

**Bedeutung des Klimawandels für die
Infrastrukturen in der Schweiz**

Stand der Literatur

Christian Jaag
Nina Schnyder

Bericht

11. Oktober 2019

ISSN 2235-1868

Titel:	Bedeutung des Klimawandels für die Infrastrukturen in der Schweiz
Status:	Bericht
Version:	V2
Datum:	11.10.2019
Autoren:	Christian Jaag, Nina Schnyder
Kontakt/Projektleitung:	Christian Jaag, christian.jaag@swiss-economics.ch +41 44 500 56 20
Keywords:	Infrastruktur, Klimawandel, Schweiz
Abstract:	Wie wird sich der Klimawandel auf die Schweizer Infrastrukturektoren auswirken? Im Rahmen eines Literaturüberblicks werden Studien aus dem In- und Ausland ab dem Jahr 2007 ausgewertet. Die zusätzlichen Schäden entstehen durch den schleichenden Klimawandel und Extremereignisse. Neben dem Transport- und dem Energiesektor sind auch die Wasserversorgung, Industrieinfrastrukturen, soziale Infrastrukturen und der Tourismus betroffen. Obwohl der Klimawandel insgesamt mehr Schaden als Nutzen bringt, hat er auch positive Auswirkungen. Zum Beispiel kommt es zu weniger kältebedingten Schäden an Strassen und Schienen und die Ausgaben für Heizenergie sinken. Mit steigenden Temperaturen nimmt auch die relative Attraktivität der Schweiz als Sommer-Tourismusdestination zu. Sämtliche verfügbaren Quantifizierungen der Auswirkungen des Klimawandels sind allerdings noch mit grossen Unsicherheiten behaftet.

Disclaimer

Dieser Bericht wurde von Swiss Economics SE AG erstellt. Obwohl Swiss Economics sich bemüht, nur wahre und korrekte Informationen zu verwenden und eigene Aussagen sorgfältig zu tätigen, kann hinsichtlich der Richtigkeit, Aktualität, Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Vollständigkeit und Verwendbarkeit der nachfolgenden Informationen keine Gewähr oder Haftung übernommen werden. Swiss Economics haftet in keinem Fall für Schäden oder Folgeschäden jeglicher Art, die in irgendeiner Weise im Zusammenhang den nachfolgend bereitgestellten Informationen stehen. Die nachfolgenden Informationen stellen keine rechtliche Beratung dar.

© Swiss Economics SE AG
Weinbergstrasse 102, CH-8006 Zürich, Schweiz
www.swiss-economics.ch

Zusammenfassung

Ausgangslage

Der Klimawandel stellt die Schweiz vor zahlreiche Herausforderungen. Dazu gehören die Auswirkungen des Klimawandels auf die Infrastrukturen. Vereinzelt sind diese bereits heute erkennbar: Im vergangenen Hitzesommer musste die Leistung von Kernkraftwerken aufgrund des warmen Kühlwassers gedrosselt werden und Güter mussten öfters vom Rhein auf den Zug umgeladen werden, weil der Wasserpegel zu tief war.

Es bestehen zwei Möglichkeiten, die künftigen Kosten des Klimawandels auf Schweizer Infrastrukturen zu reduzieren: Erstens den Klimawandel abzuschwächen und zweitens Infrastrukturen mit gezielten Adaptationsmassnahmen auf den Klimawandel vorzubereiten. Beide Ansätze benötigen genaue Kenntnisse über den Klimawandel und dessen Auswirkungen auf die Infrastrukturen.

Fragestellung und Methodik

Die vorliegende Studie befasst sich deshalb mit der folgenden Fragestellung: Wie wird sich der Klimawandel auf die Schweizer Infrastruktursektoren auswirken?

Im Rahmen eines Literaturüberblicks werden Studien aus dem In- und Ausland ab dem Jahr 2007 ausgewertet. Quellen sind wissenschaftliche Artikel, staatliche Berichte, und Studien von Beratungsunternehmen. Wo nötig, werden die Erkenntnisse auf die Schweiz übertragen bzw. die Auswirkungen – sofern diese in den Quellen nicht explizit ausgewiesen sind – in Schweizer Franken grob quantifiziert.

Schleichender Klimawandel und Extremereignisse

Die Literatur, welche die Auswirkungen des Klimawandels analysiert, unterscheidet grob zwischen den Folgen des schleichenden Klimawandels und den Auswirkungen von Extremereignissen. Der schleichende Klimawandel beschreibt langfristige Entwicklungen, etwa bezüglich Temperaturen oder Niederschlagsmengen; Extremereignisse sind grosse Einzelereignisse wie beispielsweise Überschwemmungen, die auf den Klimawandel zurückzuführen sind.

Vielfältige Auswirkungen

Bei den Transportinfrastrukturen fallen die grössten Schäden durch Extremereignisse auf Strassen und Schienen an, die abseits der Hauptachsen liegen. Höhere Temperaturen machen Investitionen in stärker hitzeresistente Fahrbahnen notwendig. Bei der Bahn erfordern Extremtemperaturen Geschwindigkeitsreduktionen, was primär Verspätungskosten verursacht.

Höhere Temperaturen, unregelmässige Niederschläge und trockenere Sommer haben negative Auswirkungen auf die Leistung von Wasser- und Kernkraftwerken. Auch die Energienachfrage verändert sich, indem aufgrund höherer Temperaturen der Heizbedarf sinkt und der Kühlbedarf steigt.

Neben dem Transport- und Energiesektor sind auch die Wasserversorgung, Industrieinfrastrukturen und soziale Infrastrukturen sowie der Tourismus vom Klimawandel betroffen. Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Übersicht über die wichtigsten Schäden (jährlich, zusätzlich zum Basisszenario).

Infrastruktur	Auswirkung	Zusätzliche Schäden p.a.
Strassen	Degradierungsschäden durch intensivere Niederschläge	*
	Schäden durch Extremstürme (an Strassen und Fahrzeugen)	*-**
	Schäden durch Überflutungen	**-***
Schienen	Verspätungen durch reduzierte Geschwindigkeiten zur Schonung der Schienen bei Extremtemperaturen	*
	Schäden durch Extremstürme (Räumung, Ersatzbusse)	*-**
	Schäden durch Überflutungen	*-**
Energie	Veränderte Energienachfrage (weniger Heizung, mehr Kühlung)	* - ****
Energieinfrastrukturen	Schäden durch Extremereignisse	**
Wasserkraftwerke	Weniger verfügbares Wasser durch höhere Temperaturen und unregelmässige Niederschläge	***
Kernkraftwerke	Reduzierte Effizienz bzw. Leistungsfähigkeit aufgrund wärmeren Kühlwassers bei Temperaturanstiegen	****
Wasserversorgung	Stärkere Verdunstung, unregelmässigerer Niederschlag	**-****
Industrie-Infrastrukturen	Schäden durch Extremereignisse	****
Soziale Infrastrukturen	Schäden durch Extremereignisse	**
Tourismus	Rückläufiger Wintertourismus aufgrund geringerer Schneesicherheit	****

- * < 10 Mio. p.a. (2050)
- ** CHF 10-50 Mio. p.a. (2050)
- *** CHF 50-100 Mio. p.a. (2050)
- **** CHF 100-250 Mio. p.a. (2050)
- ***** > CHF 250 Mio. p.a. (2050)

Die Auswirkungen des Klimawandels werden mit steigenden Temperaturen im Zeitverlauf zunehmen. Dabei sind die Vermeidungs- und Folgekosten von verschiedenen Akteuren in unterschiedlichem Ausmass zu tragen: Schäden an Schienen werden die Eisenbahn-Infrastrukturunternehmen betreffen; Verspätungskosten primär die Bahnreisenden. Schäden an Strassen fordern primär die Gemeinden und Kantone heraus, während Leistungsreduktionen von Kraftwerken deren Wert für die (öffentlichen und privaten) Eigentümer mindern.

Klimawandel hat auch positive Auswirkungen

Obwohl der Klimawandel insgesamt mehr Schaden als Nutzen bringt, hat er auch Auswirkungen, die positiv zu Buche schlagen. Zum Beispiel kommt es zu weniger kältebedingten Schäden an Strassen und Schienen und die Ausgaben für Heizenergie sinken. Mit steigenden Temperaturen nimmt auch die relative Attraktivität der Schweiz als Sommer-Tourismusdestination zu.

Bedarf für weitere Grundlagenarbeiten

Die bestehende Literatur ist bzgl. der erwarteten Auswirkungen des Klimawandels auf Schweizer Infrastrukturen uneinheitlich. Gründe dafür sind Unterschiede in den verwendeten Klimaszenarien, den analysierten lokalen Auswirkungen (Temperaturanstieg, Niederschläge, Extremereignisse) sowie in den untersuchten Infrastrukturen und Wirkungszeiträumen. Sämtliche Quantifizierungen der Auswirkungen des Klimawandels sind deshalb mit grossen Unsicherheiten behaftet. Dies gilt insbesondere für Ergebnisse von Studien im Ausland, die auf die Schweiz übertragen werden.

Die bestehende Literatur analysiert aufgrund der verfügbaren Daten nicht alle denkbaren Auswirkungen. Mit dem Fokus dieser Studie auf Infrastrukturen und deren Dienstleistungen wird ebenfalls nur ein Teil aller möglichen Effekte erfasst. Zur Quantifizierung sämtlicher volkswirtschaftlicher Auswirkungen sind breiter angelegte Studien notwendig; zielgerichtete Massnahmen zur Vermeidung oder Bewältigung von klimabedingten Ereignissen und Schäden erfordern detailliertere Grundlagenarbeiten zu konkreten Infrastrukturanlagen und den Dienstleistungen, die sie bereitstellen.

Inhalt

1	Einleitung	13
1.1	Ausgangslage	13
1.2	Fragestellung und Methodik.....	13
1.3	Methodik der bestehenden Literatur	13
1.4	Struktur der vorliegenden Studie	16
2	Transport	17
2.1	Transport Allgemein	17
2.2	Strasse.....	18
2.3	Schiene.....	21
2.4	Zusammenfassung und Zwischenfazit.....	24
3	Energie	26
3.1	Energie Allgemein	26
3.2	Thermoelektrische Energie.....	32
3.3	Wasserkraft.....	35
3.4	Zusammenfassung und Zwischenfazit.....	38
4	Wasser	41
5	Restliche Infrastrukturen	43
6	Ergebnisübersicht	51
7	Referenzen	54
A	Globale Klimaszenarien	56
A.1	SRES Klimaszenarien	56
A.2	RCP Klimaszenarien.....	57
B	Transport	59
B.1	Forzieri et al. (2018) – Transport: Erklärungen, Berechnungen und Resultate	59
B.2	Nemry und Demirel (2012) – Strassen: Erklärungen, Berechnungen und Resultate .	62
B.3	Vöhringer et al. (2017) – Strassen: Erklärungen, Berechnungen und Resultate	67
B.4	Nemry und Demirel (2012) – Schienen: Erklärungen, Berechnungen und Resultate	69
B.5	Vöhringer et al. (2017) – Schienen: Erklärungen, Berechnungen und Resultate.....	72
C	Energie	75
C.1	Müller et al. (2007) – Energie: Erklärungen, Berechnungen und Resultate	75
C.2	Vöhringer et al. (2017) – Energie: Erklärungen, Berechnungen und Resultate	80
C.3	Forzieri et al. (2018) – Energie: Erklärungen, Berechnungen und Resultate	83
C.4	Van Vliet et al. (2012): Erklärungen, Berechnungen, Resultate	86
C.5	Guardard et al. (2014): Erklärungen, Berechnungen und Resultate	87
C.6	SGHL und CHy (2011): Erklärungen, Berechnungen und Resultate	87
C.7	Hamududu und Killingtveit (2012): Erklärungen, Berechnungen und Resultate	91

D	Wasser	93
D.1	Faust et al. (2012): Erklärungen, Berechnungen und Resultate	93
E	Bauten, allgemeine Infrastruktur und soziale Infrastruktur	95
E.1	Müller et al. (2007) – Extremereignisse: Erklärungen, Berechnungen und Resultate	95
E.2	Müller et al. (2007) Schleichender Klimawandel: Erklärungen, Berechnungen und Resultate.....	98
E.3	Forzieri et al. (2018) – Industrie- und soziale Infrastrukturen: Erklärungen, Berechnungen und Resultate	100
E.4	Vöhringer et al. (2017) – Tourismus: Erklärungen, Berechnungen und Resultate ...	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gliederung der untersuchten Auswirkungen in einzelnen Studien	16
Tabelle 2: Transport Allgemein – Überblick	17
Tabelle 3: Kurzüberblick zu Forzieri et al. (2018).....	17
Tabelle 4: Erhöhung der jährlichen Kosten je Transportinfrastruktur	18
Tabelle 5: Strasse – Überblick.....	18
Tabelle 6: Kurzüberblick zu Nemry und Demirel (2012)	19
Tabelle 7: Prognostizierte Erhöhung der Schweizer Niederschlagskosten in Mio. CHF	19
Tabelle 8: Prognostizierte Erhöhung der Schweizer Temperaturkosten in Mio. CHF	20
Tabelle 9: Kurzüberblick zu Vöhringer et al. (2017).....	20
Tabelle 10: Erwartete Strassenkosten einer Extremüberflutung im Jahr 2060 in Mio. CHF	21
Tabelle 11: Erwartete Strassenkosten eines Extremsturms im Jahr 2060 in Mio. CHF.....	21
Tabelle 12: Schiene – Überblick.....	22
Tabelle 13: Kurzüberblick zu Nemry und Demirel (2012)	22
Tabelle 14: Prognostizierte Erhöhung der Verspätungskosten in Mio. CHF	23
Tabelle 15: Kurzüberblick zu Vöhringer et al. (2017).....	23
Tabelle 16: Erwartete Schienenkosten eines Extremsturmes im Jahr 2060 in Mio. CHF	23
Tabelle 17: Erwartete Schienenkosten einer Extremüberflutung im Jahr 2060 in Mio. CHF	24
Tabelle 18: Energie Allgemein – Überblick	26
Tabelle 19: Kurzüberblick zu Müller et al. (2007).....	27
Tabelle 20: Jährliche Mehrkosten für die Stromproduktion	27
Tabelle 21: Kühlungsbedarf und anfallende Kosten.....	27
Tabelle 22: Heizungsbedarf und anfallende Kosten	28
Tabelle 23: Mehrkosten im Energiebereich	28
Tabelle 24: Kurzüberblick zu Vöhringer et al. (2017).....	29
Tabelle 25: Prozentuale Wohlfahrtsänderungen auf der Energienachfrageseite.....	29
Tabelle 26: Strompreis- und Wohlfahrtsänderungen auf der Energieangebotsseite.....	30
Tabelle 27: Wohlfahrtsänderungen im Schweizer Energiemarkt.....	30
Tabelle 28: Erwartete Kosten im Strombereich eines Extremsturmes in Mio. CHF	31
Tabelle 29: Kurzüberblick zu Forzieri et al. (2018).....	31
Tabelle 30: Erhöhung der jährlichen Kosten je Art der Energieinfrastruktur in Mio. CHF	31
Tabelle 31: Thermoelektrische Energie – Überblick.....	32
Tabelle 32: Kurzüberblick zu Golombek et al. (2012)	33
Tabelle 33: Auswirkungen nach Effekt auf Schweizer Strommarkt (2030/2070-2099).....	33
Tabelle 34: Kurzüberblick zu Van Vliet et al. (2012)	34
Tabelle 35: Umsatzrückgang bei Kernkraftwerken 2031-2060	35
Tabelle 36: Wasserkraft – Überblick.....	35
Tabelle 37: Kurzüberblick zu Guardard et al. (2014)	36
Tabelle 38: Umsatzrückgänge der Wasserkraftwerke Mattmark auf Jahresbasis.....	36
Tabelle 39: Kurzüberblick zu SGHL und CHy (2011).....	37

Tabelle 40: Jährliche Umsatzverluste von Wasserkraftwerken in Mio. CHF	37
Tabelle 41: Kurzüberblick zu Hamududu und Killingtveit (2012)	38
Tabelle 42: Wasser – Überblick	41
Tabelle 43: Kurzüberblick zu Faust et al. (2012)	41
Tabelle 44: Restliche Infrastrukturen – Überblick	43
Tabelle 45: Kurzüberblick zu Müller et al. (2007).....	44
Tabelle 46: Kosten von Extremereignissen in Prozent des erwarteten BIP.....	44
Tabelle 47: Kurzüberblick zu Müller et al. (2007).....	45
Tabelle 48: Wohlfahrtsverluste im Wintertourismus der Schweiz	46
Tabelle 49: Kurzüberblick zu Forzieri et al. (2018).....	46
Tabelle 50: Erhöhung der jährlichen Kosten von Industrieinfrastrukturen in Mio. CHF	47
Tabelle 51: Erhöhung der jährlichen Kosten von sozialen Infrastrukturen in Mio. CHF	47
Tabelle 52: Kurzüberblick zu Vöhringer et al. (2017).....	48
Tabelle 53: Wohlfahrtsänderung im Schweizer Tourismus (2060)	49
Tabelle 54: Zusammenfassung der Ergebnisse	51
Tabelle 55: Auswirkungen von Extremereignissen auf Transportinfrastruktur.....	59
Tabelle 56: Bedrohung von Klimaereignissen für Transportinfrastrukturen.....	60
Tabelle 57: Verteilung der Kosten auf einzelne Transportinfrastrukturen.....	60
Tabelle 58: Jährlichen Kosten je Extremereignis.....	60
Tabelle 59: Europaweite Kosten je Infrastruktur	61
Tabelle 60: Herleitung des Schweizer Anteils	61
Tabelle 61: Erhöhung der jährlichen Kosten je Transportinfrastruktur in Mio. CHF	61
Tabelle 62: Regionen und zugehörige Länder	62
Tabelle 63: Durchschnittliche Erhöhung der niederschlagsverursachten Strassenkosten	63
Tabelle 64: Gewichtung der relevanten Regionen für den «pro Einheit»-Ansatz	63
Tabelle 65: Veränderung der niederschlagsverursachten Kosten in Vergleichsregionen	63
Tabelle 66: Strassennetz in Kilometern für relevante Länder (2012)	63
Tabelle 67: Strassennetz in Kilometern für relevante Regionen (2012)	64
Tabelle 68: Pro Kilometer Niederschlagskosten	64
Tabelle 69: Gewichteter Durchschnitt der Niederschlagskosten pro Kilometer	64
Tabelle 70: Erhöhung der Schweizer Niederschlagskosten in Mio. CHF p.a.	64
Tabelle 71: Änderung temperaturverursachter Strassenschäden p.a.	65
Tabelle 72: Gewichtung der relevanten Länder für den «pro Einheit»-Ansatz	66
Tabelle 73: Strassennetz der relevanten Länder (2012).....	66
Tabelle 74: Pro-Kilometer Zusatzkosten.....	66
Tabelle 75: Gewichteter durchschnittlicher pro-Kilometer Kostensatz.....	66
Tabelle 76: Temperaturverursachte Strassenschäden in der Schweiz in Mio. CHF	67
Tabelle 77: Strassenkosten des Sturms Lothar in Mio. CHF	68
Tabelle 78: Zusätzliche Strassenkosten durch Extremstürme im Jahr 2060 in Mio. CHF	68
Tabelle 79: Strassenkosten der Überflutungen vom August 2005 in Mio. CHF	68
Tabelle 80: Zusätzliche Strassenkosten durch Überflutungen im Jahr 2060 in Mio. CHF	69

Tabelle 81: Erhöhung der Schienenkosten je Land in Mio. EUR.....	70
Tabelle 82: Relevante Vergleichsländer und Gewichtung	71
Tabelle 83: Erhöhung der Schienenkosten in Vergleichsländern.....	71
Tabelle 84: Schienennetz, Passagiere und Gütertransport in Vergleichsländern	71
Tabelle 85: «Pro Einheit»-Schienenkosten in Vergleichsländern	72
Tabelle 86: Gewichteter Durchschnitt der «pro Einheit»-Kosten.....	72
Tabelle 87: Schienennetz, Passagiere und Gütertransport in der Schweiz	72
Tabelle 88: Prognostizierte Erhöhung der Verspätungskosten in der Schweiz in Mio. CHF	72
Tabelle 89: Schienenkosten des Sturms Lothar in Mio. CHF	73
Tabelle 90: Zusätzliche Schienenkosten durch Extremstürme im Jahr 2060 in Mio. CHF	73
Tabelle 91: Schienenkosten der Überflutungen im August 2005 und 2008 in Mio. CHF.....	73
Tabelle 92: Zusätzliche Schienenkosten durch Überflutungen im Jahr 2060 in Mio. CHF.....	74
Tabelle 93: Absolute Stromproduktion und Stromeinbusse gemäss Müller et al. (2007).....	75
Tabelle 94: Kosten für die Stromproduktion absolut und als Prozent des BIP in Mio. CHF	75
Tabelle 95: Kühlungsbedarf und anfallende Kosten für Haushalte in Mio. CHF	76
Tabelle 96: Kühlungsbedarf und Kosten im Dienstleistungssektor in Mio. CHF	77
Tabelle 97: Kühlungsbedarf und anfallende Kosten in der Schweiz in Mio. CHF	77
Tabelle 98: Heizungsbedarf und anfallende Kosten für Haushalte in Mio. CHF	78
Tabelle 99: Heizungsbedarf und anfallende Kosten im Dienstleistungssektor in Mio. CHF	78
Tabelle 100: Heizungsbedarf und anfallende Kosten in der Industrie in Mio. CHF	79
Tabelle 101: Heizungsbedarf und Rückgang der Kosten in der Schweiz in Mio. CHF	79
Tabelle 102: Kosten für den Schweizer Energiesektor aufgrund steigender Temperaturen.....	79
Tabelle 103: Auswirkung des Klimawandels auf Energieverwendung für Heizung	80
Tabelle 104: Auswirkung des Klimawandels auf Energieverwendung für Kühlung.....	81
Tabelle 105: Auswirkung des Klimawandels auf die Energienachfrage.....	81
Tabelle 106: Auswirkung des Klimawandels auf europäische Strompreise	82
Tabelle 107: Auswirkung des Klimawandels auf Schweizer Strompreise und -erzeugung	82
Tabelle 108: Auswirkung des Klimawandels auf den Schweizer Energiemarkt	82
Tabelle 109: Kosten des Sturmes Lothar im Strombereich in Mio. CHF	83
Tabelle 110: Erwartete Kosten im Strombereich eines Extremsturmes in 2060 in Mio. CHF	83
Tabelle 111: Auswirkungen von Extremereignissen auf Energieinfrastrukturen	83
Tabelle 112: Bedrohungsausmass von Klimaereignisse auf Energieinfrastrukturen	84
Tabelle 113: Kosten für Energieinfrastruktur pro Extremereignis in Europa	84
Tabelle 114: Verteilung der Kosten auf individuelle Energieinfrastrukturen.....	85
Tabelle 115: Europaweite Kosten je Infrastruktur in Mio. EUR	85
Tabelle 116: Schweizer Kostenerhöhung pro Infrastruktur in Mio. CHF.....	85
Tabelle 117: Kühlungsarten in thermoelektrischen Kraftwerken	86
Tabelle 118: Erzeugungseinbussen pro Schweizer Kernkraftwerk.....	86
Tabelle 119: Umsatzrückgänge der Schweizer Kernkraftwerke	87
Tabelle 120: Umsatzrückgang der Kraftwerke Mattmark.....	87
Tabelle 121: Prozentuale Umsatzeinbusse der Kraftwerke der Oberhasli AG.....	88

Tabelle 122: Prognostizierter Umsatz der Kraftwerke der Oberhasli AG in Mio. CHF.....	88
Tabelle 123: Prozentuale Produktionseinbussen der Kraftwerke Mattmark.....	89
Tabelle 124: Prognostizierte Produktion der Kraftwerke Mattmark	89
Tabelle 125: Prognostizierte Produktionsänderungen der Kraftwerke Prättigau	89
Tabelle 126: Prognostizierte Produktionsänderungen des Speicherkraftwerkes Löntsch.....	90
Tabelle 127: Prognostizierte Produktionsänderungen des Speicherkraftwerks Göschenen	90
Tabelle 128: Umsatzverlust für Schweizer Wasserkraftwerke in Mio. CHF	91
Tabelle 129: Änderung in hydroelektrischer Energieerzeugung in Europa	91
Tabelle 130: Erzeugungsverluste der Schweizer Wasserkraftwerke in 2050.....	91
Tabelle 131: Umsatzverluste der Schweizer Wasserkraftwerke.....	92
Tabelle 132: Preis und Wohlfahrtseffekte des Klimawandels auf Wasser in der Schweiz	93
Tabelle 133: Preis- und Wohlfahrtseffekte des Klimawandels auf Wasser in der Schweiz	94
Tabelle 134: Klimaänderungsfaktoren für Hochwasserabflüsse 2050.....	95
Tabelle 135: Berechnung des zusätzlichen Schadens vor Anpassungsmassnahmen	96
Tabelle 136: Zusätzlicher Schaden nach Anpassungsmassnahmen in Mio. CHF	96
Tabelle 137: Schätzung der zusätzlichen Kosten durch Murgänge in Mio. CHF	97
Tabelle 138: Schätzung der zusätzlichen Kosten durch Geschiebe in Mio. CHF	98
Tabelle 139: Zusätzliche Kosten von Extremereignissen in Mio. CHF	98
Tabelle 140: Geschätzte Temperaturerhöhung	99
Tabelle 141: Wohlfahrtsverluste im Wintertourismus der Schweiz in Mio. CHF p.a.	100
Tabelle 142: Auswirkungen von Extremereignissen auf Industrieinfrastruktur	100
Tabelle 143: Bedrohungsausmass von Klimaereignisse auf Industrieinfrastrukturen	100
Tabelle 144: Kosten für Industrieinfrastruktur pro Extremereignis	101
Tabelle 145: Verteilung der Kosten auf individuelle Industrieinfrastrukturen	101
Tabelle 146: Europaweite Kosten pro Infrastruktur.....	101
Tabelle 147: Schweizer Kostenerhöhung je Industrieinfrastruktur in Mio. CHF	102
Tabelle 148: Auswirkungen von Extremereignissen auf soziale Infrastruktur	102
Tabelle 149: Bedrohungsausmass von Klimaereignisse auf soziale Infrastrukturen	102
Tabelle 150: Kosten pro Extremereignis pro soziale Infrastruktur	103
Tabelle 151: Prozentuale Aufteilung der Kosten pro Extremereignis	103
Tabelle 152: Europaweite Kosten pro Extremereignis pro soziale Infrastruktur	103
Tabelle 153: Schweizer Kostenerhöhung pro soziale Infrastruktur und Jahr in Mio. CHF	103
Tabelle 154: Schneemengenrückgang im Jahr 2060 gegenüber 2010 in %	104
Tabelle 155: Wohlfahrtsänderung im Schweizer Wintertourismus.....	105
Tabelle 156: Wohlfahrtsänderung im Schweizer Tourismus in %	106

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auswirkungen des schleichenden Klimawandels	14
Abbildung 2: Untersuchte Auswirkungen und deren Zusammenhang	14
Abbildung 3: Generelle Methodik für Extremereignisse	15
Abbildung 4: CO ₂ Emissionen in den unterschiedlichen SRES Szenarien.....	57
Abbildung 5: CO ₂ Konzentrationen in den unterschiedlichen SRES Szenarien	57
Abbildung 6: CO ₂ Emissionen in den unterschiedlichen RCP Szenarien	58
Abbildung 7: CO ₂ Konzentrationen in den unterschiedlichen SRES Szenarien	58

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Der Klimawandel stellt die Schweiz vor zahlreichen Herausforderungen. Dazu gehören die Auswirkungen des Klimawandels auf die Infrastrukturen der Schweiz. Bereits heute sind einzelne Auswirkungen erkennbar: Im vergangenen Hitzesommer musste die Leistung von Kernkraftwerken aufgrund des zu heissen Kühlwassers gedrosselt werden;¹ Güter mussten im Sommer öfters vom Rhein auf den Zug umgeladen werden, weil der Wasserpegel zu tief war;² auch Murgänge wurden teilweise von den Auswirkungen des Klimawandels auf die Gletscher verursacht.³

Es bestehen zwei Möglichkeiten, die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf Schweizer Infrastrukturen zu reduzieren: (1) Es wird das Ausmass des Klimawandels abgeschwächt oder (2) Infrastrukturen werden mit gezielten Adaptationsmassnahmen auf den Klimawandel vorbereitet. Dazu sind genaue Kenntnisse des Klimawandels und dessen Auswirkungen auf die Infrastrukturen notwendig.

1.2 Fragestellung und Methodik

Vorliegende Studie befasst sich mit der Frage, wie sich der Klimawandel auf die Schweizer Infrastrukturen und deren Märkte auswirkt. Diskutiert werden nicht nur die direkten Kosten von Schäden an Infrastrukturen, sondern auch indirekte Auswirkungen wie Verspätungskosten oder Leistungsveränderungen von Kraftwerken.

Die Studie ist eine reine Metastudie, die auf Primärliteratur aus dem In- und Ausland ab 2007 basiert. Es werden wissenschaftliche Artikel, staatliche Berichte, und Studien von Beratungsfirmen verwendet. 2007 wird als Anfangsjahr gewählt, da in diesem Jahr der IPCC Assessment Report (AR) 4 publiziert wurde, in dem die Klimaprognosen auf den neusten wissenschaftlichen Stand gebracht wurden.

In erster Linie wird Literatur mit Fokus auf die Schweiz gewählt. Allerdings gibt es Bereiche, beispielweise Strasseninfrastrukturen, für welche es noch keine umfassenden Studien zu den Auswirkungen in der Schweiz gibt. Dort wird auf Literatur von Nachbarregionen zurückgegriffen. Die beschriebenen Effekte in dieser Literatur werden anhand eines «pro Einheit»-Ansatzes annäherungsweise auf die Schweiz übertragen: Die erwarteten Auswirkungen werden für alle untersuchten Länder auf eine «pro Einheit»-Basis herunter gerechnet. Aufgrund einer Gewichtung der Qualität der Infrastrukturen und der geografischen Lage werden diese «pro Einheit»-Auswirkungen auf die Schweiz umgerechnet.

1.3 Methodik der bestehenden Literatur

Die Literatur, welche die Auswirkungen des Klimawandels analysiert, unterscheidet grob zwischen den Folgen des schleichenden Klimawandels und den Auswirkungen von Extremereignissen. Der schleichende Klimawandel beschreibt langfristige Entwicklungen, etwa bezüglich

1 <https://www.aargauerzeitung.ch/aargau/zurzach/wegen-der-hitze-akw-beznau-musste-seine-leistung-drosseln-129335454>

2 <https://www.bzbasel.ch/basel/basel-stadt/zu-tiefer-wasserstand-schiffe-leer-zuege-voll-und-sogar-der-faehrimaamuss-paddeln-133616734>

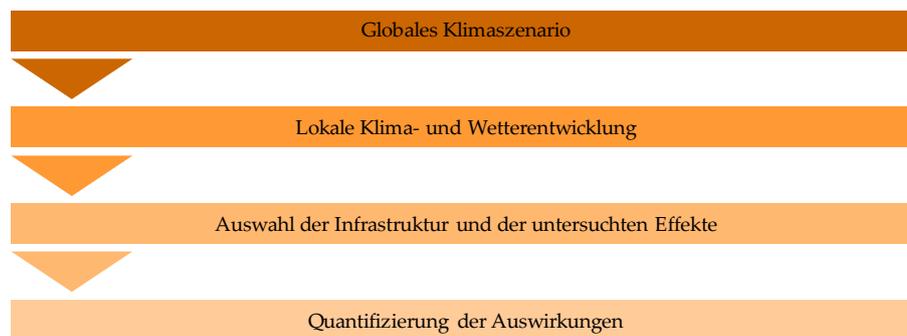
3 <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/dossiers/klimaerwarming-und-bergstuerzen.html>

Temperatur und Niederschlagsmeng. Extremereignisse beschreiben hingegen grosse Einzelergebnisse (z.B. Überschwemmungen), die auf den Klimawandel zurückzuführen sind.

1.3.1 Auswirkungen des schleichenden Klimawandels

Abbildung 1 zeigt die Methodik zur Herleitung der Auswirkungen des Klimawandels auf Infrastrukturen im Überblick.

Abbildung 1: Auswirkungen des schleichenden Klimawandels



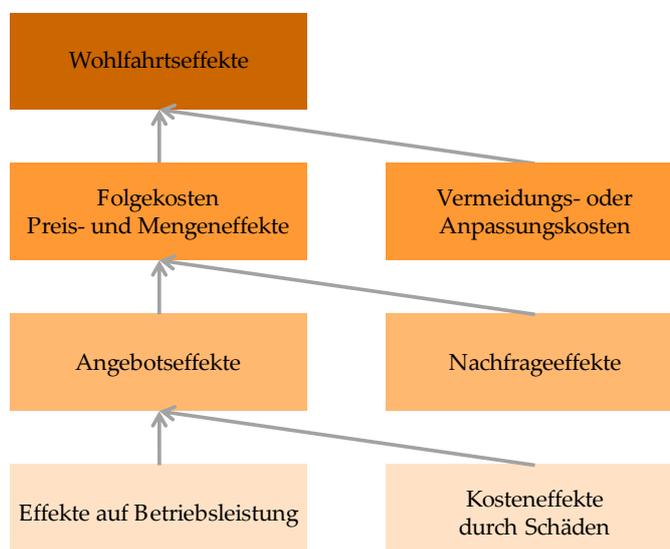
Quelle: Eigene Darstellung

Die Herleitung der Auswirkungen des schleichenden Klimawandels erfolgt in den nachfolgend beschriebenen Schritten:

1. Zunächst werden ein oder mehrere globale Klimaszenarien gewählt. Die in der relevanten Literatur verwendeten Szenarien stammen alle vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); sie werden im Anhang A beschrieben.
2. Basierend auf den globalen Szenarien werden lokale Temperatur- und Niederschlagsentwicklungen berechnet.
3. Die Infrastruktur und die Auswirkungen, die von Interesse sind, werden gewählt.
4. Basierend auf den lokalen Temperatur- und Niederschlagsentwicklungen werden die Effekte auf die untersuchte Infrastruktur in den relevanten Wirkungszeiträumen hergeleitet.

Abbildung 2 stellt dar, welche ökonomisch relevanten Auswirkungen potenziell entstehen können und in welchem gegenseitigen Zusammenhang sie stehen.

