die Panoramabilder und den vorliegenden Bericht aufmerksam machen.

Der vorliegende Bericht richtet sich an Fachleute aus dem Themenbereich Landschaft und die breite Öffentlichkeit. Kapitel 2 erläutert Hintergrund und Ziele des Berichts, Kapitel 3 erklärt die Methoden der quantitativen und qualitativen Modellierungen sowie der Entwicklung der Storylines und Visualisierungen. Kapitel 4 fasst die wichtigsten Resultate für die Schweiz und die Fallregionen zusammen. In Kapitel 5 finden sich die Storylines zu den Fallregionen mit Illustrationen aus den Panoramabildern. Die Diskussion der Ergebnisse in Kapitel 6 schliesst den Bericht ab. Die Visualisierungen (Karten, Panoramabilder, Animationen) sind als separate digitale Objekte verfügbar.

2 Einleitung

2.1 Hintergrund

Bereits heute ist der Klimawandel in verschiedenen Regionen der Erde, so auch in der Schweiz, mit Hitzewellen, Dürren oder Hochwasser spürbar. Die spezifischen Klimaszenarien für die Schweiz (CH2018) sagen starke Veränderungen des Temperatur- und Niederschlagsregimes voraus, die sich auf die Menschen, die natürlichen Ökosysteme, die Land- und Forstwirtschaft, die Naturgefahrensituation und schliesslich auf die Landschaft auswirken werden (NCCS 2018). Insgesamt werden infolge des Klimawandels für die Schweiz mehr Risiken als Chancen erwartet (Köllner *et al.* 2017). Während sich in einzelnen Regionen die Standortbedingungen für die Landwirtschaft oder den Sommertourismus verbessern können, werden für weite Teile der Schweiz Nachteile für Mensch und Umwelt erwartet, die infolge stärkerer Hitzebelastung, Trockenheit, verstärkter Hochwasser und anderer Naturgefahren sowie Artenverschiebungen und vermehrten Auftretens von Schadorganismen entstehen. Die Strategie des Bundesrats zur Anpassung an den Klimawandel verlangt deshalb koordinierte Massnahmen der verschiedenen Sektoralpolitiken, um die Chancen aus dem Klimawandel möglichst zu nutzen und die Risiken zu minimieren (Schweizerische Eidgenossenschaft 2020).

Als weitere Folge wird der Klimawandel auch die Landschaften grundlegend verändern. Die vielfältigen Landschaften sind wichtige Ressourcen der Schweiz, die zur Lebensqualität und Attraktivität des Wohnumfeldes beitragen und eine wirtschaftliche Grundlage für den Tourismus darstellen. Starke Veränderungen der ortstypischen (Kultur-)Landschaften infolge des Klimawandels können gesellschaftliche und wirtschaftliche Nachteile nach sich ziehen, weil sie wichtige Landschaftsleistungen wie Ästhetik, Identität oder Erholung beeinträchtigen (Keller und Backhaus, 2020; Keller *et al.* 2019). Trotz der Bedeutung der Landschaften für die Schweiz sind ihre möglichen Veränderungen infolge des Klimawandels bislang nur vereinzelt wissenschaftlich untersucht worden (z. B. Buttler *et al.* 2012).

Die zukünftigen Landschaftsveränderungen werden nicht nur eine natürliche Folge des Klimawandels sein, sondern auch stark vom Verhalten des Menschen abhängen. Die Landschaften werden anders aussehen, falls die Gesellschaft und die Politik bereits heute vorsorgliche Massnahmen ergreifen, als wenn lange nichts zur Anpassung an den Klimawandel unternommen wird. In der Wissenschaft dienen Szenarien der Beschreibung möglicher zukünftiger Zustände, die mit Unsicherheiten verbunden sind. Mithilfe von Indikatoren können zudem bestimmte Veränderungen messbar gemacht werden.

Allerdings helfen derartige wissenschaftliche Resultate nur beschränkt, die Öffentlichkeit von der Problematik des Klimawandels und der Handlungsnotwendigkeit zu überzeugen (Morris *et al.* 2019). Somit fehlt es an Grundlagen zur Sensibilisierung der breiten Öffentlichkeit für die Veränderungen der Schweizer Landschaften als Folge des Klimawandels. Um für eine abstrakte Bedrohung wie den Klimawandel zu sensibilisieren, der grosse zeitliche und räumliche Massstäbe betrifft, können sich Geschichten besser eignen (Harris 2020; Moezzi *et al.* 2017). Neben dem Geschichtenerzählen können auch Visualisierungen, insbesondere Bilder möglicher Landschaftsveränderungen, emotionale Reaktionen hervorrufen und sind deshalb geeignete Instrumente für die Sensibilisierung (Nicholson-Cole 2005; Vervoort und Kok 2010).

2.2 Ziele des Projekts

Das Projekt sollte zur Sensibilisierung für den Klimawandel und dessen Auswirkungen auf die Landschaften in der Schweiz beitragen. Seine Produkte sollten Landschaftsfachleute aus der Praxis und die breite Öffentlichkeit ansprechen. Im Projekt wurden Szenarien der Auswirkungen des Klimawandels auf die Landschaft entwickelt und visualisiert. Die Szenarien sollen die Chancen und Risiken infolge des Klimawandels möglichst deutlich darstellen. Deshalb gingen wir von einer starken Klimaerwärmung aus, d.h. um etwa 4°C mehr als die Durchschnittstemperaturen zwischen 1981 und 2010 (vgl. Kap.

2.4). Die Szenarien beschreiben somit Landschaftszustände, die eintreffen können, wenn die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens von 2015 nicht erreicht werden.

Das Projekt verfolgte drei konkrete Ziele:

1. Untersuchung der Wirkungspfade zwischen Klimawandel, Akteurshandlungen und Landschaftsveränderungen;
2. Modellierung der Veränderungen des Landnutzungspotenzials und der Pflanzengesellschaften unter veränderten klimatischen Bedingungen;
3. Anschauliche Beschreibung und Darstellung der Szenarien in Geschichten und Bildern.

Wir arbeiteten mit Fallbeispielen damit die Geschichten und Bilder konkrete Inhalte erhielten.

2.3 Auswahl der Fallbeispiele

Um möglichst konkrete Aussagen machen zu können, wurden zwei für die Schweiz typische Landschaftsräume gewählt: eine Region im Berggebiet und eine im Mittelland. Es ging darum, Landschaften zu untersuchen, die einen möglichst grossen Teil der Schweizer Bevölkerung betreffen, sei es in ihrem Alltag oder ihrer Freizeit. Als Berggebiet wählten wir den Bezirk Entremont im Kanton Wallis, da dort auf einem Höhengradienten von 3500 m verschiedene Landschaften vorzufinden sind, von regionalen Zentren und intensiven Landwirtschaftsflächen im Talboden über touristische Infrastrukturen in mittlerer Höhe bis zu weitgehend natürlichen Landschaften im Hochgebirge.

Für das Fallbeispiel im Mittelland wurde eine periurbane Landschaft gewählt, d. h. eine Landschaft ausserhalb der Agglomerationen mit Dörfern und Kleinstädten. Diese periurbanen Gebiete sind für einen beträchtlichen Teil der Schweizer Bevölkerung Wohn- und Erholungsraum. Veränderungen dieser Landschaften infolge des Klimawandels werden demnach viele Leute betreffen. Für die Herleitung der Szenarien und die Modellierungen wurde das Berner Seeland als Beispielregion gewählt. Auch die Visualisierungen in den Panoramabildern sind vom Seeland inspiriert. Allerdings wurde hier keine echte, sondern eine beispielhafte Landschaft auf der Basis verschiedener Fotografien erstellt. Auf diese Weise konnten die wichtigen Landschaftselemente der Seeland-Region in einem einzigen, übersichtlichen Bild dargestellt werden.

2.4 Wahl der Klimaszenarien

Zur Abschätzung des zukünftigen Ausmasses des Klimawandels werden in der Wissenschaft die Szenarien der «Representative Concentration Pathways» (RCP) verwendet (van Vuuren *et al.* 2011). Diese basieren hauptsächlich auf Annahmen zum zukünftigen Treibhausgasausstoss und sagen je nach Szenario eine Veränderung der oberflächennahen Energiebilanz der Erde um 2 bis fast 9 W/m² vorher. Seit dem fünften Sachstandsbericht des Weltklimarates (IPCC, 2013) werden die RCP als Grundlage für weltweite oder regionale Klimaszenarien verwendet. Auf dieser Basis wurden auch für die Schweiz spezifische Klimaszenarien entwickelt, die Vorhersagen für einzelne Regionen ermöglichen sollen (NCCS 2018).

Im vorliegenden Projekt stützten wir uns auf die Klimaszenarien CH2018 des NCCS (2018). Als Referenztemperatur wurde wie bei den NCCS-Szenarien die Durchschnittstemperatur der Jahre 1981 bis 2010 gewählt. Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landschaften möglichst deutlich hervorheben zu können und trotzdem realistische Szenarien darzustellen, erstellten wir die Szenarien entsprechend dem Konzentrationspfad RCP8.5 für die Zeitperiode «Ende des 21. Jahrhunderts», d. h. 2070–2099. Bei diesem Konzentrationspfad wird von einem fortgesetzten Wachstum der Treibhausgasemissionen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ausgegangen. Für die Schweiz kann daraus bis Ende dieses Jahrhunderts eine Erwärmung der Durchschnittstemperaturen um 3,3 bis 5,4°C gegenüber dem Zeitraum 1981–2010 erfolgen (NCCS, 2022). Die quantitativen und qualitativen Modellierungen basieren zudem auf zwei unter-

schiedlichen idealtypischen Strategien zur Anpassung an den Klimawandel: i) eine rein reaktive Anpassung (kurzfristige Planung und Umsetzung von Massnahmen) und ii) eine proaktive Anpassung (vorausschauende, langfristige Planung und Umsetzung von Massnahmen) (Abb. 2.1). Wir haben diese Extreme gewählt, um deutlich unterschiedliche Szenarien darstellen zu können, obschon sie in der Realität vermutlich nicht so umgesetzt werden. Strategien zur Abschwächung des Klimawandels konnten wir nicht berücksichtigen. Das Spektrum der Massnahmen zur Abmilderung der Klimaerwärmung ist sehr breit (vom teilweisen Verzicht auf Mobilität bis zur flächendeckenden Einrichtung von Sonnen- und Windkraftwerken) und die Auswirkungen auf die Landschaft können sehr unterschiedlich sein.

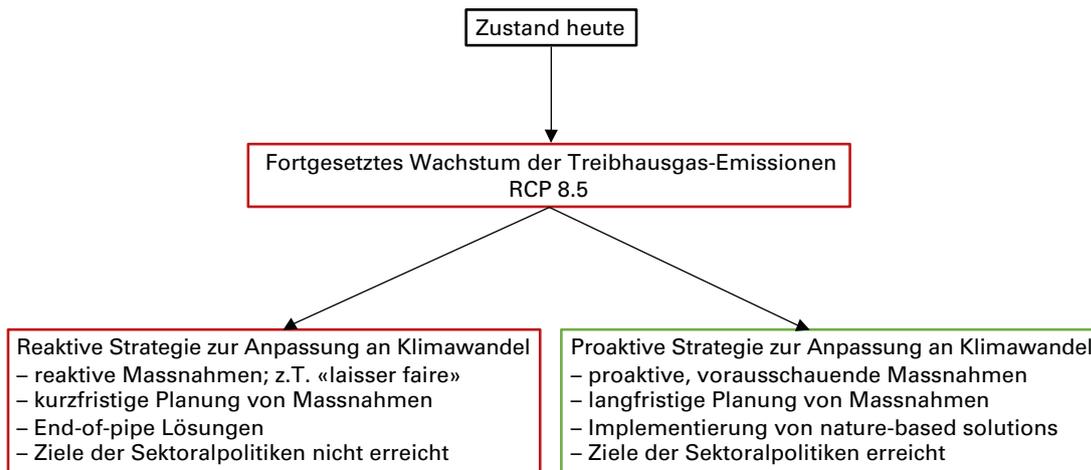


Abb. 2.1: Klimaszenarien, die für die Modellierung bzw. Herleitung der Storylines gewählt wurden.

3 Methodisches Vorgehen

3.1 Überblick über das Vorgehen

Um die Szenarien zukünftiger Landschaften in einem wesentlich wärmeren Klima herzu-leiten, kombinierten wir verschiedene wissenschaftliche Modellansätze: qualitative, auf logischen Folgerungen beruhende, und quantitative, rechnerische Ansätze. Einem qua-litativen Ansatz folgend analysierten wir die Wirkungspfade zwischen Klimawandel, Ak-teuren und Landschaftsveränderungen auf der Grundlage einer Literaturrecherche und Interviews mit Fachleuten. Daraus entwickelten wir ein konzeptionelles Systemmodell, das mögliche Landschaftsveränderungen als Folge der verschiedenen Wirkungspfade beschreibt. Gemäss einem quantitativen Ansatz modellierten wir mögliche Veränderungen der Landnutzungen und Vegetationszusammensetzung anhand von Landnutzungs-daten der Arealstatistik der Schweiz sowie von Vegetationsdaten von InfoFlora und dem schweizerischen Landesforstinventar der WSL. Zudem integrierten wir Vorhersagen po-tenzieller zukünftiger Vegetationsverteilungen, die im Projekt ValPar.CH gemacht wurden. Wir kombinierten die beiden Modellansätze, so dass sie sich gegenseitig unterstützten. So flossen Erkenntnisse zu den Wirkungspfaden aus dem konzeptionellen Systemmodell in die Festlegung der Regeln zur Modellierung der Landnutzungsänderungen ein. Umge-kehrt nutzten wir die Modellergebnisse zu den Vegetationsveränderungen für die detail-lierte Beschreibung von Landschaftsveränderungen im konzeptionellen Systemmodell. Die Ergebnisse aus den Modellen sind in Kapitel 4 zu einer Synthese zusammengestellt.

Die eigentlichen Szenarien der Landschaftsveränderungen infolge des Klimawandels und der gewählten proaktiven oder reaktiven Strategie zur Anpassung an den Klima-wandel werden in Geschichten, den «Storylines» in Kapitel 5, und Bildern dargestellt. Die Storylines beschreiben Wanderungen durch die wesentlich wärmeren zukünftigen Landschaften in den Fallregionen. Die Bilder zeigen 360°-Panoramaansichten der Bei-spiellandschaften. Die Texte und Bilder sollen ein Erlebnis der zukünftigen Landschaften in einem wesentlich wärmeren Klima ermöglichen. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse aus den qualitativen und quantitativen Modellen werden in den Texten und Bildern an-hand konkreter Einzelheiten veranschaulicht. Beispielsweise zeigen die Bilder zur Veran-schaulichung des erhöhten Waldbrandrisikos mehrere Rauchfahnen und die Storylines beschreiben abgebrannte Stellen im Wald. Schliesslich entwickelten wir Karten möglicher Landnutzungs- und Vegetationsveränderungen und für jede Beispiellandschaft ein kurzes Video, das auf die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landschaft aufmerksam ma-chen soll. Die folgenden Kapitel beschreiben das methodische Vorgehen im Detail.

3.2 Qualitative Szenarientwicklung

Nachfolgend wird ein Überblick über die angewendeten Methoden zur qualitativen Szenarientwicklung gegeben. Abbildung 3.1 gibt eine Übersicht über die Arbeits-schritte, die in den nächsten Abschnitten vorgestellt werden.



Abb. 3.1: Übersicht über das methodische Vorgehen zur Entwicklung der qualitativen Szenarien.

3.2.1 Konzeptionelles Systemmodell

Der erste Arbeitsschritt war die Erarbeitung eines konzeptionellen Systemmodells zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Landschaften in der Schweiz unter Einbezug von wissenschaftlicher Literatur und politischen Strategiedokumenten zur Anpassung an den Klimawandel sowie dem Wissen von Landschaftsfachleuten. Ziel dieses Systemmodells war die konzeptionelle Einbettung von bekannten möglichen direkten und indirekten (sektoralen) Auswirkungen des Klimawandels in Wirkungspfade. Diese Wirkungspfade sollten die Verbindung zwischen Klimawandel und den Veränderungen der Landschaften ersichtlich machen. Zudem sollten die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Wirkungspfadern aufgezeigt werden.

Grundstruktur

Siegrist (2022) schlägt eine Konzeptualisierung der Wirkungspfade von Klimawandel, Akteuren und Landschaft vor, die auf dem Konzept der «Driving Forces» nach Bürgi *et al.* (2004) basiert. Diese Konzeptualisierung eines gesamtheitlichen Landschaftsverständnisses und der Unterscheidung von direkten und indirekten Wirkungen des Klimawandels (Abb. 3.2) war die Grundlage für die Struktur des konzeptionellen Systemmodells.

Der Klimawandel wird in der Konzeptualisierung als einer von mehreren Treibern von Landschaftsveränderungen verstanden. Dabei kann der Klimawandel direkt Landschaftsveränderungen auslösen (direkte Wirkungspfade), es werden jedoch auch indirekte Wirkungspfade berücksichtigt, bei denen erst die menschlichen Reaktionen auf den Klimawandel bestimmte Landschaftsveränderungen auslösen.

Akteure können folgende drei Verhaltensweisen wählen:

- Keine Reaktion auf eine Auswirkung des Klimawandels zeigen (direkter Wirkungspfad)
- Mit ihrem Handeln die direkte Auswirkung des Klimawandels beeinflussen, beziehungsweise abschwächen (indirekter Wirkungspfad Typ I)
- Ihr Verhalten als Reaktion auf eine direkte Auswirkung des Klimawandels anpassen (indirekter Wirkungspfad Typ II)

Abbildung 3.3 zeigt für direkte Wirkungspfade sowie für indirekte Wirkungspfade Typ I und II Beispiele auf.

In der Konzeptualisierung wird eine ganzheitliche Landschaftsbetrachtung angestrebt, die sich nicht nur auf die Analyse räumlicher Muster und Prozesse innerhalb Landschaften fokussiert, sondern die Landschaft betrachtet als «eine von Menschen wahrgenommene Fläche, deren Charakter eine Manifestation der Aktion und Interaktion von natürlichen und/oder menschlichen Faktoren ist» (Council of Europe 2000: 2). Daher wird

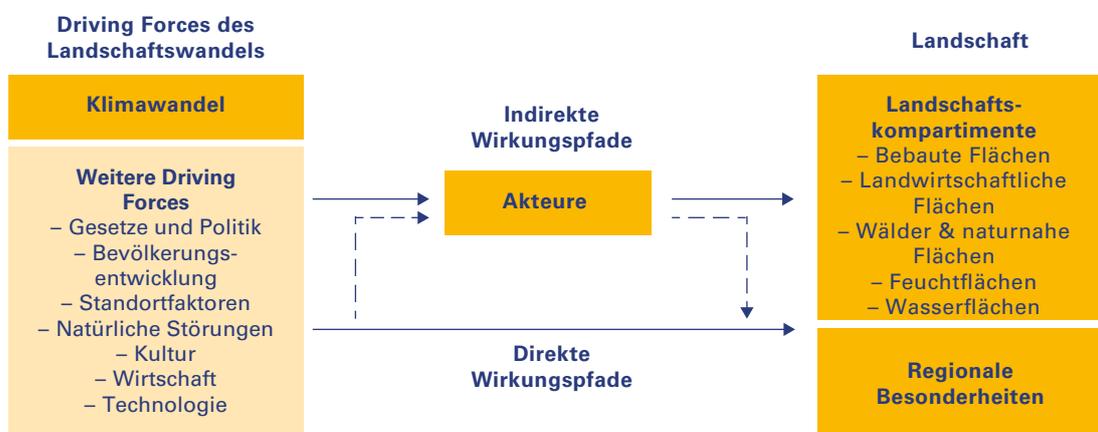


Abb. 3.2: Konzeptualisierung der Wirkungen zwischen Klimawandel, Akteuren und Landschaft nach Siegrist (2022).

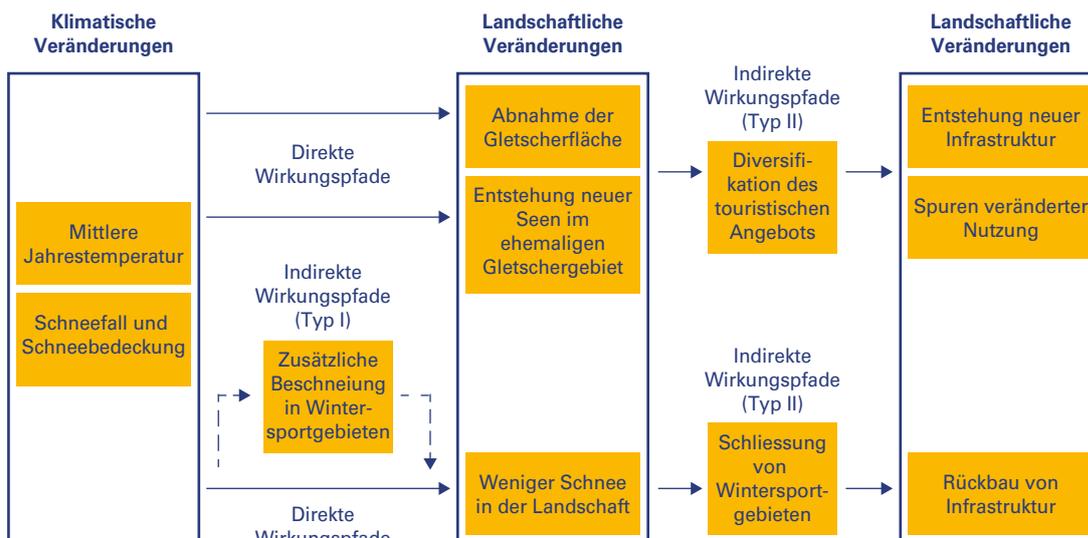


Abb. 3.3: Erläuterung der verschiedenen Arten von Wirkungspfaden anhand von Beispielen.

