

# MASTERARBEIT



## **Die Zukunft der künstlichen Beschneidung in Mitteleuropa: Konzeptionierung eines Decision Support Systems**

**Christian Reinboth**

Matrikelnummer q7952694

Studiengang infernum | FernUniversität Hagen

0152 0900 6600 | creinboth@googlemail.com

Eisenberg 4b | 38855 Wernigerode

Erstbetreuung

Prof. Dr. Rolf Kümmel

Fraunhofer UMSICHT

Zweitbetreuung

Prof. Dr. Carmen de Jong

Université de Strasbourg

26.06.2019

**Abstract (Deutsch) | Schlagworte: Kunstschnee, Wintersport, Tourismus**

Wärmere Winter, weniger Naturschnee, verstärkt auftretende Extremwetterereignisse und die schleichende Verlagerung der für die Produktion von Kunstschnee optimalen Witterungsbedingungen in die Zeitspanne um Ostern stellen das langfristige wirtschaftliche Überleben vieler Skigebiete in Frage. Während einige der von diesen Entwicklungen betroffenen Kommunen und privaten Betreiber mit Investitionen in immer leistungsfähigere Beschneigungstechnik reagieren, bemüht man sich in anderen Wintersportgebieten um den Aufbau schneeunabhängiger Alternativangebote. Welche Herangehensweise sich langfristig als erfolgreich erweist, wird nicht nur vom weiteren Fortschreiten des anthropogenen Klimawandels, sondern auch von der technischen Leistungsfähigkeit und wirtschaftlichen Tragfähigkeit der Beschneigungstechnik, von deren touristischer und gesellschaftlicher Akzeptanz sowie von der Nachfrage nach Angebotsalternativen abhängen. Im Rahmen dieser Arbeit wird – auf Basis eines umfangreichen interdisziplinären Literaturreviews – ein System zur Unterstützung von Entscheidungen für oder gegen künstliche Beschneigung skizziert, als simpler Softwareprototyp realisiert und dessen Einsatz am Beispiel des Wintersportorts Schierke im Harz demonstriert.

**Abstract (English) | Keywords: Artificial Snow, Winter Sports, Tourism**

Warmer winters, less natural snow, increased occurrence of extreme weather events and the creeping shift of optimal weather conditions for the production of artificial snow to the period before Easter, call into question the long-term economic survival of many ski resorts. While some of the municipalities and private operators affected by these changes are responding by investing in increasingly efficient snow-making technology, other winter sports resorts are endeavouring to develop snow-independent alternatives. What proves to be successful in the long run will depend not only on the progress of anthropogenic climate change, but also on the technical performance and economic viability of modern snow-making technology, on the acceptance of technology-supported winter sports offers and on the demand for alternatives. In this thesis – based on an extensive interdisciplinary literature review – a Decision Support System (DSS) for artificial snowmaking is outlined, realized as a simple software prototype and its use demonstrated by the example of the winter sports resort Schierke in the Harz Mountains.

**Inhaltsverzeichnis**

Abstract (Deutsch).....	2
Abstract (English).....	2
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	6
Abkürzungsverzeichnis.....	7
1. Einführung.....	9
1.1 Klima und Tourismus.....	9
1.2 Zielstellung und Struktur.....	10
2. Literaturauswahl.....	12
2.1 Methodisches Vorgehen.....	12
2.2 Quantitatives Ergebnis.....	14
3. Künstliche Beschneigung.....	17
3.1 Historische Entwicklung.....	17
3.2 Stand der Technik.....	19
3.3 Witterungsbedingungen.....	24
4. Ökologische Auswirkungen.....	27
4.1 Auswirkungen auf den Boden.....	27
4.2 Auswirkungen auf den Wasserhaushalt.....	29
4.3 Auswirkungen auf die Flora.....	32
4.4 Auswirkungen auf die Fauna.....	34
4.5 Auswirkungen auf das Landschaftsbild.....	36
4.6 Energieverbrauch künstlicher Beschneigung.....	37
4.7 Beurteilung der ökologischen Auswirkungen.....	39
5. Wirtschaftliche Tragfähigkeit.....	40
5.1 Ökonomische Bedeutung des Wintersports.....	40
5.2 Ansprüche an künstliche Beschneigung.....	40
5.3 Kosten künstlicher Beschneigung.....	43
5.4 Wirtschaftlichkeit für Betreiber.....	44
5.5 Wirtschaftlichkeit für Kommunen.....	45
5.6 Akzeptanz künstlicher Beschneigung.....	47
5.7 Beurteilung der wirtschaftlichen Tragfähigkeit.....	49

6. Beschneigung und Klimawandel.....	51
6.1 Stand der Klimaforschung.....	51
6.2 Klimamodelle.....	53
6.3 Konsequenzen für den Wintersport.....	56
6.4 Adaptionstrategien.....	60
7. Konzeptionierung eines Decision Support Systems.....	65
7.1 Methodisches Vorgehen.....	65
7.2 Identifizierte Einflussfaktoren.....	66
7.3 Ausgestaltung des DSS.....	73
8. Anwendung des DSS am Beispiel des Harzes.....	77
8.1 Kurzvorstellung des Skigebiets.....	77
8.2 Bestimmung der Parameter.....	81
8.3 Vorstellung der Ergebnisse.....	84
8.4 Interpretation der Ergebnisse.....	90
8.5 Kritische Würdigung der Modelle.....	92
9. Fazit und Ausblick.....	94
9.1 Fazit.....	94
9.2 Ausblick.....	96
Literaturverzeichnis.....	98
Bildquellenverzeichnis.....	114
Anhang A: Ergebnisse der Literaturrecherche.....	116
Anhang B: ReKIS-Auswertung zur Saison 2006/2007.....	117
Anhang C: Detailergebnisse der Standortanalyse.....	122
Eidesstattliche Erklärung.....	130

Hinweis: Zur Verbesserung des Leseflusses wurden in dieser Arbeit Nennungen von Personen und Personengruppen überwiegend in der weiblichen Form gehalten, inkludieren aber selbstverständlich beide Geschlechter.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteil der künstlich beschneiten Pistenfläche in Wintersportgebieten in den Alpen im Jahr 2017.....	19
Abbildung 2: Eine Schneelanze nach einem gescheitertem Beschneivungsversuch am Hexenritt-Parkplatz in Braunlage im Oberharz.....	21
Abbildung 3: Maschinelle Pistenbearbeitung (Foto: Bad Kleinkirchheim ).....	27
Abbildung 4: Pistenbeleuchtung im finnischen Ruka (Foto: Timo Newton-Syms).....	35
Abbildung 5: Ergebnis einer im Auftrag der ZEIT im Jahr 2014 durchgeführten Befragung unter deutschen Erwachsenen zur Vertretbarkeit der Erzeugung von Kunstschnee.....	48
Abbildung 6: Adaptionstrategien, segmentiert nach ihrer Zielstellung (Aufrechterhaltung / Ersatz des klassischen Skisports) und ihrer Witterungsabhängigkeit.....	61
Abbildung 7: Entwicklung der Jahresmitteltemperatur auf dem Brocken zwischen 1848 und 2014.....	78
Abbildung 8: Das Logo des Regionalen KlimaInformationsSystems ReKIS.....	82
Abbildung 9: Standort der DWD-Wetterstation in Schierke in unmittelbarer Nähe zum Parkhaus „Am Winterbergtor“.....	83
Abbildung 10: Standort der simulierten REMO-Wetterstation nahe Schierke.....	84
Abbildung 11: Entwicklung der Anzahl der für Alpin-Ski auf Basis von Naturschnee geeigneten Tage zwischen 1951/1952 und 2016/2017 (Mittelwert in grün).....	87
Abbildung 12: Entwicklung der Anzahl von Tagen mit natürlichem Schneefall zwischen 1951/1952 und 2099/2100 (5-Jahres-Schritte, gleitender Mittelwert über 10 Jahre in rot, Gesamtmittel in grün).....	88
Abbildung 13: Entwicklung der Anzahl von Tagen zwischen 1951 und 2100, an denen eine künstliche Beschneivung möglich bzw. möglich gewesen wäre (5-Jahres-Schritte, gleitender Mittelwert über 10 Jahre in rot, Gesamtmittel in grün).....	89

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schwellwerte für die gegenwärtig zu empfehlende Mindesthöhe.....	67
Tabelle 2: Schwellwerte für die zukünftig zu empfehlende Mindesthöhe.....	67
Tabelle 3: Schwellwerte für den Parameter Lufttemperatur.....	68
Tabelle 4: Schwellwerte für den Parameter Luftfeuchtigkeit.....	68
Tabelle 5: Schwellwerte für den Parameter Feuchttemperatur.....	69
Tabelle 6: Schwellwerte für den Parameter Schneehöhe (Ski-Alpin).....	69
Tabelle 7: Schwellwerte für den Parameter Schneehöhe (Ski-Langlauf).....	69
Tabelle 8: Einhaltung der 100-Tages-Regel zwischen 1951 und 2017.....	86
Tabelle 9: Entwicklung der Schneefalltage zwischen 1951 und 2100.....	88
Tabelle 10: Entwicklung der Anzahl von Tagen zwischen den 1950ern und den 2090ern, an denen eine Beschneigung möglich gewesen bzw. möglich wäre.....	89
Tabelle 11: Entwicklung der Anzahl von disruptiven Perioden zwischen den 1950ern und den 2090ern.....	90
Tabelle 12: Ergebnisse der deutschsprachigen Literaturrecherche.....	116
Tabelle 13: Ergebnisse der englischsprachigen Literaturrecherche.....	116
Tabelle 14: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 1950er.....	122
Tabelle 15: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 1960er.....	122
Tabelle 16: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 1970er.....	123
Tabelle 17: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 1980er.....	123
Tabelle 18: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 1990er.....	124
Tabelle 19: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 2000er.....	124
Tabelle 20: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 2010er.....	125
Tabelle 21: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2010er.....	125
Tabelle 22: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2020er.....	126
Tabelle 23: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2030er.....	126
Tabelle 24: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2040er.....	127
Tabelle 25: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2050er.....	127
Tabelle 26: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2060er.....	128
Tabelle 27: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2070er.....	128
Tabelle 28: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2080er.....	129
Tabelle 29: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2090er.....	129

**Abkürzungsverzeichnis**

BASE	Bielefeld Academic Search Engine (Online-Angebot der Uni Bielefeld)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und For- schung der Bundesrepublik Deutschland
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (e.V.)
DAV	Deutscher Alpenverein
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DKRZ	Deutsches Klimarechenzentrum
DOAJ	Directory of Open Access Journals (Online-Verzeichnis freier Fachjournale)
DSS	Decision Support System (Entscheidungsunterstützungssystem)
DWD	Deutscher Wetterdienst
EU	Europäische Union
HSB	Harzer Schmalspurbahnen GmbH
HZG	Helmholtz-Zentrum Geesthacht
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klima- änderungen der Vereinten Nationen)
LLC	Limited Liability Company (Unternehmensrechtsform in den USA)
MPIfM	Max-Planck-Institut für Meteorologie
NABU	Naturschutzbund Deutschland (e.V.)

NSAA	National Ski Areas Association (Nationalverband der US-Skigebiete)
OECD	Organisation for Economic Co-Operation and Development (Internationale Organi- sation zur Förderung von Demokratie und Marktwirtschaft)
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (in den USA für den Arbeitsschutz zuständige Behörde)
ppm	Parts per Million (Anteile pro Million, eine Hilfsmaßeinheit aus der Physik)
REMO	Regional Modell (Klimamodell von DWD, DKRZ, MPIfM und HGZ)
ReKIS	Regionales Klimainformationssystem der Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen
SSOAR	Social Science Open Access Repository (Online-Angebot des Leibniz-Instituts für Sozialwissenschaften Mannheim)
TU	Technische Universität
UNEP	United Nations Environment Programme (Umweltprogramm der Vereinten Nationen)
WMO	World Meteorological Organization (Weltorganisation für Meteorologie der Vereinten Nationen)
WTO	World Tourism Organization (Weltorganisation für Tourismus der Vereinten Nationen)
VzSB	Verein zum Schutz der Bergwelt (e.V.)

## 1. Einführung

### 1.1 Klima und Tourismus

Der Tourismus ist mit einem Anteil von etwa 9% am kumulierten Bruttoinlandsprodukt (BIP) aller Staaten (vgl. Bernhart et al. 2017, S. 6) sowie an nahezu 10% aller Arbeitsplätze (vgl. Amelung et al. 2016, S. 46) eine der bedeutendsten und zugleich wachstumsstärksten (vgl. Reintinger 2016, S. 1) Branchen überhaupt: Allein der internationale Tourismus ist seit 1950 von 25 Millionen Ankünften auf 1,2 Milliarden Ankünfte im Jahr 2015 angewachsen (vgl. Amelung et al. 2016, S. 46). In einer touristisch geprägten Region wie den Alpen kommen 120 Millionen Gäste auf gerade einmal 14 Millionen Einwohner (vgl. Bender et al. 2011, S. 403). Für den bayerischen Wintersportort Garmisch-Partenkirchen bedeutet dies beispielsweise bei 27.000 Bürgerinnen und Bürgern und 1,3 Millionen Übernachtungs- sowie 5 Millionen Tagesgästen ein „Verhältnis von 223 Fremden pro Einwohner“ (Borck 2013, S. 1) – Zahlen, welche die enorme wirtschaftliche und soziale Bedeutung des Tourismus erahnen lassen. Allein in Deutschland sichert der Tourismus nahezu 3 Millionen Jobs Arbeitsplätze – mehr als beispielsweise das Bankwesen, die Pflegewirtschaft oder die Automobilindustrie (vgl. Schmidt 2015, S. 9).

Mit dem Fortschreiten des anthropogenen Klimawandels ist zu beobachten, dass sich die lokale Witterung an touristischen Destinationen zunehmend von einer Ressource (sonnige Strände, verschneite Skipisten) zu einem limitierenden Faktor wandelt (vgl. Reintinger 2016, S. 4). Gerade der Wintertourismus – und insbesondere der Wintersporttourismus – ist von diesem Wandel in besonderem Maße betroffen: Während die Attraktivität der Reiseorte für Skisportler wesentlich mit den dortigen Witterungs- und damit Schneebedingungen verbunden ist, vollzieht sich der Klimawandel in Gebirgsregionen zugleich deutlich schneller und mit höherer Intensität als in anderen Klimazonen (vgl. Bender et al. 2011, S. 406).

Diese klimatischen Veränderungen äußern sich bereits heute in zahlreichen Ski-gebieten weltweit, so unter anderem durch weniger Schneefall und verminderte Schneesicherheit, ein weniger „winterliches“ Landschaftsbild mit fehlendem Schnee und (im Hochgebirge) verschwindenden Gletschern, ausbleibenden Schnee während der Weihnachtsfeiertage, mehr Niederschläge in Form von Regen und Starkregen, höhere Betriebs- und Investitionskosten durch die Beschnei-

ung und den Aufbau von Angebotsalternativen sowie eine zunehmende Wahrscheinlichkeit für extreme Wetterereignisse und damit einhergehende Bedrohungen wie Überschwemmungen und Erdbeben (vgl. u.a. Gebhardt et al. 2011, S. 84; Müller et al. 2013, S. 1; Dawson & Scott 2010, S. 220; Abegg 2011, S. 17; Tölzer & Schaffler 2017; S. 26). In zahlreichen mitteleuropäischen Wintersportorten kam es in den dort besonders warmen Wintersaisons 2005/2006, 2006/2007 und 2013/2014 schon zu Besucherausfällen in einem für touristische Akteure existenzbedrohendem Umfang (vgl. u.a. Tölzer & Schaffler 2017; S. 27).

Die Wintersportindustrie versucht diesem Problem derzeit primär durch technische Anpassungsmaßnahmen entgegenzuwirken, deren wichtigste die energieintensive und ökologisch umstrittene Produktion von sogenanntem technischem Schnee bzw. Kunstschnee ist. Die Tourismuswirtschaft ist damit zugleich Opfer wie auch – insbesondere aufgrund des durch sie verursachten Verkehrsaufkommens mit 8% der weltweiten Treibhausgasemissionen (vgl. Lupp et al. 2013, S. 69) – ein wesentlicher Treiber des Klimawandels (vgl. Bischof et al. 2017, S. 223; Ackermann 2014, S. 34). Sie ist daher ein hochinteressantes Studienobjekt mit Blick auf die Entwicklung und Umsetzung von Strategien zum Umgang mit dem Klimawandel durch das kollaborative Wirken individueller Wirtschaftsakteure.

## 1.2 Zielstellung und Struktur

Im Rahmen dieser Arbeit wird versucht, den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Debatte um die ökologischen Folgen sowie um die technische und wirtschaftliche Zukunftsfähigkeit künstlicher Beschneigung über ein interdisziplinär ausgelegtes Literaturreview abzubilden. Hierfür wurden deutsch- und englischsprachige Publikationen aus verschiedenen relevanten Fachrichtungen wie etwa der Klimatologie, der Geologie, der Hydrologie, den Ingenieurwissenschaften, den Wirtschaftswissenschaften und der Konsumentenpsychologie aus den Jahren 2009 bis 2018<sup>1</sup> identifiziert, kategorisiert und ausgewertet. Die methodische

---

1 Der gewählte Zeitraum endet bereits 2018, um Inkonsistenzen durch Neuveröffentlichungen während der laufenden Recherchen zu vermeiden. Er beginnt 2009, da aufgrund der dynamischen Erkenntnisentwicklung im Feld der Klima(folgen)forschung davon ausgegangen wird, dass Beiträge mit einem Alter von über zehn Jahren von untergeordneter Relevanz für die zu betrachtenden Forschungsfragen sind.

Vorgehensweise sowohl bei der Literatursauswahl als auch bei der Auswertung der aufgefundenen Literatur ist Gegenstand der Ausführungen in Kapitel 2.

Die aus diesem Literaturreview gewonnenen Erkenntnisse werden im ersten Teil der Arbeit vorgestellt, wobei neben der Historie und grundsätzlichen Funktionsweise von künstlicher Beschneigung (Kapitel 3) auch deren Auswirkungen auf Flora, Fauna, Bodenqualität, Landschaftsbild und Wasserhaushalt (Kapitel 4) sowie deren wirtschaftliche Bedeutung und gesellschaftliche Akzeptanz (Kapitel 5) betrachtet werden. Der Fokus liegt dabei auf der vergleichenden und wertenden Zusammenführung von Erkenntnissen aus den verschiedenen Fachdisziplinen. Diese systematische Übersicht stellt den inhaltlichen Kern dieser Arbeit dar.

Die über das Literaturreview geschaffene Informationsbasis wird im zweiten Teil der Arbeit weiter verdichtet und mit aktuellen Ergebnissen der Klimaforschung zusammengeführt (Kapitel 6), um die Grundlage für ein ökologisches und betriebswirtschaftliches Decision Support System (DSS, engl. für Entscheidungsunterstützungssystem) zu schaffen, welches im weiteren Verlauf der Arbeit in Grundzügen skizziert und als einfacher Softwareprototyp realisiert wird (Kapitel 7). Der praktische Einsatz dieses DSS wird anschließend am Beispiel des Wintersportorts Schierke im Harz – einem deutschen Mittelgebirge – demonstriert (Kapitel 8). Ein abschließendes Fazit (Kapitel 9) fasst den derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnisstand zur Zukunftsfähigkeit künstlicher Beschneigung zusammen und bietet einen Ausblick auf die zur Weiterentwicklung des DSS-Prototypen bis hin zu einer kommerziell nutzbaren Software noch erforderlichen Arbeitsschritte.

## 2. Literaturauswahl

### 2.1 Methodisches Vorgehen

Zur Schaffung einer Informationsbasis für das zu konzeptionierende DSS wurde zwischen dem 20.01.2019 und dem 03.02.2019 eine umfassende Literaturrecherche in verschiedenen akademischen Suchmaschinen, akademischen Social Networks und akademischen Repositorien durchgeführt. Die dabei erfassten Publikationen mussten alle der hier nachfolgend aufgeführten Kriterien erfüllen:

- Die Publikation muss in deutscher oder englischer Sprache erfolgt sein.
- Die Publikation muss im Zeitraum zwischen 2009 und 2018 erfolgt sein.
- Die Publikation muss entweder vollständig frei verfügbar (Open Access) sein oder über das Campus-Netz der Hochschule Harz (dem aktuellen Arbeitsplatz des Autors) abgerufen werden können.
- Die Publikation muss über mindestens eine/n von zehn Suchbegriffen oder Suchbegriffskombinationen auffindbar sein, die auf den nachfolgenden Seiten aufgeführt werden.
- Die Publikation muss über mindestens eine/s von zwölf Suchmaschinen, Social Networks oder Repositorien auffindbar sein, die ebenfalls auf den nachfolgenden Seiten aufgeführt werden.
- Titel und / oder Abstract müssen erkennen lassen, dass die Publikation ökonomische, ökologische, technische, politische oder gesellschaftliche Aspekte künstlicher Beschneigung berührt.

Als für das Thema der Arbeit wesentliche Suchbegriffe wurden auf Basis einer initialen qualitativen Recherche in deutscher Sprache

- „Kunstschnee“,
- „Beschneigung“,
- „Künstlicher Schnee“,
- „Technischer Schnee“

- und „Schneesicherheit“

sowie in englischer Sprache

- „Snow-Making“,
- „Snowmaking“,
- „Artificial Snow“,
- „Technical Snow“
- und „Snow Reliability“

festgelegt. Die Suche wurde über die akademischen Suchmaschinen

- EconBiz<sup>2</sup>,
- OpenGrey<sup>3</sup>,
- Science.gov<sup>4</sup>,
- Google Scholar<sup>5</sup>,
- Microsoft Academic Search<sup>6</sup>,
- BASE (Bielefeld Academic Search Engine)<sup>7</sup>
- und das DOAJ (Directory of Open Access Journals)<sup>8</sup>

sowie über die akademischen Sozialen Netzwerke

- Academia<sup>9</sup>,
- Mendeley<sup>10</sup>

---

2 <http://www.econbiz.de>

3 <http://www.opengrey.eu>

4 <http://www.science.gov>

5 <http://scholar.google.de>

6 <http://academic.microsoft.com>

7 <http://www.base-search.net>

8 <http://www.doaj.org>

9 <http://www.academia.com>

10 <http://www.mendeley.com>

- und ResearchGate<sup>11</sup>

und die akademischen Repositorien

- arXiv<sup>12</sup>
- und SSOAR (Social Science Open Access Repository)<sup>13</sup>

durchgeführt. Darüber hinaus wurde die an der Hochschule Harz gegebene Möglichkeit des Vollzugriffs auf die Statistik-Datenbank Statista<sup>14</sup> genutzt, um Datensätze zu identifizieren, die mit den oben aufgeführten zeitlichen und thematischen Suchkriterien korrespondieren. Da die Suche auf Publikationen begrenzt wurde, die innerhalb eines bereits abgeschlossenen Zeitraums (2009 bis 2018) erschienen sind, ist die Verteilung der Recherchetätigkeiten auf den vergleichsweise breiten Zeitrahmen von drei Wochen als unkritisch zu werten.

Erfasst wurden dabei peer-reviewte Artikel aus Fachzeitschriften und Konferenzbänden, wissenschaftliche Monografien, Hochschulschriften (insbesondere Abschlussarbeiten) sowie graue Literatur wie etwa Projektberichte oder politische Strategiepapiere. Während alle erfassten Quellen bei der Erstellung des theoretischen Teils dieser Arbeit berücksichtigt werden, fand die graue Literatur keinen Eingang in die Ausgestaltung des DSS. Von der in Meta-Studien nicht unüblichen Auswertung von Abstracts nicht verfügbarer Publikationen wurde explizit abgesehen, da nicht davon ausgegangen werden konnte, dass ein Abstract die für die Übernahme von Angaben in das DSS erforderliche Detailtiefe besitzt.

## 2.2 Quantitatives Ergebnis

Die Recherche erbrachte 401 Treffer bei den deutschsprachigen und 524 Treffer bei den englischsprachigen Suchanfragen. Die insgesamt 925 Publikationen wurden zur weiteren Auswertung in Citavi<sup>15</sup> – einer Software zur Literaturverwaltung und Wissensorganisation – erfasst. Durch den Wegfall von Dubletten (zahlreiche Veröffentlichungen wurden erwartbar mehrfach gefunden) reduzierte sich die Zahl der zu sichtenden Publikationen zunächst auf 472. Über die Anfrage-Funkti-

---

11 <http://www.researchgate.net>

12 <http://www.arxiv.org>

13 <http://www.gesis.org/ssoar/>

14 <http://de.statista.com>

15 <https://www.citavi.com>

on von ResearchGate wurden 57 nicht öffentlich verfügbare Veröffentlichungen bei den Autorinnen und Autoren angefordert, von denen jedoch nur fünf weitere im Volltext zur Verfügung gestellt werden konnten. Insgesamt wurden somit 477 Titel im Volltext erfasst. Nach Dokumenttypen unterteilt befanden sich darunter

- 240 größtenteils peer-reviewte Beiträge in Fachzeitschriften,
- 41 größtenteils peer-reviewte Beiträge in Konferenzbänden,
- 59 akademische Abschlussarbeiten,
- 38 Monografien oder Kapitel in Sammelbänden sowie
- 99 Dokumente, die dem Bereich der grauen Literatur zuzuordnen sind.

Die Verteilung der Treffer auf Fundstellen und Suchanfragen wird in Anhang A dargestellt. Die in beiden Tabellen eingefügte Spalte „Zusatz“ enthält die Anzahl an Publikationen, die nicht direkt über die Suchanfragen, sondern über die Empfehlungsmechanismen der jeweiligen Plattform aufgefunden wurden.

Die interdisziplinäre Natur des bearbeiteten Themas zeigt sich bereits deutlich in der Verteilung der aufgefundenen Publikationen (außer grauer Literatur) nach fachlicher Herkunft. Hier dominieren mit der Tourismuswirtschaft (104 Publikationen) und den Umweltwissenschaften (55 Publikationen) zwei bereits stark interdisziplinär ausgerichtete Fachrichtungen. Auf die Klimaforschung entfallen 32, auf die Geowissenschaften 27 und auf die Hydrologie 23 Veröffentlichungen, während 23 Publikationen den Wirtschaftswissenschaften, 22 der Biologie, 20 den Ingenieurwissenschaften und 19 der Physik zuzuordnen sind. Die verbleibenden 53 Beiträge teilen sich auf 14 weitere Disziplinen und Subdisziplinen auf, zu denen u.a. die Informatik (6), die Medienforschung (2), die Politikwissenschaften (7), die Rechtswissenschaften (4) und die Meteorologie (7) gehören.

Um den üblichen Umfang einer Masterarbeit nicht wesentlich zu überschreiten, wird es nicht möglich sein, im Rahmen der nachfolgenden Kapitel auf jede der 477 erfassten Quellen einzugehen. Alle direkt genutzten Quellen werden entsprechend referenziert und finden sich im Literaturverzeichnis dieser Arbeit. Die Gesamtheit der 477 Quellen wird dieser Arbeit im Volltext zusammen mit der oben erwähnten Citavi-Datenbank als DVD-Anhang beigelegt.

Zur kritischen Einordnung der Rechercheergebnisse ist anzumerken, dass – obwohl die peer-reviewte Literatur den größten Anteil ausmacht – eine bewusste Aufnahme von nicht peer-reviewten Quellen erfolgte. Während Monografien und Buchbeiträge eine zentrale Rolle in der Weiterverbreitung wissenschaftlicher Erkenntnisse spielen und ihre Erfassung somit gerechtfertigt ist, erfolgte die Aufnahme von akademischen Abschlussarbeiten vor dem Hintergrund, dass diese aufgrund ihrer Bewertung eine mit dem Peer Review vergleichbare Qualitätskontrolle durchlaufen. Graue Literatur – wie etwa politische Positionspapiere oder Wirtschaftsberichte von Seilbahnbetreibern und Kommunen – hat wiederum eine wesentliche Bedeutung für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Entscheidungsfindungsprozesse zu Wintersport-Investitionen, welche die Bedeutung klassischer wissenschaftlicher Publikationen derzeit noch deutlich übersteigen dürfte.

Als Einschränkung ist die den Sprachkenntnissen des Autors geschuldete Begrenzung auf Publikationen in deutscher und englischer Sprache zu werten, die u.a. zum Ausschluss relevanter französischsprachiger Dokumente zur künstlichen Beschneidung in den Pyrenäen geführt hat. Angesichts des Umstands, dass – wie oben erwähnt – schon eine vollständige Auswertung aller 477 erfassten Quellen den üblichen Umfang einer Masterarbeit überschreiten würde, stellt die Exklusion im Rahmen dieser Arbeit zwar keine wesentliche Einschränkung dar – für die in Kapitel 9.2 skizzierte Weiterentwicklung des DSS zu einer kommerziell nutzbaren Software, ist die Auswertung dieser Quellen dagegen anzuraten.

### **3. Künstliche Beschneigung**

#### **3.1 Historische Entwicklung**

##### **3.1.1 Entwicklung des Skitourismus**

Während Skier als Fortbewegungsmittel dem Menschen schon in prähistorischer Zeit bekannt gewesen sind und deren Nutzung etwa im skandinavischen Raum in Antike und Mittelalter nachgewiesen ist (vgl. Gray 2017, S. 78), wurden Skifahren und Skispringen als Sport- und Freizeitaktivitäten erst Mitte des 19. Jahrhunderts in Norwegen populär und breiteten sich von dort innerhalb weniger Jahrzehnte in Europa aus (vgl. Düwell 2015, S. 1), wobei vor allem die Alpen – bis dahin eher Reiseziel einzelner wohlhabender Abenteurer und Bergsportler (vgl. Berchtenbreiter 2014, S. 7) – als Destination entdeckt wurden. Diese Entwicklung wurde wesentlich durch die Etablierung der Eisenbahn als Langstrecken-Verkehrsmittel für große Personenzahlen begünstigt, durch die Hochgebirge wie Alpen und Pyrenäen leichter zugänglich wurden (vgl. Borck 2013, S. 5, Schmidt 2015, S. 7).

Die touristische Erschließung der Alpen begann um 1880 mit der Anlage des bis heute bestehenden Netzes von Schutzhütten und Wanderwegen sowie verstärkten Investitionen in luxuriöse Großhotels, Zahnrad- und Seilbahnen sowie Skiloiopen für eine kleine, aber zahlungskräftige europäische Oberschicht (vgl. Berchtenbreiter 2014, S. 7). Die Intensität dieser Erschließung führte bereits um die Jahrhundertwende zu erster ökologisch motivierter Kritik aus den Reihen des Deutschen Alpenvereins (DAV) oder des 1900 in München gegründeten Vereins zum Schutze und zur Pflege der Alpenpflanzen (vgl. Haane 2017, S. 1), der noch bis heute als Verein zum Schutz der Bergwelt (VzSB) fortbesteht.

Als wichtige, die weitere Entwicklung des Skitourismus begünstigende Faktoren gelten die Einführung von Seilbahnen mit gespannten Tragseilen zu Beginn des 20. Jahrhunderts (vgl. Walser 2013, S. 32), die Aufnahme des Skisports in das Portfolio der Olympischen Spiele mit den Spielen von Garmisch-Partenkirchen im Jahr 1936 (vgl. Düwell 2015, S. 3) und der Boom des Massentourismus in den 1960ern und 1970ern, der aus dem einstigen Oberschichtensport ein Massenvergnügen machte (vgl. Halmheu 2018, S. 1; Freppaz et al. 2013, S. 46).

Heute bewegt der Skitourismus jährlich rund 400 Millionen Menschen (vgl. Demiroglu 2016, S. 8) und ist für viele Wintersportgebiete von überragender wirtschaftlicher Bedeutung. In den Alpen – neben den Rocky Mountains in den USA die wichtigste Wintersportregion der Welt (vgl. Buckley 2017, S. 244) – generiert der Wintertourismus (der primär ein Wintersporttourismus ist) jährliche Umsätze von 50 Milliarden Euro und trägt jeden zehnten Arbeitsplatz (vgl. Balbi 2012, S. 1; zur ökonomischen Bedeutung des Skitourismus siehe auch Kapitel 5.1).

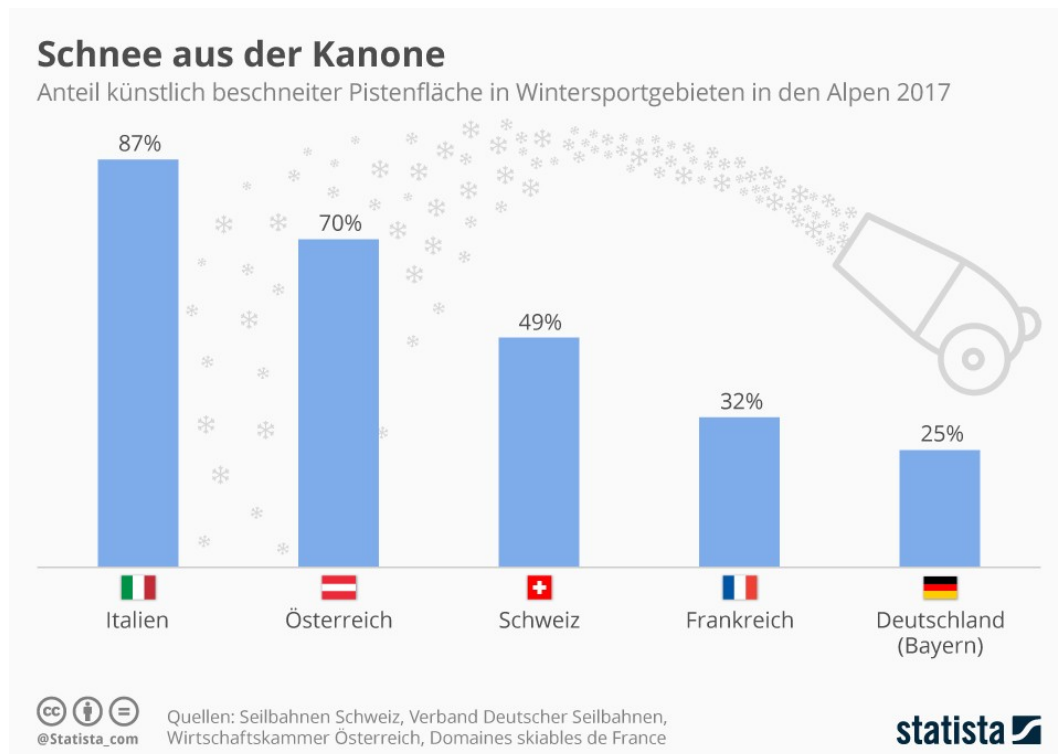
### 3.1.2 Entwicklung der künstlichen Beschneigung

Das erste Patent für eine Schneelanze wurde im Jahr 1954 in den USA ausgestellt, das erste Patent für eine Schneekanone (zu den Unterschieden zwischen diesen beiden bis heute dominierenden Beschneigungstechniken siehe auch Kapitel 3.2) folgte vier Jahre später (vgl. Noguera 2018, S. 4). Während in den USA (beginnend 1952 im Grossinger Resort im Bundesstaat New York; vgl. Yang & Wan 2010, S. 58) schon seit den 1950ern punktuell beschneit wurde, kamen Schneekanonen in Europa – zunächst ebenfalls punktuell – erst in den 1970ern (in Österreich und der Schweiz) sowie in Deutschland ab Ende der 1980er zum Einsatz (vgl. Lang & Lang 2009, S. 6; Snajdr 2012, S. 3; Benoit 2012, S. 23).