Abbildung 2: Untersuchte Auswirkungen und deren Zusammenhang



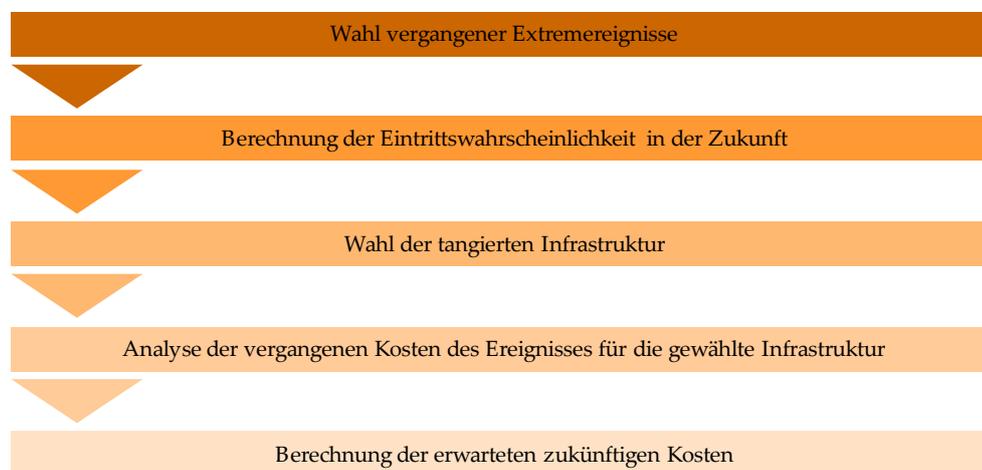
Quelle: Eigene Darstellung

Am umfassendsten sind die sog. Wohlfahrtseffekte. Sie sind das Aggregat von Vermeidungs-, Anpassungs- und Folgekosten des Klimawandels. Die Folgekosten setzen sich dabei aus Preis- und Mengeneffekten zusammen. Diese wiederum resultieren aus Angebots- und Nachfrageeffekten. Die Angebotsseite wird von Effekten auf die Betriebsleistung von Infrastrukturen und direkten Effekten auf die Kosten aufgrund von Schäden geprägt. Die aktuelle Literatur setzt sich in unterschiedlichen Kombinationen mit einer oder mehreren dieser Auswirkungen auseinander.

1.3.2 Auswirkungen von Extremereignissen

Die Herleitung der Auswirkungen von Extremereignissen als Folge des Klimawandels erfordert eine separate Methodik, die in Abbildung 3 zusammenfassend dargestellt wird.

Abbildung 3: Generelle Methodik für Extremereignisse



Quelle: Eigene Darstellung

Die Herleitung der Auswirkungen von Extremereignissen erfolgt in den nachfolgenden beschriebenen Schritten:

1. Es wird ein vorheriges Extremereignis als Basisereignis gewählt.
2. Basierend auf den verwendeten Klimaszenarien und beobachteten Zusammenhängen zwischen Extremereignissen und der Klimaentwicklungen wird die künftige Eintrittswahrscheinlichkeit eines mit dem Basisereignis äquivalenten Extremereignisses berechnet.
3. Die Infrastruktur von Interesse wird gewählt.
4. Aufgrund von Schadensberichten werden die Kosten des Basisereignisses auf die gewählte Infrastruktur berechnet.
5. Gestützt auf die Berechnung des künftigen Eintretens und mit Annahmen zur wirtschaftlichen Entwicklung⁴ werden die künftigen Kosten des Extremereignisses berechnet.

Während die Analyse des schleichenden Klimawandels tendenziell auf allgemeine Auswirkungen fokussiert, ist die Analyse von Extremereignissen eher kostenorientiert, weil Extremereignisse vor allem Schäden anrichten, die Kosten verursachen.

⁴ Die wirtschaftliche Entwicklung ist von Interesse, weil damit der Wert von Infrastrukturen steigt, sodass ein künftiges Extremereignis höhere Kosten verursacht.

1.4 Struktur der vorliegenden Studie

Der Hauptteil des vorliegenden Berichts ist nach unterschiedlichen Infrastrukturen gegliedert:

- Kapitel 2 diskutiert Transportinfrastrukturen, insbesondere Strassen und Schienen.
- Kapitel 3 setzt sich mit Energieinfrastrukturen, insbesondere thermoelektrischen Kraftwerken und Wasserkraftwerken, auseinander.
- Kapitel 4 befasst sich mit Infrastrukturen im Bereich der Wasserversorgung.
- Kapitel 5 diskutiert weitere Infrastrukturen, insbesondere Industrieinfrastrukturen oder soziale und touristische Infrastrukturen.

Je Infrastruktur werden die Auswirkungen in der Struktur von Tabelle 1 dargestellt. Der Begriff der Infrastruktur wird dabei weit gefasst, d.h. es werden Auswirkungen auf ganze Infrastruktursektoren beschrieben, welche z.B. auch die Nachfrage nach Infrastrukturleistungen umfassen können. Die Ergebnisse werden schliesslich in Kapitel 6 in einer Übersichtstabelle zusammengefasst und kurz gewürdigt. Sämtliche technischen Grundlagen und Berechnungen finden sich in den Anhängen.

Tabelle 1: Gliederung der untersuchten Auswirkungen in einzelnen Studien

Extremereignisse		Schleichender Klimawandel		
Schäden durch Extremereignisse	Nachfrageeffekte	Betriebsleistungseffekte	Vermeidungs- bzw. Anpassungseffekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte
Die Auswirkungen von Extremereignissen umfassen vor allem Kosten der Instandstellung der betroffenen Infrastruktur. Ein Beispiel ist der Neubau einer durch einen Felssturz zerstörten Strasse.	Nachfrageeffekte fassen Veränderungen im Nachfrageverhalten zusammen. Zum Beispiel wird als Folge der steigenden Temperaturen weniger Energie für Heizzwecke nachgefragt.	Auswirkungen auf die Betriebsleistung betreffen die operationellen bzw. betrieblichen Auswirkungen. Zum Beispiel steht aufgrund höherer Temperaturen und tieferen Niederschlagsmengen weniger Wasser für Wasserkraftwerke zur Verfügung, sodass die Betriebsleistung reduziert werden muss.	Vermeidungs- oder Anpassungsmassnahmen verursachen Kosten der Prävention potenzieller Schäden. Strassen müssen beispielsweise aufgrund steigender Temperaturen erneuert werden, um Asphalterschmelzungen zu vermeiden.	Preis-/Wohlfahrtseffekte resultieren aus veränderter Nachfrage und verändertem Angebot und damit veränderten Preisen, was sich auf die Wohlfahrt auswirkt. Wohlfahrtseffekte werden i.d.R. in zusätzlichen oder entgangenen Konsummöglichkeiten ausgedrückt und ins Verhältnis zum Bruttoinlandprodukt (BIP) gestellt.

Quelle: Eigene Darstellung

2 Transport

2.1 Transport Allgemein

Der vorliegende Abschnitt zu «Transport Allgemein» beschreibt die Auswirkungen des Klimawandels auf Transportinfrastrukturen im Allgemeinen, wobei sich die zitierten Analysen nicht direkt auf eine konkrete Infrastruktur beziehen. Den wichtigsten Beitrag leisten Forzieri et al. (2018).

Tabelle 2: Transport Allgemein – Überblick

Autoren	Schäden durch Extremereignisse	Nachfrageeffekte	Betriebsleistungseffekte	Vermeidungs- bzw. Anpassungseffekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte
Forzieri et al.	✓				

Quelle: Eigene Darstellung

Es wird erwartet, dass sich Extremereignisse im Laufe des Klimawandels häufen werden. Mit Ausnahme des Rückganges der durch Kältewellen verursachten Kosten bedeutet diese Vermehrung von Extremereignissen höhere Kosten für Infrastrukturen. Forzieri et al. (2018) untersuchen in ihrer Studie für Europa die Kosten von sieben Extremereignissen auf unterschiedliche Infrastrukturen (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Kurzüberblick zu Forzieri et al. (2018)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen	Strasse, Schiene, Wassertransport, Lufttransport
Untersuchte Klimaereignisse	Hitzewellen, Kältewellen, Fluss- und Küstenüberflutungen, Dürren, Brände, Windstürme
Untersuchte Effekte	Extremereignisse
Untersuchte Länder	EU+, inklusiv Schweiz
Untersuchte Zeit	2011-2040; 2041-2070; 2071-2100
Verwendetes Szenario	A1B
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Mit Klimamodellen wird die künftige Entwicklung des Klimas abgebildet, exponierte Infrastrukturen werden detailliert erfasst und deren Verletzlichkeit dokumentiert. Anhand von zahlreichen Schadensberichten werden die künftigen Schäden, die durch Extremereignisse verursacht werden, geschätzt.

Quelle: Eigene Darstellung

Mit einem Umwandlungssatz (vgl. Anhang B.1 zur Methodik der Berechnung) werden die europäischen Kosten auf die Schweiz umgerechnet. Insgesamt ergibt eine grobe Approximation, dass sich die Schweizer Kosten im Jahr 2100 auf fast CHF 530 Mio. belaufen, eine Erhöhung um CHF 442 Mio. gegenüber der Referenzperiode der 2000er Jahre. Davon werden Hitzewellen die höchsten Kosten verursachen und Strassen am stärksten tangiert werden. Eine Zusammenfassung der Resultate ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Erhöhung der jährlichen Kosten je Transportinfrastruktur

Infrastruktur	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Strassen	83.0	197.4	386.0
Schienen	12.0	26.4	50.1
Inländische Wasserwege	1.2	1.9	3.0
Häfen	0.6	1.4	2.4
Flughäfen	0.0	0.0	0.0
Total	96.8	227.1	441.5

Anmerkung: Berechnet mit dem durchschnittlichen CHF/EUR Wechselkurs im Jahr 2010 und mit BfS-Teuerungsstatistiken. Resultate ausgedrückt in Mio. CHF zum Preisniveau von 2018.

Aufgrund von Rundungen ist es möglich, dass das Total nicht der Summe entspricht.

Küstenüberflutungen wurden in der Berechnung nicht berücksichtigt, da diese in der Schweiz nicht vorkommen können.

Die Erhöhung bezieht sich auf die gewählte Basisperiode der 2000er Jahre.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Forzieri et al. (2018), EZB, BfS-Teuerungsstatistik

Geeignete Anpassungsmassnahmen müssten damit vor allem im Bereich der Strassen getroffen werden, um die prognostizierten Kosten von Extremereignissen vermeiden zu können.

2.2 Strasse

Strassen sind für die Schweiz eine der wichtigsten Transportinfrastrukturen. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Literatur, die sich spezifisch mit den Auswirkungen des Klimawandels auf Strassen auseinandersetzt.

Tabelle 5: Strasse – Überblick

Autoren	Schäden durch Extremereignisse	Nachfrageeffekte	Betriebsleistungseffekte	Vermeidungs- bzw. Anpassungseffekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte
Nemry und Demirel (2012)				✓	
Vöhringer et al. (2017)	✓				

Quelle: Eigene Darstellung

Es gibt keine Studien, welche die Auswirkungen des schleichenden Klimawandels auf die Strassen in der Schweiz untersuchen. Die wichtigste Informationsquelle ist daher der EU Kommissionsbericht «Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructures» von Nemry und Demirel (2012). Einen wichtigen Beitrag zur Analyse der Auswirkungen von Extremereignissen auf Schweizer Strassen leisten Vöhringer et al. (2017) mit der Studie «Assessing the impacts of climate change for Switzerland».

2.2.1 Nemry und Demirel (2012): Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructure

In ihrem Bericht fokussieren Nemry und Demirel (2012) auf Niederschlags- und Temperaturschäden (vgl. Tabelle 6). In Bezug auf die Niederschlagsentwicklung werden die Reparaturkosten quantifiziert, die sich daraus ergeben, dass intensivere Niederschläge erwartet werden. In Bezug auf die Temperaturentwicklung wird einerseits die Reduktion der Reparaturkosten quantifiziert, die auf weniger Strassenfrost zurückzuführen sind. Andererseits werden die Kosten quantifiziert, die anfallen, wenn Strassen neu geteert werden müssen, um sie schmelzresistent zu machen.

Es werden somit hauptsächlich Vermeidungs- und Anpassungseffekte untersucht. Die Basisperiode für sämtliche Berechnungen ist 1990-2010.

Tabelle 6: Kurzüberblick zu Nemry und Demirel (2012)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen	Strasse
Untersuchte Klimaereignisse	Temperaturerhöhungen, Niederschlagsänderungen
Untersuchte Effekte	Vermeidungs- und Anpassungseffekte
Untersuchte Länder	EU27
Untersuchte Zeit	2040-2070; 2070-2100
Verwendete Szenarien	E1; A1B; RCP8.5
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	<p>Niederschlagsschäden: Heutigen Kosten werden mittels Klimaprognosen extrapoliert.</p> <p>Hitzeschäden: Maximale Asphalttemperaturen werden basierend auf Klimaprognosen in Zukunft hergeleitet. Dann wird bestimmt, ob Asphalt mit temperaturresistenterem Asphalt ersetzt werden muss, und die Kosten des neuen Asphalts werden auf das Strassennetz hochgerechnet.</p> <p>Kälteschäden: Zunächst werden regionale «Frier-Tau-Zyklen» basierend auf Wassermengen und Temperatur berechnet. Anhand von Normen wird hergeleitet, welchen Schaden diese Zyklen anrichten und wie hoch die Reparaturkosten sind.⁵</p>

Quelle: Eigene Darstellung

Bezüglich Niederschlagsentwicklung wird angenommen, dass die niederschlagsverursachten Kosten signifikant zunehmen, wenn die durchschnittliche Niederschlagsmenge den Schwellenwert von 100mm pro Tag überschreitet. In der Periode 2040-2070 wird dies nicht der Fall sein; in der Periode 2070-2100 nur vereinzelt. Als Folge werden gesamteuropäisch und auch in der Schweiz keine grossen Kostenerhöhungen aufgrund von Niederschlägen erwartet. Die Schweizer Kosten, die sich aus einer «pro-Einheit»-Analyse ergeben, sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Prognostizierte Erhöhung der Schweizer Niederschlagskosten in Mio. CHF

Szenario	2040-2070	2070-2100
E1	0.83	0.62
A1B	2.53	3.59
RCP8.5	4.70	8.07

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Nemry und Demirel (2012), EZB Wechselkurs, BfS-Teuerungsstatistik und Eurostat

Bezüglich Temperaturkosten gilt, dass die Reduktion der kältebedingten Kosten den Anstieg der hitzebedingten Kosten in der Regel überwiegt. Vielerorts in Europa wird deshalb mit einer Gesamtreduktion der temperaturbedingten Strassenkosten gerechnet. Die Ergebnisse für die Schweiz basierend auf einer «pro-Einheit»-Analyse sind in Tabelle 8 dargestellt. Die Methodik zur Herleitung aller Kosten und die technischen Details des Berichts lassen sich Anhang B.2 entnehmen.

⁵ Die Kostenschätzung für sämtliche Effekte gilt somit nur für das heutige Strassennetz.

Tabelle 8: Prognostizierte Erhöhung der Schweizer Temperaturkosten in Mio. CHF

Szenario	2040-2070	2070-2100	
E1	Hitzeverursacht	1.70	2.46
	Kälteverursacht	-2.45	-9.09
	Temperaturverursacht	-0.74	-6.62
A1B	Hitzeverursacht	3.01	4.59
	Kälteverursacht	-3.26	-11.9
	Temperaturverursacht	-0.25	-7.28
RCP8.5	Hitzeverursacht	3.10	11.5
	Kälteverursacht	-3.36	-12.3
	Temperaturverursacht	-0.26	-0.80

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Nemry und Demirel (2012), Eurostat, CIA Factbook, EZB-Wechselkurs und BfS-Teuerungsstatistik

Es ist zu erwarten, dass sich die gesamten temperaturverursachten Strassenkosten auch in der Schweiz aufgrund eines stärkeren Rückgangs der kälteverursachten Kosten gegenüber der Basisperiode reduzieren.

2.2.2 Vöhringer et al. (2017): Assessing the Impacts of Climate Change for Switzerland

Vöhringer et al. (2017) untersuchen und quantifizieren die Auswirkungen von Extremereignissen auf verschiedene Infrastrukturen mit einem Fokus auf Stürme und Überflutungen (vgl. Tabelle 9). Weitere Extremereignisse wie beispielsweise Lawinen, Erdbeben oder Steinschläge stellen zwar eine Gefahr für Strassen dar, ihre Entwicklung kann jedoch nach dem heutigen Wissensstand nicht vorhergesagt werden. Auch die Entwicklung von Überflutungen und Stürmen ist bis jetzt nicht bekannt. Im Sommer und Winter ist eine positive, statistisch signifikante Korrelation zwischen Temperaturen und Stürmen zu beobachten. Diese deutet daraufhin, dass es in diesen Jahreszeiten zu vermehrten Stürmen und Überflutungen kommen kann. Im Herbst und Frühling ist diese Korrelation hingegen insignifikant.

Tabelle 9: Kurzüberblick zu Vöhringer et al. (2017)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen	Strasse
Untersuchte Klimaereignisse	Überflutungen, Stürme
Untersuchte Effekte	Extremereignisse
Untersuchte Länder	Schweiz
Untersuchte Zeit	von 2008 an
Verwendete Szenarien	A1B; A2; RCP3PD
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Es werden vergangene Ereignisse als Referenzpunkte verwendet. Die Schäden dieser Ereignisse werden auf 2008 hochgerechnet und verschiedenen Sektoren angerechnet. Ab 2008 werden die geschätzten Schadenswerte mit einem Faktor, der Wirtschaftswachstum und Klimawandel berücksichtigt, auf 2060 hochgerechnet.

Quelle: Eigene Darstellung

Die Quantifizierung der erwarteten Schäden erfolgt entlang der Referenzereignisse. Dafür verwenden Vöhringer et al. den Sturm Lothar vom Jahr 1999 und die Hochwasser vom August

2005. Es wird für beide Ereignisse angenommen, dass sich ihre Jährlichkeiten⁶ bis 2060 halbieren. Im Falle des Sturmes beträgt die Jährlichkeit im Jahr 2060 50 Jahre, im Falle der Überflutungen 37.5 Jahre. Die technischen Details des Berichts sind in Anhang B.3 dargestellt.

Überflutungen werden 2060 erwartete zusätzliche Kosten von CHF 13.4 Mio. (zum Preisniveau von 2018) verursachen. «Sonstige Strassen» (weder Autobahnen noch Hauptstrassen) werden dabei die grösste Last tragen. Die Resultate sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Erwartete Strassenkosten einer Extremüberflutung im Jahr 2060 in Mio. CHF

Sektor		Kosten
Transport	Autobahnen und Nationalstrassen	0.38
	Hauptstrassen	5.97
	Sonstige Strassen	7.06
Strassenkosten Total		13.41

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Vöhringer et al. (2017); BfS-Teuerungsstatistik

Stürme werden 2060 erwartete zusätzliche Kosten von CHF 4.11 Mio.⁷ verursachen. Dabei tragen Fahrzeuge die grösste Last, nicht die Strasseninfrastruktur selbst. Die Resultate sind in Tabelle 11 dargestellt, wobei die Kosten als jährliche Kosten zu verstehen sind.

Tabelle 11: Erwartete Strassenkosten eines Extremsturms im Jahr 2060 in Mio. CHF

Sektor		Kosten
Transport	Strassen – Räumungs- und Reparaturarbeiten	0.44
	Strassen – Schäden zu Fahrzeugen	3.67
Strassenkosten Total		4.11

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Vöhringer et al. (2017); BfS-Teuerungsstatistik

Geeignete Anpassungsmassnahmen müssten einerseits Nebenstrassen vor Überflutungsschäden und andererseits Fahrzeuge vor Sturmschäden schützen.

2.3 Schiene

Schienen gelten als besonders gefährdet durch Klimaereignisse und -entwicklungen, weil es für viele Routen keine Ausweichmöglichkeiten gibt. Wenn es an einer Schiene in einer Hauptverkehrsachse zu einem Schaden kommt, ist damit das gesamte Schienennetz beeinträchtigt. Tabelle 12 gibt einen Überblick über die in der einschlägigen Literatur untersuchten Effekte.

⁶ Die Jährlichkeit, bezeichnet das Wiederkehrintervall (d.h. die erwartete Zeit) zwischen Naturereignissen.

⁷ Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Tabelle 12: Schiene – Überblick

Autoren	Schäden durch Extremereignisse	Nachfrageeffekte	Betriebsleistungseffekte	Vermeidungs- bzw. Anpassungseffekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte
Nemry und Demirel (2012)				✓	
Vöhringer et al. (2017)	✓				

Quelle: Eigene Darstellung

Die wichtigsten Beiträge zur Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Schieneninfrastruktur leisten Nemry und Demirel (2012) mit ihrem Bericht «Impacts of climate change on transport: A focus on road and rail transport» für die EU Kommission und Vöhringer et al. (2017) mit dem Bericht «Assessing the impact of climate change on Switzerland». Nemry und Demirel (2012) fokussieren ihre Analyse auf den schleichenden Klimawandel, während Vöhringer et al. (2017) Extremereignisse untersuchen.

2.3.1 Nemry und Demirel (2012): Impacts of Climate Change on Transport: A focus on road and rail transport infrastructure

Extreme Temperaturen werden von Nemry und Demirel (2012) als grösste klimabedingte Gefahr für die Schiene genannt (vgl. Tabelle 13). Bei extremer Kälte erhöht sich das Risiko, dass Schienen brechen; bei extremer Hitze erhöht sich das Risiko, dass sich Schienen verformen.

Tabelle 13: Kurzüberblick zu Nemry und Demirel (2012)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen	Schiene
Untersuchte Klimaereignisse	Temperaturerhöhungen
Untersuchte Effekte	Anpassungs- bzw. Vermeidungseffekte
Untersuchte Länder	EU27
Untersuchte Zeit	2040-2070; 2070-2100
Verwendete Szenarien	E1; A1B; RCP8.5
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Berechnung der «stressfreien Temperatur (SFT)» von Schienen in allen Ländern. Berechnung der künftigen Maximaltemperatur für 50 x 50 km Quadrate in Europa. Herleitung, ob und in welchem Ausmass Züge verlangsamt werden müssen (basierend auf SFT und maximalen Temperaturen). Berechnung der durchschnittlichen Verspätungen und Quantifizierung in monetären Einheiten mit Umwandlungsfaktoren für Personen und Cargo.

Quelle: Eigene Darstellung

Das Schadensrisiko ist nebst der Temperatur auch massgeblich von der Belastung und Qualität der Schienen abhängig. Die Belastung hängt einerseits von der Geschwindigkeit, andererseits vom Gewicht der Züge ab. Bei der Qualität der Schiene ist vor allem die Bettung relevant.

Die verbreitetste Adaptationsmassnahme gegen extreme Temperaturen ist das Einsetzen von Geschwindigkeitsbegrenzungen, welche die Belastung der Schienen und damit auch die Wahrscheinlichkeit einer Verformung bzw. eines Bruchs reduzieren. Geschwindigkeitsbegrenzungen führen jedoch zu Verlangsamungen und Verspätungen, die von Nemry und Demirel (2012) in Form von Verspätungskosten quantifiziert und als Folge des Klimawandels dargestellt werden. Da Geschwindigkeitsbegrenzungen explizit darauf ausgerichtet sind, Schäden zu vermeiden, handelt es sich um Vermeidungseffekte und nicht um direkte Infrastrukturkosten.

Zur Berechnung der Schweizer Verspätungskosten werden Faktoren wie die Qualität der Schiene, die Anzahl beförderter Passagiere und die Menge an transportierten Gütern berücksichtigt – diese Faktoren beeinflussen massgeblich die Gefahr einer Verformung der Schienen. Die berechneten jährlichen Schweizer Kosten sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Prognostizierte Erhöhung der Verspätungskosten in Mio. CHF

	2040-2070	2070-2100
E1	1.46	2.03
A1B	2.80	4.93
RCP8.5	2.85	7.53

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Nemry und Demirel (2012), BfS-Teuerungsstatistik, EZB

2.3.2 Vöhringer et al. (2017): Assessing the Impacts of Climate Change for Switzerland

Der Bericht von Vöhringer et al. (2017) untersucht die Auswirkungen von extremen Stürmen und Überflutungen auf das Schienennetz der Schweiz (vgl. Tabelle 15). Andere denkbare Extremereignisse können mit heutigen Klimamodellen nur ungenügend prognostiziert werden. Deshalb beschränkt sich die Analyse auf Stürme und Überflutungen.

Tabelle 15: Kurzüberblick zu Vöhringer et al. (2017)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen	Schiene
Untersuchte Klimaereignisse	Überflutungen, Stürme
Untersuchte Effekte	Extremereignisse
Untersuchte Länder	Schweiz
Untersuchte Zeit	ab 2008
Verwendete Szenarien	A1B; A2; RCP3PD
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Verwendung vergangener Ereignisse als Basispunkte. Schätzung, wie sich die Jährlichkeit mit fortschreitendem Klimawandel entwickelt. Korrektur für Wirtschaftswachstum und Effekt des Klimawandels.

Quelle: Eigene Darstellung

Basierend auf dem Basisereignis «Lothar» von 1999 werden die erwarteten Kosten eines Extremsturmes im Jahr 2060 berechnet. Es wird dabei angenommen, dass sich die Jährlichkeit im Jahr 2060 gegenüber 1999 auf 50 Jahre halbiert. Die erwarteten Kosten belaufen sich auf CHF 4.31 Mio. und fallen hauptsächlich aufgrund von Umsatzverlusten von Eisenbahnen in den Bergen an. Die Aufteilung der Kosten ist in Tabelle 16 zu dargestellt.

Tabelle 16: Erwartete Schienenkosten eines Extremsturmes im Jahr 2060 in Mio. CHF

Sektor	Kosten
Transport	
SBB – Räumungs- und Reparaturarbeiten	0.34
Sonstige Zugsunternehmen – Räumungs- und Reparaturarbeiten	0.59
Sonstige Zugsunternehmen – Kosten der Ersatzbusse	0.10
Sonstige Zugsunternehmen – Umsatzverlust	0.15
Bergzüge – Räumungs- und Reparaturarbeiten	0.49
Bergzüge – Umsatzverlust	2.64
Erwartete zusätzliche Schienenkosten Total	4.33

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Vöhringer et al. (2017) und BfS-Teuerungsstatistiken

Vom Basisereignis der Überflutungen 2005 und mit der Annahme, dass sich die Jährlichkeit eines solchen Ereignisses im Jahr 2060 ebenfalls halbiert (auf 37.5 Jahre), werden die erwarteten Kosten einer Überflutung im Jahr 2060 auf CHF 5.5 Mio. geschätzt (vgl. Tabelle 17). Es gibt keine feinere Aufteilung, auf welcher Art von Schienen diese Kosten anfallen.

Tabelle 17: Erwartete Schienenkosten einer Extremüberflutung im Jahr 2060 in Mio. CHF

Sektor	Kosten
Zusätzliche Schienenkosten Total	5.47

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Vöhringer (2017) und OECD BIP Prognosen

Die Kosten sind als jährliche Kosten zu verstehen. Sie steigen mit fortschreitendem Klimawandel, da Extremereignisse mit stärkerem Klimawandel wahrscheinlicher werden.

Die Resultate des Berichtes zeigen, dass Adaptationsmassnahmen für Schienen allgemein vor allem auf Überflutungen ausgerichtet sein sollten. Bergzüge sind auch gegen Stürme abzuschirmen.

2.4 Zusammenfassung und Zwischenfazit

Strassen und Schienen sind in der Literatur verhältnismässig gut untersucht, weil sie die wichtigsten Transportinfrastrukturen für die Gesellschaft darstellen.

Forzieri et al. (2018) untersuchen die Auswirkungen von Extremereignissen auf Transportinfrastrukturen. Eine Umrechnung der Ergebnisse auf die Schweiz ergibt, dass der Unterhalt von Schweizer Strassen bis 2100 jährlich zusätzliche Kosten von CHF 386 Mio. verursachen wird. Schäden an Schienen werden etwa CHF 50 Mio. zusätzliche Kosten verursachen. Insgesamt werden die jährlichen Schäden an Schweizer Transportinfrastrukturen aufgrund von Extremereignissen auf rund CHF 442 Mio. geschätzt.

Nemry und Demirel (2012) untersuchen ebenfalls Strassen und Schienen. Sie analysieren die Auswirkungen des schleichenden Klimawandels, insbesondere der steigenden Temperaturen und veränderter Niederschläge. Für Strassen wird je nach Klimaszenario eine Reduktion der jährlichen temperaturverursachten Kosten zwischen CHF 0 bis -7.2 Mio. bis 2100 erwartet. Grund für die Reduktion liegt darin, dass die steigenden Temperaturen zu tieferen Kälteschäden führen. Die Autoren erwarten zudem nicht, dass sich die niederschlagsverursachten Schäden signifikant erhöhen, weil sich die Niederschlagsmengen nicht genügend erhöhen, um erhebliche zusätzliche Schäden zu verursachen. Die bis 2100 erwarteten Schäden belaufen sich auf maximal CHF 8 Mio., was wesentlich unter derjenigen von Forzieri et al. (2018) liegt. Die grossen Unterschiede sind darauf zurückzuführen, dass die beiden Studien unterschiedliche Modellannahmen treffen und die Ergebnisse anderer Länder jeweils auf die Schweiz umgerechnet werden.

Bezüglich Schienen werden von Nemry und Demirel (2012) nicht direkte Schäden quantifiziert, sondern Verspätungskosten. Die häufigste Methode, um Schienenbrüche und -verformungen zu vermeiden, ist das Einsetzen von Geschwindigkeitsgrenzen für Züge. Die daraus resultierenden Kosten für die Schweiz werden bis 2100 auf maximal CHF 7.5 Mio. beziffert.

Im Gegensatz zu Forzieri et al. (2018) sowie Nemry und Demirel (2012) analysierten Vöhringer et al. (2017) die Auswirkungen des Klimawandels auf Infrastrukturen direkt für die Schweiz. Sie fokussieren ebenfalls auf Strassen und Schienen sowie auf Extremereignisse. Vöhringer et al. (2017) schätzen, dass die erwarteten zusätzlichen Kosten für Strassen von Extremstürmen im

Jahr 2060 CHF 4.11 Mio. und von Hochwasser CHF 13.41 Mio. betragen. In Bezug auf Schienen werden die erwarteten Zusatzkosten durch Extremstürme im Jahr 2060 mit CHF 4.33 Mio. beziffert und diejenigen von Hochwasser mit CHF 5.47 Mio.

Die Ergebnisse der verschiedenen Studien streuen stark, weil sie stark vom Analysefokus und den Modellannahmen abhängen. Hinzu kommt eine Unschärfe bei der Umrechnung der Auswirkungen in anderen Ländern auf die Schweiz. Aussagen zu genauen Auswirkungen auf konkrete Transportinfrastrukturen in der Schweiz sind auf dieser Basis nicht möglich und erfordern entsprechen vertiefte Analysen zu individuellen Infrastrukturobjekten.

3 Energie

3.1 Energie Allgemein

Im vorliegenden Abschnitt werden alle Effekte des Klimawandels auf den Energiesektor zusammengefasst, die nicht einer spezifischen Infrastruktur oder einer spezifischen Art von Kraftwerken zugeordnet werden können. Dabei werden sowohl angebots- als auch nachfrageseitige Effekte analysiert. Die Angebotsseite bezieht sich auf Kraftwerke und Verteilinfrastrukturen. Es wird erwartet, dass sowohl Wasser- wie auch Kernkraftwerke in der Schweiz aufgrund von höheren Temperaturen und niedrigeren Wasserpegeln Leistungseinbussen hinnehmen müssen. Auf der Nachfrageseite wird vor allem die Energienachfrage für Temperaturregulierung (Kühlung und Heizung von Gebäuden) untersucht. Hier sind zwei entgegengerichtete Effekte zu beobachten: Einerseits sinkt die Nachfrage für Heizenergie, andererseits steigt die Energienachfrage für Kühlung. Tabelle 18 gibt einen Überblick über die verwendete Literatur und die untersuchten Effekte.

Tabelle 18: Energie Allgemein – Überblick

Autoren	Schäden durch Extremereignisse	Nachfrageeffekte	Betriebsleistungseffekte	Vermeidungs- bzw. Anpassungseffekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte
Müller et al. (2007)		✓	✓		✓
Vöhringer et al. (2017)	✓	✓	✓		✓
Forzieri et al. (2018)	✓				

Quelle: Eigene Darstellung

Wichtige Beiträge zur Abschätzung der zu erwartenden Effekte für die Schweiz leisten Vöhringer et al. (2017) mit ihrem Bericht «Assessing the impact of climate change for Switzerland», Müller et al. (2007) mit der Studie «Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse)» und die Arbeit «Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe» von Forzieri et al. (2018).

Müller et al. (2007) fokussieren ihre Analyse auf den schleichenden Klimawandel, während Vöhringer et al. (2017) sowohl den schleichenden Klimawandel als auch Extremereignisse diskutieren. Forzieri et al. (2018) richten ihren Fokus auf Extremereignisse.

3.1.1 Müller et al. (2007) Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse)

Die wichtigsten Resultate des Berichtes von Müller et al. (2007) sind in Tabelle 19 zusammengefasst. Die technischen Angaben des Berichtes werden im Anhang C.1 ausgeführt.

Tabelle 19: Kurzüberblick zu Müller et al. (2007)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen	Energie
Untersuchte Klimaereignisse	Temperaturerhöhungen
Untersuchte Effekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte
Untersuchte Länder	Schweiz
Untersuchte Zeit	2030; 2050; 2070; 2100
Verwendete Szenarien	B2; A2
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Es werden drei Bereiche untersucht, die von steigenden Temperaturen betroffen sind: Elektrizitätsangebot, Elektrizitätsnachfrage für Heizung und Elektrizitätsnachfrage für Kühlung. Auf der Angebotsseite werden die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserkraftwerke geschätzt. Zu diesem Zweck wird der Einfluss von Temperaturerhöhungen auf Niederschlags- und Abflussmengen analysiert. Gestützt darauf wird der Einfluss der veränderten Abflussmengen auf die Leistung geschätzt. Auf der Nachfrageseite wird die Temperaturregulierung untersucht. Dabei werden «Heating» und «Cooling Demand Days» mit den künftigen Temperaturen antizipiert; gestützt darauf wird im Haushalts-, Dienstleistungs- und Industriebereich die künftige Stromnachfrage geschätzt.

Quelle: Eigene Darstellung

Die Stromproduktion von Wasserkraftwerken wird aufgrund sinkender Abflussmengen abnehmen, wobei sich Abflussmengen als Differenz zwischen Niederschlagsmenge und Verdunstung ergeben. Mit höheren Temperaturen steigt die Verdunstung, und die Abflussmenge sinkt. Die reduzierte Stromproduktion muss mit Strom aus anderen Quellen ersetzt werden, was Ersatzkosten verursacht. Diese sind in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Jährliche Mehrkosten für die Stromproduktion

Jahr	Kosten für die Stromproduktion in CHF Mio.	% des BIP in der Untersuchungsperiode
2030	207	0.04%
2050	415	0.06%
2100	777	0.06%

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 115; Teuerungszahlen des BfS

Auf der Nachfrageseite liegt der Fokus auf der Temperaturregulierung. In Folge steigender Temperaturen nimmt der Klimatisierungs- bzw. Kühlungsbedarf zu, während der Heizungsbedarf sinkt. Der Kühlungsbedarf und somit die Verbreitung von Klimaanlage in Schweizer Haushalten wird zunehmen, wodurch diesbezüglich die Ausgaben für Energie ansteigen werden (vgl. Tabelle 21).

Tabelle 21: Kühlungsbedarf und anfallende Kosten

	2030	2050	2070	2100
Zunahme Stromverbrauch (TWh pro Jahr)	4.00	7.50	11.00	15.00
Mehrkosten (Mio. CHF pro Jahr)	570	1090	1620	2230
Mehrkosten in % des BIP	0.10%	0.15%	0.20%	0.20%

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 122; BfS-Teuerungsstatistik

Umgekehrt wird der Heizungsbedarf abnehmen, was Kosteneinsparungen nach sich zieht, wie Tabelle 22 aufzeigt.