Landschaft als bestehend aus physischen Elementen und Flächen (Landschaftskompartimenten) sowie sogenannten regionalen Besonderheiten verstanden. Mit dem Einbezug der regionalen Besonderheiten wird unterstrichen, dass Landschaften einzigartige Charakteristika aufweisen, und sich der Klimawandel deshalb auf alle Landschaften, die menschlichen Wahrnehmungen dieser und die bereitgestellten Landschaftsleistungen unterschiedlich und spezifisch auswirkt.

Um im konzeptionellen Systemmodell spezifizieren zu können, welche Teile einer Landschaft von einer Veränderung betroffen sind, wurde auf die CORINE Land Cover Nomenklatur der Bodenbedeckungen, eine dreistufige hierarchische Nomenklatur, zurückgegriffen. Es wurden die ersten zwei Ebenen dieser Nomenklatur berücksichtigt und leichte Anpassungen vorgenommen.

Um die Grundstruktur des konzeptionellen Systemmodells zu erarbeiten, wurde das erläuterte Verständnis der Interaktionen von Klimawandel, Akteuren und Landschaft in Tabellenform übersetzt. Dadurch konnten die Wirkungspfade aus der wissenschaftlichen Literatur und Dokumenten der Sektoralpolitiken extrahiert und in eine einheitliche und vergleichbare Form gebracht werden. Zusammenhängende Wirkungspfade wurden miteinander verknüpft. Jeder indirekte Wirkungspfad wurde mit mindestens einem direkten Wirkungspfad verknüpft. Die genaue Struktur des konzeptionellen Systemmodells kann in Siegrist (2022) eingesehen werden.

Das konzeptionelle Systemmodell wurde für die Schweiz ausgearbeitet. Hinsichtlich der räumlichen Auflösung wurden diejenigen Wirkungspfade im konzeptionellen Systemmodell berücksichtigt, die direkt sichtbare landschaftliche Auswirkungen haben oder solche indirekt auslösen können.

Inhaltliche Grundlagen

Als erste inhaltliche Grundlage des konzeptionellen Systemmodells diente die wissenschaftliche Literatur zu den erwarteten Auswirkungen des Klimawandels auf die Landschaften. Mit Berücksichtigung des aktuellen Forschungsstandes zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Landschaften wurde hierfür hauptsächlich auf Literatur zu sektoralen Auswirkungen des Klimawandels zurückgegriffen. Die Literaturstudie wurde fortgesetzt, bis pro betroffenes Landschaftskompartiment keine neuen, relevanten Wirkungspfade mehr identifiziert werden konnten. Die Liste der berücksichtigten Publikationen ist in Siegrist (2022) einsehbar.

Als zweite inhaltliche Grundlage des konzeptionellen Systemmodells dienten Dokumente, die in Zusammenhang mit der nationalen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel veröffentlicht wurden. Denn diese Strategie wird die zukünftigen Anpassungsaktivitäten an die veränderten klimatischen Bedingungen leiten und diese wie-

derum werden landschaftlich signifikante indirekte Auswirkungen haben. Nebst den vom Bundesrat verabschiedeten Dokumenten «Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz; Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder» (Schweizerische Eidgenossenschaft 2012) sowie «Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz; Aktionsplan 2020–2025» (Schweizerische Eidgenossenschaft 2020) wurden Strategiedokumente der einzelnen Sektoren Wasserwirtschaft, Umgang mit Naturgefahren, Landwirtschaft, Waldwirtschaft, Energie, Tourismus, Biodiversitätsmanagement, Gesundheit und Raumentwicklung berücksichtigt, weil diese Sektoren die Hauptverantwortungen für die Umsetzung der Anpassungsziele tragen (Schweizerische Eidgenossenschaft 2012). Die Liste der berücksichtigten Strategiedokumente ist in Siegrist (2022) einsehbar.

Interviews mit Landschaftsfachleuten zur Validierung und Ergänzung des konzeptionellen Systemmodells

Nach der Literaturrecherche wurden Interviews mit Expertinnen und Experten mit einem umfassenden Landschaftsverständnis durchgeführt, mit dem Ziel: (1) die Wirkungspfade in den Landschaftskontext einzuordnen und deren Bedeutung für die Landschaft als multidimensionales Konzept zu erarbeiten, (2) einzelne Wirkungsketten aus dem konzeptionellen Systemmodell mit Fachpersonen inhaltlich zu vertiefen und (3) zu überprüfen, dass die wichtigsten Wirkungsketten im konzeptionellen Systemmodell enthalten waren bzw. fehlende Auswirkungen zu identifizieren.

Insgesamt wurden sieben semi-strukturierte Leitfadeninterviews durchgeführt, aufgezeichnet, transkribiert, codiert und analysiert. Die Auswahl der Befragten fand ausgehend vom konzeptionellen Systemmodell und den darin identifizierten Wissenslücken statt. Die Stichprobe umfasste je eine Fachperson zu den Landschaftskompartimenten Wald, Landwirtschaft und Gewässer mit zusätzlichem Fokus auf Klimawandel oder Landschaft, drei Fachleute zu Landschaftsdynamik und/oder Landschaftsökologie und eine Expertin mit Expertise zu ästhetischer Landschaftsqualität.

3.2.2 Storylines

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landschaft wurden in wissenschaftsbasierten Texten mit Erzählcharakter, den Storylines, synthetisiert. Wir wählten dieses Medium, weil Geschichten abstrakte Konzepte greifbarer machen, zur Informationsaufnahme und -speicherung beitragen und zum Handeln motivieren können (Harris 2020; Morris *et al.* 2019). Die Storylines sollten zu einem umfassenden Verständnis der landschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels beitragen.

Die Storylines wurden in leicht verständlicher und bildhafter Sprache aus Sicht einer Wandergruppe verfasst. So konnte der Inhalt aus der Sicht eines erlebenden Ichs vermittelt und den Lesern und Leserinnen leicht zugängliche Identifizierungsmöglichkeiten geboten werden. Die Landschaften werden in den Storylines möglichst objektiv und mit Fokus auf visuelle Elemente beschrieben. Wo für das Verständnis nötig, wurden Hintergrundinformationen zu den Wirkungsweisen des Klimawandels in die Storylines eingebaut. Deren Anteil wurde jedoch möglichst geringgehalten, um die Storylines möglichst konkret zu formulieren.

Die Handlung der Storylines beschreibt einen Spaziergang durch die durchschnittlich rund 4°C wärmeren Fallregionen gegen Ende des 21. Jahrhunderts. Die Spazerrouten wurden danach gewählt, dass auf alle charakteristischen Landschaftselemente Bezug genommen werden konnte (Rodewald *et al.* 2014). Der Haupthandlung wurde ein kurzer einleitender Text zur Orientierung der Leser vorangestellt, worin der Zeitpunkt der Handlung und die vorherrschenden klimatischen Bedingungen erläutert werden. Ebenfalls werden die Leserinnen darauf aufmerksam gemacht, dass bis Ende des 21. Jahrhunderts zusätzlich zum Klimawandel weitere Prozesse auf die Landschaft wirken werden, diese aber im Text nicht thematisiert werden.

Als inhaltliche Grundlage für die Formulierung der Storylines diente in erster Linie das erarbeitete konzeptionelle Systemmodell sowie die Ergebnisse aus den Interviews mit den Landschaftsexperten. Es konnten nicht alle Wirkungspfade aus dem konzeptionellen Systemmodell in die Storylines miteinbezogen werden. Einige fielen weg, weil sie Landschaftskompartimente betreffen, die in der Falllandschaft nicht vorkommen. An-

sonsten wurden jene Wirkungspfade berücksichtigt, die im konzeptionellen Systemmodell als besonders landschaftsrelevant klassiert oder von den Landschaftsexpertinnen als besonders gewichtig gewertet wurden.

Für die in den Storylines beschriebenen Landschaften sind auch andere Zukunftsszenarien realistisch und die reale Landschaft wird im Jahr 2085 mit höchster Wahrscheinlichkeit anders aussehen, als in den Storylines beschrieben. Einerseits, weil die Storylines auf den Klimawandel als Treiber von landschaftlichen Veränderungen fokussieren und andere, z.B. gesellschaftliche oder politische Treiber, die zeitgleich landschaftsverändernd wirken werden, nicht berücksichtigen. Andererseits, weil zwar wissenschaftlicher Konsens bezüglich vieler durch den Klimawandel ausgelösten Prozesse besteht, sich dieses Verständnis aber nicht zur deterministischen Vorhersage der Zukunft eignet. Trotzdem kann die wissenschaftlich fundierte Beschreibung einer möglichen zukünftigen Landschaft in einer Storyline zum Verständnis der Wirkungen des Klimawandels auf die Landschaften beitragen und eine vertiefte Auseinandersetzung mit dieser Thematik auslösen.

In den Storylines wurden sowohl die direkten als auch die indirekten Auswirkungen des Klimawandels auf die Landschaften thematisiert. So soll für die Leser und Leserinnen deutlich werden, dass die menschliche Reaktion auf den Klimawandel ebenfalls landschaftsprägend ist. Um dies zu erreichen, wurden die Storylines stellenweise in zwei Varianten verfasst: eine als Folge der reaktiven und eine zweite als Folge der proaktiven Strategie (vgl. Kap. 2.4). Die folgenden beiden Fragen gaben bei der Ausarbeitung der Varianten Orientierung:

- Wie wird sich die Landschaft verändern, wenn Politik und Gesellschaft ihr Verhalten gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels nicht vorausschauend verändern, sondern passiv auf die Auswirkungen reagieren?
- Wie wird sich die Landschaft verändern, wenn Politik und Gesellschaft ihr Verhalten gegenüber dem Klimawandel möglichst vorausschauend verändern und den Auswirkungen mit aktiven Anpassungsstrategien und entsprechenden Anpassungsaktivitäten begegnen?

Interviews mit regionalen Fachleuten zur Präzisierung der Storylines

Wir führten Interviews mit regionalen Experten und Expertinnen zu den Storylines durch, um diese im Hinblick auf regionale Besonderheiten und Charakteristika zu präzisieren. Wir befragten Personen, die die Regionen Entremont und Seeland in Bezug auf landschaftsrelevante Prozesse gut kennen. In den Interviews wurde ein besonderer Fokus auf die indirekten Auswirkungen des Klimawandels auf die Landschaften gelegt, weil diese stark von den Landnutzungsweisen der regionalen Akteure mitgeprägt werden.

Die Auswahl der Befragten fand ausgehend von den Storylines und den darin behandelten Hauptthemen statt. Unter den Befragten befanden sich Kantons-/Revierförster, Tourismusverantwortliche, Landwirtschaftliche Berater, Mitglieder von Gemeinde- und Stadträten sowie regionalen Gemeindeverbänden und schliesslich Vertreterinnen aus Industrie und Forschung. Insgesamt wurden in jeder Region mindestens fünf Personen in semi-strukturierten Leitfadenterviews befragt.

Thematisch waren die Fragen und das Interview nach den Schwerpunktthemen aus den Storylines gegliedert. Es wurden nicht alle Themen mit allen Personen besprochen, da dies den zeitlichen Rahmen der Gespräche oft gesprengt hätte. Aber jedes Thema wurde mit mindestens einer Person pro Region besprochen. In den Gesprächen wurden bereits spürbare Auswirkungen des Klimawandels, daraus resultierende Herausforderungen (und Chancen) für die Region sowie Anpassungsmassnahmen und deren Umsetzungswahrscheinlichkeit in der Region identifiziert.

Anhand der Interviews ergänzten wir die Storylines um fehlende Landschaftsveränderungen, Anpassungsmassnahmen an den Klimawandel und regionale Besonderheiten. Ebenfalls entfernten wir Landnutzungspraktiken oder Anpassungsmassnahmen, die in den Storylines angesprochen wurden und von den regionalen Fachleuten als unrealistisch eingeschätzt wurden, aus den Storylines. Alle vorgenommenen Überarbeitungen wurden dokumentiert und die Begründungen für die Änderungen festgehalten.

3.3 Quantitative Modellierungen

Dieses Kapitel erläutert die quantitative Modellierung der Landschaftsveränderungen bei einer Erwärmung um 4°C nach proaktiver oder reaktiver Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Das Modell besteht aus einer Reihe von Untermodellen, die die Verteilung der Pflanzengesellschaften entsprechend der beiden Anpassungsstrategien vorhersagen. Dabei flossen die Erkenntnisse aus dem konzeptionellen Systemmodell (vgl. Kap. 3.2) sowie die Vorgaben der Sektoralpolitiken und Voraussetzungen für bestimmte Landnutzungsänderungen als Einschränkungen ins Modell ein. Aus den Ergebnissen der quantitativen Modellierung wurden neue Landschaftsindikatoren abgeleitet. Schliesslich lieferten die kartografischen Darstellungen der Resultate quantitative Informationen für die Visualisierungen (siehe Kap. 3.4).

Abbildung 3.4 zeigt die einzelnen Schritte des Arbeitsablaufs:

1. Vorhersagemodell:
Training eines neuronalen Netzes zur Vorhersage der Landnutzungseignungen aufgrund der bisherigen Landnutzungen sowie klimatischer und sozioökonomischer Variablen;
2. Allokationsmodell:
Räumliche Zuweisung potenzieller Landnutzungsänderungen aufgrund der potenziellen Nachfrage nach bestimmten Landnutzungen und speziellen Regeln von Landnutzungsänderungen;
3. Modell der Pflanzengesellschaften:
Modellierung potenzieller räumlicher Verteilungen von Pflanzengesellschaften aufgrund bio-geografischer Gegebenheiten und unter veränderten klimatischen Bedingungen. Die Vorhersagen der Pflanzenzusammensetzungen waren im Projekt ValPar.CH entwickelt worden und standen uns zur Verfügung (valpar.ch; Adde *et al.* 2023).
4. Randbedingungen/Einschränkungen:
Einschränkungen für die Ausbreitung der Pflanzengesellschaften bzw. für mögliche Landnutzungsänderungen, abgeleitet von den rechtlichen Rahmenbedingungen der Sektoralpolitiken sowie von den Vorgaben einer reaktiven bzw. proaktiven Strategie zur Anpassung an den Klimawandel entsprechend des konzeptionellen Systemmodells dieses Projekts.

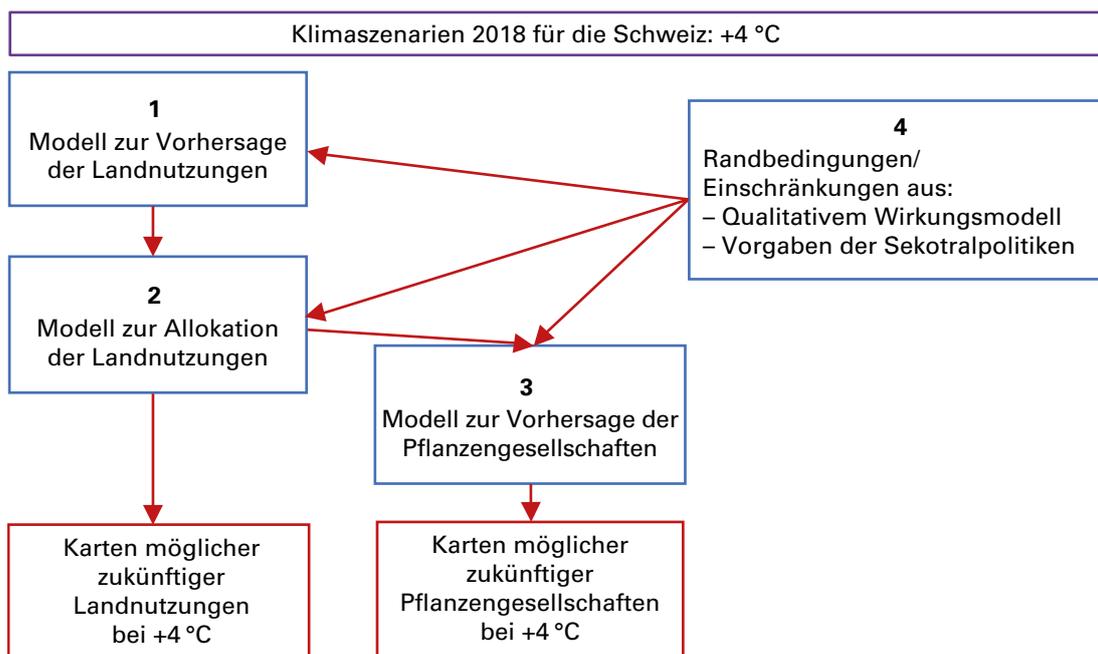


Abb. 3.4: Flussdiagramm der Untermodelle.

Als Produkte resultierten Karten möglicher Landnutzungen und Pflanzengemeinschaften in einem 4 °C wärmeren Klima.

3.3.1 Modell zur Vorhersage der Landnutzungen

Das Vorhersagemodell der Landnutzungseignungen ist ein auf künstlicher Intelligenz basierendes neuronales Netz, das die Eignung der Landschaft für 14 Landnutzungsklassen der Arealstatistik Schweiz anhand verschiedener Prädiktorvariablen vorhersagt.

Landnutzungsklassen

Das neuronale Netz modelliert die Landnutzungsklassen der Landnutzungs-/Bodenbedeckungskarten des Bundesamts für Statistik (BfS, s.a.). Von diesen 17 Landnutzungsklassen («NOAS04_17») wurden drei («Verkehrsflächen», «Seen» und «Flüsse») in allen Berechnungen konstant gehalten, weil deren Änderungen entweder nicht zuverlässig modelliert werden können (z. B. «Verkehrswege») oder ihre erwartete Veränderung während des modellierten Zeitraums vernachlässigbar ist (z. B. «Seen» und «Flüsse»). Eine Ausnahme sind neue alpine Seen als Folge des Gletscherrückzugs. Diese Seen erscheinen in den Simulationen. Die modellierten Landnutzungsklassen sind «Industrie», «Gebäude», «Besondere Siedlungsflächen», «Erholungs- und Grünanlagen», «Wald», «Gebüschwald», «Gehölze», «Ackerland», «Obst-, Reb-, Gartenbauflächen», «Naturwiesen, Heimweiden», «Alpwirtschaftsflächen», «Unproduktive Vegetation», «Vegetationslose Flächen», und «Gletscher, Firn».

Prädiktoren

Für das Training des neuronalen Netzes wurden mehrere räumlich explizite Variablen in der Auflösung von 1 ha für die ganze Schweiz verwendet. Aus den Landnutzungskarten für die Gegenwart (2012–18) und drei vergangenen Zeitschritten der Datenerhebung für die Arealstatistik (1979–85, 1992–97, 2004–09) lernte das neuronale Netz die Trends der Landnutzungsänderungen mit der Zeit. Aus zusätzlichen klimatischen, ökologischen und sozioökonomischen Prädiktoren erlernte es weitere Regeln für das Auftreten verschiedener Landnutzungsklassen auf einer bestimmten Fläche. Beispiele solcher Prädiktoren sind die vorherrschenden Landnutzungsklassen in der Nachbarschaft, Entfernung zu Verkehrswegen und Gewässern, Boden- und Geländeeigenschaften, klimatische Variablen wie die Sonneneinstrahlung, politische Grenzen und die Bevölkerungsdichte in der Nachbarschaft.

Modell-Output

Das neuronale Netz erstellt für jede der 14 Landnutzungsklassen eine Karte, die aufzeigt mit welcher Wahrscheinlichkeit die Landnutzungsklasse auf einer bestimmten Hektare (= ein Pixel der Karte) in der Schweiz zu finden ist. Im Allokationsmodell (nächster Abschnitt) werden diese Karten zu einer einzigen Landnutzungskarte kombiniert.

3.3.2 Allokationsmodell für die Landnutzungen

Das Allokationsmodell kombiniert die vom neuronalen Netz generierten Wahrscheinlichkeitskarten für die einzelnen Landnutzungsklassen zu einer Wahrscheinlichkeitskarte aller Landnutzungsklassen. Dies basiert einerseits auf dem Bedarf bzw. der Nachfrage nach einer bestimmten Landnutzungsklasse und andererseits auf weiteren Regeln für die Landnutzungsänderungen.

Landnutzungsbedarf

Den Landnutzungsbedarf leiteten wir aus der Entwicklung der Bodenbedeckung in der Vergangenheit ab (von 1979–2018). Durch einfache lineare Extrapolation der vergangenen Trends wurde für jede Landnutzungsklasse der in Zukunft zu erwartende Flächenanteil errechnet. Die Extrapolation der Trends der Landnutzungen diente als Basisschätzung künftiger Landschaftsveränderungen. Diese Schätzungen wurden weiter eingegrenzt aufgrund der Vorgaben durch die Bundesgesetze für Raumplanung, Wald, Landwirtschaft sowie Natur- und Heimatschutz.

Tab. 3.1: Regeln für die Landnutzungsänderungen im Allokationsmodell.