Nachdem es in den 1980ern in den Alpen erstmals zu witterungsbedingten Saisonausfällen kam (vgl. Yang & Wan 2010, S. 56), erfolgte ein sukzessiver Übergang von einer punktuellen und den Naturschnee lediglich ergänzenden hin zu einer flächendeckenden und fehlenden Naturschnee ersetzenden Beschneigung. Die in Europa besonders schneearme Wintersaison von 2006/2007 löste einen weiteren Investitionsschub in künstliche Beschneigung aus – laut Trawöger & Steiger 2012 ein Anzeichen dafür, „dass derartige Investitionen hauptsächlich als Reaktion auf vergangene Ereignisse und nicht vorausschauend auf mögliche zukünftige Veränderungen getätigt werden“ (S. 27). Medial breiter wahrgenommene Debatten über die ökologischen Folgen künstlicher Beschneigung finden seit Beginn der 2000er statt (vgl. Loubier et al. 2010, S. 1).

Wie rasant sich die Flächendeckung von Beschneigung entwickelt hat, verdeutlichen einige durch den Statistikdienst Statista zusammengestellte Zahlen: Der Anteil der technisch beschneibaren Pistenflächen in der Schweiz ist von weniger als 5% im Jahr 1991 auf fast 50% im Jahr 2017 gestiegen, in Österreich wurden im gleichen Jahr schon 70%, in Italien sogar 87% aller Pistenflächen künstlich be-

schneit (siehe Abbildung 1). Allein in Österreich wurden im Jahr 2017 rund 51 Millionen Euro mit dem Verkauf von etwa 2.150 neuen Beschneiungsanlagen umgesetzt, für 2019 wird ein Zuwachs um weitere 5 Millionen Euro prognostiziert. Auch außerhalb Europas lässt sich eine Tendenz zu mehr Beschneigung beobachten – so hat sich etwa in China die Zahl der Schneekanonen von rund 700 im Jahr 2015 auf über 1.400 im Jahr 2017 in nur zwei Jahren mehr als verdoppelt.



*Abbildung 1: Anteil der künstlich beschneiten Pistenfläche in Wintersportgebieten in den Alpen im Jahr 2017.*

In Frankreich und Deutschland ist die Schneeproduktion im Vergleich mit den übrigen Alpenländern weniger stark verbreitet, die Tendenz zu mehr Beschneigung ist aber auch hier klar erkennbar: Laut Demiroglu 2016 (S. 20) kommt Beschneigungstechnik derzeit in 121 von 595 deutschen Skigebieten zum Einsatz.

### 3.2 Stand der Technik

#### 3.2.1 Entstehung von Naturschnee

Die Entstehung von natürlichem Schnee in der Atmosphäre setzt voraus, dass die Lufttemperatur unter 0°C liegt, die Luftfeuchtigkeit ausreichend hoch ist (also

Wasserdampf vorhanden ist) und sich Partikel (z.B. Meeressalz, Blütenpollen oder Stickstoffteilchen) in der Luft befinden, die als Kristallisationskeime dienen können (vgl. Schneider 2014, S. 11). Sind diese Bedingungen erfüllt, so kann Wasserdampf an den Kristallisationskeimen kondensieren und Schneekristalle bilden, die in Abhängigkeit von Temperatur und Grad der Übersättigung äußerst heterogene und hochkomplexe Formen annehmen können (zu sehen etwa in den von Schneebeli 2015 angefertigten Mikrotomographie-Aufnahmen von Schneekristallen und den in diesen ablaufenden Veränderungsprozessen im Zeitraffer). Schneekristalle durchlaufen während ihres Alterungsprozesses noch weitere Metamorphosen und bilden sich mehrfach fast vollständig neu (ebd., S. 130).

### 3.2.2 Produktion von Kunstschnee

Zur Herstellung von künstlichem Schnee wird ein Gemisch aus (ggf. zuvor heruntergekühltem) Wasser und Kristallisationskeimen sowie – je nach Art der Beschneigungstechnik – auch Luft mit hoher Geschwindigkeit über ein Düsensystem in die Atmosphäre gesprüht. Kühlen sich die Wassertröpfchen während des Flugs durch eine Teilverdunstung so weit ab, dass sie noch in der Luft an den Keimen gefrieren können, erreichen sie als Eiskügelchen den Boden (vgl. Benoit 2012, S. 26 ff; Olefs et al. 2010, S. 1098; de Jong et al. 2012, S. 2). Als Kristallisationskeime können ohnehin in der Atmosphäre vorkommende Stoffe oder Beschneigungszusätze wie SNOMAX (siehe Kapitel 3.2.4) zum Einsatz kommen.

Technisch ist zwischen den beiden marktdominanten Technologien der Hochdruckdüsenteknik und der Niederdruckdüsenteknik sowie sonstigen Formen der Kunstschneeerzeugung zu unterscheiden (vgl. Bieger et al. 2019, S. 10). Bei der Hochdruckdüsenteknik wird Druckluft mit Wasser und Kristallisationskeimen vermischt und in die Atmosphäre gesprüht, während bei der Niederdruckdüsenteknik Umgebungsluft angesaugt und an einer Wasserdüse vorbeigeführt wird, die gekühltes (und mit Kristallisationskeimen versetztes Wasser) in den Luftstrom abgibt. Der Hauptunterschied zwischen den Ansätzen besteht somit darin, dass die Schneeerzeugung bei der Hochdruckdüsenteknik mit eigens herangeführter Druckluft erfolgt, während bei der Niederdruckdüsenteknik auf die Umgebungsluft zurückgegriffen wird (vgl. Benoit 2012, S.29 ff; Olefs et al. 2010, S. 1098).



*Abbildung 2: Eine Schneelanze nach einem gescheiterten Beschneivungsversuch am Hexenritt-Parkplatz in Braunlage im Oberharz.*

Hochdruckdüsensysteme haben meist die Form von bis zu 10 m hohen Schnei- oder Schneelanzen (um den in größeren Höhen stärkeren Luftzug auszunutzen, siehe Abbildung 2), während Niedrigdruckdüsensysteme als kompaktere Schneekanonen vertrieben werden. Schneelanzen zeichnen sich gegenüber Schneekanonen durch eine geringere Lärmentwicklung, eine höhere Wartungsfreundlichkeit, einen geringeren Energieverbrauch und einen höheren Output aus. Schneekanonen sind dafür aufgrund ihrer geringeren Höhe weniger windanfällig und können als transportable Geräte hergestellt und somit flexibel eingesetzt werden (vgl. Noguera 2018, S. 5; Schneider 2014, S. 19; Lang & Lang 2009, S. 7).

Zu den weiteren, weniger verbreiteten Technologien gehören die (teure) Kryotechnik, bei der das Wasser mit einem Kühlmittel wie z.B. flüssigem Stickstoff vermischt wird, um auch bei Plusgraden beschneien zu können, das Ausbringen von in Kühlhallen produziertem und maschinell zerstoßenem Eis auf die Pisten (aus Sicht von Skifahrerinnen ein Ersatz niederer Qualität) oder auch das Cloud Seeding, bei dem Kristallisationskeime per Flugzeug in der Atmosphäre ausge-

bracht werden, um die natürliche Schneebildung zu beschleunigen (ebenfalls teuer und mit allen Nachteilen der Eigenschaften von Naturschnee verbunden, siehe hierzu Kapitel 3.2.3). Weitere alternative Systeme zur Schneeproduktion, die derzeit (noch) nicht zu konkurrenzfähigen Preisen bzw. noch gar nicht am Markt verfügbar sind, werden in Dieseth 2016 und Schabschneider 2013 vorgestellt.

Beschneit wird in zwei Phasen: Während des Einschneiens wird zum frühestmöglichen Zeitpunkt über mehrere Tage so viel Schnee wie möglich produziert (und im Falle einer Überproduktion gelagert), um das Weihnachtsgeschäft abzusichern; während der Saison erfolgen dann nach Bedarf, Witterung und Wasserverfügbarkeit weitere Nachbeschneigungen (vgl. Lang & Lang 2009, S. 10; diese aufgrund der niedrigen Temperaturen meist nachts, vgl. Radmann 2012, S. 36).

### 3.2.3 Eigenschaften von Kunstschnee

Da sich die Herstellung von Kunstschnee erheblich vom Entstehungsprozess von Naturschnee unterscheidet, unterscheiden sich auch die Ergebnisse. Während Naturschnee eine kristalline Struktur aufweist, besteht Kunstschnee aus runden Eiskörnern mit Durchmessern zwischen 0,1 mm und 0,8 mm. Im Vergleich mit Naturschnee ist Kunstschnee bis zu 4 mal dichter sowie bis zu 50 mal härter, bindet deutlich mehr Wasser und weist eine größere Resilienz gegenüber höheren Temperaturen und Regen auf (vgl. de Jong et al. 2017, S. 217; Lintzen 2013, S. 18; Lintzen & Edeskär 2012, S. 8). Während die mittlere Dichte von Naturschnee bei 100 kg/m<sup>3</sup> liegt, weist technischer Schnee eine durchschnittliche Dichte von 480 kg/m<sup>3</sup> auf (vgl. Benoit 2012, S. 27 f), wobei eine Dichte zwischen 400 kg/m<sup>3</sup> und 450 kg/m<sup>3</sup> als für den Skisport ideal gilt (vgl. Schneider 2014, S. 37).

Aufgrund der höheren Resilienz lässt sich Kunstschnee wirtschaftlich besser verwerten als Naturschnee, was paradoxerweise dazu geführt hat, dass weniger natürlicher Schneefall (bei gleichzeitig geeigneten Witterungsbedingungen für die Produktion von Kunstschnee) von vielen Pistenbetreibern inzwischen dem natürlichen Schneefall vorgezogen wird. So wurde beispielsweise in einer von Trawöger & Steiger 2012 durchgeführten Erhebung unter 24 Vertreterinnen von Tourismusverbänden und Seilbahnen in Tirol angegeben, dass diese „große Mengen an Naturschnee [...] als Kostenfaktor (höherer Aufwand bei der Präparierung) und Qualitätsproblem (Kundenbeschwerden bei zu weichen Naturschnee-Pisten)“ betrachten (S. 28). Aufgrund der größeren Dichte von technischem Schnee

ist zudem weniger Schnee erforderlich, um einen Skibetrieb zu gewährleisten – so schätzt beispielsweise Lintzen 2012 (S. 7), dass bis zu 40 cm Naturschnee durch lediglich 10 cm Kunstschnee ersetzt werden können.

### 3.2.4 Verwendung von Beschneigungszusätzen

Zur Förderung des Kristallisationsprozesses können dem zur Beschneigung verwendeten Wasser Additive beigefügt werden, die als zusätzliche Kristallisationskeime dienen und damit eine Beschneigung bei höheren Temperaturen gestatten (vgl. Abegg 2011, S.14; Gray 2017, S. 75). Bei dem meistverwendeten Beschneigungszusatz handelt es sich um ein biologisches Produkt, das unter der Bezeichnung SNOMAX durch die Snomax LLC mit Sitz in den USA vertrieben wird<sup>16</sup>.

SNOMAX wird aus durch Bestrahlung oder Gefriertrocknung sterilisierten Bakterien der Art *Pseudomonas syringae* hergestellt. Stamm 31a dieser Art produziert ein Protein, welches sich als Kristallisationskeim eignet und die Produktion von Kunstschnee schon bei einer Feuchttemperatur von -2°C (und damit bei Lufttemperaturen oberhalb von 0°C) gestattet (vgl. Benoit 2012, S. 100; zum Zusammenhang von Lufttemperatur und Feuchttemperatur siehe Kapitel 3.3). Unter Einsatz von SNOMAX produzierter Schnee weist eine geringere Dichte als herkömmlicher Kunstschnee (aber eine höhere Dichte als Naturschnee) auf. Der Zusatz wird dem Wasser im Mengenverhältnis 0,9 g je 1.000 l beigegeben und sorgt im Regelfall für eine 40%-ige Steigerung der produzierten Schneemenge (vgl. Herstellerangaben zitiert in Dieseth 2016, S. 11). Inaktive Bakterien von Typ *Pseudomonas syringae* kommen neben der Kunstschneeherstellung u.a. auch bei der Produktion gefrorener Lebensmittel zum Einsatz (vgl. Lit et. al 2012, S. 1097).

Die möglichen ökologischen Folgen des SNOMAX-Einsatzes sind gegenwärtig noch umstritten. Während dem Additiv etwa von Gray 2017 (S. 75 f.) attestiert wird, im Boden lebende Insektenarten wie Fadenwürmer zu schädigen, indem es die Menge an ungefrorenem Wasser herabsetzt und damit den Lebensraum dieser Tiere einschränkt, werden in Benoit 2012 (S. 100) Studien zusammengefasst, deren Ergebnisse nahelegen, dass die größere Lockerheit und geringere Dichte von mit SNOMAX erzeugtem Schnee die unter Kunstschneedecken zu beobachtende Verzögerung der Entwicklung von Pflanzen abmildern (zu den Auswirkungen von Kunstschnee auf die Flora siehe Kapitel 4.3).

---

<sup>16</sup> <http://www.snomax.com>

Ebenfalls umstritten ist die Frage, ob sich der Einsatz von SNOMAX oder anderer Beschneigungszusätze auf die menschliche Gesundheit auswirken kann. Obwohl die sterilisierten Bakterien sich nicht reproduzieren können und auch keine unmittelbare toxische Wirkung entfalten, sollten sie in einen menschlichen (oder tierischen) Kreislauf gelangen, steht die Verwendung von SNOMAX im Verdacht, Lungenentzündungen und Hauterkrankungen bei Personen auszulösen, die sich häufig in direkter Nähe von Schneelanzern oder Schneekanonen aufhalten (vgl. Snajdr 2012, S. 7). Nicht auszuschließen sind zudem allergische Reaktionen (vgl. Gray 2017, S. 76) sowie die Nutzung von *Pseudomonas syringae* als Nährboden durch andere (pathogene) Bakterien. Von der Mehrzahl der Autorinnen und Autoren wird das Produkt aber als gesundheitlich unbedenklich eingeschätzt.

Aufgrund der Restunsicherheiten und insbesondere der fehlenden Langzeitstudien zum dauerhaften Verbleib der Additive in der Umwelt (vgl. Benoit 2012, S. 100), ist die Nutzung von biologischen und chemischen Beschneigungszusätzen wie SNOMAX derzeit in Deutschland und Österreich nicht zulässig. In den USA kommen derartige Hilfsmittel dagegen breit zum Einsatz (vgl. Steiger 2010, S. 5).

### 3.3 Witterungsbedingungen

Die Produktion von Kunstschnee ist nicht immer möglich, sondern hängt – neben der Verfügbarkeit von Wasser – vor allem von den Witterungsbedingungen am zu beschneien Standort ab. Die Mehrzahl der Publikationen, in denen Aussagen zu den Rahmenbedingungen von Beschneigung getroffen werden, fokussiert auf zwei Parameter: Die Lufttemperatur sowie die Luftfeuchtigkeit (d.h. den prozentualen Anteil des Wasserdampfs am Luftgemisch).

So muss etwa laut Deutschem Skiverband für eine effektive Beschneigung eine Temperatur von  $-2^{\circ}\text{C}$  oder weniger bei einer Luftfeuchtigkeit von unter 80 % gegeben sein (vgl. Usinger 2015, S. 42), während Joemann et al. 2017 die Grenze bei  $-2,5^{\circ}\text{C}$  und de Jong et al. 2017 (S. 218) bei  $-3^{\circ}\text{C}$  oder weniger bei gleichzeitig möglichst niedriger Luftfeuchtigkeit ziehen. Die untere Temperaturgrenze der Beschneibarkeit liegt bei  $-20^{\circ}\text{C}$  (vgl. Bones 2009, S. 67). Allen Aussagen ist gemein, dass sie einen Bezug zwischen Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit herstellen.

Beide Parameter müssen somit in ihrem Zusammenspiel berücksichtigt werden: Je niedriger die Luftfeuchtigkeit, umso wärmer darf es während der Kunstschnee-

produktion noch sein; je höher die Luftfeuchtigkeit, umso geringere Temperaturen werden für die Beschneigung benötigt (vgl. u.a. Olefs et al. 2010, S. 1100; Lintzen 2013, S. 18; Bones 2009, S. 67). Ist die Luft ungesättigt (d.h. weist sie eine niedrige Luftfeuchtigkeit auf), fördert dies die Bildung von Kunstschnee, da dann das Wasser auf der Oberfläche eines von einer Schneekanone oder Schneelanze in die Luft abgegebenen Wassertröpfchens besser verdunsten kann, wodurch sich – bei entsprechend geringer Lufttemperatur – wiederum die Abkühlung des verbleibenden Tröpfchens beschleunigt (vgl. Benoit 2012, S. 26 ff).

Der für die Beschneigung entscheidende Parameter ist damit die Feuchttemperatur (auch als Feuchtkugeltemperatur oder Kühlgrenztemperatur bezeichnet), in deren Berechnung sowohl die Lufttemperatur als auch die Luftfeuchtigkeit eingehen. Die Feuchttemperatur ist als die kühlfte Temperatur definiert, die bei gegebener Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit durch Verdunstung erreicht werden kann (vgl. Benoit 2012, S. 34). Wie Schneider 2014 ausführt, liegt die Feuchttemperatur „aufgrund der Verdunstungskälte [und] in Abhängigkeit von der relevanten Luftfeuchte unterhalb der Lufttemperatur. Die Temperaturabsenkung ist [...] umso größer, je trockener die umgebende Luft ist“ (S. 9).

Zur Bestimmung der Feuchttemperatur existiert eine u.a. in Benoit 2012 genutzte empirische Näherungsformel, die durch das im US-Bundesstaat Vermont ansässige Unternehmen Mountain View Inc. entwickelt wurde und die ohne den Luftdruck als zusätzliche Variable auskommt<sup>17</sup>. Die Ergebnisse sind nur im Wertebereich zwischen -17,8°C und 4,5°C gültig und verlieren an Genauigkeit, je weiter sich die Lufttemperatur von dieser Temperaturspanne entfernt – was in der Beschneigungspraxis in Mitteleuropa allerdings kaum eine Rolle spielt, da Temperaturen unterhalb von -17,8°C selten eintreten und bei Temperaturen oberhalb von 4,5°C ohnehin nicht mehr beschneit werden kann. Die Formel soll in dem zu konzipierenden DSS (siehe hierzu Kapitel 7.2) zur Anwendung kommen.

$$FT = (-5,806 + 0,672 * T - 0,006 * T * T + (0,061 + 0,004 * T + 0,000099 * T * T) * L + (-0,000033 - 0,000005 * T - 0,0000001 * T * T) * L * L)$$

*FT = Feuchttemperatur*

*T = Lufttemperatur*

*L = Luftfeuchtigkeit*

<sup>17</sup> <http://www.the-snowman.com/wetbulb2.html>

Eine wesentliche weitere Rahmenbedingung der Kunstschneeproduktion ist die Abwesenheit von zu starkem Wind. Während Wind zur Produktion von technischem Schnee grundsätzlich benötigt wird (siehe hierzu Kapitel 3.2), damit eine Wärmeabfuhr stattfinden kann (vgl. Lintzen 2012, S.), gehen Olefs et al. 2010 (S. 1000) zufolge auch unter Windbedingungen, die eine Beschneigung ermöglichen, zwischen 5% und 15% des durch Schneekanonen und zwischen 15% und 40% des durch Schneelanzern produzierten technischen Schnees durch Verwehung verloren. Bei zu hohen Windgeschwindigkeiten ist eine Beschneigung nicht mehr sinnvoll, da ein Großteil des produzierten Schnees unmittelbar verweht werden würde. Auch wenn sich in der gesichteten Literatur kein konkreter Schwellwert finden ließ, wird die Windgeschwindigkeit neben den beiden für die Berechnung der Feuchttemperatur erforderlichen Parametern Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit als wesentlicher Faktor in das in Kapitel 7 zu konzipierende DSS eingehen.

Der einzige weitere noch im DSS berücksichtigte Witterungsfaktor – die Niederschlagsmenge – wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet, da er sich nicht auf die Beschneibarkeit an sich, sondern auf die Haltbarkeit der Schneedecke auswirkt (siehe hierzu Erläuterungen zum quantitativen DSS-Modell in Kapitel 7.2).

## 4. Ökologische Auswirkungen

### 4.1 Auswirkungen auf den Boden

#### 4.1.1 Auswirkungen der maschinellen Pistenpräparation

Die Auswirkungen von künstlicher Beschneieung auf Zusammensetzung und ökologische Qualität des Bodens sind neben den direkten Effekten der Kunstschneeausbringung primär auf die mit der Beschneieung einhergehende maschinelle Bearbeitung von Pisten zurückzuführen. Im Rahmen einer solchen Präparation werden alle Unebenheiten sowie die natürliche Vegetation entfernt, um eine möglichst ebene Fläche zu erzeugen (vgl. Gray 2017, S. 67). Aufgrund der dabei zum Einsatz kommenden schweren Fahrzeuge (typisch sind etwa die in Abbildung 3 gezeigten Pistenraupen) geht dies nicht nur mit einer starken Komprimierung des Schnees – beabsichtigt, da dieser dadurch widerstandsfähiger wird – sondern auch des Bodens einher. Die Schwere dieser Eingriffe geht weit über traditionelle Formen der Anlage von Pisten hinaus, bei denen lediglich mit einem Verletzungsrisiko behaftete Hindernisse wie große Steine oder Büsche entfernt wurden, während kleinere Unebenheiten unter der Naturschneedecke verschwanden.



*Abbildung 3: Maschinelle Pistenbearbeitung (Foto: Bad Kleinkirchheim ).*

Der Hintergrund der maschinellen Pistenbearbeitung ist ökonomischer Natur, da durch entsprechende Maßnahmen die für einen Betrieb – egal ob mit Natur- oder Kunstschnee – zu erreichende Mindestschneehöhe reduziert werden kann. Burt & Rice 2009 (S. 2251) gehen davon aus, dass auf naturbelassenen Pisten etwa ein halber Meter mehr Schnee liegen muss, bevor diese sicher befahren werden können. Präparierte Pisten können somit meist früher in der Saison eröffnet und länger betrieben werden, was sie wiederum wirtschaftlich attraktiver macht.

Die bessere Verwertbarkeit wird jedoch mit einer Verringerung der ökologischen Wertigkeit des Bodens erkaufte. Durch die großflächige Bodenbearbeitung wird die besonders nährstoffreiche obere Bodenschicht meist vollständig zerstört (vgl. Burt & Rice 2009, S. 2243), was wiederum erhebliche Konsequenzen für Flora und Fauna nach sich zieht (vgl. Schröder 2015, S. 100 f.; siehe auch Kapitel 4.3 und 4.4). Freppaz et al. 2013 (S. 60) empfehlen daher, vor jeder Neuanlage einer Piste die natürliche Zusammensetzung des Bodens und der Vegetation möglichst detailliert zu erfassen, um spätere Maßnahmen der Wiederbegrünung und des Erosionsschutzes an diesem Ursprungszustand ausrichten zu können.

#### 4.1.2 Auswirkungen der Kunstschneeeasbringung

Da künstlicher Schnee eine andere Dichte und Zusammensetzung als natürlicher Schnee aufweist, isoliert er den unter ihm befindlichen Boden stärker gegen kalte Temperaturen, wodurch die Wahrscheinlichkeit für Bodenfrost sinkt (vgl. Lintzen 2012, S. 12; Snajdr 2012, S. 4; Knaus 2011, S. 23) – einer der wenigen Effekte von Kunstschnee, die ökologisch positiv gewertet werden könnten.

Da das zur Beschneiung verwendete Wasser aufgrund seiner Herkunft aus Oberflächengewässern (Flüsse, Speicherbecken) einen höheren Mineraliengehalt und damit einen höheren pH-Wert als Regenwasser aufweist, wirkt sich das Eindringen abgetauten Kunstschnees in den Boden auf die dortigen mikrobiellen Aktivitäten aus, wodurch sich die Menge der für Pflanzen zur Verfügung stehenden organischen Verbindungen verringert (vgl. Gray 2017, S. 73-74). Freppaz et al. 2013 (S. 58) berichten, dass sich das Mikrobiom im Boden von Skipisten auch fast 15 Jahre nach deren Konstruktion noch nicht wieder normalisiert hat. Wie Knaus 2011 (S. 22) anmerkt, sind angesichts teils widersprüchlicher Erkenntnisse (vgl. ebenda, S. 14) jedoch noch weitere Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen künstlicher Beschneiung auf den pH-Wert des Bodens erforderlich.

Die auf beschneiten Pisten im Schnitt um bis zu zwei Wochen später einsetzende Schneeschmelze sowie die aufgrund der höheren Schneedichte und der stärkeren Versiegelung der komprimierten Böden dabei freigesetzte größere Wassermenge tragen zudem – ebenso wie die bereits angesprochene maschinelle Pistenbearbeitung – zur Erosion des Bodens bei (vgl. Freppaz et al. 2013, S. 52; Snajdr 2012, S. 5; Burt & Rice 2009, S. 2250; de Jong et al. 2015, S. 7). Dieser Effekt wird durch die Entfernung eines Großteils der den Boden stabilisierenden Vegetation bei der Anlage neuer Pisten noch verstärkt (vgl. Freppaz et al. 2013, S. 49 f.; Abegg 2011, S. 16; Gray 2017, S. 68; siehe auch Kapitel 4.3).

## **4.2 Auswirkungen auf den Wasserhaushalt**

### **4.2.1 Wasserverbrauch künstlicher Beschneigung**

Der Wasserverbrauch von künstlicher Beschneigung wird in der Literatur übereinstimmend als hoch beziffert, wobei die Angaben (für Grund- und Nachbeschneigung) zwischen 4.000 m<sup>3</sup> (vgl. Triebswetter & Wackerbauer, S. 99) und 6.000 m<sup>3</sup> (vgl. de Jong 2013, S. 37) pro beschneitem Hektar Pistenfläche schwanken. Der Bedarf einer einzigen Schneekanone oder Schneelanze kann dabei bei bis zu 10 Litern Wasser in der Sekunde liegen (vgl. Schneider 2014, S. 22). Allein im am Lake Tahoe im US-Bundesstaat Nevada gelegenen, gleichnamigen Skiresort werden pro Schneeproduktionstag 1,8 Millionen Liter Wasser verbraucht, im Liberty Mountain Ski Ressort im US-Bundesstaat Pennsylvania sind es gar 1,4 Millionen Liter Wasser pro Stunde (Angaben zitiert in Gray 2017, S. 79).

In vielen Wintersportregionen wird inzwischen ein Großteil des lokal verfügbaren Wassers für die Beschneigung aufgewendet. So beziffert Lintzen 2012 (S. 12) den Anteil der Beschneigung am Wasserverbrauch in Schweizer Wintersportort Davos auf 21,5%, während Abegg 2011 (S. 13) für Scuol im Schweizer Kanton Graubünden einen Anteil von 36,2% angibt. In einigen Regionen der französischen Alpen macht der Wasserverbrauch der (lediglich in wenigen Wochen im Jahr betriebenen) Beschneigung bereits mehr als die Hälfte des jährlichen regionalen Gesamtwasserverbrauchs aus (vgl. Snajdr 2012, S. 10).

Aufgrund der stetig zunehmenden Beschneigung weist auch der Wasserbedarf eine stark steigende Tendenz auf: Wurden in den Alpen 2005 rund 95 Millionen Liter Wasser für die Beschneigung verbraucht, waren es 2011 bereits 190 Millio-

nen Liter – eine Verdoppelung in gerade einmal sechs Jahren (vgl. de Jong et al. 2017, S. 219). Um den Verbrauch von auch landwirtschaftlich oder als Trinkwasser nutzbarem Wasser für die Beschneigung zu senken, wurden in den USA erste Versuche unternommen, geklärte Abwässer für die Produktion von Kunstschnee zu nutzen (vgl. Gray 2017, S. 81). Da bei unzureichender Vorbehandlung des Wassers negative Auswirkungen auf die Gesundheit von Urlauberinnen und Pistenpersonal befürchtet werden (jedoch nicht belegt werden konnten), gilt dieser Ansatz derzeit aber noch als umstritten (vgl. Duquette 2016, S. 144).

In Debatten um die ökologische Verträglichkeit künstlicher Beschneigung wird immer wieder behauptet, dass sich die Produktion von Kunstschnee nicht auf die aggregierte Wasserverfügbarkeit einer Region auswirke, da das den lokalen Gewässern entnommene Wasser ja lediglich in Schnee umgewandelt würde, der wiederum schmelze und damit als unkontaminiertes Wasser in die Umwelt entweiche. Tatsächlich bildet die Kunstschnee-Produktion jedoch keinen geschlossenen Wasserzyklus – vielmehr gehen insbesondere aufgrund von Verwehungen bei der Schneeproduktion sowie aufgrund von gradueller Verdunstung aus den Speicherbecken, die meist deutlich stärker sonnenexponiert sind, als die sie speisenden und über beschattenden Uferbewuchs verfügenden Gewässer, zwischen 30% und 50% der pro Saison entnommenen Wassermenge für den regionalen Wasserhaushalt verloren (vgl. de Jong et al. 2012, S. 11; Snajdr 2012, S. 12; de Jong et al. 2017, S. 220). Darüber hinaus ändert der Umstand, dass ein Großteil des entnommenen Wassers nicht im Sinne einer industriellen Nutzung „verbraucht“ wird, nichts an dem temporär sehr hohen Wasserbedarf der Anlagen, welcher eine erhebliche Belastung für lokale Gewässer darstellen kann (vgl. Abegg & Steiger 2016, S. 389 f.; siehe dazu auch Kapitel 4.2.2).

#### 4.2.2 Auswirkungen auf Fließgewässer

Weniger als 10% des zur Beschneigung verwendeten Wassers stammen aus in die Speicherbecken eingehendem Niederschlag, der Rest wird meist aus lokalen Fließgewässern entnommen und – oft unter erheblichem technischem und energetischem Aufwand – in die Becken gepumpt (vgl. Snajdr 2012, S. 11). Dies hat „große Auswirkungen auf den Wasserkreislauf, nicht nur durch die Umverteilung des Wassers, sondern auch durch die veränderten Hangwasserdrainagen [aufgrund des unterirdischen Verlegens] der Leitungen“ (de Jong 2013, S. 36).

Ein wesentliches Problem ist die Belastung von Fließgewässern durch die übermäßige Entnahme von Wasser (vgl. de Jong 2013, S. 36; Pinnow 2014, S. 32) sowie durch sonstige, mit der Wasserentnahme verbundene bauliche Eingriffe<sup>18</sup>, die etwa zum Verlust von Retentionsflächen oder zur Abnahme der Biodiversität beitragen (vgl. Alverá et al. 2012, S. 165). Zwar darf eine Entnahme aus natürlichen Gewässern in den meisten Staaten nur dann stattfinden, wenn diese so viel Wasser führen, dass der für den Fortbestand der dort lebenden Arten erforderliche Restwasserabfluss gewährleistet ist, was eine Entnahme während Phasen der Trockenheit oder Verknappung ausschließt (vgl. Götz et al. 2014, S. 32). In der Praxis können jedoch die zur Beschneidung nötige Wassermenge sowie die verfügbare Entnahmemenge aufgrund der Witterungsabhängigkeit oft nur unzureichend genau geschätzt werden (vgl. Carmagnola et al. 2018, S. 503), weshalb die zulässigen Entnahmemengen in vielen Regionen immer wieder (unter dem großen Druck der Betreiber – siehe hierzu Kapitel 5.4) heraufgesetzt werden.

Während es durch die Beschneidung auf der einen Seite zur Entnahme von Wasser aus Fließgewässern kommt, kommt es während der Schmelzphase – auch aufgrund der geringeren Aufnahmekapazität des maschinell bearbeiteten und dadurch komprimierten Pistenbodens (vgl. Freppaz et al. 2013, S. 50; siehe auch Kapitel 4.1.1) – zu erhöhten Rückflüssen. Da das abfließende Schmelzwasser im Vergleich zu Regenwasser mehr Nährstoffe und Mineralien wie Calcium und Magnesium mitführt (siehe hierzu auch Kapitel 4.1.2), und durch die erhöhte Erosion zudem mehr Bodenmaterial eingetragen wird, wirkt sich die Schneeschmelze auch auf die Wasserzusammensetzung der das Schmelzwasser aufnehmenden Wasserkörper aus und kann zu deren Eutrophierung beitragen (vgl. Snajdr 2012, S. 6; Freppaz et al. 2013, S. 56). Um die durch den Wassereintrag verursachten Probleme zu begrenzen und zugleich den Wasserbedarf der Beschneidung zu verringern, werden in einigen Skigebieten – wie etwa im Wachusett Ski Resort im US-Bundesstaat Massachusetts – Auffangbecken erprobt, aus denen Schmelzwasser in Speicherbecken zurückgepumpt werden kann (vgl. Gray 2017, S. 80). Aufgrund ihrer Größe stellen solche Becken jedoch einen erheblichen zusätzlichen Eingriff in das Landschaftsbild dar (siehe hierzu auch Kapitel 4.5).

---

18 In den Alpen waren schon um das Jahr 2000 weniger als 13% der Fließgewässer noch unverbaut bzw. naturnah (vgl. de Jong 2013, S. 28).

Wie Knaus 2011 (S. 25) anmerkt, lässt sich in manchen Regionen zudem nicht mit Sicherheit feststellen, wo große Teile des Schmelzwassers überhaupt verbleiben. Dies impliziert, dass die Auswirkungen von Wasserentnahme, Beschneigung und Schneeschmelze erheblich von der lokalen Geomorphologie abhängen und daher regional stark unterschiedlich ausfallen können.

#### 4.2.3 Auswirkungen auf Feuchtflächen

Mit den Auswirkungen künstlicher Beschneigung auf den Wasserhaushalt in enger Verbindung stehend und bis dato kaum erforscht, ist der Effekt von Beschneigung auf Moore und andere Feuchtgebiete. Bei Feuchtgebieten in Gebirgslagen handelt es sich nicht nur um besonders empfindliche Lebensräume mit komplexen Ökosystemen, die von einem hohen Grad an Biodiversität geprägt sind, sondern auch um hocheffiziente Kohlenstoffspeicher, die rund 60% des in europäischen Böden gespeicherten Kohlenstoffs beherbergen (vgl. de Jong 2013, S. 26; Pinnow 2014, S. 33). Auch wenn der genaue Wirkmechanismus noch unbekannt ist (vgl. Knaus 2011, S. 5; Snajdr 2012, S. 9), konnte wiederholt festgestellt werden, dass Feuchtgebiete im – auch weiteren – Umfeld künstlich beschneiter Pisten und insbesondere von Speicherbecken an ökologischer Qualität (gemessen etwa an Bodenfeuchte oder Nährstoff- und Humusgehalt im Boden, vgl. hierzu Knaus 2011, S. 7 ff.) verlieren oder sogar gänzlich veröden (vgl. de Jong et al. 2012, S. 15; de Jong et al. 2017, S. 221). Da sich Moorökosysteme bei einem „Über- oder Unterschreiten hydrologischer Faktoren [...] grundlegend verändern“ können (Pinnow 2014, S. 33) wird vermutet, dass der Eintrag von Schmelzwasser mit atypischen Inhaltsstoffen in das fragile Ökosystem eine Kette an schwer vorher-sagbaren Reaktionen auslöst, die im Negativfall zum dessen Zusammenbruch führen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, ist für die Beschneigung in der Nähe mancher Feuchtgebiete ausschließlich Wasser zugelassen, das hinsichtlich pH-Wert, Mineraliengehalt und anderer Eigenschaften exakt die Zusammensetzung von ortsüblichem Regenwasser aufweist (vgl. Knaus 2011, S. 5).