Tabelle 22: Heizungsbedarf und anfallende Kosten

	2030	2050	2070	2100
Abnahme Stromverbrauch (TWh pro Jahr)	-6.00	-8.50	-10.00	-13.50
Minderkosten (Mio. CHF pro Jahr)	-520	-730	-840	-1090
Minderkosten in % des BIP	-0.09%	-0.10%	-0.10%	-0.09%

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 128; BfS-Teuerungsstatistik

Die Kosteneinsparungen, die durch reduzierte Heizung anfallen, können die Kostenerhöhungen der vermehrten Kühlung nicht komplett wettmachen.

Durch Kombination der reduzierten Erzeugung der Wasserkraftwerke und der veränderten Nachfrage für Heizung und Kühlung machen Müller et al. (2007) eine Analyse des Gesamtmarktes. Wie bereits oben angedeutet, werden die Auswirkungen auf den Energiemarkt negativ sein. Dies wird in Tabelle 23 bestätigt.

Tabelle 23: Mehrkosten im Energiebereich

	2030	2050	2070	2100
Jährliche Mehrkosten in Mio. CHF	310	780	1300	1970
Jährliche Mehrkosten in % des BIP	0.05%	0.13%	0.16%	0.17%

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 130; BfS-Teuerungsstatistik

Insgesamt gehen die Autoren davon aus, dass in Zukunft im Energiebereich höhere Kosten zu erwarten sind. Absolut entwickeln sich diese Mehrkosten von CHF 310 Mio. pro Jahr im Jahr 2030 bis fast 2'000 Mio. Franken pro Jahr im Jahr 2100. Relativ zum erwarteten BIP steigt der Anteil dieser Mehrkosten von 0.05 Prozent im Jahr 2030 auf 0.17 Prozent im Jahr 2100.

3.1.2 Vöhringer et al. (2017): Assessing the Impacts of Climate Change for Switzerland

Zur Analyse von Preis- und Wohlfahrtseffekten untersuchen Vöhringer et al. (2017) sowohl Extremereignisse als auch auf den schleichenden Klimawandel (vgl. Tabelle 24). Die technischen Details des Berichts sind in Anhang C.2 zu finden.

Tabelle 24: Kurzüberblick zu Vöhringer et al. (2017)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen	Energiesektor – Angebot und Nachfrage
Untersuchte Klimaereignisse	Temperaturerhöhungen, Stürme
Untersuchte Effekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte, Extremereignisse
Untersuchte Länder	Schweiz
Untersuchte Zeit	2060
Verwendete Szenarien	A1B; A2; RCP3PD
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Es werden sowohl der schleichende Klimawandel (Temperaturerhöhungen) als auch Extremereignisse (Stürme) analysiert. Die Analyse der steigenden Temperaturen umfasst sowohl die Angebots- wie auch die Nachfrageseite. Auf der Nachfrageseite wird mit der Herleitung der CDD (Cooling Demand Days) und HDD (Heating Demand Days) die künftige Energienachfrage für Temperaturregulierung geschätzt. Auf der Angebotsseite wird die zu erwartende Knappheit im Ausland analysiert. Der inländische Energiemarkt wird nicht analysiert, weil angenommen wird, dass dieser wenig betroffen ist. Die Analyse der Extremereignisse fokussiert auf Stürme. Der Sturm Lothar von 1999 wird als Basisereignis verwendet. Dessen Kosten werden auf 2060 hochgerechnet und die Jährlichkeit wird angepasst, um die erwarteten Kosten im Jahr 2060 herzuleiten.

Quelle: Eigene Darstellung

Schleichender Klimawandel

Um die Effekte des schleichenden Klimawandels abzuschätzen, wird der Einfluss der steigenden Temperaturen auf Energienachfrage und -angebot analysiert. Die Nachfrage nach Heizwärme ist rückläufig, während der Kühlungsbedarf steigt. In Abweichung zu Müller et al. (2007) treffen Vöhringer et al. (2017) die Annahme, dass die Verbreitung von Klimaanlage in der Schweiz nicht signifikant steigen wird. Demzufolge wird der Rückgang der Nachfrage nach Heizwärme die Erhöhung der Nachfrage nach Kühlung mehr als kompensieren. Die daraus entstehenden Wohlfahrtseffekte sind in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Prozentuale Wohlfahrtsänderungen auf der Energienachfrageseite⁸

	RCP3PD			A1B			A2		
	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.
Δ Wohlfahrt durch reduzierte Heizung	0.09	0.18	0.26	0.28	0.29	0.39	0.17	0.28	0.39
Δ Wohlfahrt durch steigende Kühlung	-0.02	-0.03	-0.04	-0.03	-0.04	-0.06	-0.03	-0.04	-0.05
Δ Wohlfahrt durch veränderte Temperaturregulierung	0.07	0.15	0.22	0.15	0.25	0.34	0.14	0.24	0.33

Anmerkung: Angaben in Prozent relativ zur Basisperiode 1980-2009.

Quelle: Vöhringer (2017), S. 50-52

⁸ Wohlfahrtsänderungen sind im Bericht so definiert, dass ein Wohlfahrtsverlust von 1% eine Konsumreduktion von 1% bedeutet.

Auf der Angebotsseite wird nur das Ausland analysiert. Gemäss Vöhringer et al. (2017) ist der inländische Strommarkt zu wenig stark vom Klimawandel betroffen, um eine Analyse durchführen zu können. Es wird aufgrund der steigenden Temperaturen zwar zu einer veränderten Saisonalität der Erzeugung von Wasserkraft kommen (mehr im Winter, weniger im Sommer), aber über das ganze Jahr hinweg wird erwartet, dass sich die Fassungsmengen der Wasserkraftwerke in der Schweiz innerhalb der heutigen Schwankungen halten werden, sodass die inländische Produktion von Wasserkraftwerken nicht signifikant tangiert wird. Kernkraftwerke werden aufgrund fehlenden Kühlwassers zwar von warmen Temperaturen negativ beeinflusst. Allerdings ist in der Schweiz der Atomausstieg geplant, sodass dies langfristig keine Rolle spielt. Im Ausland wird es aufgrund der steigenden Temperaturen zu veränderter Nachfrage und veränderter Erzeugung kommen, vor allem in den Ländern, die hauptsächlich thermoelektrische Kraftwerke betreiben (insb. Frankreich und Deutschland). Dies führt zu Preisänderungen, die auch den Strompreis in der Schweiz beeinflussen, weil ein Teil des Stroms importiert wird. Diese Entwicklung und der resultierende Wohlfahrtseffekt sind in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: Strompreis- und Wohlfahrtsänderungen auf der Energieangebotsseite

	RCP3PD			A1B			A2		
	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.
Δ Strompreis	0.61	1.52	2.42	-0.09	-0.14	-0.22	-0.08	-0.14	-0.22
Δ Wohlfahrt	-0.01	-0.02	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Anmerkung: Die Strompreise beschreiben die Endkonsumentenpreise. Angaben in Prozent relativ zur Basisperiode 1980-2009. Die Untersuchungsperiode ist 2060.

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 52

Die Wirkungen von Preiserhöhungen in einem Land (z.B. Frankreich) auf die Schweiz können durch Preisreduktionen in einem anderen Land (z.B. Deutschland) ausgeglichen werden. Die Kombination von Angebots- und Nachfrageeffekten ergibt die Auswirkungen auf den gesamten Energiemarkt. Diese Analyse ist in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27: Wohlfahrtsänderungen im Schweizer Energiemarkt

	RCP3PD			A1B			A2		
	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.
Wohlfahrtsänderung insgesamt	0.06	0.13	0.19	0.15	0.25	0.34	0.14	0.24	0.34

Anmerkung: Angaben in Prozent relativ zur Basisperiode 1980-2009.

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 53

Der Heizungsbedarf sinkt mit steigenden Temperaturen. Gleichzeitig wird angenommen, dass der Kühlungsbedarf nicht signifikant ansteigt, weil die Verbreitung von Klimaanlage nicht zunehmen wird. Die inländische Energieerzeugung wird nicht signifikant beeinträchtigt von steigenden Temperaturen und der Preis für importierten Strom wird sich auch nicht signifikant verändern. Aus diesen Gründen kommen Vöhringer et al. (2017) zum Schluss, dass es im Schweizer Energiesektor zu einer leichten Wohlfahrtssteigerung kommt.

Extremereignisse

Von den möglichen Extremereignissen werden nur Stürme untersucht. Der Sturm Lothar vom Jahr 1999 wird als Basisereignis verwendet. Es wird angenommen, dass sich die Jährlichkeit eines Sturmes wie Lothar bis 2060 auf 50 Jahre halbiert. Die erwarteten Kosten für den Energiesektor im Jahr 2060 betragen CHF 3.8 Mio. Diese sind in Tabelle 28 dargestellt.

Tabelle 28: Erwartete Kosten im Strombereich eines Extremsturmes in Mio. CHF

Sektor	Kosten
Erwartete Zusatzkosten	Räumungs- und Reparaturarbeiten 3.8

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Vöhringer et al. (2017), OECD, BfS-Teuerungsstatistik

3.1.3 Forzieri et al. (2018): Escalating impacts of climate change on critical infrastructures in Europe

Forzieri et al. (2018) untersuchen die Auswirkungen von Extremereignissen auf Energieinfrastrukturen in Europa (vgl. Tabelle 29). Dabei werden unterschiedliche Extremereignisse und unterschiedliche Energieinfrastrukturen betrachtet. Die technischen Details und die Berechnung der Schweizer Kosten sind in Anhang C.3 aufgeführt.

Tabelle 29: Kurzüberblick zu Forzieri et al. (2018)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen	Energie
Untersuchte Klimaereignisse	Hitzewellen, Kältewellen, Fluss- und Küstenüberflutungen, Dürren, Brände, Windstürme
Untersuchte Effekte	Extremereignisse
Untersuchte Länder	EU+, inklusiv Schweiz
Untersuchte Zeit	2011-2040; 2041-2070; 2071-2100
Verwendete Szenarien	A1B
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Mit Klimamodellen wird die künftige Entwicklung des Klimas abgebildet, exponierte Infrastrukturen werden detailliert erfasst und deren Verletzlichkeit wird dokumentiert. Anhand von zahlreichen Schadensberichten werden die künftigen Schäden, die durch Extremereignisse verursacht werden, geschätzt.

Quelle: Eigene Darstellung

Mittels einem Umwandlungssatz (vgl. Anhang C.3) werden die Schweizer Kosten pro Infrastruktur geschätzt. Diese sind in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30: Erhöhung der jährlichen Kosten je Art der Energieinfrastruktur in Mio. CHF

Infrastruktur	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Kernkraftwerke	6.40	17.75	34.04
Biomasse- und geothermische Kraftwerke	2.65	7.43	14.24
Wasserkraftwerke	7.05	21.90	41.92
Photovoltaikanlagen	0.00	0.00	0.00
Windkraftwerken	-0.32	-0.32	-0.07
Stromverteilungsnetz	-8.86	-8.62	-1.36
Gasleitungen	-0.13	-0.04	0.00
Total	6.78	38.11	88.77

Anmerkung: Berechnet mit dem durchschnittlichen 2010 CHF/EUR Wechselkurs und mit BfS-Teuerungsstatistiken. Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Aufgrund von Rundungen ist es möglich, dass das Total nicht der Summe entspricht.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Forzieri et al. (2018), EZB, BfS-Teuerungsstatistik

Gemäss diesen Resultaten tragen Kern- und Wasserkraftwerke die höchsten Kosten als Folge von Extremereignissen. Allerdings ist zu bedenken, dass in der Schweiz der Atomausstieg geplant ist und dass sich die Auswirkungen auf die Kernkraftwerke deshalb mittelfristig nicht mehr realisieren.

3.2 Thermoelektrische Energie

Thermoelektrische Kraftwerke (in der Schweiz die Kernkraftwerke) zeichnen sich dadurch aus, dass sie für die Kühlung Wasser brauchen. Mit steigenden Temperaturen erhöht sich die Verdunstung und die Wassertemperatur steigt. Aufgrund reduzierter oder unregelmässiger Niederschlagsmengen sinkt der Wasserpegel. Dies hat zur Folge, dass die thermoelektrischen Kraftwerke weniger gekühlt werden können. Aus Sicherheitsgründen muss die Produktion der Kraftwerke gedrosselt werden, was Umsatzverluste für die Kraftwerke verursacht. Tabelle 31 gibt einen Überblick über die verwendete Literatur und die untersuchten Effekte.

Tabelle 31: Thermoelektrische Energie – Überblick

Autoren	Schäden durch Extremereignisse	Nachfrageeffekte	Betriebsleistungseffekte	Vermeidungs- bzw. Anpassungseffekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte
Golombek et al.		✓	✓		✓
Van Vliet et al.			✓		

Quelle: Eigene Darstellung

Diese Auswirkungen von steigenden Temperaturen und verändertem Niederschlag werden im Papier von Golombek et al. (2012) «Climate change: Impacts on electricity markets in Western Europe» und in der Studie von Van Vliet et al. (2012) «Vulnerability of US and European electricity supply to climate change» untersucht.

3.2.1 Golombek et al. (2012): Climate Change: Impacts on electricity markets in Western Europe

Golombek et. al (2012) untersuchen die Auswirkungen des Klimawandels auf den Energiemarkt (vgl. Tabelle 32). Es werden sowohl Nachfrage wie auch Angebot analysiert.

Tabelle 32: Kurzüberblick zu Golombek et al. (2012)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen bzw. Klimaänderungen	Thermoelektrische Kraftwerke, Wasserkraftwerke
Untersuchte Klimaereignisse	Temperaturerhöhungen, Niederschlagsänderungen
Untersuchte Effekte	Nachfrageeffekte, Leistungseffekte, Preiseffekte
Untersuchte Länder	Europa, inklusiv Schweiz
Untersuchte Zeit	Klima: 2070-2099; ökonomische Struktur 2030
Verwendete Szenarien	A1B
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Es werden drei Effekte des Klimawandels auf Energieinfrastrukturen analysiert: Nachfrageeffekt, «Inflow»-Effekt und Carnot-Effekt. Es wird ein Klimamodell und ein hydrologisches Modell verwendet, um Temperatur- und Niederschlagsentwicklungen herzuleiten. Für den Nachfrageeffekt wird der Heizungs- und Kühlungsbedarf geschätzt und gestützt darauf die Energienachfrage hergeleitet. Für den Inflow-Effekt wird die Abflussmenge geschätzt und daraus abgeleitet, wie sich die Leistung von Kernkraftwerken entwickeln wird. Für den Carnot-Effekt wird die Wassertemperatur geschätzt und gestützt darauf vorhergesagt ob es aufgrund des warmen Kühlwassers zu Kühlungsineffizienzen kommt.

Quelle: Eigene Darstellung

Es werden drei Effekte untersucht:

- Der **Nachfrageeffekt** führt dazu, dass einerseits die Energienachfrage im Winter für Heizwärme sinkt, während im Sommer die Nachfrage nach Energie für Kühlung steigt. Diese entgegengerichteten Tendenzen werden sich in der Schweiz mehrheitlich ausgleichen, so dass die Auswirkungen auf die Nachfrage klein sein werden.
- Der **Inflow Effekt** drückt aus, dass bei weniger regelmässigen Niederschlägen Wasserkraftwerke weniger Energie erzeugen können, weil sie weniger Wasser zur Verfügung haben.
- Der **Carnot-Effekt** beschreibt den negativen Zusammenhang zwischen Wassertemperatur und thermoelektrischer Kraftwerkleistung (von Kraftwerken, welche mit Wasser gekühlt werden müssen). Je höher die Wassertemperatur, desto weniger kann das Wasser als Kühlung für Kraftwerke verwendet werden, und desto stärker muss die Leistung der Kraftwerke reduziert werden.

Die Auswirkungen dieser drei Effekte auf die inländische Nachfrage, die Produktion und den Preis von Strom sind in Tabelle 33 zusammengefasst.

Tabelle 33: Auswirkungen nach Effekt auf Schweizer Strommarkt (2030/2070-2099)

Effekt	Inl. Nachfrage TWh	Produktion TWh	Preis (USD/MWh)	Umsatz Mio. CHF
Basisszenario	93	98	80.20	8'229
Nachfrageeffekt	92	96	79.90	8'031
Inflow Effekt	93	98	80.50	8'259
Carnot Effekt	93	97	81.40	8'267
Insgesamt im Klimaszenario	91	96	82.00	8'242

Anmerkung: Als Basisperiode wird das Jahr 2000 verwendet. Bewertung des Umsatzes zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Golombek et. al (2012), online Anhang, S. 2; BfS-Teuerungsstatistik, Wechselkurs von ofx.com

Die jährliche Stromproduktion ist im Jahr 2030 mit dem prognostizierten Klima von 2070-2099 unter Berücksichtigung aller Effekte um 2 TWh geringer als im Basisszenario ohne Klimawandel, der Preis steigt um 1.80 USD/MWh. Bewertet zum Preisniveau von 2018 ergibt sich ein Umsatzwachstum von CHF 13 Mio.; bei einem konstanten Preis von CHF 80.20 resultiert ein Umsatzverlust von CHF 168 Mio.

3.2.2 Van Vliet et al. (2012): Vulnerability of US and European electricity supply to climate change

Van Vliet et. al (2012) untersuchen die Auswirkungen von steigenden Temperaturen auf die Erzeugungskraft von thermoelektrischen Kraftwerken (Tabelle 34). Steigende Temperaturen haben einen Einfluss auf die Leistung von thermoelektrischen Kraftwerken, weil die Kühlung weniger effizient wird und die Leistung aus Sicherheitsgründen gedrosselt werden muss.

Tabelle 34: Kurzüberblick zu Van Vliet et al. (2012)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen bzw. Klimaänderungen	Thermoelektrische Kraftwerke
Untersuchte Klimaereignisse	Temperaturerhöhungen
Untersuchte Effekte	Leistungseffekte
Untersuchte Länder	Europa und USA
Untersuchte Zeit	2031-2060
Verwendete Szenarien	A2
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Basierend auf einem GCM-Klimamodell werden tägliche Flussströmungen und Wassertemperaturen in Europa und den USA geschätzt. Untersucht wird, wie häufig die Wassertemperatur einen Schwellenwert überschreitet. Basierend auf diesen Untersuchungen wird abgeschätzt, wie die Leistung der thermoelektrischen Kraftwerke beeinflusst wird. Daraus wird die klimaverursachte Leistungsabnahme im Sommer in Europa und in den USA gemessen.

Quelle: Eigene Darstellung

In der Schweiz sind die vier Kernkraftwerke Beznau, Leibstadt, Gösgen und Mühleberg betroffen. Es wird erwartet, dass Beznau und Gösgen im Durchschnitt eine Leistungsreduktion um 0 bis 1 Prozent hinnehmen müssen; Leibstadt muss eine Reduktion um 1 bis 5 Prozent hinnehmen und Mühleberg wird mit 10 bis 20 Prozent Leistungsreduktion am stärksten betroffen sein.⁹

Basierend auf diesen Angaben und mit eigenen Berechnungen zu Preisen und Leistung der Kernkraftwerke wird die durchschnittliche Leistungsreduktion und der durchschnittliche Umsatzverlust der Kernkraftwerke in der Untersuchungsperiode (2031-2060) gegenüber der Basisperiode (2000) in der Schweiz berechnet. Die Resultate zeigen, dass der Rückgang des jährlichen Umsatzes bis zu CHF 77 Mio. beträgt (vgl. Tabelle 35).

⁹ Zu beachten ist allerdings, dass Mühleberg bis Ende 2019 abgeschaltet wird und sich die prognostizierten Auswirkungen deshalb nicht mehr realisieren werden.

Tabelle 35: Umsatzrückgang bei Kernkraftwerken 2031-2060

Szenario	Bruttoerzeugung (MWh)	Preis pro MWh (CHF)	Umsatzrückgang (Mio. CHF)
Keine Einbusse	26'322'725	60.00	-
Durchschnittliche Einbusse	25'533'904	60.00	51
Maximale Einbusse	25'131'181	60.00	77

Quellen: Eigene Berechnungen, gestützt auf van Vliet et al. (2012), BfS Elektrizitätserzeugung; BFE Energie Ein- und Ausfuhr

3.3 Wasserkraft

Die Wasserkraft ist die wichtigste inländische Energiequelle der Schweiz. Gemäss Angaben des SWW (Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband) wird rund 56 Prozent des Schweizer Strombedarfs mit Wasserkraftwerken gedeckt.¹⁰ Dabei ist einerseits wesentlich wie viel Wasser (durch Niederschlag oder Gletscherschmelze) zur Verfügung steht, andererseits wie viel durch Verdunstung verloren geht. Deshalb sind Niederschlags- und Temperaturentwicklungen zentral zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkraftwerke in der Schweiz. Die Tabelle 36 gibt ein Überblick über die bestehende Literatur und die untersuchten Effekte.

Tabelle 36: Wasserkraft – Überblick

Autoren	Schäden durch Extremereignisse	Nachfrageeffekte	Betriebsleistungseffekte	Vermeidungs- bzw. Anpassungseffekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte
SGHL und CHy (2011)			✓		
Hamududu und Killingtveit (2012)			✓		
Guardard et al. (2014)			✓		

Quelle: Eigene Darstellung

Die wichtigsten Beiträge stammen von SGHL und CHy (2011) mit ihrem Bericht «Auswirkung der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung», von Hamududu und Killingtveit (2012) mit der Studie «Assessing climate change impacts on global hydropower» und von Guardard et al. (2014) mit ihrem Papier «Climate change impacts on hydropower in Swiss and Italian Alps».

Die verschiedenen Quellen unterscheiden sich vor allem in der Zahl der untersuchten Wasserkraftwerke. Guardard et al. (2014) untersuchen nur ein Schweizer Kraftwerk (Mattmark); SGHL und CHy (2011) untersuchen 5 Kraftwerke und Hamududu und Killingtveit (2012) decken mit ihrer Analyse die gesamte Schweiz ab.

3.3.1 Guardard et al. (2014): Climate change impacts on hydropower in Swiss and Italian Alps

Guardard et al. (2014) untersuchen die Auswirkung des Klimawandels, insbesondere die steigenden Temperaturen und veränderten Niederschlagsmengen, auf die Stromproduktion der Kraftwerke Mattmark (vgl. die Tabelle 37). Die steigenden Temperaturen erhöhen einerseits die Verdunstung, andererseits beschleunigen sie das Schmelzen der Gletscher. Die Kraftwerke

¹⁰ <https://www.swv.ch/fachinformationen/wasserkraft-schweiz/>

Mattmark werden von beiden dieser Effekte negativ beeinflusst. In Bezug auf die Niederschlagsentwicklung wird erwartet, dass diese in der Schweiz saisonaler werden d.h. es gibt mehr Niederschläge im Winter und weniger im Sommer. Als Folge davon wird auch die Stromproduktion von grösserer Saisonalität geprägt sein.

Tabelle 37: Kurzüberblick zu Guardard et al. (2014)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen bzw. Klimaänderungen	Wasserkraftwerke
Untersuchte Klimaereignisse	Temperaturerhöhungen, Niederschlagsänderungen
Untersuchte Effekte	Leistungseffekte
Untersuchte Länder	Spezifische Wasserkraftwerke in Italien und der Schweiz.
Untersuchte Zeit	2011-2040; 2041-2070; 2071-2099
Verwendete Szenarien	A1B
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Mit Klimamodellen werden künftige Niederschlagsmengen und Temperaturen geschätzt. Darauf basierend werden Abflussmengen prognostiziert. Die Entwicklung der Abflussmengen wird verwendet, um die künftige Produktion von Wasserkraftwerken vorherzusagen. Die Temperaturentwicklung wird ebenfalls verwendet, um die künftige Stromnachfrage für Temperaturregulierung vorherzusagen.

Quelle: Eigene Darstellung

Gegenüber der Basisperiode 1991-2010 wird im Jahr 2050 erwartet, dass die Abflussmenge um 21 Prozent sinkt. Dies führt dazu, dass pro Jahr durchschnittlich 135 GWh, maximal 150 GWh an Produktionsverlusten zu verzeichnen sein wird. Die Resultate sind in Tabelle 38 dargestellt.

Tabelle 38: Umsatzrückgänge der Wasserkraftwerke Mattmark auf Jahresbasis

Wasserkraftwerke Mattmark	
Durchschnittliche Produktion Basisperiode (GWh)	649
Durchschnittlicher Umsatz Basisperiode (Mio. CHF)	39
Umsatzverlust bei 135 GWh Produktionsverlust (Mio. CHF)	6
Relativer Umsatzrückgang	-16%
Umsatzverlust bei 150 GWh Produktionsverlust (Mio. CHF)	7
Relativer Umsatzrückgang	-18%

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Guardard et al. (2014)

Bis 2050 ist ein Umsatzrückgang zwischen CHF 6 und 7 Mio. pro Jahr zu erwarten.

3.3.2 SGHL und CHy (2011): Auswirkung der Klimaänderung auf die Wasserkraft

SGHL und CHy (2011) analysieren den Effekt des Klimawandels auf fünf Wasserkraftwerke in der Schweiz (vgl. Tabelle 39).

Tabelle 39: Kurzüberblick zu SGHL und CHy (2011)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen bzw. Klimaänderungen	Wasserkraftwerke
Untersuchte Klimaereignisse	Temperaturerhöhungen, Niederschlagsänderungen
Untersuchte Effekte	Leistungseffekte
Untersuchte Länder	Schweiz mit Fallstudien für die grössten Wasserkraftwerken
Untersuchte Zeit	2021-2050; 2070-2099
Verwendete Szenarien	A1B
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Basierend auf dem A1B Klimaszenario werden ein Klimamodell, ein hydrologisches Modell und ein Gletschermodell aufgestellt. Diese bilden Niederschläge, Wasserzyklen und Gletscherschmelze ab. Mit diesen Modellen wird für jedes Kraftwerk geschätzt, wie sich die verfügbare Wassermenge und Produktion in Zukunft entwickeln wird.

Quelle: Eigene Darstellung

Die Ergebnisse sind sehr heterogen. Gewisse Wasserkraftwerke werden zumindest in der kürzeren Frist aufgrund höherer Schmelzwasserzuflussmengen eine gesteigerte Produktion aufweisen; andere werden aufgrund der veränderten Saisonalität der Niederschläge vor allem im Sommer Produktionseinbussen hinnehmen müssen. Die Effekte auf die untersuchten Wasserkraftwerke, ausgedrückt als jährlicher Umsatzverlust im Durchschnitt über die jeweilige Periode, sind in Tabelle 40 dargestellt.

Tabelle 40: Jährliche Umsatzverluste von Wasserkraftwerken in Mio. CHF

Kraftwerk	Basisperiode	2021-2050	2071-2099
Mattmark	1980-2009	-0.93	-2.52
Prättigau	1976-2005	1.55	0.30
Löntschi	1998-2009	0.20	0.04
Göschenen	1980-2009	1.98	1.78
Oberhasli (Durchschnitt)	1980-2009	-5.80	-11.2
Total		-3.00	-23.07

Anmerkung: Im Bericht werden für die Kraftwerke Prättigau und Löntschi nur Resultate für die Periode 2071-2099 präsentiert. Damit eine Berechnung vorgenommen werden kann, werden die Resultate aus der Periode 2021-2050 um 92 Prozent reduziert. Dies entspricht der durchschnittlichen Veränderung der anderen Kraftwerke zwischen der ersten Periode und der zweiten.

Die Resultate der Oberhasli AG Kraftwerke sind als Mittelwert zwischen Situation mit und ohne Kraftwerkausbau berechnet.

Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Eigene Berechnungen, gestützt auf SGHL und CHy (2011) und BfS-Teuerungsstatistiken

Die Auswirkungen des Klimawandels werden bis 2050 vernachlässigbar sein; in der Periode 2071-2099 ist jedoch mit grösseren Umsatzverlusten zu rechnen. Geeignete Anpassungsmassnahmen müssten die Effizienz von Wasserkraftwerken steigern, sodass mit weniger Wasser gleich viel Strom produziert werden kann; oder es müsste eine sichere Wasserquelle etabliert werden, damit Wasserkraftwerke weniger auf Gletscherzufluss angewiesen sind.

Gemäss SGHL und CHy (2011) lassen sich die Resultate für spezifische Wasserkraftwerke nicht oder nur bedingt auf andere Wasserkraftwerke übertragen. Es können deshalb keine Aussagen zur gesamten Wasserkraftindustrie der Schweiz gemacht werden.

3.3.3 Hamududu und Killingtveit (2012): Assessing climate change impacts on global hydro-power

Hamududu und Killingtveit (2012) untersuchen ebenfalls die Auswirkungen des Klimawandels auf die Stromerzeugung durch Wasserkraftwerke (vgl. Tabelle 41). Dafür werden Temperatur- und Niederschlagsentwicklungen berücksichtigt. Diese Klimafaktoren haben einen entscheidenden Einfluss auf die Abflussmengen und damit die Stromerzeugung.

Tabelle 41: Kurzüberblick zu Hamududu und Killingtveit (2012)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen bzw. Klimaänderungen	Wasserkraftwerke
Untersuchte Klimaereignisse	Temperaturerhöhungen, Niederschlagsänderungen
Untersuchte Effekte	Leistungseffekte
Untersuchte Länder	Weltweit, kontinental zusammengefasst
Untersuchte Zeit	2050
Verwendete Szenarien	A1B
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Basierend auf Klimamodellen werden Änderungen von Abflussmengen geschätzt. Mittels Regressionsanalyse wird sodann die künftige Wasserverfügbarkeit eruiert. Die Veränderungen in der Wasserverfügbarkeit werden wiederum verwendet, um die Änderungen in der Wasserkraftenergieerzeugung in Zukunft zu schätzen.

Quelle: Eigene Darstellung

In der Schweiz wird im Jahr 2050 gegenüber 2005 eine Reduktion im Umfang von 1.28 Prozent der Stromerzeugung erwartet. Das bedeutet eine Reduktion um 419 GWh pro Jahr. Dies entspricht etwa einem Umsatzrückgang von CHF 26 Mio. Die technischen Angaben und detaillierte Berechnungen des Berichtes sind in Anhang C.7 dargestellt.

3.4 Zusammenfassung und Zwischenfazit

Sowohl Kernkraftwerke wie auch Wasserkraftwerke sind in der Literatur zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Schweizer Infrastrukturen gut repräsentiert. Insbesondere die Nachfrageseite des Energiemarktes wird öfters thematisiert, weil steigende Temperaturen die Nachfrage nach Heizwärme und Kühlung verändern.

Müller et al. (2007) fokussieren auf den Schweizer Energiemarkt. Mithilfe eines Modells des allgemeinen volkswirtschaftlichen Gleichgewichts analysieren sie einerseits die Auswirkungen der steigenden Temperaturen auf die Energienachfrage für Kühlung und Heizung; andererseits quantifizieren sie die Ersatzkosten für Strom, die sich ergeben, wenn Wasserkraftwerke aufgrund abnehmender Wassermengen weniger produzieren können. Diese betragen bis 2100 CHF 1'970 Mio. pro Jahr.

Vöhringer et al. (2017) untersuchen ebenfalls den Schweizer Energiemarkt. Sie treffen jedoch die Annahme, dass (a) der inländische Strommarkt nicht gross beeinflusst wird durch den Klimawandel und (b) die Verbreitung von Klimaanlage in Schweizer Haushalte auch in Zukunft nicht signifikant zunehmen wird. Mit der zweiten Annahme unterscheiden sich Vöhringer et al. (2017) von Müller et al. (2007). Sie kommen zum Schluss, dass die Wohlfahrtseffekte im Schweizer Energiemarkt bis 2060 marginal sind. Es wird eine Wohlfahrtserhöhung (Erhöhung der Konsummöglichkeiten) zwischen 0.06 Prozent bis 0.34 Prozent erwartet, verglichen mit der Basisperiode 1980-2009, die auf die reduzierten Ausgaben für Heizung zurückzuführen ist.

Vöhringer et al. (2017) untersuchen zusätzlich die erwarteten Kosten eines Extremsturmes im Jahr 2060 und quantifizieren diese Schäden auf CHF 3.80 Mio.

Forzieri et al. (2018) fokussieren ihre Analyse ebenfalls auf Extremereignisse. Gemäss ihren Berechnungen erhöhen sich die jährlichen Kosten von Extremereignissen 2071-2100 (verglichen mit den 2000er Jahren als Basis) für Energieinfrastruktur um CHF 89 Mio., wovon CHF 34 Mio. auf Kernkraft- und CHF 42 Mio. auf Wasserkraftwerke entfallen.

Golombek et al. (2012) untersuchen Kernkraftwerke. Insbesondere drei Effekte werden analysiert: Der Nachfrageeffekt beschreibt die bereits erwähnte Tatsache, dass sich die Nachfrage nach elektrischer Energie aufgrund von steigenden Temperaturen verändern wird. Durch den Inflow Effekt senken wärmere Temperaturen und unregelmässige Niederschläge die Wasserpegel senken, sodass Kernkraftwerke weniger Wasser für Kühlung zur Verfügung haben. Der Carnot-Effekt ist der negative Zusammenhang zwischen Wassertemperatur und Kraftwerkeffizienz, der sich ergibt, weil das Wasser weniger stark kühlt. Für den Schweizer Markt erwarten die Autoren keine grossen Auswirkungen dieser Effekte. Sowohl Nachfrage wie auch Produktion sinken, der Preis steigt voraussichtlich jedoch etwas. Es ist unsicher, wie sich die Energieausgaben der Konsumenten und damit die Einnahmen der Produzenten verändern werden. Es wird allerdings nicht berücksichtigt, dass der Atomausstieg der Schweiz geplant ist.

Van Vliet et al. fokussieren ihre Analyse ebenfalls auf Kernkraftwerke. Dabei werden die Effekte der steigenden Wassertemperatur auf die Effizienz der Kraftwerke untersucht (Carnot-Effekt). Ihre Berechnungen zeigen, dass – verglichen mit der Basisperiode 2000 – die Umsatzrückgänge auf Jahresbasis bis 2060 zwischen CHF 121 und 183 Mio. betragen werden. Es wird allerdings auch in diesem Fall nicht berücksichtigt, dass in der Schweiz der Atomausstieg geplant ist.

Guardard et al. richten ihren Fokus auf die Wasserkraftwerke Mattmark. Sie kommen zum Schluss, dass die reduzierten Abflussmengen aufgrund höherer Temperaturen, die eine höhere Verdunstung und schnelleres Schmelzen der Gletscher verursachen, verglichen mit der Basisperiode 1991-2010, bis 2050 einen Umsatzrückgang von insgesamt CHF 20 bis 23 Mio. bringen.

SGHL und CHy (2011) untersuchen mehrere Schweizer Wasserkraftwerke und analysieren ebenfalls die Auswirkungen von steigenden Temperaturen. Das Fazit ist einerseits, dass die Auswirkungen je nach Wasserkraftwerk sehr unterschiedlich ausfallen können; andererseits, dass die grössten Verluste ab 2050 realisiert werden.

Hamududu und Killingtveit (2012) untersuchen die gesamte Wasserkrafterzeugung in der Schweiz und kommen zum Schluss, dass bis 2050, verglichen mit 2005, aufgrund höherer Temperaturen und unregelmässigerer Niederschläge die Umsatzrückgänge bei etwa CHF 58 Mio. liegen.