«Siedlungsflächen»	<p>«Siedlungsflächen» können nicht in andere Landnutzungsklassen übergeführt werden, da in der Vergangenheit viele Ressourcen eingesetzt wurden, um dieses Land in Siedlungsflächen umzuwandeln.</p> <p>Die Ausdehnung der «Siedlungsflächen» wird ab Mitte des 21. Jahrhunderts verhindert, um die strengeren Vorgaben des Raumplanungsgesetzes zur Siedlungsentwicklung nach innen zu simulieren.</p>
«Ackerland», «Naturwiesen, Heimweiden»	<p>Die Klassen «Ackerland» und «Naturwiesen, Heimweiden» können immer ineinander übergehen, um gemischte landwirtschaftliche Systeme darzustellen. Diese beiden Klassen können auch in «Wald», «Gebüschwald» und «unproduktive Vegetation» übergehen, jedoch nur entsprechend dem extrapolierten Trend der zukünftigen Waldausdehnung. Zudem können diese Klassen in «Siedlungsflächen» umgewandelt werden, aber nur bis zur Mitte des Jahrhunderts.</p>
«Alpines Grünland»	<p>«Alpines Grünland» kann in «Wald», «Gebüschwald» und «Gehölze» übergehen. Zudem kann es in «unproduktive Vegetation» umgewandelt werden, um den Prozess der Rodung von Waldgebieten zur Erhaltung wertvoller landwirtschaftlicher oder vom Menschen geschaffener Landschaften zu simulieren, wie es das revidierte Bundesgesetz über den Wald erlaubt.</p>
«Alpwirtschafts- flächen»	<p>«Alpwirtschaftsflächen» können über «Gebüschwald» (oder «Gehölze») zu «Wald» übergehen, um die natürliche Vegetationsdynamik nach der Aufgabe von Sömmerungsweiden im Gebirge zu simulieren. Daher sind Übergänge entlang dieser Sequenz nur in Richtung Wald möglich, d. h. «Wald» kann nicht in «Gehölze» oder «Gebüschwald» übergehen.</p>
«Wald»	<p>Die Ausdehnung des Waldes auf Siedlungsflächen und Landwirtschaftsland wird verhindert, auf «Alpwirtschaftsflächen» ist sie jedoch möglich, um die Aufgabe von Sömmerungsweiden zu simulieren. Da die zukünftige Aufgabe von Sömmerungsweiden ausschliesslich durch die Extrapolation vergangener Trends bestimmt wird, wird die Verschiebung der Baumgrenze nach oben in alpinen Regionen in erster Linie durch die Landbewirtschaftung und nicht durch den Klimawandel gesteuert, der eine viel schnellere Besiedlung von alpinem Grasland durch Wälder zeigen würde.</p>
«Gehölze», «Gebüschwald», «Unproduktive Vegetation»	<p>Die Landnutzungsklassen «Gehölze», «Gebüschwald» und «unproduktive Vegetation» sind nicht immer eindeutig abgrenzbar. Deshalb lassen wir zu, dass sich diese Klassen überlappen. Zudem können sich die Klassen «Gehölze» und «Naturwiesen, Heimweiden» überlappen, um die Bildung neuer Hecken zu simulieren. Diese können sowohl zu landwirtschaftlichen Zwecken (Windschutz) als auch zur Erhaltung der biologischen Vielfalt (als Lebensraum) gepflanzt werden.</p>
«Obst-, Reb- und Gartenbauflächen»	<p>«Obst-, Reb- und Gartenbauflächen» werden beibehalten, um die Bemühungen um die Erhaltung der biologischen Vielfalt und die Kohlenstoffbindung abzubilden. Diese Klasse kann Flächen übernehmen, die von «Ackerland», «Naturwiesen, Heimweiden», «Gehölzen» oder «unproduktiver Vegetation» eingenommen werden. Übergänge zu «Obst-, Reb-, Gartenbauflächen» sind jedoch nur möglich solange sie Verluste aus der Vergangenheit ersetzen. Diese Klasse war in der Vergangenheit rückläufig und für die Zukunft simulieren wir ihre Erhaltung.</p>
«Gletscher, Firn»	<p>Die natürliche Gletscherrückzugsdynamik wird durch die Abfolge «Gletscher, Firn» über «unproduktive Flächen» zu «unproduktiver Vegetation» simuliert. Übergänge zwischen diesen Klassen sind nur in Richtung «unproduktive Vegetation» möglich. Dies ist die einzige Klasse, die «unproduktive Flächen» ablösen kann.</p>
«Unproduktive Vegetation»	<p>«Unproduktive Vegetation» kann dann zu «Gehölzen», «Gebüschwald» oder «Wald» werden. Letzteres simuliert die Aufforstung. Ausserdem kann «unproduktive Vegetation» zu «Alpwirtschaftsflächen» übergehen, um die Einrichtung neuer Sömmerungsweiden zu simulieren.</p>

Regeln der Landnutzungsänderungen

Da nicht alle Landnutzungsklassen in eine beliebige andere Klasse umgewandelt werden können, wurden dem Allokationsmodell bestimmte Regeln vorgegeben. Diese sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Ausgeschlossen wurden Landnutzungsänderungen, die physikalisch nicht möglich sind (z. B. die Umwandlung von Siedlungsflächen in Gletscher) oder sehr unwahrscheinlich sind (z. B. die Umwandlung von Siedlungsflächen in Wald).

Allokation der Landnutzungsänderungen

Aufgrund der Annahmen zum Landnutzungsbedarf sowie der Regeln zu den Landnutzungsänderungen verorteten wir mit den Algorithmen des Programms CLUE-S (Verburg *et al.* 2002) die möglichen zukünftigen Landnutzungsänderungen. Das Programm produziert Karten potenzieller Landnutzungen für drei Zeitabschnitte in der Zukunft.

Gletscherdynamik

Um die Dynamik des Gletscherrückzugs und die Entstehung neuer Seen aus ihren Ursprüngen präzise darzustellen, haben wir auch die Ergebnisse eines unabhängigen Gletscher- und Seenmodells verwendet, das vom Beobachtungsnetz GLAMOS entwickelt wurde (Jouvet *et al.* 2019; Steffen *et al.* 2022).

3.3.3 Vorhersagemodell für Pflanzengesellschaften

Mit dem Modell zur Vorhersage von Pflanzengesellschaften wurden die durch das Allokationsmodell prognostizierten Landnutzungsklassen verfeinert. Pflanzengesellschaften sind Gruppen von Pflanzenarten, die ähnliche ökologische Anforderungen haben und daher in der Regel gemeinsam vorkommen. Zum Beispiel wurden die Flächen der Klasse «Wald» in die verschiedenen Waldgesellschaften unterteilt, aus denen sie sich zusammensetzen.

Die potenzielle Verbreitung einer Pflanzengesellschaft hängt von den lokalen pedoklimatischen Bedingungen (d. h. den kombinierten Eigenschaften von Boden und Klima) ab. Wir haben die Verbreitung von 84 Pflanzengesellschaften aus insgesamt 800 Arten aufgrund von Feldbeobachtungen aus den Datenbanken von InfoFlora und dem Landesforstinventar der WSL ermittelt. Die potenziellen aktuellen und zukünftigen Artenverteilungen stammen aus Vorhersagen des Projekts ValPar.CH (Adde *et al.* 2023). Aufgrund von Karten zum potenziellen Vorkommen jeder einzelnen Art haben wir die potenzielle aktuelle und zukünftige Verbreitung von 12 Waldgesellschaften hergeleitet. Die Veränderungen innerhalb von Wiesengesellschaften wurden nicht dargestellt, weil sie keinen grossen Einfluss auf das Landschaftsbild haben. Da der pH-Wert des Bodens einen grossen Einfluss auf das Vorkommen der Pflanzengesellschaften hat, verwendeten wir ihn als weiteren Prädiktor und teilten die geologische Karte in zwei Klassen ein: Gesteine, die alkalische Bodenbedingungen erzeugen, und Gesteine, die neutrale oder saure Böden erzeugen.

3.3.4 Spezielle Auswertungen und Indikatoren

Mit den Modellen zu den Landnutzungs- und Vegetationsveränderungen können spezifische Fragen beantwortet werden, z. B. in Bezug auf das potenzielle zukünftige Erscheinungsbild der Landschaften, Risiken durch Naturgefahren oder die Eignung für besondere Landnutzungs- und Bewirtschaftungssysteme. Unten werden drei Beispiele vorgestellt.

«Vergrünung» und «Vergrauung»

Eine «Vergrünung» findet statt, wenn die Vegetation hochgelegene Gebiete besiedelt und dadurch die Farbe der Landschaft verändert. Eine «Vergrauung» zeigt die durch den Rückzug der Gletscher neu entstandenen grauen Sedimentflächen an.

Verbreitung leicht entzündlicher Waldbestände

Bei bestimmten Pflanzengesellschaften ist das Waldbrandrisiko höher als bei anderen, insbesondere Bestände mit hohen Anteilen an Waldkiefern und Eichen erhöhen das

Risiko von Waldbränden bei längeren Hitzeperioden. Dieser Indikator kombiniert die Verteilungen von Waldkiefergesellschaften, Gesellschaften anderer Kiefernarten und Eichengesellschaften. Da die Waldkiefer besonders entzündlich ist, wird ihr Auftreten im Indikator des Waldbrandrisikos doppelt gewichtet.

Potenzial für Wald-Weide-Systeme

Unter Wald-Weide-Systemen («Wytweiden») versteht man Weideflächen, die mit vielen Einzelbäumen bestockt sind. Sie bieten viele Vorteile für den Bodenwasserhaushalt, die Bodenfruchtbarkeit, die Arten- und Landschaftsvielfalt sowie die Kohlenstoffspeicherung. Zudem bieten die Bäume Schatten für die Weidetiere und sind Holzlieferanten. Wald-Weide-Systeme sind daher geeignete Massnahmen für die Anpassung an den Klimawandel.

Zur Modellierung des Potenzials für Wald-Weide-Systeme kombiniert das Modell die Ausdehnung der Waldfläche entsprechend den in der Periode 1979–84 beobachteten Wachstumsraten mit der Eignung für die landwirtschaftliche Produktion auf subalpinen Wiesen und in alpinen Sömmerungsgebieten. Das Modell geht von einer höheren landwirtschaftlichen Eignung aus, wenn die Gebiete gut erschlossen sind oder die landwirtschaftliche Produktion dort gefördert wird. Unter den heutigen klimatischen Bedingungen zeigt das Modell die Einwanderung des Waldes auf Wiesen, Weiden und Sömmerungsflächen unterhalb der klimabedingten Waldgrenze. Das Modell zeigt zudem, wie weit sich der Wald bei einer Klimaerwärmung um 4 °C über die aktuelle Waldgrenze hinaus in die Sömmerungsgebiete ausdehnen könnte. Diese Gebiete könnten zu Wald-Weide-Systemen umgebaut werden. Das Modell hat für die Region Entremont die Ausdehnung der Flächen mit hohem Potenzial für Wald-Weide-Systeme errechnet.

3.4 Visualisierungen

Für zwei Regionen (Mittelland und Berggebiet) wurden jeweils drei Zustände visualisiert: der aktuelle Zustand sowie zwei mögliche Zustände, die sich in einem durchschnittlich 4 °C wärmeren Klima bei unterschiedlichen Strategien der Anpassung an den Klimawandel einstellen können. Diese Strategien wurden in Kapitel 2.4 definiert und in eine «reaktive» und eine «proaktive» Anpassungsstrategie unterteilt (vgl. Abb. 2.1). Für jede Region wurden Panoramabilder und eine kurze Animation erstellt. Den Visualisierungen liegen die Storylines sowie die quantitativen Modellierungen zugrunde. Sie bilden zudem die Landnutzungen, die vom Klimawandel besonders betroffen sind, mit sichtbaren Elementen ab: Radfahrer, Wanderer als Symbol für Tourismus; Stausee, Solarpanel als Symbol für Energiewirtschaft usw.

Für die Mittellandregion, inspiriert durch das Seeland, wurde eine Foto-Collage zu einem 360°-Panoramabild zusammengestellt. Für das Berggebiet wurden zwei Panoramafotos der Region Entremont von einem Standort oberhalb der Gemeinde Liddes (VS) mit einer Weitwinkel-Digitalkamera aufgenommen und zusammengesetzt. Die potenziellen zukünftigen Zustände, die in den Storylines beschrieben werden, wurden als Fotomontagen in die Panoramabilder der Landschaften eingebaut. Details zu den möglichen zukünftigen Pflanzengesellschaften und deren Aussehen wurden den Vegetationsmodellierungen entnommen. Insbesondere das Ansteigen der Waldgrenze im Alpenraum wurde aufgrund dieser Modellresultate visualisiert. Die Jahreszeit in den Bildern ist Sommer (Juli, August).

Die Panoramabilder wurden so aufbereitet, dass man in einem Internet-Browser am Computer oder Smartphone darin navigieren kann. Ausschnitte aus diesen Bildern illustrieren die Storylines im vorliegenden Bericht. Für jede Region wurde zudem eine Animation als Teaser erstellt. Die Animationen wurden kurz gehalten, d. h. unter einer Minute, so dass sie über soziale Medien geteilt werden können. Die Panoramabilder und Animationen sind auf der Website des Projekts verfügbar.

4 Resultate: die wichtigsten Landschaftsveränderungen in der Schweiz als Folge des Klimawandels

In diesem Kapitel werden die Resultate aus der qualitativen Szenarienentwicklung und der quantitativen Modellierung zu einer Synthese zusammengefasst. Bei der Beschreibung der Resultate verfolgen wir einen umfassenden Landschaftsansatz. Deshalb ist das Kapitel nicht nach Landnutzungen gegliedert, sondern nach den Fallstudiengebieten Berggebiet und Mittelland. Dieses Kapitel erläutert die Veränderungen der physischen Landschaftselemente. Wie die zukünftigen Landschaften in einem 4°C wärmeren Klima möglicherweise erlebt werden, wird in den Storylines (Kap. 5) vermittelt.

4.1 Grossräumige Landschaftsveränderungen in der ganzen Schweiz

Der Klimawandel wird die Schweizer Landschaften verändern, jedoch wird er keine wesentlichen Änderungen der Landnutzungsklassen hervorrufen. Eine Ausnahme bildet der Gletscherrückzug im Hochgebirge. Diese Landnutzungsklasse wird in der Fläche abnehmen (Abb. 4.1). Auch die Alpwirtschaftsflächen könnten natürlicherweise in Ge-

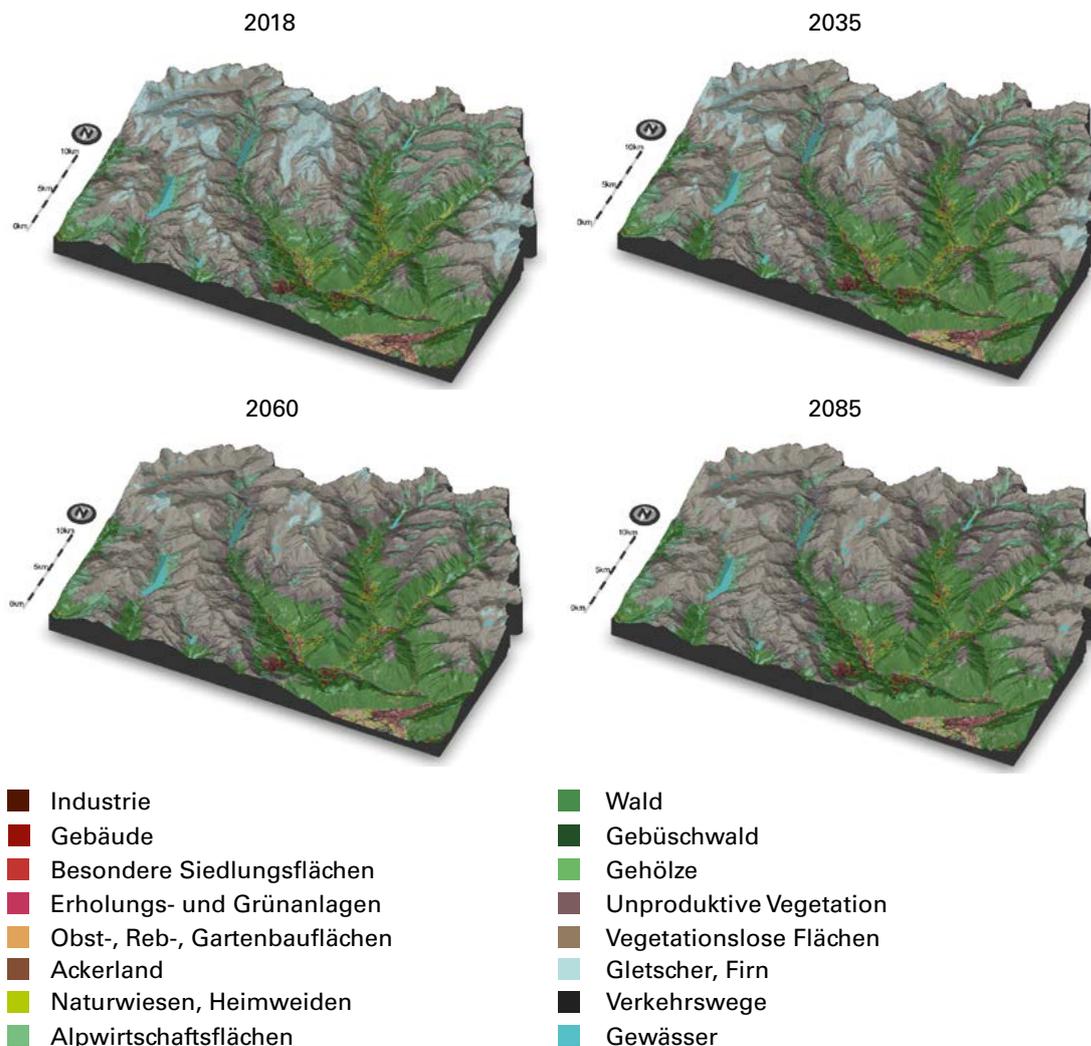


Abb. 4.1: Modellerte Veränderungen des Landnutzungspotenzials in der Region Entremont. Auffallend ist der Rückgang der Landnutzungsklasse «Gletscher, Firn». Zudem werden heutige «Alpwirtschaftsflächen» von «Gebüschwald» und «Wald» abgelöst.

hölze, Gebüschwald und Wald übergehen. Die tatsächliche räumliche Ausdehnung der verschiedenen Landnutzungen ist jedoch anthropogen bedingt durch die entsprechende Gesetzgebung, z. B. das Raumplanungsgesetz oder das Waldgesetz, oder durch Förderpolitiken, z. B. die weitere Nutzung oder Aufgabe marginaler Landwirtschaftsflächen. Innerhalb der einzelnen Landnutzungsklassen kann der Klimawandel jedoch starke Landschaftsveränderungen herbeiführen. Für das zukünftige Aussehen der Siedlungen, Landwirtschaftsflächen und der bewirtschafteten Wälder wird wiederum der Mensch in erster Linie verantwortlich sein. Je nach reaktiver oder proaktiver Strategie zur Anpassung an den Klimawandel (vgl. Kap. 2.4) gehen aus den Modellen andere landschaftliche Veränderungen hervor.

Das wärmere Klima wird die Wachstumsbedingungen für die Vegetation verändern, wodurch starke räumliche Verschiebungen der natürlichen Pflanzengesellschaften resultieren können. Dies wird insbesondere das Erscheinungsbild der Wälder verändern. Die meisten Waldflächen werden einen Wechsel der Pflanzengesellschaften erfahren, wobei sich die Hauptbaumarten meistens von Nadelhölzern zu Laubbäumen verschieben werden (Pluess *et al.* 2016). In einem 4°C wärmeren Klima werden sich Eichenwälder stark ausbreiten können. Buchen werden den trockenheitsresistenteren Arten Ahorn und Linde weichen. Buchen- und Fichtenwälder, die heute im Mittelland häufig vorkommen, können sich neu in den Voralpen und im Jurabogen ansiedeln. Auch die heute im Tessin weit verbreiteten Edelkastanien können auf der Alpennordseite gute Wachstumsbedingungen vorfinden. Die potenziellen natürlichen Veränderungen der Waldgesellschaften in den Regionen Entremont und Seeland werden in Abb. 4.2 dargestellt. Es ist jedoch zu beachten, dass südeuropäische Waldgesellschaften, die heute in der Schweiz noch nicht vorkommen, nicht in den Modellierungen berücksichtigt wurden.

Wie die Wälder in einem 4°C wärmeren Klima wirklich aussehen werden, hängt wesentlich von der Waldbewirtschaftung ab. Da sich Waldgesellschaften über mehrere Jahrzehnte entwickeln, ist es ratsam mit dem Wechsel der Hauptbaumarten frühzeitig, d. h. möglichst schon heute, zu beginnen. Andernfalls werden die Wälder infolge Trockenheit, Temperaturextremen, Stürmen und Waldbränden oder Schädlingsbefalls grosse Schäden erleiden (Brang *et al.* 2016). Die Waldwirtschaft wird zudem mit der Ausbreitung invasiver Arten wie Robinie und lorbeerblättrigen Gesellschaften («Laurophyllisierung») zu kämpfen haben. Allerdings werden die heute oft dominanten Grünerlenwälder mit fortschreitendem Klimawandel gemäss Modellierung zurückgehen.

In Bezug auf die Gefahren für die Wälder ist zu beachten, dass mit der klimabedingten Verschiebung der heutigen Waldgesellschaften in höhere Lagen auch das Risiko für Waldbrände im Jura und Alpenraum ansteigen wird (Pezzatti *et al.* 2016). Auch leicht entzündliche Nadelhölzer (z. B. Kiefern) werden sich in höheren Lagen ansiedeln. Laubbaumarten sind weniger brandgefährdet und können aktiv gefördert werden. Allerdings wird das Waldbrandrisiko auch im Flachland weiter ansteigen wegen längerer und intensiverer Trockenperioden (Pluess *et al.* 2016). Die mit dem Klimawandel erwarteten höheren Temperaturen und zunehmende Trockenheit werden das Waldbrandrisiko in der ganzen Schweiz erhöhen.

4.2 Landschaftsveränderungen im Berggebiet

4.2.1 Graue und grüne an Stelle weisser Berggipfel

Der Rückgang der Gletscher wird zu einschneidenden Veränderungen der Schweizer Berglandschaften führen. Entsprechend dem Klimaszenario RCP 8.5, das den Modellierungen zugrunde liegt (vgl. Kap. 2.4), werden die meisten Gletscher der Schweiz bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verschwinden. In der Folge werden sich neue Lebensräume und in den Geländemulden neue Seen bilden (Steffen *et al.* 2022; Haeberli *et al.* 2013). Die Bodenbedeckung verändert sich zunächst zu vegetationslosen Fels- und Schuttflächen. Im weiteren Verlauf der Klimaerwärmung um 4°C und mehr werden die grauen Berggipfel von der natürlichen Vegetation besiedelt (Rumpf *et al.* 2022). Die Farben der Berglandschaften werden sich mit dem Klimawandel verändern (Abb. 4.3).