### 4.3 Auswirkungen auf die Flora

#### 4.3.1 Auswirkungen der maschinellen Pistenpräparation

Wie schon bei der Betrachtung der Auswirkungen künstlicher Beschneigung auf den Boden (siehe Kapitel 4.1), ist auch hinsichtlich der Auswirkungen auf die Flo-

ra festzustellen, dass diese wesentlich auf die maschinelle Bearbeitung des Bodens – insbesondere auf die weitgehende Zerstörung der oberen Bodenschicht sowie auf die Entfernung als störend empfundener größerer Pflanzen wie Sträuchern oder Büschen – zurückzuführen sind. Durch das spätere häufige Befahren der Pisten mit schweren Geräten – etwa im Rahmen der Verteilung von Schnee durch Pistenraupen – wird die Schneedecke immer wieder komprimiert, was nicht nur zu mechanischen Schäden an „überfahrenen“ Pflanzen führen kann, sondern auch (bei mangelnder Luftdiffusion) deren Verrottung oder den Befall durch Pilze begünstigt (vgl. Schmidt 2015, S. 36; Keßler et al. 2012, S. 282).

Laut Mayer & Erschbarmer 2009 (S. 152/153) wirkt sich die maschinelle Bearbeitung von Pisten vor allem auf verholzte (und damit strukturell stabilere) Pflanzen sowie auf langsam wachsende Ökosysteme negativ aus, während grasartige (und damit strukturell flexiblere) Pflanzen weniger stark betroffen sind. Allgemein ist festzustellen, dass die Biodiversität zur Mitte von Skipisten hin deutlich abnimmt, wobei sogenannte Schuttvegetation – Pflanzen, die an die Lebensbedingungen auf Geröll angepasst sind – die Pistenflächen übernimmt und die dort ursprünglich heimischen Arten ersetzt.

#### 4.3.2 Auswirkungen der Kunstschneeeausbringung

Durch die höheren Nährstoffeinträge des Schmelzwassers von Kunstschnee (siehe hierzu auch Kapitel 4.2.2), sowie durch die erhöhte Wassermenge, ergibt sich im Frühjahr auf den Pisten eine gewisse Düngewirkung, die in der Literatur unterschiedlich bewertet wird. Während Sippel 2017 (S. 44) darauf hinweist, dass die zusätzlichen pflanzenverfügbaren Nährstoffe die Regeneration der aufgrund der Präparation mechanisch dauerbelasteten Pistenböden unterstützen (und somit die Verringerung des Nährstoffangebots aufgrund der Entfernung des Oberbodens partiell ausgleichen, vgl. hierzu Mayer & Erschbarmer 2009, S. 140), weisen andere Autoren darauf hin, dass sich dieser Düngeeffekt auf die Zusammensetzung der lokalen Flora auswirkt (vgl. Steiger 2010, S. 5; Rixen & Freppaz 2009, S. 82). Begünstigt werden dadurch Generalisten mit höherem Wasser- und Nährstoffbedarf, welche die teils hochspezialisierten Nischenarten verdrängen und dadurch die Biodiversität reduzieren (vgl. Knaus 2011, S. 16 f.; Snajdr 2012, S. 5).

Veränderungen in der Zusammensetzung der Flora werden auch durch die Verkürzung der Vegetationsperiode hervorgerufen, die sich aus der künstlichen Verlängerung der Wintersportsaison um mehrere Wochen (falls witterungsbedingt möglich nicht selten bis in die Osterferien hinein) ergibt (vgl. Steiger 2010, S. 5; Snajdr 2012, S. 4; Beniston 2012; S. 349). „Dies führt dazu, dass in den alpinen Gebieten Arten der Schneetälchengesellschaften<sup>19</sup> und spät blühende Arten gefördert werden, während früh blühende Arten Nachteile erleiden.“ (Knaus 2011, S. 23) Änderungen in der Zusammensetzung der Flora wirken sich wiederum kaskadierend auf die Zusammensetzung der Fauna aus, da es letztlich von den verfügbaren Pflanzen abhängt, welche Insektenarten sich dauerhaft an einem Standort halten können – und deren Verfügbarkeit als Nahrungsquelle sich wiederum auf Vögel und Amphibien auswirkt (vgl. Gray 2017, S. 69).

#### 4.4 Auswirkungen auf die Fauna

Die Auswirkungen künstlicher Beschneigung auf die – in Mittel- und insbesondere in Hochgebirgen hochgradig sensible und diverse<sup>20</sup> – Tierwelt wurden bislang in bedeutend geringerem Umfang untersucht, als deren Folgen für andere Bereiche der belebten wie unbelebten Umwelt. Die wenigen vorliegenden Untersuchungen beschränken sich meist auf einzelne Arten und Untersuchungsgebiete, was generelle Aussagen erschwert (vgl. Keßler et al. 2012, S. 282).

Als gesichert gilt, dass der durch die Beschneiungsanlagen sowie durch die den Schnee verteilenden Pistenraupen verursachte Lärm störend auf Säugetiere und insbesondere Vögel wie etwa den Auerhahn (*Tetrao urogallus*) oder das Birkhuhn (*Lyrurus tetrix*) wirkt (vgl. Schmidt 2015, S. 35; Snajdr 2012, S. 6). Wie erheblich die Lärmauswirkungen von künstlicher Beschneigung sind, verdeutlicht eine von Radmann 2012 (S. 17) in einem Skigebiet im US-Bundesstaat Colorado durchgeführte Untersuchung. Diese ergab, dass gut ein Drittel der mit der Beschneigung am Tag und alle der mit der Beschneigung bei Nacht befassten Angestellten regelmäßig dauerhaftem Lärm ausgesetzt waren, der über dem von der US-Arbeits-schutzbehörde OSHA (Occupational Safety and Health Administration) empfohle-

---

19 Pflanzengesellschaften, die in schneereichen Höhenlagen verbreitet sind, und die sich durch eine kurze Vegetationsperiode von unter vier Monaten auszeichnen.

20 In den Alpen finden sich rund 20% aller in Europa vorkommenden Pflanzenarten auf lediglich 3% der Landfläche (vgl. Lenz 2012, S. 39).

nen 12-Stunden-Lärmgrenzwert von 82 dbA lag. Dies entspricht in etwa dem Geräuschpegel eines Küchenmixers in unmittelbarer Nähe<sup>21</sup>.

Viele nacht- wie tagaktive Tierarten werden durch eine auch nur zeitweilige, dafür aber wiederkehrende Lärmbelastung dieses Ausmaßes dauerhaft vom Aufsuchen betroffener Areale abgeschreckt, womit nicht nur ein Lebensraumverlust, sondern auch eine Lebensraumfragmentierung einhergeht, da Skipisten zu Schneisen werden, die vormals zusammenhängende Lebensräume zerteilen (vgl. Snajdr 2012, S. 6). Auch bei lärmarmen Systemen ist von (wenn auch geringen) Beeinträchtigungen wildlebender Tiere auszugehen (vgl. de Jong et al. 2017, S. 221).



*Abbildung 4: Pistenbeleuchtung im finnischen Ruka (Foto: Timo Newton-Syms).*

Ein mit der Lärmentwicklung vergleichbarer Effekt ist die Lichtverschmutzung, die von beleuchteten Beschneiungsanlagen und Pistenfahrzeugen sowie von für das abendliche Skifahren illuminierten Pisten ausgeht (siehe Abbildung 4). Unter dem Begriff der Lichtverschmutzung oder auch des Lichtsmogs fasst man eine übermäßige und ineffiziente Beleuchtung sowie deren negative Auswirkungen auf Flora, Fauna und die Qualität astronomischer Beobachtungen zusammen. Da eine detaillierte Betrachtung des Phänomens den Rahmen dieser Arbeit überschreiten

---

21 <http://www.industrialnoisecontrol.com/comparative-noise-examples.htm>

würde, sei an dieser Stelle auf einige Arbeiten des Autors verwiesen, die sich mit Lichtverschmutzung befassen (u.a. Reinboth 2014; Hänel & Reinboth 2012; Fischer-Hirschert & Reinboth 2009; Fischer-Hirschert et al. 2009). Nächtliche Beleuchtung schreckt viele nachtaktive Säugetiere vom Betreten oder Befliegen beleuchteter Areale ab und trägt damit zu Fragmentierung und Verlust von Lebensräumen bei. Darüber hinaus wirkt Licht auf zahlreiche nachtaktive Insektenarten anziehend, was dazu führt, dass Insekten durch Lampen regelrecht „eingefangen“ werden und entweder in diesen verenden oder aber die ganze Nacht um sie kreisen und dadurch von Nahrungssuche und Fortpflanzung abgehalten werden.

Analog zu den in Kapitel 4.3 betrachteten Auswirkungen auf die Flora gehen viele Autorinnen und Autoren davon aus, dass die Präparation der Pisten sich stärker auf wildlebende Tiere auswirkt, als deren spätere Beschneidung. Durch die Entfernung von Vegetation und anderen Strukturelementen geht Lebensraum für Insekten verloren (vgl. Knaus 2011, S. 19 ff), wodurch sich aufgrund des sinkenden Nahrungsangebots wiederum die Anzahl an Vögeln verringert (vgl. Gray 2017, S. 69). Sichere Erkenntnisse bezüglich einzelner Arten liegen u.a. für Heuschrecken vor: Wie Keßler et al. 2012 (S. 290) belegen, nimmt sowohl deren Artendiversität als auch deren Individuenzahl auf präparierten Pisten ab, wobei der Effekt sich verstärkt, wenn diese Pisten künstlich beschneit werden. Ähnlich wie bei der Flora scheinen Pistenpräparation und Beschneidung auch bei den Insekten die Generalisten wie den Gemeinen Grashüpfer (*Chorthippus parallelus*) gegenüber den Spezialisten wie der Alpenen Gebirgsschrecke (*Miramella alpina*) zu bevorzugen, wodurch es zu einem Rückgang an Biodiversität kommt (ebd., S. 29 ff.).

#### **4.5 Auswirkungen auf das Landschaftsbild**

Der Bau von Beschneidungsanlagen ist wegen der für deren Betrieb erforderlichen Infrastruktur zur Energie- und insbesondere zur Wasserversorgung mit erheblichen Eingriffen in das natürliche Landschaftsbild verbunden (vgl. Sippel 2017, S. 44). Die sichtbarsten dieser Eingriffe stellen sicherlich die Speicherbecken (in Anlehnung an natürliche Wasserkörper oft auch Speicherseen oder Speicher-teiche bezeichnet, obwohl es sich in den seltensten Fällen um natürliche Gewässer handelt) dar, auf deren Befüllung bereits in Kapitel 4.2 eingegangen wurde.

Während in den 1970ern und 1980ern neben den Pisten insbesondere die Parkplätze sowie die zugehörige Verkehrsinfrastruktur die auffälligsten Eingriffe in das

Landschaftsbild eines Skigebiets darstellten, kamen mit der zunehmenden Verbreitung der künstlichen Beschneigung die Speicherbecken als dominierendes Element hinzu. Derartige Becken – die mit einem Volumen von bis zu 400.000 m<sup>3</sup> bei Tiefen zwischen 20 m und 30 m erhebliche Flächen überspannen können (vgl. Kellner & Weingartner 2018, S. 102; de Jong 2013, S. 36) – sowie die zu ihrer Befüllung und ihrem Betrieb erforderliche Infrastruktur, werden nicht selten mit hohem technischen Aufwand in unzugänglichen und schwer bebaubaren Arealen errichtet. Wie gravierend die damit verbundenen Landschaftseingriffe sind, zeigen beispielhaft die Darstellungen in Kirsch et al. 2014 und Eugen et al. 2010. Während die künstlichen Wasserflächen in einigen Regionen während der Sommermonate erfolgreich als Wander- und Ausflugsziele vermarktet werden (vgl. Mayer et al. 2011, S. 56), entstehen durch sie im Winter ganz neue Risiken: So kann es etwa durch Lawineneinstöße in Speicherseen zu kostspieligen Schäden an der Beschneigungsinfrastruktur kommen (vgl. Gabl et al. 2010 S. 26).

Neben den bereits benannten Elementen wirkt sich die Intensivierung des technisch gestützten Wintertourismus noch über zahlreiche weitere Effekte auf die Landschaftswahrnehmung aus – von optisch irritierenden weißen Pistenstreifen in ansonsten grünenden Umgebungen im Frühling über am Abend taghell beleuchtete Abfahrten und die daraus resultierende Lichtverschmutzung bis hin zu unansehnlichen, erkennbar erosionsgeschädigten und nur spärlich bewachsenen Pisten während der Sommermonate. Da bislang kaum empirische Untersuchungen zur Rezeption solcher Optiken durch Besucherinnen und Einheimische existieren, kann über deren Auswirkungen auf die menschliche Wahrnehmung des Landschaftsbildes jedoch nur spekuliert werden (vgl. Mayer et al. 2011, S. 55).

#### **4.6 Energieverbrauch künstlicher Beschneigung**

Auch wenn sich der Energieverbrauch künstlicher Beschneigung nicht auf die unmittelbare Umwelt in Skigebieten auswirkt, kann sie im Rahmen einer ökologischen Gesamtbewertung von Beschneiungsanlagen nicht ignoriert werden. Energie wird dabei primär für zwei Prozesse verbraucht: Für den Transport (und ggf. die Kühlung<sup>22</sup>) von Wasser zu Beschneiungsanlagen und Speicherbecken sowie für den Beschneigungsprozess an sich, d.h für die Erzeugung von Druckluft und

---

22 Für die Beschneigung zu verwendendes Wasser muss ab Temperaturen oberhalb von etwa 3°C gekühlt werden (vgl. Schneider 2014, S. 73).

den Betrieb von Ventilatoren und Kühlsystemen (vgl. Lang & Lang 2009, S. 11; zu Aufbau und Funktion von Beschneigungsanlagen siehe Kapitel 3.2).

Über den Energieverbrauch pro Hektar beschneiter Fläche finden sich in der Literatur unterschiedliche und aufgrund örtlicher Gegebenheiten teilweise stark voneinander abweichende Angaben. Müller et al. 2013 (S. 4) tragen hierzu eine Vielzahl von Quellen aus den Jahren 2002 bis 2009 zusammen und gelangen im Vergleich mit Erkenntnissen aus ihrem eigenen Forschungsprojekt KlimTourV zu einem Durchschnittswert von 10.000 kWh/ha. Dies deckt sich mit aktuelleren Angaben in Mimm 2018 (S. 1), welcher von einem Energieverbrauch von 6.000 bis 10.000 kWh pro Schneekanone und Saison sowie von einem Verhältnis von 0,8 ha beschneiter Fläche pro Schneekanone ausgeht, wodurch sich ein durchschnittlicher Energieverbrauch von 8.000 kWh auf 0,8 ha und damit ebenfalls von 10.000 kWh/ha ergibt. Rechnet man weitere Energieaufwendungen neben dem reinen Beschneigungsverbrauch (so beispielsweise für Wassertransport und -kühlung) ein, ergibt sich pro Hektar beschneiter Fläche sogar ein saisonaler Energieverbrauch von durchschnittlich 13.000 kWh (vgl. de Jong et al. 2012, S. 12).

Auch wenn der Energieverbrauch eines modernen Skiessorts somit zweifelsfrei hoch ist (so ist etwa das Skiessort Crested Butte im US-Bundesstaat Colorado innerhalb weniger Betriebsmonate für mehr als die Hälfte des jährlichen Energieverbrauchs der 2000-Seelen-Gemeinde verantwortlich, vgl. hierzu Gray 2017, S. 73), weisen Lang & Lang 2009 zu Recht darauf hin, dass „das Einschneien eines großen Skigebiets mit rund 550.000 kWh Strom in der Größenordnung des Betriebs einer offenen Kunsteisbahn [...] (rund 800.000 kWh/a) oder eines Hallenbades in den Bergen (820.000 kWh/a) liegt“ (S. 3). Im Unterschied zu anderen Großanlagen besteht beim Skiessort jedoch das Risiko, dass eine einzige längere Wärmeperiode oder ein mehrtägiger Starkregen das Ergebnis des Energieeinsatzes vollständig zunichte machen, während die Vergleichsanlagen mit dem jeweiligen Energieeinsatz das ganze Jahr hindurch – und nicht nur während einer zeitlich eng begrenzten Saison – betrieben werden können.

Zur Optimierung der energetischen Bilanz von Skigebieten findet sich in der Literatur eine Reihe von Vorschlägen, darunter etwa die anteilige oder ausschließliche Nutzung regenerativ erzeugter Energie zur Beschneigung (vgl. Joemann et al. 2017), die Sekundärnutzung von Speicherbecken zur Stromerzeugung (vgl. Lanz

et al. 2014, S. 16) oder die Integration von Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung in den Beschneigungsprozess (vgl. Noguera 2018, S. 57; Vagle 2016).

#### **4.7 Beurteilung der ökologischen Auswirkungen**

Die ökologischen Folgen künstlicher Beschneigung sind als erheblich zu betrachten. Während sich bei den Auswirkungen auf die Flora neben negativen Wirkungen auch Effekte zeigen, die positiv interpretiert werden können, sind die Auswirkungen auf den Boden sowie auf die Fauna ausschließlich negativ und kaum kompensierbar. Auch mit Blick auf die Gewässerqualität sowie auf das Landschaftsbild zeigen sich ausschließlich negative Effekte, die jedoch – sofern praktiziert – durch einen schonenden Umgang mit Wasserressourcen sowie durch eine angepasste Bauweise zumindest abgemildert werden können. Da die für die Beschneigung erforderliche Energie grundsätzlich auch klimaneutral und umweltschonend generiert und zur Verfügung gestellt werden kann, hängt die ökologische Bilanz eines Skigebiets in dieser Hinsicht vom gewählten Energiemix ab.

Auch wenn einige Autorinnen und Autoren (wie etwa Abegg 2012, S. 33) vor einer emotionalen Überhöhung der Umweltfolgen künstlicher Beschneigung warnen, bleibt festzuhalten, dass der überwiegende Anteil der gesichteten Literatur ein insgesamt negatives Bild von den ökologischen Auswirkungen technisch gestützter Wintersportangebote zeichnet. Hinzu kommt, dass eine ausgeprägte Infrastruktur für künstliche Beschneigung meist mit einem hohen Besucheraufkommen einhergeht, welches wiederum mit weiteren Belastungen für die Umwelt verbunden ist. Hierzu gehört insbesondere der touristische An- und Abreiseverkehr (vgl. Abegg 2011, S. 4), der aufgrund der relativen Zunahme von Flugreisen sowie dem gleichzeitigen Bedeutungsverlust von Bahnfahrten in die Alpen als größter Treiber der durch den Wintersporttourismus verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen zu betrachten ist (vgl. Behnen 2011, S. 289 ff). Zusammenfassend ist somit festzuhalten, dass technisch gestützte Wintersportangebote – wie jede Form des technisch gestützten Intensivtourismus – die natürliche Umwelt erheblich belasten.

## **5. Wirtschaftliche Tragfähigkeit**

### **5.1 Ökonomische Bedeutung des Wintersports**

Die ökonomische Bedeutung des Wintersports für manche Regionen manifestiert sich in wenigen Ländern so deutlich wie in Österreich, wo etwa 2,5% aller Vollzeitarbeitsplätze vom Wintersporttourismus abhängig sind (vgl. Grussmann et al. 2014, S. 44), der wiederum 68% (vgl. Grussmann et al. 2014, S. 43) bis 78% (vgl. Schneider 2014, S. 5) des Wintertourismus ausmacht (s.a. Hammerl 2010, S. 30). Der Wintertourismus ist damit für über ein Drittel des Beschäftigungseffekts der österreichischen Tourismuswirtschaft verantwortlich (vgl. Pröbstl-Haider & Pütz 2016, S. 16). In einigen österreichischen Gemeinden macht der (gesamte) Tourismus mehr als 80% der gesamten dortigen Wertschöpfung aus.

In Deutschland – das nicht zu den wichtigsten europäischen Wintersportländern gehört<sup>23</sup> – spielt der Wintersporttourismus eine weniger wichtige, aber dennoch nicht vernachlässigbare Rolle: Laut Demiroglu 2016 (S. 17) spielen sich etwa 12,5% der weltweiten wintersporttouristischen Wertschöpfung in Deutschland ab. Dabei zeigt sich, dass auch in den Mittelgebirgen die ökonomische Abhängigkeit vom Wintersport beträchtlich sein kann – so verzeichnete man beispielsweise in Wintersportort Winterberg in Nordrhein-Westfalen im Jahr 2012 rund 1,2 Millionen Übernachtungen und 1,9 Millionen Tagesgäste, von denen 480 Betriebe und mehr als 3.700 Arbeitsplätze abhängig waren (vgl. Usinger 2015, S. 13).

### **5.2 Ansprüche an künstliche Beschneigung**

Wie Dinter et al. 2016 (S. 5) und Landtwing & Götz 2016 (S. 593) anmerken, haben die Ansprüche von Urlauberinnen an Infrastruktur und Angebote von Winter-sportdestinationen während der vergangenen zwei Jahrzehnte beständig zugenommen. Von herausragender Bedeutung für die wirtschaftliche Existenz von Skigebieten ist dabei die Fähigkeit der Anbieter, Schneesicherheit zu garantieren: Da viele Touristinnen auf den Klimawandel mit einer erhöhten Flexibilität bei der Destinationswahl reagieren, „damit das bisherige Aktivitätsmuster beibehalten [werden kann]“ (Bischof et al. 2017, S. 225), können „relativ geringe Änderungen

---

<sup>23</sup> Neben Österreich sind dies Frankreich, Italien und die Schweiz, die zusammen 83% der europäischen Pistenflächen auf sich vereinen (vgl. Damm et al. 2017, S. 39).

der klimatischen Rahmenbedingungen [...] bereits massive Verluste in der Tourismusbranche zur Folge haben“ (Endler 2010, S. 15). Ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Witterung und Belegungszahlen von Wintersportdestinationen wird etwa von Falk & Vanat 2016 (S. 345) und Gonseth & Matasci 2011 (S. 265) nachgewiesen.

Wie eine im Jahr 2012 von Osberghaus et al. 2013 (S. 50 ff.) durchgeführte repräsentative Erhebung unter deutschen Winterurlauberinnen zeigt, haben zwar erst 3% der Befragten eine Reise wegen Schneemangels am Zielort nicht angetreten, beinahe 23% würden aber ihr Reiseziel ändern, wenn es dort mehrfach zu Saisonausfällen käme. Rund 6% der Befragten schlossen bereits 2012 eine Schneesicherheitsversicherung ab, welche die kostenlose Stornierung einer gebuchten Reise bei ungünstigen Witterungsbedingungen vor Ort ermöglichte – und weitere 7% planten, derartige Versicherungen zukünftig abzuschließen. Eine Erhebung unter 2.400 Wintersportlerinnen in Deutschland, Italien und Österreich durch Demiroglu et al. 2015 (S. 55) ergab, dass über ein Drittel der Befragten einen Urlaub bei schlechten Witterungsbedingungen abbrechen oder absagen würden. Die hohen Erwartungen an die Schneesicherheit von Destinationen hat dazu geführt, dass selbst in extremen Höhenlagen oberhalb von 3.000 m ü.NN mittlerweile Beschneiungsinfrastruktur vorgehalten wird (vgl. Gray 2017, S. 72), um potentiellen Gästen gegenüber Schneesicherheit signalisieren zu können.

Wie aber ist die für die Vermarktung von Skigebieten so wichtige Eigenschaft der Schneesicherheit definiert? In der gesichteten Literatur finden sich mit der 100-Tage-Regel und dem Weihnachtsindikator zwei häufig gemeinsam verwendete Definitionen, die nachfolgend kurz betrachtet werden sollen.

Die auf eine Veröffentlichung von Bruno Abegg aus dem Jahr 1996 zurückgehende 100-Tage-Regel besagt, dass ein Wintersportgebiet als schneesicher gelten kann, wenn in mindestens 7 von 10 Wintersaisons an mindestens 100 Tagen eine ausreichende Schneehöhe für den Wintersportbetrieb verfügbar ist, wobei die erforderliche Schneehöhe meist mit 30 cm angegeben wird. Diese Regel wird etwa in Dawson & Scott 2013 (S. 245), Müller et al. 2013 (S. 3), Steiger 2010 (S. 3) und Abegg 2012 (S. 29) referenziert. In einigen Quellen finden sich Adaptionen dieser Regel: So legen etwa Endler 2010 (S. 9 f.), Matzarakis et al. 2012 (S. 646), Becken 2010 (S. 12), Amelung & Moreno 2009 (S. 10) und Sippel 2017 (S.

43) die Wintersportsaison auf den Zeitraum zwischen dem 01.12. und dem 15.04., während sie bei Usinger 2015 (S. 9) am 16.12. startet. Während Müller et al. 2013 zur Erfüllung der 100-Tage-Regel einen Betrieb nicht im gesamten Skigebiet, sondern lediglich „auf der mittleren Höhe des Skigebiets“ (S. 1) verlangt, ist die Regel für Steiger 2011 (S. 687) erfüllt, wenn ein Betrieb auf mindestens 50% der Pistenfläche möglich ist.

Kritik an der Allgemeingültigkeit der 100-Tage-Regel findet sich etwa bei Schneider 2014 (S. 7), der darauf hinweist, dass sie – da die 100 Tage sich beliebig innerhalb der Saison verteilen können – nicht zwischen der wirtschaftlichen Bedeutung von Haupt- und Nebensaison unterscheidet. Ergänzend stellen Bark et al. 2010 (S. 469) fest, dass das Hauptgeschäft in Wintersportgebieten außerhalb Europas nicht während der „klassischen“ Wintersportsaison stattfindet<sup>24</sup> und die 100 Tage-Regel daher regional anzupassen ist. Demiroglu et al. 2015 (S. 103) bemängeln, dass eine empirische Überprüfung des Zusammenhangs zwischen der „Faustregel“ und der Wirtschaftlichkeit eines Skigebiets bis heute fehlt – und belegen am Beispiel zweier Skigebiete in der Türkei, dass eine Wirtschaftlichkeit auch bei Unterschreitung der Regel gegeben sein kann. Auch Usinger 2015 (S. 9) geht davon aus, dass für die Schneesicherheit und die Wirtschaftlichkeit kleinerer Skigebiete in Mittelgebirgen eigentlich eine 60-Tage-Regel oder eine 80-Tage-Regel gelten müsste. Selbst Abegg 2012 weist als Schöpfer der 100-Tage-Regel darauf hin, dass ihre Einhaltung „bei weitem nicht der einzige Faktor [ist], der über Erfolg oder Nichterfolg eines Skigebiets entscheidet“ (S. 29).

In einigen Publikationen wird die 100-Tage-Regel durch den Weihnachtsindikator ergänzt. Nach diesem gilt ein Skigebiet als schneesicher, wenn die betriebserforderliche Mindestschneehöhe während der ökonomisch wichtigen Weihnachtssaison zwischen dem 22.12. und dem 04.01.<sup>25</sup> durchgehend gegeben ist (vgl. Abegg & Steiger 2016, S. 395; Steiger 2011, S. 687; Müller et al. 2013, S. 3).

---

24 In den USA sind beispielsweise die in Europa eher unbedeutenden Erntedanktage (Thanksgiving) von wesentlicher wirtschaftlicher Bedeutung für Wintersportgebiete.

25 Viele europäische Skigebiete generieren in diesen 13 Tagen 20%-30% ihres gesamten Jahresumsatzes.

### 5.3 Kosten künstlicher Beschneigung

Bei der Betrachtung der Kosten künstlicher Beschneigung ist zwischen den Kosten für Infrastrukturerrichtung und -modernisierung sowie den Kosten für Instandhaltung und laufenden Betrieb zu unterscheiden. Da die Investitionskosten erheblich von Topologie und Topographie des Planungsgebiets abhängig sind, finden sich in der Literatur zwar beispielhafte Angaben zur Höhe einzelner Investitionen<sup>26</sup>, allgemeingültige Aussagen werden aber nur zur Amortisationsdauer getroffen. Diese liegt (bei wirtschaftlich arbeitenden Skigebieten, siehe hierzu Kapitel 5.2) für Schneekanonen bei etwa 12 Jahren, für Leitungen bei 20 bis 30 Jahren sowie für Speicherseen bei 30 bis 45 Jahren (vgl. Schneider 2014, S. 55) bzw. bei durchschnittlich 15 bis 20 Jahren für jeden investierten Euro (vgl. Snajdr 2012, S. 13).

Detailliertere Angaben finden sich dagegen zu den Betriebskosten von Beschneigungsanlagen, die durch die Energiekosten dominiert werden. Bei Tölzer & Schaffler 2017 (S. 30), Triebswetter & Wackerbauer (S. 100), Landtwing & Götz 2016 (S. 595) und Bark et al. 2010 (S. 482) finden sich für die Betriebskosten übereinstimmende Schätzwerte zwischen 3 Euro und 6 Euro pro Kubikmeter produziertem Schnee. Pro Kilometer beschneiter Skipiste ergeben sich damit Kosten zwischen 33.000 Euro und 50.000 Euro (vgl. Bräuer et al. 2009, S. 70; Triebswetter & Wackerbauer, S. 100). Eine davon abweichende Einschätzung findet sich bei Lang & Lang 2009 (S. 5), welche die Betriebskosten pro Pistenkilometer – auffallend breit – bei 18.000 Euro bis 88.000 Euro veranschlagen. Hinzu kommen die Kosten für die Pistenpräparation, wobei Pistenfahrzeuge rund 45.000 Euro in der Anschaffung kosten, bis zu 30 Liter Diesel pro Stunde verbrauchen und durchschnittlich rund 1.200 Betriebsstunden je Saison im Einsatz sind (vgl. Landtwing & Götz 2016, S. 594). Nicht einfaktoriert sind bei allen aufgeführten Schätzwerten die Kosten für das erforderliche Personal, da diese von Region zu Region zu stark divergieren, um allgemeingültige Aussagen ableiten zu können.

---

26 So wurden beispielsweise in Frankreich zwischen 1993 und 2014 1,4 Milliarden Euro und damit rund 66 Millionen Euro im Jahresdurchschnitt in neue Beschneigungstechnik investiert (vgl. Demiroglu et al. 2015, S. 124), in Österreich waren es im Jahr 2010 rund 153 Millionen Euro (vgl. Schneider 2014, S. 5).

#### 5.4 Wirtschaftlichkeit für Betreiber

Die Frage, ob technische Beschneigung für die Betreiber von Skipisten – in der Regel auch die Betreiber der zuführenden Seil- bzw. Bergbahnen – wirtschaftlich sein kann, wird in der gesichteten Literatur überwiegend bejaht. Laut Bieger et al. 2019 (S. 19) ist davon auszugehen, dass rund 22% der in größeren und fast 50% der in kleineren Skigebieten generierten Einnahmen der Beschneigung zu verdanken sind. Eine Risikoanalyse von Falk 2013 (S. 386) belegt, dass sich die frühzeitige (nicht jedoch die spätere) Einführung von Beschneigung positiv auf die langfristige wirtschaftliche Performanz von Skigebieten ausgewirkt hat – und dass Gebiete, die auf technische Beschneigung verzichten, einem höheren Insolvenzrisiko ausgesetzt sind. Falk & Vanat 2016 konnten zudem anhand einer Analyse von Daten aus 109 französischen Skigebieten nachweisen, dass die „kumulierten Investitionen in Beschneigungstechnik einen signifikanten und positiven Einfluss auf die Anzahl an Pistenutzern haben“ (S. 49), wobei der Zusammenhang nur für Skigebiete oberhalb von 1.800 m ü.NN generalisiert werden kann, während positive Effekte in niedrig gelegenen Gebieten nur in Jahren mit besonders wenig Naturschnee eintreten. Wie Damm et al. 2017 (S. 40) feststellen, hat künstliche Beschneigung den Umsatz vieler Skigebiete bereits weitgehend vom natürlichen Schneefall entkoppelt. Tatsächlich ist Beschneigung aus Sicht vieler Betreiber weit mehr als nur ein Ansatz zur Überbrückung ungünstiger Witterungsperioden, gestattet sie doch eine Verstetigung des Skibetriebs mit zusicherbaren Schneehöhen (vgl. Bark et al. 2010, S. 469).

Während die Wirtschaftlichkeit von Beschneigungstechnik für hochgelegene und größere Skigebiete in den meisten der gesichteten Quellen nicht bezweifelt wird, wird doch – insbesondere in jüngeren Publikationen – auf eine Reihe von Problemen hingewiesen, welche die perspektivische Wirtschaftlichkeit von Beschneigung in Frage stellen. Aufgrund der steigenden Energiepreise, der sich verschlechternden klimatischen Bedingungen sowie der sich – in einigen Regionen – verknappenden Wasserressourcen, wird die Beschneigung in vielen Gebieten immer energieintensiver und damit kostspieliger werden (vgl. Damm et al. 2014, S. 9). Dabei geht Abegg 2011 (S. 14) davon aus, dass der erhöhte Energiebedarf durch die klimatische Entwicklung alle zu erwartenden Effizienzgewinne durch die weitere technische Optimierung von Beschneiungsanlagen deutlich übertreffen wird.

Dies wird – vorbehaltlich einer stärkeren Subventionierung (siehe hierzu auch Kapitel 5.5) – zu erheblichen Steigerungen bei den Preisen für Lift- und Skikarten führen (vgl. Schneider 2014, S. 4; Damm et al. 2014, S. 8). Da die Entwicklung der Liftpreise in einigen Ländern – wie etwa Schweden (vgl. Demiroglu et al. 2015, S. 47) – bereits heute deutlich über der Inflationsrate liegt, gehen Autoren wie Laesser et al. 2010 davon aus, dass für weitere Erhöhungen „ohne zusätzliche Leistungen oder eine Beeinflussung der Wahrnehmung [der Preiserhöhungen durch die jeweilige Zielgruppe] nur ein geringer Spielraum“ besteht (S. 17). Diese Entwicklung stellt die Zukunft des Wintersporttourismus als Wachstumsmarkt in Frage (vgl. Demiroglu et al. 2015, S. 47) und könnte mittelfristig dazu führen, dass dieser anstatt eines durch breite Massen wahrgenommenen Freizeitvergnügens wieder zum Betätigungsfeld einer finanziell gutsituierten Klientel wird, wie dies noch bis in die 1960er der Fall gewesen ist (siehe auch Kapitel 3.1). Wie Lütlof & Lengweiler 2015 (S. 11) ausführen, sind die Winterumsätze der Bergbahnen in der Schweiz bereits heute rückläufig: So erwirtschaftete zur Wintersaison 2013/2014 nur noch die Hälfte der Betreiber im Fünfjahresdurchschnitt einen Gewinn, während dies 2011/2012 erst bei knapp einem Drittel der Fall war.

Da die Kosten der Beschneigung insbesondere in schneeärmeren Lagen ansteigen werden, ist davon auszugehen, dass vor allem tieferliegende (vgl. Bark et al. 2010, S. 468; Dawson et al. 2009, S. 2; Falk & Vanat 2016, S. 345) und kleinere und damit weniger investitionsstarke (vgl. Schneider 2014, S. 72; Müller et al. 2013, S. 8) Skigebiete von dieser Entwicklung betroffen sein werden. Falk & Vanat 2016 (S. 345) führen den Nachweis, dass sich Investitionen in Beschneigungstechnik in niedrig gelegenen Skigebieten schon heute nicht mehr rentieren, da sie sich nicht mehr signifikant auf die zu erwartenden Nutzerzahlen auswirken.