Wiederum streuen die Ergebnisse der diskutierten Studien stark. Die Studien nehmen unterschiedliche Klimaszenarien an, die eine Entwicklung in der Klimamodellierung aufzeigen und die unterschiedlichen Resultate teilweise erklären. Müller et al. (2007) gehen von älteren Emissionsszenarien aus und weisen die Auswirkungen von Extremereignissen primär qualitativ aus. Vöhringer et al. (2017) sowie Forzieri et al. (2018) basieren auf dem Emissionsszenario A1B und machen auch quantitative Aussagen zu einigen Extremereignissen.

Wie bei den Transportinfrastrukturen sind die Ergebnisse der verschiedenen Studien im Energiebereich nur schwer zu vergleichen. Die erwarteten Auswirkungen des Klimawandels auf die Energienachfrage hängen stark von den Annahmen darüber ab, ob der Temperaturanstieg im Sommer eine vermehrte Raumkühlung notwendig macht.

Zur Quantifizierung sämtlicher volkswirtschaftlicher Auswirkungen sind breiter angelegte Studien notwendig; zielgerichtete Massnahmen zur Vermeidung oder Bewältigung von klimabedingten Ereignissen und Schäden im Energiebereich erfordern detailliertere Grundlagenarbeiten zu konkreten Infrastrukturanlagen und den Dienstleistungen, die sie bereitstellen.

4 Wasser

Die Wasserversorgung in der Schweiz ist essenziell für Haushalte, Industrie und die Landwirtschaft. Mit wärmeren Temperaturen und unregelmässigeren Niederschlägen kann diese in Schwierigkeiten geraten, weil die Nachfrage bei höheren Temperaturen steigt, während das Angebot sinkt. Wärmere Temperaturen können auch Qualitätsprobleme verursachen. Tabelle 42 gibt einen Überblick über die verwendete Literatur und die untersuchten Effekte.

Tabelle 42: Wasser – Überblick

Autoren	Schäden durch Extremereignisse	Nachfrageeffekte	Betriebsleistungseffekte	Vermeidungs- bzw. Anpassungseffekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte
Faust et al. (2012)					✓

Quelle: Eigene Darstellung

Den wichtigsten Beitrag zur Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Wasserversorgung leisten Faust et al. (2012) mit ihrem Aufsatz «The economic impact of climate driven changes in water availability in Switzerland». Sie analysieren die Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserversorgung und Wasserpreise mit Klimamodellen, hydrologischen Modellen und einem allgemeinen Modell des allgemeinen volkswirtschaftlichen Gleichgewichts (vgl. Tabelle 43). Untersucht werden Preis- und Wohlfahrtseffekte.

Tabelle 43: Kurzüberblick zu Faust et al. (2012)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen bzw. Klimaänderungen	Wasserversorgung
Untersuchte Klimaereignisse	Niederschlagsänderung, Temperaturänderung
Untersuchte Effekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte
Untersuchte Länder	Schweiz
Untersuchte Zeit	2050
Verwendete Szenarien	A1B
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Die Wasserverfügbarkeit im Jahr 2050 wird mit Klima- und hydrologischen Modellen geschätzt und mit der Basisperiode 1980-2009 verglichen. Mit einem Modell des allgemeinen Gleichgewichts wird der Preis des Wassers berechnet. Daraus werden Wohlfahrtseffekte berechnet.

Quelle: Eigene Darstellung

Im Durchschnitt wird künftig mit einer Zunahme der jährlichen Wasserverfügbarkeit gerechnet. Im Sommer wird jedoch die Wasserverfügbarkeit abnehmen; im Durchschnitt um 7.2 Prozent. Es werden 14 Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Substituierbarkeit von Wasser durch andere Güter und des Rückgangs in der Wasserverfügbarkeit berechnet. Im Worst Case Szenario resultiert im Jahr 2050 ein Wohlfahrtsverlust von CHF 214 Mio. Dieses Szenario wird berechnet mit einer Reduktion der Wasserverfügbarkeit um 20 Prozent, ein Ergebnis, das allerdings weit über den anderen Modellierungsergebnissen liegt. Ohne diesen Ausreisser liegt der durchschnittliche Wohlfahrtsverlust (gemessen in Konsummöglichkeiten) bei CHF 37.7 Mio. oder 0.004 Prozent gegenüber der Basisperiode 1980-2009.

Anpassungsmassnahmen müssten vor allem im Sommer eingesetzt werden, um temporäre Phasen der Wasserknappheit überwinden zu können. Ein Überblick über alle Szenarien, Berechnungen und Annahmen des Berichts findet sich in Anhang D.1.

5 Restliche Infrastrukturen

«Restliche Infrastrukturen» sind solche, die nicht in die Hauptkategorien Transport, Energie oder Wasser fallen. Es handelt sich zum Beispiel um Berginfrastrukturen (z.B. Seilbahnstationen), welche von schmelzendem Permafrost betroffen sind, oder Tourismusinfrastrukturen, die mit steigenden Temperaturen weniger Schneesicherheit haben. Ebenfalls betroffen sind soziale Infrastrukturen und Industrieinfrastrukturen. Tabelle 46 gibt einen Überblick über die Literatur und die untersuchten Effekte.

Tabelle 44: Restliche Infrastrukturen – Überblick

Autoren	Schäden durch Extremereignisse	Nachfrageeffekte	Betriebsleistungseffekte	Vermeidungs- bzw. Anpassungseffekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte
Müller et al. (2007)	✓	✓	✓		✓
Forzieri et al. (2018)	✓				
Vöhringer et al. (2017)		✓	✓		✓

Quelle: Eigene Darstellung

Wichtige Beiträge zu den Auswirkungen des Klimawandels auf diese Infrastrukturen leisten Müller et al. (2007) mit ihrem Bericht «Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse), Forzieri et al. (2018) mit der Studie «Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe» und Vöhringer et al. (2017) mit ihrem Report «Assessing the impact of climate change on Switzerland».

Diese Werke werden nachfolgend vorgestellt, wobei Müller et al. (2007) zweigeteilt präsentiert wird: In einem ersten Teil wird ihre Analyse von Extremereignissen, insbesondere Hochwasser, Murgängen und Geschiebe erläutert, in einem zweiten Teil ihre Analyse des schleichenden Klimawandels und dessen Auswirkungen auf den alpinen Tourismus.

Müller et al. (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse)

Müller et al. (2007) untersuchen den Einfluss von Klimawandel auf die erwarteten Schäden von Hochwasser, Murgängen und Geschiebe im Jahr 2050, verglichen mit 2005 (vgl. Tabelle 45).

Tabelle 45: Kurzüberblick zu Müller et al. (2007)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen bzw. Klimaänderungen	Allgemeine Infrastrukturen
Untersuchte Klimaereignisse	Hochwasser, Murgänge, Geschiebe
Untersuchte Effekte	Extremereignisse
Untersuchte Länder	Schweiz
Untersuchte Zeit	2050
Verwendete Szenarien	B2
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Anhand eines Basisereignisses werden die Kosten eines Extremereignisses geschätzt. Diese werden unter Berücksichtigung des Wirtschaftswachstums und der Eintrittswahrscheinlichkeit zu den erwarteten Kosten eines analogen Ereignisses in der Zukunft hochgerechnet.

Quelle: Eigene Darstellung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf diese Ereignisse sind unsicher. Es handelt sich bei der Quantifizierung um Schätzungen, die zum Teil auf starken Annahmen beruhen.

Basierend auf dem Hochwasserereignis von Mai 1999 wird eine Kostenschätzung für das Jahr 2050 gemacht. Es werden mit zusätzlichen Kosten infolge Hochwasser in einer Bandbreite von CHF 16.2 bis 73.4 Mio. oder 0.0023-0.0064 Prozent des BIP im Jahr 2050 gerechnet.

Obwohl Murgänge öfters mit der Permafrost-Schmelze in Verbindung gesetzt werden, entstehen diese oftmals nicht in Gebieten mit Permafrost oder sie entstehen unabhängig von der Klimaentwicklung in den dortigen Gebieten. Es ist deshalb schwierig, Murgänge in Verbindung mit Permafrost oder Klimawandel zu setzen. Die Murgänge, die in Gebieten mit Permafrost entstehen, werden erwartungsgemäss nicht häufiger auftreten, aber sie werden in Zukunft mehr Material mit sich tragen. Dies wird eine Erhöhung der Schäden an Infrastrukturen verursachen.

Basierend auf vergangenen Murgängen wird eine Bandbreite der Kosten geschätzt. Die untere Grenze ist dabei, dass es keine zusätzlichen Kosten gibt; die obere Grenze ist, dass sich die Kosten verdreifachen. Diese Schätzung resultiert in erwarteten Kosten von maximal CHF 63.0 Mio. oder 0.0066 Prozent des BIP im Jahr 2050.

Das Auftauen des Permafrostes führt auch zu grösserem Geschiebeaufkommen. Es gibt eine Verzögerung zwischen dem Schmelzen des Permafrostes und Geschiebeaufkommen von einigen Monaten bis mehrere Jahre. Aufgrund dieser Unsicherheit wird die Annahme gemacht, dass Geschiebe zwei Drittel der Kosten der Murgänge verursachen. Es wird allerdings kein Versuch einer detaillierteren Quantifizierung unternommen. Die geschätzten Kosten werden auf maximal CHF 42.0 Mio. oder 0.0044 Prozent des BIP im Jahr 2050 beziffert. Die Resultate sind in Tabelle 46 dargestellt.

Tabelle 46: Kosten von Extremereignissen in Prozent des erwarteten BIP

	Minimum	Maximum
Hochwasser	0.0023	0.0064
Geschiebe	0.0000	0.0044
Murgänge	0.0000	0.0066
Summe	0.0023	0.0174

Quelle: Müller et al. (2007), S. 107

Die Obergrenze bei den Murgängen und der Geschiebe werden mit einem «Worst-Case» Szenario berechnet, das auf Annahmen von Müller et al. (2007) und nicht auf Klimamodellen beruht. Insgesamt wird maximal eine durch den Klimawandel verursachte Kostenerhöhung von CHF 178.4 Mio. oder 0.0174 Prozent des BIP im Jahr 2050 geschätzt. Eine wichtige Beobachtung des Berichtes ist die Tatsache, dass geeignete Anpassungsmassnahmen eine wichtige Rolle spielen, die Kosten zu senken. Geeignete Anpassungsmassnahmen können die Kosten um 45 bis 70 Prozent senken.

Ein Kurzüberblick der Analyse von Müller et al. (2007) bezüglich des schleichenden Klimawandels und dessen Auswirkungen auf den alpinen Wintertourismus ist in Tabelle 47 dargestellt.

Tabelle 47: Kurzüberblick zu Müller et al. (2007)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen	Alpiner Tourismus
Untersuchte Klimaereignisse	Temperaturerhöhungen
Untersuchte Effekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte
Untersuchte Länder	Schweiz
Untersuchte Zeit	2030, 2050, 2070, 2100
Verwendete Szenarien	A2 und B2
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Es wird ein Gleichgewichtsmodell verwendet, um die Auswirkungen der steigenden Temperaturen auf den alpinen Tourismus zu analysieren. Das Modell untersucht den direkten Zusammenhang zwischen steigenden Temperaturen und alpinem Tourismus sowie die Nebeneffekte der veränderten Produzenten- und Konsumentenrenten. Basierend auf den Resultaten wird abgeschätzt, wie sich die Wohlfahrt entwickelt.

Quelle: Eigene Darstellung

Der Bericht untersucht den Einfluss der Temperaturerhöhung auf den Wintertourismus in der Schweiz. Mit einem Gleichgewichtsmodell wird der Tourismussektor abgebildet und es wird abgeschätzt, wie hoch die Wohlfahrtseinbussen als Folge von steigenden Temperaturen und weniger Schnee sind.

Die Resultate zeigen, dass bei einer Temperaturerhöhung unter 2°C (gegenüber 1990) nicht mit grossen Wohlfahrtsverlusten zu rechnen ist, da die hochgelegenen Skigebiete der Schweiz noch schneesicher sind und im internationalen Vergleich eine starke Wettbewerbsposition geniessen. Ab einer Temperaturerhöhung von 2°C werden die Wohlfahrtsverluste deutlich grösser, da der schneeabhängige Wintertourismus zunehmend durch Fernreisen ausserhalb der Schweiz substituiert wird. Die Wohlfahrtsverluste betragen im Jahr 2030 0.01 Prozent des BIP (ca. CHF 62 Mio.) und diese steigen bis 2100 auf 0.1 Prozent des prognostizierten BIP (ca. CHF 1'158 Mio.).¹¹ Die Resultate sind in Tabelle 48 zusammengefasst.

¹¹ Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Tabelle 48: Wohlfahrtsverluste im Wintertourismus der Schweiz

	2030	2050	2070	2100
Temperaturerhöhung °C	1.00	1.80	2.60	3.70
Wohlfahrtsänderung in BIP%	0.01%	0.03%	0.08%	0.10%
Kosten (Mio. CHF)	62.19	179.38	607.29	1158.37

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 85; BfS-Teuerungsstatistik

Forzieri et al. (2018): Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe

Forzieri et al. (2018) untersuchen die Auswirkungen von Extremereignissen auf Industrieinfrastrukturen und soziale Infrastrukturen (vgl. Tabelle 49).

Tabelle 49: Kurzüberblick zu Forzieri et al. (2018)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen	Industrie, soziale Infrastrukturen
Untersuchte Klimaereignisse	Hitzewellen, Kältewellen, Fluss- und Küstenüberflutungen, Dürren, Brände, Windstürme
Untersuchte Effekte	Extremereignisse
Untersuchte Länder	EU+, inklusiv Schweiz
Untersuchte Zeit	2011-2040; 2041-2070; 2071-2100
Verwendete Szenarien	A1B
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Mit Klimamodellen wird die künftige Entwicklung des Klimas abgebildet, exponierte Infrastrukturen werden detailliert erfasst und deren Verletzlichkeit wird dokumentiert. Anhand von zahlreichen Schadensberichten werden die künftigen Schäden, die durch Extremereignisse verursacht werden, geschätzt.

Quelle: Eigene Darstellung

Industrieinfrastrukturen umfassen Infrastrukturen, die in der Wasser- bzw. Abwasser-, Chemie-, Raffinerie-, Mineralien- und Metallindustrie verwendet werden. Soziale Infrastrukturen umfassen hingegen Gesundheitsinfrastrukturen wie beispielweise Spitäler und Bildungsinfrastrukturen. Die auf die Schweiz übertragenen Resultate der Berechnungen von Forzieri et al. (2018), sind in Tabelle 50 und Tabelle 51 dargestellt; die Methodik der Umrechnung wird in Anhang E.3 erläutert.

Tabelle 50: Erhöhung der jährlichen Kosten von Industrieinfrastrukturen in Mio. CHF¹²

Infrastruktur	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Wasser/Abwasser	75.9	234.6	441.8
Chemikalien	-6.3	2.5	20.7
Raffinerien	1.7	13.7	30.7
Mineralien	-0.1	3.9	10.3
Metalle	-3.2	13.5	41.4
Total	68.0	268.1	544.8

Anmerkung: Berechnet mit dem durchschnittlichen 2010 CHF/EUR Wechselkurs und mit BfS-Teuerungsstatistiken. Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Aufgrund von Rundungen ist es möglich, dass das Total nicht der Summe entspricht.

Küstenüberflutungen wurden in der Berechnung nicht berücksichtigt, da diese in der Schweiz nicht vorkommen können.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Forzieri et al. (2018), EZB, BfS-Teuerungsstatistik

Tabelle 51: Erhöhung der jährlichen Kosten von sozialen Infrastrukturen in Mio. CHF

Infrastruktur	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Bildung	-5.8	-3.0	6.3
Gesundheit	-7.1	-2.2	11.5
Total	-12.9	-5.2	17.8

Anmerkung: Berechnet mit dem durchschnittlichen 2010 CHF/EUR Wechselkurs und mit BfS-Teuerungsstatistiken. Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Küstenüberflutungen wurden in der Berechnung nicht berücksichtigt, da diese in der Schweiz nicht vorkommen können.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Forzieri et al. (2018), EZB, BfS-Teuerungsstatistik

Von den analysierten Industrieinfrastrukturen werden Wasser und Abwasseranlagen die höchsten Kosten tragen, während es bei sozialen Infrastrukturen bis 2080 nicht zu einer signifikanten Erhöhung (bzw. sogar zu einer Senkung) der Kosten kommen wird. Diese Resultate zeigen, dass Anpassungsmassnahmen an erster Stelle bei den Wasser- und Abwasseranlagen unternommen werden sollten.

Vöhringer et al. (2017): Assessing the impact of climate change for Switzerland

Vöhringer et al. (2017) berechnen mithilfe eines Gleichgewichtsmodells und einem Tourismusmodell die Wohlfahrtsänderung im Tourismus der Schweiz. Die zentrale Klimavariablen ist dabei die Temperaturentwicklung (vgl. Tabelle 52).

¹² Die Auswirkungen bzgl. Wasser/Abwasser und Raffinerien liessen sich sachlich auch den Kapiteln 4 bzw. 3 zuordnen. Allerdings weisen Forzieri et al. (2018) sie selber den Industrieinfrastrukturen zu. Deshalb werden sie hier ebenfalls in dieser Struktur diskutiert.

Tabelle 52: Kurzüberblick zu Vöhringer et al. (2017)

Kurzüberblick	
Untersuchte Infrastrukturen	Winter und Sommer Tourismus
Untersuchte Klimaereignisse	Steigende Temperaturen
Untersuchte Effekte	Preis-/Wohlfahrtseffekte
Untersuchte Länder	Schweiz
Untersuchte Zeit	2060
Verwendete Szenarien	A1B; RCP3PD
Methode zur Schätzung der künftigen Kosten	Die Temperaturerhöhung wird aus einem Klimamodell hergeleitet; daraus wird die Entwicklung der Schneefallgrenze berechnet. Der Wintertourismus wird mit einem Modell des allgemeinen Gleichgewichts abgebildet. Basierend auf Entwicklungen der Temperatur und der Schneefallgrenze und auf Annahmen zu Substitutionselastizitäten wird die Entwicklung des Wintertourismus berechnet. Der Sommertourismus wird zusätzlich mit dem HTM (Hamburg Tourism Model) abgebildet. Basierend auf Klimaentwicklungen und sonstigen sozioökonomischen Entwicklungen wird der Einfluss des Klimawandels auf den Sommertourismus berechnet.

Quelle: Eigene Darstellung

Der Wintertourismus wird von Temperaturerhöhungen negativ betroffen sein. Steigende Temperaturen führen zu steigenden Schneefallgrenzen und reduzierter Schneesicherheit. Sie tragen auch zu schmelzendem Permafrost bei, was die Stabilität von Berganlagen reduziert.

Die Resultate der Berechnungen zeigen, dass die Schweiz aufgrund ihrer guten Wettbewerbsposition (hohe, schneesichere Skigebiete) – unter der Annahme, dass es keine Erweiterung künstlicher Beschneiungsanlagen gibt – profitieren wird. Es werden mehr ausländische Touristen in die Schweiz kommen. Unter der Annahme, dass die künstliche Beschneigung ausgedehnt wird, gibt es keine Wohlfahrtsänderung. Dies gilt jedoch nur, wenn überall in Europa keine Beschneiungsanlagen verbessert werden.

Mit einer Verschiebung weg von Tagestourismus und hin zu Tourismus mit Übernachtung wird in jedem Szenario gerechnet und es wird erwartet, dass die tief gelegenen Skigebiete mit Umsatzeinbussen und Schliessungen konfrontiert werden.

Der Sommertourismus wird in zwei wesentlichen Aspekten von der Temperaturerhöhung beeinflusst werden. Einerseits werden kühlere Destinationen beliebter, andererseits verlängert sich die Periode, in der Sommeraktivitäten unternommen werden können. Die Schweiz wird von diesen Entwicklungen in allen untersuchten Szenarien profitieren.

Die Wohlfahrtsentwicklung in der Schweiz gemäss Vöhringer et al. (2017) ist in Tabelle 53 dargestellt, wobei prozentuale Wohlfahrtsänderungen den prozentualen Veränderungen der Konsummöglichkeiten entsprechen.

Tabelle 53: Wohlfahrtsänderung im Schweizer Tourismus (2060)

	RCP3PD	A1B
Schweizer Sommertourismus		
Produktion	1.40	3.00
Konsum	0.10	0.30
Export	-0.70	-1.60
Import	-6.00	-12.90
Schweizer Wintertourismus mit Übernachtung		
Produktion	0.03	0.60
Konsum	-0.20	-1.20
Export	0.20	2.30
Import	-0.40	-3.70
Kunstschnee	1.40	10.50
Produzentenpreis	0.20	1.60
Schweizer Wintertourismus ohne Übernachtung		
Produktion	-0.40	-2.80
Konsum	-0.40	-2.80
Kunstschnee	1.00	7.20
Produzentenpreis	0.70	5.10
Wohlfahrtsänderung	0.08	0.17

Anmerkung: Angaben in Prozent gegenüber 2010.

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 91

Insgesamt ist im Schweizer Tourismus von 2010 bis 2060 eine positive Wohlfahrtsänderung zu erwarten. Die positiven Auswirkungen auf den Sommertourismus werden die negativen Auswirkungen auf den Wintertourismus übertreffen. Allerdings müssen die Resultate mit Vorsicht interpretiert werden, weil nicht nur die Temperatur, sondern auch Niederschläge und sonstige Klimaänderungen einen Einfluss auf Tourismus haben können, die aber von Vöhringer et al. (2017) nicht berücksichtigt werden.

Zusammenfassung und Zwischenfazit

Unter die «restlichen Infrastrukturen» fallen Tourismus, Industrieinfrastrukturen und soziale Infrastrukturen.

Müller et al. (2007) quantifizieren die Auswirkungen von Hochwasser, Murgängen und Gesteinschleife auf Industrie und soziale Infrastrukturen. Diese werden u.a. daraus resultieren, dass der Permafrost schmilzt. Allerdings gibt es viele solcher Ereignisse in der Schweiz, die nicht in Permafrost-Gebiete fallen oder keinen Zusammenhang mit dem Klimawandel aufweisen. So sind die Quantifizierungen sehr spekulativ. Die Autoren kommen zum Schluss, dass die jährlichen Zusatzkosten dieser Ereignisse bis 2050 bis zu CHF 178 Mio. betragen werden.

Müller et al. (2007) analysieren auch die Auswirkungen der steigenden Temperaturen auf den Wintertourismus. Im Jahr 2100 werden mit einer Temperaturerhöhung von 3.7°C die Kosten für den Wintertourismus auf CHF 1'160 Mio. geschätzt. Die Verluste resultieren daraus, dass sich Konsumenten im Winter aufgrund der fehlenden Schneesicherheit zunehmend für Fernreisen ausserhalb der Schweiz entscheiden, anstatt Skiferien zu machen.

Vöhringer et al. (2017) analysieren ebenfalls den Tourismus, untersuchen jedoch sowohl Winter- als auch Sommertourismus. Es wird erwartet, dass der Sommertourismus profitieren wird, weil das Klima in der Schweiz im Sommer angenehmer wird, als in Grossstädten. So kommen

die Autoren zum Schluss, dass die Wohlfahrt im Tourismus (gemessen in Konsummöglichkeiten) bis 2060, verglichen mit 2010, zwischen 0.08 Prozent und 0.17 Prozent steigen wird.

Forzieri et al. (2018) fokussieren auf die Auswirkungen von Extremereignissen auf Industrie und soziale Infrastrukturen. Soziale Infrastrukturen sind dabei Gesundheitsinfrastrukturen, d.h. primär Spitäler, und Bildungsinfrastrukturen wie Schulen. In Bezug auf Industrieinfrastrukturen wird erwartet, dass die Kosten bis 2100 gegenüber den 2000er Jahren um CHF 545 Mio. pro Jahr steigen werden. Dabei tragen Wasser und Abwasserinfrastrukturen die höchste Last. In Bezug auf soziale Infrastrukturen wird erst ab der Periode 2071-2100 mit einer Erhöhung der Kosten gegenüber den 2000er Jahren gerechnet. Bis 2100 betragen die erwarteten Zusatzkosten jährlich CHF 18 Mio.; davon tragen die Gesundheitsinfrastrukturen die grösste Last.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf übrige Infrastrukturen sind vielfältig; insbesondere im Tourismus werde auch wesentliche Nachfrageänderungen erwartet. Die Industrieinfrastrukturen werden relativ stark betroffen sein, wobei das primär eine Folge deren starker Verbreitung ist.

6 Ergebnisübersicht

Die wichtigsten Ergebnisse der Literaturrecherche zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Schweizer Infrastrukturen sind in Tabelle 54 dargestellt. Die Tabelle ist am Beispiel der ersten Zeile wie folgt zu lesen: Auf der Basis von Forzieri et al. (2018) wird geschätzt, dass die erwarteten jährlichen Zusatzkosten an allgemeinen Transportinfrastrukturen, welche durch Extremereignisse verursacht werden, in der Zeitperiode 2011-2040 gegenüber der Basisperiode in den 2000er Jahren rund CHF 97 Mio. betragen.

Tabelle 54: Zusammenfassung der Ergebnisse

Infrastruktur	Auswirkungen	Quantifizierung ¹³ pro Jahr (Zeitperiode); Veränderung gegenüber der Basisperiode	Literatur
Allgemeine Transportinfrastrukturen	Generelle Schäden durch Extremereignisse	CHF 97 Mio. (2011-2040) CHF 227 Mio. (2041-2070) CHF 442 Mio. (2071-2100)	Forzieri et al. (2018)
Strassen	Hitze- und Kälteschäden an Strassen; Schäden durch Frier-Tau-Zyklen	Minderkosten: CHF 0.7-0.3 Mio. (2040-2070) CHF 7.3-0.8 Mio. (2070-2100)	Nemry und Demirel (2012)
Strassen	Intensivere Niederschläge erhöhen Degradierungsschäden	CHF 0.8-4.7 Mio. (2040-2070) CHF 0.6-8.1 Mio. (2070-2100)	Nemry und Demirel (2012)
Strassen	Räumungsarbeiten und Schäden an Fahrzeugen durch Extremstürme	CHF 4 Mio. (2060)	Vöhringer et al. (2017)
Strassen	Schäden an Strassen allgemein durch Überflutungen	CHF 13 Mio. (2060)	Vöhringer et al. (2017)
Schienen	Geschwindigkeitsgrenzen, um Belastung durch Extremtemperaturen zu reduzieren und Verformungen zu vermeiden	CHF 1.5-2.9 Mio. (2040-2070) CHF 2.0-7.5 Mio. (2070-2100)	Nemry und Demirel (2012)
Schienen	Räumungsarbeiten, Kosten für Ersatzbusse, Umsatzverluste durch Extremstürme	CHF 4.3 Mio. (2060)	Vöhringer et al. (2017)
Schienen	Generelle Schäden durch Überflutungen	CHF 5.5 Mio. (2060)	Vöhringer et al. (2017)
Energie	Nachfrage für Kühlung bzw. Heizung verändert sich in Folge steigender Temperaturen; Leistung von Wasserkraftwerken sinkt aufgrund geringerer Wasserverfügbarkeit	CHF 311 Mio. (2030) CHF 777 Mio. (2050) CHF 1'296 Mio. (2070) CHF 1'969 Mio. (2100) Wohlfahrtssteigerung: 0.06% - 0.34% (2060)	Müller et al. (2007) Vöhringer et al. (2017)
Allgemeine Energieinfrastrukturen	Räumungsarbeiten nach Extremstürmen	CHF 3.8 Mio. (2060)	Vöhringer et al. (2017)
Allgemeine Energieinfrastrukturen	Generelle Schäden durch Extremereignisse	CHF 6.8 Mio. (2011-2040) CHF 38.1 Mio. (2041-2070) CHF 88.8 Mio. (2071-2100)	Forzieri et al. (2018)

¹³ Wo nicht anders angegeben, handelt es sich um Mehrkosten gegenüber der Basisperiode. Die Angaben entsprechen einer Punktschätzung, sind aber mit grosser Unsicherheit behaftet.

Infrastruktur	Auswirkungen	Quantifizierung ¹³ pro Jahr (Zeitperiode); Veränderung gegenüber der Basisperiode	Literatur
Kern- und Wasserkraft	Reduzierte Produktion von Wasserkraftwerken aufgrund geringerer Wasserverfügbarkeit	Reduktion der jährlichen Produktion um 2 TWh; Umsatzrückgang bei konstanten Preisen: CHF 168 Mio. (2030/2070-2099) Umsatzsteigerung bei Preisänderungen: CHF 13 Mio. (2030/2070-2099)	Golombek et al. (2012)
Kernkraftwerke	Reduzierte Leistung aufgrund wärmeren Kühlwassers bei Temperaturanstiegen	Umsatzrückgang CHF 51-77 Mio. (2031-2060)	Van Vliet et al. (2012)
Wasserkraftwerke	Weniger verfügbares Wasser aufgrund höherer Temperaturen (stärkere Verdunstung und schnelleres Schmelzen der Gletscher) und unregelmässigeren Niederschlags	Umsatzrückgang Mattmark: CHF 6-7 Mio. (2050) Umsatzrückgang von 5 Kraftwerken: CHF -3 Mio. (2021-2050) CHF 23 Mio. (2071-2099) Umsatzrückgang gesamte Schweiz: CHF 26 Mio. (2050)	Guardard et al. (2014) SGHL und CHy (2011) Hamududu und Kiltingveit (2012)
Wasser	Stärkere Verdunstung, unregelmässigerer Niederschlag, höhere Nachfrage während Hitzewellen	Maximaler Wohlfahrtsverlust: CHF 214 Mio. (2050)	Faust et al. (2012)
Tourismus	Rückläufiger Wintertourismus aufgrund geringerer Schneesicherheit durch höhere Temperaturen Mehr Sommertourismus aufgrund relativ angenehmerer Temperaturen im Sommer	CHF 62 Mio. (2030) CHF 179 Mio. (2050) CHF 607 Mio. (2070) CHF 1'158 Mio. (2100) Wohlfahrtssteigerung gegenüber 2010: 0.08%-0.17% (2060)	Müller et al. (2007) Vöhringer et al. (2017)
Allgemeine Infrastrukturen	Schmelzender Permafrost durch höhere Temperaturen verursacht Hochwasser, Geschiebe und Murgänge	CHF 16-178 Mio. (2050)	Müller et al. (2007)
Industrieinfrastrukturen	Generelle Schäden durch Extremereignisse	CHF 68 Mio. (2011-2040) CHF 268 Mio. (2041-2070) CHF 545 Mio. (2071-2100)	Forzieri et al. (2018)
Soziale Infrastrukturen	Generelle Schäden durch Extremereignisse	CHF -13 Mio. (2011-2040) CHF -5 Mio. (2041-2070) CHF 18 Mio. (2071-2100)	Forzieri et al. (2018)

Quelle: Eigene Darstellung

Dieser Überblick zeigt folgendes auf:

- Von den Transportinfrastrukturen sind insbesondere Strassen und Schienen betroffen, dabei werden Strassen stärker tangiert als Schienen.
- Im Energiebereich wird der Klimawandel sowohl die Leistung der Infrastrukturen als auch die Nachfrage betreffen. Direkte Schäden durch Extremereignisse sind dagegen gering. Die Literatur zieht allerdings nicht in Betracht, dass der Atomausstieg in der Schweiz geplant ist, was die Auswirkungen auf den Energiesektor in der Schweiz tendenziell, reduziert.

- Tourismusinfrastrukturen sind vor allem in den Bergen betroffen. Der Wintertourismus wird unter steigenden Temperaturen leiden; der Sommertourismus kann einen Grossteil dieser Verluste wettmachen, da mit einer Nachfragesteigerung gerechnet wird.

Insgesamt streuen die in der Literatur diskutierten Auswirkungen auf Infrastrukturen und deren Märkte stark. Eine Aggregation der Resultate ist aufgrund der unterschiedlichen Annahmen, Klimaszenarien und Untersuchungsperioden nicht möglich. Klar ist, dass die Auswirkungen des Klimawandels mit steigenden Temperaturen im Zeitverlauf zunehmen werden. Dabei sind die Vermeidungs- und Folgekosten von verschiedenen Akteuren in unterschiedlichem Ausmass zu tragen: Schäden an Schienen werden die Eisenbahn-Infrastrukturunternehmen betreffen; Verspätungskosten die Bahnreisenden. Schäden an Strassen fordern primär die Gemeinden und Kantone heraus, während Leistungsreduktionen von Kraftwerken deren Wert für die (öffentlichen und privaten) Eigentümer mindern.

7 Referenzen

Literatur

Faust, Anne-Kathrin, Camille Gonseth and Marc Vielle (2012). The economic impact of climate driven changes in water availability in Switzerland. Studie im Auftrag von Swiss Climate Research [EPFL, Lausanne].

Forzieri, Giovanni, Alessandra Bianchi, Filipe Batista e Silva, Mario A. Marin Herrera, Antoine Leblois, Carlo Lavalle, Jeroen C.J.H. Aerts and Luc Feyen (2018). "Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe". *Global Environmental Change* 48, 97-107.

Hamududu, Byman and Aanund Killingtveit (2012). "Assessing climate change impacts on global hydropower". *Energies* 5, 305-322.

Golombek, Rolf, Sverre A. C. Kittelsen and Ingjerd Haddeland (2012). "Climate change: Impacts on electricity markets in Western Europe". *Climatic Change* 113, 357-370.

Guardard, Ludovic, Franco Romerio, Francesco Dalla Valle, Roberta Gorret, Stefano Maran, Giovanni Ravazzani, Markus Stoffel and Michela Volonterio (2014). "Climate change impacts on hydropower in the Swiss and Italian Alps". *Science of the Total Environment* 493, 1211-1221.

Müller, André, Ueli Roth, Frank Vöhringer and Renger van Nieuwkoop (2007). Auswirkungen der Klimaänderung auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse). Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt und des Bundesamtes für Energie [Ecoplan und Sigma-plan, Bern].

Nemry, Françoise and Hande Demirel (2012). Impacts of climate change on transport: A focus on road and rail transport infrastructures. Studie im Auftrag der EU Kommission [Publications Office of the European Union, Luxembourg].

Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL) und Hydrologische Kommission (CHy) (Hrsg.) (2011). Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Synthesebericht. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 38 [Bern].

Suez Water Technologies (2019). Handbook of Industrial Water Treatment. Online Abgerufen von: <https://www.suezwatertechnologies.com/handbook/handbook-industrial-water-treatment>.

Van Vliet, Michelle T.H., John R. Yearsley, Fulco Ludwig, Stefan Vögele, Dennis P. Lettenmaier and Pavel Kabat (2012). "Vulnerability of US and European electricity supply to climate change". *Nature Climate Change*, 1-6.

Vöhringer, Frank, Marc Vielle, Boris Thurm, Wolfgang Knoke, Dario Stocker, Anita Frehner, Sophie Maire and Philippe Thalmann (2017). Assessing the impacts of climate change for Switzerland. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt [EPFL, Lausanne].