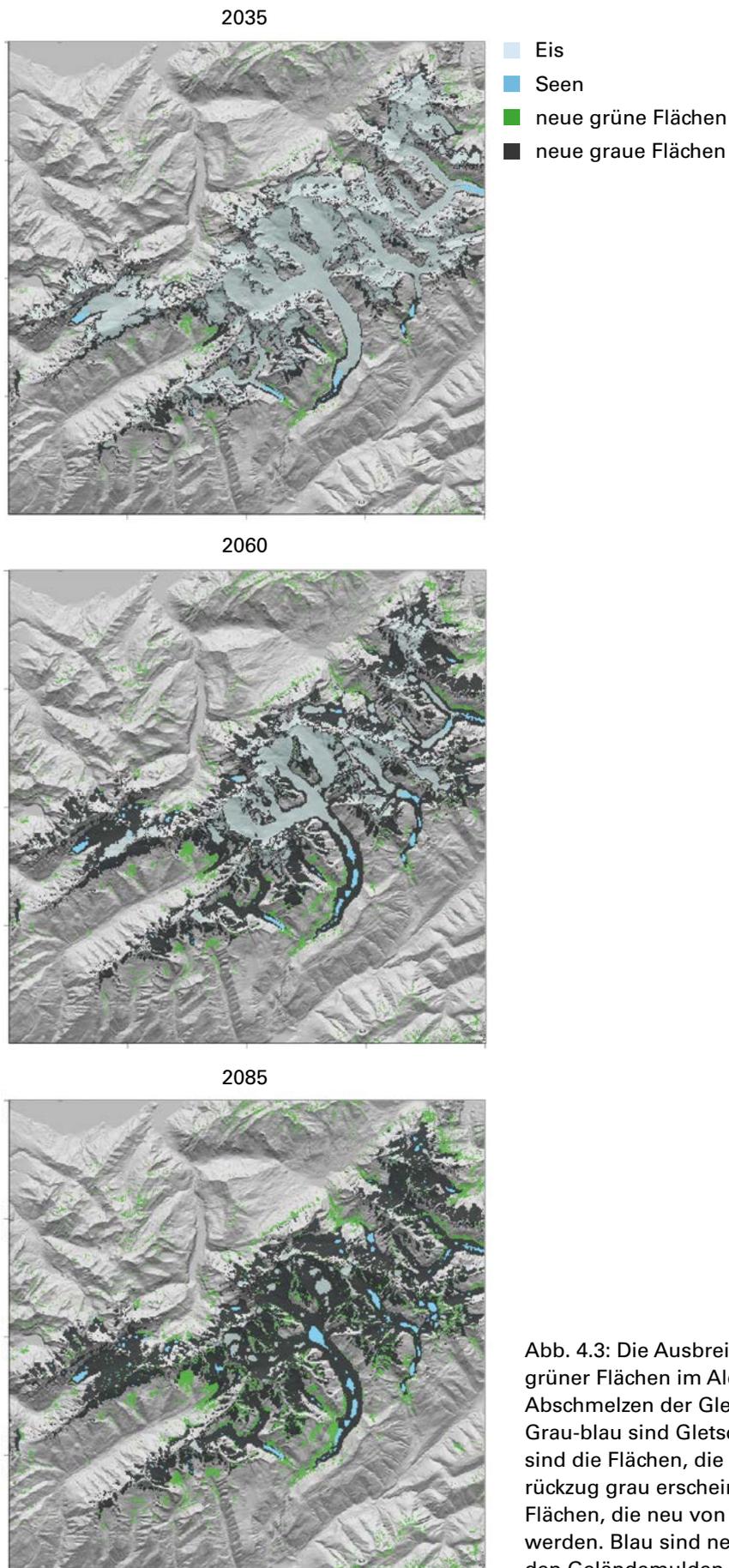


Abb. 4.3: Die Ausbreitung grauer bzw. grüner Flächen im Aletschgebiet nach dem Abschmelzen der Gletscher und Firnfelder. Grau-blau sind Gletscher und Firn, schwarz sind die Flächen, die nach dem Gletscher-rückzug grau erscheinen; grün sind die Flächen, die neu von Vegetation besiedelt werden. Blau sind neu entstandene Seen in den Geländemulden.

Mit dem Rückzug der Gletscher geht ein wichtiges Wasserreservoir für die Energiegewinnung, Landwirtschaft, Industrie und private Haushalte verloren, was besonders in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts spürbar wird (Davies 2022). Die Nutzung der ehemaligen Gletschergebiete mit teilweise neuen Seen wird einen starken Einfluss auf die Landschaft haben, je nachdem, ob grosse Talsperren errichtet werden, eine kombinierte Nutzung für Tourismus und Energiegewinnung angestrebt oder die natürliche Sukzession der Vegetation ermöglicht wird. Auch der traditionelle Wintertourismus wird unter dem signifikanten Rückgang der Schneebedeckung leiden (NCCS 2021b). Sowohl die Schliessung von Skigebieten wie auch deren Ausdehnung in höhere Lagen würde sich über die Infrastruktur landschaftlich manifestieren. Im Sommer wird der Tourismus in den Berggebieten möglicherweise von tieferen Temperaturen als im Mittelland profitieren können, sofern das Angebot auf einen ganzjährigen Tourismus umgestellt wird (Lanz *et al.* 2021).

Infolge des Klimawandels werden sich die Naturgefahren in den Berggebieten ebenfalls verändern. Während die Lawinengefahr insgesamt abnehmen wird, werden stärkere und häufigere Starkniederschlagsereignisse und eine erhöhte Sedimentverfügbarkeit aufgrund schmelzender Gletscher und Rückzug des Permafrosts allgemein zu einem höheren Risiko für Überschwemmungen, Murgänge, Rutschungen und Bergstürze im alpinen Gebiet führen (NCCS 2021a). Solche Ereignisse können die Berglandschaft stark verändern und ebenso werden die Massnahmen zum Schutz vor diesen Naturgefahren einen grossen Einfluss auf die Landschaftsqualität haben. Mächtige Stützbauwerke können von weither sichtbar werden. Umgekehrt, wenn im Extremfall gewisse Täler nicht mehr bewohnbar werden, könnten neue Wildnisgebiete entstehen. Im Kontext der Naturgefahren wird besonders die Anpassung der Schutzwälder an die veränderte Gefahrensituation relevant sein (Bebi *et al.* 2016). Dies stellt eine doppelte Herausforderung für die Forstwirtschaft dar: Einerseits ändert sich die notwendige Schutzfunktion der Wälder und andererseits sind die heutigen Wälder nicht an ein 4 °C wärmeres Klima angepasst, wodurch sie störungsanfälliger werden.

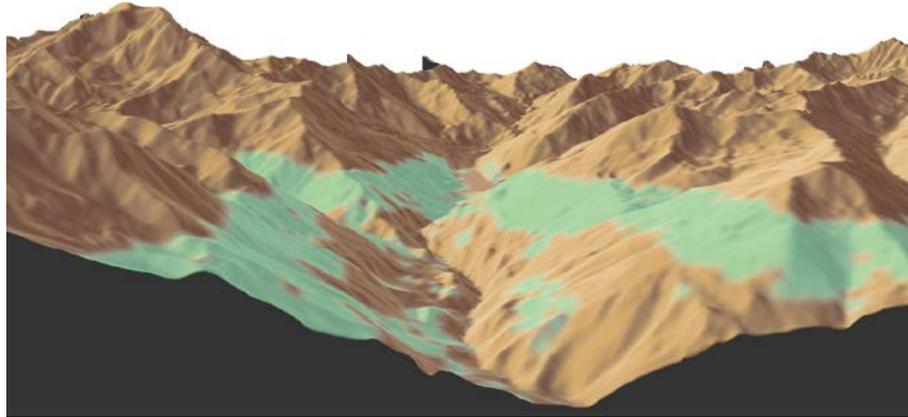
4.2.2 Berglandwirtschaft als landschaftsprägendes Element

Die Landwirtschaft spielt eine bedeutende Rolle im Berggebiet – auch landschaftlich, indem sie zur Offenhaltung der alpinen Flächen beiträgt, wie lokale Fachleute betonen. Mit dem Ansteigen der Vegetationsgrenze in höhere Regionen werden sich auch die Bedingungen für die Alpwirtschaft verändern. Ein Grossteil der heutigen Alpweiden liegt unterhalb der aktuellen und der potenziellen zukünftigen Baumgrenze und würde ohne Mähen oder Beweidung verbuschen und je nach Höhenlage wieder zu Wald werden. Gleichzeitig werden alpine Rasen in die Höhe steigen und heute vegetationslose Flächen besiedeln. Unter diesen natürlichen Voraussetzungen ist es für die Landschaftsqualität entscheidend, wie diese Flächen in Zukunft genutzt werden. Dabei sind folgende Szenarien denkbar:

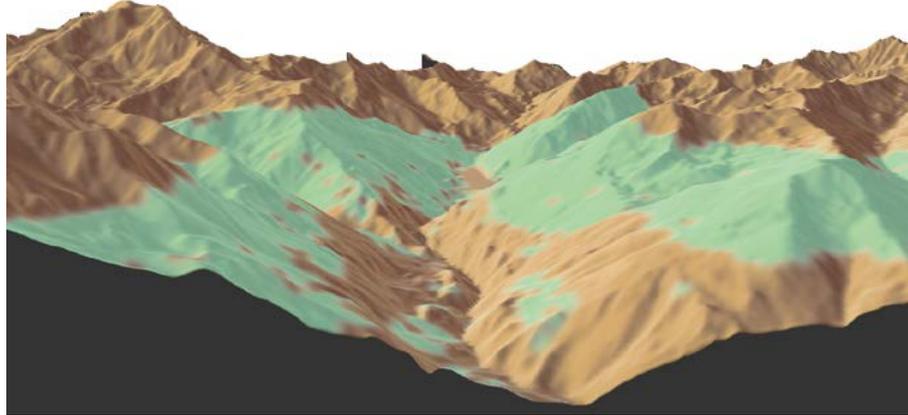
- Wenn die heutige Alpwirtschaft oberhalb der aktuellen Baumgrenze reduziert oder aufgegeben wird, werden sich auf diesen Flächen Gebüschwälder und Wälder einstellen (Gehrig-Fasel *et al.* 2007).
- Wenn die klimatischen Bedingungen genutzt werden, können die Sömmerungsweiden in höheren Lagen über der neuen Baumgrenze eingerichtet werden. Dies würde auch einen Ausbau der Infrastruktur in höheren Lagen nötig machen, z. B. Alpstrassen, Ställe, Wasserversorgungsanlagen.
- Wenn auf den heutigen Sömmerungsweiden Wald-Weide-Systeme eingerichtet würden, könnte ein neuer Landschaftstyp im Berggebiet entstehen. Bei regelmässiger Beweidung von angepasster Intensität und gleichzeitigem Ansteigen der Baumgrenze könnten mit Einzelbäumen durchsetzte Wiesen entstehen.

Die Fläche, auf der Wald-Weide-Systeme umgesetzt werden können, wird mit dem Klimawandel deutlich zunehmen (Abb. 4.4). Diese Bewirtschaftungsart fördert sowohl die Anpassung an den als auch die Abmilderung des Klimawandels (vgl. Kap. 3.2.4). Allerdings hängt es von den Entscheidungen der Bewirtschaftenden ab, ob sich dieser Landschaftstyp grossflächig ausdehnen wird.

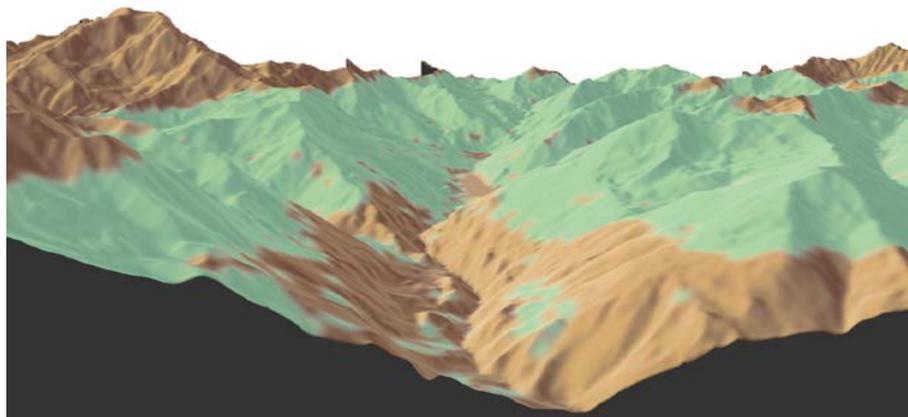
2018



2035



2060



2085

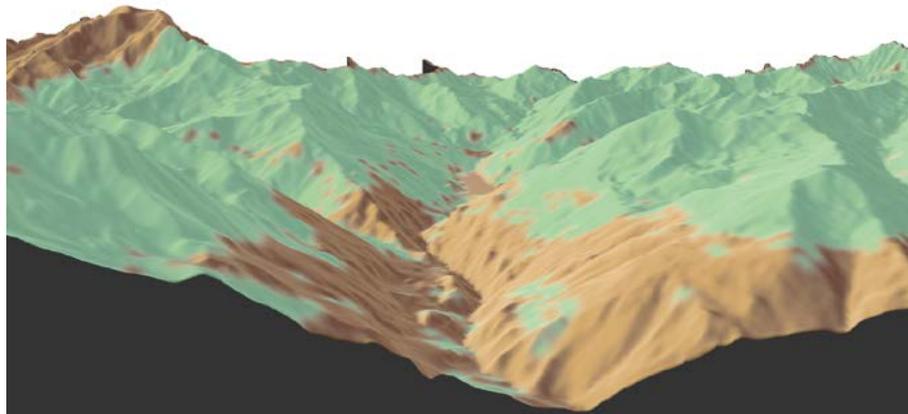


Abb. 4.4: Modelliertes Potenzial für Wald-Weide-Systeme im Val de Bagnes (Bezirk Entremont, VS) zu vier verschiedenen Zeitpunkten (grüne Flächen). Auch für den heutigen Zustand (2018) ist das Potenzial und nicht die effektive Bewirtschaftung abgebildet.

Wie Fachleute der Region Entremont betonen, wird das Wassermanagement mit fortschreitendem Klimawandel zu einer zentralen Herausforderung für die Berglandwirtschaft werden, um die Wasserverfügbarkeit langfristig zu gewährleisten. In Trockenperioden steigt der Bewässerungsbedarf auf Äckern und Mähwiesen und das Wasser zur Betreibung der Alpen kann knapp werden. Im Umgang mit den veränderten Bedingungen sind verschiedene Anpassungsmassnahmen denkbar. Einerseits könnten gemäss lokalen Expertinnen die Wasserverteilnetzwerke verbessert und die Bewässerungsinfrastruktur ausgebaut werden. Andererseits könnte die landwirtschaftliche Produktion durch den Anbau von trockenheitsresistenterem Getreide oder Nischenprodukten wie Kräutern diversifiziert werden. Eine verlängerte Vegetationsperiode kann gewisse Vorteile für die regionale Landwirtschaft hervorbringen, etwa eine verlängerte Alpdauer (Köllner *et al.* 2017). Gelingt eine Anpassung der Landwirtschaft nicht oder nur auf gewissen Flächen, muss mit vertrockneten und versteppten Flächen sowie einer Verbuschung der Alpweiden gerechnet werden.

4.3 Landschaftsveränderungen im Mittelland

4.3.1 Hitze und Trockenheit prägen die Landschaft

Hitze wird eine wichtige Herausforderung für die Menschen im Mittelland werden, denn Hitzetage, wie sie zwischen 1981 und 2010 durchschnittlich einmal jährlich auftraten, werden im Klimaszenario RCP8.5 für das Mittelland an durchschnittlich 10 bis 29 Tagen pro Jahr erwartet (NCCS 2018). Siedlungsgebiete erhitzen sich tagsüber stärker und kühlen nachts langsamer ab als umliegende ländliche Gebiete: ein Effekt, der als Wärmeinseleffekt bezeichnet wird (Köllner *et al.* 2017). An heissen Sommertagen werden die Strassen und Plätze nicht zum Verweilen einladen.

Die Siedlungen könnten dann aber bereits so umgestaltet sein, dass sie sich weniger stark erwärmen. Mit einer geschickten Ausrichtung von Gebäuden und Strassen können Frischluftkorridore zur Kühlung des Siedlungsraums erhalten oder neu errichtet werden (BAFU 2018). Diese Möglichkeiten bestehen vorab bei Neubaugebieten, Arealüberbauungen und Quartiererneuerungen. Unversiegelte Böden können das Regenwasser, insbesondere bei Starkregeneignissen, aufnehmen. In Trocken- und Hitzeperioden verdunstet das im Boden gespeicherte Wasser, was zur Kühlung der Umgebung beiträgt. Nach diesem Prinzip eines Schwammes können Siedlungsräume zu Schwammstädten und -dörfern umgestaltet werden (BAFU/ARE 2022). Auch sogenannte blaue und grüne Infrastruktur trägt zu einem angenehmen Mikroklima in Siedlungen bei (BAFU 2018). Dazu gehören offene Wasserflächen sowie die Begrünung des öffentlichen und privaten Raums insbesondere mit schattenspendenden Bäumen. Mit der Begrünung der Siedlungen muss frühzeitig begonnen werden und es ist dabei zu berücksichtigen, dass sich die Wachstumsbedingungen für die Vegetation mit dem Klimawandel ändern werden (vgl. Kap. 4.1). Wie bei der Baumartenwahl für die Wälder müssen auch für die Stadtbäume solche Arten gewählt werden, die den zukünftigen klimatischen Bedingungen im Siedlungsraum standhalten können. Beispiele sind die ungarische oder italienische Eiche (*Quercus frainetto*) oder der chinesische Guttaperchabaum (*Eucommia ulmoides*). Weitere klimaresistente Stadtbaumarten werden von Schönfeld (2019) genannt. Die Umsetzung dieser Massnahmen zur Anpassung an den Klimawandel kann das Erscheinungsbild der Siedlungen stark verändern und dabei gemäss Fachleuten der Region Seeland die Attraktivität des öffentlichen Raums erhöhen.

Trockenheit stellt eine weitere zentrale Herausforderung für das Mittelland dar, die sich auf die Landschaft auswirken wird, wobei Trockenstress und Hitzestress oft gemeinsam auftreten werden. Bei einer durchschnittlichen Erwärmung von 4 °C ist zu erwarten, dass die Sommermonate deutlich trockener sind und deutlich mehr regenfreie Tage auftreten. In diesem Klimaszenario ist damit zu rechnen, dass die längste Trockenperiode des Sommers in der Schweiz bis zu 9 Tage länger als Anfang des Jahrhunderts ist, also rund 20 Tage lang (NCCS 2018). Trockenperioden werden insbesondere für die Land- und Forstwirtschaft eine grosse Herausforderung darstellen (Williams *et al.* 2013).

Die Wasserverfügbarkeit wird ausschlaggebend sein für die zukünftige Entwicklung der Landwirtschaft. Ist ausreichend Wasser vorhanden, wird die Landwirtschaft im Mittelland von der verlängerten Vegetationsperiode profitieren. Auf Ackerland werden innerhalb einer Vegetationsperiode zwei aufeinander folgende Kulturen angebaut werden können. Wiesen können zusätzliche Schnitte erfahren. Fehlt es jedoch an Wasser zur Bewässerung wird man anstelle grüner Wiesen und Weiden vermehrt braune Flächen mit dürrerem Gras vorfinden. Das Getreide wird häufiger frühzeitig, allenfalls notreif, geerntet werden müssen. In der Folge werden Zwischenfrüchte angebaut, um den Boden vor Erosion zu schützen. Auch die Palette der landwirtschaftlichen Kulturen wird sich infolge der Trockenheit verändern. So werden Zuckerrüben, Kartoffeln oder Mais, die viel Wasser benötigen, gegen Ende des 21. Jahrhunderts kaum mehr angebaut werden können. An deren Stelle könnten trockenheitsresistentere Kulturen wie z. B. Süsskartoffeln oder Sorghum treten (Felber *et al.* 2017).

Die Massnahmen in der Landwirtschaft zur Anpassung an den Klimawandel werden die Landschaft stark beeinflussen. Bewässerte Flächen werden als grüne Flecken in der Landschaft erkennbar sein, auf denen weitreichende Beregnungsanlagen in Betrieb sind. Mit dem fortschreitenden Klimawandel wird ein haushälterischer Umgang mit Wasser immer bedeutender, um Konflikte mit der Gewässerökologie und anderen Wassernutzungen (z. B. Trinkwasserversorgung) zu vermeiden. Gemüse und Beeren werden vermehrt in Gewächshäusern angebaut werden, denn diese ermöglichen eine gezielte Bewässerung und Düngung, den Schutz vor Unwettern (z. B. Hagelschlag) und Schädlingen. Grossflächige Gewächshausanlagen werden jedoch den ästhetischen Wert der Landschaft beeinträchtigen.

4.3.2 Gewässer: vom Rinnsal zur Sturzflut

Neben vermehrten Trockenperioden muss bei einer durchschnittlichen Erwärmung um 4 °C Schweizweit mit häufigeren und stärkeren Starkniederschlagsereignissen gerechnet werden, die im Mittelland zu häufigeren Hochwasserereignissen und Überschwemmungen führen werden (BAFU 2021). Nicht nur die Schäden an Gebäuden, Infrastrukturen und Landwirtschaftsflächen, sondern auch die Schutzmassnahmen werden in der Landschaft sichtbar sein. Hohe Dämme und mit Beton verbaute Gerinne beeinträchtigen nicht nur das Landschaftsbild, sie fördern auch die Sohlenerosion in den Fließgewässern und schränken die natürlichen Lebensräume ein (Rohde, 2005). Daher sind Gewässeraufweitungen und -renaturierungen vorzuziehen, nicht nur aus ökologischen und landschaftlichen, sondern auch aus technischen und ökonomischen Gründen. Sie reduzieren das Schadenspotenzial von Hochwassern massgeblich und erhöhen die Resilienz von Gewässerökosystemen gegenüber Hoch- und Niedrigwasser, wie regionale Fachleute betonten. Solche Massnahmen sind jedoch verhältnismässig flächenintensiv und stehen daher teilweise im Konflikt mit anderen Landnutzungen, wie der landwirtschaftlichen Produktion.