## **5.5 Wirtschaftlichkeit für Kommunen**

Neben der betriebswirtschaftlichen Rendite von künstlicher Beschneigung für den Pisten- oder Seilbahnbetreiber ist im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auch die regionalwirtschaftliche Rendite für die Kommune oder den Landkreis zu berücksichtigen (vgl. Bieger et al. 2019, S. 2). Obwohl laut Bernhart et al. 2017 „vielfach vermutet [wird], dass der Wirtschaftsmotor ‚Tourismus‘ zu steigenden Einnahmen in den Gemeindehaushalten führt und dafür sorgt, dass die finanzielle Lage der Gemeinden mit höherer Tourismusintensität zunimmt, [gilt es]

allerdings auch zu untersuchen, inwieweit der Tourismus höhere Gemeindeausgaben erforderlich macht, die wiederum die finanzielle Performance negativ beeinflussen können.“ (S. 9) Tatsächlich ist die öffentliche Hand nicht selten direkt oder indirekt an der finanziellen Aufrechterhaltung von Wintersportangeboten beteiligt (vgl. Bieger et al. 2019, S. 26), so etwa durch Subventionierung der Entnahme von Wasser aus lokalen Gewässern (vgl. de Jong 2013, S. 39) oder aber durch immer wieder neu ausgehandelte allgemeine Betriebskostenzuschüsse.

Der kritische Blick in die Literatur verdeutlicht, dass Kommunen ein erhebliches finanzielles Zukunftsrisiko eingehen, wenn sie die Entwicklung eines Wintersportgebiets in ihrem Einflussbereich zulassen oder fördern. Zwar zeigt eine von Bernhart et al. 2017 durchgeführte Untersuchung des Zusammenhangs zwischen touristischer Intensität und öffentlichen Haushalten in 395 österreichischen Kommunen, dass ein florierender Fremdenverkehr zu einer positiven Haushaltsentwicklung beiträgt und „tourismusintensive Gemeinden über einen höheren Wirtschaftsüberschuss und über eine höhere öffentliche Sparquote verfügen“ (S. 76). Gerät aber ein Betreiber in eine wirtschaftliche Schieflage, kann er aufgrund der mit einem Skigebiet direkt und indirekt verbundenen Arbeitsplätze (siehe hierzu auch Kapitel 5.1) erheblichen Druck auf eine Kommune ausüben, um zusätzliche Subventionen oder Betriebskostenzuschüsse zu erhalten.

Wie Schröder 2015 feststellt, sind die Pistenbetriebe „innerhalb [des] Netzwerks [aus regionalen touristischen Unternehmen] häufig jener Knotenpunkt, der am stärksten auf die Reiseentscheidung Einfluss nimmt. Diese Gegebenheit ruft [...] ein bestimmtes lokales und regionales Kräfteverhältnis hervor.“ (S. 98) Die sich daraus ergebende regionale Vormachtstellung trägt dazu bei, dass Pistenbetreiber nicht selten einen unverhältnismäßig großen Einfluss auf die öffentliche Meinung sowie auf politische Willensbildungsprozesse ausüben (vgl. Schröder 2017, S. 467). Ein 2013 entstandenes Positionspapier der Bergbahnen in Graubünden zum Umgang mit dem Klimawandel (Gschwend 2013) macht deutlich, dass seitens solcher Akteure teils sehr konkrete Forderungen zur öffentlichen Förderung von Beschneidung sowie zur Lockerung von Umweltauflagen erhoben werden.

Wie Abegg 2011 anmerkt, existieren „zahlreiche Beispiele für die finanzielle Unterstützung von notleidenden Seilbahnunternehmen“ (S. 18), die das erhebliche Potential der Branche unterstreichen, mit der Androhung einer Betriebseinstel-

lung und den daraus resultierenden regionalwirtschaftlichen Verwerfungen immer wieder neue öffentliche Mittel zu requirieren. Abegg bemängelt, dass die von den Betreibern vorgebrachte Prämisse einer ökonomischen Unverzichtbarkeit im Rahmen der politischen Entscheidungsfindungsprozesse meist nicht kritisch hinterfragt oder empirisch überprüft wird. „Kommunen, die den Bau künstlich beschneiter Skianlagen genehmigen bzw. fördern, gehen damit das Risiko ein, [...] finanziell in die Pflicht genommen zu werden oder aber vor einer Investitionsruine zu stehen.“ (de Jong et al. 2017, S. 221)

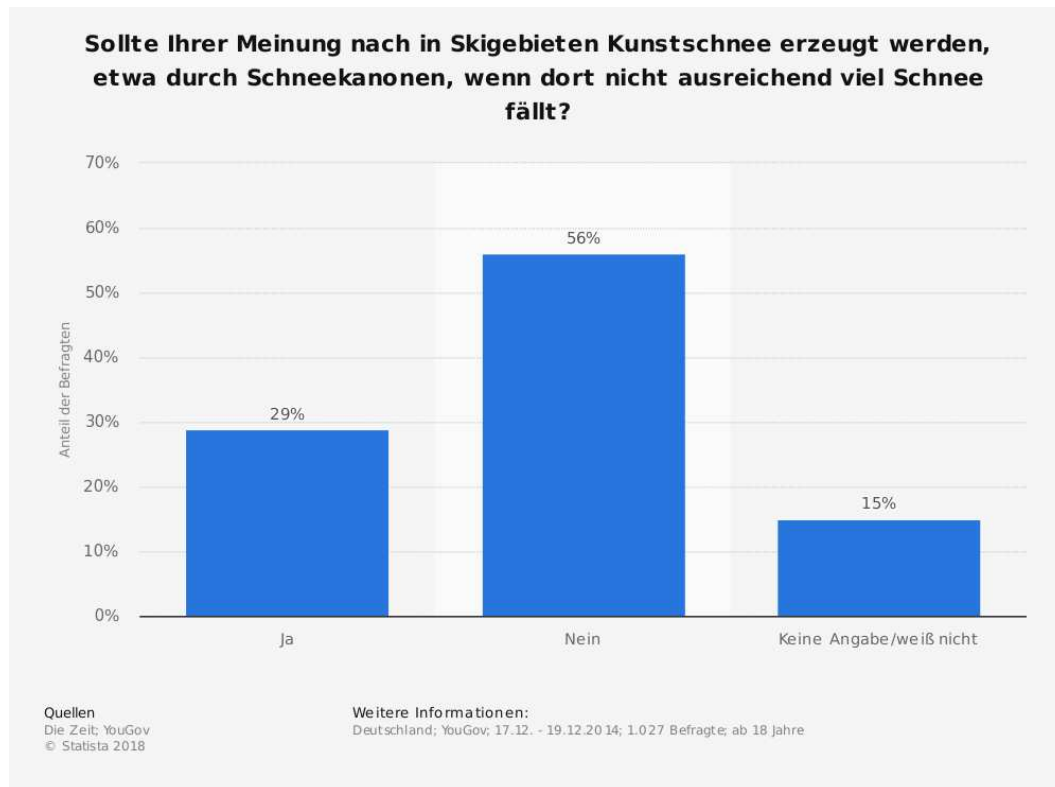
## **5.6 Akzeptanz künstlicher Beschneigung**

Als Anpassungsstrategie an den Klimawandel ist die Beschneigung in den vergangenen zehn Jahren deutlich stärker in die mediale und öffentliche Kritik geraten. Wurde Beschneigung bis in das erste Jahrzehnt des neuen Jahrtausends primär von Landschaftsästheten und Umweltverbänden wegen der enormen baulichen Eingriffe sowie der Wirkung auf Flora und Fauna abgelehnt, stellt sich auch Ski-enthusiasten zunehmend die Frage, ob eine Klimaanpassungsstrategie mit einem hohen Energieverbrauch und ökologischen Schäden einhergehen sollte – mithin ja genau den Faktoren, die den anthropogenen Klimawandel vorantreiben.

Da der langfristige Erfolg dieser Strategie zudem zeitlich wie örtlich begrenzt ist – nicht alle Skigebiete werden angesichts der klimatischen Veränderungen auf Dauer beschneien können (vgl. Bark et al. 2010, S. 469) – wird die Sinnhaftigkeit von Beschneigung vor dem Hintergrund der öffentlichen Debatten um den Klimawandel zunehmend in Frage gestellt (vgl. Schröder 2017, S. 472). Dies wird auch in der Industrie als Bedrohung wahrgenommen: „Viele Eltern leiden heute unter Gewissensbissen. Sollen sie ihren Kindern noch das Pistenskifahren beibringen? Ist es vertretbar, sich einzureihen in die Autostaus Richtung Skiorte und in die endlosen Liftschlangen? [...] Alternativen sind gefragt.“ (Bertle 2009, S. 20)

Wie eine im Auftrag der ZEIT durch das Meinungsforschungsinstitut YouGov durchgeführte bevölkerungsrepräsentative Umfrage ergab, waren bereits 2014 rund 56% der erwachsenen Deutschen der Meinung, dass fehlender natürlicher Schnee nicht durch die Produktion von Kunstschnee ausgeglichen werden sollte (siehe Abbildung 5). In der gleichen Erhebung gaben 78% der Befragten an, dass

den Interessen der touristischen Industrie in Wintersportgebieten kein Vorrang vor den Belangen des Umwelt- und Naturschutzes eingeräumt werden sollte<sup>27</sup>.



*Abbildung 5: Ergebnis einer im Auftrag der ZEIT im Jahr 2014 durchgeführten Befragung unter deutschen Erwachsenen zur Vertretbarkeit der Erzeugung von Kunstschnee.*

Wie problematisch für die Wintersportindustrie diese zunehmende Ablehnung bereits geworden ist, zeigt unter anderem der erhebliche Widerstand gegen die beiden Bewerbungsversuche der Stadt München um die Olympischen Winterspiele der Jahre 2018 und 2022, wobei sich die Kritik – neben den Kosten für die öffentliche Hand – wesentlich gegen die Beschneidung und deren Umweltfolgen richtete (vgl. Hamberger et al. 2013, S. 10). Sowohl die Bewerbung Münchens als auch die Bewerbung des Kantons Graubünden auf die Winterolympiade 2022 scheiterten letztendlich an Volksbegehren (vgl. Müller et al. 2013; Hierneis et al. 2011).

Für Wintersportinvestoren ist die schwindende Akzeptanz mit erheblichen Risiken verbunden: Widersprüche und Klagen durch Anwohnerinnen und Umweltverbände können Planungen und Bauvorhaben um Jahre verzögern und – auch ange-

<sup>27</sup> Datenquelle: Statista

sichts der konjunkturellen Entwicklung im Bausektor – erheblich verteuern oder sogar gänzlich scheitern lassen. Darüber hinaus kann auch lokaler politischer Widerstand zu Verzögerungen oder höheren Bewilligungsauflagen führen.

### **5.7 Beurteilung der wirtschaftlichen Tragfähigkeit**

Zunehmende touristische Ansprüche, höhere Energiepreise, sich verschlechternde klimatische Rahmenbedingungen, wachsender Konkurrenzdruck (vgl. Laesser et al. 2010, S. 23) und ein aus einer Vielzahl von Gründen (darunter steigende Preise, demografischer Wandel und zunehmendes Umweltbewusstsein) abnehmendes Interesse am Wintersport (vgl. Demiroglu et al. 2015, S. 47), setzen Pistenbetreiber unter Druck und stellen – wie in den vorigen Abschnitten dargestellt – die Wirtschaftlichkeit technischer Beschneigung sowohl mit Blick auf die betriebswirtschaftliche sowie auf die regionalökonomische Rendite in Frage.

Obwohl Beschneigung – gerade in höhergelegenen Gegenden – noch auf Jahrzehnte hinaus technisch möglich sein wird, hat die aufgezeigte Entwicklung bereits zu wirtschaftlichen Problemen in zahlreichen Skigebieten geführt. Wie Laesser et al. 2010 berichten, „leidet die Bergbahnbranche in besonderem Maße unter einer Ertragsschwäche“ (S. 6), die insbesondere durch die abnehmenden Grenzerlöse von Investitionen in neue Beschneigungstechnik verursacht wird – die aufgrund des erwähnten Erwartungs- und Konkurrenzdrucks dennoch beständig zunehmen (vgl. Benoit 2012, S. 23). Wie Walser 2013 (S. 60) anmerkt, arbeitete schon 2013 ein Drittel der österreichischen Seilbahnen nicht mehr rentabel – und laut einer in Bogataj 2011 (S. 19) zitierten Studie der Uni Zürich erwogen bereits 2007 gut 15% der schweizerischen Seilbahnen die Geschäftsaufgabe. Im Jahr 2018 konstatierten Falk & Steiger 2018 (S. 10) für 23% der österreichischen Seilbahnunternehmen eine negative Eigenkapitallage, d.h. einen unter dem Wert der aufgenommenen Kredite und Hypotheken liegenden Unternehmenswert.

Eine besondere Vulnerabilität ergibt sich durch den Umstand, dass einzelne Saisonausfälle sich erheblich auf die wirtschaftliche Überlebensfähigkeit von Skigebieten auswirken können, da die Umsatzausfälle erforderliche Infrastrukturinvestitionen verzögern (vgl. Becken 2010, S. 6). Während die meisten Marktteilnehmer unwirtschaftliche Einzelsaisons noch überstehen können (Dawson & Scott 2013, S. 245), können zwei oder mehr schlechte Saisons in Folge bereits das wirtschaftliche Aus eines Skigebiets bedeuten (vgl. Dawson et al. 2009, S. 3). Die

Branche reagiert auf diese Bedrohung mit zunehmend exotischeren Maßnahmen, zu denen unter anderem der Abschluss von Wetterderivaten gehört – derivativen Finanzinstrumenten, die zwischen einem touristischen Betrieb und einer Versicherung gehandelt werden und durch die sich Witterungsrisiken auf den Versicherungspartner übertragen lassen (detailliert dargestellt in Dordevic 2018). Immer wieder diskutiert wird auch eine direkte Beteiligung der von den Wintergästen profitierenden regionalen Betriebe der Hotellerie und Gastronomie an den Kosten der Beschneigung – allerdings konnte diesbezüglich noch in keiner Region eine funktionierende Vereinbarung getroffen werden (vgl. Abegg 2011, S. 16).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die perspektivische Wirtschaftlichkeit künstlicher Beschneigung von zahlreichen Autorinnen hinterfragt wird. Wie Trawöger & Steiger 2012 zusammenfassen, drängten „hohe Investitionen in technische Infrastruktur und laufende Kosten für die Aufrechterhaltung des Skibetriebs [...] in der jüngeren Vergangenheit bereits kleine und mittlere Seilbahnunternehmen an den Rand ihrer Existenz. Kostenbeteiligungen größerer und wirtschaftlich erfolgreicherer Skigebiete werden bereits diskutiert.“ (S. 29) Da jede zusätzliche Investition in für die Kunstschneeproduktion erforderliche Infrastruktur aufgrund der Amortisationszeit sowie aufgrund der kalkulatorischen Kosten (die verausgabten Gelder stehen nicht mehr für den Aufbau alternativer Angebote zur Verfügung, die Eingriffe ins Landschaftsbild schmälern die Attraktivität der Destination für andere Zielgruppen) zu einer weiteren wirtschaftlichen Bindung an die Aufrechterhaltung des Wintersportbetriebs beiträgt (vgl. Balbi 2012, S. 6), sollte jede entsprechende Kapitalanlage gründlich geprüft werden – das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte DSS kann hierfür einen Bezugsrahmen liefern (siehe Kapitel 7).

## 6. Beschneigung und Klimawandel

### 6.1 Stand der Klimaforschung

#### 6.1.1 Natürlicher und anthropogener Klimawandel

Unter dem Begriff des Klimas wird laut DWD (zitiert nach Usinger 2015, S. 11) die Gesamtheit aller Wettererscheinungen verstanden, „die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder [...] Gebiet charakterisieren. Es wird repräsentiert durch die statistischen Gesamteigenschaften [...] über einen [...] langen Zeitraum von [mindestens] 30 Jahren.“ Das Klima ist zeitlich sowohl vom Wetter – dem physikalischen Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt (in der Regel eines Tages, gelegentlich auch von Zeiträumen bis zu einer Woche) – sowie der Witterung – der durchschnittlichen Entwicklung des Wetters über mehrere Monate – abzugrenzen (vgl. Berchtenbreiter 2014, S. 14).

Das Klima verhält sich – global wie lokal – über sehr lange Zeiträume nicht konstant, sondern ist natürlichen Schwankungen unterworfen, die etwa durch Änderungen in der Intensität der Sonnenabstrahlung, plattentektonische Verschiebungen, vulkanische Aktivitäten oder Änderungen an der Neigung der Erdachse verursacht werden können (vgl. Endler 2010, S. 7; Lenz 2012, S. 34). Über die Jahrmillionen kam es so zu einem Wechsel zwischen Warm- und Kaltzeiten mit erheblichem Einfluss auf die Entwicklung des Lebens auf der Erde.

Seit Beginn der Industrialisierung in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts verfügt der Mensch über die Fähigkeit, die Entwicklung des Klimas nicht nur lokal – etwa durch Rodung und Landwirtschaft – sondern auf globaler Ebene zu beeinflussen. Durch die zunehmende Nutzung fossiler Energieträger wie Öl, Kohle und Gas sowie durch andere menschliche Aktivitäten kommt es zu einer Freisetzung von CO<sub>2</sub> und anderen Treibhausgasen – wie insbesondere Methan – in die Atmosphäre (vgl. Grussmann et al. 2014, S. 4). Diese Gase verstärken den natürlichen Treibhauseffekt der Erdatmosphäre, durch den von der Erdoberfläche abgegebene Infrarotstrahlung in der Atmosphäre absorbiert und anteilig wieder auf die Erde zurückgestrahlt wird (vgl. Lenz 2012, S. 36). Seit Beginn der Industrialisierung hat die atmosphärische Konzentration von CO<sub>2</sub> um 31% sowie die Konzentration von Methan um 151% zugenommen (vgl. Pinnow 2014, S. 4).

Der durch den Menschen verursachte Klimawandel wird in Abgrenzung zum natürlichen als anthropogener Klimawandel bezeichnet. Es handelt sich um ein äußerst komplexes Phänomen, welches von einer Vielzahl an teilweise unzureichend erforschten Wechselwirkungen, Prozessen und Rückkopplungen bestimmt wird, die sich – global wie regional – abschwächend oder verstärkend auswirken können. Während der vergangenen 100 Jahre hat sich die globale Durchschnittstemperatur primär aufgrund menschlicher Eingriffe um  $0,74^{\circ}\text{C}$  erhöht, weshalb im Zusammenhang mit dem anthropogenen Klimawandel häufig der Begriff der „globalen Erwärmung“ Verwendung findet (vgl. Becken 2010, S. 10).

Der Stand der internationalen Forschung zum Klimawandel wird seit 1988 durch das IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change; engl. für Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen) in den sogenannten Sachstandsberichten (Assessment Reports) aggregiert und aufbereitet. Das IPCC ist der WMO (World Meteorological Organization, engl. für Weltorganisation für Meteorologie) und dem UNEP (United Nations Environment Programme, engl. für Umweltprogramm der Vereinten Nationen) zugeordnet.

#### 6.1.2 Fortschreiten des anthropogenen Klimawandels

Der anthropogene Klimawandel ist mit einer Vielzahl gravierender Folgen verbunden, zu denen unter anderem der langsame Anstieg des Meeresspiegels und damit der Verlust von Küstenregionen, die Zunahme extremer Wetterereignisse wie etwa von Überschwemmungen und Hurrikans und das Abtauen der polaren Eisschilde sowie des Permafrostbodens gehören. Eine detaillierte Betrachtung dieses Phänomens jenseits der Auswirkungen auf den Wintertourismus würde den Rahmen dieser Arbeit überschreiten – es sei mit Referenz auf Bogataj 2011 (S. 5) daher nur darauf verwiesen, dass die „Bewältigung des Klimawandels weitestgehend einstimmig als die wahrscheinlich größte Herausforderung betrachtet [wird], vor der unser Planet [...] in den kommenden Jahrzehnten [steht].“

Da sich die schon freigesetzten Treibhausgase auch mit geeigneten Maßnahmen wie etwa massiven Aufforstungen nur über lange Zeiträume wieder aus der Atmosphäre entfernen lassen, ist die zu antizipierende Entwicklung des Klimas während der nächsten Jahrzehnte kaum noch zu beeinflussen (vgl. Demiroglu 2016, S. 6). Als wichtigstes klimapolitisches Ziel gilt die Begrenzung des Anstiegs der durchschnittlichen Erwärmung der Erdoberfläche auf maximal  $2^{\circ}\text{C}$  einschließlich

der bereits eingetretenen Erwärmung von 0,74°C im 20. und 21. Jahrhundert. Nach Ansicht des IPCC kann diese Grenze nur dann eingehalten werden, wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre bis zum Jahr 2100 bei 450 ppm (Parts per Million, engl. für ein Millionstel) stabilisiert werden kann. Als langfristig verträglich und damit wünschenswert gilt sogar eine Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5°C im Vergleich zur vorindustriellen Periode (vgl. Damm et al. 2014, S. 32; Grussmann et al. 2014, S. 4). „Bei der derzeitigen globalen, ökonomischen und politischen Entwicklung, vor allem bei den Wirtschaftswachstumsraten und dem damit verknüpften Emissionsausstoß, ist eine Erwärmung der Erdoberfläche von über 2°C [jedoch] sehr wahrscheinlich.“ (Grussmann et al. 2014, S. 13).

## **6.2 Klimamodelle**

### **6.2.1 Globale Klimamodelle**

Die Prognose zukünftiger klimatischer Entwicklungen erfolgt auf Basis von Klimamodellen, welche die für das Klima bedeutendsten physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre sowie deren wesentliche Wechselwirkungen mit anderen Systemen wie etwa den Ozeanen abbilden. Aufgrund ihrer Komplexität erfordern solche Modelle enorme Rechenleistungen, die nur von großen Rechenzentren wie dem Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) in Hamburg erbracht werden können (vgl. Dallhammer et al. 2015, S. 10). Globale Klimamodelle sind mit inhärenten Unsicherheiten behaftet, die sich u.a. durch erforderliche Vereinfachungen, bisher unbekannte Wirkmechanismen oder auch parallel zum anthropogenen Klimawandel auftretende natürliche Klimaentwicklungen ergeben (vgl. Endler 2010, S. 47). Hinzu kommt, dass die Klimaentwicklung über den Zeitraum von einigen Jahrzehnten hinaus erheblich vom Umfang weiterer Treibhausgas-Emissionen durch den Menschen abhängt – ein Faktor, dessen Prognose aufgrund vieler politischer und wirtschaftlicher Facetten ebenfalls mit einem hohen Maß an Unsicherheit verbunden ist (vgl. Kromp-Kalb et al. 2009, S. 24).

Auch wenn alle Modelle übereinstimmend das weitere Fortschreiten des anthropogenen Klimawandels vorhersagen, besteht somit hinsichtlich dessen Geschwindigkeit und Ausmaß sowie der Wahrscheinlichkeit des Überschreitens von „Sprungpunkten“, an welchen irreversible Prozesse (wie beispielsweise das Ab-

tauen der sibirischen Permafrostböden) ausgelöst werden, eine nicht zu beseitigende Restunsicherheit (vgl. Dallhammer et al. 2015, S. 14).

### 6.2.2 Regionale Klimamodelle

Ein Problem beim regionalen Einsatz globaler Klimamodelle ist deren grobe, zwischen 300 km und 100 km liegende Gitterauflösung. Diese macht es unmöglich, regionale Besonderheiten (Mikroklima, Höhenlagen, größere Wasserkörper etc.) zu berücksichtigen, wodurch die Genauigkeit der Prognosen abnimmt (vgl. Benoit 2012, S. 498). Da sich der Klimawandel in unterschiedlichen Regionen und insbesondere Naturräumen jedoch stark unterschiedlich manifestiert (vgl. Bogataj 2011, S. 11; Balbi et al. 2011, S. 53; Enke 2010, S. 101), werden kleinräumige Klimamodelle benötigt, um dem zunehmenden Interesse an konkreten regionalen Klimaprognosen zur Planung von Klimaanpassungsmaßnahmen Rechnung zu tragen. „Vor allem im komplexen Gelände – z. B. Mittel- und Hochgebirge – ist eine hohe räumliche Auflösung essenziell, da meso- und mikroskalige Prozesse einen entscheidenden Einfluss auf das Gebirgsklima haben.“ (Endler 2010, S. 101) Derartige Modelle werden – höchst rechenleistungsaufwändig – mittels unterschiedlicher mathematischer Verfahren sowie unter Verwendung lokaler Klimadaten aus globalen Modellen abgeleitet (vgl. Grussmann et al. 2014, S. 14).

Zur Prognosegenauigkeit regionaler Klimamodelle finden sich in der gesichteten Literatur unterschiedliche Aussagen. Während zahlreiche Veröffentlichungen auf entsprechende Modelle zurückgreifen, ist laut Endler 2010 zu hinterfragen, wie gut die Modelle „die klimatische Komplexität mit dem für ein heterogenes Gelände charakteristischen Lokalklima [wiedergeben] können“ (S. 48).

Zu den meistgenutzten regionalen Klimamodellen gehört das REMO (Regional Modell) – ein seit 1993 kontinuierlich durch den DWD, das DKRZ, das Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPIfM) und das Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) fortentwickeltes, dynamisches Klimamodell mit einer Gitterauflösung von 10 km (dies ist derzeit die feinstmögliche Auflösung regionaler Klimamodelle überhaupt, vgl. Dallhammer et al. 2015, S. 11) und einer temporalen Auflösung bis auf Stundenebene, dessen historische Ursprünge im Europa-Modell des DWD – einem Modell zur Wettervorhersage – liegen. REMO prognostiziert unter anderem Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur (jeweils im Tagesmittel) in den drei IPCC-Emissionsszenarien A1B, A2 und B1 (siehe Kapitel 6.2.3) und ist daher zur

Vorhersage der Feuchttemperatur geeignet. Die derzeit im REMO verfügbaren Daten umfassen die Jahre zwischen 1950 und 2100 (vgl. Schmidt et al. 2010, S. 405; Prex 2015, S. 15). Gemeinsam mit dem ebenfalls durch das DWD mitentwickelten COSMO-CLM, ist REMO das im deutschsprachigen Raum derzeit meistgenutzte regionale Klimamodell (vgl. Kreilkamp 2011, S. 204).

### 6.2.3 Emissionsszenarien

Um die zukünftige Klimaentwicklung prognostizieren zu können, müssen Annahmen über den weiteren Umgang der Menschheit mit den Herausforderungen des Klimawandels und insbesondere über die politische und wirtschaftliche Entwicklung und damit auch über die Entwicklung der anthropogenen Einträge von Treibhausgasen getroffen werden. Das IPCC hat hierzu im Jahr 2000 vier Emissionsszenarien (A1, A2, B1 und B2) entwickelt, wobei das Szenario A1 in drei Unterszenarien (A1FI, A1T und A1B) zerfällt, insgesamt also sechs mögliche Ausgänge skizziert werden (vgl. Prex 2015, S. 12; Grussmann et al. 2014, S. 11). Die in diesen Szenarien jeweils angenommene Entwicklung soll nachfolgend kurz auf Basis des IPCC Fourth Assessment Reports (IPCC 2007) dargestellt werden:

- A1FI: Eine rückläufige Weltbevölkerung, ein hoher Grad an technischer Innovation, ein hoher Grad an Globalisierung und ein rasches globales Wirtschaftswachstum bei primärem Einsatz fossiler Energiequellen. Bei A1FI handelt es sich um das im Ergebnis negativste Szenario.
- A1T: Identische Entwicklung wie A1FI, aber bei primärem Einsatz nichtfossiler, regenerativer Energiequellen.
- A1B: Identische Entwicklung wie A1FI bei ausgewogenem Einsatz von fossilen und nichtfossilen, regenerativen Energiequellen. Der Eintritt von A1B gilt mit Blick auf die wirtschaftliche Entwicklung sowie den Energieverbrauch derzeit als besonders wahrscheinlich, weshalb A1B häufig als Basis globaler wie regionaler Klimamodelle dient.
- A2: Eine weiterhin wachsende Weltbevölkerung, ein geringerer Grad an Globalisierung und Wirtschaftswachstum sowie eine weitgehend regional entkoppelte wirtschaftliche Entwicklung.

- B1: Ein schneller Umbau der globalen Wirtschaft in Richtung einer Informations- und Dienstleistungsökonomie, eine breite Einführung ressourcenschonender und umweltfreundlicher Technologien sowie ein weitgehender Umstieg auf regenerative Energiequellen. Von allen Szenarien fällt der anthropogene Klimawandel in B1 am geringsten aus.
- B2: Eine ähnliche Entwicklung wie in B1, die aber stärker lokal als global geprägt wird, weshalb sowohl das Wirtschaftswachstum als auch die Durchsetzung neuer Technologien langsamer verlaufen.

Die Klimaszenarien liegen mit einem bis zum Jahr 2100 prognostizierten Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur von 1,1°C (B1) bis 6,4° (A1FI) weit auseinander (vgl. Lenz 2012, S. 13) und bilden somit ein breites Spektrum zukünftiger Entwicklungsmöglichkeiten ab. Einige Autoren wie etwa Becken et al. 2015 (S. 430) halten sämtliche Szenarien angesichts der wirtschaftlichen und politischen Entwicklungen der letzten Jahre für zu optimistisch und gehen davon aus, dass insbesondere die positiveren B-Szenarien nicht mehr erreicht werden können.

Grundlage der meisten politischen Diskussionen im deutschsprachigen Raum ist gegenwärtig das Szenario A1B (vgl. Kreilkamp 2011, S. 204), das – wie dargestellt – als plausibel und „mittelgut“ gilt, obwohl es einen Anstieg der durchschnittlichen Erdtemperatur von 2,8°C bis zum Jahr 2100 prognostiziert und damit das klimapolitische „Zwei-Grad-Ziel“ klar verfehlt (vgl. Grussmann et al. 2014, S. 13; Bräuer et al. 2009, S. 5; Bender et al. 2011, S. 406).

## **6.3 Konsequenzen für den Wintersport**

### **6.3.1 Bereits eingetretene Folgen**

Der Klimawandel schreitet in unterschiedlichen klimatischen Regionen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit voran, wobei Bergregionen als besonders verwundbar gelten (vgl. Bogataj 2011, S. 7). Als beispielhaft für das besonders rasche Fortschreiten des Klimawandels in einem Hochgebirge kann die klimatische Entwicklung in den Alpen betrachtet werden. Da in den Alpen schon seit über 200 Jahren meteorologische Messungen vorgenommen werden, liegen für diesen Klimaraum besonders viele Daten vor (vgl. Bender et al. 2011, S. 406). Diese Daten zeigen, dass sich die Durchschnittstemperatur in den Alpen zwischen 1900 und

1990 um 2°C erhöht hat, während der durchschnittliche globale Temperaturanstieg im gleichen Zeitraum bei 0,78°C lag (entsprechende Untersuchungen aus den frühen 2000ern werden u.a. zitiert in Balbi et al. 2010, S. 1; Bonzanigo et al. 2016, S. 637 und Grussmann et al. 2014, S.4). Diese Geschwindigkeitsdifferenz des Temperaturanstiegs ist in der letzten Dekade von der doppelten auf die dreifache Geschwindigkeit angestiegen (vgl. Sippel 2017, S. 43).

An keiner anderen Entwicklung zeigt sich der rasante klimatische Wandel im Hochgebirge so deutlich, wie am Rückgang der Alpengletscher, die zwischen 1850 und 2010 rund die Hälfte ihres Volumens eingebüßt haben (vgl. Balbi et al. 2010, S. 1; de Jong 2013, S. 20). Von 95 Gletschern in der Schweiz befinden sich derzeit 92 auf dem Rückzug, während nur ein einziger expandiert (vgl. Paul et al. 2013, S. 54 f.). Auch wenn das Zwei-Grad-Ziel gehalten werden kann, werden die Gletscher bis zum Jahr 2100 vermutlich fast vollständig verschwinden.

Das schnellere Fortschreiten des Klimawandels in Hoch- wie Mittelgebirgsregionen wirkt sich bereits heute erkennbar auf den Wintertourismus aus, der wiederum als besonders klimasensibel gilt (vgl. Abegg 2012, S. 30). Die durchschnittliche Schneedichte und Schneedeckendauer gingen um mehrere Wochen zurück (vgl. Beniston 2012, S. 352), Niederschläge während des Winters treten verstärkt in Form von Regen auf (vgl. Grussmann et al. 2014, S. 14), das Hochwasserrisiko stieg deutlich an (vgl. Bogataj 2011, S. 10) und der alpine Permafrostboden taut auf Tiefen von bis zu 7 m auf (vgl. Paul et al. 2013, S. 58). Balbi et al. 2011 (S. 53) stuften bereits 2011 rund 9% der größeren Skigebiete in den Alpen als nicht mehr schneesicher ein. Berichte über besonders ungewöhnliche Wärmeperioden und geringe Schneehöhen in den Saisons 2006/2007, 2014/2015 und 2015/2016 finden sich bei Huss et al. 2016 (S. 37/38), Zweifel et al. 2016 (S. 13), Erdlinger & Wissensteiner 2013 (S. 9), Paul et al. 2013 (S. 53), Falk 2010 (S. 912), Dingeldein 2017 (S. 36) und Burakowski & Magnusson 2012 (S. 3).

Aber auch in zahlreichen Wintersportgebieten außerhalb des alpinen Raums verschlechtern sich die für einen wirtschaftlichen Betrieb erforderlichen klimatischen Rahmenbedingungen – so mussten etwa in der Saison 2014/2015 24 von 66 internationalen Wintersportwettbewerben im norwegischen Trondelag aufgrund der Witterung ersatzlos abgesagt werden (vgl. Dieseth 2016, S. 1). Laut Burakowski & Magnusson 2012 (S. 5) haben die sich ändernden Witterungsbedingungen we-

sentlich dazu beigetragen, dass der Umsatz der US-Wintersportindustrie zwischen 1999 und 2010 um über eine Milliarde Dollar zurückging, wodurch es zum Verlust von 27.000 Arbeitsplätzen kam. In Falk 2013 (S. 377) werden Statistiken der National Ski Areas Association (NSAA; der Nationalverband der US-Skigebiete) zitiert, aus denen hervorgeht, dass zwischen 1982 und 2010 insgesamt 264 von 735 (~ 36%) aller US-Skiressorts aufgegeben wurden oder Insolvenz anmelden mussten. In Japan wurden im gleichen Zeitraum 147 Ressorts geschlossen, in Australien stellten allein zwischen 1995 und 2011 rund 20% der Skigebiete den Betrieb dauerhaft ein. Neben dem Klimawandel sind auch die demografische Entwicklung sowie das nachlassende touristische Interesse am Wintersport (siehe hierzu auch Kapitel 9.1) als Treiber dieser Entwicklung zu betrachten.

Weltweit hat die durchschnittliche Schneebedeckung seit den 1960ern um 10% abgenommen (vgl. Dar et al. 2014, S. 2250). Die WTO (World Tourism Organization, engl. für Weltorganisation für Tourismus) der Vereinten Nationen stuft den Klimawandel seit 2003 vor diesem Hintergrund als wesentliche Bedrohung für die Zukunft des Wintersporttourismus ein (vgl. Balbi et al. 2010, S. 1).