Statistiken

Bundesamt für Energie (2019). Energie Ein- und Ausfuhr. Abgerufen von: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/energie.assetdetail.9306217.html>

Bundesamt für Statistik (2019). LIK Teuerungsstatistiken. Abgerufen von: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/preise/landesindex-konsumentenpreise/lik-resultate.html>

Bundesamt für Statistik (2019). Elektrizitätserzeugung. Abgerufen von: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/energie.assetdetail.9306227.html>

Bundesamt für Statistik (2019). Endverbraucher-Ausgaben für Energie. Abgerufen von: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/energie.assetdetail.9306237.html>

CIA Factbook (2019). Roadways. Abgerufen von: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/385.html>

EZB (2019). Historischer Wechselkurs CHF/EUR. Abgerufen von: https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofxref-graph-chf.en.html

Eurostat (2019). Total length of motorways. Abgerufen von: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/44cb267a-76af-4752-a083-b5ffa92ff4e5?lang=en>

Eurostat (2019). Rail transport of passengers. Abgerufen von: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/13c51a08-f0b5-4b5a-9d6f-4742a8cb890b?lang=en>

Eurostat (2019). Goods transport by rail. Abgerufen von: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/8378ad1f-b80b-4f52-bbc0-f3e594b44996?lang=en>

OECD (2019). Real GDP long-term forecast. Abgerufen von: <https://data.oecd.org/gdp/gdp-long-term-forecast.htm>

OFX (2019). USD to CHF Exchange Rates. Abgerufen von: <https://www.ofx.com/en-us/exchange-rates/other/chf/>

Swissnuclear (2000). Monatsbericht über den Betrieb der Schweizerischen Kernkraftwerke Dezember 2000, Jahresüberblick 2000. Abgerufen von: <http://www.swissnuclear.ch/upload/cms/user/Mbd-2000-12.pdf>

WEF (2019). Quality of railroad infrastructure. Abgerufen von: https://todata360.worldbank.org/indicators/h75993d65?indicator=539&viz=line_chart&years=2009,2017

World Bank (2019). Rail lines (total route-km). Abgerufen von <https://data.worldbank.org/indicator/IS.RRS.TOTL.KM?view=chart>

A Globale Klimaszenarien

Der Kern aller Studien zur Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf Schweizer Infrastrukturen ist das verwendete globale Klimaszenario. Es gibt zwei Gruppen von Klimaszenarien, die SRES und die RCP Gruppe; beide stammen vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

A.1 SRES Klimaszenarien

Die SRES (Special Report on Emissions Scenarios) Klimaszenarien wurden im Jahr 2000 von der IPCC definiert und mit jedem Bericht des IPCC aufgrund der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse überarbeitet. Es gibt innerhalb der SRES zwei Familien von Szenarien: A und B, wobei es innerhalb dieser Familien jeweils eine Variante 1 und Variante 2 gibt.

Die **A1 Familie** beschreibt ein Szenario mit schnellem wirtschaftlichem Wachstum, einer Bevölkerung, welche um 2050 ihr Maximum erreicht und nachher fällt und einer raschen Einführung von neuen und effizienten Technologien. Es wird mit einer signifikanten Reduktion der regionalen Einkommensungleichheiten gerechnet. Drei Untergruppen unterscheiden sich durch ihre technologischen und energischen Schwerpunkte:

- Die **A1F1 Untergruppe** setzt den Schwerpunkt auf fossile Energiequellen,
- Die **A1T Untergruppe** setzt den Schwerpunkt auf nicht fossile Energiequellen und
- Die **A1B Untergruppe** nimmt eine Mischung aus fossilen und nicht fossilen Energiequellen an.

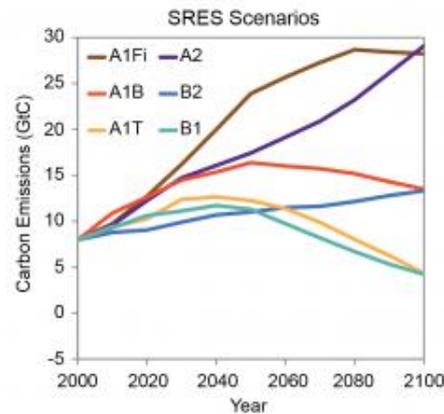
Die **A2 Familie** beschreibt eine heterogene Welt. Jede Region und jedes Land behält die lokale Identität und ist selbständig. Die Bevölkerung wächst an, wirtschaftliche Entwicklung ist regional unterschiedlich und technologischer Fortschritt ist fragmentiert und langsam.

Die **B1 Familie** beschreibt dieselbe Entwicklung der Bevölkerung wie die A1 Familie. In der B1 Familie wird eine schnelle wirtschaftliche Entwicklung in Richtung einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft angenommen. Der Materialismus nimmt ab und erneuerbare und effiziente Technologien werden eingeführt. Es gibt eine globale Zusammenarbeit für die Lösung von ökonomischen, sozialen und umweltlichen Nachhaltigkeitsproblemen.

Die **B2 Familie** beschreibt eine Welt, in welcher der Schwerpunkt auf der regionalen Lösung von ökonomischen, sozialen und umweltlichen Nachhaltigkeitsproblemen liegt. Die Bevölkerung wächst an, aber langsamer als in der A2 Familie. Technologische Fortschritte werden weniger rasch als in der A1 und B1 Familie eingeführt und Probleme werden nur auf lokaler und regionaler Ebene gelöst.

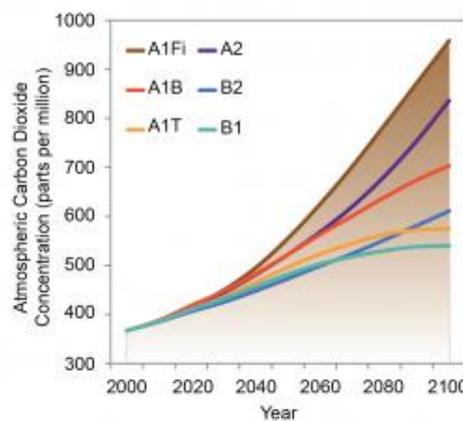
Die Entwicklung der CO₂ Emissionen und Konzentration in diesen Szenarien ist in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt.

Abbildung 4: CO₂ Emissionen in den unterschiedlichen SRES Szenarien



Quelle: GlobalChange.gov

Abbildung 5: CO₂ Konzentrationen in den unterschiedlichen SRES Szenarien



Quelle: GlobalChange.gov

Das Szenario A1Fi ist das klimaschädlichste, B1 das klimaschonendste.

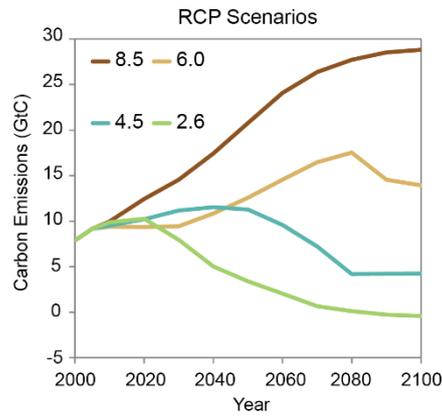
A.2 RCP Klimaszenarien

Die RCP (Representative Concentration Pathways) Szenarien sind die Nachfolger der SRES Szenarien. Sie wurden 2014 von der IPCC publiziert. Die vier Szenarien können wie folgt mit den SRES Szenarien verglichen werden:

- Das RCP 8.5 Szenario entspricht dem A1Fi Szenario.
- Das RCP 6.0 Szenario entspricht dem A1B Szenario.
- Das RCP 4.5 Szenario entspricht dem B1 Szenario.
- Das RCP 2.6 Szenario ist viel optimistischer als alle SRES Szenarien. Der Grund dafür ist, dass es mit Massnahmen rechnet, die dem Klimawandel entgegenwirken und in den SRES Szenarien nicht enthalten sind.

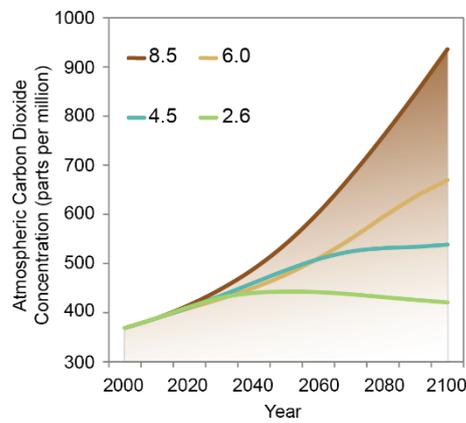
Die Entwicklung der CO₂ Emissionen und der CO₂ Konzentration in diesen Szenarien ist in Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellt.

Abbildung 6: CO₂ Emissionen in den unterschiedlichen RCP Szenarien



Quelle: GlobalChange.gov

Abbildung 7: CO₂ Konzentrationen in den unterschiedlichen SRES Szenarien



Quelle: GlobalChange.gov

Das RCP 8.5 Szenario ist das klimaschädlichste, das RCP 2.6 Szenario das klimaschonendste.

B Transport

B.1 Forzieri et al. (2018) – Transport: Erklärungen, Berechnungen und Resultate

Forzieri et al. (2018) schätzen ab, wie sich Extremereignisse auf unterschiedliche Infrastrukturtypen, inklusive Transportinfrastrukturen, in Europa auswirken. Tabelle 55 präsentiert die Auswirkungen von Extremereignissen auf die Transportinfrastruktur.

Tabelle 55: Auswirkungen von Extremereignissen auf Transportinfrastruktur

Hitzewellen	Kältewellen	Dürren	Brände	Überflutungen	Windstürme
Schmelzender Asphalt	Vereistes Flughafenmaterial	Reduzierte Navigationsfähigkeit auf Wasser	Unterbrüche und Verspätungen	Beeinträchtigung der strukturellen Integrität	Strukturelle Schäden durch Trümmerteile
Bildung von Spurrillen	Unterbrüche und Verspätungen			Unterbrüche und Verspätungen	Stärkere Turbulenzen für Flugzeuge
Reifenschäden	Schienenbrüche			Degradation von Küsteninfrastruktur	Schäden an Fahrleitungen
Reduzierte Effizienz von Verbrennungsmotoren	Schäden an Fahrleitungen			Reduzierte Navigationsfähigkeit auf Wasser	Wellen für Wassertransport
Schienenverformungen					
Beeinträchtigung der strukturellen Integrität					
Ausfälle der Signalanlagen					
Effizienzreduktion von Flugzeugen					
Instabilität von Hängen aufgrund schmelzenden Permafrosts					

Quelle: Forzieri et al. (2018), Online Anhang

Dazu ist zu bemerken, dass die Anzahl aufgelisteter Auswirkungen eines Extremereignisses keine Rückschlüsse auf die Grösse der Schäden erlaubt. Es werden die meisten Auswirkungen für Hitzewellen aufgelistet, da diese am häufigsten vorkommen und somit mehr Beobachtungen zu deren negativen Auswirkungen vorliegen. Tabelle 56 zeigt das Bedrohungsausmass der verschiedenen Extremereignisse für die Transportinfrastrukturen.

Tabelle 56: Bedrohung von Klimaereignissen für Transportinfrastrukturen

Infrastruktur	Hitzewellen	Kältewellen	Dürren	Brände	Fluss- und Küstenüberflutungen	Windstürme
Lokale Strassen	M	M	N	M	M	L
Nationale Strassen	M	M	N	M	M	L
Autobahnen	M	M	N	M	M	L
Schienen	M	M	N	M	H	L
Inländische Wasserwege	L	M	H	L	H	M
Häfen	L	M	L	L	H	M
Flughäfen	L	M	N	L	M	M

Anmerkung: N = Keine Bedrohung, L = Tiefe Bedrohung, M = Mittlere Bedrohung, H = Hohe Bedrohung.

Quelle: Forzieri et al. (2018), S. 100

Gestützt auf diese Bedrohungen wird berechnet, welcher Anteil der Kosten eines Extremereignisses auf eine bestimmte Transportinfrastruktur fällt (vgl. Tabelle 57).

Tabelle 57: Verteilung der Kosten auf einzelne Transportinfrastrukturen

Ereignis	Strassen	Schienen	Inländische Wasserwege	Häfen	Flughäfen
Hitzewelle	89%	11%	0%	0%	0%
Kältewellen	81%	6%	4%	10%	0%
Dürre	0%	0%	100%	0%	0%
Brände	93%	7%	0%	0%	0%
Flussüberflutungen	66%	20%	9%	4%	0%
Küstenüberflutungen	63%	4%	1%	32%	0%
Windstürme	0%	0%	40%	48%	12%

Quelle: Forzieri et al. (2018), S. 104

Tabelle 58 zeigt die erwarteten Kosten eines Extremereignisses in den Perioden 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100.

Tabelle 58: Jährlichen Kosten je Extremereignis

Ereignis	Basis	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Hitzewelle	217	2'432	5'353	10'888
Kältewellen	76	64	17	-
Dürre	7	9	22	42
Brände	20	19	27	28
Flussüberflutungen	103	507	551	667
Küstenüberflutungen	4	26	84	168
Windstürme	66	Keine Angaben	Keine Angaben	74

Anmerkung: Angaben in Mio. 2010 Euro

Quelle: Forzieri et al. (2018), S. 103

Durch Multiplikation der Kosten eines Extremereignisses (Tabelle 58) mit dem Anteil, der auf eine bestimmte Infrastruktur fällt (Tabelle 57), ergeben sich die Kosten je Infrastruktur (Tabelle 59).

Tabelle 59: Europaweite Kosten je Infrastruktur

	Basis	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Strassen	344	2'585	5'220	10'262
Schienen	51	375	705	1'340
Inländische Wasserwege	46	57	73	133
Häfen	57	419	753	1'384
Flughäfen	8	-	-	9

Anmerkung: Ergebnisse in 2010 Mio. EUR.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Forzieri et al. (2018)

Die Gesamtrechnung der europäischen Kosten enthält alle Kosten für alle untersuchte Infrastrukturen inkl. Energieinfrastrukturen wie z.B. Kohlekraftwerke. Da es in der Schweiz keine Kohlekraftwerke gibt, werden solche Kosten aus der Gesamtrechnung Europas entfernt. Auch Kosten, die durch einen steigenden Meeresspiegel verursacht werden, spielen in der Schweiz keine Rolle. Tabelle 60 zeigt den Schlüssel für die Umrechnung der Ergebnisse auf die Schweiz.

Tabelle 60: Herleitung des Schweizer Anteils

	Basis	2020	2050	2080
EU Gesamtkosten	3'410	10'304	20'621	37'632
Minus Kohle-, Öl- und Gaskraftwerke	3'235	9'110	17'807	32'201
Minus Küstenüberflutungskosten	3'221	9'028	17'544	31e705
Schweizer Kosten	136	261	530	910
Anteil der Schweizer Kosten an Gesamtkosten	4.22%	2.89%	3.02%	2.87%

Quelle: Forzieri et al. (2018), S. 106

Die Europäischen Gesamtkosten jeder Periode werden mit dem berechneten Prozentsatz der Periode multipliziert, um die Schweizer Kosten herzuleiten. Daraus ergibt sich eine Schätzung der Schweizer Kostenerhöhungen gegenüber der Basisperiode (1981-2010), vgl. Tabelle 61.

Tabelle 61: Erhöhung der jährlichen Kosten je Transportinfrastruktur in Mio. CHF

Infrastruktur	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Strassen	83.01	197.36	386.05
Schienen	12.01	26.43	50.07
Inländische Wasserwege	1.16	1.92	2.98
Häfen	0.64	1.35	2.43
Flughäfen	0.00	0.00	0.00
Total	96.82	227.06	441.52

Anmerkung: Berechnet mit dem durchschnittlichen 2010 CHF/EUR Wechselkurs und mit BfS-Teuerungsstatistiken. Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Aufgrund von Rundungen ist es möglich, dass das Total nicht der Summe entspricht.

Küstenüberflutungen wurden in der Berechnung nicht berücksichtigt, da diese in der Schweiz nicht vorkommen können.

Die Erhöhung ist gegenüber der gewählten Basisperiode 2000er Jahren.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Forzieri et al. (2018), EZB, BfS-Teuerungsstatistik

Die Berechnungen deuten darauf hin, dass Strassen am stärksten gefährdet sind und die grösste Gefahr von Hitzewellen stammt.

Die präsentierten Schätzungen sind aufgrund der verwendeten Annahmen als Annäherung zu verstehen. Forzieri et al. (2018) präsentieren die Kosten pro Extremereignis nur für Gesamteuropa. Der Schlüssel zur Berechnung der Schweizer Kosten pro Extremereignis und Infrastruktur wird für alle Infrastrukturgruppen konstant gehalten. Es wird somit die Annahme getroffen, dass der Schweizer Anteil an den Europäischen Kosten für jedes Extremereignis und jede Infrastrukturgruppe gleich ist.

B.2 Nemry und Demirel (2012) – Strassen: Erklärungen, Berechnungen und Resultate

In ihrem 2012 Bericht schätzen Nemry und Demirel (2012) den Einfluss des Klimawandels auf Strassen. Im Fokus stehen die Folgen von Niederschlägen und der Temperaturentwicklung.

Niederschlagsschäden

Niederschlag und darauffolgende Überflutungen sind bereits heute für einen grossen Anteil der wetterverursachten Strassenschäden verantwortlich, insbesondere aufgrund der Strassendegradierung. Wenn ein Schwellenwert von 100mm pro Tag überschritten wird, steigen diese Degradierungskosten signifikant an. In keinem der Klimaszenarien wird diese Schwelle in der Zeitperiode 2040-2070 überschritten. Auch in der Periode 2070-2100 wird diese Schwelle selten überschritten. Es wird deshalb keine starke Erhöhung der niederschlagsverursachten Kosten erwartet. In ihrem Bericht analysieren Nemry und Demirel (2012) die niederschlagsverursachten Strassenkosten regional. Die Regionen und die Auflistung der Kosten pro Region sind in Tabelle 62 dargestellt.

Tabelle 62: Regionen und zugehörige Länder

Region	Länder
UK & Ireland	Grossbritannien, Irland
Iberian Peninsula	Spanien, Portugal
Mediterranean	Italien, Griechenland
Middle Europe	Deutschland, Belgien, Niederlande
Alpines Regions	Österreich, Slowenien
Scandinavia	Schweden, Finnland, Estland, Lettland, Dänemark
Eastern Europe	Polen, Tschechien, Slowakei, Ungarn, Rumänien, Bulgarien
France	Frankreich

Anmerkung: Gemäss grafischer Darstellung im sind Luxembour und Litauen keiner Region zugeordnet.

Quelle: Nemry und Demirel (2012), S. 19

Die durchschnittliche Erhöhung der Kosten in diesen Regionen ist in Tabelle 63 dargestellt.

Tabelle 63: Durchschnittliche Erhöhung der niederschlagsverursachten Strassenkosten

Szenario	2040-2070			2070-2100		
	E1	A1B	RCP8.5	E1	A1B	RCP8.5
Alpine Regions	7.00	13.00	2.50	8.00	23.00	7.00
UK & Ireland	16.50	15.00	17.50	26.50	33.00	16.50
Eastern Europe	6.00	10.00	5.50	7.50	14.00	6.00
France	12.50	23.00	-4.50	36.50	33.00	12.50
Iberian Peninsula	1.50	-1.00	-9.50	6.50	5.00	1.50
Mediterranean	0.50	6.00	-7.50	1.50	8.00	0.50
Middle Europe	25.00	30.00	3.50	54.50	54.00	25.00
Scandinavia	52.00	66.00	82.50	95.00	201.00	52.00

Anmerkung: Angaben in Mio. EUR.

Quelle: Eigene Berechnungen, gestützt auf Nemry und Demirel (2012), S. 29

Auf dieser Grundlage werden die Auswirkungen auf die Schweizer Strassen mit einem «pro Einheit»-Ansatz annäherungsweise berechnet.

Anwendung des «pro Einheit» Ansatzes

Die Regionen, die ähnliche Klimaentwicklungen wie die Schweiz haben werden, sind «France» und «Alpine Regions». Die Gewichtung der Regionen wird in Tabelle 64 zusammengefasst und erklärt; die Strassenkosten werden in Tabelle 65 angegeben.

Tabelle 64: Gewichtung der relevanten Regionen für den «pro Einheit»-Ansatz

Region	Gewicht	Begründung
Alpine Regions	0.6	Die Region «Alpine Regions» ist aufgrund ihrer topografischen Eigenschaften (insb. Bergen) vergleichbar mit der Schweiz. Österreich wird wie die Nordschweiz nasser, Slowenien wie die Südschweiz trockener.
France	0.4	«France» wird schwächer gewichtet, als die «Alpine Regions» Region, weil ein Grossteil des französischen Gebietes Küste ist. Dies macht es weniger vergleichbar mit der Schweiz, da Infrastrukturen an der Küste höheren Risiken ausgesetzt sind.

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 65: Veränderung der niederschlagsverursachten Kosten in Vergleichsregionen

Szenario	2040-2070			2070-2100		
	E1	A1B	RCP8.5	E1	A1B	RCP8.5
Alpine Regions	2.00	7.00	13.00	2.50	8.00	23.00
France	7.00	12.50	23.00	-4.50	36.50	33.00

Quelle: Nemry und Demirel (2012), S. 29

Die Länge der Strassennetze dieser Länder und Regionen sowie der Schweiz im Jahr 2012 sind in Tabelle 66 und Tabelle 67 dargestellt.

Tabelle 66: Strassennetz in Kilometern für relevante Länder (2012)

Land	2012 Strassennetz in Kilometer
Österreich	126'367
Slowenien	39'517
Frankreich	1'078'527
Schweiz	70'907

Quelle: Eurostat

Tabelle 67: Strassennetz in Kilometern für relevante Regionen (2012)

Region	2012 Strassennetz in Kilometer
Alpine Regions	165'884
France	1'078'527

Quelle: Eigene Berechnung, gestützt auf Eurostat Daten

Diese Strassennetzdaten werden verwendet, um die niederschlagsverursachten Strassenkosten pro km zu berechnen (vgl. Tabelle 68).

Tabelle 68: Pro Kilometer Niederschlagskosten

Region	Pro-km Kosten 2040-2070			Pro-km Kosten 2070-2100		
	E1	A1B	RCP8.5	E1	A1B	RCP8.5
Alpine Regions	12.06	42.20	78.37	15.07	48.23	138.65
France	6.49	11.59	21.33	-4.17	33.84	30.60

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Nemry und Demirel (2012) und Eurostat

Mit einer Gewichtung von 0.6 bzw. 0.4 für Alpine Regions bzw. France wird ein gewichteter Durchschnitt der pro-km Kosten für jedes Szenario und jede Zeitperiode berechnet (vgl. Tabelle 69).

Tabelle 69: Gewichteter Durchschnitt der Niederschlagskosten pro Kilometer

Scenario	2040-2070	2070-2100
E1	9.83	7.37
A1B	29.95	42.47
RCP8.5	55.55	95.43

Anmerkung: Angaben in Mio. EUR.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Nemry und Demirel (2012) und Eurostat

Letztlich wird der gewichtete pro-km Kostensatz auf das Schweizer Strassennetz angewendet, um die prognostizierten niederschlagsverursachten Kosten für die Schweiz herzuleiten. Diese werden mit dem durchschnittlichen Wechselkurs im Jahr 2012 und mit BfS-Teuerungsstatistiken auf das Preisniveau von 2018 hochgerechnet (vgl. Tabelle 70).

Tabelle 70: Erhöhung der Schweizer Niederschlagskosten in Mio. CHF p.a.

Szenario	2040-2070	2070-2100
E1	0.91	0.69
A1B	2.79	3.95
RCP8.5	5.17	8.88

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf EU Kommission (2012), EZB Wechselkurs, BfS-Teuerungsstatistiken und Eurostat

Temperaturschäden

Temperaturschäden fallen in zwei Kategorien:

- **Höhere Temperaturen** führen dazu, dass Asphalt schmilzt. Um die Sicherheit der Strassen sicherzustellen, müssen diese mit hitzeresistentem Asphalt neu belegt werden. Je höher die Temperaturen, desto hitzeresistenter muss der Asphalt sein und desto höher sind die Kosten.

- **Kältere Temperaturen** führen dazu, dass die Wasserpartikel innerhalb des Asphaltes gefrieren und bei leichter Erwärmung wieder auftauen. Da Wasser beim Gefrieren expandiert, wird der Asphalt durch Frost-Tau-Zyklen über die Zeit geschwächt und muss ersetzt werden.

In allen Klimaszenarien wird mit einer Erhöhung der Temperaturen gerechnet. Es kommt deshalb zu einer Erhöhung der hitzeverursachten und einer Reduktion der kälteverursachten Strassenschäden. Die temperaturbedingten Strassenkosten für die europäischen Länder werden in Tabelle 71 dargestellt.

Tabelle 71: Änderung temperaturverursachter Strassenschäden p.a.

	2040-2070			2070-2100		
	E1	A1B	RCP8.5	E1	A1B	RCP8.5
AT	0.60	1.40	1.40	-1.10	0.30	1.80
BE	-1.90	-0.90	-0.40	-7.00	-7.40	1.60
BG	0.40	1.40	1.70	-1.10	0.60	3.40
CZ	2.10	4.00	4.00	0.20	5.00	2.90
DE	-1.60	3.30	2.40	-52.40	-53.80	-40.60
DK	-4.40	-4.90	-5.20	-11.00	-12.40	-13.10
EE	0.00	-0.10	-0.10	0.10	0.10	0.40
ES	-40.90	-63.40	-66.10	-48.70	-81.10	-65.20
FI	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.20	-0.20
FR	-11.40	-23.20	-22.50	-28.80	-49.00	-37.70
GR	-3.90	-5.70	-5.50	-7.90	-11.90	-9.30
HU	4.80	9.40	9.50	-5.30	2.80	3.30
IE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
IT	-7.60	-5.90	-4.70	-8.70	-14.60	64.80
LT	0.40	1.20	0.60	0.40	2.40	2.20
LU	-0.10	-0.20	-0.20	-0.60	-0.80	-0.80
LV	-0.10	-0.10	-0.20	0.20	0.80	1.40
NL	-7.80	-10.80	-10.40	-21.70	-26.40	-22.00
PL	2.50	5.90	5.20	5.90	10.20	22.80
PT	-5.90	-13.10	-12.80	-3.20	-8.70	-3.90
RO	0.40	1.10	1.20	-0.30	0.80	1.20
SE	-0.90	-1.00	-1.20	-1.20	-0.40	-1.20
SI	1.80	1.80	1.90	2.80	2.50	8.50
SK	0.80	1.40	1.00	0.40	1.50	3.50
UK	-1.30	-1.70	-2.10	-5.10	-4.70	-5.60

Anmerkung: Angaben in Mio. EUR.

Quelle: Nemry und Demirel (2012), S. 41-42

Anwendung des «pro Einheit»-Ansatzes

Die Temperaturen in der Schweiz werden sich ähnlich zu ihren Nachbarländer Italien, Österreich, Deutschland und Frankreich entwickeln. Diese vier Länder werden deshalb für die Berechnung mit der «pro Einheit» Methode ausgewählt. Deren Gewichtung wird in Tabelle 72 erklärt.

Tabelle 72: Gewichtung der relevanten Länder für den «pro Einheit»-Ansatz

Land	Gewicht	Erklärung
Österreich, Frankreich, Deutschland	0.275	Diese drei Länder werden alle gleich gewichtet, da sie in den Teilen, die an die Schweiz grenzen, ähnliche Temperaturentwicklungen erleben werden.
Italien	0.175	Italien wird schwächer gewichtet, da die Qualität der italienischen Strassen nicht auf demselben Niveau ist, wie die der Schweiz. ¹⁴

Quelle: Eigene Darstellung

Das Strassennetz der relevanten Länder und der Schweiz ist in Tabelle 73 dargestellt.

Tabelle 73: Strassennetz der relevanten Länder (2012)

Land	Strassennetz in km
Österreich	126'367
Frankreich	1'078'527
Italien	253'730
Deutschland	657'879
Schweiz	70'907

Anmerkung: Für Deutschland gibt es im Eurostat Datensatz keine Angaben. Die Informationen bezüglich des deutschen Strassennetzes sind vom CIA World Factbook genommen, diese stammen jedoch von 2010. Für 2012 sind keine zuverlässigen Daten verfügbar.

Quelle: Eurostat und CIA World Factbook

Mit diesem Strassennetz werden die pro-Kilometer Zusatzkosten für temperaturverursachte Strassenschäden berechnet. Die Resultate sind in Tabelle 74 dargestellt. Es handelt sich bei diesen Resultaten um millionstel CHF.

Tabelle 74: Pro-Kilometer Zusatzkosten

Land	2040-2070			2070-2100		
	E1	A1B	RCP8.5	E1	A1B	RCP8.5
Österreich	4.75	11.08	11.08	-8.70	2.37	14.24
Frankreich	-10.57	-21.51	-20.86	-26.70	-45.43	-34.96
Italien	-29.95	-23.25	-18.52	-34.29	-57.54	255.39
Deutschland	-6.95	14.32	10.42	-227.45	-233.53	-176.23

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Nemry und Demirel (2012), Eurostat und CIA Factbook

Der gewichtete Durchschnitt der pro-Kilometer Zusatzkosten für jedes Szenario und jede Zeitperiode ist in Tabelle 75 dargestellt (wiederum in millionstel CHF).

Tabelle 75: Gewichteter durchschnittlicher pro-Kilometer Kostensatz

Szenario	2040-2070	2070-2100
E1	-8.75	-78.29
A1B	-3.00	-86.13
RCP8.5	-3.07	-9.47

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Nemry und Demirel (2012), Eurostat und CIA Factbook

Diese Zusatzkosten werden auf das Strassennetz der Schweiz umgerechnet, um die prognostizierten temperaturverursachten Strassenschäden in der Schweiz herzuleiten. Diese werden

¹⁴ Italien ist gemäss der EU Quality of Roads Index weit hinter den anderen 3 Länder. Siehe dazu https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/scoreboard/compare/investments-infrastructure/quality-roads_en

dann mit dem durchschnittlichen 2012 EUR/CHF Wechselkurs in Schweizer Franken und mit BfS-Teuerungsstatistiken auf das Preisniveau von 2018 umgerechnet. Dieselbe Methodik wird angewendet, um die hitze- und kälteverursachten Kosten herzuleiten. Damit können die Schweizer kälteverursachten, hitzeverursachte und temperaturverursachte Kosten zum Preisniveau von 2018 bewertet werden (vgl. Tabelle 76).

Tabelle 76: Temperaturverursachte Strassenschäden in der Schweiz in Mio. CHF

Szenario		2040-2070	2070-2100
E1	Hitzeverursacht	1.70	2.46
	Kälteverursacht	-2.45	-9.09
	Temperaturverursacht	-0.74	-6.62
A1B	Hitzeverursacht	3.01	4.59
	Kälteverursacht	-3.26	-11.9
	Temperaturverursacht	-0.25	-7.28
RCP8.5	Hitzeverursacht	3.10	11.5
	Kälteverursacht	-3.36	-12.3
	Temperaturverursacht	-0.26	-0.80

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Nemry und Demirel (2012), Eurostat, CIA Factbook, EZB-Wechselkurs und BfS-Teuerungsstatistik

Die Reduktion der kälteverursachten Kosten ist absolut grösser als die Erhöhung der hitzeverursachten Kosten, weshalb es insgesamt zu Kostenreduktionen kommt.

B.3 Vöhringer et al. (2017) – Strassen: Erklärungen, Berechnungen und Resultate

Die Quantifizierung erwarteter Schäden durch Extremereignisse in Vöhringer et al. (2017) erfolgt für jedes Ereignis entlang derselben Methodik: Es wird ein Basisereignis gewählt und die Kosten dieses Ereignisses werden auf das Preisniveau von 2008 hochgerechnet. Dabei wird sowohl die Inflation als auch die wirtschaftliche Entwicklung berücksichtigt. Danach werden mit der folgenden Formel die Kosten im Jahr 2060 berechnet:

$$Kosten_t^j = Kosten_{2008}^j \times \frac{BIP_t}{BIP_{2008}} \times \frac{1}{Jährlichkeit_t} \quad (1)$$

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 36

Eine Jährlichkeit von 50 heisst, dass ein solches Ereignis alle 50 Jahre einmal eintritt. Vöhringer et al. (2017) präsentieren Jährlichkeiten von Ereignissen im Jahr 2060. Sie treffen keine Annahmen zum erwartetem BIP im Jahr 2060 gegeben. Damit eine Quantifizierung möglich ist, werden BIP-Prognosen der OECD herangezogen. Gemäss Angaben des OECD betrug das BIP im Jahr 2008 USD (PPP) 412.8 Mrd. Im Jahr 2060 wird im selben Datensatz ein BIP von 1'1016.4 Mrd. USD (PPP) erwartet. Diese Annahmen werden für sämtliche Quantifizierungen verwendet.

Stürme

Der Bericht verwendet als Basispunkt der Sturm Lothar von 1999. Die Strassenkosten dieses Sturmes im Jahr 1999 sind hochgerechnet auf 2008 in Tabelle 77 dargestellt.

Tabelle 77: Strassenkosten des Sturms Lothar in Mio. CHF

Sektor		Kosten 1999	Kosten 2008
Transport	Strassen – Räumungs- und Reparaturarbeiten	6	9
	Strassen – Schäden an Fahrzeugen	55	75
Strassenkosten Total		61	84

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 37

Es gibt keine klaren Angaben, wie sich Stürme mit fortschreitendem Klimawandel entwickeln werden. Da es im Sommer und Winter einen beobachtbaren Zusammenhang zwischen Temperaturen und Stürmen gibt, schätzen die Autoren, dass Stürme mit der Zeit häufiger werden und damit die Jährlichkeit abnimmt. Lothar wurde im Jahr 1999 als «Jahrhundertsturm» beschrieben. Es wird die Annahme getroffen, dass sich die Jährlichkeit eines solchen Sturmes im Jahr 2060 auf 50 Jahren halbieren wird. Mit diesen Angaben und den obigen Angaben zum erwarteten BIP können die erwarteten Strassenkosten von Stürmen für 2060 berechnet werden. Die Resultate sind in Tabelle 78 dargestellt. Diese Kosten sind als jährliche Kosten zu verstehen.

Tabelle 78: Zusätzliche Strassenkosten durch Extremstürme im Jahr 2060 in Mio. CHF

Sektor		Kosten
Transport	Strassen – Räumungs- und Reparaturarbeiten	0.44
	Strassen – Schäden an Fahrzeugen	3.67
Strassenkosten Total		4.11

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Vöhringer et al. (2017); BfS-Teuerungsstatistik

Die erwarteten zusätzlichen Strassenkosten eines Sturmes mit Ausmass des Lothars im Jahr 2060 werden mit CHF 4.11 Mio. beziffert. Die höchsten Kosten werden dabei aufgrund von Fahrzeugschäden erwartet.

Überflutungen

Als Basispunkt für die Berechnung der Strassenschäden durch Überflutungen verwenden Vöhringer et al. (2017) die Hochwasser von August 2005. Die Strassenkosten für diese Überflutungen, sowohl im Jahr 2005 wie auch hochgerechnet auf 2008 sind in Tabelle 79 dargestellt.

Tabelle 79: Strassenkosten der Überflutungen vom August 2005 in Mio. CHF

Sektor		Kosten 2005	Kosten 2008
Transport	Autobahnen und Nationalstrassen	5	6
	Hauptstrassen	80	94
	Sonstige Strassen	94	111
Strassenkosten Total		179	211

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 39

Im Jahr 2005 wurde geschätzt, dass die Überflutungen eine Jährlichkeit von 77 Jahren hatten. Die Autoren treffen die Annahme, dass sich diese Jährlichkeit bis 2060 halbiert, also 38.5 Jahre beträgt. Mit diesen Angaben und den BIP-Prognosen der OECD können die erwarteten Strassenkosten von Überflutungen im Jahr 2060 berechnet werden. Die Resultate sind in Tabelle 80 dargestellt. Die Kosten sind als jährliche Kosten zu verstehen.