Feuchtgebiete, sprich Hochmoore, Flachmoore und Moorlandschaften, und die dazugehörigen Ökosysteme können durch Trockenperioden beeinträchtigt oder sogar zerstört werden (Niedermair *et al.* 2011). Diese Lebensräume werden sich verändern. Wenn sich funktionell ähnliche, aber trockenheitsresistentere Arten ansiedeln, können gewisse Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen erhalten bleiben. Bei dem von uns angenommenen Klimaszenario RCP 8.5 und ausbleibenden Schutzmassnahmen für die Moore ist dies eher unwahrscheinlich (Graf *et al.* 2021). Der Verlust von Feuchtgebieten wird zu einer Abnahme der landschaftlichen und biologischen Diversität führen.

5 Storylines zu den Landschaften im Klimawandel

In diesem Kapitel nehmen wir Sie auf eine Wanderung durch zwei typische Landschaften der Schweiz mit, eine im Mittelland und eine im Alpenraum. Sie führen jedoch nicht durch heutige Landschaften, sondern durch solche, wie sie sich bei einer durchschnittlichen Erwärmung von 4 °C einstellen könnten. Mit einer klimatischen Erwärmung um 4 °C wird sich die Landschaft in der Schweiz deutlich verändern. Dabei ist zu beachten, dass sich die Landschaften unterschiedlich entwickeln werden, je nachdem ob wir bereits heute Vorkehrungen zur Anpassung an den Klimawandel treffen oder nicht. Deshalb werden wir einige Landschaftsausschnitte auf unserer Wanderung in zwei Varianten kennenlernen. In der ersten Variante besuchen wir eine Landschaft, bei der Politik und Gesellschaft ihr Verhalten gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels nicht vorausschauend verändert haben, sondern passiv auf die Auswirkungen reagieren. In der zweiten Variante lernen wir eine Landschaft kennen, die sich einstellen könnte, wenn Politik und Gesellschaft ihr Verhalten gegenüber dem Klimawandel möglichst vorausschauend verändern und den Auswirkungen mit aktiven Anpassungsstrategien und entsprechenden Massnahmen begegnen.

Bevor wir losmarschieren können, müssen wir aber noch eine Zeitreise ins Jahr 2085 antreten. Dazu noch eine Vorwarnung: Unsere Zeitreisemaschine kann uns in eine Welt mitnehmen, wo der Klimawandel bereits weit fortgeschritten ist, sie kennt sich aber mit anderen Veränderungen, die bis 2085 zusätzlich stattfinden können, nicht aus. Darunter fällt beispielsweise: mit welchen Transportmitteln die Menschen 2085 von A nach B reisen, welche Kleidung sie tragen, wie sie miteinander kommunizieren oder welche Gesetze gelten. Deshalb werden wir uns bei unserer Wanderung ausschliesslich auf die Landschaftsveränderungen konzentrieren, die durch den Klimawandel und die menschliche Anpassung an den Klimawandel angestossen werden. Immerhin sind wir so mit unserer Wanderausrüstung aus 2023 nicht komplett aus der Mode.

5.1 Eine Wanderung im Seeland 2085

Die Landschaft im Seeland ist heute charakterisiert durch die intensive landwirtschaftliche Bewirtschaftung sowie die Seen und Flüsse, die die Landschaft strukturieren. Ganz deutlich sichtbar sind auch die Dörfer und Städte, in denen die Menschen leben und arbeiten sowie die dazugehörige Infrastruktur wie Strassen, Eisenbahngleise oder Fussballplätze. Oftmals ruft das Stichwort Seeland Bilder einer sehr flachen Landschaft hervor, jedoch gehören auch hügelige Gebiete zum Seeland. Häufig sind diese Hügel bewaldet.

Jetzt beginnt unsere Zeitreise ins durchschnittlich 4 °C wärmere Jahr 2085. Ende dieses Jahrhunderts sind die Sommermonate Juni, Juli und August deutlich trockener. Zwar fällt an einem Regentag ähnlich viel Niederschlag wie zu Beginn dieses Jahrhunderts, aber die regenfreien Tage sind häufiger. Die längste Trockenperiode des Sommers ist Ende des 21. Jahrhunderts in der Schweiz bis zu 9 Tagen länger als am Anfang des Jahrhunderts, also rund 20 Tage lang. Trockenperioden, die zwischen 1981 und 2010 durchschnittlich alle 10 Jahre auftraten, kommen Ende des 21. Jahrhunderts durchschnittlich jedes zweite Jahr vor. Es fällt in den Sommermonaten durchschnittlich 24% weniger Regen. Trotz zunehmender Trockenheit treten auch Ende des Jahrhunderts extreme Niederschlagsereignisse auf. Der stärkste jährliche Eintagesniederschlag ist durchschnittlich 4% stärker. Ein sehr seltenes Niederschlagsereignis, das etwa einmal in 100 Jahren vorkommt, ist durchschnittlich 12% heftiger. Trotz abnehmender Niederschlagssummen im Sommer sind somit einzelne Regenereignisse stärker und können erhebliche Kostenfolgen nach sich ziehen. Gleichzeitig ist die bodennahe Lufttemperatur im Durchschnitt in den Sommermonaten Juni, Juli und August 4 °C bis 7 °C wärmer als im Zeitraum 1981–2010. Der heisseste Tag im Jahr ist 3,9 bis 9,5 °C wärmer (NCCS 2018a; NCCS 2018b). Im Seeland kann die Durchschnittstemperatur im Juli von etwa 19 °C in der Periode 1981–2010 auf 26 °C steigen und der heisseste Tag kann über 45 °C heiss werden (RAOnline 2023).

Heutige Landschaft**Zukünftige Landschaft bei langsamer, reaktiver Anpassung an den Klimawandel****Zukünftige Landschaft bei vorausschauender, proaktiver Anpassung an den Klimawandel**

Abb. 5.1: Ausschnitte der 360° Panoramabilder, die drei mögliche Zustände einer fiktiven Landschaft im Mittelland zeigen. Sie beziehen sich auf die Erläuterungen zur Siedlung, Landwirtschaft und Flusslandschaft. Die Bilder sind Fotomontagen, inspiriert durch die Landschaft im Seeland.
© Ikonaut GmbH

5.1.1 Dichtes Siedlungsgebiet

Unser Ausflug beginnt am Bahnhof einer mittelgrossen Stadt. Die Stadt liegt auf rund 500 m ü. M. Es ist heiss und hat seit über zwei Wochen nicht mehr geregnet. Wir überqueren den Bahnhofplatz, die Sonne brennt und die Hitze staut sich zwischen den Gebäuden. In dicht bebauten Gebieten ist es noch um einige Grad wärmer als im Umland.

Langsame, reaktive Anpassung an den Klimawandel

Wir gehören zu den wenigen Leuten, die die Stadt zu Fuss durchqueren. Die meisten Menschen sind an heissen Tagen wie heute möglichst wenig draussen, halten notwendige Wege in der Stadt kurz und verbringen möglichst viel Zeit in klimatisierten Wohn- und Büroräumen. An den Fassaden der Gebäude sind die Kästen vieler Klimaanlage sichtbar und hörbar, denn fast jede Wohnung und jedes Büro ist inzwischen klimatisiert. Die Stadt ist seit den 2020er Jahren in die Fläche und in die Höhe gewachsen, aber in ihrer grundlegenden Struktur weitestgehend gleichgeblieben. Wir kommen an einer grossen Baustelle vorbei, wo gerade das unterirdische Kanalsystem für einen Bach revidiert wird, damit grössere Wassermengen bewältigt werden können. Trotzdem kommt es in gewissen Stadtteilen regelmässig zu überfluteten Kellern.

Vorausschauende, proaktive Anpassung an den Klimawandel

Wir sind froh, dass die Strassen mit schattenspendenden Bäumen, mit Sträuchern und Gras begrünt sind, denn dadurch wird die Hitze erträglicher. Bereits in den 2020er Jahren begann die Stadtgärtnerei hitze- und trockenheitsresistente Pflanzen in der Stadt zu fördern. Es fällt auf, dass Siedlungen und Strassen, die in den letzten sechzig Jahren gebaut wurden, in ihrer Ausrichtung anders in der Stadtlandschaft stehen als die früheren. Dies liegt daran, dass seit 2020er Jahren die Raumplanung auf die Erhaltung von Kaltluftkorridoren für eine Kühlung der Stadt während den heissen Tagen achtet. Trotzdem ist es brütend heiss. Wir überqueren einen Bach und spüren sogleich einen kühlen Luftzug. Der Bach verlief 2023 noch unterirdisch. Heute ist er von Bäumen und Sträuchern umgeben, das Bachufer ist gut zugänglich und im seichten Wasser spielen Kinder.

Wir erreichen ein Quartier mit einer öffentlichen Begegnungszone, die wiederum mit Bäumen begrünt ist und deren Boden nicht asphaltiert, sondern mit Kies bedeckt ist. Dadurch können die häufiger gewordenen Starkregen leichter in den Boden eindringen und das Wasser fliesst nicht ausschliesslich oberflächlich bis zum nächsten Kanalisationsschacht ab. Bei heftigem Regen kommt auch der unterirdische Entlastungstollen zum Einsatz, der verhindert, dass zu viel Wasser aus dem umliegenden Gebiet durch die Stadt fliesst.

Zu unserer Linken sehen wir ein Bürogebäude. Sein Dach und seine Fassade sind begrünt und es bietet auf mehreren Balkonen und Terrassen schattige Arbeitsplätze als Alternativen zu den Büros in den Innenräumen. Auch die meisten benachbarten Wohnhäuser haben begrünte Dächer und Fassaden, welche für ein angenehmeres Wohnklima im Innern sorgen und den Energiebedarf für die Kühlung senken. Für alle neuen Gebäude gelten strenge Vorschriften zur Wärmeisolation, denn eine gute Isolation kann den Energiebedarf für die Kühlung weiter senken.

5.1.2 Agrarlandschaft

Wir steigen in einen Bus und fahren aus der Stadt hinaus. Der Bus erreicht den Stadtrand und das Siedlungsgebiet geht in Landwirtschaftsflächen über. Die landwirtschaftlichen Erträge stiegen in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts tendenziell, weil die Kulturen von den höheren Temperaturen und längeren Vegetationsperioden profitierten und Frostschäden, beispielsweise an Obstbäumen und Rebbergen, gesamthaft seltener wurden, obwohl das Risiko von Spätfrösten infolge des früheren Vegetationsbeginns anstieg. Doch die negativen Auswirkungen von Trockenheit und Hitze überholten seit

Mitte des 21. Jahrhunderts die positiven Effekte. Immer wieder kommt es zu längeren Dürreperioden und Hitzesommern, in denen ein Grossteil der Ernte ausfällt, weil die Felder austrocknen oder die Kulturen dem Hitzestress nicht standhalten können. Zum Beispiel wird das Getreide immer häufiger notreif geerntet und das Halten von Tieren ist anspruchsvoller. Während der Jahrhunderttrockenheit im letzten Sommer gab es viele Ernteauffälle, weil die Bewässerung nicht aufrechterhalten werden konnte. Auch ohne weitere Entnahmen durch Bewässerung wurden viele Gewässerökosysteme geschädigt, Fische starben und Bäche trockneten aus. Die Ernten verkümmerten und die Felder wurden braun und rissig.

Langsame, reaktive Anpassung an den Klimawandel

Beim Blick aus dem Busfenster erblicken wir eine Agrarlandschaft voller deutlicher Gegensätze. Zum einen sehen wir in der Ebene Flächen mit dauerhaft eingerichteten Bewässerungssystemen, wo Kulturen kontrolliert, präzise und während der ganzen Vegetationsperiode bewässert werden. Die Flächen stechen in der Landschaft in leuchtendem Grün hervor. Allerdings können bei weitem nicht alle bewässerungsbedürftigen Felder, Wiesen und Kulturen bewässert werden, weil es kaum effektive regional koordinierte Vorgehensweisen zur Wasserspeicherung und Wasserverteilung gibt und die Oberflächengewässer häufig niedrige Wasserstände aufweisen, weshalb Wasserentnahmen nicht möglich sind. Viele Flächen in der Ebene gelten als prioritäre Landwirtschaftsflächen und dürfen deshalb bewässert werden. Felder in Hügellagen und solche, die weiter weg von den Gewässern und Kanälen sind, können meist nicht bewässert werden. Diese Felder weisen Zeichen der Versteppung auf, also trockene vegetationslose Stellen mit Staubbildung. Wind und Wasser haben den Oberboden stark erodiert und viele Nährstoffe wurden ausgewaschen. Auf den versteppten Flächen stehen noch einzelne Bäume, welche die Trockenperioden überlebt haben und auf einigen Feldern hat Vieh Auslauf. Um die Tiere vor der Hitze zu schützen, wurden schattenspendende Sonnensegel aufgestellt.

Wir steigen bei einer Haltestelle an der Landstrasse aus und sehen im ersten Moment nichts mehr, weil ein Traktor in der Nähe grosse Mengen Staub aufwirbelt. Der Traktor besprüht ein Feld mit Pflanzenschutzmitteln. Viele Schädlinge profitieren von den wärmeren Bedingungen und neue Schadorganismen konnten inzwischen über den Alpenkamm einwandern. Pilze und Insekten können beträchtliche Schäden anrichten, weshalb der Pflanzenschutz in der Landwirtschaft nochmal an Bedeutung gewonnen hat.

Vorausschauende, proaktive Anpassung an den Klimawandel

Beim Blick aus dem Busfenster sehen wir in der Ebene das typische geometrische Muster unterschiedlicher sich abwechselnder Felder. Vor dem Fenster ziehen Felder in den braun-gelben Farbtönen des darauf angebauten trockenheitsresistenten Getreides vorbei. Immer mehr Kulturen müssen heute regelmässig und intensiv bewässert werden. Wir sehen Flächen mit dauerhaft eingerichteten Bewässerungssystemen, auf denen Kulturen während der ganzen Vegetationsperiode kontrolliert und präzise bewässert werden. Die bewässerten Flächen erscheinen noch immer in frischem Grün und die Bewässerung stellt sicher, dass Kulturen wie Kartoffeln überhaupt noch angebaut werden können. Die bewässerten Felder sind möglichst nahe an Flüssen, Kanälen und Seen gelegen damit die Bewässerung mit kleinstmöglichem Aufwand stattfinden kann. Es gibt regional koordinierte Bewässerungs- und Entwässerungssysteme, die eine möglichst faire Verteilung des knappen Wassers ermöglichen.

Wir steigen bei einer Haltestelle an der Landstrasse aus und sehen im ersten Moment nichts mehr, weil ein Traktor auf der unbefestigten Strasse entlangfährt und grosse Mengen Staub aufwirbelt. Nachdem sich der Staub wieder gelegt hat, blicken wir hinüber zu einem Hof und sehen ein überdecktes Speicherbecken für Regenwasser. Mit diesem Becken kann der Landwirtschaftsbetrieb kurzfristige Engpässe in der Bewässerung überbrücken.

Wir gehen am Hof vorbei und sehen eine grosse Fläche mit langen Folientunnels und Gewächshäusern, deren Dächer streifenweise mit Solarpanels bedeckt sind. Solche

Bauten sind in der Landschaft deutlich häufiger anzutreffen als in den 2020er Jahren, denn darin sind die Kulturen vor den häufiger gewordenen Extremereignissen, wie Trockenheit, Schädlingsbefall oder Starkniederschlägen, besser geschützt. Zudem lassen sich die Bedingungen im Innern leichter kontrollieren als auf dem offenen Feld. Viele Gewächshäuser sehen aus wie Industriebauten. Hier findet eine vertikale, technisch hochausgerüstete Landwirtschaft statt. Die Gebäude sind teilweise mehrere Stockwerke hoch und wir fühlen uns hier eher wie in einem Industrieviertel als in einer Agrarlandschaft. In solchen Anlagen können Produktion, Verpackung und Vertrieb nahe beieinander stattfinden, was die Transportwege kurzhält. Wir setzen unseren Weg entlang der Gewächshäuser zu unserer Linken fort.

Zu unserer Rechten zeigt sich ein gegensätzliches Bild. Hier wird Agroforestry betrieben, eine Anbaumethode, die den Anbau von Feldfrüchten oder Gemüse mit Bäumen verbindet. Im Feld vor uns wächst Getreide unter dem Schatten von hochstämmigen Apfelbäumen. Die Obstbäume halten zudem die Feuchtigkeit zurück. So sind die Kulturen besser gegen Trockenheit gewappnet und die Äpfel können zusätzlich geerntet und verkauft werden. Auch die Landschaft wird dank der Bäume attraktiver.

Die meisten Betriebe verwenden neugezüchtete Sorten, die besser an die veränderten Klimabedingungen angepasst sind. Sie unterscheiden sich in der Landschaft kaum von den herkömmlichen Sorten. Es gibt aber auch Felder mit Kulturen, die in der Schweiz früher nicht angebaut wurden, wie beispielsweise das Quinoafeld, das wir inzwischen erreicht haben. Dieses grün-rötliche Feld erweitert die Farbpalette der Landwirtschaftsflächen. Kulturen aus dem Mittelmeerraum, wie beispielsweise Melonen oder Auberginen, gehören inzwischen auch zum normalen Anbauzyklus.

Wir folgen einem Wanderweg, der uns von der Ebene auf einen Hügel hinaufführt. Dort erreichen wir den nächsten Hof. Der Hof ist auf Tierhaltung spezialisiert und besteht deshalb aus geräumigen, hohen und gut durchlüfteten Stallgebäuden, so dass die Tiere am Boden möglichst kühle Bedingungen geniessen können. Es ist Mittagszeit, die Kuhherde steht im Stall und nicht auf der Weide mit den vielen schattenspendenden Bäumen. Die Weideflächen in der Nähe der Ställe sind mit vertrocknetem Gras bedeckt. Offensichtlich bewegen sich die Tiere zwar draussen, weiden aber nur in geringem Masse und werden zugefüttert.

Wir kommen an einem Feld vorbei, das bereits geerntet wurde, weil es dieses Jahr mit zwei Hauptkulturen bepflanzt werden sollte. Dadurch können die Erträge gesteigert werden. Das Feld wurde aber von den heftigen Starkregen vor der jetzigen Trockenperiode in Mitleidenschaft gezogen. Es war damals frisch angesät und daher von der Vegetation noch kaum bedeckt und so gegen Erosion weitestgehend ungeschützt. Wegen der Hanglage hat das abfliessende Wasser viel Oberboden weggeschwemmt und ein Netz von Wassergräben im Feld hinterlassen. Das war Pech, denn eigentlich werden die Felder in Hügellagen möglichst dauernd von Vegetation bedeckt gehalten zum Schutz vor Oberflächenerosion bei Starkregen.

Beim Spaziergang durch die Agrarlandschaft fällt auf, dass zwischen den unterschiedlichen landwirtschaftlichen Kulturen viele Hecken, Bäume und Blühstreifen stehen, die zwecks Windschutz, Schatten sowie Förderung von Nützlingen und Biodiversität errichtet wurden. Auch Untersaaten bieten Nützlingen Lebensraum. Viele Schädlinge profitieren von den wärmeren Bedingungen und neue Schadorganismen konnten inzwischen über den Alpenkamm einwandern, weshalb die Schädlingsbekämpfung in der Landwirtschaft an Bedeutung gewonnen hat. Um nicht immer mehr Pflanzenschutzmittel einsetzen zu müssen, spielen Gewächshäuser sowie Blühstreifen und Landschaftselemente zur Förderung von Nützlingen eine wichtige Rolle. Wir erreichen den Dorfrand und sehen eine Solaranlage auf einer Wiese, auf der Schafe grasen. Die Schafe haben sich in den Schatten der Panels zurückgezogen, um die Mittagshitze besser verkraften zu können.

Die einzelnen Landwirtschaftsbetriebe sind den veränderten klimatischen Bedingungen mit unterschiedlichen Strategien begegnet, was einerseits zu einer vielfältigen Landschaft geführt hat, andererseits die Resilienz der gesamten landwirtschaftlichen Produktion gegenüber Störungen erhöht hat.

5.1.3 Flusslandschaft

Wir wandern durch ein kleines Dorf und erreichen über einen Feldweg das Ufer eines mittelgrossen Flusses. Der Fluss führt wenig Wasser und der tiefe Wasserstand lässt den Fluss eher wie einen grossen Bach aussehen. Man sieht am Rand des Flusses die offene Flusssohle. Dies ist zum einen durch die anhaltende Trockenperiode verschuldet, zum anderen durch die fehlenden Zuflüsse aus den Gletschern, die früher in den Sommermonaten die Flüsse in der Schweiz speisten. Wir kommen an einem Flusskraftwerk zur Stromgewinnung vorbei. Momentan ist es nicht in Betrieb, weil der Pegelstand des Flusses zu tief ist. Es passiert häufiger, dass wegen der niedrigen Abflüsse nicht alle Bedürfnisse der Wassernutzung gedeckt werden können. Später kommen wir zu einer Kläranlage. Niedrigwassersituationen und warme Wassertemperaturen können zu konzentrierten Verunreinigungen in Gewässern führen. Zudem werden von den häufigeren Starkniederschlägen vermehrt Schadstoffe von den umliegenden Gebieten ausgewaschen und gelangen in die Gewässer. Diese mitgeführten Stoffe können das Gewässerökosystem schädigen, weshalb deutlich mehr Ressourcen in die Wasserreinigung und -aufbereitung investiert werden als zu Beginn des Jahrhunderts.