### 6.3.2 Zu antizipierende Folgen

Mit Blick auf die zu antizipierenden Folgen des Klimawandels für den Wintersport besteht durch die gesichtete Literatur hindurch Einigkeit: Der Klimawandel wird – auch in weniger extremen Ausprägungen – in jedem Fall zu einer weiteren Verringerung des Schneefalls, zu einer Verschlechterung der Rahmenbedingungen für die Beschneigung, zu einem massiven Rückzug der Gletscher, zu einer Zunahme von Hitze- und Starkregenperioden während der Wintersaison sowie zu einem allgemein erhöhten Risiko für extreme Wetterereignisse führen (vgl. Bischof et al. 2017, S. 228; Davoudi et al. 2012, S. 167 f.; Balbi et al. 2010, S. 3; Dingeldein 2017, S. 33). In einigen Regionen ist zudem mit einer Reduktion der Wasserverfügbarkeit zu rechnen, wodurch sich die Rahmenbedingungen für die künstliche Beschneigung weiter verschlechtern. „Besonders betroffen sind die tiefer gelegenen Skigebiete sowie die Saisonrandzeiten, insbesondere der Saisonauftakt mit den für den Geschäftserfolg so wichtigen Weihnachtsferien.“ (Abegg 2012, S. 31)

Eine auf Basis des Klimamodells REMO (siehe Kapitel 6.2.2) von Berchtenbreiter 2014 (S. 24) durchgeführte Analyse prognostiziert für den Alpenraum bis 2050 einen Anstieg der Durchschnittstemperatur von 2°C sowie bis 2085 einen Anstieg

von weiteren 1-2°C. Eine technische Beschneigung könnte – vorbehaltlich wesentlicher technischer Fortschritte – unter diesen Bedingungen in vielen Skigebieten nicht über die 2050er hinaus aufrechterhalten werden (vgl. Damm et al. 2014, S. 9). In Abegg 2012 werden Prognosen der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD; Organisation for Economic Co-Operation and Development) zitiert, nach denen der Anteil schneesicherer Skigebiete in den Alpen bei einer Erwärmung von 1°C von derzeit 90% auf 75% sinken würde. „Bei 2°C wären noch 61%, bei 4°C nur noch 30% der Skigebiete schneesicher.“ (S. 30) Im Alpenraum wird es dadurch „zu starken Umsatzeinbußen [...] kommen. Der Klimawandel bedingt im Jahr 2050 eine Reduktion der Gesamtausgaben im alpinen Wintertourismus in der Höhe von 505,5 Mio. Euro. Diese Kosten steigen bis zum Jahr 2100 auf 1,1 Mrd. Euro pro Jahr an.“ (Grussmann et al. 2014, S. 2)

Während sich die meisten Publikationen aufgrund der enormen wirtschaftlichen Bedeutung mit den Folgen des Klimawandels für die Alpen befassen, sind auch die Prognosen für andere Wintersportregionen negativ: Für die europäischen Mittelgebirge sagen Bräuer et al. 2009 (S. 69) im Falle eines Verfehlens des Zwei-Grad-Ziels das Ende des Wintersports bis 2030 voraus; bereits eine Erwärmung um 1°C – die kaum mehr abzuwenden sein wird – wäre Pinnow 2014 zufolge „ausreichend, um die schneesicheren Gebiete [in Deutschland] um 60% unter das heutige Niveau [zu] verringern.“ (S. 14) Negative Prognosen zur Zukunft der Wintersportindustrie finden sich etwa für Australien in Barnett et al. 2015 oder für die USA in Dawson & Scott 2013 und Lazar & Williams 2010. Selbst in besonders hochgelegenen Gegenden wie dem Himalaya-Gebirge auf dem indischen Subkontinent wird mit einem erheblichen negativen Einfluss des Klimawandels auf den Wintersporttourismus gerechnet (vgl. Dar et al. 2014, S. 2560).

Besonders eindrücklich werden die sich weltweit verschlechternden Wintersportbedingungen durch eine Analyse von Scott et al. 2015 (S. 922) illustriert, nach der in 8 (bei einem Niedrigemissionsszenario) bis 9 (bei einem Hochemissionsszenario) der bisherigen 19 Austragungsorte der Olympischen Winterspiele bis 2050 auch mit Beschneigung keine Winterolympiade mehr stattfinden könnte.

## 6.4 Adaptionstrategien

### 6.4.1 Adaption und Mitigation

Beim Umgang mit der Herausforderung des Klimawandels sind zwei wesentliche Strategien zu unterscheiden: Einerseits die Anpassung an die sich verändernden klimatischen Bedingungen – die Adaption – sowie andererseits den Versuch, das Ausmaß der Veränderungen durch die Senkung von Emissionen, die Aufforstung von Wäldern als CO<sub>2</sub>-Senken oder andere geeignete Maßnahmen zu begrenzen – die Mitigation (vgl. Prex 2015, S. 37; Matern et al. 2009, S. 27).

Da der inhaltliche Fokus dieser Arbeit auf der künstlichen Beschneigung liegt, soll auf die davon weitgehend unabhängigen Mitigationsstrategien nicht weiter eingegangen werden. Da der CO<sub>2</sub>-Abdruck eines durchschnittlichen Skiurlaubs zu fast drei Vierteln durch die An- und Abreise zum Urlaubsort sowie durch die Mobilität vor Ort bestimmt wird, sind effiziente Mitigationsstrategien vor allem solche, die sich mit der Reorganisation von Verkehr befassen (vgl. Sippel 2017, S. 42; Borck 2013, S. 23). Aus dem gleichen Grund wird die Beschneigung – die mit weitem Abstand wichtigste Strategie zur Aufrechterhaltung des klassischen Wintersporttourismus (vgl. Dawson & Scott 2013, S. 244; Davoudi et al. 2012, S. 178) – nachfolgend ebenfalls nicht separat betrachtet, sondern lediglich eine kurze Darstellung weiterer wichtiger Strategien gegeben. Eine Übersicht aller wesentlichen Adaptionstrategien findet sich in Abbildung 6.

### 6.4.2 Technische Aufrechterhaltung

#### Schneemanagement

Der immer effizientere Umgang mit Natur- und insbesondere mit Kunstschnee im Sinne einer zu verwaltenden Ressource fasst unter dem Begriff des Schneemanagements eine Reihe technischer und organisatorischer Maßnahmen zusammen. Zu diesen gehören unter anderem das Anlegen von Langzeit-Schneedepots durch die thermische Isolation des Schnees mit Sägespänen und Folien über den Sommer sowie die Schaffung von Kurzzeit-Schneedepots zur Lagerung von bei günstigen Witterungsbedingungen zu viel produziertem Kunstschnee (vgl. Landtwin & Götz 2016, S. 594; Abegg 2011, S. 16; Benoit 2012, S. 102; Lintzen 2012, S. 13). Zu den weiteren Maßnahmen des Schneemanagements zählen die Verteilung von Schnee mittels Fahrzeugen, die Beschattung von Pisten, die Bearbei-

tung von Pisten in einer Weise, die die Höhe des für den Betrieb erforderlichen Schnees verringert, sowie die Nutzung von Schneezäunen zur Verhinderung von Schneeverwehungen (vgl. Berchtenbreiter 2014, S. 29; Davoudi et al. 2012, S. 178).

In größeren Skiessorts ist das Schneemanagement nicht selten hochtechnisiert und umfasst unter anderem die Nutzung von Geoinformationssystemen, Wärmesensorik und Videoüberwachung (vgl. Landtwing & Götz 2016, S. 593).

Aufrechterhaltung	Rollskier Schneeersatzstoffe	Snow Farming Pistenpräparation Naturschneeangebote Künstliche Beschneigung Anlage von Schneedepots Verlagerung des Saisonstarts Reflexionsschutz für Gletscher Konzentration auf Gunsträume
	Kultur Wellness Gesundheit Indoor-Sport Gastronomie Sommerfrische	Skilanglauf Snowbiking Winterwanderungen Wildbeobachtungen Scheeschuhwandern
Witterungsunabhängig		Witterungsabhängig

*Abbildung 6: Adaptionstrategien, segmentiert nach ihrer Zielstellung (Aufrechterhaltung / Ersatz des klassischen Skisports) und ihrer Witterungsabhängigkeit.*

### Ausweichen in Gunsträume

Eine der aufwändigsten, zugleich aber erfolgreichsten Anpassungsstrategien ist das Ausweichen in Gunsträume bzw. die „Flucht nach oben“. Dabei werden tiefergelegene Standorte zugunsten höhergelegener Standorte aufgegeben, die bessere Rahmenbedingungen für natürlichen Schneefall und für die Produktion von Kunstschnee bieten (vgl. Yang & Wan 2010, S. 58). Die „Flucht nach oben“ gilt als eine ökologisch besonders kritische Form der Klimaadaptation, da der Spezialisierungsgrad von Lebewesen sowie die Empfindlichkeit und klimatische Vul-

nerabilität von Ökosystemen mit der Höhenlage ansteigt und der Massentourismus damit mehr und mehr in Gebiete eindringt, in denen er schwere und möglicherweise irreparable Schäden verursacht (vgl. Gray 2017, S. 36; Pinnow 2014, S. 31). Hinzu kommt, dass sowohl der bauliche und Versorgungsaufwand sowie die höheren Transportkosten als auch das Risiko von witterungsbedingten Betriebsunterbrechungen und die Lawinengefahr mit der Höhe ansteigen und ein Ausweichen in immer höhere Areale somit auch wirtschaftlich nur eingeschränkt sinnvoll ist (vgl. Abegg 2011, S. 17).

### Weitere Strategien

Zu den weiteren Strategien der technischen Aufrechterhaltung des Skibetriebs gehören das Einbringen von Silberoxidpartikeln als Kondensationskeime in die Wolkendecke (meist per Flugzeug) zur Unterstützung der natürlichen Schneebildung (das sogenannte „Cloud Seeding“, siehe hierzu Benoit 2012, S. 103) sowie die vollständige bauliche Abschirmung des Pistenareals von den Witterungsbedingungen vor Ort durch die Errichtung klimatisierter Skihallen, wie sie etwa bereits in Bispingen und Oberhof zu finden sind (vgl. Usinger 2015, S. 43). Seit einigen Jahren gibt es zudem Bestrebungen, fehlenden Natur- oder Kunstsnee durch andere Materialien mit ähnlichen fahrerischen und idealerweise auch optischen Eigenschaften zu ersetzen. So wurde etwa im Rahmen des BMBF-geförderten Projekts BioGlizz von einem Konsortium um die TU Dresden eine algenbasierte Gleitunterlage für den Skisport entwickelt (siehe hierzu Valtingoier 2015).

## 6.4.3 Angebotsalternativen

### Sommertourismus

Zahlreiche Quellen weisen darauf hin, dass der Sommertourismus in den klassischen Wintersportgebieten im Gegensatz zum Wintertourismus durch den Klimawandel gestärkt werden könnte. Als Gründe hierfür werden unter anderem die Verlängerung der Sommersaison, das mildere Wetter während des Herbstes sowie die zu erwartende „Hitzevlucht“ aus Großstädten in die im Sommer noch vergleichsweise kühleren und feuchteren Höhenlagen aufgeführt (vgl. Endler 2010, S. 60 f.; Schmidt 2015, S. 32; Pröbstl-Haider & Pütz 2016, S. 17).

Die zum Erhalt des Wintertourismus stattfindende „Flucht nach oben“ könnte diesen Effekt noch verstärken, da touristische Infrastruktur in immer größeren Hö-

henlagen errichtet wird, die perspektivisch zwar auch keine absolute Schneesicherheit mehr garantieren können, die aber während des Sommers witterungsbedingt für hitzegeplagte Großstädterinnen höchst attraktive Urlaubsziele sein dürften (vgl. Demuth et al. 2010, S. 43). Autoren wie Bender et al. 2011 rechnen sogar mit einer Rückkehr der in den 1970ern und 1980ern populären „Sommerfrische“ als innereuropäischem Urlaubstrend (S. 415).

Als besonders interessante Sommer-Zielgruppe hat sich in den letzten Jahren die einkommensstarke, schnell wachsende, junge und „höhenaffine“ Gruppe der Mountainbikerinnen erwiesen (vgl. Kurtz 2015, S. 9). Für diese Zielgruppe spielt allerdings – neben Infrastrukturfaktoren wie Beschilderung, Wegequalität und Unterkünften – das Natur- und Landschaftserlebnis eine herausragende Rolle bei der Wahl der Urlaubsregion (vgl. Sand 2018, S. 30). Es ergibt sich insofern ein Zielkonflikt in der Vermarktung einer Urlaubsregion gegenüber Mountainbikern (möglichst naturnahe und attraktive Landschaft) und Skifahrern (möglichst große gefühlte Schneesicherheit durch gut sichtbare technische Ausstattung).

### Wintertourismus

Auf den Wintertourismus ausgerichtete Alternativen können entweder darauf abzielen, Ski-Langlauf und Alpin-Ski so gut wie möglich zu emulieren oder aber diese Aktivitäten durch andere attraktive Angebote zu substituieren. Zur ersten Gruppe der Alternativen zählen etwa das Gras- und Rollenskitfahren oder die Nutzung von befeuchteten Plastikmatten als Schneeersatz (vgl. hierzu etwa Usinger 2015, S. 45 f.). Zur zweiten Gruppe der Alternativen zählen alle schneeunabhängigen Angebote, die während des Winters im Außenraum wie insbesondere völlig wetterunabhängig in Gebäuden (vgl. Balbi et al. 2013, S. 40) möglich sind, also etwa Wellness-, Kultur-, Hallensport- oder Kulinarik-Angebote. Hinzugerechnet werden können auch schneeabhängige Angebote, für die deutlich weniger Schnee benötigt wird, wie etwa Schneeschuhwanderungen, Winterwanderungen oder Wildtierfütterungen. Alle Außenaktivitäten sind letztlich aber auch von der Attraktivität und Akzeptanz der winterlichen Landschaft abhängig, die wiederum unter fehlendem Naturschnee leidet (vgl. Eriksen et al. 2011, S. 15).

Eine Sonderstellung nehmen sogenannte Naturschnee-Konzepte ein: In einigen Wintersportregionen wie etwa dem bayerischen Achental wird bewusst auf den Einsatz künstlicher Beschneigung verzichtet, so dass eine Nutzung der Pisten nur

möglich ist, wenn ausreichend Naturschnee fällt (vgl. Schmidt 2015, S. 46). Auch in solchen Regionen bemüht man sich in der Regel intensiv um den Aufbau von schneeunabhängigen Angeboten zur Überbrückung von Mangelperioden.

Auch wenn Abegg 2011 (S. 19) einen Markt für den „wintersportlosen“ Wintertourismus sieht, der zwischen 25% und 50% des aktuellen Besuchervolumens umfassen könnte, halten Davoudi et al. 2012 (S. 178) und Pröbstl-Haider & Pütz 2016 alle Angebotsalternativen dadurch für limitiert, dass eine völlig oder weitgehend schneefreie Landschaft auch für den nicht an Wintersport interessierten Besucher im Winter unattraktiv wirkt. Hinzu kommt, dass ein Großteil der an Wintersport interessierten Gäste sich derzeit noch eher wenig für Angebotsalternativen erwärmen kann: „Selbst ein ideales Alternativprogramm kann bei einem 7-tägigen Urlaub nur für 15% der Wintersportlerinnen und Wintersportler das Skifahren vollständig ersetzen.“ (Pröbstl-Haider & Pütz 2016, S. 17). Auch Abegg 2011 weist vor diesem Hintergrund darauf hin, dass das „Potential der schneeunabhängigen Produkte nicht überschätzt werden“ darf (S. 19).

## 7. Konzeptionierung eines Decision Support Systems

### 7.1 Methodisches Vorgehen

Im Rahmen der Sichtung der in Kapitel 2 aufgeschlüsselten Vielzahl an Quellen wurde deutlich, dass eine qualifizierte Empfehlung hinsichtlich der technischen Realisierbarkeit, der ökologischen Verträglichkeit sowie der wirtschaftlichen Tragfähigkeit von künstlicher Beschneigung an einem spezifischen Standort auf zwei wesentlichen Säulen ruhen sollte,

- a) einer qualitativen Betrachtung der an diesem Standort geltenden Rahmenbedingungen wie etwa der generellen Verfügbarkeit von Wasser, der Nähe des Planungsgebiets zu Schutzgebieten oder der Akzeptanz künstlicher Beschneigung durch Anwohner und lokale Interessensgruppen sowie
- b) einer quantitativen Analyse historischer und prognostischer Daten zum lokalen Mikroklima mit Blick auf die technische Realisierbarkeit von künstlicher Beschneigung während der Amortisationsdauer der zu tätigenen Investitionen.

Wie Damm et al. 2014 (S. 9) oder auch Dawson et al. 2009 (S. 1) bemängeln, werden in vielen allgemeinen Betrachtungen zur Zukunft der Skiindustrie sowohl das lokale Mikroklima einzelner zu bewertender Skigebiete, als auch die Möglichkeit der künstlichen Beschneigung weitgehend außer Acht gelassen. Dieser Kritik soll im zu konzipierenden Modell durch die Berücksichtigung des örtlichen Klimas sowie durch die Integration der Möglichkeit künstlicher Beschneigung als Bewertungsfaktor Rechnung getragen werden.

Die Zweiteilung in die qualitative Betrachtung der Rahmenbedingungen (a) und die quantitative Analyse der Beschneibarkeit (b) an einem Standort wurde in den nachfolgenden Kapiteln sowie bei der Softwareumsetzung des Entscheidungsfindungsmodells in Form eines DSS durchgehend berücksichtigt. Während im Rahmen dieser Arbeit von der weniger komplexen Betrachtung der Rahmenbedingungen zur komplexeren Analyse der lokalen Beschneibarkeit übergegangen wird, empfiehlt sich für die praktische Anwendung des Modells die umgekehrte Abfolge: Erst wenn feststeht, dass eine technische Beschneigung an einem zu beplanenden Standort überhaupt über einen angemessenen Zeitraum realisierbar sein wird, lohnt sich die Betrachtung der sonstigen Rahmenbedingungen.

## 7.2 Identifizierte Einflussfaktoren

### 7.2.1 Qualitative Betrachtung

Im Rahmen des Literaturreviews sowie einer parallel zu diesem durchgeführten Sichtung von Presseberichten aus den vergangenen zehn Jahren über Probleme und Erfolge bei Planung und Bau von Beschneiungsanlagen sowie bei deren Betrieb, konnten folgende positiv wie negativ wirkende Faktoren identifiziert werden.

#### Positiv wirkende Faktoren

Lage: Die Eignung der Lage eines Projektionsgebietes hängt primär von dessen Höhe (in m ü.NN) sowie von der Himmelsrichtung der Pistenausrichtung ab. Nordhänge gelten aufgrund der stärkeren Sonnenexposition als am schlechtesten, Südhänge als am besten beschneibar. Als nachteilig gelten zudem Areale, die häufig starken Winden ausgesetzt sind. Da letzterer Aspekt im DSS im Rahmen der quantitativen Betrachtung abgebildet wird, werden im Rahmen der qualitativen Betrachtung lediglich Höhenlage und Ausrichtung berücksichtigt.

Wasserverfügbarkeit: Der Verfügbarkeit von Wasser gewinnt als Standortfaktor zunehmend an Bedeutung. Projektionsgebiete, in denen ein oder mehrere Fließgewässer existieren, die ausreichend Wasser führen, um eine durchgehende Entnahme zur Befüllung von Speicherbecken zu gewährleisten, sind gegenüber Gebieten im Vorteil, in denen diesbezüglich Unsicherheiten zu konstatieren sind.

Alternativangebote: Da auch mit künstlicher Beschneigung keine durchgehende Schneesicherheit mehr garantiert werden kann, ist ein wirtschaftlich erfolgreicher Betrieb insbesondere in solchen Wintersportgebieten möglich, in denen im Falle eines Ausfalls attraktive, von der Zielgruppe akzeptierte und unmittelbar verfügbare Alternativangebote existieren.

Bekanntheitsgrad: Der letzte der fünf identifizierten Positiv-Faktoren weist keinen direkten Zusammenhang mit der Frage der technischen und wirtschaftlichen Beschneibarkeit auf, sondern ließe sich auch auf die Bewertung touristischer Regionen mit vollständig anderer Ausrichtung übertragen: Das mit der Investition in touristische Infrastruktur verbundene Risiko ist – erwartbar – in solchen Regionen geringer, die sich bereits als touristische Destinationen etabliert haben und die daher über eine Grundbekanntheit und eine Stammbesucherschaft verfügen. Da ein hohes Besucheraufkommen nicht selten mit einer größeren Diversifikation der

touristischen Angebote einhergeht, müssen die Faktoren „Bekanntheitsgrad“ und „Alternativangebote“ als interdependent betrachtet werden.

### Negativ wirkende Faktoren

Schutzgebietsnähe: Die Nähe zu ökologischen Schutzgebieten wie etwa Nationalparks oder Biosphärenreservaten erschwert die Planung und den Betrieb von Beschneiungsanlagen, da – etwa mit Blick auf die Wasserentnahme oder den Zusatz von Additiven – in der Nähe solcher Schutzgebiete höhere Auflagen zu erfüllen sind und zudem mit mehr Widerstand von Umweltverbänden gerechnet werden muss. Die Wahrscheinlichkeit eines Scheiterns während der Planungsphase ist hier grundsätzlich als größer einzuschätzen.

Mangelnde Akzeptanz: Widerstand gegen den Aufbau von Beschneiungsinfrastruktur – etwa durch Umweltverbände oder lokale politische Akteure – kann ein Planungsvorhaben erheblich verzögern, verteuern und sogar zu dessen Scheitern führen. Analog zu Bekanntheitsgrad und Alternativangeboten ist auch bei den Faktoren „Schutzgebietsnähe“ und „mangelnde Akzeptanz“ von einer Interdependenz auszugehen.

Zur zu empfehlenden Mindesthöhe für den erfolgreichen Betrieb eines Skigebiets – sowohl unter den gegenwärtigen als auch unter den zukünftigen klimatischen Bedingungen – konnten in der gesichteten Literatur verschiedene voneinander abweichende Angaben gefunden werden.

Fundstelle	Wert	Fundstelle	Wert
Steiger 2010, S. 3	≥ 1.200 m	Endler 2010, S. 11	≥ 1.500 m
Davoudi et al. 2012, S. 166	≥ 1.300 m		

*Tabelle 1: Schwellwerte für die gegenwärtig zu empfehlende Mindesthöhe.*

Fundstelle	Wert	Fundstelle	Wert
Brunner 2013, S. 24	≥ 1.300 m	Campos et al. 2018, S. 9	≥ 2.000 m
Bräuer et al. 2009, S. 69	≥ 1.500 m	Beniston 2012, S. 356	≥ 3.000 m
Balbi 2012, S. 4	≥ 1.500 m	Prex 2015, S. 11	≥ 3.000 m

*Tabelle 2: Schwellwerte für die zukünftig zu empfehlende Mindesthöhe.*

## 7.2.2 Quantitative Analyse

Im Rahmen des Literaturreviews konnten acht Parameter identifiziert werden, die für eine quantitative Analyse der Beschneisbarkeit von Bedeutung sind:

Lufttemperatur	Schneehöhe (jeweils für
Luftfeuchtigkeit	Ski-Alpin und Langlauf)
Feuchttemperatur	Niederschlagsmenge
Dauer der Wintersaison	Windgeschwindigkeit

Für fünf dieser acht Parameter (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Feuchttemperatur und benötigte Schneehöhen für Ski-Alpin und Ski-Langlauf) werden in der gesichteten Literatur unterschiedliche Schwellwerte benannt, die in den Tabellen 3 bis 7 wiedergegeben werden. In fast allen Fällen sind diese Werte nicht Ergebnisse experimenteller oder analytischer Arbeiten der Autorinnen und Autoren, sondern Übernahmen der Angaben von Herstellern und Skigebietsbetreibern oder aus älteren Publikationen (teilweise zurückreichend bis in die 1930er).

Alle Parameter werden nachfolgend noch im Detail vorgestellt, wobei auch auf die jeweiligen Rahmenbedingungen eingegangen wird, unter denen die benannten Schwellwerte Gültigkeit besitzen (z.B. die Beschaffenheit des Terrains bei Angaben zur minimal erforderlichen Schneehöhe).

Fundstelle	Wert	Fundstelle	Wert
Chin et al. 2018, S. 45	$\leq -2^{\circ}\text{C}$	Steiger 2011, S. 686	$\leq -5^{\circ}\text{C}$
Schmidt 2015, S. 35	$\leq -2^{\circ}\text{C}$	Scott et al. 2015, S. 918	$\leq -5^{\circ}\text{C}$
de Jong et al. 2012, S. 3	$\leq -3^{\circ}\text{C}$	Dawson & Scott 2013, S. 247	$\leq -5^{\circ}\text{C}$
Schönthaler et al. 2015, S. 199	$\leq -3^{\circ}\text{C}$	Pinnow 2014, S. 27	$\leq -5^{\circ}\text{C}$
Müller et al. 2013, S. 3	$\leq -4^{\circ}\text{C}$	Lintzen 2013, S. 18	$\leq -5^{\circ}\text{C}$

*Tabelle 3: Schwellwerte für den Parameter Lufttemperatur.*

Fundstelle	Wert	Fundstelle	Wert
Pinnow 2014, S. 27	$\leq 65\%$	Lintzen 2013, S. 18	$\leq 80\%$

*Tabelle 4: Schwellwerte für den Parameter Luftfeuchtigkeit.*

Fundstelle	Wert	Fundstelle	Wert
Noguera 2018, S. 4	$\leq -2^{\circ}\text{C}$	Schneider 2014, S. 10	$\leq -3^{\circ}\text{C}$
Damm et al. 2014, S. 9	$\leq -2^{\circ}\text{C}$	Graber 2017, S. 1	$\leq -5^{\circ}\text{C}$
Benoit 2012, S. 35	$\leq -3^{\circ}\text{C}$	Schneider 2014, S. 43	$\leq -5^{\circ}\text{C}$
Olefs et al. 2010, S. 1100	$\leq -3^{\circ}\text{C}$	Demiroglu et al. 2015, S. 5	$\leq -7^{\circ}\text{C}$

*Tabelle 5: Schwellwerte für den Parameter Feuchttemperatur.*

Fundstelle	Wert	Fundstelle	Wert
Foken & Lüers 2015, S. 36	$\geq 30\text{ cm}$	Becken 2010, S. 6	$\geq 30\text{ cm}$
Scott et al. 2015, S. 918	$\geq 30\text{ cm}$	Schneider 2014, S. 13	$\geq 30\text{ cm}$
Demiroglu et al. 2015, S. 103	$\geq 30\text{ cm}$	Bark et al. 2010, S. 469	$\geq 30\text{ cm}$
Müller et al. 2013, S. 1	$\geq 30\text{ cm}$		

*Tabelle 6: Schwellwerte für den Parameter Schneehöhe (Ski-Alpin).*

Fundstelle	Wert	Fundstelle	Wert
Bark et al. 2010, S. 469	$\geq 10\text{ cm}$	Foken & Lüers 2015, S. 36	$\geq 15\text{ cm}$

*Tabelle 7: Schwellwerte für den Parameter Schneehöhe (Ski-Langlauf).*

Alle acht eingangs benannten Parameter wurden in das quantitative Analysemodell aufgenommen, welches die Basis des zu konzipierenden DSS bildet. Das Modell wurde insofern flexibel gehalten, als dass die zugehörigen Grenzwerte frei modifiziert werden können und auch eine Erweiterung um zusätzliche Parameter möglich ist. Eine Anpassung an die speziellen mikroklimatischen Rahmenbedingungen betrachteter Standorte sowie an zukünftige technische Entwicklungen bei der Schneeproduktion, ist daher ohne großen Aufwand darstellbar.

Da sich die Feuchttemperatur – wie in Abschnitt 3.3 dargestellt – aus Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit errechnen lässt, finden die Schwellwerte für beide Parameter (die ja wiederum von der Ausprägung des jeweils anderen Parameters abhängig sind) keinen Eingang in das Modell. Dieses wird dadurch von den standortspezifischen Aussagen der in den Tabellen 3 und 4 aufgeführten Publikationen entkoppelt. Die in das Modell übernommene Kombination aus Feuchttemperatur, Schneehöhe und der Identifikation disruptiver Einflüsse durch Wind, Regen und Wärme, zeichnet sich damit durch größtmögliche Standortunabhängigkeit aus.

### Feuchttemperatur

Es wird davon ausgegangen, dass die Herstellung von qualitativ hochwertigem Kunstschnee (ohne die Beifügung von Zusätzen wie SNOMAX) nur dann möglich ist, wenn die Feuchttemperatur maximal  $-3^{\circ}\text{C}$  beträgt. Da sowohl die Lufttemperatur als auch die Luftfeuchtigkeit (anhand der in Kapitel 3 dargestellten Formel) in die Berechnung der Feuchttemperatur einfließen, wird die Luftfeuchtigkeit – obwohl in der Literatur häufig genannt und von essentieller Bedeutung für die Beschneibarkeit – nicht separat in das Analysemodell aufgenommen, sondern geht indirekt über die Feuchttemperatur in dieses ein. Die Lufttemperatur wird dagegen als separater Parameter für die Bestimmung disruptiver Phasen benötigt. Die Feuchttemperatur wird in  $^{\circ}\text{C}$  erfasst und kann – je nach Umfang der verfügbaren Daten – als Stunden-, Tages-, Wochen- oder Monatsmittelwert vorliegen. Ihre Berechnung ist sowohl auf Basis realer Wetterdaten als auch auf Basis von Prognosedaten aus regionalen Klimamodellen (siehe hierzu Kapitel 6) möglich.

### Niederschlagsmenge

Die Niederschlagsmenge – üblicherweise erfasst als Tagessumme in mm oder als durchschnittliche Tagessumme in mm pro Woche oder Monat – ist aus zwei Gründen von Bedeutung: Zum einen lässt sich anhand der Niederschlagsmenge in Verbindung mit der Lufttemperatur ermitteln, an welchen Tagen es zu natürlichem Schneefall kommt. Zum anderen ist davon auszugehen, dass ein bei positiven Temperaturen als Regen fallender Niederschlag von mehr als 20 mm pro Tag und über einen Zeitraum von zwei Tagen hinaus als ein für den Pistenbetrieb disruptives Ereignis gewertet werden muss, da anhaltender Regen in diesem Umfang nicht nur zur Einstellung des Skibetriebs führt, sondern auch die Pistenoberfläche erheblich in Mitleidenschaft zieht (vgl. Becken 2010, S. 6; Scott et al. 2015, S. 918). Wie eine von Steiger im Jahr 2015 durchgeführte Erhebung unter 2.400 Skifahrerinnen in Deutschland, Österreich und der Schweiz zeigt, ist das Auftreten von Regen noch vor Wind, Nebel und anderen Wetterproblemen der meistgenannte Grund für den Abbruch von Ski-Aktivitäten (vgl. Demiroglu et al. 2015, S. 53). Angaben zur Niederschlagsmenge können in Form realer Wetterdaten sowie in Form von Prognosedaten aus regionalen Klimamodellen vorliegen.

### Lufttemperatur

Die Lufttemperatur (in °C) wird nicht nur für die Bestimmung der Feuchttemperatur sowie für die Identifikation disruptiver Niederschlagsphasen benötigt, sie zeigt darüber hinaus auch disruptive Wärmephasen an: Liegt sie an mehr als zwei Tagen in Folge bei mehr als 10°C, so ist von einem teilweisen Anschmelzen der Pistenoberfläche mit negativen Folgen für den Skibetrieb auszugehen (vgl. Scott et al. 2015, S. 918; Becken 2010, S. 6). Auch dieser Parameter kann stunden-, tages- wochen- und monatsweise erfasst bzw. gemittelt und mit realen Wetterdaten sowie mit Prognosedaten aus regionalen Klimamodellen unterlegt werden.

### Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit ist für die Bestimmung der Beschneibarkeit von Bedeutung, da bei „zu starkem Wind“ das Wasser-Druckluft-Gemisch so stark verweht wird, dass ein Großteil des Kunstschnees verloren geht. Da sich in der Literatur überraschenderweise keine konkreten Angaben zu der Frage finden ließen, ab wann Wind als „zu stark“ für die Beschneigung zu werten ist, wurde nachfolgend von phänomenologischen Kriterien ausgegangen und angenommen, dass eine Windstärke ab 11,32 m/s bzw. ab Stufe 6 der Beaufort-Skala<sup>28</sup> („starker Wind“, der u.a. dicke Äste bewegen kann) als prohibitiv zu betrachten ist.

Gleiches gilt für die Frage, ab welcher Windstärke der Pisten- bzw. Seilbahnbetrieb im Sinne einer disruptiven Periode vollständig eingestellt werden müsste. Zu diesem Parameter ließen sich in der Literatur ebenfalls keine konkreten Angaben finden, auch wenn Autorinnen wie etwa Becken 2010 (S. 6) berichten, dass hohe Windstärken in Ländern wie Finnland den Hauptgrund für die außerplanmäßige Schließung von Skipisten darstellen. Für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell wird nachfolgend davon ausgegangen, dass dies bei einer Windstärke ab 21,09 m/s bzw. ab Stufe 9 auf der Beaufort-Skala (ein „Sturm“, der u.a. Äste abbrechen und Dächer abdecken kann) der Fall ist. Die Windgeschwindigkeit wird üblicherweise in m/s erfasst und kann – wie alle zuvor betrachteten Parameter – stunden-, tages-, wochen- und monatsweise sowohl in Form realer Wetterdaten als auch in Form von Prognosedaten aus Klimamodellen vorliegen.

---

28 Die nach dem britischen Hydrologen Francis Beaufort (1774 – 1857) benannte Skala dient der Charakterisierung der Windstärke.

### Schneehöhe

Liegen Daten zur Decke der Schneehöhe (in cm) vor, so können diese für die Feststellung genutzt werden, an welchen Tagen Alpin-Ski oder andere Winter-sportaktivitäten nur auf Basis von Naturschnee angeboten werden könnten. Für das im Rahmen dieser Arbeit konzipierte DSS wird davon ausgegangen, dass für Alpin-Ski mindestens eine Naturschneedecke von 30 cm sowie für andere Aktivitäten wie Ski-Langlauf, Winterschuhwandern oder Snowbiking mindestens eine Naturschneedecke von 10 cm vorhanden sein sollte. Auf Basis dieser Überlegungen lässt sich darüber hinaus die Zahl der Tage ermitteln, an denen eine Ergänzung des Naturschneeangebots durch künstliche Beschneigung für die Aufrechterhaltung bestimmter Wintersportaktivitäten erforderlich wäre. Die Höhe der Schneedecke kann zudem – im Zusammenspiel mit den Feuchttemperaturen – dazu genutzt werden, die Auswirkungen disruptiver Perioden auf den Pistenbetrieb zu bestimmen: Liegt zum Zeitpunkt des Auftretens einer solchen Periode kein Naturschnee und waren auch die Feuchttemperaturen der vorangegangenen drei Wochen zu warm für eine künstliche Beschneigung, so richtet die disruptive Phase keinen Schaden an und ist somit nicht als solche zu werten.