Tabelle 80: Zusätzliche Strassenkosten durch Überflutungen im Jahr 2060 in Mio. CHF

Sektor		Kosten
Transport	Autobahnen und Nationalstrassen	0.38
	Hauptstrassen	5.97
	Sonstige Strassen	7.06
Strassenkosten Total		13.41

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Vöhringer et al. (2017); BfS-Teuerungsstatistik

Die erwarteten Zusatzkosten belaufen sich auf fast CHF 13.5 Mio.; die grössten Kosten fallen bei «sonstigen Strassen» (weder Autobahnen noch Hauptstrassen) an.

B.4 Nemry und Demirel (2012) – Schienen: Erklärungen, Berechnungen und Resultate

Zentral für die Berechnung der Verspätungskosten in Nemry und Demirel (2012) ist die Stress-Freie Temperatur (SFT) für Schienen. Bei dieser Temperatur ist die Schiene weder aufgrund der Kälte durch Brechen gefährdet, noch aufgrund der Wärme durch Verformungen. Die SFT ist veränderbar, wobei die Schiene hitze- oder kälteresistenter wird. Allerdings gibt es einen Trade-Off: Wenn eine Schiene hitzeresistenter gebaut wird (d.h. die SFT erhöht wird), wird sie gleichzeitig weniger kälteresistent und umgekehrt. Aufgrund dieses Trade-Offs ist die gängige Adaptationsmassnahme bei extremen Temperaturen, die Geschwindigkeit der Züge zu reduzieren. Dies reduziert die Belastung der Schienen und dadurch auch das Schadensrisiko.

Mit gedrosselter Geschwindigkeit kommt es zu Verspätungen, deren Kosten im Bericht quantifiziert werden. Weitere Adaptationsmassnahmen wie Bettungsunterhalt oder vermehrte bzw. bessere Wartungsarbeiten werden nicht quantifiziert. Für die Quantifizierung werden folgende Annahmen getroffen:

- 5 Prozent der Schienen im Kurz- und Mittelverkehr in Europa weisen schlechte Bettungen auf. Bei schlechter Bettung erhöht sich das Schadensrisiko signifikant.
- Geschwindigkeitskontrollen werden für 50 Prozent des Tages durchgesetzt.

Es werden folgende Kosten für Verspätungen angenommen:

- Im Personenverkehr durchschnittlich EUR 8 / Stunde, basierend auf folgenden Kostensätzen:
 - EUR 21 / Stunde für Verspätungen bei Business Reisen
 - EUR 6.40 / Stunde für Verspätungen beim Pendeln
 - EUR 3.20 / Stunde für Verspätungen beim Freizeitfahren
- Im Güterverkehr durchschnittlich EUR 0.76 / Tonne / Stunde

Die gesamten Kosten pro Land für den Schienenverkehr sind in Tabelle 81 aufgelistet.

Tabelle 81: Erhöhung der Schienenkosten je Land in Mio. EUR

Land	1990-2010	2040-2070			2070-2100		
	Absoluter Wert	E1	A1B	RCP8.5	E1	A1B	RCP8.5
AT	1.80	0.40	0.70	0.80	0.50	1.40	2.00
BE	0.70	0.10	0.30	0.30	0.30	0.50	1.00
BG	0.40	0.20	0.30	0.30	0.20	0.60	0.80
CZ	0.80	0.10	0.40	0.30	0.10	0.80	0.50
DE	5.00	1.30	2.60	2.50	1.90	4.30	6.80
DK	0.30	0.10	0.20	0.10	0.10	0.30	0.30
EE	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20
ES	2.70	2.90	1.60	1.50	4.20	2.80	7.80
FI	0.30	0.10	0.30	0.10	0.10	0.30	0.20
FR	4.90	4.30	3.10	2.10	4.70	5.20	9.10
GR	0.60	0.20	0.40	0.70	0.50	0.70	2.10
HU	0.80	0.30	0.60	0.60	0.50	1.20	1.30
IE	0.00	0.00	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10
IT	8.60	8.90	5.80	14.40	9.90	9.80	86.60
LT	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LU	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LV	0.20	0.00	0.10	0.00	0.00	0.10	0.20
NL	0.80	0.30	0.30	0.20	0.40	0.60	1.00
PL	1.70	0.60	1.00	1.30	1.00	1.70	3.60
PT	0.80	0.30	0.40	0.50	0.50	0.80	1.80
RO	1.50	0.30	0.90	1.00	0.50	1.70	2.00
SE	0.70	0.10	0.50	0.30	0.20	0.80	0.50
SI	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.30
SK	0.30	0.10	0.20	0.20	0.20	0.30	0.60
UK	0.60	0.20	0.40	0.20	0.30	0.90	0.80

Anmerkung: Angaben in Mio. EUR. Die künftige Werte sind Erhöhungen, die Basiswerte sind absolute Werte.

Quelle: Nemry und Demirel (2012), S. 57-59

Diese Daten sind die Basis für den «pro Einheit»-Ansatz zur Umrechnung auf die Schweiz.

Anwendung des «pro Einheit»-Ansatzes

Die Schweiz wird sich ähnlich wie ihre Nachbarländer Deutschland und Österreich entwickeln. Frankreich und Italien werden deutlich höheren Risiken ausgesetzt sein, weil die maximalen Temperaturen höher sein werden. Die Gewichtung der für die Anwendung des «pro-Einheit»-Ansatzes relevanten Länder ist in Tabelle 82 dargestellt; die im Bericht berechneten Kosten für diese Länder in Tabelle 83.

Tabelle 82: Relevante Vergleichsländer und Gewichtung

Land	Gewicht	Erklärung
Deutschland	0.4	Deutschland wird mit 0.4 gewichtet, weil das Schienennetz, die Anzahl Passagiere und die Menge der mit dem Zug transportierten Güter in Deutschland deutlich grösser sind als in Österreich oder in der Schweiz. Ein grösseres Schienennetz könnte möglicherweise die Wartungsarbeiten erschweren, was das Risiko für gebrochene Schienen unabhängig vom Klima erhöht.
Österreich	0.6	Die Grösse des österreichischen Schienennetzes ist etwa gleich gross wie das der Schweiz. Es ist kein perfekter Vergleich, weil gewisse Szenarien aufzeigen, dass es stärker von der Hitze betroffen sein wird, als die Schweiz. Deshalb wird nur eine Gewichtung von 0.6 gewählt.

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 83: Erhöhung der Schienenkosten in Vergleichsländern

Land	2040-2070			2070-2100		
	E1	A1B	RCP8.5	E1	A1B	RCP8.5
Österreich	0.40	0.70	0.80	0.50	1.40	2.00
Deutschland	1.30	2.60	2.50	1.90	4.30	6.80

Anmerkung: Angaben in Mio. EUR.

Quelle: Nemry und Demirel (2012), S. 57-59

Für die Herleitung der Schweizer Kosten mit dem «pro Einheit»-Ansatz werden verschiedene Faktoren berücksichtigt. Die «Einheiten» ergeben sich als Summe der Zugpassagiere pro qualitätsadjustiertem Schienenkilometer und der Menge an zugtransportierten Gütern pro qualitätsadjustiertem Schienenkilometer. Die qualitätsadjustierten Schienenkilometer werden berechnet, indem die Länge des Schienennetzes von 2012 mit dem World Economic Forum (WEF) «Railroad infrastructure quality» Index multipliziert werden.

Deutschland und Österreich sind die relevanten Vergleichsländer für die Schweiz. Die Herleitung der «Einheiten» in diesen Ländern ist in Tabelle 84 dargestellt. Die Angaben der Schienennetzlänge stammen von der Weltbank, die Angaben zu Passagierzahlen und transportierten Gütern von Eurostat.

Tabelle 84: Schienennetz, Passagiere und Gütertransport in Vergleichsländern

Land	Schienennetz (km)	Qualitätsadjustiertes Schienennetz	Passagiere	Transportierte Güter	Passagiere und Güter pro km
Österreich	4'985	26'221	260'518	100'452	13.77
Deutschland	33'506	191'989	2'564'498	366'140	15.26

Anmerkung: Werte für 2012.

Quellen: Weltbank, Eurostat

Unter Verwendung des Werts «Passagiere und Güter pro km» in Tabelle 84 als Einheit, werden die «pro Einheit»-Kosten hergeleitet. Diese sind in Tabelle 85 aufgelistet. Der gewichtete Durchschnitt der «pro Einheit»-Kosten wird für jedes Szenario und jede Zeitperiode mit einer Gewichtung von 0.6 für Österreich und 0.4 für Deutschland berechnet. Diese gewichteten Durchschnitte sind in Tabelle 86 zu finden.

Tabelle 85: «Pro Einheit»-Schienenkosten in Vergleichsländern

Land	2040-2070			2070-2100		
	E1	A1B	RCP8.5	E1	A1B	RCP8.5
Österreich	0.03	0.05	0.06	0.04	0.10	0.15
Deutschland	0.09	0.17	0.16	0.12	0.28	0.45

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Nemry und Demirel (2012), Eurostat und CIA Factbook

Tabelle 86: Gewichteter Durchschnitt der «pro Einheit»-Kosten

	2040-2070	2070-2100
E1	0.05	0.07
A1B	0.10	0.17
RCP8.5	0.10	0.27

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Nemry und Demirel (2012), Eurostat und CIA Factbook

Mit derselben Methodik, die bereits für die Herleitung der österreichischen und deutschen Einheiten verwendet worden ist, werden die Schweizer Einheiten hergeleitet. Diese sind in Tabelle 87 dargestellt. Die entsprechenden Schweizer Kosten, die sich aus dem Produkt «pro Einheit»-Kostensätze und den Schweizer Einheiten ergeben, sind in Tabelle 88 dargestellt.

Tabelle 87: Schienennetz, Passagiere und Gütertransport in der Schweiz

Land	Schienennetz (km)	Qualitätsadjustiertes Schienennetz	Passagiere	Transportierte Güter	Passagiere und Güter pro km
Schweiz	3'558	24'122	513'860	60'270	23.80

Anmerkung: Werte für 2012.

Quellen: Weltbank, Eurostat

Tabelle 88: Prognostizierte Erhöhung der Verspätungskosten in der Schweiz in Mio. CHF

	2040-2070	2070-2100
E1	1.46	2.03
A1B	2.80	4.93
RCP8.5	2.85	7.53

Anmerkung: Angaben mit EZB-Wechselkurs umgerechnet. Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Nemry und Demirel (2012), BfS-Teuerungsstatistik, EZB-Wechselkurs Informationen

B.5 Vöhringer et al. (2017) – Schienen: Erklärungen, Berechnungen und Resultate

Die Quantifizierung der erwarteten Schäden durch Extremereignisse an Schienen erfolgt nach derselben Methodik wie die Quantifizierung der Schäden an Strassen (vgl. B.3).

Stürme

Die durch den Sturm Lothar verursachten Schienenkosten (ebenfalls hochgerechnet auf 2008) sind in Tabelle 89 dargestellt.

Tabelle 89: Schienenkosten des Sturms Lothar in Mio. CHF

Sektor		Kosten 1999	Kosten 2008
Transport	SBB – Räumungs- und Reparaturarbeiten	5	7
	Sonstige Zugsunternehmen – Räumungs- und Reparaturarbeiten	9	12
	Sonstige Zugsunternehmen – Kosten der Ersatzbusse	2	2
	Sonstige Zugsunternehmen – Umsatzverlust	3	3
	Bergzüge – Räumungs- und Reparaturarbeiten	8	10
	Bergzüge – Umsatzverlust	39	54
	Schienenkosten Total		66

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 37

Vöhringer et al. (2017) treffen die Annahme, dass sich die Jährlichkeit eines solchen Sturmes halbiert und 2060 50 Jahre beträgt. Mit diesen Angaben und den Prognosen zum künftigen BIP im Jahr 2060 werden die erwarteten Kosten im Jahr 2060 berechnet. Diese sind in Tabelle 90 dargestellt.

Tabelle 90: Zusätzliche Schienenkosten durch Extremstürme im Jahr 2060 in Mio. CHF

Sektor		Kosten
Transport	SBB – Räumungs- und Reparaturarbeiten	0.34
	Sonstige Zugsunternehmen – Räumungs- und Reparaturarbeiten	0.59
	Sonstige Zugsunternehmen – Kosten der Ersatzbusse	0.10
	Sonstige Zugsunternehmen – Umsatzverlust	0.15
	Bergzüge – Räumungs- und Reparaturarbeiten	0.49
	Bergzüge – Umsatzverlust	2.64
	Erwartete Schienenkosten Total	

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Vöhringer et al. (2017) und BfS-Teuerungsstatistik

Die erwarteten zusätzlichen Kosten betragen jährlich etwa CHF 4.3 Mio. Sie werden sich mit fortschreitendem Klimawandel erhöhen, da ein extremer Sturm zunehmend wahrscheinlicher wird.

Überflutungen

Als Basisereignis für Überflutungen verwenden Vöhringer et al. (2017) die Hochwasser von August 2005. Die Kosten dieser Hochwasser sind in Tabelle 91 dargestellt.

Tabelle 91: Schienenkosten der Überflutungen im August 2005 und 2008 in Mio. CHF

Sektor		Kosten 2005	Kosten 2008
Transport	Schienen	73	86

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 39

Die Autoren schätzen, dass sich die Jährlichkeit solcher Hochwasser bis 2060 halbiert, sodass diese 2060 37.5 Jahre beträgt. Mit den OECD BIP-Prognosen der OECD werden die erwarteten Kosten im Jahr 2060 berechnet (vgl. Tabelle 92).

Tabelle 92: Zusätzliche Schienenkosten durch Überflutungen im Jahr 2060 in Mio. CHF

Sektor		Kosten
Transport	Schienen	5.47

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Vöhringer et al. (2017) und OECD BIP Prognosen

Die erwarteten Zusatzkosten belaufen sich auf rund CHF 5.5 Mio. Sie werden sich mit fortschreitendem Klimawandel erhöhen, da Überflutungen immer wahrscheinlicher werden.

C Energie

C.1 Müller et al. (2007) – Energie: Erklärungen, Berechnungen und Resultate

Der Bericht von Müller et al. (2007) untersucht die Auswirkungen des Klimawandels, insbesondere von Temperaturerhöhungen, auf den Energiesektor der Schweiz. Dazu werden sowohl die Angebots- als auch die Nachfrageseite analysiert.

Angebotsseite: Produktion

Auf der Angebotsseite liegt der Fokus auf Wasserkraftwerken. Steigende Temperaturen beeinflussen deren Abflussmengen, weil sie die Verdunstung sowie die Häufigkeit und Intensität von Niederschlägen beeinflussen. Gestützt auf die Abflussmengen wird die künftige Stromproduktion berechnet.

Die absolute Stromproduktion und ihr Rückgang in TWh gegenüber der Basisperiode 2005 ist in Tabelle 93 dargestellt.

Tabelle 93: Absolute Stromproduktion und Stromeinbusse gemäss Müller et al. (2007)

Jahr	Absolute Stromproduktion TWh	Rückgang gegenüber 2005 (Median)
2030	34.6 – 41.4	-2
2050	33.9 – 40.1	-3
2070	32.1 – 39.4	-7
2100	32.1 – 39.4	-7

Quelle: Müller et al. (2007), S. 113-114

Die Reduktion der Stromproduktion verursacht Kosten, da der Strom durch andere Quellen ersetzt werden muss. Müller et al. (2007) schätzen diese Kosten in einer Bandbreite von 6.0 und 16.4 Rappen pro kWh. Gestützt darauf ergeben sich folgende Ersatzkosten (Tabelle 94).

Tabelle 94: Kosten für die Stromproduktion absolut und als Prozent des BIP in Mio. CHF

Jahr	Kosten für die Stromproduktion	% des BIP in der Untersuchungsperiode
2030	207	0.04%
2050	415	0.06%
2100	777	0.06%

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 115; BfS-Teuerungsstatistik

Die Kosten steigen im Zeitverlauf kontinuierlich an; gemessen in Prozent des BIP bleiben sie nach 2050 stabil.

Nachfrageseite: Kühlung

In Folge steigender Temperaturen wird der Kühlungsbedarf steigen. Dieser wird anhand von Kühlgradtagen (CDD) gemessen. Die Autoren analysieren drei Sektoren: Haushalte, Dienstleistungen und Industrie. Allerdings werden nur detaillierte Berechnungen zum Kühlungsbedarf in Haushalten und im Dienstleistungssektor angestellt.

Mit einer Reihe von Annahmen zur Bevölkerung, zur Energiebezugsfläche¹⁵, zur Leistung von Klimaanlageanlagen, zur technologischen Entwicklung, zur Durchdringung von Klimaanlageanlagen und

¹⁵ Grundfläche eines Gebäudes, welche geheizt bzw. gekühlt werden muss.

zur Entwicklung der Kühlgradtage werden die Mehrkosten der zunehmenden Kühlung geschätzt. Die Ergebnisse sind für Haushalte in Tabelle 95 und für den Dienstleistungssektor in Tabelle 96 dargestellt.

Tabelle 95: Kühlungsbedarf und anfallende Kosten für Haushalte in Mio. CHF

	2005	2030	2050	2070	2100
Bevölkerung (Mio.)	7.50	8.10	8.10	8.10	8.10
EBF (m²/Kopf)	59.00	73.00	81.00	88.00	96.00
EBF (Mio. m²)	444.00	592.00	658.00	713.00	780.00
Temperaturerhöhung, Median JJA	0.00	1.40	2.70	3.80	5.30
Kühlgradtage	122.00	199.00	292.00	385.00	536.00
Leistungsziffer	2.25	2.90	35.00	3.80	4.00
Technologiefaktor					
Von	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Bis	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60
Kühlleistung * Vollbenutzungsstunden (kWh(m²))	15.90	25.90	38.00	50.10	69.70
Spezifische Kühlleistungsverbrauch	7.10	9.00	10.80	13.20	17.40
Anteil klimatisierte Wohnungen	1.00%	35.00%	68.00%	95.00%	100.00%
Anteil klimatisierte Fläche/Wohnung	33.00%	60.00%	72.00%	76.00%	78.00%
EBF klimatisiert	1.00	124.00	321.00	518.00	610.00
Verbrauch (TWh)	0.00	1.10	3.50	6.80	10.60
Minimale Ressourcenkosten (Rappen/kWh)	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Maximale Ressourcenkosten (Rappen/kWh)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Minimale Ressourcenkosten	1.04	92.24	289.17	565.89	882.01
Maximale Ressourcenkosten	2.07	236.31	736.91	1442.72	2249.06

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 119; BfS-Teuerungsstatistik

Tabelle 96: Kühlungsbedarf und Kosten im Dienstleistungssektor in Mio. CHF

	2005	2030	2050	2070	2100
Vollzeitäquivalent Dienstleistung und Landwirtschaft (Mio.)	2.40	2.50	2.50	2.50	2.50
EBF (m²/Vollzeitäquivalent)	62.00	75.00	83.00	90.00	99.00
EBF (Mio- m²)	147.00	190.00	206.00	223.00	244.00
Temperaturerhöhung, Median JJA	0.00	1.40	2.70	3.80	5.30
Kühlgradtage	122.00	199.00	292.00	385.00	536.00
Spezifischer Verbrauch (kWh/m²)	35.30	33.30	42.80	52.40	67.90
Anteil EBF vollklimatisiert	27.00%	31.00%	35.00%	39.00%	44.00%
Anteil EBF zusätzlich vollklimatisiert	0.00%	11.00%	22.00%	30.00%	43.00%
Total Anteil vollklimatisiert	27.00%	43.00%	57.00%	69.00%	87.00%
EBF vollklimatisiert	40.00	81.00	116.00	154.00	211.00
Technologiefaktor					
Von	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60
Bis	1.00	0.80	0.60	0.40	0.20
Verbrauch (TWh)	1.00	2.70	5.00	8.10	14.30
Minimale Ressourcenkosten (Rappen/kWh)	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Maximale Ressourcenkosten (Rappen/kWh)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Minimale Ressourcenkosten	82.91	223.87	413.54	667.46	1187.75
Maximale Ressourcenkosten	212.47	570.04	1053.02	1701.83	3029.50

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 120; BfS-Teuerungsstatistik

Tabelle 97 zeigt die aggregierten Effekte.

Tabelle 97: Kühlungsbedarf und anfallende Kosten in der Schweiz in Mio. CHF

	2030	2050	2070	2100
Zunahme Stromverbrauch (TWh/Jahr)	4.00	7.50	11.00	15.00
Zunahme der Ressourcenkosten p.a.	570	1088	1617	2228
Kosten in % des BIP	0.10%	0.15%	0.20%	0.20%

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 122; BfS-Teuerungsstatistik

Nachfrageseite: Heizung

Höhere Temperaturen führen zu einer Reduktion des Heizungsbedarfs. Die Abschätzung der Auswirkungen des reduzierten Heizungsbedarfs wird mit derselben Methodik wie oben für den Kühlungsbedarf vorgenommen. In allen drei Sektoren sinkt der Heizungsbedarf (vgl. Tabelle 98, Tabelle 99 und Tabelle 100).

Tabelle 98: Heizungsbedarf und anfallende Kosten für Haushalte in Mio. CHF

	2005	2030	2050	2070	2100	
Bevölkerung (Mio.)	7.50	8.10	8.10	8.10	8.10	
EBF (m ² /Kopf)	59.00	73.00	81.00	88.00	96.00	
EBF (Mio. m ²)	444.00	592.00	658.00	713.00	780.00	
Energiekennzahl (MJ/m ²)	433.00	290.00	235.00	201.00	179.00	
ohne Klimaerwärmung	432.90	214.00	133.00	90.00	64.00	
Temperaturerhöhung, Median September bis Mai	0.00	1.00	1.80	2.60	3.70	
Heizgradtage	2588.00	3252.00	3000.00	2761.00	2467.00	
Alpha	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
Rückgang Heizenergiebedarf	0.00%	9.00%	16.00%	23.00%	31.00%	
Energiekennzahl (MJ/m ²)	433.00	263.00	197.00	154.00	123.00	
mit Klimaerwärmung	433.00	194.00	111.00	69.00	44.00	
Einsparung in MJ/m ²		Von	27.00	39.00	46.00	56.00
		Bis	20.00	22.00	21.00	20.00
Einsparung in TWh		Von	3.00	4.00	4.00	4.00
		Bis	4.00	7.00	9.00	12.00
Minimale Ressourcenkosten (Rappen/kWh)			5.00	5.00	5.00	5.00
Maximale Ressourcenkosten (Rappen/kWh)			12.00	12.00	12.00	12.00
Minimaler Rückgang an Ressourcenkosten			185.52	185.52	224.91	230.09
Maximaler Rückgang an Ressourcenkosten			572.11	572.11	904.81	1174.28

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 125; BfS-Teuerungsstatistik

Tabelle 99: Heizungsbedarf und anfallende Kosten im Dienstleistungssektor in Mio. CHF

	2005	2030	2050	2070	2100	
Vollzeitäquivalent Dienstleistung und Landwirtschaft (Mio.)	2.40	2.50	2.50	2.50	2.50	
EBF (m ² /Vollzeitäquivalent)	62.00	75.00	83.00	90.00	99.00	
EBF (Mio. m ²)	147.00	190.00	206.00	223.00	244.00	
Energiekennzahl MJ/m ²	485.00	333.00	312.00	264.00	225.00	
ohne Klimaerwärmung	485.00	230.00	194.00	146.00	107.00	
Temperaturerhöhung Median September bis Mai	0.00	1.00	1.80	2.60	3.70	
Heizgradtage	3588.00	3252.00	3000.00	2761.00	2467.00	
Alpha	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
Rückgang Heizenergiebedarf	0.00%	9.00%	16.00%	23.00%	31.00%	
Energiekennzahl MJ/m ²	485.00	302.00	261.00	203.00	155.00	
Mit Klimaerwärmung	485.00	209.00	162.00	112.00	73.00	
Einsparung in MJ/m ²		Von	31.00	51.00	61.00	70.00
		Bis	22.00	32.00	34.00	33.00
Einsparung in TWh		Von	1.00	2.00	2.00	2.00
		Bis	2.00	3.00	4.00	5.00
Minimale Ressourcenkosten (Rappen/kWh)			4.00	4.00	4.00	4.00
Maximale Ressourcenkosten (Rappen/kWh)			11.00	11.00	11.00	11.00
Minimaler Rückgang an Ressourcenkosten			51.82	83.95	95.35	103.64
Maximaler Rückgang an Ressourcenkosten			193.81	344.10	442.56	559.67

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 126; BfS-Teuerungsstatistik

Tabelle 100: Heizungsbedarf und anfallende Kosten in der Industrie in Mio. CHF

	2005	2030	2050	2070	2100
Temperaturerhöhung Median September bis Mai	0.00	1.00	1.80	2.60	3.70
Heizgradtage	3588	3252	3000	2761	2467
Alpha	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Rückgang Heizenergiebedarf		7.00%	13.00%	18.00%	25.00%
Einsparung		0.60	0.90	1.10	1.40
in TWh		0.40	0.60	0.70	0.70
Minimale Ressourcenkosten (Rappen/kWh)		4.00	4.00	4.00	4.00
Maximale Ressourcenkosten (Rappen/kWh)		11.00	11.00	11.00	11.00
Minimaler Rückgang an Ressourcenkosten		25.91	41.46	51.82	65.30
Maximaler Rückgang an Ressourcenkosten		51.82	67.37	77.73	82.91

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 126; BfS-Teuerungsstatistik

Für Tabelle 98 bis Tabelle 100 gilt: Die Energiekennzahl gibt den Jahresheizwärmebedarf an. MJ sind Megajoules. Alpha ist ein Anteilsfaktor, der beschreibt, welcher Anteil des Energiebedarfs durch die Veränderung der Heizgradtage verursacht wird. Die aggregierten Resultate der drei Sektoren sind in Tabelle 101 aufgelistet.

Tabelle 101: Heizungsbedarf und Rückgang der Kosten in der Schweiz in Mio. CHF

	2030	2050	2070	2100
Abnahme Stromverbrauch (TWh/Jahr)	6.00	8.50	10.00	13.50
Rückgang der Ressourcenkosten	518.22	725.50	839.51	1088.26
Rückgang in % des BIP	0.09%	0.10%	0.10%	0.09%

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 128; BfS-Teuerungsstatistik

Es wird ein Rückgang der Kosten für Heizung erwartet; dieser ist allerdings kleiner als die Steigung der Kosten aufgrund des erhöhten Kühlungsbedarfs.

Gesamter Energiemarkt

Tabelle 102 zeigt die gesamten Kosten von steigenden Temperaturen für den Energiesektor in der Schweiz.

Tabelle 102: Kosten für den Schweizer Energiesektor aufgrund steigender Temperaturen

	2030	2050	2070	2100
Kosten in Mio. CHF	310.93	777.33	1295.54	1969.23
Kosten in % des BIP	0.05%	0.13%	0.16%	0.17%

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 130; BfS-Teuerungsstatistik

Die kombinierten negativen Auswirkungen auf die Stromproduktion und die erhöhte Kühlnachfrage verursachen mehr Kosten, als durch den verminderten Heizbedarf gespart wird.

C.2 Vöhringer et al. (2017) – Energie: Erklärungen, Berechnungen und Resultate

Schleichender Klimawandel

Vöhringer et al. (2017) analysieren in Bezug auf den schleichenden Klimawandel sowohl Angebots- wie auch Nachfrageseite auf dem Schweizer Energiemarkt.

Nachfrageseite

Auf der Nachfrageseite werden die wärmeren Temperaturen die Stromnachfrage für Temperaturregulierung beeinflussen.

Der Heizungsbedarf, gemessen an der Anzahl Heating Demand Days (Tagen, an denen es die tiefe Temperatur notwendig macht zu heizen), wird bis 2060 relativ zur Basisperiode 1980-2009 je nach Klimaszenario um 6 bis 24 Prozent fallen.

Der Kühlungsbedarf, gemessen an Anzahl Cooling Demand Days (Tagen, an denen es die Temperatur notwendig macht zu kühlen), wird bis 2060 relativ zur Basisperiode um 23 bis 53 Prozent steigen. In der Schweiz ist die Energieverwendung für Kühlung momentan nicht proportional zur Anzahl Cooling Demand Days, weil Klimaanlage wenig verbreitet sind. Insgesamt erwarten die Autoren eine Abnahme der Energienachfrage für Temperaturregulierung, weil die Annahme getroffen wird, dass Klimaanlage auch künftig nicht signifikant eingesetzt werden.

Die geschätzten Wohlfahrtsänderungen bis 2060, die sich durch reduzierte Heizung ergeben sind in Tabelle 103 in Prozenten relativ zur Basisperiode 1980-2009 dargestellt. Tabelle 104 zeigt die Wohlfahrtsänderungen aufgrund der vermehrten Kühlung. Wohlfahrtsänderungen können dabei als Änderungen in den Konsummöglichkeiten interpretiert werden.

Tabelle 103: Auswirkung des Klimawandels auf Energieverwendung für Heizung

	RCP3PD			A1B			A2		
	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.
Energiekonsum	-0.85	-1.59	-2.35	-1.60	-2.58	-3.53	-1.55	-2.54	-3.47
Erdölprodukte	-1.10	-2.07	-3.06	-2.07	-3.37	-4.62	-2.01	-3.31	-4.55
Erdgas	-1.51	-2.84	-4.17	-2.85	-4.61	-6.31	-2.76	-4.53	-6.21
Strom	0.31	0.60	0.90	0.60	1.00	1.41	0.58	0.98	1.39
Fernwärme	-2.26	-4.25	-6.28	-4.26	-6.92	-9.49	-4.13	-6.79	-9.33
CO₂ Ausstoss	-1.17	-2.20	-3.26	-2.21	-3.59	-4.92	-2.14	-3.52	-4.84
Wohlfahrt	0.09	0.18	0.26	0.28	0.29	0.39	0.17	0.28	0.39

Anmerkung: Die Untersuchungsperiode ist 2060, die Vergleichsperiode ist 1980-2009.

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 50

Tabelle 104: Auswirkung des Klimawandels auf Energieverwendung für Kühlung

	RCP3PD			A1B			A2		
	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.
Energiekonsum	0.45	0.57	0.72	0.62	0.83	1.26	0.61	0.82	1.07
Erdölprodukte	-0.04	-0.04	-0.05	-0.04	-0.05	-0.07	-0.04	-0.05	-0.06
Erdgas	0.60	0.77	0.97	0.84	1.13	1.72	0.83	1.11	1.45
Strom	4.19	1.90	2.37	2.07	2.74	4.13	2.04	2.70	3.50
Fernwärme	-0.11	-0.13	-0.16	-0.14	-0.18	-0.25	-0.14	-0.18	-0.22
CO₂ Ausstoss	0.08	0.11	0.14	0.12	0.16	0.26	0.12	0.16	0.22
Wohlfahrt	-0.02	-0.03	-0.04	-0.03	-0.04	-0.06	-0.03	-0.04	-0.05

Anmerkung: Die Untersuchungsperiode ist 2060, die Vergleichsperiode ist 1980-2009. Angaben in Änderungen gegenüber der Basisperiode.

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 51

Die aggregierten Resultate für die gesamte Energienachfrage sind in Tabelle 105 aufgelistet.

Tabelle 105: Auswirkung des Klimawandels auf die Energienachfrage

	RCP3PD			A1B			A2		
	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.
Energiekonsum	-0.40	-1.02	-1.62	-0.97	-1.74	-2.42	-0.93	-1.70	-2.38
Erdölprodukte	-1.13	-2.11	-3.11	-2.12	-3.42	-4.68	-2.05	-3.36	-4.61
Erdgas	-0.90	-2.06	-3.19	-1.99	-3.45	-4.77	-1.92	-3.38	-4.70
Strom	1.81	2.51	3.30	2.68	3.78	5.05	2.63	3.71	4.95
Fernwärme	-2.37	-4.39	-6.44	-4.41	-7.10	-9.71	-4.27	-6.97	-9.55
CO₂ Ausstoss	-1.09	-2.10	-3.11	-2.09	-3.42	-4.69	-2.02	-3.35	-4.61
Wohlfahrt	0.07	0.15	0.22	0.15	0.25	0.34	0.14	0.24	0.33

Anmerkung: Die Untersuchungsperiode ist 2060, die Vergleichsperiode ist 1980-2009. Angaben in Änderungen gegenüber der Basisperiode.

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 52

Die reduzierte Heizung und die geringe Erhöhung der Kühlung resultiert auf der Nachfrageseite in einem Wohlfahrtsgewinn (in Tabelle 105 ausgedrückt in prozentualen Änderungen relativ zur Basisperiode 1980-2009).

Angebotsseite

Aufgrund der steigenden Temperaturen wird die Saisonalität der Erzeugung von Strom durch Wasserkraft verändert (mehr im Winter, weniger im Sommer). Über das ganze Jahr wird erwartet, dass sich die Fassungskmengen der Wasserkraftwerke in der Schweiz innerhalb der heutigen Schwankungen halten werden, sodass die inländische Erzeugung nicht signifikant tangiert wird. Kernkraftwerke sind durch wärmeres Kühlwasser ebenfalls von steigenden Temperaturen betroffen. Allerdings beabsichtigt die Schweiz den Atomausstieg. Aus diesen Gründen untersuchen die Autoren nur die Auswirkungen des Klimawandels auf die ausländische Energieerzeugung. Die Schweiz ist davon vor allem über den Strompreis betroffen.

Auf der Basis früherer Literatur bilden Vöhringer et al. (2017) die Veränderung der Strompreise in Europa im Jahr 2060 verglichen mit der Basisperiode 1980-2009 ab. Dabei wird der Einfluss des Klimawandels auf die Angebotsseite (reduzierte Effizienz von thermoelektrischen Kraftwerken aufgrund von fehlendem Kühlwasser, veränderte Produktivität von erneuerbaren Energien (Wind, Wasser, Photovoltaik) und auf die Nachfrageseite (Energienachfrage für Temperaturregulierung) berücksichtigt. Die entsprechenden Preise sind in Tabelle 106 abgebildet.

Tabelle 106: Auswirkung des Klimawandels auf europäische Strompreise

	RCP3PD			A1B			A2		
	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.
EU27	1.23	3.08	4.93	-0.49	-0.79	-1.22	-0.46	-0.78	-1.24
Deutschland	1.65	4.11	6.58	-6.14	-9.83	-15.23	-2.72	-9.72	-15.44
Frankreich	2.88	7.20	11.51	1.72	2.75	4.26	1.60	2.72	4.32
Italien	0.41	1.03	1.64	0.74	1.18	1.83	0.69	1.17	1.85
Österreich	-0.41	-1.03	-1.64	0.49	0.79	1.22	0.46	0.78	1.24

Anmerkung: Die Untersuchungsperiode ist 2060, die Vergleichsperiode ist 1980-2009. Angaben in Änderungen gegenüber der Basisperiode.

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 50

Preiserhöhung in einem Land stehen oft Preisreduktionen in einem anderen Land gegenüber. Aus der Entwicklung der europäischen Strompreise leiten Vöhringer et al. (2017) ab, wie sich die Schweizer Strompreise entwickeln werden. Daraus folgt eine Quantifizierung der Wohlfahrtsänderung. Die Resultate sind in Tabelle 107 als prozentuale Veränderungen gegenüber der Basisperiode 1980-2009 dargestellt.