Langsame, reaktive Anpassung an den Klimawandel

Der Fluss folgt in einem kanalisiertem Flussbett heute noch einem sehr ähnlichen Lauf wie in den 2020er Jahren. Wir gehen auf einem Kiesweg auf einer künstlich befestigten Uferböschung, die den Fluss bei Hochwasser in seinem Bett halten soll. Die anhaltende Trockenheit und Hitze haben das Gewässerökosystem aus dem Gleichgewicht gebracht. Auf der trockenen Flusssohle liegen tote Fische, es stinkt und das Flussgebiet wirkt allgemein wenig belebt. Wir überqueren einen zufließenden Bach, der komplett ausgetrocknet ist. Das sporadische Trockenfallen von Bächen hat schweizweit dazu geführt, dass viele Tier- und Pflanzenarten ausgestorben sind, weil sie ihr Verbreitungsgebiet nicht in kühlere, tendenziell höher liegende Gewässer verschieben konnten. Im Hochwasserfall kann die befestigte Uferböschung eine grosse Durchflussmenge bewältigen, bei Extremereignissen sind die umliegenden Felder und Siedlungen jedoch vom Wasser bedroht.

Vorausschauende, proaktive Anpassung an den Klimawandel

Wir gehen auf einem kurvigen Weg durch einen Auenwald, der als Überschwemmungsfläche des Flusses dient. Der Fluss wurde in der ersten Hälfte des Jahrhunderts renaturiert, was zur verbesserten Widerstands- und Anpassungsfähigkeit des Gewässerökosystems an die veränderten klimatischen Bedingungen beigetragen hat. Der Fluss fliesst heute in kleinen bewaldeten Bändern und nicht wie früher als gerader Graben in der Fläche. Die Bewaldung spendet Schatten und hilft die Gewässertemperatur kühler zu halten, was für einige Pflanzen- und Tierarten überlebenswichtig ist. Es sind Vogelstimmen und das Rascheln von Tieren hörbar. Mit der Revitalisierung haben die Tiere mehr Unterschlupfmöglichkeiten erhalten, denn es gibt Stellen mit seichterem und solche mit tieferem Wasser. Auch die zufließenden Bäche wurden renaturiert und sind bewaldet, weshalb einzelne Arten in neue höher gelegene Verbreitungsgebiete umsiedeln konnten. Bei den häufigeren Hochwassern kann der Auenwald überschwemmt und mitgeführtes Sediment sowie Geschiebe abgelagert werden, ohne dass Infrastruktur, Felder und Siedlungen bedroht werden. Die verzweigten Arme des Flusses bieten den Wasserlebewesen im Hochwasserfall einen Rückzugsort.

Am Ufer begegnen wir mehreren Familien auf Picknickwiesen, die sich im Schatten erholen oder im seichten Wasser Abkühlung suchen.

Auf unserem Weg begegnen uns entlang des Flusses immer wieder Stellen, die von einer pink blühenden Pflanze bewachsen sind. Der Farbtupfer sieht zwar schön aus, ist aber problematisch, weil die Pflanze stark invasiv ist und durch die klimatischen Veränderungen besser an die aktuellen Bedingungen angepasst ist als andere einheimische Arten. Die Behörden haben daher Massnahmen ergriffen, um die weitere Verbreitung der Pflanze zu hemmen.

5.1.4 Ländliche Zentrumsgemeinde

Die Landschaft um uns herum wird immer deutlicher von Siedlungen geprägt und wir erreichen schliesslich eine ländliche Zentrumsgemeinde am Ufer eines Sees. Auf unserem Weg durch das Dorf sehen wir mehrere Gebäude, die durch Objektschutzmassnahmen, wie beispielsweise hüfthohe Betonmauern entlang des Gartens oder wasserdicht abdeckbare Kellerfenster gegen Hochwasser geschützt sind. Seit schweizweit immer häufiger lokale Hochwasser auftreten, besitzt der Hochwasserschutz im Siedlungsgebiet eine grössere Bedeutung. So verläuft auch der Dorfbach in einem, beim aktuellen Wasserstand viel zu breit und tief aussehendem Kanal mit hohen Dämmen, damit die umliegenden Gebäude im Hochwasserfall möglichst gut geschützt sind. Wir blicken über den See zu einer Gemeinde am anderen Ufer hinüber.

Langsame, reaktive Anpassung an den Klimawandel

In den letzten Jahrzehnten war das Dorf am anderen Ufer immer wieder in den Medien, weil mehrere Murgänge in Wildbächen am Hang oberhalb des Dorfes ausgelöst worden waren und im Dorf für Verwüstung sorgten. Mit dem Klimawandel wurden solche Naturgefahrenereignisse häufiger und intensiver, was vermehrt zu Schäden geführt hat.

Vorausschauende, proaktive Anpassung an den Klimawandel

Das Dorf am anderen Ufer hat die Gefahr durch Wildbäche und Murgänge vorbildlich gebannt. Wie in anderen Gemeinden auch, gelten dort strenge raumplanerische Massnahmen, wie Bauverbote und Vorschriften für den Objektschutz. Dank diesen Massnahmen hat das Schadenspotenzial mit den veränderten klimatischen Bedingungen und erhöhten Risiken nicht weiter zugenommen. Dafür musste an einigen Orte aufs Bauen verzichtet werden.

Wir spazieren für eine Abkühlung zum Strandbad am See. Dort angekommen, müssen wir aber feststellen, dass das Bad geschlossen ist. Im See herrscht Badeverbot wegen Cyanobakterien, die von den warmen Temperaturen profitieren. Wir kommen an einer Wasseraufbereitungsanlage vorbei, wo das Seewasser so aufbereitet wird, dass es Trinkwasserqualität erreicht. Die Anlage hat einen wichtigen Stellenwert für die Trinkwasserversorgung der umliegenden Gemeinden und wurde deshalb bereits im Bau mit einem effektiven System zum Schutz vor Schäden durch Quaggamuscheln ausgestattet, denn diese haben von den höheren Wassertemperaturen ebenfalls profitiert und sich stark vermehrt.

5.1.5 Feuchtgebiet

Wir haben unerwartet Zeit, um das Feuchtgebiet in der Mündungsgegend des Flusses zu besuchen. Die tieferen Pegel von Fluss und See lassen es trockener aussehen als erwartet. Die hohe Resilienz dieses Ökosystems und eine ausgiebige Pflege durch die Gemeinde, haben es aber ermöglicht, dass verschwundene Arten durch funktionell ähnliche Arten ersetzt werden konnten und das Feuchtgebiet daher noch immer als lebendige und artenreiche Gegend wahrgenommen werden kann.

Heutige Landschaft**Zukünftige Landschaft bei langsamer, reaktiver Anpassung an den Klimawandel****Zukünftige Landschaft bei vorausschauender, proaktiver Anpassung an den Klimawandel**

Abb. 5.2: Ausschnitte der 360° Panoramabilder, die drei mögliche Zustände einer fiktiven Landschaft im Mittelland zeigen. Sie beziehen sich auf die Erläuterungen zur Agrarlandschaft, dem Feuchtgebiet und Wald. Die Bilder sind Fotomontagen, inspiriert durch die Landschaft im Seeland.
© Ikonaut GmbH

5.1.6 Wald

Der Weg führt uns aus dem Feuchtgebiet hinaus und hinauf zum Gemeindewald am Hang oberhalb des Dorfes.

Langsame, reaktive Anpassung an den Klimawandel

Beim Durchqueren des Waldes fallen immer wieder grössere Flächen ohne Bäume auf. Der Wald ist zwar auch hier grün, weil Sträucher und Jungbäume den Boden bedecken, aber die ausgewachsenen Bäume fehlen und der Wald wirkt eher wie eine Buschfläche. Weil das Kronendach fehlt, ist es hier wärmer als im Rest des Waldes. Auch dort wo der Wald gesund und grundsätzlich wie gewohnt aussieht, fallen immer wieder Einzelbäume auf, die krank wirken. Die steigende Mortalität von Waldbäumen betrifft besonders Fichten, Tannen und Buchen. Buchen und Fichten sind seit langer Zeit die Hauptbaumarten in vielen Wäldern des Mittellandes. So auch in diesem Wald. Ihre optimalen Verbreitungsgebiete haben sich mit dem Klimawandel in deutlich höhere Lagen verschoben; im Mittelland leiden sie unter Trockenheits- und Hitzestress. Eine Anpassung an den Klimawandel mit hitze- und trockenheitsbeständigeren Arten wurde in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts verpasst. Deshalb sieht der Wald insgesamt nicht gesund aus. Einzelne gesunde Bäume treffen wir im Wald trotzdem noch an. Es gedeihen vor allem Laubbäume, wie beispielsweise Eichen. Nadelbäume sieht man kaum noch gesunde. Wir dringen weiter in den Wald vor und erreichen an einer exponierten Hanglage eine Stelle, die kürzlich wegen starkem Schädlingsbefall grösstenteils gerodet werden musste, um einen Befall der restlichen Waldfläche möglichst zu verhindern. Die Aufräumarbeiten sind noch nicht abgeschlossen und deshalb können wir nicht den ursprünglich geplanten Weg nehmen, sondern müssen einen Umweg gehen. Wir gehen durch einen lichten niederen Wald, der nicht mit den geschlossenen dichten Wäldern aus den 2020er Jahren vergleichbar ist. Da der Wald kahler, weniger grün und stellenweise stark beschädigt ist, gehen die Menschen zur Erholung weniger gerne in den Wald als früher. Der Wald sieht auch aus der Ferne verändert aus, weil die kahlen Stellen von weit her sichtbar sind. Wir werden von einem Lastwagen überholt, der die schädlingsbefallenen Baumstämme abtransportiert. Diese können nicht mehr zu einem normalen Marktpreis verkauft werden, sondern nur noch als Brennholz zweiter Klasse.

Vorausschauende, proaktive Anpassung an den Klimawandel

Der Wald, in den wir eintreten, sieht auf den ersten Blick so aus, als hätte er sich durch den Klimawandel nicht verändert. Beim genauen Hinschauen fällt auf, dass der Wald eine grosse horizontale und vertikale Strukturvielfalt aufweist. Das heisst die Baumarten sind sehr durchmischt und hohe und weniger hohe Bäume wechseln sich ab. Oftmals ist es nämlich so, dass Störungen wie Trockenheit oder Schädlingsbefall nur eine Baumart oder eine Grössenklasse von Bäumen betreffen, während die anderen Bäume gesund bleiben. Artendurchmischte Bestände sind nicht nur resistenter gegen Störungen, sie erholen sich auch schneller davon. Wir sehen vereinzelt kranke oder gar abgestorbene Bäume, aber im Gesamtbild wirkt der Wald dicht und gesund. Es fällt auf, dass im Wald kaum mehr Fichten und Buchen zu finden sind. Es wurden bereits vor mehreren Jahrzehnten Baumarten identifiziert, die gegenüber dem heutigen Klima an diesem Waldstandort mit den längeren Trockenperioden resilienter sind. Diese Arten wurden gezielt gefördert und so wurde der Baumbestand in einen robusten Mischwald überführt. Es sind beispielsweise mehr Eichen, Linden, Nussbäume, Waldföhren, Schneeballblättrige- und Feldahorne zu sehen und der Nadelholzanteil ist deutlich geringer als zu Beginn des Jahrhunderts. Dies ist zu anderen Jahreszeiten aus der Ferne sichtbar, denn der Wald ist im Frühling in helleren Grüntönen und im Herbst in bunten Farben zu sehen. Im Winter ist der Wald nur noch an vereinzelt Stellen grün. Mit Frühwarnsystemen wird sichergestellt, dass ein Schädlingsbefall frühestmöglich erkannt und ausgebremst werden kann, was zur Gesundheit des Waldes als Gesamtes beiträgt. Wir werden von einem Lastwagen überholt, der gefällte Baumstämme zur Weiterverarbeitung transportiert. Um die Wirtschaftlichkeit der Holzproduktion bestmöglich zu erhalten, wurde die Umtriebszeit sowie der Zieldurch-

messer der Bäume reduziert, um so den Anteil störungsanfälliger Bestände zu reduzieren. Wir erreichen ein Stück Wald, das ausschliesslich der Holzproduktion dient und daher Plantagencharakter hat und gut erschlossen ist.

5.1.7 Am Aussichtsturm

Am höchsten Punkt des Waldes erreichen wir einen Aussichtsturm und klettern hinauf. Von oben geniessen wir eine Rundumsicht auf den Wald, die umliegenden Dörfer, den See, die umliegenden Landwirtschaftsflächen sowie die Hügel in der Nähe und die Berge am Horizont. Am gegenüberliegenden Hügel sehen wir einen Wald, der zur Hälfte niedergebrannt ist. Es ist eine schwarze Fläche mit einzelnen emporragenden verkohlten Baumstämmen zu sehen. Die Waldbrandgefahr ist auch diesen Sommer durch die anhaltende Trockenheit in weiten Teilen der Schweiz sehr hoch und fast überall herrscht ein Feuerverbot. Obwohl die Forstbetriebe brennbares Astmaterial zügig abführen oder zerkleinern damit es rasch abgebaut wird, kommt es durch menschliches Fehlverhalten und ungünstige Windverhältnisse immer wieder zu Waldbränden, deren Spuren in der Landschaft über viele Jahre hinweg sichtbar sind. Wir blicken in Richtung Jura und sehen auf einem Hügel einen der dortigen Windparks. Der Hügel war in den 2020er Jahren noch vollständig bewaldet, doch nachdem der ganze Südhang niedergebrannt war und danach die Humusschicht von einem Starkniederschlagsereignis weggespült wurde, wuchs kein Wald mehr nach. Der Standort ist nicht mehr waldfähig und wird seither für die Energiegewinnung genutzt. In die andere Richtung sehen wir in der Ferne die Alpen. Viele Berge, die früher noch schneebedeckt waren, sind heute schneefrei und das Panorama ist daher grau und nicht mehr weiss. Auch die restliche Landschaft hat sich farblich verändert. Die anhaltende Trockenheit hat braune und gelbe Farbtöne in der Landschaft dominanter gemacht, während frische Grüntöne vorwiegend in der Nähe von Gewässern, auf bewässerten Flächen und im Wald vorkommen.

Langsame, reaktive Anpassung an den Klimawandel

Beim Blick zum nächsten Dorf sehen wir in den Strassen ein paar Autos fahren, aber keine Fussgänger oder Radfahrerinnen. Ausserhalb des Dorfes ziehen Staubwolken über die braunen, ausgetrockneten Felder. Die bewässerten Flächen stechen deutlich hervor.

Vorausschauende, proaktive Anpassung an den Klimawandel

Beim Blick zum nächsten Dorf erkennen wir das viele Grün an den Gebäuden und im öffentlichen Raum. Von hier oben sehen wir auch die vielen Folientunnels und Gewächshäuser in der Ebene, durch die wir gewandert sind.

Wir steigen vom Turm hinab und machen uns in der Abendsonne auf den Heimweg zurück ins Jahr 2023.

5.2 Eine Wanderung im Entremont 2085

Charakteristisch für die Landschaft im Entremont sind die alpinen Täler, beidseitig von hohen Bergen flankiert. In den Tälern befinden sich meist kleine und ein paar mittelgrosse Dörfer, teilweise mit Skigebieten. Dort, wo es nicht zu steil und felsig ist, sind die Hänge bewaldet. Die Landwirtschaft besteht hauptsächlich aus der Alpwirtschaft. Sowohl die Hauptflüsse in den Tälern als auch zahlreiche Nebenflüsse, die von den Hängen hinunterfliessen, prägen die Täler. Die umliegenden Berge sind teilweise über 3000 m hoch, weshalb die Landschaft dort hochalpin ist. Es sind vor allem Felsen, Gletscher und Geröllhalden.

Heutige Landschaft**Zukünftige Landschaft bei langsamer, reaktiver Anpassung an den Klimawandel****Zukünftige Landschaft bei vorausschauender, proaktiver Anpassung an den Klimawandel**

Abb. 5.3: Ausschnitte der 360° Panoramabilder, die drei mögliche Zustände einer Landschaft im Berggebiet zeigen. Sie beziehen sich auf die Erläuterungen zum Dorf, Fluss und Wald. Die Bilder sind aus zwei Fotografien der Region Entremont zusammengesetzt. © Ikonaut GmbH

5.2.1 Bergdorf

Nun brechen wir abermals ins durchschnittlich 4°C wärmere Jahr 2085 auf. Unser Spaziergang beginnt bei der Bushaltestelle «Schule» in einem kleinen Bergdorf. Es liegt auf rund 1600 m ü. M. etwas oberhalb der Talsohle am Sonnenhang und wird auf beiden Talseiten von 2000 bis 4000 m hohen Bergen flankiert. Durch das Tal fliesst ein Gebirgsfluss. Es ist heiss und hat seit über zwei Wochen nicht mehr geregnet.

Wir spazieren die selten befahrene Dorfstrasse entlang. Das Dorf besteht aus vielen einzelnen, meist kleinen, Gebäuden. Grössere Mehrfamilienhäuser findet man hier keine.

Langsame, reaktive Anpassung an den Klimawandel

Sowohl der Winter- als auch der Sommertourismus haben in der Region gelitten. Im Winter fehlt die attraktive Winteratmosphäre, weil oft kein Schnee liegt und es deutlich häufiger regnet als zu Beginn des Jahrhunderts. Früher betrieb das Dorf ein kleines Skigebiet und der Wintersport war ein wichtiger Bestandteil des lokalen Lebens. Doch in den 2030er Jahren wurde es wegen fehlendem Schnee geschlossen und die Liftanlagen zurückgebaut. Das hat nicht nur die Dorfbevölkerung enttäuscht, es kommen deshalb auch weniger Touristen in die Region und im Winter werden im Tourismussektor kaum noch Einnahmen generiert. Auch im Sommer sehen wir einige leerstehende Häuser, Läden und Restaurants gibt es hier schon lange nicht mehr. Im Dorf wurden kaum neue touristische Angebote geschaffen, die die Attraktivität der Region erhöhen könnten. Daher ging die Anzahl an Arbeitsplätzen im Dorf zurück. Im Sommer ist es im Entremont zwar kühler als im Mittelland, aber in den Sommermonaten ist es trotzdem heiss und sehr trocken. An vielen Gebäuden hängen die Kästen von Klimaanlage. Vor uns ist eine Baustelle, die so viel Staub aufwirbelt, dass wir unseren Weg kaum erkennen können. In den Gärten hat die dominante Farbe von leuchtendem Grün zu Gelb gewechselt, weil die Vegetation unter der Trockenheit leidet.

Wir spazieren zum Fluss hinunter, überqueren ihn und folgen seinem Ufer. Von dem Zeltplatz, der früher hier stand, sind keine Spuren mehr zu sehen.

Vorausschauende, proaktive Anpassung an den Klimawandel

Die Gebäude haben kein einheitliches Erscheinungsbild. Wir kommen an historischen Chalets aus Holz sowie älteren Gebäuden aus Stein mit Steildächern aus Steinplatten und Dachvorsprüngen zum Schutz vor Schnee vorbei. Dazwischen stehen neuere Gebäude. Sie sind in helleren Farben gehalten damit sie im Sommer kühler bleiben. Viele haben dicke Mauern, wie es früher bei den traditionellen Steinhäusern üblich war, denn so bleiben sie im Sommer innen kühler. Zudem sind sie häufig mit begrünten Flachdächern und Balkonen versehen, weil kaum mehr mit grossen Schneelasten zu rechnen ist und die Begrünung bei Hitze kühlend wirkt. Viele Gebäude haben Solarpanels auf ihren Dächern. In den Gärten fallen die zahlreichen, schattenspendenden Bäume auf, viel mehr als in den 2020er Jahren. Die Menschen versuchen ihre Gärten möglichst als kühle Oasen zu gestalten. Ab und zu kommen wir an grösseren Wiesen mit Obstbäumen innerhalb des Dorfes vorbei. Diese lichte Dorfstruktur mit vielen Grünflächen macht die Hitze erträglich und bietet den Menschen ein angenehmes Wohn- und Arbeitsklima. Das Dorf gewinnt einen Teil seiner Einnahmen aus dem Tourismus und dem Gastgewerbe. Obwohl das Dorf früher primär eine Winterdestination war, wird heute auf ein diverses touristisches Angebot gesetzt, das für jede Saison vielseitige Attraktionen zu bieten hat, auch wenn im Winter meist kein Schnee mehr liegt. Die Angebote im Sommer locken Menschen während der Hitzeperioden in die vergleichsweise kühlen Berggebiete, wo sie Erfrischung und Abwechslung finden. Wir kommen am Dorfrand an einem touristisch genutzten traditionellen Chalet vorbei. Oberhalb des Chalets wurde ein bunter Kräuter- und Blumengarten angelegt, in dem eine Besucherfamilie die Verwendung von Kräutern zur Herstellung einer eigenen Teemischung erlernt. Eine typische Szene, denn es wird im Dorf primär auf saisongerechte, lokale und familiäre Angebote gesetzt. In der Landschaft sind daher keine grossen Tourismusanlagen sichtbar und die bestehenden Angebote fügen sich unauffällig in die Dorfstrukturen ein. Das kleine Skigebiet im Dorf wurde in

den 2030er Jahren wegen fehlendem Schnee geschlossen. Ein Teil der Liftanlagen wurde zurückgebaut und heute ist nur noch ein Sessellift erhalten, um bequem zu Wander-, Kletter- und Mountainbike-Gebieten zu gelangen. Die Schliessung des Skigebiets war für die Dorfbevölkerung eine Enttäuschung, weil der Wintersport ein wichtiger Bestandteil des lokalen Lebens war.

Wir kommen aus dem Dorf hinaus und steigen zum Fluss hinab. Diesen überqueren wir und erreichen am anderen Ufer einen Zeltplatz. Er ist über die Jahre hinweg gewachsen, weil er die anderen touristischen Angebote in der Region gut ergänzt. Beim Ausbau wurden viele neue Bäume gepflanzt, um die Beschattung der Parzellen sicherzustellen. Deshalb konnten wir vom Dorf her nicht viel vom Zeltplatz sehen.