### Saisonlänge

Zur Eingrenzung der Wintersaison finden sich in der Literatur verschiedene Angaben. Während sie im Zusammenhang mit der in Kapitel 3 vorgestellten 100-Tage-Regel häufig als vom 01. Dezember bis zum 15. April laufend definiert wird (und somit der „Easter Shift“ bereits Berücksichtigung findet, siehe z.B. Matzarakis et al. 2012, S. 646), bedienen andere Autorinnen und Autoren die traditionelle Eingrenzung vom 01. November bis zum 31. März (siehe z.B. Müller et al. 2013, S. 3) oder überlassen sie in Abhängigkeit von lokalen Gegebenheiten dem Anwender selbst (siehe z.B. Abegg 2012, S. 29 oder Usinger 2015, S. 16). In Bark et al. 2010 (S. 469) wird zudem darauf hingewiesen, dass die klassische europäische Wintersportsaison für Ressorts außerhalb Europas teilweise von untergeordneter ökonomischer Bedeutung ist – so spielen etwa für US-Skigebiete der „Spring Break“ und Thanksgiving eine bedeutsamere Rolle. Für das im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde Modell wurde von der traditionellen Eingrenzung und damit von einer Saison ausgegangen, die zwischen dem 01. November und dem

31. März stattfindet und die somit – je nachdem, ob es sich beim Folgejahr um ein Schaltjahr oder ein Nichtschaltjahr handelt – 151 oder 152 Tage umfasst.

## 7.3 Ausgestaltung des DSS

### 7.3.1 Qualitative Betrachtung

Um die qualitative Standortbetrachtung angesichts der Komplexität des in Kapitel 7.3.2 vorgestellten quantitativen Modells nicht unnötig zu verkomplizieren, werden die Ausprägungen der in Kapitel 7.2.1 identifizierten Faktoren auf einer vierstufigen Skala anhand kurzer Schilderungen repräsentiert, die sich konzeptionell an den User Stories der Softwareentwicklung orientieren – die also einen Sachverhalt formlos, umgangssprachlich und möglichst prägnant zusammenfassen.

<b>Positiv wirkende Faktoren</b>	
<b><u>Lage - Höhe</u></b>	
<input type="radio"/> 1	Das Projektionsgebiet liegt überwiegend unterhalb von 1.500 m ü.NN.
<input type="radio"/> 2	Das Projektionsgebiet liegt überwiegend oberhalb von 1.500 m ü.NN, zu großen Teilen aber auch noch unterhalb von 2.000 m ü.NN.
<input type="radio"/> 3	Das Projektionsgebiet liegt überwiegend oberhalb von 2.000 m ü.NN, zu großen Teilen aber auch noch unterhalb von 3.000 m ü.NN.
<input type="radio"/> 4	Das Projektionsgebiet liegt überwiegend oberhalb von 3.000 m ü.NN.
<b><u>Lage - Pistenausrichtung</u></b>	
<input type="radio"/> 1	Alle Pisten im Projektionsgebiet befinden sich an Nordhängen.
<input type="radio"/> 2	Der überwiegende Teil der Pisten im Projektionsgebiet befindet sich an Nordhängen.
<input type="radio"/> 3	Der überwiegende Teil der Pisten im Projektionsgebiet befindet sich nicht an Nordhängen.
<input type="radio"/> 4	Keine der Pisten im Projektionsgebiet befindet sich an einem Nordhang.
<b><u>Wasserverfügbarkeit</u></b>	
<input type="radio"/> 1	In der Nähe des Projektionsgebietes befinden sich keine Fließ- oder Standgewässer, aus denen ausreichende Mengen an Wasser für die Beschneigung entnommen werden könnten.
<input type="radio"/> 2	In der Nähe des Projektionsgebietes befinden sich zwar Fließ- oder Standgewässer, die für die Entnahme geeignet wären, diese führen aber nicht ganzjährig ausreichend Wasser oder es sprechen andere Gründe (z.B. das Vorhandensein geschützter Arten) gegen eine Wasserentnahme.
<input type="radio"/> 3	In der Nähe des Projektionsgebietes befindet sich ein wasserreiches Fließ- oder Standgewässer, aus dem ausreichende Mengen an Wasser für die Beschneigung entnommen werden können.
<input type="radio"/> 4	In der Nähe des Projektionsgebietes befinden sich mehrere wasserreiche Fließ- oder Standgewässer, aus denen ausreichende Mengen an Wasser für die Beschneigung entnommen werden können.

<b>Alternativangebote</b>	
<input type="radio"/> 1	Am Standort existieren keinerlei etablierte und schneeunabhängige Angebote, die für den Fall der Nichtbeschneibarkeit von der Zielgruppe der Wintersportler als akzeptable Alternativen angenommen werden.
<input type="radio"/> 2	Am Standort existieren schneeunabhängige Angebote, die für den Fall der Nichtbeschneibarkeit von der Zielgruppe der Wintersportler als Alternativen angenommen werden. Diese sind jedoch weder etabliert noch gelten sie bei einem Großteil der Zielgruppe als besonders attraktive Alternativen.
<input type="radio"/> 3	Am Standort existieren einige wenige etablierte und schneeunabhängige Angebote, die für den Fall der Nichtbeschneibarkeit von der Zielgruppe der Wintersportler als akzeptable Alternativen angenommen werden.
<input type="radio"/> 4	Am Standort existiert eine Vielzahl etablierter und schneeunabhängiger Angebote, die für den Fall der Nichtbeschneibarkeit von der Zielgruppe der Wintersportler als akzeptable Alternativen angenommen werden.
<b>Bekanntheitsgrad</b>	
<input type="radio"/> 1	Der Standort ist touristisch noch gar nicht oder kaum erschlossen.
<input type="radio"/> 2	Der Standort ist touristisch erschlossen, jedoch nicht als Wintersportstandort.
<input type="radio"/> 3	Der Standort ist als Wintersportstandort erschlossen, ist aber eher unbekannt.
<input type="radio"/> 4	Der Standort ist als Wintersportstandort erschlossen und als solcher bekannt.

<b>Negativ wirkende Faktoren</b>	
<b>Schutzgebietsnähe</b>	
<input type="radio"/> 1	Das Projektionsgebiet grenzt unmittelbar an ein Schutzgebiet oder an mehrere Schutzgebiete mit hohem Schutzstatus (z.B. Nationalpark, Naturmonument) an.
<input type="radio"/> 2	Das Projektionsgebiet grenzt entweder unmittelbar an ein oder mehrere Schutzgebiete mit niedrigem Schutzstatus (z.B. Landschaftsschutzgebiet) an oder aber es befindet sich in der näheren Umgebung eines oder mehrerer Schutzgebiete mit hohem Schutzstatus (z.B. Nationalpark, Naturmonument).
<input type="radio"/> 3	Das Projektionsgebiet befindet sich in der näheren Umgebung eines oder mehrerer Schutzgebiete mit niedrigem Schutzstatus.
<input type="radio"/> 4	Weder in der unmittelbaren noch in der näheren Umgebung des Projektionsgebiets befinden sich Schutzgebiete gleich welcher Art.
<b>Mangelnde Akzeptanz</b>	
<input type="radio"/> 1	Die Projektierung wird durch zahlreiche lokale zivilgesellschaftliche oder politische Akteure in Frage gestellt, die dabei wesentliche Unterstützung aus übergeordneten Strukturen (z.B. Bundes- und Landesverbände der jeweils vor Ort involvierten politischen Parteien oder Umweltverbände) erfahren.
<input type="radio"/> 2	Die Projektierung wird durch zahlreiche lokale zivilgesellschaftliche oder politische Akteure in Frage gestellt, die dabei aber nur unwesentliche Unterstützung aus übergeordneten Strukturen erfahren.
<input type="radio"/> 3	Die Projektierung wird durch einige lokale lokale zivilgesellschaftliche oder politische Akteure in Frage gestellt, die dabei aber keinerlei Unterstützung aus übergeordneten Strukturen erfahren.
<input type="radio"/> 4	Die Projektierung wird von keinem kommunalpolitischen oder zivilgesellschaftlichen Stakeholder grundsätzlich in Frage gestellt.

### 7.3.2 Quantitative Analyse

Für eine Anwendung des in Abschnitt 7.2.2. dargestellten Modells auf Tagesbasis werden Angaben zu folgenden Parametern benötigt:

- Lufttemperatur (Tagesmittel, in °C)
- Luftfeuchtigkeit (Tagesmittel, in %)
- Schneedecke (Tagesmittel, in cm)
- Windgeschwindigkeit (Tagesmittel, in m/s)
- Niederschlagsmenge (Tagesmenge, in mm)

Liegen Daten zu allen Parametern vor, werden folgende Schritte durchlaufen:

- (1) Auf Basis von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit erfolgt eine näherungsweise Berechnung der Feuchttemperatur. Liegt diese höchstens bei  $-3^{\circ}\text{C}$  und liegt die Windgeschwindigkeit zudem unter  $11,32\text{ m/s}$ , kann – vorbehaltlich der Verfügbarkeit von Wasser – künstlich beschneit werden.
- (2) Anhand von Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Niederschlag werden potentielle disruptive Phasen identifiziert (länger als zwei Tage dauernde Perioden mit einer Lufttemperatur von mehr als  $10^{\circ}\text{C}$  oder mehr als  $20\text{ mm}$  täglichem Niederschlag in Form von Regen sowie jeder Tag mit Windgeschwindigkeiten oberhalb von  $21,09\text{ m/s}$ ). Um die Auswirkungen disruptiver Perioden auf den Pistenbetrieb nicht zu überschätzen, werden diese nur dann als solche gewertet, wenn zum Zeitpunkt ihres Eintretens entweder Naturschnee lag oder in den drei Wochen vor dem Zeitpunkt ihres Eintretens eine künstliche Beschneigung möglich gewesen wäre.
- (3) Anhand von Lufttemperatur und Niederschlag wird zudem die Anzahl von Tagen identifiziert, an denen auf natürliche Weise Schnee (unabhängig von der konkreten Menge oder der sich daraus ergebenden Schneehöhe) gefallen wäre (negative Temperatur, positiver Niederschlag).
- (4) Anhand der Höhe der Schneedecke lässt sich die Anzahl von Tagen identifizieren, an denen nur mit Naturschnee Ski-Alpin (ab  $30\text{ cm}$  Höhe) oder andere Wintersportaktivitäten (ab  $10\text{ cm}$  Höhe) angeboten werden könnten. Darüber hinaus lässt sich über die Gegenüberstellung von Tagen, an denen eine technische Beschneigung möglich gewesen wäre, und Tagen, an denen eine zu niedrige natürliche Schneedecke vorherrscht, die An-

zahl von Tagen bestimmen, an denen eine Beschneigung möglich und zugleich auch erforderlich gewesen wäre. Aufgrund der Tatsache, dass die Möglichkeit des Lagerns und späteren Ausbringens von vorab produziertem Schnee sowie die Dauer der Nutzung von Kunstschnee auf einer Piste nicht im Modell abgebildet werden können, ist allerdings mit einer deutlichen Überschätzung der Anzahl an Tagen zu rechnen, an denen eine Beschneigung erforderlich gewesen wäre – insofern handelt es sich hier lediglich um eine interessehalber berechnete Zusatzgröße.

- (5) Die ermittelten Werte gestatten eine Reihe von weiteren Berechnungen (etwa zur Einhaltung der 100-Tage-Regel oder des Weihnachtsindikators).

Es ergeben sich durch die Anwendung somit folgende Kenngrößen, auf deren Basis qualifizierte Aussagen über die gegenwärtigen und zukünftigen Möglichkeiten künstlicher Beschneigung an einem Standort möglich sind:

- Anzahl und Anteil der Tage (an der Saison), an denen Naturschnee fällt.
- Anzahl und Anteil der Tage, an denen nur auf Basis von Naturschnee das Anbieten von Ski-Alpin oder anderen Wintersportaktivitäten möglich wäre.
- Anzahl und Anteil der Tage, an denen künstlich beschneit werden könnte.
- Anzahl, Verteilung und Länge disruptiver Perioden, in denen durch Wärme oder Starkregen Schäden an den Pistenoberflächen erzeugt werden oder in denen aufgrund hoher Windstärken kein Pistenbetrieb möglich ist.
- Anzahl der Saisons, in denen die 100-Tage-Regel sowie der Weihnachtsindikator vollständig oder mindestens zu 50% auf Basis des verfügbaren Naturschnees eingehalten werden könnten.

Eine erste Umsetzung des Modells erfolgte unter Einsatz der freien Tabellenkalkulation LibreOffice Calc<sup>29</sup>, eine Beispieltabelle mit Daten aus der in Kapitel 8 betrachteten Region findet sich in Anhang 2, wobei zu niedrige Schneehöhen rot, für die Beschneigung geeignete Feuchttemperaturen grün und Tage gelb markiert sind, die potentiell einer disruptiven Periode zuzurechnen sind. Die verwendete Software, die Tabellenvorlage sowie alle für die Auswertungen im nachfolgenden Kapitel erstellten Saisontabellen finden sich im digitalen Anhang dieser Arbeit.

---

<sup>29</sup> <https://www.libreoffice.org/discover/calc/>

## 8. Anwendung des DSS am Beispiel des Harzes

### 8.1 Kurzvorstellung des Skigebiets

#### 8.1.1 Topologie und Topographie

Der Landkreis Harz, entstanden im Jahr 2007 im Rahmen einer Kreisgebietsreform aus den drei Landkreisen Wernigerode, Halberstadt und Quedlinburg sowie der Stadt Falkenstein, befindet sich im Südwesten Sachsen-Anhalts und umfasst 120 Ortschaften, die in 13 Einheitsgemeinden und einer Verbandsgemeinde organisiert sind. Der Landkreis mit 223.000 Einwohnern ist stark durch Landwirtschaft (51,8% der Fläche) und Naturräume (36,8% der Fläche) geprägt. Allein 247 km<sup>2</sup> des Kreisgebiets gehören zur Fläche des anteilig in Sachsen-Anhalt und Niedersachsen liegenden Nationalparks Harz (vgl. Schulze et al. 2014, S. 7).

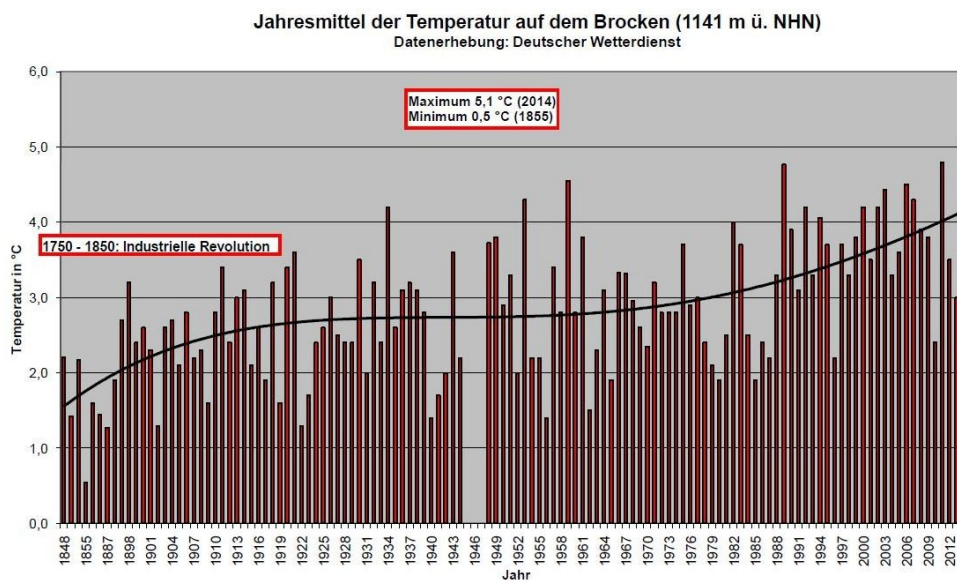
Die Topologie der für die weitere Betrachtung relevanten Gegend um Wernigerode wird primär durch das Berg- und Hügelland des Harzes bestimmt (vgl. Brauns & Offinger 2002, S. 74; Brandt 2006, S. 73). Der Harz ist ein 30 km breites und 90 km langes Mittelgebirge mit Ursprung im Mesozoikum, das als eigenständige naturräumliche Großregion gilt. Die höchste Erhebung ist der 1.141 m hohe Brocken, der sich seit der Eingemeindung der Ortschaft Schierke in die Stadt Wernigerode im Jahr 2009 auf Wernigeröder Stadtgebiet befindet.

Der Klimawandel macht sich im Harz bereits bemerkbar: Die Jahresmitteltemperatur auf dem Brocken (wo sich seit 1848 eine Wetterstation befindet) ist bis 2014 von 1,5°C um rund 2,5°C auf über 4,0°C gestiegen (siehe Abbildung 7). Während die Temperatur im Jahresmittel seit Beginn der Aufzeichnungen und dem Ende des Zweiten Weltkriegs – für 1944 bis 1950 fehlen kriegsbedingt Messdaten – in über 100 Jahren nur in einem Jahr oberhalb von 4,0°C lag, wurde diese Schwelle zwischen 1950 und 2014 bereits in 13 Jahren überschritten. Von diesen 13 besonders warmen Jahren fallen wiederum 11 in den Zeitraum seit 1980. Die bislang höchste Temperatur wurde im August 2012 mit 29°C gemessen – und 2014 lag die Durchschnittstemperatur mit 5,1°C erstmals oberhalb von 5,0°C.<sup>30</sup>

---

30 Siehe hierzu auch die Ausführungen des Autors unter:

<http://www.scienceblogs.de/2015/01/18/2014-das-waermste-jahr-auf-dem-brocken-seit-beginn-der-aufzeichnungen/>



*Abbildung 7: Entwicklung der Jahresmitteltemperatur auf dem Brocken zwischen 1848 und 2014.*

### 8.1.2 Wintersport im Harz

Der Harz kann auf eine lange Wintersporttradition verweisen, deren Ausgang sich auf das Wirken des Försters Arthur Ulrichs (1838 – 1927) zurückführen lässt, der u.a. 1892 den ersten Harzer Ski-Club mitbegründete. In den 1920er und 1930er Jahren waren insbesondere Braunlage, Sankt Andreasberg und Schierke Wintersportorte von internationaler Bekanntheit (vgl. Knolle & Reinboth 2014). Heute gilt der Tourismus als der mit bedeutendem Abstand wichtigste Wirtschaftszweig der Region (vgl. Pinnow 2014, S. 1). Für den internationalen Wintersport ist der Harz – wie auch einige andere europäische Mittelgebirge – von überregionaler Bedeutung. Zwar sind die klimatischen wie auch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für einen profitablen Skibetrieb hier deutlich schlechter ausgeprägt als etwa in vielen alpinen Wintersportorten – dafür ist der Harz aus zahlreichen norddeutschen Großstädten und Ballungsräumen für Tagesausflügler, Wochenendurlauber und Schulklassen gut erreichbar und hat somit eine für den Wintersportmarkt bedeutende Stützfunktion: Hier werden Anfängerinnen an den Wintersport herangeführt, während erfahrene Wintersportlerinnen auf Kurzausflügen im Training bleiben und den Kontakt zur Sportart nicht verlieren. Demiroglu 2016 bezeichnet

derartige Mittelgebirgs-Skigebiete daher als „für das Überleben des heimischen sowie sogar des alpinen Wintersportmarkts dringend erforderlich“ (S. 17).

Die natürlichen Rahmenbedingungen für Wintersportangebote im Harz sind eher ungünstig. So gilt der Harz zwar als eines der am wenigsten klimavulnerablen Mittelgebirge (vgl. Pinnow 2014, S. 18) und verfügt zudem über ein feuchtes und kühles Klima und viele natürliche Wasserkörper, so dass das Vorhandensein von Wasser hier – im Gegensatz zu anderen Regionen (vgl. Lang & Lang 2009, S. 13) – nicht als limitierender Faktor zu werten ist. Auf der anderen Seite sind die klimatischen Bedingungen für eine Beschneigung eher ungünstig: Die höchste Erhebung endet bei 1.141 m ü.NN, eine „Flucht nach oben“ ist damit nicht möglich und die Luftfeuchtigkeit liegt während des Winters nahezu konstant oberhalb von 85%<sup>31</sup>, was die Möglichkeiten für eine Beschneigung erheblich einschränkt (siehe Kapitel 7.2.2). Hinzu kommt, dass weite Teile der Region im Nationalpark Harz oder in anderen rechtlich geschützten Naturräumen (u.a. existieren ein EU-Vogelschutzgebiet und ein Landschaftsschutzgebiet) liegen, die Auflagen für großflächige Eingriffe in die natürliche Umwelt also vergleichsweise umfassend sind.

Angesichts der klimatischen Entwicklung wird die zukünftige Eignung des Harzes als Wintersportgebiet u.a. von Gebhardt et al. 2011 (S. 86), Franck & Peithmann (S. 10), Enke 2010 (S. 105) und Pinnow 2014 (S. 14) bezweifelt.

### 8.1.3 Wurmberg und Winterberg

Um das im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde DSS an einer Skiregion testen zu können, wird das Projekt „Natürlich.Schierke“ als Beispiel herangezogen. Hierbei handelt es sich um ein sich gegenwärtig in Planung befindliches und baulich noch nicht realisiertes Skigebiet, welches am Kleinen Winterberg (837,0 m ü.NN) des zu Wernigerode in Sachsen-Anhalt gehörenden Ortsteils Schierke – einem der bekannteren Ausflugsorte im Harz mit langer, nach 1950 jedoch unterbrochener Tradition als Wintersportort – entstehen soll.

Das Planungsgebiet liegt in unmittelbarer Nähe des derzeit größten Skigebiets im Harz am Wurmberg (971,2 m ü.NN) im niedersächsischen Braunlage. Dieses ebenfalls traditionsreiche Wintersportgebiet wurde zwischen 2012 und 2013 massiv ausgebaut und für ca. 13 Millionen Euro an privaten wie öffentlichen Investiti-

<sup>31</sup> Die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit im Harz liegt laut

DWD bei 84% (siehe <http://www.norddeutscher-klimamonitor.de>).

onen mit einer modernen Kunstschneefinfrastruktur ausgestattet, wobei unter anderem 16 ha Wald für neue Pisten gefällt und ein 80.000 m<sup>3</sup> fassendes Speicherbecken errichtet wurden. Auch wenn die im Wirtschaftlichkeitsgutachten prognostizierten 138 durchschnittlichen Betriebstage pro Saison seit Inbetriebnahme der Beschneigung im Jahr 2013 bisher noch in keinem Jahr erreicht werden konnten<sup>32</sup>, gilt das Projekt als wirtschaftlicher wie auch politischer Erfolg, an den in der weniger als 20 km entfernten Nationalparkgemeinde Schierke angeknüpft werden soll.

Hier soll in den kommenden Jahren am Kleinen Winterberg ein weiteres künstlich beschneites und unmittelbar mit dem Wurmberg verbundenes Skiareal geschaffen werden. Die seit der Wende stark (auf unter 400 Personen) geschrumpfte Gemeinde galt in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts als Wintersportort mit überregionaler Bedeutung und bewarb sich 1936 um die Austragung der Olympischen Winterspiele. Zu Hochzeiten verfügte Schierke über eine Skiabfahrt am Großen Winterberg (heute für die wirtschaftliche Entwicklung unerreichbarer Teil des Nationalparks Harz), mehrere Skisprungschanzen und eine Bobbahn. Als Ort in direkter Grenznähe wurde Schierke nach 1950 schwerer zugänglich, blieb aber ein in der DDR bekannter Urlaubsort. Im Jahr 2009 wurde Schierke im Zuge einer Gebietsreform nach Wernigerode eingemeindet, ein Jahr später beschloss der Wernigeröder Stadtrat ein Ortsentwicklungskonzept, mit welchem die „Wiedererweckung“ Schierkes als Wintersportort angestrebt wird.

Dieses Konzept befindet sich derzeit unter dem Titel „Natürlich.Schierke“ in der Umsetzung, wobei zunächst grundlegende infrastrukturelle Maßnahmen durch die öffentliche Hand finanziert und umgesetzt wurden. So wurden 8 Millionen Euro in die Ertüchtigung der Sandbrinkstraße zum geplanten Standort für die Talstation der Seilbahn investiert, weitere 13 Millionen Euro in ein Parkhaus mit 715 Stellplätzen am gleichen Standort sowie 9 Millionen Euro in ein Kunsteisstadion in unmittelbarer Nähe. Zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit ist die Trassenplanung der Seilbahn Gegenstand eines beim Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr angesiedelten Raumordnungsverfahrens, welches noch in diesem Jahr abgeschlossen werden soll. Für die Seilbahn sowie für eine Abfahrts piste von etwa 2,5 km Länge sollen rund 20 ha Wald gerodet und ein aus dem Harzer Gebirgsfluss Kalte Bode gespeistes Speicherbecken angelegt werden.

---

32 2013/2014: 30 Tage; 2014/2015: 105 Tage; 2015/2016: 60 Tage

## 8.2 Bestimmung der Parameter

### 8.2.1 Qualitative Betrachtung

Zu den im Rahmen der qualitativen Analyse zu bewertenden Faktoren können im Hinblick auf das Skigebiet am Winterberg folgende Aussagen getroffen werden:

- Lage – Höhe: Die geplante Piste beginnt auf etwa 830 m ü.NN und endet auf etwa 625 m ü.NN.
- Lage – Pistenausrichtung: Die geplante Piste hat eine westliche bis südwestliche Ausrichtung.
- Wasserverfügbarkeit: Der Harz ist äußerst feucht und wasserreich. Mit der Kalten Bode existiert ein für die Wasserentnahme grundsätzlich geeignetes Fließgewässer. Vor dem Hintergrund des Klimawandels ist damit zu rechnen, dass die Niederschlagsmenge im Planungsgebiet im Jahresmittel sogar noch zunehmen wird (vgl. Pinnow 2014, S. 8).
- Alternativangebote: Als stark touristisch ausgerichtete Region verfügt das Planungsgebiet über eine ganze Reihe von schneeunabhängigen und populären Alternativangeboten, wie etwa Wanderungen durch den Nationalpark Harz, Fahrten mit der Harzer Schmalspurbahn (HSB) zum Brocken oder Besuche in zahlreichen Kulturstätten.
- Bekanntheit: Das Planungsgebiet ist eine seit über 100 Jahren etablierte und bundesweit bekannte Urlaubs- und Wintersportregion.
- Schutzgebietsnähe: Das Planungsgebiet grenzt unmittelbar an den Nationalpark Harz (höchste Schutzstufe) sowie an das EU-Vogelschutzgebiet Hochharz und das Landschaftsschutzgebiet Harz. Es finden sich hier zudem Tier- und Pflanzenarten, die auf der Roten Liste verzeichnet sind.
- Mangelnde Akzeptanz: Das Projekt wird durch die lokalen Verbände von BUND und NABU sowie deren nationale Vereinigungen scharf kritisiert und war bereits mehrfach Gegenstand von Widersprüchen und Klageandrohungen. Mit den Grünen und den Linken zweifeln mindestens zwei der im Stadtrat vertretenen Kommunalparteien sowie deren Landesverbände die Umsetzbarkeit des Vorhabens an.

### 8.2.2 Quantitative Analyse

Die für die quantitative Analyse benötigten Daten konnten dem ReKIS<sup>33</sup> entnommen werden – dem gemeinsamen Regionalen KlimaInformationssystem der drei Bundesländer Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen, das seit 2012 durch den Lehrstuhl für Meteorologie der TU Dresden betrieben und dort aktuell in der Version 3.1.22 vom 11.04.2018 gehostet wird. Das ReKIS bietet den freien Zugriff auf historische Daten von Wetterstationen in allen drei Bundesländern aus den Jahren 1950 bis 2017 sowie auf bis in das Jahr 2100 reichende Simulationsdaten aus verschiedenen Klimamodellen.



Abbildung 8: Das Logo des Regionalen KlimaInformationSystems ReKIS.

Eine der in ReKIS erfassten Wetterstationen des DWD (Nr. 4445 bei den Koordinaten 51.7656; 10.6536 sowie auf 609 m ü.NN.) befindet sich im Wernigeröder Ortsteil Schierke in direkter Nähe (ca. 600 - 800 m, siehe Abbildung 9) des Parkhauses Winterbergtor, welches wiederum nahe dem Loipeneinstieg sowie am Endpunkt der geplanten Skipiste sowie der geplanten Talstation der Seilbahn auf den Winterberg liegt. Für diese Wetterstation konnten über ReKIS historische Tagesdaten für die Wintersaisons von 1951/1952 bis 2016/2017 bezogen werden. Diese Datensätze enthalten (u.a.) die Tagesmittelwerte für Lufttemperatur, Windstärke, Luftfeuchtigkeit und Scheedeckenhöhe sowie die Tagesmenge für den Niederschlag. Mutmaßlich aufgrund technischer Defekte oder Umrüstungen an der Station fehlen in manchen Jahren Werte – so etwa die Angaben zur Windgeschwindigkeit für die Jahre zwischen 1951 und 1960 oder die Angaben zur Luftfeuchtigkeit für die Jahre zwischen 1967 und 1975. Sich daraus ergebende Lücken in den Datensätzen, die dazu geführt haben, dass sich einige Kennwerte nicht für jede Saison bestimmen ließen, wurden nachfolgend kenntlich gemacht.

---

<sup>33</sup> <http://www.rekis.org>



*Abbildung 9: Standort der DWD-Wetterstation in Schierke in unmittelbarer Nähe zum Parkhaus „Am Winterbergtor“.*

Zu den über das ReKIS verfügbaren Modellen gehört auch das in Kapitel 6 kurz vorgestellte regionale Klimamodell REMO, das u.a. in den Arbeiten von Schmidt et al. 2010 und Endler 2010 zum Einsatz kommt. Das Modell prognostiziert Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur (im Tagesmittel) und ist damit zur Bestimmung der Feuchttemperatur geeignet. Verfügbar sind zudem Prognosedaten zu Windgeschwindigkeit und Niederschlagsmenge, so dass im Vergleich mit den historischen Daten nur Angaben zur Höhe der Schneedecke fehlen. Unter den netzförmig über das Bundesgebiet verteilten „virtuellen Wetterstationen“ des REMO befindet sich zufällig eine Station (Nr. 104894 bei den Koordinaten 51.78; 10.65 sowie auf 687 ü.NN., siehe Abbildung 10) in unmittelbarer Nähe Schierkes.

Für diese REMO-Messstation sind – bis zum Jahr 2100 – prognostische Daten zum ebenfalls bereits in Kapitel 6 vorgestellten IPCC-Szenario A1B verfügbar, welches einen „mittelschweren“ Verlauf des Klimawandels abbildet. Der historische Datensatz für die Saisons von 1951/1952 bis 2016/2017 konnte damit um REMO-Daten für die Saisons von 2017/2018 bis 2099/2100 erweitert werden. Die Zäsur zwischen historischen und REMO-Daten liegt bei allen weiteren Auswertungen also zwischen den Saisons 2016/2017 und 2017/2018. Die Vergleichbarkeit der beiden Datenreihen ist aufgrund der Standortverschiebung durchaus kritisch zu hinterfragen – in dieser Hinsicht besser geeignete Prognosedaten konnten jedoch im Rahmen der Modellrecherchen nicht ermittelt werden.

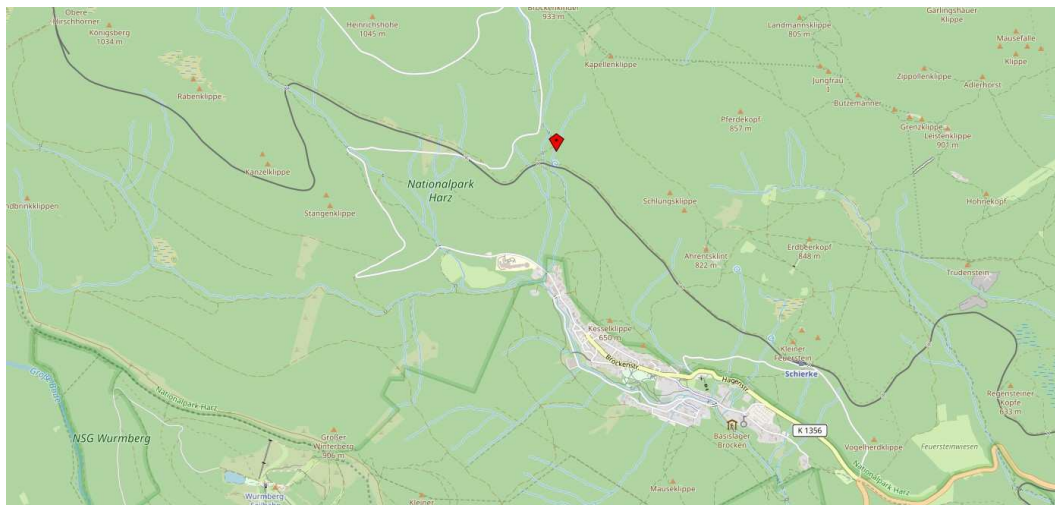


Abbildung 10: Standort der simulierten REMO-Wetterstation nahe Schierke.

Es sei darauf hingewiesen, dass in der nachfolgenden Auswertung – siehe auch hierzu Kapitel 6 – somit neben Realdaten des DWD prognostische Daten aus einem der beiden meistverwendeten regionalen Klimamodelle sowie auf Basis des meistgenutzten IPCC-Emissionsszenarios zum Einsatz kommen. Auch wenn die räumliche Auflösung von REMO als für touristische Betrachtungen bisweilen als zu grob eingeschätzt wird (vgl. Kreilkamp 2011, S. 4), dürfte die Datengrundlage eine plausible Prognose gestatten, die weder unter den für den Wintersport bestmöglichen noch den schlechtestmöglichen Modellprämissen erfolgt.

Die tabellarische Auswertung über das in Kapitel 7 vorgestellte Schema umfasst 447 Seiten (3 Seiten für jede der 149 abgedeckten Wintersaisons) und befindet sich in vollem Umfang im digitalen Anhang dieser Arbeit. Eine Beispieltabelle für eine Saison mit vollständigen Daten (2006 / 2007) findet sich in Anhang B.

## 8.3 Vorstellung der Ergebnisse

### 8.3.1 Qualitative Betrachtung

Die in Kapitel 8.2.1 übersichtsartig dargestellten Rahmenbedingungen im Hinblick auf die zu betrachtenden qualitativen Standortfaktoren führen in einer durch den Autor selbst vorgenommenen, ebenso subjektiven wie an dieser Stelle lediglich exemplarischen Bewertung zu den umseitig dargestellten Ergebnissen.

<b>Positiv wirkende Faktoren</b>				
Lage – Höhe	X 1	O 2	O 3	O 4
Lage – Pistenausrichtung	O 1	O 2	X 3	O 4
Wasserverfügbarkeit	O 1	O 2	X 3	O 4
Alternativangebote	O 1	O 2	O 3	X 4
Bekanntheitsgrad	O 1	O 2	O 3	X 4
<b>Negativ wirkende Faktoren</b>				
Schutzgebietsnähe	X 1	O 2	O 3	O 4
Mangelnde Akzeptanz	X 1	O 2	O 3	O 4

Im Ergebnis zeigt sich, dass das betrachtete Areal in mehrfacher Hinsicht als für die Beschneidung geeignet betrachtet werden darf: Der Harz ist ein etabliertes Urlaubs- und Wintersportgebiet, das unter den Mittelgebirgen nicht nur als besonders wasserreich gilt<sup>34</sup>, sondern auch mit einer Vielzahl alternativer und komplementärer touristischer Angebote – insbesondere im Wander-, Natur- und Kulturtourismus – aufwarten kann. Aufgrund der geplanten Pistenlage darf zudem von einer niedrigen Sonnenexposition ausgegangen werden. Gegen eine Beschneidung sprechen dagegen die geringe Höhe des Planungsgebietes, dessen Nähe zu mehreren Schutzgebieten und der nicht unwesentliche lokale Widerstand des organisierten Umweltschutzes sowie aus Teilen von Politik und Bevölkerung.