Tabelle 107: Auswirkung des Klimawandels auf Schweizer Strompreise und -erzeugung

	RCP3PD			A1B			A2		
	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.
Strompreis	0.61	1.52	2.42	-0.09	-0.14	-0.22	-0.08	-0.14	-0.22
Wohlfahrt	0.13	0.32	0.51	-0.02	-0.03	-0.05	-0.02	-0.03	-0.05

Anmerkung: Die Strompreise beschreiben die Endkonsumentenpreise. Die Untersuchungsperiode ist 2060, die Vergleichsperiode ist 1980-2009. Angaben in Änderungen gegenüber der Basisperiode.

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 52, BfS-Teuerungsstatistik

Angebot und Nachfrage

Die Erkenntnisse der Analyse der Angebots- und Nachfrageseite werden kombiniert, um die Auswirkungen der Temperaturerhöhungen auf den Schweizer Strommarkt herzuleiten. Die Resultate sind in Tabelle 108 dargestellt.

Tabelle 108: Auswirkung des Klimawandels auf den Schweizer Energiemarkt

	RCP3PD			A1B			A2		
	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.	Min.	Med.	Max.
Energiekonsum	-0.36	-0.98	-1.59	-0.84	-1.54	-2.14	-0.80	-1.51	-2.11
Erdölprodukte	-1.15	-2.14	-3.15	-2.12	-3.42	-4.68	-2.05	-3.35	-4.60
Erdgas	-0.76	-1.70	-2.63	-2.01	-3.49	-4.83	-1.94	-3.42	-4.75
Strom	1.61	2.01	2.51	2.71	3.83	2.15	2.71	3.83	5.12
CO₂ Ausstoss	-1.07	-2.05	-3.05	-2.09	-3.42	-4.69	-2.02	-3.36	-4.62
Wohlfahrt	0.06	0.13	0.19	0.15	0.25	0.34	0.14	0.24	0.34
Strompreis	0.84	1.84	2.85	0.24	0.33	0.41	0.24	0.32	0.40
Stromerzeugung	1.15	1.74	2.37	1.50	2.11	2.80	4.17	2.07	2.75

Anmerkung: Die Strompreise beschreiben die Endkonsumentenpreise. Die Untersuchungsperiode ist 2060, die Vergleichsperiode ist 1980-2009. Angaben als prozentuale Änderungen gegenüber der Basisperiode.

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 53

Es wird in allen Szenarien eine Wohlfahrtserhöhung gegenüber der Basisperiode 1980-2009 erwartet. Diese ist auf die Reduktion der Nachfrage nach Heizung und die konstant bleibende Nachfrage nach Kühlung zurückzuführen.

Extremereignisse

Für die Quantifizierung der Auswirkungen von Extremereignissen wird wiederum der Sturm Lothar als Basisereignis verwendet. Die Kosten des Sturms für den Stromsektor im Jahr 1999 und hochgerechnet auf 2008 sind in Tabelle 109 dargestellt.

Tabelle 109: Kosten des Sturmes Lothar im Strombereich in Mio. CHF

Sektor		Kosten 1999	Kosten 2008
Strom	Räumungs- und Reparaturarbeiten	57	78

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 37

Unter der Annahme einer halbierten Jährlichkeit eines solchen Sturmes im Jahr 2060 gegenüber 1999 auf 50 Jahre und mit den BIP Prognosen der OECD werden die künftigen erwarteten Kosten eines Sturmes wie Lothar berechnet (vgl. Tabelle 110).

Tabelle 110: Erwartete Kosten im Strombereich eines Extremsturmes in 2060 in Mio. CHF

Sektor		Kosten
Strom	Räumungs- und Reparaturarbeiten	3.80

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Vöhringer et al. (2012), OECD, BfS-Teuerungsstatistik

C.3 Forzieri et al. (2018) – Energie: Erklärungen, Berechnungen und Resultate

Forzieri et al. (2018) analysieren die Auswirkungen von Extremereignissen auf Energieinfrastrukturen. Die möglichen Effekte sind in Tabelle 111 dargestellt.

Tabelle 111: Auswirkungen von Extremereignissen auf Energieinfrastrukturen

Hitzewellen	Kältewellen	Dürren	Brände	Überflutungen	Windstürme
Beeinträchtigung der strukturellen Integrität	Strukturschäden	Reduzierte strukturelle Integrität	Materialschäden	Strukturschäden	Strukturschäden
Leistungsreduktion der Stromverteilung	Abnutzung der Stromverteilung	Leistungsreduktion der Stromverteilung		Effizienzreduktionen von thermischen und Wasserkraftwerken	Gefahr von Kurzschlüssen
Effizienzreduktion von thermischen und Wasserkraftwerken sowie Photovoltaikanlagen	Reduzierte Produktion von Wasserkraftwerken	Effizienzreduktionen von thermischen und Wasserkraftwerke		Gefahr von Kurzschlüssen	Reduzierte Menge an Biokraftstoff
Reduzierte Menge an Biokraftstoff	Reduzierte Menge an Biokraftstoff	Reduzierte Menge an Biokraftstoff		Schäden an Schutzmaterial	Stärkere Belastung von Windturbinen
Brandgefahr	Reduktion der Effizienz von Photovoltaikanlagen			Reduzierte Menge an Biokraftstoff	Stärkerer Verschleiss von Solarpanels
Expansion von Öl und Gaslinien	Kontraktion von Öl- und Gaspipelines				

Quelle: Forzieri et al. (2018), Online Anhang

Die tatsächliche Gefahr der Extremereignisse für die Energieinfrastruktur wird von Forzieri et al. (2018) in Expertengesprächen erhoben. Tabelle 112 präsentiert die Bedrohung von Extremereignissen für die verschiedenen Energieinfrastrukturen.

Tabelle 112: Bedrohungsausmass von Klimaereignisse auf Energieinfrastrukturen

Energieinfrastruktur	Hitzewellen	Kältewellen	Dürren	Brände	Überflutungen	Stürme
Kohlekraftwerke	M	L	M	L	M	M
Gaskraftwerke	M	L	M	L	M	M
Ölkraftwerke	M	L	M	L	M	M
Kernkraftwerke	M	L	M	L	M	M
Biomasse- und geothermische Kraftwerke	M	M	H	H	M	L
Wasserkraftwerke	L	M	H	L	M	L
Photovoltaikanlagen	N	M	N	L	L	L
Windkraftwerken	N	L	N	L	L	H
Stromverteilungsnetz	L	M	N	H	M	H
Gasleitungen	N	L	N	H	L	N

Anmerkung: N = Keine Sensitivität, L = Tiefe Sensibilität, M = Mittlere Sensibilität, H = Hohe Sensibilität.

Quelle: Forzieri et al. (2018), S. 100

Analog zur Methodik in B.1 werden die Kosten für Energieinfrastrukturen in Gesamteuropa hergeleitet. Tabelle 113 zeigt die Gesamtkosten pro Extremereignis; Tabelle 114 die prozentuale Aufteilung der Kosten auf die einzelnen Energieinfrastrukturen. Daraus werden die Kosten pro Infrastruktur hergeleitet (vgl. Tabelle 115).

Tabelle 113: Kosten für Energieinfrastruktur pro Extremereignis in Europa

Ereignis	Basisperiode	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Hitzewellen	47	520	1'118	2'192
Kältewellen	18	15	4	0
Dürre	160	1'133	2'860	5'515
Brände	15	14	19	23
Flussüberflutungen	128	159	173	238
Küstenüberflutungen	1	14	39	59
Stürme	139	Keine Angaben	Keine Angaben	162

Anmerkung: Angaben in Mio. EUR.

Quelle: Forzieri et al. (2018), S. 103

Tabelle 114: Verteilung der Kosten auf individuelle Energieinfrastrukturen

Ereignis	KoKW	GKW	ÖKW	KKW	Bio	WKW	PV	WiKW	SVN	GL
Hitzewelle	18%	51%	7%	18%	7%	0%	0%	0%	0%	0%
Kältewellen					2%	4%			93%	1%
Dürre	15%	42%	10%	9%	4%	20%				
Brände					8%				52%	40%
Flussüberflutungen	12%	11%		6%	1%	9%			60%	
Küstenüberflutungen	10%	11%		3%	2%	1%			72%	
Stürme	1%	1%						4%	94%	

Anmerkung: KoKW = Kohlenkraftwerk, GKW = Gaskraftwerk, ÖKW = Ölkraftwerk, KKW = Kernkraftwerk, Bio = Biomasse und geothermische Kraftwerke, WKW = Wasserkraftwerke, PV = Photovoltaik, WiKW = Windkraftwerk, SVN = Stromverteilungsnetz, GL = Gasleitungen.

Quelle: Forzieri et al. (2018), S. 103

Tabelle 115: Europaweite Kosten je Infrastruktur in Mio. EUR

Infrastruktur	Basisperiode	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Kohlekraftwerke		49.31	284.03	654.90
Gaskraftwerke		106.75	760.09	1'794.70
Ölkraftwerke		19.29	149.70	364.26
Kernkraftwerke		30.57	205.53	470.19
Biomasse- und geothermische Kraftwerke		12.55	85.01	196.77
Wasserkraftwerke		44.25	241.65	588.12
Photovoltaikanlagen		0.00	0.00	0.00
Windkraftwerken		5.56	0.00	0.00
Stromverteilungsnetz		232.72	126.71	145.48
Gasleitungen		6.18	5.75	7.64

Anmerkung: Als Basis werden die 2000er Jahren verwendet. Angaben in Mio. EUR (2010).

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Forzieri et al. (2018)

Zur Umrechnung der die europaweiten Kosten auf die Schweiz wird wiederum der Schlüssel aus Tabelle 60 verwendet. Tabelle 116 zeigt die Schweizer Kosten und die Kostenerhöhungen pro Energieinfrastruktur.

Tabelle 116: Schweizer Kostenerhöhung pro Infrastruktur in Mio. CHF

Infrastruktur	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Kernkraftwerke	6.40	17.75	34.04
Biomasse- und geothermische Kraftwerke	2.65	7.43	14.24
Wasserkraftwerke	7.05	21.90	41.92
Photovoltaikanlagen	0.00	0.00	0.00
Windkraftwerken	-0.32	-0.32	-0.07
Stromverteilungsnetz	-8.86	-8.62	-1.36
Gasleitungen	-0.13	-0.04	0.00
Total	6.78	38.11	88.77

Anmerkung: Berechnet mit dem durchschnittlichen 2010 CHF/EUR Wechselkurs und mit BfS-Teuerungsstatistiken. Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Aufgrund von Rundungen ist es möglich, dass das Total nicht der Summe entspricht.

Küstenüberflutungen wurden in der Berechnung nicht berücksichtigt, da diese in der Schweiz nicht vorkommen können.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Forzieri et al. (2018), EZB, BfS-Teuerungsstatistik

Kern- und Wasserkraftwerke werden in der Schweiz die höchsten Kosten tragen. In diesen Berechnungen ist allerdings der beabsichtigte Atomausstieg der Schweiz nicht berücksichtigt.

C.4 Van Vliet et al. (2012): Erklärungen, Berechnungen, Resultate

Van Vliet et al. (2012) diskutieren die Auswirkungen von höheren Wassertemperaturen und tieferen Wasserständen auf die Leistung von thermoelektrischen Kraftwerken in den USA und in Europa. Tabelle 117 zeigt verschiedene Arten von deren Kühlung. In Europa gilt 23°C Wassertemperatur als Schwellenwert. Ab dieser Temperatur muss die Kraftwerksleistung gedrosselt werden.

Tabelle 117: Kühlungsarten in thermoelektrischen Kraftwerken

Kühlungsart	Beschreibung
Once-through	Mit der once-through Kühlung wird der Wasserquelle eine grosse Menge an Wasser entnommen, die Hitze wird an dieses Wasser transferiert und das Wasser wird wieder abgeleitet. Diese Art der Kühlung wird vor allem da angewendet, wo viel Wasser zur Verfügung steht.
Rezirkulation	Mit der Rezirkulationskühlung wird immer dasselbe Wasser verwendet für die Kühlung, dieses wird aber immer wieder durch Luftkontakt abgekühlt. Diese Art der Kühlung wird angewendet, wenn kleinere Mengen von Wasser zur Verfügung stehen.

Quelle: Suez Water Technologies

In der Schweiz werden die vier Kernkraftwerke Beznau, Mühleberg, Leibstadt und Gösgen analysiert. Dabei haben zwei «once through» Kühlungssysteme und zwei haben Rezirkulationskühlungssysteme. Es wird die Zeitperiode 2031-2060 analysiert. Von den «once through» Kühlungssystemen muss Mühleberg eine Leistungsreduktion von 10 bis 20 Prozent hinnehmen; Leibstadt eine Reduktion von 1 bis 5 Prozent. Die beiden Rezirkulationskraftwerke (Beznau und Gösgen) werden im Durchschnitt eine Reduktion von 0 bis 1 Prozent erleben. Aus der Anwendung dieser Bandbreiten der Leistungsabnahme auf die Erzeugungsdaten der Kraftwerke im Jahr 2012 resultiert eine Einschätzung der Auswirkungen auf den Schweizer Energiemarkt (vgl. Tabelle 118).

Tabelle 118: Erzeugungseinbussen pro Schweizer Kernkraftwerk

Kernkraftwerk	Erzeugung im Jahr 2000	Erwartete Leistungsreduktion	Durchschnittliche Einbusse	Maximale Einbusse
Leibstadt	9'272'934	1-5%	278'188	463'647
Gösgen	8'267'592	0-1%	41'338	82'676
Mühleberg	2'933'680	10-20%	440'052	586'736
Beznau	5'848'519	0-1%	29'243	58'485
Gesamtschweiz	26'322'725		788'821	1'191'544
Prozentuale Einbusse			3.00%	4.53%

Anmerkung: Erzeugungsangaben in MWh. Untersuchungsperiode ist 2031-2060.

Quelle: Swiss Nuclear 2000 Jahresüberblick, Van Vliet et. al (2012)

Um die Umsatzentwicklung der Kernkraftwerke zu berechnen, wird ein Strom-Durchschnittspreis von CHF 60 pro MWh angenommen (vgl. Tabelle 119).

Tabelle 119: Umsatzrückgänge der Schweizer Kernkraftwerke

Szenario	Bruttoerzeugung (MWh)	Preis pro MWh (CHF)	Umsatz (Mio. CHF)	Umsatzrückgang (Mio. CHF)
Keine Einbusse	26'322'725	60.00	1'709	0
Durchschn. Einbusse	25'533'904	60.00	1'658	51
Maximale Einbusse	25'131'181	60.00	1'631	77

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018. Untersuchungsperiode ist 2031-2060.

Quellen: Eigene Berechnungen, gestützt auf van Vliet et al. (2012).

Es wird erwartet, dass die Kernkraftwerke in der Schweiz in der Periode 2031-2060 einen durchschnittlichen jährlichen Umsatzverlust von 77 Mio. erleben werden. Dieser ist zu Beginn der Periode tiefer und erhöht sich mit steigenden Temperaturen.

C.5 Guardard et al. (2014): Erklärungen, Berechnungen und Resultate

Guardard et. al (2014) analysieren die Auswirkungen des Klimawandels auf die Elektrizitätsnachfrage und die Erzeugung von Wasserkraftwerken in den Alpen. Der Fokus liegt auf den Kraftwerken Mattmark. Diese produzierten in der Basisperiode (2001-2010) durchschnittlich 649 GWh Energie pro Jahr.

Die Autoren schätzen, dass die Kraftwerke Mattmark 2031-2050 gegenüber der Basisperiode 1991-2010 21 Prozent ihres jährlichen Wasserzuflusses verlieren werden. Als Folge wird die Produktion in Mattmark abnehmen: um etwa 11.25 bis 12.5 GWh pro Monat, also 135 bis 150 GWh pro Jahr. Um diese Produktionseinbusse zu quantifizieren, wird wiederum ein Strompreis von CHF 60 pro MWh angenommen.

Tabelle 120: Umsatzrückgang der Kraftwerke Mattmark

Einbusse	135 GWh	150 GWh
Durchschnittliche Produktion Basisperiode (GWh)	649.00	649.00
Durchschnittlicher Umsatz in Mio. CHF	38.94	38.94
Durchschnittliche Leistung nach Einbusse	514.00	499.00
Durchschnittlicher Umsatz nach Einbusse	32.74	31.78
Umsatzrückgang in Mio. CHF	6.20	7.16

Anmerkung: Umsatz berechnet als Produktion x Preis (CHF 60 pro MWh). Bewertung zum Preisniveau von 2018. Untersuchungsperiode ist 2031-2050.

Quelle: Eigene Berechnungen, gestützt auf BfS, BFE, Mattmark AG Website, Guardard et al. (2014)

C.6 SGHL und CHy (2011): Erklärungen, Berechnungen und Resultate

SGHL und CHy (2011) untersuchen, wie sich der Klimawandel auf Schweizer Wasserkraftwerke auswirken wird. Es werden dabei sowohl Niederschlags- wie auch Temperaturänderungen modelliert. Der Bericht untersucht die grössten Kraftwerke mit individuellen Fallstudien. Diese werden im Folgenden kurz erläutert und aggregiert, um den gesamten Umsatzverlust dieser Kraftwerke abzuschätzen.

Kraftwerke Oberhasli

Für die Kraftwerke Oberhasli wird in der Periode 2021-2050 mit einer Reduktion der Abflussmenge um 6 Prozent und bis 2085 mit einer Reduktion um 12 Prozent gerechnet werden. Die Abflussmenge ergibt sich als Differenz zwischen der Niederschlagsmenge und der Verdunstung. Diese Schwankungen liegen innerhalb der Variabilität des Kraftwerkes, sodass das Betriebsmodell nicht grundlegend angepasst werden muss.

Leistungseinbussen wird das Kraftwerk jedoch aufgrund der verkürzten Wasserakkumulationsperiode hinnehmen müssen, d.h. der Periode, in der Wasser ins Reservoir des Wasserkraftwerkes fliesst. Bei erhöhter Saisonalität von Niederschlägen und längeren trockenen Perioden im Sommer wird diese Periode verkürzt.

Die Prognosen von SGHL und CHy (2011) für den Umsatz des Kraftwerks Oberhasli mit dem jetzigen Ausbau des Kraftwerkes und unter Einbezug des geplanten Ausbaus des Kraftwerkes sind in Tabelle 121 dargestellt.

Tabelle 121: Prozentuale Umsatzeinbisse der Kraftwerke der Oberhasli AG

	2021-2050		2071-2099	
	Von	Bis	Von	Bis
Normaler Betrieb	-3%	-6%	-1%	-17%
Mit Ausbau	-2%	-5%	-1%	-12%

Quelle: SGHL und CHy (2011), S. 23

Die Referenzperiode ist 1980-2009. Es sind keine Geschäftsberichte der Oberhasli AG vor 2009 verfügbar; der Jahresumsatz mit Elektrizität betrug im Jahr 2009 CHF 136 Mio.¹⁶. Mit diesen Angaben werden der prognostizierte Umsatz und die Umsatzeinbisse für die Oberhasli AG berechnet (vgl. Tabelle 122).

Tabelle 122: Prognostizierter Umsatz der Kraftwerke der Oberhasli AG in Mio. CHF

Betriebsgestaltung	Basisperiode	2021-2050		2071-2099	
		Von	Bis	Von	Bis
Normaler Betrieb	136	132	127	134	113
Einbisse bei normalem Betrieb	0	-4	-8	-1	-23
Mit Ausbau	136	133	129	135	120
Einbisse bei Ausbau	0	-2	-6	-1	-16

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf SGHL und CHy (2011) und Oberhasli AG Geschäftsberichte

Kraftwerke Mattmark

Für die Wasserkraftwerke Mattmark gibt es zwei wichtige Klimaentwicklungen:

1. Die Sommerniederschläge nehmen ab und
2. Aufgrund der Gletscherschmelze werden ab 2020 die Schmelzwasserabflüsse geringer ausfallen.

Es wird erwartet, dass die Abflussmengen in der Periode 2021-2050 um 6 Prozent sinken und in der Periode 2071-2099 um 12 Prozent. SGHL und CHy (2011) berechnen die Produktionseinbisse der Kraftwerke Mattmark in einem optimistischen, durchschnittlichen und pessimistischen Szenario. Diese sind in Tabelle 123 dargestellt.

¹⁶ Oberhasli AG Geschäftsbericht (2010). Es wurden die Zahlen von 2009 im 2010 Geschäftsbericht verwendet, da der 2009 Geschäftsbericht nicht mehr öffentlich zugänglich ist.

Tabelle 123: Prozentuale Produktionseinbussen der Kraftwerke Mattmark

Klimaszenario	2021-2050	2071-2099
Optimistisch	7%	3%
Durchschnittlich	0%	0%
Pessimistisch	-14%	-22%

Quelle: SGHL und CHy (2011), S. 23

Die durchschnittliche Produktionsleistung ist auf der Website des Kraftwerkes verfügbar.¹⁷ Die prognostizierte Produktion und die Einbussen sind in Tabelle 124 dargestellt.

Tabelle 124: Prognostizierte Produktion der Kraftwerke Mattmark

Klimaszenario	2021-2050	2071-2099
Optimistisch	694	668
Absolute Änderung gegenüber Durchschnittlich	45	19
Durchschnittlich	649	649
Absolute Änderung gegenüber Durchschnittlich	0	0
Pessimistisch	558	506
Absolute Änderung gegenüber Durchschnittlich	-91	-143

Anmerkung: Angaben in GWh.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Mattmark AG Website und SGHL und CHy (2011)

Kraftwerke Prättigau

Für die Anlagen der Kraftwerkgruppe Prättigau ist mit höheren Abflüssen von September bis Mai und tieferen Abflüssen von Juni bis August zu rechnen. Es wird erwartet, dass sich die Zuflussmenge in der Periode 2021-2050 gegenüber der Basisperiode 1976-2005 um -6 bis zu +8 Prozent verändert.¹⁸

Damit wird im Winter eine Steigerung der Stromproduktion um 20-40 Prozent erwartet. Im Sommer wird kaum eine Veränderung erwartet. Somit wird die Jahresproduktion um erwartete 9.3 Prozent steigen. Es gibt vier Kraftwerke in der Gruppe Kraftwerke Prättigau. Deren Entwicklung sowie die Entwicklung der ganzen Gruppe ist in Tabelle 125 abgebildet.

Tabelle 125: Prognostizierte Produktionsänderungen der Kraftwerke Prättigau

Kraftwerk	Jahresproduktion Basisperiode	Relative Änderung	Jahresproduktion Periode 2021-2050	Absolute Änderung
Klosters	22	9.30%	24	
Schlappin	30	9.30%	32	
Küblis	178	9.30%	195	
Taschinas	41	9.30%	45	
KW Prättigau	271	9.30%	296	25

Anmerkung: Alle Angaben in GWh.

Quelle: SGHL und CHy (2011), S. 25; Repower Website¹⁹

¹⁷ <http://www.kwm.ch/unternehmen.html>

¹⁸ Der Bericht macht keine Angaben zur Periode 2071-2099.

¹⁹ <https://www.repower.com/gruppe/%C3%BCber-uns/unsere-anlagen/wasserkraftwerke/>

Speicherkraftwerk Löntsch

Das Speicherkraftwerk Löntsch beim Klöntalersee wird im Herbst, Winter und Frühling höhere, im Sommer tiefere Abflussmengen erleben. Im Vergleich zur Basisperiode 1998-2009 muss in der Periode 2021-2050 mit einer Abflussmengenänderung zwischen -0.3 bis +6.1 Prozent gerechnet werden. Das ergibt eine Produktionsveränderung zwischen -0.4 und 6.1 Prozent.²⁰ Tabelle 126 zeigt, wie sich die Produktion im Vergleich zur Basisperiode entwickeln wird.

Tabelle 126: Prognostizierte Produktionsänderungen des Speicherkraftwerkes Löntsch

Produktion Basisperiode	Relative Änderung	Produktion Periode 2021-2050	Absolute Änderung	Mittlere Änderung
114	-0.4%-6.1%	113.54 - 120.95	-0.46 - 6.95	3.25

Anmerkung: Angaben in GWh.

Quelle: SGHL und CHy (2011), S. 25; Axpo Website²¹

Speicherkraftwerk Göschenen

Für das Speicherkraftwerk in Göschenen wird in der Periode 2021-2050 eine Zuflussänderung von -0.6 bis 23 Prozent erwartet; in der Periode 2071-2099 eine Zuflussänderung zwischen -1.9 bis 22.0 Prozent im Vergleich zur Basisperiode 1980-2009. Die Produktionsänderungen entwickeln sich proportional dazu (vgl. Tabelle 127).

Tabelle 127: Prognostizierte Produktionsänderungen des Speicherkraftwerkes Göschenen

Kraftwerk	Produktion Basisperiode	Relative Änderung 2021-2050	Relative Änderung 2071-2099	Produktion 2021-2050	Produktion 2071-2099
Göschenen (Unterdorf)	5.80	-0.6% - 23%	-1.9% - 22%	5.77-7.13	5.69-7.08
Urnerloch	0.49	-0.6% - 23%	-1.9% - 22%	0.49-0.60	0.48-0.60
Göschenen (Göschneralp)	282.00	-0.6% - 23%	-1.9% - 22%	280.31-346.86	276.64-344.04
Total	288.29	-0.6% - 23%	-1.9% - 22%	286.56-354.60	282.81-351.71
Δ gegenüber Basis				-1.73 - 66.31	-5.48 - 63.42

Anmerkung: Alle Stromangaben in GWh.

Quelle: SGHL und CHy (2011), S. 25; RAOnline Website²²

Totaler Umsatzverlust

SGHL und CHy (2011) zeigen nur für die Oberhasli AG Kraftwerke monetäre Einbussen; für die restlichen Kraftwerke lediglich Produktionseinbussen. Damit diese Produktionseinbussen in monetären Einheiten ausgedrückt werden können, werden sie mit einem durchschnittlichen Strompreis von CHF 60 pro MWh multipliziert (d.h. CHF 60'000 pro GWh).

SGHL und CHy (2011) folgend, werden die Verluste unter der Annahme konstanter Preise berechnet. Schliesslich werden die Resultate mit der BFS-Teuerungsstatistik auf das Preisniveau von 2018 umgerechnet. Tabelle 128 zeigt die Resultate.

²⁰ Der Bericht enthält keine Informationen zur Periode 2071-2099.

²¹ https://www.axpo.com/content/dam/axpo2/Documents/Switzerland/Newsroom/dossiers-publikationen/Factsheet-Kraftwerk-Loentsch_DE-2016-11.pdf

²² <https://www.raonline.ch/pages/edu/nw3/energyWA1801a01.html>

Tabelle 128: Umsatzverlust für Schweizer Wasserkraftwerke in Mio. CHF

Kraftwerk	Umsatzverlust bis 2035	Umsatzverlust bis 2085
Mattmark	-928'490	-2'520'187
Prättigau	1'547'628	Keine Angaben
Löntsch	196'624	Keine Angaben
Göschenen	1'979'718	1'776'444
Oberhasli (normal)	-6'522'824	-13'045'649
Oberhasli (mit Ausbau)	-5'073'308	-9'421'858

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Eigene Berechnungen

In der Periode 2021-2050 wird insgesamt mit einer kleinen Erhöhung des Umsatzes gerechnet. Allerdings sind diese Umsatzerhöhungen ungleich auf die untersuchten Kraftwerke verteilt. Mattmark und Oberhasli werden bereits in dieser Periode Umsatzverluste haben. In der Periode 2071-2099, wenn die Gletscherschmelze in vielen Gebiete weit fortgeschritten ist, wird mit grösseren Einbussen gerechnet.

C.7 Hamududu und Killingtveit (2012): Erklärungen, Berechnungen und Resultate

Hamududu und Killingtveit (2012) untersuchen die Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserkraftwerke. Dabei identifizieren sie vor allem die Änderungen in Temperatur und Niederschlagsmengen als wichtige Klimaeffekte, weil diese Faktoren entscheidende Auswirkungen auf die Abflussmengen haben. Die Abflussmengen ergeben sich als Differenz zwischen Niederschlagsmenge und Verdunstung. Die Niederschlagsentwicklung beeinflusst die Niederschlagsmenge; die Temperatur beeinflusst die Verdunstung. Deshalb wird der Fokus auf diese zwei Klimaentwicklung gesetzt.

Die Änderung in der Energieerzeugung wird nur regional quantifiziert. In der Region der Schweiz wird eine Reduktion um 1.28 Prozent gegenüber dem Basisjahr erwartet (vgl. Tabelle 129).

Tabelle 129: Änderung in hydroelektrischer Energieerzeugung in Europa

Kontinent	Region	Generation in TWh	Änderung in TWh	Änderung in %
Europa	Osten	50.50	-0.60	-1.00
	Norden	227.72	3.32	1.46
	Süden	96.60	-1.79	-1.82
	Westen	142.39	-1.73	-1.28

Anmerkung: Ungenauigkeiten bei der prozentualen Änderung ergeben sich aufgrund von Rundungsfehlern. Die Untersuchungsperiode ist 2050, die Vergleichsperiode ist 2005. Die Schweiz ist Teil der Region Westen.

Quelle: Hamududu und Killingtveit (2012), S. 316.

Basierend auf BfS Erzeugungszahlen von 2005 wird der absolute Produktionsverlust im Jahr 2050 berechnet. Dieser ist in Tabelle 130 dargestellt.

Tabelle 130: Erzeugungsverluste der Schweizer Wasserkraftwerke in 2050

Produktion Basisperiode	Relative Änderung	Produktion 2050	Absolute Änderung
32'759	-1.28%	32'340	-419

Anmerkung: Produktionsangaben in GWh.

Quelle: Hamududu und Killingtveit (2012), Inländische Elektrizitätserzeugung gemäss BfS Elektrizitätserzeugung

Zur monetären Quantifizierung wird die Produktionsänderung mit einem Strompreis von CHF 60 pro MWh multipliziert (d.h. CHF 60'000 pro GWh).

Tabelle 131: Umsatzverluste der Schweizer Wasserkraftwerke

Strompreis pro GWh	Umsatz Wasserkraft in der Basisperiode (Mio. CHF)	Umsatz mit Wasserkraft 2050 (Mio. CHF)	Absolute Änderung (Mio. CHF)
60'000	1'965	1'940	-26

Anmerkung: Untersuchungsperiode 2050, Basisperiode 2005.

Quelle: BfS-Teuerungsstatistik, Inländische Elektrizitätserzeugung gemäss BfS Elektrizitätserzeugung

D Wasser

D.1 Faust et al. (2012): Erklärungen, Berechnungen und Resultate

Faust et al. (2012) modellieren die Wasserverfügbarkeit in der Schweiz angesichts des Klimawandels. In der Schweiz gibt es sowohl verschiedene Verbraucher (z.B. Haushalte, Landwirtschaft, Industrie), als auch verschiedene Typen von Wasser (z.B. Rohwasser, Trinkwasser).

Mit hydrologischen Modellen und Klimamodellen, alle basierend auf dem A1B Klimaszenario, wird die Veränderung der Wasserverfügbarkeit in der Schweiz im Jahr 2050 relativ zur Basisperiode 1980-2009 errechnet; sowohl ganzjährig als auch nur im Sommer. Ganzjährig variieren die Ergebnisse zwischen -6.8 Prozent und 9.4 Prozent, im Durchschnitt steigt die Wasserverfügbarkeit um 1.3 Prozent. Im Durchschnitt sinkt die Wasserverfügbarkeit im Sommer um 7.2 Prozent

In verschiedenen Szenarien und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Annahmen bezüglich der Substituierbarkeit von (Trink-)Wasser mit anderen Gütern werden die Wohlfahrtsverluste im Jahr 2050 gegenüber der Basisperiode 1980-2009 berechnet. Die Resultate sind in Tabelle 132 und Tabelle 133 dargestellt.

Tabelle 132: Preis und Wohlfahrtseffekte des Klimawandels auf Wasser in der Schweiz

Szenario	1	2	3	4	5	6	7
Klimaszenario	ETHZ	SMHI	-20%	ETHZ	ETHZ	ETHZ	ETHZ
Produktionspreis Rohwasser							
Rohwasser	115.50%	-79.90%	575.00%	180.80%	222.60%	78.40%	116.00%
Rohwasser für Bewässerung	431.30%	50.30%	596.80%	886.90%	423.40%	434.20%	1630.70%
Produktionspreis Wasser							
Industriewasser	46.60%	-32.80%	299.90%	53.10%	89.30%	31.80%	46.80%
Bewässerungswasser	64.60%	7.70%	88.90%	80.50%	63.40%	65.00%	240.10%
Trinkwasser	12.40%	-8.80%	60.90%	18.30%	23.90%	8.40%	12.50%
Trinkwasserkonsum							
Total	-3.20%	2.60%	-11.90%	-4.40%	-3.20%	-3.30%	-3.20%
Haushalte	-2.30%	1.90%	-9.10%	-3.30%	-4.20%	-1.60%	-2.30%
Wohlfahrtsänderung	-0.01%	0.01%	-0.04%	-0.01%	-0.01%	0.01%	-0.01%

Quelle: Faust et al. (2012), S. 16 und 18, BfS-Teuerungsstatistik, Wechselkursangaben von ofx.com

Tabelle 133: Preis- und Wohlfahrtseffekte des Klimawandels auf Wasser in der Schweiz

Szenario	8	9	10	11	12	13	14
Klimaszenario	ETHZ	ETHZ	ETHZ	ETHZ	ETHZ	ETHZ	ETHZ
Produktionspreis Rohwasser							
Rohwasser	115.40%	123.20%	104.10%	130.60%	102.90%	371.70%	68.50%
Rohwasser für Bewässerung	250.90%	448.40%	397.50%	429.70%	432.80%	1831.90%	242.70%
Produktionspreis Wasser							
Industriewasser	46.50%	49.30%	42.20%	52.70%	41.50%	149.40%	28.00%
Bewässerungswasser	37.90%	67.10%	59.60%	64.40%	64.80%	269.70%	36.60%
Trinkwasser	12.40%	13.20%	11.20%	14.10%	11.00%	39.70%	7.30%
Trinkwasserkonsum							
Total	-3.20%	-3.70%	-2.40%	-2.30%	-4.00%	-2.20%	-3.20%
Haushalte	-2.30%	-2.50%	-2.10%	0.00%	-4.10%	0.00%	-2.80%
Wohlfahrtsänderung	-0.01%	-0.01%	0.01%	-0.01%	-0.01%	-0.01%	0.01%

Quelle: Faust et al. (2012), S. 16 und 18, BfS-Teuerungsstatistik, Wechselkursangaben von ofx.com

In allen Szenarien resultiert maximal eine Wohlfahrtsreduktion von 0.04 Prozent gegenüber der Basisperiode 1980-2009. Dieses Worst Case Szenario geht von einer Reduktion der Wasserverfügbarkeit um 20 Prozent aus, was von keinem Klimamodell gestützt wird. Ohne diesen Ausreisser liegt der Mittelwert der Wohlfahrtsverluste bei -0.004 Prozent.

E Bauten, allgemeine Infrastruktur und soziale Infrastruktur

E.1 Müller et al. (2007) – Extremereignisse: Erklärungen, Berechnungen und Resultate

Der Bericht von Müller et al. (2007) untersucht eine Reihe von Extremereignissen, die sich durch den Klimawandel häufen werden.