5.2.2 Fluss

Der Fluss wird von zahlreichen Wildbächen gespeist, die an den Hängen weit oberhalb des Tals entspringen. Aktuell führt er wegen der Trockenperiode wenig Wasser. Dadurch, dass weniger Schnee fällt, die Gletscher verschwunden sind und im Sommer häufig längere Trockenperioden auftreten, sind die Pegelstände im Sommer oft tief, was sich negativ auf das Gewässerökosystem auswirkt. Der Fluss ähnelt momentan eher einem Bach als einem Fluss. Aber nicht nur die Spuren von Trockenheit, sondern auch diejenigen von Hochwasser sind sichtbar. Die Intensität und Häufigkeit der Starkniederschläge hat zugenommen. Zudem fällt heutzutage mehr Niederschlag in Form von Regen statt Schnee und fliesst somit direkt ab. Dies hat die Hochwassersaison in alpinen Einzugsgebieten verlängert und im Frühsommer ist das Risiko einer Überlagerung von Schneeschmelze und intensiven Niederschlägen erhöht. Insgesamt führt dies häufiger zu Hochwasser und in den Gebirgsflüssen verstärken sich Erosion und Materialumlagerungen. Weiter haben die Abnahme des Gletschervolumens und der Permafrostrückzug im Hochgebirge die Hänge instabiler gemacht. Der erhöhte Sedimenteintrag aus den umliegenden Wildbächen hat zu sichtbaren Ablagerungen im Gerinne des Flusses geführt und oberhalb der Brücke wurde der Flusslauf durch Geschiebeablagerungen um mehrere Meter verschoben. Einige Meter weiter sehen wir die Spuren eines Murgangs. Die häufigeren Hochwasser und das lockere Gestein haben zu einer Zunahme solcher Ereignisse in Wildbächen beigetragen. Wir spazieren dem Ufer entlang flussabwärts. Uns begegnen immer wieder Stellen, die von einer pink blühenden Pflanze bewachsen sind. Der Farbtupfer sieht zwar schön aus, ist aber problematisch, weil die Pflanze stark invasiv ist und durch die klimatischen Veränderungen besser an die aktuellen Bedingungen angepasst ist als andere einheimische Arten. Die Behörden haben daher Massnahmen ergriffen, um die weitere Verbreitung der Pflanze zu einzudämmen. Wir erreichen das nächste Dorf.

5.2.3 Wildbach

Langsame, reaktive Anpassung an den Klimawandel

Das Dorf wird von einem Wildbach durchquert, der aus dem Hochgebirge kommt und in seinem Unterlauf kanalisiert ist. In der Umgebung dieses Wildbachs finden aktuell Räumungsarbeiten und kleinere Gebäudereparaturen statt, weil mehrtägige Regenfälle gefolgt von einem heftigen Gewitter vor einigen Wochen einen Murgang ausgelöst haben, der die Durchflusskapazität des Wildbachgerinnes überstiegen hat. Der Murgang ist aus dem Gerinne ausgebrochen, floss zuerst über eine Kuhweide und bahnte sich danach seinen Weg durch das Dorf. Seine Spuren sind deutlich sichtbar, es liegt Geröll und Schlamm auf den Strassen. Glücklicherweise wurde dank einer frühzeitigen Evakuierung niemand verletzt, aber es sind Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen und damit auch hohe Kosten entstanden. Die Spuren des Murgangs sind auf unserem Spaziergang über die Wiesen hinauf zum Waldrand als ein braunes Band aus Schlamm und Gesteinsblöcken unterschiedlicher Grössen deutlich sichtbar. Wir blicken hinunter ins Tal und sehen die Stelle des ehemaligen Zeltplatzes bei der Mündung des Wildbaches in den Fluss. Der Campingplatz musste wegen hohem Hochwasser- und Murgangrisiko geschlossen werden.

Vorausschauende, proaktive Anpassung an den Klimawandel

Das Dorf wurde bis in die 2030er Jahre von einem Wildbach durchquert, der aus dem Hochgebirge kam und in seinem Unterlauf kanalisiert war. Wir gehen durch das Dorf zum Wald hoch und folgen einem Weg rund 200 m in den Wald hinein. Hier steht ein Geschiebesammler zum Rückhalt von festem Material wie Geröll und Ästen. Nach dem Durchfluss des Geschiebesammlers folgt der Wildbach heute einem anderen Verlauf als früher und fließt in einem künstlich angelegten, aber nicht kanalisiertem Gerinne über eine grosse Wiese ausserhalb des Dorfes und mündet rund 300 m vor dem Dorf in den Fluss. Das Risiko von Murgängen im Dorf wurde durch diese Massnahmen deutlich reduziert, und Material, das die Kapazität des Geschiebesammlers übersteigt, kann sich auf der Wiese mit vergleichsweise kleinem Risiko ablagern. Die Gefahrenkarten wurden entsprechend angepasst und das sanierungsbedürftige Schulhaus mit Mehrzweckhalle, das vorher auf der grossen Wiese stand, wurde am anderen Ende des Dorfes in einem Ersatzneubau wieder erstellt. Dank diesen Massnahmen zur Anpassung an die veränderten Bedingungen fühlen sich Einheimische und Touristen sicher. Wir blicken hinunter zum Zeltplatz. Dank stark verbesserten Überwachungs- und Frühwarnsystemen sowie Notfallkonzepten kann der Zeltplatz bei der ehemaligen Mündung des Wildbachs weiterhin betrieben werden und das Flussufer kann von den Übernachtungsgästen und der Dorfbevölkerung als Erholungsraum mit willkommenen Abkühlungsmöglichkeiten genutzt werden.

5.2.4 Wald

Wir folgen dem Wanderweg weiter bergaufwärts in den Wald hinein. Der Wald ist ein Schutzwald und soll den Siedlungsraum und die Infrastruktur vor verschiedenen Naturgefahren, wie Lawinen, Steinschlag oder Hangrutschen, schützen. Während zu Beginn des 21. Jahrhunderts die Lawinenschutzfunktion noch zentral war, hat diese Funktion an Bedeutung verloren, weil weniger Schnee fällt und folglich die Anzahl kritischer Tage für im Wald anreisende Lawinen abgenommen hat. Hingegen hat der durch den Klimawandel ausgelöste Rückzug des Permafrosts das Risiko für Rutschungen, Steinschlag und Murgänge erhöht. Zudem sorgen höhere Temperaturen und steigende Schneefallgrenzen dafür, dass mehr Niederschlag in Form von Regen statt Schnee fällt, was zu einem höheren Risiko von flachgründigen Rutschungen, Hangmuren und Bodenerosion führt. Deshalb müssen die Schutzfunktionen des Walds gegenüber Sturzprozessen, Murgängen, Rutschungen und Erosion verstärkt werden. Allerdings sind die Gebirgswälder heute stärker als früher von Schädlingen bedroht. Diese können sich infolge der steigenden Temperaturen und zunehmenden Trockenheit auch in höheren Lagen schneller und stärker ausbreiten.

Langsame, reaktive Anpassung an den Klimawandel

Schon aus der Ferne fallen grosse Flächen ohne Bäume auf. Fichten gehörten lange Zeit zu den Hauptbaumarten dieses Waldes, können an diesem trockenen Standort aber nicht mehr gedeihen. Zudem profitieren viele Schädlinge von den höheren Temperaturen und von der Trockenheit. So sieht der Wald insgesamt nicht gesund aus und leidet unter dem Absterben der Hauptbaumarten. Dennoch finden wir auch gesunde Bäume im Wald. Dies sind vor allem Laubbäume, Lärchen und Tannen. Wir dringen weiter in den Wald vor und erreichen an einer exponierten Hanglage ein Stück Wald, das kürzlich wegen Schädlingsbefall gerodet werden musste. Hier ist es heiss. Die Aufräumarbeiten sind noch nicht abgeschlossen und wir können deshalb nicht den ursprünglich geplanten Weg nehmen, sondern müssen einen Umweg machen. Doch auch die Alternativroute ist unwegsam, weil sie durch ein Rutschgebiet führt. Hier stehen die Bäume schief, der Boden ist von grossen Unebenheiten und Rissen übersät. Der Pfad wurde durch die Rutschung teilweise um rund zwei Meter versetzt, was zu hohen Stufen führte. Da der Wald kahler und stellenweise massiv beschädigt ist, ist die Schutzwirkung des Waldes stark beeinträchtigt. Wir kommen an einer Stützmauer aus Beton vorbei, die den Hang zusätzlich vor Rutschungen schützt.

Vorausschauende, proaktive Anpassung an den Klimawandel

Der Wald, in dem wir den Hang hinauf wandern, sieht auf den ersten Blick so aus, als hätte er sich durch den Klimawandel nicht gross verändert. Wir sehen vereinzelt Bäume, die nicht gesund wirken oder abgestorben sind, aber im Gesamtbild wirkt der Wald dicht und gesund. Erst beim genauen Hinschauen fällt auf, dass sich die Zusammensetzung der Baumarten verändert hat. So sind im Wald beispielsweise weniger Fichten und mehr Tannen, Lärchen und Laubbäume zu finden. Diese Bäume sind gegenüber den längeren Trockenperioden resilienter. Der höhere Laubholzanteil ist farblich deutlich erkennbar, weil der Wald im Frühling und Sommer in helleren Grüntönen erscheint und im Winter teilweise braun ist. Obwohl der Laubholzanteil deutlich gewachsen ist, sind die vorhandenen Nadelbäume ökonomisch wertvoll. Bereits vor einigen Jahrzehnten wurden durch entsprechende Pflegemassnahmen Baumarten gefördert, die an das heutige Klima und insbesondere an die häufigeren Trockenperioden gut angepasst sind. So kann der Wald seine Schutzfunktion weiterhin erfüllen. Die Pflege der alpinen Schutzwälder wird sehr genau auf die Boden- und Klimabedingungen der einzelnen Standorte abgestimmt, um die jeweiligen Schutzansprüche erfüllen zu können. Wir erreichen ein neu aufgeforstetes Stück Wald, das eingezäunt ist. Dieses Stück Wald wurde gerodet, weil es von Borkenkäfern befallen war. Dank einem Frühwarnsystem wurde der Schädlingsbefall rechtzeitig erkannt und es musste nur eine kleine Waldfläche gerodet werden. Der Zaun dient der Abwehr von Wild, das schwere Verbisschäden an den jungen Bäumen anrichten kann.

Nach einem längeren Aufstieg erreichen wir die obere Waldgrenze. Sie hat sich in den letzten hundert Jahren markant nach oben verschoben, weil die Wachstumsbegrenzung durch die Kälte abgenommen hat. Der Wald hat folglich an vielen Orten im Tal an Fläche zugenommen und die Alpwirtschaftsfläche ist kleiner geworden. Oberhalb des Waldes geniessen wir eine schöne Aussicht auf das Tal und die gegenüberliegende Hangseite. Dort sehen wir einen Wald, von dem rund die halbe Fläche niedergebrannt ist. Aus der schwarzen Fläche ragen einzelne verkohlte Baumstämme heraus. Jetzt ist die Fläche wegen der fehlenden Bewaldung besonders anfällig für Erosion, was oberflächliche Rutschungen und Murgänge nach sich ziehen kann. Die Waldbrandgefahr ist diesen Sommer durch die anhaltende Trockenheit auch im Berggebiet sehr hoch und fast überall herrscht ein Feuerverbot. Menschliches Fehlverhalten und ungünstige Windverhältnisse verursachen immer wieder Waldbrände, deren Spuren in der Landschaft über Jahre hinweg sichtbar sind und Einbussen der Schutzfunktion des Waldes mit sich bringen. Am gegenüberliegenden Hang sehen wir eine Fläche, die kürzlich in Brand stand.

Langsame, reaktive Anpassung an den Klimawandel

Aufgrund fehlender Möglichkeiten für Wasserentnahmen von Löschhelikoptern konnte der Waldbrand auf dieser Fläche nur schwer gelöscht werden und deshalb ist der halbe Wald abgebrannt.

Vorausschauende, proaktive Anpassung an den Klimawandel

Dank zahlreichen Wasserentnahmestellen für die Löschhelikopter konnte der Waldbrand auf dieser Fläche rasch unter Kontrolle gebracht werden. Die verbrannte Fläche ist nur klein.

Heutige Landschaft**Zukünftige Landschaft bei langsamer, reaktiver Anpassung an den Klimawandel****Zukünftige Landschaft bei vorausschauender, proaktiver Anpassung an den Klimawandel**

Abb. 5.4: Ausschnitte der 360° Panoramabilder, die drei mögliche Zustände einer Landschaft im Berggebiet zeigen. Sie beziehen sich auf die Erläuterungen zum Wildbach, Wald und Gletschergebiet. Die Bilder sind aus zwei Fotografien der Region Entremont zusammengesetzt.
© Ikonaut GmbH

5.2.5 Mit der Seilbahn zum Aussichtspunkt

Wir kommen zur Mittelstation einer Seilbahn, die auf einen über 2500 m hohen Gipfel führt. Wir steigen ein und nach einigen Minuten Fahrt sehen wir zu unserer Linken eine grosse Solaranlage mit Photovoltaik-Modulen, die sich besonders für den Einsatz im alpinen Gebiet eignen. Die Anlage steht auf einer Alpweide und unter den Panels weiden Ziegen, die in diesem heissen Wetter vom zusätzlichen Schatten profitieren. Oben angekommen gehen wir die restlichen 500 m bis zum Aussichtspunkt. Hier haben wir einen guten Rundblick zu Gipfeln, in hochalpine Gebiete, hinab ins Tal, wo wir gestartet sind, und ins Gebiet des ehemals grössten Gletschers der Region. Von ihm ist nur noch ein sehr kleines Stück übrig, der Rest ist geschmolzen. Das Abschmelzen des Gletschers hat die Stimmung und die touristische Attraktivität der Region verändert. Die Landschaft um uns herum hat seit den 2020er Jahren deutliche farbliche Veränderungen erlebt: Einerseits von Weiss zu Grau, denn im Sommer liegt selbst auf den hohen Gipfeln kaum Schnee und die meisten Dauerschneeflächen und Gletscher sind verschwunden. Jetzt sehen wir graue Felsen und Geröll. Andererseits änderten sich die Farben von Grün zu Gelb, denn die nicht bewässerten Grasflächen erscheinen gelb und sind aufgrund der Sommertrockenheit weniger ertragreich.

5.2.6 See im ehemaligen Gletschergebiet

Wir blicken zum ehemaligen Gletschergebiet am Gegenhang. Der Gletscherrückzug hat eine deutliche Vertiefung freigelegt, worin über die Zeit ein immer grösserer See entstanden ist. Der See übernimmt einen Teil der Wasserspeicherfunktion des Gletschers, was auch für tiefer gelegene Regionen von Bedeutung ist. Er gleicht die durch den Klimawandel veränderten saisonalen Abflüsse und die ausgeprägteren Niedrigwasserstände im Sommer teilweise aus. Auf dem See befindet sich eine schwimmende Solaranlage, die wie ein grosses Floss aussieht und von schrägstehenden dunkelblauen Panels überdeckt ist. Solche Solaranlagen gab es in dieser Region vereinzelt bereits in den 2020er Jahren, aber heute findet man sie auf fast allen grösseren Seen der Region. Während des Gletscherrückzugs kam es mehrmals zu grösseren Felsstürzen, weil die vom Gletscherrückzug freigelegten Talflanken durch die fehlenden Eismassen instabil wurden. Die Spuren dieser Felsstürze sind an einigen Stellen als Gesteinskegel sichtbar. Wenn sich ein solches Sturzereignis am Seeufer abspielen würde, könnte es durch die fallenden Gesteinsmassen zu einer Flutwelle kommen, die auch weit flussabwärts erhebliche Schäden verursachen könnte.

Langsame, reaktive Anpassung an den Klimawandel

Der See konnte mit dem Bau einer Staumauer zu einem wichtigen Speichersee gestaut werden und leistet einen bedeutenden Beitrag zur Energieversorgung. Die südexponierte Staumauer ist mit Solarpanels bedeckt. Die Energieproduktion hat in der Region einen hohen Stellenwert und prägt die Landschaft. Die Staumauer sticht in der Landschaft hervor und das Flussökosystem unterhalb der Staumauer wurde stark verändert. Der Pegel des Sees kann dank der Staumauer reguliert werden, was in Hoch- und Niedrigwassersituationen zur Normalisierung des Abflusses im Einzugsgebiet beiträgt. Der Gefahr von Felsstürzen und Flutwellen wurde beim Bau der Staumauer insofern Rechnung getragen, als dass kontrollierte Überläufe und genügend Freibord gegen Impulswellen vorhanden sind. Der zusätzliche Eintrag von Sedimenten infolge des tauenden Permafrosts kann zur Verlandung des Sees und zu Schäden an Infrastrukturen um den Stausee führen. Daher muss die Infrastruktur gut gewartet werden, was zu hohen Unterhaltskosten führt.

Vorausschauende, proaktive Anpassung an den Klimawandel

Die Grösse des Sees wird durch die natürlichen geomorphologischen Gegebenheiten vorgegeben. Nach dem rapiden Gletscherrückzug entstanden auf dem dadurch freige-

legten Terrain zahlreiche neue Lebensräume im und um den See. Mehrere Wander- und Bike-Wege führen entlang der Hänge um den See herum und teilweise direkt ans Seeufer, das als Erholungsraum genutzt werden kann. Auf dem See sehen wir eine Handvoll Stand-Up-Paddler und Gummiboote und die ganz Mutigen schwimmen oder planschen sogar im kalten Gebirgssee. Es wurde ein Erdwall errichtet, um den See permanent zu erhalten und den Wasserstand regulieren zu können. Weiter hangabwärts sehen wir noch mehr solche Seen, die auch als Ausgleichsbecken im Fall von Flutwellen dienen, um allfällige Schäden an Siedlungen und Infrastrukturen im Tal zu reduzieren.

5.2.7 Berglandwirtschaft

Wir setzen unseren Weg in Richtung Tal fort. Nach rund einer Stunde haben wir die hochalpine Umgebung hinter uns gelassen und wandern vermehrt durch Wiesen. Wir bleiben an einer Wiese stehen, die nicht mehr alpwirtschaftlich genutzt wird, weil keine Wasserleitungen hierhin verlegt wurden und die Quellen versiegt sind. Auf der Wiese blühen viele Blumen, um die Schmetterlinge und andere Insekten tanzen. Neben einzelnen Büschen finden wir viele seltene Arten, die auf bewässerten Wiesen und Weiden keine Chance haben.

Langsame, reaktive Anpassung an den Klimawandel

Wir erreichen eine Alpweide, wo Kühe gesömmert werden – heutzutage nur noch ein seltener Anblick. Die Erwärmung, die kürzere oder teilweise nicht vorhandene Schneebedeckung, sowie eine verlängerte Vegetationsperiode ermöglichen zwar einen früheren Alpaufzug und eine längere Alpdauer als zum Anfang des Jahrhunderts. Doch viele Alpen mussten aufgegeben werden, weil nicht mehr genügend Wasser für die Tiere zur Verfügung steht. Infolge der zunehmenden Sommertrockenheit führen viele Quellen im alpinen Gebiet kaum mehr Wasser. Zudem gibt es kaum effektive regional koordinierte Vorgehensweisen zur Wasserverteilung und die traditionelle Bewässerungsinfrastruktur wurde nicht genügend unterhalten, beziehungsweise nicht auf die veränderten Wasserverfügbarkeiten angepasst. Weil heute weniger Alpen für die Sömmerng zur Verfügung stehen, kann in der Region gesamthaft weniger Vieh gehalten werden.

Nach einem steilen Abstieg erreichen wir den Talboden. Dort sehen wir viele trockene, gelbe Wiesen, die klare Zeichen der Versteppung aufweisen, also trockene vegetationslose Stellen mit Staubbildung. Auf diesen Stellen haben Wind und Wasser den Oberboden stark erodiert und die Nährstoffe wurden grösstenteils ausgewaschen. Die wenigen Wiesen, die noch bewässert werden können, stechen durch ihre leuchtend grüne Farbe deutlich hervor. Ohne Bewässerung verdorren die Wiesen und die Ernte wird so klein, dass sie nicht mehr rentabel ist. Viel mehr Wiesen- und Weidestandorte müssen heute bewässert werden und es muss regelmässiger und intensiver bewässert werden. Auch im Tal fehlen effektive regional koordinierte Strategien zur Wasserverteilung. Deshalb können bei weitem nicht alle bewässerungsbedürftigen Weiden, Wiesen und Kulturen bewässert werden. Wegen Problemen mit der Trockenheit und damit verbundenen Ertragseinbussen wurden viele Betriebe aufgegeben und der Stellenwert der Landwirtschaft hat in der Region insgesamt abgenommen.

Vorausschauende, proaktive Anpassung an den Klimawandel

Unser Weg folgt einem Bewässerungskanal, einer sogenannten Suone oder Bisse. Infolge der zunehmenden Sommertrockenheit schütten viele Quellen im alpinen Gebiet weniger Wasser als zu Beginn des Jahrhunderts. Zur Kompensation der verminderten Quellschüttung wird Wasser aus dem See im ehemaligen Gletschergebiet in Suonen zu den Alpwiesen geleitet. Wir erreichen eine Alpweide, auf der Kühe gesömmert werden. Die Milchwirtschaft und die Käseproduktion profitieren vom früheren Alpaufzug und der

längeren Alpdauer als zu Beginn des Jahrhunderts. Die Bedeutung der Alpweiden als Futterquelle für das Vieh hat zugenommen, denn obwohl Trockenheit und Wassermangel auch in diesen höheren Lagen problematisch sein können, ist die Trockenheit weniger akut als im Tal. Zudem leiden die Tiere in höheren Lagen weniger unter Hitzestress als im Mittelland, weshalb eine Alpsommerung als standortangepasste Tierhaltungsart finanziell gefördert wird. Doch dieses Jahr hat die lange Trockenperiode auch in dieser Region zu Wasserknappheit geführt. Dank regional koordinierten Bewässerungssystemen kann sichergestellt werden, dass noch genügend Wasser zum Tränken der Tiere zur Verfügung steht. Wegen der steigenden Waldgrenze muss Jahr für Jahr dafür gesorgt werden, dass die Alpweiden nicht verbuschen. Diese Arbeiten werden bei der Alp, auf der wir uns befinden, von allen Mitgliedern der Alpgenossenschaft gemeinsam durchgeführt. Auf einzelnen Flächen wurden Wald-Weide-Systeme eingeführt, die es zu Beginn des Jahrhunderts vor allem im Jura gab. Auf diesen Flächen werden gezielt Einzelbäume gefördert, die den Tieren Schatten spenden und die Attraktivität der Landschaft fördern sollen.