Nimmt man an, dass die beiden Negativ-Faktoren durch eine umweltschutzkonforme Planung ausgeräumt werden könnten, wäre eine Empfehlung mit Blick auf die Höhenlage insbesondere von der Betrachtung des gegenwärtigen und prognostizierten lokalen Mikroklimas abhängig zu machen – und damit vom Ergebnis der nachfolgenden quantitativen Analyse.

### 8.3.2 Quantitative Analyse

#### Natürliche Schneehöhe

Für die Saisons zwischen 1951/1952 und 2016/2017 liegen Daten zur natürlichen Schneehöhe am Standort vor, auf deren Basis sich ermeszen lässt, ob die 100-

<sup>34</sup> Eine zum Zeitpunkt der Finalisierung dieser Arbeit noch nicht im Volltext verfügbare Studie der Harzwasserwerke gelangt zu dem abweichenden Schluss, dass auch im Harz mit einem erheblichen Rückgang der Wasserverfügbarkeit gerechnet werden muss, siehe: <https://www.hildesheimer-allgemeine.de/news/article/studie-im-harz-wird-es-immer-trockener.html>

Tage-Regel, nach der ein Standort dann profitabel ist, wenn Wintersport-Aktivitäten in 7 von 10 Saisons an mindestens 100 Tagen pro Saison angeboten werden können, für Ski-Alpin (mindestens 30 cm Schneehöhe) und sonstige Wintersport-Aktivitäten (mindestens 10 cm Schneehöhe) erfüllt wird. Die Daten für alle Wintersportsaisons von 1951/1952 bis 2016/2017 finden sich tabelliert in Anhang C, die nachfolgende Tabelle bildet die aggregierten Werte pro Dekade ab, wobei die Einteilung in Dekaden letztendlich eine willkürliche und damit suboptimale Segmentierung darstellt. Da die Daten nicht für alle Jahre vollständig vorliegen, konnten nicht alle Werte für die 1950er, die 1960er und die 2010er berechnet werden.

Dekade	Durchschnittliche Anzahl Tage mit 10 cm Schnee und mehr	Einhaltung der 100-Tages-Regel unter dieser Bedingung	Durchschnittliche Anzahl Tage mit 30 cm Schnee und mehr	Einhaltung der 100-Tages-Regel unter dieser Bedingung
1950er	84	2 von 9	50	1 von 9
1960er	106	5 von 7	75	2 von 7
1970er	87	4 von 10	44	1 von 10
1980er	81	4 von 10	55	1 von 10
1990er	74	2 von 10	26	0 von 10
2000er	70	3 von 10	39	0 von 10
2010er	58	0 von 7	29	0 von 7

*Tabelle 8: Einhaltung der 100-Tages-Regel zwischen 1951 und 2017.*

Betrachtet man die Dekade als – wenn auch unzulängliche – Richtgröße, wird die 100-Tage-Regel für niederschweligen Wintersport lediglich in den 1960ern sowie für den Alpinsport in keiner der betrachteten Dekaden erreicht, was grundsätzlich gegen die Eignung des Standorts zu sprechen scheint. Da Schierke zwischen den 1950ern und den 1980ern jedoch ein durchaus anerkannter Wintersportort gewesen ist, lohnt sich ein genauerer Blick auf die Daten.

Wie Abbildung 11 verdeutlicht, wurden zwar die 100 Tage nur in wenigen Saisons erreicht, für die Zeit zwischen 1950 und 1990 lässt sich jedoch – mit Ausnahme der Datenlücke in den 1960ern – insgesamt eine hohe Anzahl von Saisons konstatieren, in denen die 100 Tage nur knapp verfehlt wurden. So wurden in den 1950ern in 4 von 9 Saisons an mehr als 90 Tagen Schneehöhen von 10 cm und mehr erreicht, in den 1960ern in 5 von 7 Saisons, in den 1970ern in 5 von 10 Saisons und in den 1980ern in 5 von 10 Saisons. Während dieser Wert auch in den 1990ern und in den 2000ern noch in jeweils 3 von 10 Saisons erreicht wird, überspringt in den 2010ern nur noch eine der 7 Saisons diese Hürde. Ausgehend von

der von Usinger 2015 (S. 9; siehe hierzu auch Kapitel 5.2) getroffenen Annahme, dass für einen wirtschaftlich erfolgreichen Skibetrieb in Mittelgebirgen auch 60-80 Betriebstage ausreichen sollten, ist eine grundsätzliche historische Eignung des Standorts mindestens bis in die 1980er zu konstatieren.

Auffällig ist die Zunahme an Saisons, die de facto einen „Totalausfall“ darstellen: So wurde in der Saison 2000/2001 an nur 2 Tagen die benötigte Schneehöhe für Alpin-Ski von mehr als 30 cm erreicht, in der Saison 2006/2007 an einem Tag, in der Saison 2007/2008 an 10 Tagen, in der Saison 2013/2014 überhaupt nicht und in der Saison 2015/2016 an 6 Tagen. Wie die Kennzahlen zur Beschneibarkeit zeigen werden, hätte ein Großteil des Wintersportgeschäfts in diesen Saisons auch mit Beschneigung nicht gerettet werden können.

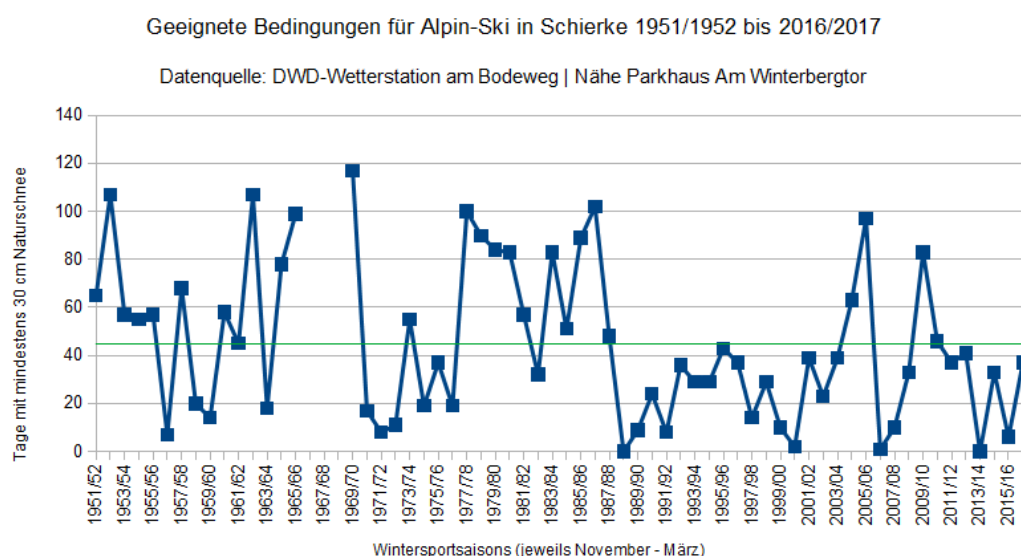


Abbildung 11: Entwicklung der Anzahl der für Alpin-Ski auf Basis von Naturschnee geeigneten Tage zwischen 1951/1952 und 2016/2017 (Mittelwert in grün).

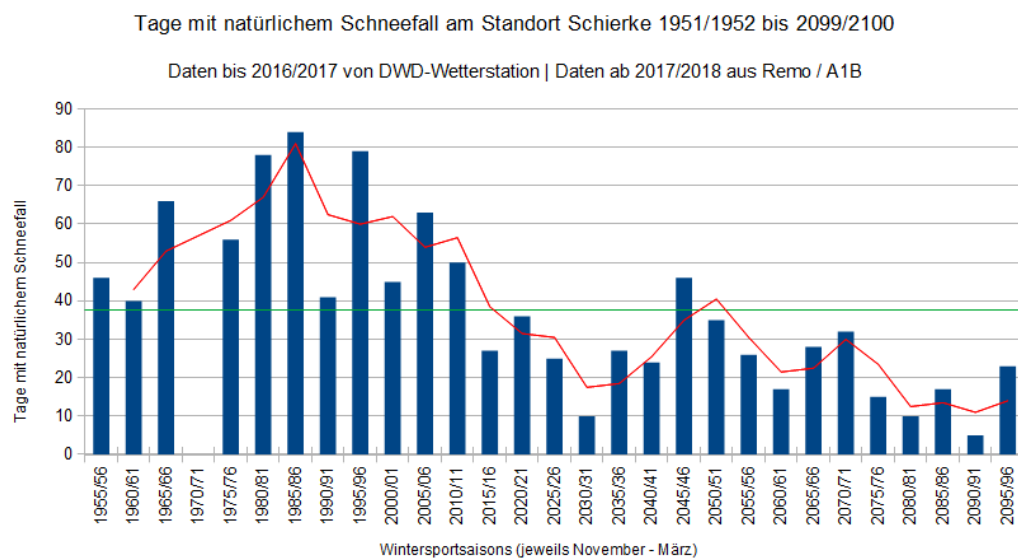
#### Tage mit natürlichem Schneefall

Die durch diese Entwicklung implizierte Verschlechterung der Wintersportbedingungen spiegelt sich insbesondere in der Verringerung der Anzahl von Tagen wieder, an denen es zu natürlichem Schneefall kommt (siehe Abbildung 12). Da die zur Bestimmung der Anzahl an Schneefalltagen erforderlichen Parameter Lufttemperatur und Niederschlag auch im REMO-Datensatz enthalten sind, kann

die Zeitlinie – mit der markierten Zäsur in den 2010ern sowie der Datenlücke in den 1960ern – bis zur Wintersaison 2099/2100 fortgeschrieben werden. Auch die Detailtabellen dieser Auswertung finden sich in Anhang C dieser Arbeit.

Dekade	Durchschnittliche Anzahl von Tagen mit natürlichem Schneefall	Dekade	Durchschnittliche Anzahl von Tagen mit natürlichem Schneefall
1950er	35	2020er	35
1960er	55	2030er	31
1970er	61	2040er	28
1980er	59	2050er	20
1990er	51	2060er	21
2000er	43	2070er	19
2010er	34	2080er	9
2010er	39	2090er	13

*Tabelle 9: Entwicklung der Schneefalltage zwischen 1951 und 2100.*



*Abbildung 12: Entwicklung der Anzahl von Tagen mit natürlichem Schneefall zwischen 1951/1952 und 2099/2100 (5-Jahres-Schritte, gleitender Mittelwert über 10 Jahre in rot, Gesamtmittel in grün).*

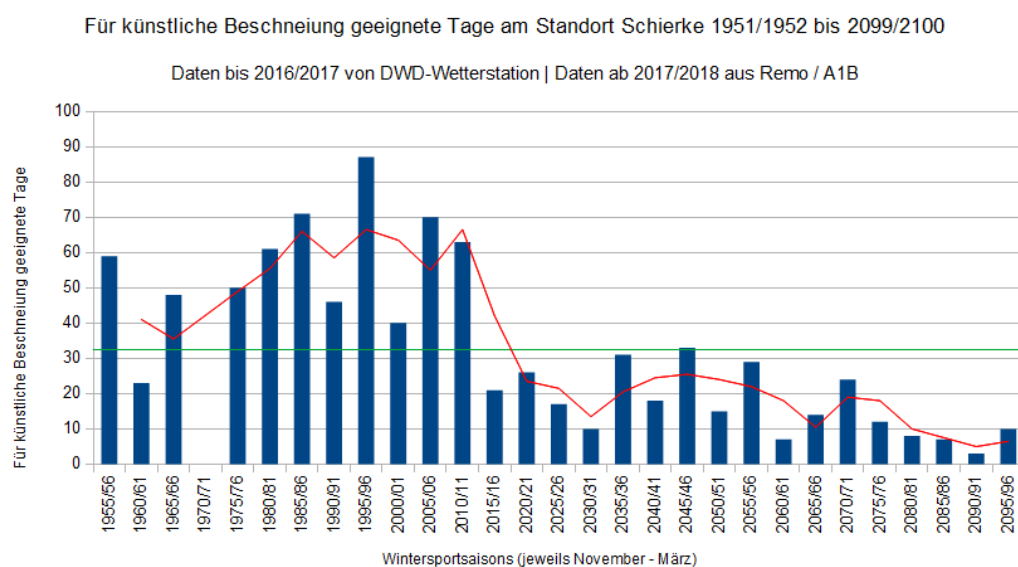
Es offenbart sich über die gesamte Zeitreihe – mit Ausnahme der schneearmen 1950er – eine deutliche Abnahme der Tage mit natürlichem Schneefall, die sich bei Betrachtung der Jahreseinzelschritte (siehe hierzu Abbildung 12) sogar noch klarer darstellt: Während in den 2020ern noch in keiner der 10 Wintersaisons an weniger als 20 Tagen pro Saison Naturschnee fällt, sind es in den 2040ern 3 von

10 Saisons, in den 2060ern bereits 6 von 10 Saisons und in den 2080ern ganze 9 von 10 Saisons, wobei auch in der einzigen etwas schneereicheren Saison (2082/2083) lediglich an 28 von 151 Tagen mit Schneefall zu rechnen ist.

### Für die Beschneigung geeignete Tage

Dekade	Durchschnittliche Anzahl von für die künstliche Beschneigung geeigneten Tagen	Dekade	Durchschnittliche Anzahl von für die künstliche Beschneigung geeigneten Tagen
1950er	49	2020er	26
1960er	57	2030er	21
1970er	50	2040er	15
1980er	48	2050er	16
1990er	41	2060er	13
2000er	42	2070er	13
2010er	34	2080er	4
2010er	30	2090er	8

*Tabelle 10: Entwicklung der Anzahl von Tagen zwischen den 1950ern und den 2090ern, an denen eine Beschneigung möglich gewesen bzw. möglich wäre.*



*Abbildung 13: Entwicklung der Anzahl von Tagen zwischen 1951 und 2100, an denen eine künstliche Beschneigung möglich bzw. möglich gewesen wäre (5-Jahres-Schritte, gleitender Mittelwert über 10 Jahre in rot, Gesamtmittel in grün).*

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Anzahl von Tagen, an denen Feuchttemperatur und Windgeschwindigkeit eine künstliche Beschneigung er-

möglichen würden (siehe Abbildung 13). Diese brechen nach den 2030ern erkennbar ein: In den 2040ern ist etwa eine künstliche Beschneigung bereits in der Hälfte der Saisons nur noch an weniger als 10 Tagen möglich. Zwar zeigen sich in den Folgedekaden immer wieder einzelne Saisons, in denen die Witterungsbedingungen die Produktion von Kunstschnee an mehr als 20 Tagen zulassen würde, die Anzahl der „Totalausfälle“ nimmt jedoch auch hier erkennbar zu.

### Entwicklung der disruptiven Perioden

Die Entwicklung der Anzahl disruptiver Perioden – ausgelöst durch Starkregen, hohe Windgeschwindigkeiten und Wärmephasen – entspricht vor dem Hintergrund der aufgezeigten Tendenzen sowie unter Berücksichtigung der bereits erwähnten Willkürlichkeit der Einteilung in Dekaden der Erwartung: Die Zahl disruptiver Perioden nimmt insbesondere mit dem häufigeren Auftreten starker Niederschläge und längerer Wärmephasen (windbedingte Unterbrechungen spielen im gesamten Untersuchungszeitraum entgegen der initialen Erwartung keine Rolle) zunächst zu, fällt dann aber parallel zum Rückgang der natürlichen Schneetage sowie zum Rückgang der Beschneibarkeit ab, da zwar weiterhin mehr potentiell disruptive Perioden auftreten, diese jedoch aufgrund der Nichtnutzbarkeit der Piste keine disruptive Wirkung auf den Pistenbetrieb mehr entfalten können. Die disruptiven Perioden haben – möglicherweise bedingt durch deren bewusst restriktive Definition – über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg keinen bedeutenden Einfluss auf das Ergebnis der quantitativen Standortanalyse.

Dekade	Summe der disruptiven Perioden	Dekade	Summe der disruptiven Perioden
1950er	1	2020er	1
1960er	1	2030er	1
1970er	2	2040er	5
1980er	4	2050er	3
1990er	4	2060er	2
2000er	1	2070er	6
2010er	2	2080er	6
2010er	0	2090er	2

*Tabelle 11: Entwicklung der Anzahl von disruptiven Perioden zwischen den 1950ern und den 2090ern.*

## 8.4 Interpretation der Ergebnisse

### 8.4.1 Qualitative Bewertung

Das Ergebnis der durchgeführten qualitativen Bewertung spricht nicht per se gegen die Realisation der am Winterberg geplanten Investitionen. Zwar wird deutlich, dass bei der Projektumsetzung erhebliche umweltrechtliche und politische Hürden zu überwinden wären – unter der Annahme, dass dies mit einer entsprechend umweltverträglichen Planung gelingt, spricht jedoch lediglich die niedrige Höhenlage und damit das Klimarisiko gegen eine Projektierung. Für die Entscheidung ausschlaggebend ist somit die Betrachtung des örtlichen Mikroklimas sowie der sich daraus ergebenden Möglichkeiten für eine erfolgreiche Beschneigung im Rahmen der im Anschluss durchgeführten quantitativen Analyse.

### 8.4.2 Quantitative Analyse

Die Betrachtung der für die Jahre zwischen 1951 und 2017 vorliegenden Realdaten zur örtlichen Witterung zeigt, dass – ohne Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten für eine Beschneigung – die grundlegende Eignung des Standorts für wintertouristische Investitionen bezweifelt werden muss. Zwar wird die 100-Tage-Regel zwischen den 1950ern und den 1980ern für den Ski-Langlauf in vielen Saisons erfüllt oder zumindest nur knapp verpasst, für den Alpinski sind die Bedingungen aber bereits während dieser Zeitperiode als suboptimal zu werten. Ab den 2000ern nimmt die Zahl der „Totalausfälle“ unter den Saisons, in denen die Pisten auch mit künstlicher Beschneigung nur an weniger als drei Dutzend Tagen hätten geöffnet werden können, erkennbar zu.

Setzt man die Zeitreihe mit den standortnahen Daten der simulierten REMO-Messtation unter den Rahmenbedingungen des „mittelguten“ Emissionsszenarios A1B fort, ergibt sich ein eindeutiges Bild: Sowohl die Anzahl an Tagen mit natürlichem Schneefall als auch die Anzahl an Tagen, an denen eine künstliche Beschneigung witterungsbedingt möglich wäre, gehen ab den 2020ern stetig zurück: Wären in den 2030ern im saisonalen Durchschnitt noch 31 Tage mit natürlichem Schneefall und 21 für die Beschneigung geeignete Tage zu erwarten, sinkt dieser Wert für die 2050er auf 20 und 16 und für die 2070er auf 19 und 13 Tage. Für die 2090er prognostiziert das Modell natürlichen Schneefall an durchschnittlich nur 13 und für die Beschneigung geeignete Zeitfenster an durchschnittlich nur 8 Tagen

pro Saison. Unter der Annahme, dass diese Prognosen zutreffend sind, wäre ein wirtschaftlicher Betrieb spätestens in den 2040ern nicht mehr darstellbar.

Ob die Amortisation einer Investition an diesem Standort bei einem (aufgrund des örtlichen Widerstands mutmaßlich immer wieder verzögerten) Baubeginn in den 2020ern und einer Amortisationsdauer von 15 bis 20 Jahren gelingen kann, muss unter diesen Rahmenbedingungen bezweifelt werden. Da ein wirtschaftlich erfolgreicher Betrieb über die 2030er hinaus aufgrund der durch den Klimawandel stetig steigenden Investitions- und Betriebskosten als höchst unwahrscheinlich betrachtet werden muss, der Harz als Urlaubsdestination aber mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit auch über diesen Zeitraum hinaus attraktiv bleiben wird, kann Kommune und Tourismuswirtschaft nur geraten werden, in den Aufbau von Infrastruktur und die Etablierung von Angeboten zu investieren, die auch unter den sich ändernden klimatischen Rahmenbedingungen nicht an Viabilität verlieren. Hierzu könnten am betrachteten Standort unter anderem Angebote in den Bereichen Mountainbiking, Freeclimbing und Naturwandern gehören.

## **8.5 Kritische Würdigung der Modelle**

### **8.5.1 Qualitative Bewertung**

Das im Rahmen dieser Arbeit konzeptionierte qualitative Analysemodell ist wenig komplex und basiert auf einer Zusammenstellung von auf Basis der gesichteten Literatur identifizierten Faktoren, die als wesentlich für den Erfolg oder Misserfolg von Investitionen in künstliche Beschneidung betrachtet werden dürfen. Da nicht auszuschließen ist, dass sich bei einer anderen Literaturzusammenstellung oder bei der Literaturlauswertung durch einen anderen Autoren eine abweichende Zusammenstellung an Faktoren ergeben hätte, ist das Modell als subjektiv und damit als methodisch angreifbar zu betrachten. Hinzu kommt, dass mit Blick auf den maximalen Umfang dieser Arbeit auf ein Ranking oder eine Gewichtung der Faktoren verzichtet wurde, auch wenn etwa das Vorhandensein von touristischen Alternativangeboten von geringerer Bedeutung als die Höhenlage oder die Verfügbarkeit von Wasser sein dürfte – und der Faktor „mangelnde Akzeptanz“ im Grunde nur während der Planungs- und Bauphase von erheblicher Bedeutung ist.

Unbenommen aller aufgezeigten Mängel ist davon auszugehen, dass sich die Prognosevalidität des Modells erheblich verbessern ließe, wenn die Bewertung

der Faktoren nicht – wie im Rahmen der vorliegenden Arbeit – durch den Autor selbst, sondern durch eine möglichst breite Gruppe unabhängig voneinander bewertender Expertinnen und Stakeholder vorgenommen werden würde.

### 8.5.2 Quantitative Analyse

Der inhaltliche Schwerpunkt des praktischen Teils dieser Arbeit liegt klar auf der Entwicklung des quantitativen Analysemodells. Im Gegensatz zum qualitativen Modell kann dieses sowohl im Aufbau als auch in der Anwendung als objektiv betrachtet werden: Die für das Modell verwendeten Faktoren – Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Feuchttemperatur, Windgeschwindigkeit, Niederschlagsmenge und Schneehöhe – stellen zweifelsfrei alle für die Prognose der Beschneibarkeit wesentlichen Größen dar – und die verwendeten Daten, die entweder aus historischen Aufzeichnungen oder Prognosemodellen stammen, sind von der durchführenden Person unabhängig. Bezüglich aller Größen, über deren Ausprägung abweichende Auffassungen bestehen könnten, ist das Modell zudem flexibel.

So können etwa die für eine Beschneigung oder einen Pistenbetrieb abträgliche maximale Windstärke, die für Ski-Alpin oder Ski-Langlauf erforderlichen Mindestschneehöhen oder die für eine Beschneigung notwendige maximale Feuchttemperatur unkompliziert verändert werden, um die Rahmenbedingungen der Analyse etwa an andere lokale oder technische Gegebenheiten (wie beispielsweise die Berücksichtigung der Nutzung von Additiven) anpassen zu können.

Gleiches gilt für die Quelle der Prognosedaten – soll alternativ zur im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Kombination REMO – A1B auf Daten eines anderen Klimamodells oder eines anderen Emissionsszenarios zurückgegriffen werden, so ist auch dies unkompliziert möglich. Da einerseits bekannt ist, dass die Anzahl der für die Beschneigung geeigneten Tage auf Basis von REMO zu einem eher konservativen Ergebnis führt (vgl. Endler 2010, S. 48 f.), die Erreichung eines Positiv-Szenarios wie A1B andererseits aber mittlerweile als unwahrscheinlich gilt, ist die Option der Verwendung alternativer Kombinationen aus Klimamodell und Emissionsszenario grundsätzlich als sinnvoll zu betrachten.

## 9. Fazit und Ausblick

### 9.1 Fazit

Die künstliche Beschneigung als Anpassungsstrategie wintertouristischer Anbieter an den Klimawandel ist erkennbar nur eine temporäre Lösung. Zwar wird die Produktion von Kunstschnee in vielen der höhergelegenen mitteleuropäischen Ski-gebiete noch bis Mitte dieses Jahrhunderts technisch möglich sein (vgl. Steiger 2010, S. 4), der zunehmende Kunstschneebedarf, die Verknappung von Wasserressourcen und die stetig steigenden Energiekosten werden jedoch lange vor dem Ende der technischen Möglichkeit dazu führen, dass der Kunstschneebetrieb immer teurer und damit unattraktiver wird und seine Konkurrenzfähigkeit mit alternativen touristischen Angeboten einbüßt (vgl. Abegg 2011, S. 23).

Insbesondere kleinere und weniger investitionsstarke sowie niedriger gelegene Skigebiete werden mittelfristig die „Zwischenlösung Kunstschnee“ aufgeben müssen – auch wenn sie sich derzeit nicht selten durch hohe kreditfinanzierte sowie teilweise auch öffentlich geförderte (und daher mit entsprechenden Mindestnutzzeiten verbundene) Investitionen der weiteren Beschneigung verschreiben. Auch wenn exakte Prognosen für einzelne Skigebiete mit hohem Aufwand und Unsicherheiten verbunden sind, kann allgemein festgestellt werden, dass der Aufbau schneeunabhängiger Angebote verglichen mit weiteren Investitionen in die Beschneigung in vielen Regionen den größeren wirtschaftlichen Erfolg verspricht.

Diese Problematik wurde von vielen Betreibern noch nicht erkannt – offenbar unter anderem, weil der große wirtschaftliche und technische Erfolg der Kunstschneeproduktion in den 1990ern und 2000ern „die Verantwortlichen in vielerlei Hinsicht sehr sicher gemacht und zu einer veränderten Risikowahrnehmung geführt [hat]“ (Trawöger & Steiger 2012, S. 28). Wie sämtliche im Rahmen der Literaturrecherche aufgefundenen Befragungen von Entscheidungsträgern in Wintersportbetrieben oder Kommunen zeigen, wird der Klimawandel entweder als ein abstraktes, zeitlich noch sehr weit entferntes Problem betrachtet (vgl. Lenz 2012, S. 15; Demiroglu et al. 2015, S. 120; Heuchele et al. 2014, S. 13) oder sogar vollkommen ignoriert oder geleugnet (vgl. Campos et al. 2018, S. 8; Demiroglu et al. 2015, S. 121). Verbreitet ist auch die Ansicht, dass es sich beim Klimawandel zwar um ein ernsthaftes Problem für den Wintersporttourismus handelt, das aber

gerade für das eigene Skigebiet aufgrund dessen Lage, Bekanntheit, finanzieller Ausstattung oder lokalklimatischer Besonderheiten nicht als existenzbedrohend zu betrachten ist (vgl. Heuchelet et al. 2014, S. 6 f.; Gschwend 2013, S. 1).

Das unterentwickelte Problembewusstsein seitens der Wintersportanbieter, welches sich aufgrund deren herausgehobener Stellung bei der örtlichen Meinungsbildung (siehe auch Kapitel 5.4) auf zahlreiche andere Akteure überträgt, führt zu einem insgesamt geringen Interesse an der Schaffung alternativer Angebote. Selbst sogenannte „no regret“-Investitionen (vgl. hierzu Balbi et al. 2011, S. 54), die sich auch dann tragen würden, wenn der Klimawandel vollständig ausbliebe, werden durch den von den Bahnbetreibern vorgegebenen „strategischen Fokus auf den Erhalt des Skigebiets“ (Trawöger & Steiger 2012, S. 29) unterbunden.

Diese problematische Entwicklung wird durch eine Reihe weiterer Trends verstärkt, welche die Zukunft des Wintersporttourismus als Wachstumsmarkt in Frage stellen. Zu diesen Trends gehört neben dem demografisch bedingt sinkenden Interesse an stark bewegungsorientierten und körperlich herausfordernden touristischen Angeboten (vgl. Damm et al. 2017, S. 40; Steiger 2011, S. 692) der gerade bei jüngeren Zielgruppen zunehmend stärker ausgeprägte Wunsch, dass auch erlebnisorientierte und „trendige“ Reisen einem ökologischen Anspruch genügen (vgl. Kreilkamp 2011, S. 207). Die Wintersportindustrie steht aufgrund der in Kapitel 4 dargestellten ökologischen Folgen künstlicher Beschneigung in besonderem Maße im Fokus negativer Aufmerksamkeit. Dieser Wertewandel bei den Nachfragern, gepaart mit dem Trend zu kürzeren Urlauben (vgl. Damm et al. 2014, S. 18) und der steigenden Bereitschaft von Skiurlaubern, bei ungünstigen Witterungsbedingungen spontan das Reiseziel zu wechseln (vgl. Bischof et al. 2017, S. 238), stellen die Branche vor enorme Herausforderungen.

Vor diesem Hintergrund ist damit zu rechnen, dass in den kommenden Jahrzehnten zahlreiche weitere Skigebiete aufgrund hoher Kosten und sinkender Nachfrage den Betrieb einstellen werden, obwohl eine technische Beschneigung in vielen dieser Gebiete weiterhin möglich sein dürfte. Gerade für niedrig gelegene Skigebiete oder Skigebiete, in denen bislang noch keine oder nur geringfügige Investitionen in künstliche Beschneigung vorgenommen wurden, kann daher nur empfohlen werden, eine Diversifikationsstrategie zu verfolgen, in der die technische Beschneigung neben Naturschnee- und witterungsunabhängigen Angeboten lediglich

eine untergeordnete Rolle spielt. Das im Rahmen dieser Arbeit als Beispielfall für die DSS-Anwendung betrachtete Winterberg-Projekt darf als ein geradezu prototypisches Exempel für diesen strategischen Ansatz betrachtet werden.

## 9.2 Ausblick

Das im Rahmen dieser Masterarbeit entwickelte DSS erreicht derzeit noch nicht den Reifegrad eines kommerziell einsetzbaren Produkts. Wie bereits in Kapitel 8.5 dargestellt, zeichnet sich das für die quantitative Analyse verwendete Modell aber durch einen hohen Grad an Flexibilität aus und kann nahezu beliebig an andere lokalklimatische oder technische Rahmenbedingungen angepasst bzw. neben Realdaten auch mit prognostischen Daten aus den verschiedensten Kombinationen von Klimamodellen und Emissionsszenarien unterlegt werden.

Zur weiteren Professionalisierung der Software empfehlen sich aus Sicht des Autors insbesondere die beiden nachfolgend kurz vorgestellten Schritte:

Umstellung des quantitativen Analysemodells auf Stundenbasis: Das derzeit auf Basis von Tagesmittelwerten für Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit operierende quantitative Analysemodell könnte auf Stundenmittelwerte umgestellt werden. Dies würde den Detailgrad der Prognostik verbessern und es ermöglichen, einzelne für die Beschneigung geeignete Zeitfenster an ansonsten ungeeigneten Tagen zu identifizieren, was mit dem aktuellen Modell nicht möglich ist. Darüber hinaus könnte das Modell durch den Wechsel der zeitlichen Basis noch um einen interessanten Aspekt erweitert werden: Die Berücksichtigung von Vorgaben des Lärmschutzes, die – regional unterschiedlich – ab bestimmten Uhrzeiten eine Beschneigung oder auch eine Präparation von Pisten untersagen, wodurch geeignete Zeitfenster nicht immer genutzt werden können. Auch dieser für die Beschneigungsprognostik wichtige Aspekt findet sich im aktuellen Modell nicht wieder.

Entwicklung einer professionellen Benutzeroberfläche: Sowohl das qualitative als auch das quantitative Analysemodell wurden im Rahmen dieser Arbeit unter Einsatz der freien Office-Software LibreOffice implementiert – eine für Testzwecke ausreichende Softwarebasis. Um ein Produkt zu generieren, welches kommerziellen Ansprüchen genügt, wäre allerdings eine Standalone-Realisierung mit benutzerfreundlicher Oberfläche notwendig, die etwa über eine Implementierung in den Programmiersprachen C++, C# oder VisualBasic.NET und unter Verwen-

dung von Microsoft Visual Studio erfolgen könnte. Neben einer optisch ansprechenderen Oberfläche könnte bei dieser Implementierung die bereits in Kapitel 8.5 angesprochene Flexibilisierung integriert werden, indem Anwenderinnen die Möglichkeit gegeben wird, mit nur einem Klick zwischen verschiedenen Klimamodellen und Emissionsszenarien zu wechseln. Auch die derzeit zwar mögliche, im aktuellen Interface aber noch versteckte Option der Anpassung von Grenzparametern (wie etwa der für einen sicheren Pistenbetrieb maximal tolerierbaren Windgeschwindigkeit) ließe sich im Rahmen dieser Implementierung verbessern.

Integriert werden sollten darüber hinaus ein Assistent, welcher die Anwenderinnen über die Abfrage von qualitativen wie quantitativen Parametern schrittweise zum Analyseergebnis geleitet, und dabei auch eine Wichtung der Bewertungsfaktoren gestattet, sowie ein Reporting-Modul, welches die Ausgabe der Analyseergebnisse (idealerweise unter gleichzeitiger Berücksichtigung verschiedener Kombinationen von Klimamodell, Emissionsszenario und Modellgrenzwerten) in Form eines übersichtlichen und zur Weitergabe geeigneten Dokuments ermöglicht.

Die skizzierten Verbesserungen am Modell sowie an der Softwareimplementation sollen in den kommenden zwei Jahren schrittweise umgesetzt und Open Access zum freien Download zur Verfügung gestellt werden. Der Autor hofft, potentiellen Investoren aber auch kommunalen Entscheidungsträgern, Umweltverbänden und interessierten Bürgerinnen und Bürgern auf diesem Weg ein nützliches Werkzeug zur Evaluation von Beschneiungsinvestitionen zur Verfügung stellen zu können. Die im Rahmen dieser Masterarbeit entwickelte LibreOffice-Implementierung wird im Anschluss an die Bewertung der Arbeit ebenfalls Open Access publiziert.

## Literaturverzeichnis

Abegg & Steiger 2016: Abegg, Bruno, Steiger, Robert (2016): Klimawandel und Wintertourismus: Zwei benachbarte Skigebiete im Vergleich. Innsbrucker Geographische Studien, Band 40, 391-400.

Abegg 2011: Abegg, Bruno (2011): Tourismus im Klimawandel. Ein Hintergrundbericht der CIPRA, CIPRA International, Schaan.

Abegg 2012: Abegg, Bruno (2012): Natürliche und technische Schneesicherheit in einer wärmeren Zukunft. Forum für Wissen 2012, 29-35.

Ackermann 2014: Ackermann, Kurt (2014): Mountain Tourism in Hokkaido, Japan and Tyrol, Austria. Studienarbeit, Hokusei Gakuen University, Sapporo.

Alverá et al. 2012: Alverá, Katharina; Zerbe, Stefan; Hecher, Peter; Gallmetzer, Willigis (2012): Fluss- und Auenrenaturierung in Südtirol (Italien). Synthese und Perspektiven. Naturschutz und Landschaftsplanung 13 (6), 165-172.

Amelung & Moreno 2009: Amelung, Bas; Moreno, Alvaro (2009): Impacts of climate change in tourism in Europe. IPTS – Institute for Prospective Technological Studies, Sevilla.

Amelung et al. 2016: Amelung, Bas; Student, Jillian; Nicholls, Sarah; Lamers, Machiel; Baggio, Rodolfo; Boavida-Portugal, Ines (2016): The value of agent-based modelling for assessing tourism–environment interactions in the Anthropocene. Current Opinion in Environmental Sustainability 23, 46-53.

Balbi et al. 2010: Balbi, Stefano; Perez, Pascal; Giupponi, Carlo (2010): A spatial agent-based model to explore alternative scenarios of adaptation to climate change in an Alpine tourism destination. Agricultural Research for Development (CIRAD), Montpellier.