Hochwasser

Hochwasser werden insbesondere im nördlichen Mittelland und im Jura in der Folge des Klimawandels vermehrt auftreten. Obwohl die jüngsten Hochwasser vor allem in den Alpen und/oder im Sommer auftraten, gibt es keine wissenschaftlichen Hinweise darauf, dass diese auf den Klimawandel zurückzuführen sind. Diese Ereignisse werden auch in Zukunft unabhängig vom Klimawandel auftreten und sind deshalb bei einer Berechnung der durch den Klimawandel verursachten Schäden nicht zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wählen Müller et al. (2007) die Hochwasser von Mai 1999 als Referenz, da diese örtlich und zeitlich denjenigen entsprechen, welche in Zukunft aufgrund des Klimawandels häufiger eintreten werden.

Die Autoren verwenden frühere deutsche Literatur, um Klimaänderungsfaktoren herzuleiten, welche die erwarteten Hochwasserabflüsse im Jahr 2050 beschreiben. Diese sind in Tabelle 134 aufgelistet.

Tabelle 134: Klimaänderungsfaktoren für Hochwasserabflüsse 2050

Jährlichkeit	Faktor
2	1.50
5	1.45
10	1.40
20	1.33
50	1.23
100	1.15
200	1.08
500	1.03
1000	1.00

Quelle: Müller et al. (2007), S. 99

Diese Tabelle ist so zu interpretieren, dass z.B. ein Ereignis mit Jährlichkeit von 20 Jahren im Jahr 2050 eine Hochwasserabflussmenge aufweist, welche 33 Prozent höher ist als in der Basisperiode 2006.

Es werden Daten von sechs Schweizer Messstationen analysiert, um die Jährlichkeit der 1999 Hochwasser pro Messstation zu bestimmen. Mit diesen Angaben und mit Annahmen bezüglich der Repräsentativität einzelner Messstationen für die Schweiz wird ein Schadensmultiplikator für 2050 von 5.88 berechnet.

Die Hochwasser von Mai 1999 verursachten in den für die Analyse relevanten Gebieten Schäden von CHF 362 Mio. Unter Berücksichtigung des Wirtschaftswachstums und der Teuerung sind das im Basisjahr 2005 CHF 419 Mio.

Ohne Anpassungsmassnahmen wird erwartet, dass ein solches Hochwasser im Jahr 2060 (abhängig vom Wirtschaftswachstum) Kosten zwischen 524 und 1'021 Mio. Franken verursacht. Die erwarteten Kosten, die dabei auf den Klimawandel zurückzuführen sind, betragen zwischen CHF 48 und 105 Mio. Die Resultate werden in Tabelle 135 zusammengefasst.

Tabelle 135: Berechnung des zusätzlichen Schadens vor Anpassungsmassnahmen

Durchschnittliches jährliches Wachstum bis 2050									
	0.90%			0.50%			2.00%		
Kosten des Ereignisses im Jahr 2050	627.00			524.30			1'021.30		
Erwartungsschaden 2050 ohne Klimaänderung	6.40			5.30			10.40		
Erwartungsschaden 2050 mit Klimaänderung	37.40			31.30			61.00		
Zusätzlicher Erwartungsschaden 2050	31.10			26.00			50.60		
Faktor zur Berücksichtigung relevanter Regionen, die 1999 nicht betroffen waren	1.50	1.25	2.00	1.50	1.25	2.00	1.50	1.25	2.00
Zusätzlicher Erwartungsschaden 2050 vor Anpassungsmassnahmen	48.30	40.21	64.36	40.42	33.68	53.89	78.67	65.61	104.89

Anmerkung: Zusätzlicher Erwartungsschaden in Mio. CHF; Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 103; BfS-Teuerungsstatistik

Es ist davon auszugehen, dass Anpassungsmassnahmen eingesetzt werden, um den Schaden solcher Ereignisse zu reduzieren. Trotz politischer Unsicherheit (v.a. bzgl. der Finanzierung und der Raumplanung) wird angenommen, dass bis 2050 Massnahmen umgesetzt werden und diese zu einer Reduktion der Erwartungsschäden um 45 Prozent führen; mit einer Bandbreite von 30-60 Prozent.

Unter Berücksichtigung dieser Anpassungsmassnahmen, resultieren erwartete Kosten zwischen CHF 16.2 und 73.4 Mio. Die Resultate sind in Tabelle 136 zusammengefasst.

Tabelle 136: Zusätzlicher Schaden nach Anpassungsmassnahmen in Mio. CHF

Durchschnittliches jährliches Wachstum bis 2050	0.90%			0.50%			2.00%		
Extrapolationsfaktor	1.50	1.25	2.00	1.50	1.25	2.00	1.50	1.25	2.00
Wirksamkeit der Anpassungsmassnahmen									
45%	26.56	22.22	43.27	22.14	18.51	36.07	35.43	29.62	57.70
60%	19.32	16.16	31.48	16.11	13.46	26.23	25.77	21.55	41.97
30%	33.81	28.27	55.08	28.18	23.57	45.90	45.08	37.71	73.44

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 105, BfS-Teuerungsstatistik

Diese erwarteten Schäden liegen gemäss Müller et al. (2007) in einer Bandbreite zwischen 0.002 und 0.006 Prozent des im Jahr 2050 erwarteten BIP.

Murgänge

Jegliche Angaben zu Murgängen werden von Müller et al. (2007) als spekulativ eingeschätzt. Obwohl Murgänge oft mit der Schmelze des Permafrosts in Verbindung gesetzt werden, entstehen viele Murgänge nicht in Gebieten mit Permafrost oder sie entstehen unabhängig von Klimaentwicklungen in den dortigen Gebieten. Es ist deshalb schwierig, eine Kausalität zwischen Murgängen, Permafrost oder Klimawandel festzustellen.

Die Murgänge, die in Gebiete mit Permafrost entstehen, werden gemäss Müller et al. (2007) nicht häufiger auftreten, aber sie werden in Zukunft mehr Material mit sich tragen. Dies wird eine Erhöhung der Schäden verursachen. Zur Quantifizierung werden alle Kosten von Murgängen zwischen 1995 und 2004 zusammengetragen. Sie betragen insgesamt CHF 200 Mio. (durchschnittlich CHF 20 Mio. pro Jahr). Es wird angenommen, dass der Jahresdurchschnitt von mitgezogenem Material gesamtschweizerisch etwa 300'000 Kubikmeter beträgt und dass Transport und Lagerung des Materials 20 CHF pro Kubikmeter kosten.

Die Klimaentwicklung wird mit Klimafaktoren dargestellt. Der Klimafaktor beschreibt, sich die Kosten in Zukunft multiplizieren. Müller et al. (2007) setzen die Bandbreite der Klimafaktoren zwischen eins und drei. Ein Klimafaktor 1 bedeutet, dass der Klimawandel keine Auswirkungen hat. Dies wird als unrealistisch bezeichnet. Aufgrund der Unsicherheit bezüglich Murgänge, Permafrost und Einfluss des Klimas wird eine obere Grenze des Klimafaktors von drei gewählt. Der Unterschied zwischen den Kosten aufgrund eines Klimafaktors 3 und denjenigen aufgrund eines Klimafaktors 1 sind die durch den Klimawandel verursachten Kosten.

Die Autoren treffen folgende Annahmen, um eine Einschätzung der Kosten von Murgängen herzuleiten:

- Die Schadenskosten entwickeln sich linear mit dem Volumen des Materials.
- Da, wo die grössten Schäden anfallen, werden geeignete Anpassungsmassnahmen eingeführt. Diese Massnahmen vermindern den Schaden um 50 Prozent und kosten 20 CHF pro Kubikmeter.

Mit diesen Annahmen werden die Ergebnisse in Tabelle 137 errechnet.

Tabelle 137: Schätzung der zusätzlichen Kosten durch Murgänge in Mio. CHF

	Referenz			2050		
	1	2	3	1	2	3
Klimafaktor	1			3		
Jährliches Wachstum	0.9%	0.5%	2.0%	0.9%	0.5%	2.0%
Transport und Lagerung (300'000 m3 à 20 CHF) bzw. Anpassungskosten	6.00	6.00	6.00	18.00	18.00	18.00
Schäden an Infrastruktur und Gebäude (mit Anpassung)	15.00	12.50	24.40	44.90	37.50	73.10
Summe der Kosten	21.00	18.50	30.40	62.90	55.50	91.10
Kostenerhöhung aufgrund Klimawandel	-	-	-	43.43	38.35	63.02

Anmerkung: Das Referenzszenario beschreibt ein Szenario ohne Klimawandel im Jahr 2050. Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 107; BfS-Teuerungsstatistik

Die Kosten sind als jährliche Kosten zu verstehen und werden gemäss Angaben von Müller et al. (2007) 0.007 Prozent des BIP im Jahr 2050 ausmachen.

Geschiebe

Das Auftauen des Permafrostes führt zu grösserem Geschiebeaufkommen. Es gibt gemäss den Autoren eine Verzögerung zwischen Schmelzen des Permafrostes und grösserem Geschiebeaufkommen. Diese Verzögerung kann von wenigen Monaten bis mehrere Jahre dauern. Aufgrund dieser Unsicherheit wird die Annahme gemacht, dass die durch Geschiebe verursachten Kosten zwei Drittel der Kosten der Murgänge betragen. Es wird kein Versuch einer detaillierteren Quantifizierung gemacht.

Die durch Geschiebe verursachten Kosten sind in Tabelle 138 dargestellt. Die Kosten sind als jährliche Kosten zu verstehen und werden gemäss Angaben von Müller et al. (2007) 0.004 Prozent des BIP im Jahr 2050 ausmachen.

Tabelle 138: Schätzung der zusätzlichen Kosten durch Geschiebe in Mio. CHF

	Geschiebekosten in 2050		
Klimaänderungsfaktor	3		
Jährliches Wachstum	0.9%	0.5%	2.0%
Durch Klimawandel verursachte Kosten	28.95	25.57	42.01

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Eigene Berechnung gestützt auf Müller et al. (2007), BfS-Teuerungsstatistik

Zusammenfassung der Extremereignisse

Die jährlichen erwarteten Kosten von Hochwasser, Murgängen und Geschiebe sind in Tabelle 139 dargestellt. Diese machen zwischen 0.0023 bis 0.018 Prozent des BIP im Jahr 2050 aus.

Tabelle 139: Zusätzliche Kosten von Extremereignissen in Mio. CHF

	Minimum	Maximum
Hochwasser	16.16	73.44
Geschiebe	0.00	42.01
Murgänge	0.00	63.02
Total	16.16	178.47

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018. Untersuchungsperiode ist 2050, Referenzperiode ist 2005.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 107.

Die Obergrenzen bei den Murgängen und den Geschieben sind mit einem «Worst-Case» Szenario berechnet, das auf Annahme von Müller et al. (2007), nicht auf Klimamodellen beruht.

E.2 Müller et al. (2007) Schleichender Klimawandel: Erklärungen, Berechnungen und Resultate

Der Bericht von Müller et al. (2007) untersucht mit einem Gleichgewichtmodell, wie sich steigende Temperaturen auf den alpinen Wintertourismus in der Schweiz auswirken. Damit der Effekt der steigenden Temperaturen auf den alpinen Wintertourismus quantifiziert werden kann, wird eine Reihe von Annahmen getroffen. Auf der Angebotsseite sind dies:

- **Sinkendes Angebot schneesicherer Skigebiete:** Es bleiben nur die Skigebiete im Markt, welche schneesicher sind.
- **Verbesserte Wettbewerbsposition der Schweiz:** Die Schweiz wird dank ihrer hochgelegenen Skigebiete international eine verbesserte Wettbewerbsposition geniessen.
- **Attraktivität höher gelegener Skigebiete durch Investitionen gesichert:** Die Attraktivität der hochgelegenen Skigebiete wird durch Investitionen (z.B. bessere Lifanlagen, Kunstschneetechnik) sichergestellt.
- **Wintersport wird teurer**

Es werden auch Annahmen bzgl. der Nachfrageseite des alpinen Wintertourismus getroffen:

- **Wegfallende Winteratmosphäre im Schweizer Mittelland:** Es kommt im Mittelland keine Winterstimmung auf. Dies reduziert den Tagestourismus, lässt den Ferientourismus aber unbeeinflusst.

- **Budget für Freizeitaktivitäten von Klimaänderung unverändert**
- **Statt Wintersportferien mehr Fernreisen:** Weil im Winter mehr Regen statt Schneefall zu erwarten ist und weil Wintersportferien mit steigenden Preisen sich im gleichen Preissegment befinden wie Fernreisen, werden zunehmend Fernreisen statt Wintersportferien gebucht.
- **Zweitwohnungen als Stabilisatoren der Nachfrage in der Schweiz:** Die Nachfrage der Zweitwohnungsbenutzer wird weniger stark reagieren, als die von Hotelgästen. Diese werden einen stabilisierenden Effekt auf die Nachfrage ausüben.
- **Steigende internationale Nachfrage:** Dank der starken Wettbewerbsposition der Schweiz wird die internationale Nachfrage im Ferientourismus steigen.

Die Angebotsseite des Tourismus wird mit einer geschachtelten Kostenfunktion, mit Arbeit, Kapital und Vorleistungen abgebildet. Es wird innerhalb des Sektors unterschieden zwischen schneeabhängigem Wintertourismus, Fernreisen, Sommertourismus und restliche Freizeitaktivitäten.

Für den schneeabhängiger Wintertourismus werden folgende Spezialitäten berücksichtigt:

- **Schnee als Ressource:** Zusätzlich zu Kapital und Arbeit ist Schnee eine notwendige Ressource für die Wertschöpfung.
- **Klimaerwärmung reduziert Ausstattung mit Ressource Schnee:** In Folge steigender Temperaturen wird die Schneemenge sinken, was die Wertschöpfung senken wird.

Die Nachfrageseite des Tourismussektors wird mit einer geschachtelten Nutzenfunktion abgebildet. Es werden dabei folgende Annahmen getroffen:

- Wintertourismus kann durch Fernreisen substituiert werden.
- Wintertourismus und Fernreisen sind durch übrige Freizeitaktivitäten und Sommertourismus substituierbar.

Mit geschätzten Substitutionselastizitäten und den in Tabelle 140 gezeigten Temperaturentwicklungen in der Schweiz wird der Wohlfahrtsverlust der Temperaturerhöhung für die Schweiz in den Jahren 2030, 2050, 2070 und 2100 berechnet.

Tabelle 140: Geschätzte Temperaturerhöhung

Jahr	Median	0.025-Quantil	0.975-Quantil
2030	1.00	0.40	1.80
2050	1.80	0.90	3.40
2070	2.60	1.20	4.70
2100	3.70	1.60	7.10

Anmerkung: Referenzperiode ist 1999

Quelle: Müller et al. (2007), S. 84

Es zeigt sich, dass «bis zum Jahre 2050...die zu erwartenden Wohlfahrtseinbussen für die Schweiz relativ moderat [sind]... Nach 2050 – also bei einer erwarteten Temperaturerhöhung von über 2°C – ist aber mit einer deutlichen Zunahme der Wohlfahrtseinbussen zu rechnen» ist (Müller et al., 2007, S. 84).

Mit dem Gleichgewichtsmodell werden folgende Wohlfahrtsverluste geschätzt (Tabelle 141).

Tabelle 141: Wohlfahrtsverluste im Wintertourismus der Schweiz in Mio. CHF p.a.

	2030	2050	2070	2100
Temperaturerhöhung	1.00	1.80	2.60	3.70
Wohlfahrtsänderung in BIP%	0.01%	0.03%	0.08%	0.10%
Kosten	62.19	179.38	607.29	1'158.37

Anmerkung: Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Quelle: Müller et al. (2007), S. 85. BfS-Teuerungsstatistik

E.3 Forzierer et al. (2018) – Industrie- und soziale Infrastrukturen: Erklärungen, Berechnungen und Resultate

Forzierer et al. (2018) quantifizieren die Auswirkungen von Extremereignissen auf Industrie- und soziale Infrastrukturen.

Industrieinfrastrukturen

Die untersuchten Industrieinfrastrukturen umfassen Wasser/Abwasser, Chemie, Raffinerien, Mineralien und Metalle. Tabelle 142 stellt dar, welche Auswirkungen die verschiedenen Extremereignisse auf diese Infrastrukturen haben können.

Tabelle 142: Auswirkungen von Extremereignissen auf Industrieinfrastruktur

Hitzeperioden	Kälteperioden	Dürren	Brände	Fluss- und Küsten- überflutungen	Stürme
Erhöhungen von Methanaustritt und Sickerwasserlauf	Kälteschaden	Bodenabsenkung	Negative Auswirkung auf Bergbaubetriebe und Produktionsstätten	Strukturschäden	Strukturschäden
Höhere Wasserbehandlungskosten		Höhere Wasserbehandlungskosten		Höhere Wasserbehandlungskosten	
Reduktion der Zerfallsrate und Produktivität		Reduktion der Zerfallsrate und Produktivität		Abnutzung von Bauten	
Reduktion der Wasserqualität		Reduktion der Wasserqualität		Reduktion der Wasserqualität	

Quelle: Forzierer et al. (2018), Online Anhang

Basierend auf den Auswirkungen von Extremereignissen auf Industrieinfrastrukturen und auf Expertengesprächen leiten Forzierer et al. (2018) her, welches Ausmass die Bedrohung von Extremereignisse auf die verschiedenen Infrastrukturen hat (vgl. Tabelle 143).

Tabelle 143: Bedrohungsausmass von Klimaereignisse auf Industrieinfrastrukturen

Industrieinfrastruktur	Hitzeperioden	Kälteperioden	Dürren	Brände	Überflutungen	Stürme
Metallindustrie	L	L	L	L	M	M
Mineralienindustrie	L	L	L	L	M	M
Chemikalienindustrie	L	L	L	L	M	M
Raffinerien	L	L	L	L	M	M
Wasser/Abwasser	M	M	M	M	H	M

Quelle: Forzierer et al. (2018), S. 100

Wasser und Abwasser sind der höchsten Bedrohung ausgesetzt. Forzierer et al. (2018) errechnen die gesamten Kosten für Industrieinfrastrukturen sowie die prozentuale Aufteilung dieser Kosten auf die einzelnen Infrastrukturen gemäss Tabelle 144 und Tabelle 145.

Tabelle 144: Kosten für Industrieinfrastruktur pro Extremereignis

Ereignis	Basisperiode	2020	2050	2080
Hitzewelle	110	1106	2641	5197
Kältewellen	12	10	2	0
Dürre	269	1927	4999	9118
Brände	6	5	7	9
Flussüberflutungen	720	911	945	1213
Küstenüberflutungen	6	29	101	199
Stürme	425			501

Anmerkung: Als Basis werden die 2000er Jahren verwendet. Angaben in Mio. EUR zum Preisniveau von 2010.

Quelle: Forzieri et al. (2018), S. 103

Tabelle 145: Verteilung der Kosten auf individuelle Industrieinfrastrukturen

Ereignis	Wasser/Abwasser	Chemikalien	Raffinerien	Mineralien	Metalle
Hitzewelle	100%	0%	0%	0%	0%
Kältewellen	100%	0%	0%	0%	0%
Dürre	70%	6%	9%	3%	12%
Brände	100%	0%	0%	0%	0%
Flussüberflutungen	34%	27%	6%	4%	29%
Küstenüberflutungen	41%	34%	4%	2%	20%
Stürme	9%	34%	14%	7%	36%

Quelle: Forzieri et al. (2018), S. 104

Aus diesen Angaben werden die Kosten pro Industrieinfrastruktur hergeleitet (vgl. Tabelle 146).

Tabelle 146: Europaweite Kosten pro Infrastruktur

Infrastruktur	Basisszenario	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Wasser/Abwasser	602	2'792	6'512	12'128
Chemikalien	357	371	589	1'113
Raffinerien	127	229	511	972
Mineralien	67	95	190	361
Metalle	395	501	894	1'666

Anmerkung: Angaben in Mio. EUR zum Preisniveau von 2010. Als Basis werden die 2000er Jahren verwendet.

Quelle: Eigene Berechnungen mit Angaben von Forzieri et al. (2018)

Zur Umrechnung der europaweiten Kosten auf die Schweiz wird wiederum der Schlüssel aus Tabelle 60 verwendet. Tabelle 147 zeigt die Erhöhung der Schweizer Kosten je Industrieinfrastruktur.

Tabelle 147: Schweizer Kostenerhöhung je Industrieinfrastruktur in Mio. CHF

Infrastruktur	2020	2050	2080
Wasser/Abwasser	75.89	234.58	441.75
Chemikalien	-6.26	2.45	20.68
Raffinerien	1.70	13.71	30.74
Mineralien	-0.12	3.94	10.25
Metalle	-3.19	13.46	41.41
Total	68.02	268.14	544.83

Anmerkung: Berechnet mit dem durchschnittlichen 2010 CHF/EUR Wechselkurs und mit BfS-Teuerungsstatistiken. Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Aufgrund von Rundungen ist es möglich, dass das Total nicht der Summe entspricht.

Küstenüberflutungen wurden in der Berechnung nicht berücksichtigt, da diese in der Schweiz nicht vorkommen können.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Forzieri et al. (2018), EZB, BfS-Teuerungsstatistik

Soziale Infrastrukturen

Soziale Infrastrukturen sind die Infrastrukturen, welche für eine Gesellschaft notwendig sind, damit die sozialen Dienste (z.B. Bildung, Gesundheit, usw.) sichergestellt werden können. Forzieri et al. (2018) fokussieren auf Auswirkungen des Klimawandels auf den Gesundheits- und den Bildungssektor. Zudem wird in der Analyse nur auf Dürren, Überflutungen, Brände und Stürme eingegangen. Es wird angenommen, dass die Bedrohung von Hitze- und Kältewellen zu klein ist, um eine signifikante Erhöhung der Kosten zu verursachen. Diese Annahme bezieht sich allerdings nur auf die Infrastrukturen: Hitze- und Kältewellen haben starke Auswirkungen auf die Gesundheit, nicht aber auf die Infrastrukturen des Gesundheitssektors (z.B. Krankenhäuser). Tabelle 148 zeigt auf, welche Auswirkungen Extremereignisse auf soziale Infrastrukturen haben können.

Tabelle 148: Auswirkungen von Extremereignissen auf soziale Infrastruktur

Dürren	Fluss- und Küstenüberflutungen	Brände	Stürme
Strukturschäden aufgrund der von der Trockenheit verursachte Bodensenkung	Strukturschäden aufgrund von Überflutungen, reduzierter Bodenstabilität und Trümmerbewegungen	Keine Angaben	Strukturschäden aufgrund von Winddruck und Trümmerteilen
Höhere Abhängigkeit von Wasserverfügbarkeit und -qualität	Reduzierte Leistungsfähigkeit von Spitälern etc.		

Quelle: Forzieri et al. (2018). Online Anhang.

Zur Quantifizierung der Kosten von Extremereignissen für soziale Infrastrukturen wird die Bedrohung pro Infrastrukturgruppe ermittelt. Forzieri et al. (2018) machen dies mithilfe von Expertengesprächen. Die Resultate sind in Tabelle 149 dargestellt.

Tabelle 149: Bedrohungsausmass von Klimaereignisse auf soziale Infrastrukturen

Industrieinfrastruktur	Hitzewellen	Kältewellen	Dürren	Brände	Fluss- und Küstenüberflutungen	Stürme
Bildung	L	L	M	M	H	L
Gesundheit	L	L	M	M	H	L

Quelle: Forzieri et al. (2018), S. 100

Wie bei den Industrieinfrastrukturen werden Gesamtkosten pro Extremereignis und prozentuale Aufteilungen der Kosten auf die Infrastrukturgruppen errechnet (Tabelle 150 und Tabelle 151).

Tabelle 150: Kosten pro Extremereignis pro soziale Infrastruktur

Ereignis	Basis	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Dürre	13	105	269	456
Brände	14	13	18	19
Flussüberflutungen	245	298	296	434
Küstenüberflutungen	3	16	47	82
Stürme	286	0	0	348

Forzieri et al. (2018), S. 103

Tabelle 151: Prozentuale Aufteilung der Kosten pro Extremereignis

Ereignis	Bildung	Gesundheit
Dürre	36%	64%
Brände	36%	46%
Flussüberflutungen	39%	61%
Küstenüberflutungen	54%	46%
Stürme	36%	46%

Forzieri et al. (2018), S. 104

Mittels dieser Gesamtkosten und prozentualen Aufteilungen werden die Kosten pro Infrastruktur berechnet (vgl. Tabelle 152).

Tabelle 152: Europaweite Kosten pro Extremereignis pro soziale Infrastruktur

Infrastruktur	Basisperiode	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Bildung	209.85	167.34	244.14	509.82
Gesundheit	297.15	262.32	382.62	763.12

Anmerkung: Angaben in 2010 Mio. EUR

Als Basis werden die 2000er Jahren verwendet.

Quelle: Eigene Berechnungen mit Angaben von Forzieri et al. (2018)

Zur Umrechnung der die europaweiten Kosten auf die Schweiz wird wiederum der Schlüssel aus Tabelle 60 verwendet. Die Resultate sind in Tabelle 153 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass erst ab 2080 mit einer Erhöhung der Kosten im Bildungs- und Gesundheitssektor zu rechnen.

Tabelle 153: Schweizer Kostenerhöhung pro soziale Infrastruktur und Jahr in Mio. CHF

Infrastruktur	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Bildung	-5.80	-3.01	6.30
Gesundheit	-7.06	-2.18	11.49
Total	-12.85	-5.19	17.79

Anmerkung: Berechnet mit dem durchschnittlichen 2010 CHF/EUR Wechselkurs und mit BfS-Teuerungsstatistiken. Bewertung zum Preisniveau von 2018.

Aufgrund von Rundungen ist es möglich, dass das Total nicht der Summe entspricht.

Küstenüberflutungen wurden in der Berechnung nicht berücksichtigt, da diese in der Schweiz nicht vorkommen können.

Quelle: Eigene Berechnungen gestützt auf Forzieri et al. (2018), EZB, BfS-Teuerungsstatistik

E.4 Vöhringer et al. (2017) – Tourismus: Erklärungen, Berechnungen und Resultate

In ihrem Bericht schätzen Vöhringer et al. (2017) den Einfluss des Klimawandels auf den Tourismus ab. Sie unterscheiden zwischen Sommer- und Wintertourismus. Für die Berechnung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Tourismus verwenden die Autoren ein Modell des allgemeinen volkswirtschaftlichen Gleichgewichts. Der Tourismus wird dabei in «Winter Tourismus mit Übernachtung», «Winter Tagestourismus» und «sonstiger Tourismus» aufgeteilt. Touristen können diese Angebote gegenseitig substituieren.

Wintertourismus

Für den Wintertourismus sind vor allem steigende Temperaturen eine Herausforderung. Diese führen zu höheren Schneefallgrenzen und es wird für Skigebiete schwieriger, Schneesicherheit zu gewährleisten. Schmelzender Permafrost und der resultierende Verlust an Hangstabilität sind ebenfalls negative Auswirkungen steigender Temperaturen. Diese können allerdings nicht quantifiziert werden.

Es wird zwischen Schneeressourcen für Tourismus mit und ohne Übernachtung unterschieden. Tagestouristen haben aufgrund der reduzierten Dauer des Aufenthalts generell weniger Ausweichmöglichkeiten. Deshalb werden sie vom Klimawandel stärker betroffen. Entscheidend für den Wintertourismus ist die Schnee-Entwicklung. Es werden drei Szenarien modelliert:

- **Worst-Case für Europa (Worst-Case):** Skigebiete ausserhalb Europas werden nicht vom Klimawandel tangiert. Sie haben keine Einschränkungen bezüglich Schneemenge oder Schneefallgrenze.
- **50 Prozent (50%):** Die Skigebiete ausserhalb Europas werden 50 Prozent des Rückgangs von Europa erleben.
- **Klimawandel für Alle (All):** Alle Skigebiete weltweit sind gleich vom Klimawandel tangiert.

Die Schneemengenentwicklungen in diesen drei Szenarien und in den unterschiedlichen Klimaszenarien sind in Tabelle 154 zu finden.

Tabelle 154: Schneemengenrückgang im Jahr 2060 gegenüber 2010 in %

	RCP3PD mit Adaptationsmassnahmen			A1B mit Adaptationsmassnahmen			A1B ohne Adaptationsmassnahmen		
	Worst-Case	50%	All	Worst-Case	50%	All	Worst-Case	50%	All
Schneemengen Rückgang im Tourismus mit Übernachtung									
CH	-2.00	-2.00	-2.00	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50	-12.50
EU	-3.40	-3.40	-3.40	-23.40	-23.40	-23.40	-23.40	-23.40	-23.40
OECD	0.00	-2.00	-4.00	0.00	-10.00	-20.00	0.00	-10.00	-20.00
USA	0.00	-2.00	-4.00	0.00	-10.00	-20.00	0.00	-10.00	-20.00
BRIC	0.00	-2.00	-4.00	0.00	-10.00	-20.00	0.00	-10.00	-20.00
ROW	0.00	-2.00	-4.00	0.00	-10.00	-20.00	0.00	-10.00	-20.00
Schneemengen Rückgang im Tourismus ohne Übernachtung									
CH	-4.00	-4.00	-4.00	-21.80	-21.80	-21.80	-21.80	-21.80	-21.80

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 86

Für das Szenario A1B wird eine Ausgangslage mit und eine ohne Adaptationsmassnahmen modelliert. Die Adaptationsmassnahmen beziehen sich auf die Effizienz der künstlichen Schneesherstellung. Das Szenario RCP3PD wird nur mit Adaptationsmassnahmen präsentiert. Der resultierende Wohlfahrtsverlust ist in Tabelle 155 aufgelistet.

Tabelle 155: Wohlfahrtsänderung im Schweizer Wintertourismus

	RCP3PD mit Adaptationsmassnahmen			A1B mit Adaptationsmassnahmen			A1B ohne Adaptationsmassnahmen		
	Worst-Case	50%	All	Worst-Case	50%	All	Worst-Case	50%	All
Schweizer Tourismus mit Übernachtung									
Produktion	-0.10	0.00	0.03	-0.60	-0.10	0.60	-3.10	-2.80	-2.50
Konsum	-0.20	-0.20	-0.20	-1.10	-1.20	-1.20	-3.50	-3.80	-4.20
Export	-0.10	0.00	0.20	-0.20	0.80	2.30	-2.90	-2.20	-1.20
Import	-0.40	-0.40	-0.40	-3.60	-3.60	-3.70	-7.90	-8.30	-9.00
Kunstschnee	1.10	1.30	1.40	8.40	9.20	10.50	0.00	0.00	0.00
Produzentenpreis	0.20	0.20	0.20	1.50	1.50	1.60	5.20	5.70	6.40
Schweizer Tourismus ohne Übernachtung									
Produktion	-0.40	-0.40	-0.40	-2.80	-2.80	-2.80	-5.30	-5.40	-5.40
Konsum	-0.40	-0.40	-0.40	-2.80	-2.80	-2.80	-5.30	-5.40	-5.40
Kunstschnee	1.00	1.00	1.00	7.20	7.20	7.20	0.00	0.00	0.00
Produzentenpreis	0.70	0.70	0.70	5.10	5.10	5.40	9.30	9.20	9.10
Schweizer Tourismus insgesamt									
Wohlfahrt	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03

Anmerkung: Import bezeichnet, wie viel Schweiz ins Ausland für Tourismus gehen (Import deshalb, weil das Geld ins Ausland fliesst); Export bezeichnet, wie viel Ausländer in die Schweiz für Tourismus gehen (Export deshalb, weil das Geld in die Schweiz fliesst).

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 86

Es werden keine monetären Quantifizierungen vorgenommen. Allerdings ist klar, dass der Wohlfahrtsverlust gegenüber 2010 klein ist. Zum Teil werden auch Wohlfahrtsgewinne erwartet. Allerdings gibt es hier Ungleichheiten: Einerseits eine Verschiebung weg von Tagestourismus hinzu Tourismus mit Übernachtung. Andererseits werden die höhergelegenen Skigebiete profitieren, während die tiefergelegenen Umsatzeinbussen hinnehmen müssen.

Die Wohlfahrt steigt im Szenario ohne Anpassungsmassnahmen. Grund dafür ist, dass die Schweiz aufgrund ihrer hochgelegenen Skigebiete eine starke Wettbewerbsposition hat. Wenn europaweit keine Investitionen für Beschneiungsanlagen getätigt werden, haben viele Nachbarländer kein ausreichendes Angebot an schneesicheren Skigebieten. In einer solchen Situation werden die Importe (Ausländer, die in die Schweiz kommen) gegenüber den Exporten (Schweizer, die ins Ausland gehen) steigen. Dies wird sich positiv auf die Schweizer Wohlfahrt auswirken.

Sommertourismus

Steigenden Temperaturen haben für den Sommertourismus zwei wesentliche Einflüsse:

- Weltweit werden eher kühlere Länder als Feriendestination gewählt.
- Die Sommerperiode wird verlängert, sodass auch bereits im Frühling oder bis in den Herbst hinein Sommeraktivitäten ausgeführt werden können.

Um die Tourismusflüsse der Zukunft abzubilden, verwenden Vöhringer et al. (2017) das HTM (Hamburg Tourism Model), welches mit einer angenommenen Temperaturentwicklung und der wirtschaftlichen Entwicklung die Tourismusflüsse zwischen und innerhalb von Ländern schätzt. Diese Berechnung dient dann als Input für das Modell des allgemeinen volkswirtschaftlichen Gleichgewichts.

In allen verwendeten Klimaszenarien wird es in der Schweiz zu einem Wohlfahrtsgewinn kommen. Dieser ist für das A1B Szenario am höchsten. Allerdings ist dieses Ergebnis mit Vorsicht zu interpretieren, da es aufgrund der Schätzmethode und nichtkontrollierten Variablen grosse Unsicherheiten gibt. Es wird z.B. nicht berücksichtigt, ob die Gesellschaft in Zukunft Auslandsreisen aufgrund des Fliegens vermeiden wird und es wird nur die Temperatur als Klimavariablen verwendet, nicht aber die Niederschlagsmenge.

Tourismus insgesamt

Tabelle 156 zeigt, wie sich in den Szenarien A1B und RCP3PD der Tourismus (sowohl im Sommer als auch im Winter) in der Schweiz entwickeln wird. Für beide Szenarien wird mit einer mittleren Schneeeentwicklung und von einem Szenario mit Anpassungsmassnahmen im Wintertourismus gerechnet.

Tabelle 156: Wohlfahrtsänderung im Schweizer Tourismus in %

	RCP3PD	A1B
Schweizer sonstige Tourismus (Sommer)		
Produktion	1.40	3.00
Konsum	0.10	0.30
Export	-0.70	-1.60
Import	-6.00	-12.90
Schweizer Wintertourismus mit Übernachtung		
Produktion	0.03	0.60
Konsum	-0.20	-1.20
Export	0.20	2.30
Import	-0.40	-3.70
Kunstschnee	1.40	10.50
Produzentenpreis	0.20	1.60
Schweizer Wintertourismus ohne Übernachtung		
Produktion	-0.40	-2.80
Konsum	-0.40	-2.80
Kunstschnee	1.00	7.20
Produzentenpreis	0.70	5.10
Wohlfahrtsänderung	0.08	0.17

Quelle: Vöhringer et al. (2017), S. 91