Nach einem steilen Abstieg erreichen wir den Talboden und sehen verschiedene Felder. Seit Mitte des 21. Jahrhunderts erlebt der Ackerbau in der Region einen erneuten Aufschwung. Dieser Aufschwung lässt sich einerseits mit den verbesserten Bedingungen für Ackerbau vor Ort, einer Abnahme der Schneebedeckungsdauer und der Frostschäden sowie höheren Mitteltemperaturen und einer längeren Vegetationsperiode begründen. Andererseits spielen die durch die intensivierte sommerliche Wasserknappheit und den zunehmenden Hitzestress verursachten Ernteeinbussen, die die ganze Schweiz, aber ganz besonders das Mittelland betreffen, eine Rolle. Die Standorteignung gewisser Kulturen hat sich verändert und deren Anbau wurde im Mittelland aufwändiger – hier im Alpenraum sind die Bedingungen vergleichsweise gut. Wir spazieren an einem Roggenfeld, einem Kartoffelfeld und einer bewässerten Wiese vorbei. Viel mehr Kulturen müssen heute bewässert werden und dies regelmässiger und intensiver. Die Bewässerungsinfrastruktur musste entsprechend angepasst werden und die Wasserverteilung ist regional koordiniert, um eine faire Verteilung des verfügbaren Wassers zu ermöglichen. In die Aushandlung dieser Systeme wurde eine Vielzahl an Akteuren aus der Region sowie wissenschaftliche Berater einbezogen, was zur Akzeptanz der Wasserbewirtschaftungsstrategien beitrug. Trotzdem kommt es in extremen Trockenjahren immer wieder zu Konflikten, weil nicht genügend Wasser für die Deckung aller Bedürfnisse wie Trinkwasser, Energieproduktion und Bewässerung vorhanden ist. Beispielsweise kam es letztes Jahr deswegen zu grossen Ernteeinbussen und zu Engpässen bei der Futterproduktion. Obwohl es dieses Jahr auch trocken ist, reicht das Wasser im Moment noch für eine Bewässerung.

Beim Spaziergang sehen wir, ähnlich wie im Mittelland, Hecken, Bäume und Blühstreifen zwischen den landwirtschaftlichen Kulturen stehen, die als Windschutz, Schattenspenden oder zur Förderung der Biodiversität errichtet wurden. Als Folge der wärmeren Bedingungen gibt es auch im Berggebiet immer mehr Schädlinge und der Pflanzenschutz hat auch in der Berglandwirtschaft an Bedeutung gewonnen. Mit den Hecken und Blühstreifen sollen insbesondere Nützlinge gefördert werden. In deren Nähe sehen wir auch viele Bienenhäuschen.

Wir erreichen ein Feld, wo im Frühsommer Beeren geerntet wurden, und schauen hinauf zum Hang, wo wir Weinreben sehen. In der Region wurden bereits früher Wein und Beeren angebaut. Dank der veränderten klimatischen Bedingungen konnten diese Kulturen in höhere Lagen ausgedehnt werden. Zwar liegt der Fokus der landwirtschaftlichen Produktion in der Region noch immer auf der Milchwirtschaft, aber Nischenprodukte wie Honig, Getreide, Weintrauben, Kräuter und Obst wurden in den letzten Jahren gezielt gefördert und von verschiedenen Betrieben produziert. Diese Diversität in der Produktion hat die Landwirtschaft in der Region gestärkt und weniger anfällig gegenüber Störungen gemacht.

5.2.8 Aussicht zur grossen Tourismusdestination

Wir erreichen einen Aussichtspunkt, von dem wir an der gegenüberliegenden Bergseite die grösste Tourismusdestination der Region sehen können. Die Ortschaft erstreckt sich über eine weite Fläche und besteht aus zahlreichen Chalets. Rund um das Dorf sehen wir viele Liftanlagen sowie Flächen, die im Winter als Pisten verwendet werden. Die Destination gilt als eine der letzten grossen Wintersportgebiete der Alpen. Sie eignet sich als solche, weil bereits zu Beginn des Jahrhunderts Skilifte bis auf über 3000 m ü. M. existierten und das Gebiet daher im Winter als relativ schneesicher gilt. Die Destination wird staatlich unterstützt und ist eine zentrale Einnahmequelle für die Region.

Langsame, reaktive Anpassung an den Klimawandel

Um das Skigebiet wirtschaftlich zu erhalten, wurde es in höhere Lagen ausgedehnt und die Beschneiungsanlagen wurden aufwändig aufgerüstet. Damit geht ein deutlich erhöhter Wasserverbrauch einher, was mitunter zur Wasserknappheit in der Landwirtschaft und bei der natürlichen Vegetation führt. Bei der Erweiterung des Skigebiets mussten diverse Stützbauwerke errichtet und das Gelände aufwändig modelliert werden, um das infolge des schwindenden Permafrosts erhöhte Risiko für Hangrutsche und Bergstürze zu minimieren. Zudem wirken sich die neuen Infrastrukturen erheblich auf die Landschaft und die Biodiversität aus. Im Sommer werden die neu gebauten Infrastrukturen kaum genutzt.

Vorausschauende, proaktive Anpassung an den Klimawandel

Einige Pisten und Liftanlagen wurden zurückgebaut, vor allem auf ehemaligen Gletschern und an Hängen, die infolge des tauenden Permafrosts rutschgefährdet sind. Dafür wurde die Tourismusregion strategisch auf den Ganzjahrestourismus ausgerichtet. So kann zum Beispiel ein Wasserspeichersee, der im Winter der Beschneiung dient, im Sommer als Badesee genutzt werden.

Wir spazieren die Strasse hinab ins Dorf, wo wir mit dem Bus zurück ins Jahr 2023 reisen.

6 Diskussion und Schlussfolgerung

Dieses Projekt hat aufgezeigt, dass ein etwa 4 °C wärmeres Klima die Qualitäten und Leistungen der Landschaften in der Schweiz grundlegend verändern wird. Viele Veränderungen der Ökosysteme und natürlichen Lebensräume werden in der Landschaft sichtbar sein, z. B. die markant höher gelegene Waldgrenze oder das Verschwinden der Gletscher und die schneefreien Gipfel. Auch das zu erwartende steigende Risiko von Naturgefahren wird die Landschaft stark verändern. Im Berggebiet werden Murgänge, Hangrutsche, Felsstürze und Schutzbauten, um ihnen zu begegnen, ihre Spuren in der Landschaft hinterlassen. Im Mittelland muss mit häufigeren Hochwasserereignissen gerechnet werden und die Massnahmen zum Hochwasserschutz, von hohen Dämmen bis zu naturnahen Flussaufweitungen, werden in der Landschaft sichtbar sein. Feuer und Windwurf können die Wälder in allen Regionen bedrohen. Die Wälder können weitgehend gesund erhalten werden, wenn sie rechtzeitig an die sich ändernden Umweltbedingungen und Wetterextreme angepasst werden. Nadelbäume und Buchen werden es schwer haben und sollten durch trockenheitsresistente Laubbaumarten ersetzt werden. Die regionstypischen Wälder im Jura und Tessin werden sich stark wandeln. Die Kastanienwälder werden im Tessiner Flachland zurückgehen und können von Eichenwäldern abgelöst werden, während sich im Jura die Lebensbedingungen für die Kastanien verbessern können. Wiederholte langanhaltende Trockenperioden können die Landwirtschaftsflächen im Mittelland mitunter als braune, staubige Steppen erscheinen lassen. Mit dem Wechsel zu trockenheitsresistenten Kulturen kann sich die Farbpalette der Felder verändern. Der Ausbau von Gewächshäusern für den effizienteren Umgang mit Wasser, Dünge- und Pflanzenschutzmitteln wird ebenfalls einen starken Einfluss auf die Landschaft haben. So wird sich auch die Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel auf die Landschaft auswirken. Die Hitze kann im Siedlungsraum zum Problem werden und die Massnahmen zu ihrer Linderung können das Erscheinungsbild der Siedlungen verändern. Schliesslich wird auch die Infrastruktur zur Energiegewinnung, auf die in diesem Projekt nur vereinzelt eingegangen wurde, die Landschaft beeinflussen. Wenn die Nutzung von Wind- und Sonnenenergie weiter ausgebaut werden soll, werden die entsprechenden Infrastrukturen in der Landschaft sichtbar sein und eine sorgfältige Standortevaluation erfordern.

In den Kapiteln 4 und 5 wurden verschiedene Varianten möglicher Entwicklungen aufgezeigt, denn es hängt stark von den Entscheidungen der Gesellschaft und Politik ab, wie die Landschaft in einem wesentlich wärmeren Klima wirklich aussehen wird. Der Mensch hat beachtlichen Spielraum, sie zu gestalten. Mit der reaktiven und proaktiven Strategie zur Anpassung an den Klimawandel wurden in diesem Projekt zwei gegensätzliche Entwicklungspfade gewählt, die zu deutlich unterschiedlichen Landschaftsqualitäten führen. Dadurch soll nicht nur die Spannweite der Möglichkeiten aufgezeigt werden, es soll auch zum Denken anregen, welche Konsequenzen menschliches Handeln oder Unterlassen für die Landschaft in einem veränderten Klima haben kann. Die Gesellschaft muss sich hiermit stärker auseinandersetzen, denn der Klimawandel betrifft alle und von den Leistungen der Landschaft profitieren auch alle. Zudem müssen viele Massnahmen zur Anpassung an den Klimawandel frühzeitig geplant und umgesetzt werden. Dies gilt insbesondere für langfristige Massnahmen im Wald oder bei der naturnahen Gewässergestaltung für den Hochwasserschutz.

Im vorliegenden Projekt gelten jedoch verschiedene Einschränkungen. So wurden Landschaftszustände dargestellt, die sich unter der Annahme einer durchschnittlichen Erwärmung von etwa 4 °C einstellen können. Wie in Kapitel 2.4 erwähnt, wird eine Erwärmung um 4 °C gegenüber dem Zeitraum 1981–2010 für die Schweiz nur im Szenario RCP 8.5 der Klimaszenarien CH2018 und gegen Ende des 21. Jahrhunderts vorausgesagt. Somit beziehen sich die Aussagen aus diesem Projekt auf einen langen Zeithorizont und sind schon deshalb mit einer hohen Unsicherheit verbunden. Hinzu kommt, dass bei den Modellierungen jeweils nur der Klimawandel als Treiber der Landschaftsveränderungen berücksichtigt wurde. Einzelne Landschaftsveränderungen wurden zwar als Folge von Strategien zur Anpassung an den Klimawandel hergeleitet, aber es wurden keine Szenarien zu technischen, wirtschaftlichen, gesellschaftlichen oder politischen Treibern der Landschaftsveränderung berücksichtigt. Beispielsweise wurde davon ausgegangen,

dass die aktuellen rechtlichen Grundlagen der Sektoralpolitiken (insbesondere Umweltschutzgesetz, Naturschutzgesetz, Raumplanungsgesetz, Waldgesetz, Landwirtschaftsgesetz) nach wie vor ihre Gültigkeit behalten.

Zu beachten ist schliesslich, dass in einem 4°C wärmeren Klima auch bei einer vorausschauenden, proaktiven Anpassung an den Klimawandel die Landschaft weniger attraktiv und die Lebensbedingungen für den Menschen weniger angenehm sein werden als heute. Insgesamt birgt der Klimawandel auch für die Landschaften mehr Risiken als Chancen. Massnahmen zur Verringerung des Treibhausgasausstosses und der Abmilderung des vom Menschen verursachten Temperaturanstiegs sind daher mindestens genauso wichtig wie die Anpassung an den Klimawandel.

7 Quellenverzeichnis

- Adde A., Rey P.-L., Brun P., Külling N., Fopp F., Altermatt F., ... (2023) N-SDM: a high-performance computing pipeline for Nested Species Distribution Modelling. *Ecography* 6 pp. e06540
- BAFU/ARE (2022) Regenwasser im Siedlungsraum. Starkniederschlag und Regenwasserbewirtschaftung in der klimaangepassten Siedlungsentwicklung. Bundesamt für Umwelt (BAFU); Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). Umwelt-Wissen 2201: 115 S. www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/regenwasser-im-siedlungsraum.html
- BAFU, Bundesamt für Umwelt (2021) Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Umwelt-Wissen 2101. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU, S. 134. www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/auswirkungen-des-klimawandels-auf-die-schweizer-gewaesser.html
- BAFU, Bundesamt für Umwelt (2018) Hitze in Städten. Grundlage für eine klimaangepasste Siedlungsentwicklung. Umwelt-Wissen 1812: 108 S. www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/hitze-in-staedten.html
- Bebi P., Bugmann H., Lüscher P., Lange B., Brang P. (2016) Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren. In: Pluess A.R., Augustin S., Brang P. Hrsg.: Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. S. 269–285.
- Brang P., Kuchli C., Schwitter R., Bugmann H., Ammann P. (2016) Waldbauliche Strategien im Klimawandel. In: Pluess A.R., Augustin S., Brang P. Hrsg.: Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. S. 341–364.
- BfS, Bundesamt für Statistik. s.a. Arealstatistik Schweiz. www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/erhebungen/area.html (Zugang 20.02.2022)
- Bürgi M., Hersperger A.M., Schneeberger N. (2004) Driving forces of landscape change – current and new directions. *Landsc. Ecol.* 19: 857–868.
- Büttler A., Spiegelberger T., Chételat J., Kalbermatten M., Lannas K., Peringer A., ... (2012) Evolution récente et future des paysages sylvo-pastoraux du Jura vaudois. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 1163, 12: 469–480. doi.org/10.3188/szf.2012.0469
- Council of Europe (2000) Council of Europe Landscape Convention as amended by the 2016 Protocol. *European Treaty Series*, 176.
- Davies, B. (2022) Glaciers as a water resource. www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/glacier-recession/glaciers-as-a-water-resource/ (Zugang 28.6.2023)
- Felber F., Di Maio E., Schaefer K., Chervet N., Gesset L., Randin C. (2017) Graines pour le futur: Conservation et recherche à l'Institut Vavilov et en Suisse. Avec les photographies de Mario Del Curto. Edité par les Musées et Jardins botaniques cantonaux, Lausanne. 76 p.
- Gehrig-Fasel J., Guisan A., Zimmermann N.E. (2007) Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? *J. Veg. Sci.* 18: 571–582. doi.org/10.1111/j.1654-1103.2007.tb02571.x
- Graf U., Boch S., Bergamini A. (2021) Abklärungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf Moore im Kanton Zürich. S. 30.
- Harris D.M. (2020) Telling Stories about Climate Change. *The Prof. Geogr.* 72, 3: 309–316. doi.org/10.1080/00330124.2019.1686996
- Haeberli W., Bütler M., Huggel C., Müller H., Schleiss A. (Hrsg.) (2013) Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken. Forschungsbericht des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich. 300 S.
- Jouvet G., Huss M. (2019) Future retreat of Great Aletsch Glacier. *J. Glaciol.* 1–4. doi.org/10.1017/jog.2019.52
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/
- Keller R., Clivaz M., Reynard E., Backhaus N. (2019) Increasing Landscape Appreciation through the Landscape Services Approach. A Case Study from Switzerland. *Sustainability* 11: 5826. doi.org/10.3390/su11205826
- Keller R., Backhaus N. (2020) Integrating landscape services into policy and practice – a case study from Switzerland. *Landsc. Res.* 45, 1: 111–122. DOI: 10.1080/01426397.2019.1569218

- Köllner P., Gross C., Schäppi B., Füssler J., Lerch J., Nauser M. (2017) Klimabedingte Risiken und Chancen. Eine schweizweite Synthese. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen 1706: 148 S. www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/klimabedingte-risiken-und-chancen.html
- Lanz K., Reynard E., Calianno M., Milano M., Wechsler T. (2021) Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Bern, SCNAT, Beitr. Hydrol. Schweiz 43: 376 p. scnat.ch/de/uuid/i/7ba3924a-b845-56aa-b35a-48b60638fc1a-Auswirkungen_des_Klimawandels_auf_die_Wasserwirtschaft_der_Schweiz
- Moezzi M., Janda K.B., Rotmann S. (2017) Using stories, narratives, and storytelling in energy and climate change research. *Energy Res. Soc. Sci.* 31: 1–10. doi.org/10.1016/j.erss.2017.06.034
- Morris B.S., Chrysochou P., Christensen J.D., Orquin J.L., Barraza J., Zak P.J., Mitkidis P. (2019) Stories vs. facts: triggering emotion and action-taking on climate change. *Clim. Chang.* 154,1–2: 19–36. doi.org/10.1007/s10584-019-02425-6
- NCCS National Centre for Climate Services (2018) CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien.html
- NCCS National Centre for Climate Services (2021a) Umgang mit Naturgefahren. Informationen zu Auswirkungen des Klimawandels und Massnahmen in verschiedenen Sektoren. www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/sektoren/umgang-mit-naturgefahren.html (Zugang 17.09.2022)
- NCCS National Centre for Climate Services (2021b) Tourismus. Informationen zu Auswirkungen des Klimawandels und Massnahmen in verschiedenen Sektoren. www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/sektoren/tourismus.html (Zugang 14.09.2022)
- NCCS National Centre for Climate Services (2022) Zahlen und Fakten. www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/zahlen-und-fakten.html (Zugang 20.02.2022)
- Nicholson-Cole S.A. (2005) Representing climate change futures: a critique on the use of images for visual communication. *Computers, Environment and Urban Systems* 29, 3: 255–273. doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2004.05.002
- Niedermair M., Plattner G., Egger G., Essl F., Zika F. (2011) Moore im Klimawandel. Studie des WWF Österreich, der Österreichischen Bundesforste und des Umweltbundesamtes. 24 S.
- Pezzatti G.B., De Angelis A., Conedera M. (2016) Potenzielle Entwicklung der Waldbrandgefahr im Klimawandel. In: A.R. Pluess, S. Augustin, Brang, P. (Eds.), *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*: 223–244. Haupt. www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:10619
- Pluess A.R., Augustin S., Brang P. (2016) *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Haupt, Bern, Stuttgart, Wien. 447 S.
- RAOnline (2023) Informationen über die Schweiz: Berichte über das Klima. RAOnline Schule & Bildung. www.raonline.ch/pages/edu/cli5/wearep06a.html#ch (Zugang 14.07.2023)
- Rodewald R., Schwyzer Y., Liechti K. (2014) Katalog der charakteristischen Kulturlandschaften. Grundlage zur Ermittlung von Landschaftsentwicklungszielen. Stiftung Landschaftsschutz Schweiz (SL-FP), Bern. www.sl-fp.ch/de/stiftung-landschaftsschutz-schweiz/dokumentation/katalog-charakteristische-kulturlandschaften-53.html
- Rohde S. (2005) *Integrales Gewässermanagement – Erkenntnisse aus dem Rhône-Thur Projekt. Synthesebericht Gerinneaufweitungen*. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 69 S. www.wsl.ch/land/products/rhone-thur/aufweitungen/docs/synthese.pdf
- Rumpf S., Gravey M., Brönnimann O., Luoto M., Cianfrani C., Mariethoz G., Guisan A. (2022) From white to green: Snow cover loss and increased vegetation productivity in the European Alps. *Science* 376/6597: 1119–1122. [doi: 10.1126/science.abn6697](https://doi.org/10.1126/science.abn6697)
- Schönfeld P. (2019) «Klimabäume» – welche Arten können in Zukunft gepflanzt werden? Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (Hrsg.), Veitshöchheim (De), 9 S. Download: www.lwg.bayern.de/mam/cms06/landespflge/dateien/zukunft_klimabaeume.pdf
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2012) *Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012*. 66 S. www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/anpassung-klimawandel-schweiz-2012.html
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2020) *Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2020–2025*. Bern, 164 S. www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/anpassung-klimawandel/strategie.html

- Siegrist E. (2022) Landschaften im Klimawandel – Evaluation und Darstellung der landschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels in der Schweiz anhand der Falllandschaft Ramosch (GR). Masterarbeit Geographisches Institut Universität Bern. Download: Landschaften im Klimawandel – Evaluation und Darstellung der landschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels in der Schweiz anhand der Falllandschaft Ramosch (GR) – Publikationen – WSL
- Steffen T., Huss M., Estermann R., Hodel E., Farinotti D. (2022) Volume, evolution, and sedimentation of future glacier lakes in Switzerland over the 21st century. *Earth Surf. Dyn.* 10: 723–741, doi:10.5194/esurf-10-723-2022. <https://doi.org/10.5194/esurf-10-723-2022>
- Van Vuuren D.P., Edmonds J., Kaimuna M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., ... (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Clim. Chang.* 109: 5–31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z
- Verburg P.H., Soepboer W., Veldkamp A., Limpiada R., Espaldon V., Mastura S.S. (2002) Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. *Environ. Manage.* 30, 3: 391–405.
- Vervoort J.M., Kok K. (2010) Stepping into futures: Exploring the potential of interactive media for participatory scenarios on social-ecological systems. *Futures* 42: 604–616.
- Williams P.A., Allen C.D., Macalady A.K., Griffin D., Woodhouse C.A., Meko D.M., ... (2013) Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nat. Clim. Chang.* 3: 292–297. doi.org/10.1038/nclimate1693