Balbi 2012: Balbi, Stefano (2012): Climate Change and Tourism in the Alps: A Position Paper in View of the Upcoming Alpine Convention Fourth Report on the State of the Alps on Sustainable Tourism. CMCC Research Paper 127, Lecce.

Balbi et al. 2011: Balbi, Stefano; Bonzagino, Laura; Giupponi, Carlo (2011): Climate change and its impacts on tourism in the Alps. The pilot area of Auronzo di Cadore (Belluno). Euro-Mediterranean Centre for Climate Change, Lecce.

Balbi et al. 2013: Balbi, Stefano; Giupponi, Carlo; Perez, Pascal; Alberti, Marco (2013): A spatial agent-based model for assessing strategies of adaptation to climate and tourism demand changes in an alpine tourism destination. *Environmental Modelling & Software* 45, 29-51.

Bark et al. 2010: Bark, Rosalind H.; Colby, B. G.; Dominguez, F. (2010): Snow days? Snowmaking adaptation and the future of low latitude, high elevation skiing in Arizona, USA. *Climatic Change* 102 (3-4), 467-491.

Barnett et al. 2015: Barnett, Jon; Evans, Louisa S.; Gross, Catherine; Kiem, Anthony S.; Kingsford, Richard T.; Palutikof, Jean P. (2015): From barriers to limits to climate change adaptation: path dependency and the speed of change. *Ecology and Society* 20 (3): 5-15.

Becken 2010: Becken, Susanne (2010): The importance of climate and weather for tourism: literature review. LEaP - Land Environment and People.

Becken et al. 2015: Becken, Susanne; Zammit, Christian; Hendrikx, Jordy (2015): Developing Climate Change Maps for Tourism. *Journal of Travel Research* 54 (4), 430-441.

Behnen 2011: Behnen, Tobias (2011): Alpine airports as gateways for growing incoming ski tourism: relevance and spatial impacts. *Managing Alpine Future II - Inspire and drive sustainable mountain regions*. Innsbruck, 21.11.2011.

Bender et al. 2011: Bender, Oliver; Borsdorf, Axel; Fischer, Andrea; Stötter, Johann (2011): Mountains Under Climate and Global Change Conditions – Research Results in the Alps. Blanco, Juan A.; Kheradmand, Houshang (Hrsg.) (2011): *Climate Change. Geophysical Foundations and Ecological Effects*, Chapter 20, IntechOpen, London.

Beniston 2012: Beniston, Martin (2012): Is snow in the Alps receding or disappearing? *WIREs Climate Change* 3 (4), 349–358.

Benoit 2012: Benoit, Claudine (2012): Lufttemperatur und Luftfeuchte als Voraussetzung zur Erzeugung von künstlichem Schnee. Masterarbeit, Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, Graz.

Berchtenbreiter 2014: Berchtebreiter (2014): Wintertourismus in den Alpen. Entwicklung, Trends und Klimawandel. Dargestellt an der Tourismusgemeinde Lengries. Bachelorarbeit, Hochschule Mittweida, Mittweida.

Bernhart et al. 2017: Bernhart, Josef; Decarli, Peter; Promberger, Kurt (2017): Der Einfluss der Tourismusintensität auf die öffentlichen Haushalte der Gemeinden in Tirol und Südtirol. Eurac Research, Bozen.

Bertle 2009: Bertle, Ludwig (2009): Kinder, Kinder, es wird Winter. Winter-Freizeit-Alternativen für Familien. DAV Panorama (6/2009), 20-21.

Bieger et al. 2019: Bieger, Thomas; Riklin, Thomas; Baudenbacher, Catherine (2019): Umfrage zur aktuellen Situation und zu den wirtschaftlichen Perspektiven der Beschneigung in der Schweiz. Universität St. Gallen.

Bischof et al. 2017: Bischof, Michael; Schmude, Jürgen; Bauer, Manuela (2017): Tourismus und Klimawandel – Eine nachfrageseitige Analyse zu Wahrnehmung und Reaktion am Beispiel der Alpen. Zeitschrift für Tourismuswissenschaft 9 (2), 105.

Bogataj 2011: Bogataj, Tanja (Hrsg.) (2011): Reduktion klimaschädlicher Emissionen in den Alpen. Nationale Strategien, regionale und lokale Initiativen. Ständiges Sekretariat der Alpenkonvention, Innsbruck.

Bones 2009: Bones, Josephine (2009): Controlling Crystal Habit in a Small Scale Snowmaker. International Snow Science Workshop 2009, Davos.

Bonzanigo et al. 2016: Bonzanigo, Laura; Giupponi, Carlo; Balbi, Stefano (2016): Sustainable tourism planning and climate change adaptation in the Alps: a case study of winter tourism in mountain communities in the Dolomites. Journal of Sustainable Tourism 24 (4), 637.652.

Borck 2013: Borck, Sandrine (2013): Die Entwicklung des nachhaltigen Tourismus und der kulturellen Identität am Beispiel des Lesachtals. Bachelorarbeit, Hochschule Mittweida, Mittweida.

Brandt 2006: Brandt, Doreen (2006): Das ökologische Verbundsystem in der Raumordnung am Beispiel der Aufstellung des Regionalen Entwicklungsplanes für die Planungsregion Harz. Naturschutz in Sachsen-Anhalt, Sonderheft 2006, 71-79.

Brauns & Offinger 2002: Brauns, Mario; Offinger, Wibke (2002): Bemerkenswerte Nachweise von Wasserinsekten aus dem Nordharz, Sachsen-Anhalt. *Lauterbornia* 44/2002, 73-82.

Bräuer et al. 2009: Bräuer, Ingo; Umpfenbach, Katharina; Blobel, Daniel; Grünig, Max; Best, Aaron; Peter, Martin; Lückge, Helen (2009): Klimawandel: Welche Belastungen entstehen für die Tragfähigkeit der Öffentlichen Finanzen? Projektbericht, Ecologic Institut, Berlin.

Brunner 2013: Brunner, Magdalena Anna (2013): Tourismuswerbung und touristisches Potenzial in den Ländern des östlichen Mitteleuropa. Eine vergleichende Gegenüberstellung mit einem Fokus auf Diskrepanzen und deren Gründe. Diplomarbeit, Universität Wien, Wien.

Buckley 2017: Buckley, Ralf (2017): Perceived Resource Quality as a Framework to Analyze Impacts of Climate Change on Adventure Tourism: Snow, Surf, Wind, and Whitewater. *Tourism Review International* 21 (3), 241-254.

Burakowski & Magnusson 2012: Burakowski, Elizabeth; Magnusson, Matthew (2012): Climate Impacts on the Winter Tourism Economy in the United States. Natural Resources Defense Council, New York.

Burt & Rice 2009: Burt, Jennifer W.; Rice, Kevin J. (2009): Not all ski slopes are created equal: Disturbance intensity affects ecosystem properties. *Ecological Applications* 19 (8), 2242-2253.

Campos et al. 2018: Campos Rodrigues, Luís; Freire-González, Jaume; González Puig, Aina; Puig-Ventosa, Ignasi (2018): Climate Change Adaptation of Alpine Ski Tourism in Spain. *Climate* 6 (2), 29-52.

Carmagnola et al. 2018: Carmagnola, C. M.; Morin, S.; Lafayasse, M.; Vernay, M.; Francois, H.; Eckert, N. (2018): Combination of Climatological Information and Meteorological Forecast for Seamless Prediction of Alpine Snow Conditions. International Snow Science Workshop 2018, Innsbruck.

Chin et al. 2018: Chin, Natalie; Byun, Kyuhyun; Hamlet, Alan F.; Cherkauer, Keith A. (2018): Assessing potential winter weather response to climate change and implications for tourism in the U.S. Great Lakes and Midwest. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 19, 42-56.

Dallhammer et al. 2015: Dallhammer, E.; Formayer, H.; Jiricka, A.; Keringer, F.; Leitner, M.; McCallum, S. et al. (2015): Strategische Unterstützung bei der Projektplanung zur Berücksichtigung von Klimawandelfolgen. Endbericht zum Forschungsprojekt Environmental Impact Assessment Satisfying Adaptation Goals Evolving from Climate Change. Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

Damm et al. 2014: Damm, Andrea; Köberl, Judith; Prettenthaler, Franz (2014): Does artificial snow production pay under future climate conditions? A case study for a vulnerable ski area in Austria. *Tourism Management* 43, 8-21.

Damm et al. 2017: Damm, Andrea; Greuell, Wouter; Landgren, Oskar; Prettenthaler, Franz (2017): Impacts of +2 °C global warming on winter tourism demand in Europe. *Climate Services* 7, 31-46.

Dar et al. 2014: Dar, Reyaz Ahmad; Rashid, Irfan; Romshoo, Shakil Ahmad; Mazarazi, Asif (2014): Sustainability of winter tourism in a changing climate over Kashmir Himalaya. *Environmental monitoring and assessment* 186 (4), 2549-2562.

Davoudi et al. 2012: Davoudi, Simin; Tranos, Emmanouil; Lückenkötter, Johannes (2012): Climate change and winter tourism – A Pan-European perspective. *Tourism Planning and Development* 11 (2), 163-178.

Dawson & Scott 2010: Dawson, Jackie; Scott, Daniel (2010): Systems Analysis of Climate Change Vulnerability for the US Northeast Ski Sector. *Tourism and Hospitality Planning and Development* 7 (3), 219-235.

Dawson & Scott 2013: Dawson, J.; Scott, D. (2013): Managing for climate change in the alpine ski sector. In: *Tourism Management* 35, 244-254.

Dawson et al. 2009: Dawson, J.; Scott, D.; McBoyle, G. (2009): Climate change analogue analysis of ski tourism in the northeastern USA. In: *Climate Research* 39, 1-9.

de Jong et al. 2012: de Jong, Carmen; Knolle, Friedhart; Reinboth, Christian (2012): Auswirkungen von Klimawandel und künstlicher Beschneigung auf Wurmberg und Winterberg. Erste Ergebnisse einer Analyse der Planungsunterlagen sowie von Geländeuntersuchungen im Juli 2012. BUND Goslar, Goslar.

de Jong et al. 2015: de Jong, Carmen; Previtali, Franco; Carletti, Gloria (2015): Challenges in Assessing and Managing Geohydrological Risk related to Natural

and Anthropogenic Pressures in Alpine Ski Resorts. Engineering Geology for Society and Territory Vol. 5, 781-785-

de Jong et al. 2017: de Jong, Carmen; Knolle, Friedhart; Reinboth, Christian; Wendenkampf, Oliver (2017): Das Projekt "Natürlich.Schierke" - eine kritische Betrachtung. Unser Harz (11/2017), 216-223.

Demiroglu 2016: Demiroglu, Osman Cenk (2016): Climate Change Vulnerability of Ski Tourism in Germany and Turkey. Istanbul Policy Center, Istanbul.

Demiroglu et al. 2015: Demiroglu, Osman Cenk; Kučerová, Jana; Ozcelebi, Oguzhan (2015): Snow reliability and climate elasticity: Case of a Slovak ski resort. Tourism Review 70 (1), 1-12.

Demuth et al. 2010: Demuth, Bernd; Heiland, Stefan; Wiersbinski, Norbert; Finck, Peter; Schiller, Jens (2010): Landschaften in Deutschland 2030 – Der stille Wandel. Ergebnisse des Workshops vom 29.11. bis zum 02.12.2010 an der Internationalen Naturschutzakademie Insel Vilm des Bundesamtes für Naturschutz, Bonn.

Dieseth 2016: Dieseth, Jon-Brede Rykkje (2016): Snow Production Equipment at Ambient Temperatures Above Zero Degrees Celsius. Masterarbeit, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

Dingeldein 2017: Dingeldein, Johanna (2017): Auswirkung der Nachhaltigkeit in der Tourismusbranche am Beispiel Österreich. Bachelorarbeit, Hochschule Mittweida, Mittweida.

Dinter et al. 2016: Dinter, Janis; Färber, Vanessa; Kindl, Lukas; Speyer, Anja; Weickert, Juliane; Steiger, Robert; Abegg, Bruno (2016): Die Verbesserung der touristischen Wettbewerbsfähigkeit von ländlichen Destinationen. GW-Unterricht 1/2016, 5-14.

Dordevic 2018: Dordevic, Bojan (2018): Hedging by using weather derivatives in winter ski tourism. Ekonomika poljoprivrede 65 (1), 125-142.

Duquette 2016: Duquette, Katie A. (2016): Don't Eat the Brown Snow! Utilizing Wastewater for Artificial Snow: A Slippery Slope Between Protecting Skiers and Encouraging Water Reuse. Villanova Environmental Law Journal, 27 (1), 123-148.

Düwell 2015: Düwell, Klaus Johannes (2015): Verletzungsmuster und Verletzungsrisiko im alpinen Wintersport am Beispiel der Skiregion Oberstdorf. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität zu München, München.

Endler 2010: Endler, Christina (2010): Analyse von hochaufgelösten Klimasimulationen für die Schwarzwaldregion. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.

Enke 2010: Enke, Franck (2010): Klimaanpassung in der räumlichen Planung in Niedersachsen: Das Forschungsprojekt KLIFF-IMPLAN. 12. Junges Forum der Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL) vom 10.06. bis zum 12.06.2009, Hamburg.

Erdlinger & Wissensteiner 2013: Edlinger, Patrick; Wissensteiner, Dominik (2013): The Impact of Climate Change on Tourism. An Analysis of the Sensitivity of Austrian Winter Tourism in Regards to Temperature and Snow Availability. University of Southern Denmark, Kolding.

Eriksen et al. 2011: Eriksen, Siri; Aldunce, Paulina; Bahinpati, Chandra Sekhar; Martins, Rafael D'Almeida; Molefe, John Isaac; Nhemachena, Charles (2011): When not every response to climate change is a good one: Identifying principles for sustainable adaptation. *Climate and Development* 3 (1), 7-20.

Eugen et al. 2010: Eugen, Man Teodor; Beilicci, Robert; Rusan, Ion; Chafilka, Djelal-Dantek; Yannik, Vanhove (2010): Waterstorage Basin for the Production of Artificial Snow at the Ski Resort "Gutaiul Doamnei Cavnic", Maramures. *Analele Universității din Oradea (Vol. XV)*, 686-695.

Falk & Steiger 2018: Falk, Martin; Steiger, Robert (2018): An Exploration of the Debt Ratio of Ski Lift Operators. *Sustainability* 2018, 10 (9), 2985.

Falk & Vanat 2016: Falk, Martin; Vanat, Laurent (2016): Gains from investments in snowmaking facilities. *Ecological Economics* 130, 339-349.

Falk 2010: Falk, Martin (2010): A dynamic panel data analysis of snow depth and winter tourism. *Tourism Management* 31 (6), 912-924.

Falk 2013: Falk, Martin (2013): A survival analysis of ski lift companies. *Tourism Management* 36, 377-390.

Fischer-Hirchert & Reinboth 2009: Fischer-Hirchert, Ulrich; Reinboth, Christian (2009): Lichtökologie und Lichtwahrnehmung. Lehrbrief für den Management-Lehrgang "Straßenbeleuchtung – Planung, Bau und Betrieb unter wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten", EUROFORUM-Verlag, Düsseldorf.

Fischer-Hirchert et al. 2009: Fischer-Hirchert, Ulrich; Reinboth, Christian; David, Tim (2009): Neues Licht für Städte und Kommunen - Wie LED-Technologie die Straßenbeleuchtung reformieren könnte. Optik & Photonik, 1/2009, 36-39.

Foken & Lüers 2015: Foken, Thomas; Lüers, Johannes (2015): Regionale Ausprägung des Klimawandels in Oberfranken. Bayreuther Kontaktstudium Geographie, Band 8, 33-42.

Franck & Peithmann: Franck, Enke; Peithmann, Ortwin: Regionalplanung und Klimaanpassung in Niedersachsen. Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL), Hannover.

Freppaz et al. 2013: Freppaz, Michele; Filippa, Gianluca; Corti, Giuseppe; Cocco, Stefania; Williams, Mark W.; Zanini, Ermanno (2013): Soil Properties on Ski Runs. The Impact of Skiing on Mountain Environments, 45-64.

Gabl et al. 2010: Gabl, Roman; Kapeller, Gerhard; Aufleger, Markus (2010): Lawineneinstoß in einen Speichersee – Vergleich numerisches und physikalisches Modell. WasserWirtschaft (5), 26-29.

Gebhardt et al. 2011: Gebhardt, Oliver; Kumke, Sven; Hansjürgens, Bernd (2011): Kosten der Anpassung an den Klimawandel: Eine ökonomische Analyse ausgewählter Sektoren in Sachsen-Anhalt. UFZ-Berichte 05/2011, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Magdeburg.

Gonseth & Matasci 2011: Gonseth, Camille; Matasci, Cecilia (2011): Analysis of the sensitivity of ski tourism demand to climate change in Switzerland. Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung, Innsbruck.

Götz et al. 2014: Götz, Andreas; Siegwart, Karine; Burkhardt, Andrea; Manser, Rolf; Marendaz, Evelyne; Müller, Stephan; Willi, Hans Peter (2014): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014-2019. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.

Graber 2017: Graber, Peter Paul (2017): Probabilistische Vorhersage von Beschneigungsbedingungen in Tiroler Skigebieten. Masterarbeit, Universität Innsbruck, Innsbruck.

Gray 2017: Gray, Emilie (Hg.) (2017): Crested Butte. Loving it to Death. Class Papers, Colorado College, Colorado Springs.

Grussmann et al. 2014: Grussmann, Severin; Janke, Julia; Schibany, Andreas (2014): Die wirtschaftlichen Kosten des Klimawandels in Österreich. Institut für höhere Studien, Wien.

Gschwend 2013: Gschwend, Marcus (2013): Positionspapier Herausforderung Klimawandel. Bergbahnen Graubünden, Lantsch.

Haane 2017: Haane, Antonius (2017): Der mediale Diskurs über den Naturschutz im Raum Garmisch-Partenkirchen: Eine qualitative Inhaltsanalyse des Garmischer Tagblattes seit 1925. Bachelorarbeit, TU Universität München, München.

Halmheu 2018: Halmheu, Franziska (2018): Spannungsfeld Tourismus – Naturschutz. Künstliche Beschneigung als Anpassungsstrategie an den Klimawandel? Studienarbeit, Katholische Universität Ingolstadt-Eichstätt, Ingolstadt.

Hamberger et al. 2013: Hamberger, Sylvia; Doering, Axel; Zängl, Wolfgang (2013): Bewertung der geplanten Bewerbung für Olympische Winterspiele „München 2022“ durch das Netzwerk Nolympia. Bürgerbündnis NOlympia. München.

Hammerl 2010: Hammerl, Nina (2010): Wintertourismus im Skigebiet Göstling/Hochkar Eine sozialgeographische Studie zur Entwicklung des Gästeaufkommens aus Central Eastern European Countries. Diplomarbeit, Universität Wien, Wien.

Hänel & Reinboth 2012: Hänel, Andreas; Reinboth, Christian (2012): Wo Sternlicht unter Naturschutz steht - Dark-Sky-Parks und ihre Ausweisung. interstellum – die Zeitschrift für praktische Astronomie, Ausgabe 80, 02/03 2012, 12-17.

Heuchele et al. 2014: Heuchele, Linda; Nothacker, Klemens; Renner, Christina; Konold, Werner; Lupp, Gerd (2014): Die Bedeutung des Wintersports für den Tourismus im Südschwarzwald und Überlegungen zu potentiellen schneeunabhängigen Alternativen – Eine Analyse von Wahrnehmungen im Hinblick auf den Klimawandel. Zeitschrift für Tourismuswissenschaft 6 (1), 5-21.

Hierneis et al. 2011: Hierneis, Christian; Keller, Andreas; Hamberger, Sylvia (2011): Stellungnahme zum Bid Book München 2018. Gesellschaft für ökologische Forschung e.V., München.

Huss et al. 2016: Huss, Matthias; Bauer, Andreas; Marty, Christoph; Nötzli, Jeanette (2016): Schnee, Gletscher und Permafrost 2014/15. Kryosphärenbericht für die Schweizer Alpen. Die Alpen (Juli 2016), 36-43.

IPCC 2007: Solomon, S.; Quin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K.B.; Tignor, M.; Miller, H.L. (Hrsg.) (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.

Joemann et al. 2017: Joemann, Michael; Völkel, René; Pollerberg, Clemens; Podesta, Lorenzo; Besana, Francesco (2017): All-Weather Snow Machine Driven by Solar Energy. ISES Solar World Congress 2017, Abu Dhabi.

Kellner & Weingartner 2018: Kellner, Elke; Weingartner, Rolf (2018): Chancen und Herausforderungen von Mehrzweckspeichern als Anpassung an den Klimawandel. Wasser Energie Luft 100 (2), 101-107.

Keßler et al. 2012: Keßler, Teresa; Cierjacks, Arne; Ernst, Raffael; Dziöck, Frank (2012): Direct and indirect effects of ski run management on alpine Orthoptera. Biodiversity Conservation 21 (1), 281-296.

Kirsch et al. 2014: Kirsch, A.; Felber, W.; Marcher, Th.; Fuchs, W. (2014): Geotechnical challenges during design and construction of a ski resort in Azerbaijan. XV Danube-European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE 2014). Wien, 09.09.2014.

Knaus 2011: Knaus, Florian (2011): Der Einfluss von künstlicher Beschneigung auf geschützte Moorflächen in Sörenberg, Luzern. ETH Zürich, Zürich.

Knolle & Reinboth 2014: Knolle, Friedhart; Reinboth, Christian (2014): Winter Tourism and Protected Areas in the Harz Mts. – History, Problems and Perspectives. ISSRM 2014, Universität Hannover, Hannover, 10.06.2014.

Kreilkamp 2011: Kreilkamp, Edgar (2011): Klimawandel und Tourismus – Herausforderungen für Destinationen. Zeitschrift für Tourismuswissenschaft 3 (2), 203-219.

Kromp-Kalb et al. 2009: Kromp-Kolb, Helga; Formayer, Herbert; Haas, Patrick; Hofstätter, Michael; Schwarzl, Ingeborg (2009): Beobachtete Veränderung der Hitzeperioden in Oberösterreich und Abschätzung der möglichen zukünftigen Entwicklungen. Universität für Bodenkultur, Wien.

Kurtz 2015: Kurtz, Klemens (2015): Eine spieltheoretische Betrachtung von Nutzungskonflikten bei der Erschließung des Schöckls für den Mountainbike-Sport. Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Graz.

Küry et al. 2018: Küry, Daniel; Lubini, Verena; Stucki, Pascal (2018): Verletzlichkeit von Eintagsfliegen, Steinfliegen und Köcherfliegen alpiner Quellen gegenüber Klimaveränderungen. Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt 83 (2018), 199-218.

Laesser et al. 2010: Laesser, Christian; Bieger, Thomas; Riklin, Thomas; Engeler, Isabelle; Boksberger, Philipp (2010): Neue Preismodelle für Bergbahnen – Konzeptionelle Grundlagen und empirische Erkenntnisse. Studie im Auftrag der Seilbahnen Schweiz (SBS), Universität St. Gallen, St. Gallen.

Landtwing & Götz 2016: Landtwing, Stephan; Götz, Thomas (2016): Unbeschwertes und sicheres Skivergnügen dank Geodaten. Dreiländertagung 2016 der DGPF, der OVG und der SGPF. Bern.

Lang & Lang 2009: Lang, Thomas; Lang, Thomas (2009): Energetische Bedeutung der technischen Pistenbeschneigung und Potentiale für Energieoptimierungen. Schweizerische Eidgenossenschaft, Bern.

Lanz et al. 2014: Lanz, Klaus; Rahn, Eric; Siber, Rosi; Stamm, Christian (2014): Bewirtschaftung der Wasserressourcen unter steigendem Nutzungsdruck. Schweizerische Nationalfonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung, Dübendorf.

Lazar & Williams 2010: Lazar, Brian; Williams, Mark W. (2010): Potential Impacts of Climate Change for U.S. Westach Range Ski Areas: Projections for Park City Mountain Resort in 2030, 2050 and 2075. International Snow Science Workshop 2010, Squaw Valley.

Lenz 2012: Lenz, Elisabeth (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf die alpine Vegetation: Didaktische Überlegungen und Vermittlungsstrategien. Diplomarbeit, Universität Wien, Wien.

Li et. al 2012: Li, Qianqian; Yan, Qi; Chen, Jinsi; He, Yan; Wang, Jing; Zhang, Hongxing et al. (2012): Molecular characterization of an ice nucleation protein variant (inaQ) from *Pseudomonas syringae* and the analysis of its transmembrane transport activity in *Escherichia coli*. *International journal of biological sciences* 8 (8), 1097-1108.

Lintzen & Edeskär 2012: Lintzén, Nina; Edeskär, Tommy (2012): Study on basic material properties of artificial snow. 2012 Nordic Conference on Soil Mechanics and Geotechnical NGM, Danish Geotechnical Society, Copenhagen.

Lintzen 2012: Lintzén, Nina (2012): Snow making and snow storage. Methods for making and storing snow for winter activities in a warmer climate. Summary of practical experiences with snow storage. Semesterarbeit, Lulea University of Technology, Lulea.

Lintzen 2013: Lintzén, Nina (2013): Mechanical Properties of Artificial Snow. Studienarbeit, Lulea University of Technology, Lulea.

Loubier et al. 2010: Loubier, J. C.; Kanevski, M.; Schumacher, M.; Timoni, V.; Claret, S.; Zieba, A.; Doctor, M. (2010): Optimization of snowmaking in high mountain ski resorts. 13th AGILE International Conference on Geographic Information Science, Guimarães.

Lupp et al. 2013: Lupp, Gerd; Heucheles, Linda; Konold, Werner; Renner, Christina; Pauli, Patrick; Siegrist, Dominik (2013): Biologische Vielfalt und Klimawandel als Herausforderung für Tourismusdestinationen. Wahrnehmung und Handlungsbedarf der Akteure in naturräumlich besonders wertvollen Beispielregionen Deutschlands. *Biodiversität – Klimaschutz – Tourismus* 45 (3), 69-75.

Lütolf & Lengweiler 2015: Lütolf, Philipp; Lengwiler, Christoph (2015): Finanzsituation von Bergbahnen in der Schweiz 2013/2014. 2013/14 und im Durchschnitt von fünf Jahren. Hochschule Luzern, Luzern.

Matern et al. 2009: Matern, Antja; Löwis, Sabine von; Bruns, Antje: Integration - Aktuelle Anforderungen und Strategien in der Stadt-, Raum- und Umweltplanung.

12. Junges Forum der Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL) vom 10.06. bis zum 12.06.2009, Hamburg.

Matzarakis et al. 2012: Matzarakis, Andreas; Hämmerle, Martin; Koch, Elisabeth; Rudel, Ernest (2012): The climate tourism potential of Alpine destinations using the example of Sonnblick, Rauris and Salzburg. *Theoretical and Applied Climatology* 110 (4), 645-658.

Mayer & Erschbarmer 2009: Mayer, Robert; Erschbarmer, Brigitta (2009): Die Vegetation von Schipisten im Vergleich zur angrenzenden Vegetation im inneren Ötztal (Zentralalpen, Nordtirol). *Verhandlungen der Zoologisch-Botanischen Gesellschaft in Österreich* 146, 139-157.

Mayer et al. 2011: Mayer, Marius; Kraus, Felix; Job, Hubert (2011): Tourismus – Treiber des Wandels oder Bewahrer alpiner Kultur und Landschaft? *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft* 153, 31-74.

Mimm 2018: Mimm, Günther Matthäus (2018): Kunstschneeanlagen als Stromspeicher. Sekundärnutzung von Beschneiungsseen als hydraulische Energiespeicher in Österreich. Diplomarbeit, Universität Graz, Graz.

Müller et al. 2013: Müller, Andreas; Steiger, Robert; Peters, Mike; Veulliet, Eric (2013): Klimawandel und Tourismus: Wirtschaftliche und Management-Implikationen für Wintersportdestinationen. 7th research Forum of the Austrian Universities of Applied Sciences, Dornbirn.

Noguera 2018: Noguera, Alejo Louro (2018): Studying the feasibility of installing a temperature independent snowmaking system with heat recovery. Masterarbeit, University of Gävle, Gävle.

Olefs et al. 2010: Olefs, Marc; Fischer, Andrea; Lang, Josef (2010): Boundary Conditions for Artificial Snow Production in the Austrian Alps. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49 (6), 1096-1113.

Osberghaus et al. 2013: Osberghaus, Daniel; Schwirplies, Claudia; Ziegler, Andreas (2013): Klimawandel in Deutschland: Risikowahrnehmung, Wissensstand und Anpassung in privaten Haushalten. Ergebnisse einer Befragung deutscher Haushalte 2012. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin.

Paul et al. 2013: Paul, Frank; Bauer, Andreas; Marty, Christoph; Nötzli, Jeannette (2013): Schnee, Gletscher und Permafrost 2011/12. Kryosphärenbericht der Schweizer Alpen. Die Alpen (Juli 2013), 52-59.

Pinnow 2014: Pinnow, Mandy (2014): Zukunftskonzept Harz. Eine Untersuchung zur zukünftigen Anpassung des Wintertourismus an den Klimawandel. Bachelorarbeit, Hochschule Mittweida, Mittweida.

Prex 2015: Prex, Ulrike (2015): Tourismus und Klimawandel am Beispiel der Region Garmisch-Partenkirchen. Bachelorarbeit, Hochschule Mittweida, Mittweida.

Pröbstl-Haider & Pütz 2016: Pröbstl-Haider, Ulrike; Pütz, Marco (2016): Großschutzgebiete und Tourismus in den Alpen im Zeichen des Klimawandels. Zeitschrift für Naturschutz und Landschaftspflege 91 (1), 15-19.

Radmann 2012: Radman, Audra (2012): Noise Characterzation and Exposure at a Ski Resort. Masterarbeit, Colorado State University, Fort Collins.

Reintinger 2016: Reintinger, Christine (2016): Wohin geht die Reise? Eine Analyse aktueller und zukünftiger Reiseentscheidungen deutscher Touristen. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität zu München, München.

Rixen & Freppaz 2009: Rixen, Christian; Freppaz, Michele (2009): Winter sports: the influence of ski piste construction and management on soil and plant characteristics. Understanding Mountain Soils: A Contribution from Mountain Areas to the International Year of Soils, 81-83.

Sand 2018: Sand, Manuel S. (Hrsg.) (2018): Mountainbike und Tourismus. Adventuremanagement in Theorie und Praxis. ZIEL - Zentrum für Interdisziplinäres Erfahrungsorientiertes Lernen, Augsburg.

Schabschneider 2013: Schabschneider, Helmut (2013): The influence of various parameters on the generation of snow crystals in an artificial cloud. Magisterarbeit, Universität Wien, Wien.

Schmidt 2015: Schmidt, Lea Marie (2015): Tourismus und Klimawandel: Anpassungs- und Verminderungsstrategien. Eine Analyse der deutschen Küsten- und Alpentourismusregion. Bachelorarbeit, Hochschule Mittweida, Mittweida.

Schmidt et al. 2010: Schmidt, Philipp; Steiger, Robert; Matzarakis, Andreas (2010): Artificial snow making in the Southern Black Forest. 7th Conference on Biometeorology. Freiburg.

Schneebeli 2015: Schneebeli, Martin (2015): Warum alter Schnee jung ist. Physik Unserer Zeit 46 (3/2015), 126-130.

Schneider 2014: Schneider, Frank (2014): Kostenmanagement und Controlling Instrumente von technischen Beschneiungsanlagen. Diplomarbeit, Hochschule Mittweida, Mittweida.

Schönthaler et al. 2015: Schönthaler, Konstanze; Andrian-Werburg, Stefan von; Rüth, Petra van; Hempen, Susanne (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe zur Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.

Schröder 2015: Schröder, Verena (2015): Corporate Regional Responsibility (CRR) – Potential für eine transdisziplinäre Geographie am Beispiel von Seilbahnunternehmen in Tirol. Innsbrucker Bericht 2014–15, 89-106.

Schröder 2017: Schröder, Verena (2017): Verantwortung für die Region? Das Beispiel der Seilbahnunternehmen in Tirol vor dem Hintergrund einer Corporate Regional Responsibility. Dagmar Lund-Durlacher, Matthias S. Fifka und Dirk Reiser (Hrsg.): CSR und Tourismus. Springer Gabler, Heidelberg, 467-474.

Schulze et al. 2014: Schulze, Hans-Martin; Reinboth, Christian; Fischer-Hirchert, Ulrich (2014): Machbarkeitsuntersuchung zum NGA-Breitbandausbau im Landkreis Harz (unveröffentlicht), HarzOptics GmbH, verfasst im Auftrag des Landkreises Harz, Wernigerode.

Scott et al. 2015: Scott, D.; Steiger, R.; Rutt, M.; Johnson, P. (2015): The future of the Olympic Winter Games in an era of climate change. Current Issues in Tourism 18 (10), 913-930.

Sippel 2017: Sippel, Maike (Hrsg.) (2017): Nachhaltigkeit im industriellen Umfeld. Studentische Fachkonferenz 2016, HTWG Konstanz / HS Ravensburg-Weingarten. Konstanz.

Snajdr 2012: Snajdr, Julia (2012): The production of artificial snow - ecological, social and economical aspects. Studienarbeit, Universität Wien, Wien.

Steiger 2010: Steiger, Robert (2010): Klimawandel und Wintertourismus. GW-Unterricht (117), 2-10.

Steiger 2011: Steiger, Robert (2011): The impact of climate change on the skiing tourism industry in Tyrol (Austria, Italy). Andriotis, Konstantinos; Theocharous, Antonis; Kotsi, Filareti (Hrsg.): Proceedings of the International Conference on Tourism (ICOT 2011), Tourism in an Era of Uncertainty, International Association for Tourism Policy, Cyprus.

Trawöger & Steiger 2012: Trawöger, Lisa; Steiger, Robert (2012): Schnee von gestern? Ökologisches Wirtschaften 27 (3), 27.

Usinger 2015: Usinger, Dennis (2015): Der Einfluss des Klimawandels auf Hotelkonzepte im Sauerland am Beispiel von Winterberg. Bachelorarbeit, Hochschule Mittweida, Mittweida.

Vagle 2016: Vagle, Bernhard Haver (2016): Utilization of surplus heat from snow producing machines. Masterarbeit, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

Valtingoier 2015: Valtingoier, Ingo P. (2015): BioGlizz - Eine biologische Alternative zu Kunstschnee für den weltweiten Einsatz. Innovationsmanufaktur GmbH, München.

Walser 2013: Walser, Andreas (2013): Methoden, Verfahren, Instrumente des Risikomanagements, Risikocontrolling bei Seilbahnunternehmen zur Vermeidung von Ausfällen bei Seilbahnsystemen in einer vergleichenden Betrachtung. Diplomarbeit, Hochschule Mittweida, Mittweida.

Yang & Wan 2010: Yang, Jianming; Wan, Chunyan (2010): Progress in Research on the Impacts of Global Climate Change on Winter Ski Tourism. Advances in Climate Change Research 1 (2), 55-62.

Zweifel et al. 2016: Zweifel, Benjamin; Pielmeier, Christine; Marty, Christoph; Tschel, Frank; Stoffel, Lukas; Ruesch, Marc; Bühler, Yves (2016): Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen. Hydrologisches Jahr 2015/16. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF. Birmensdorf.

## **Bildquellenverzeichnis**

Abbildung 1: Statista (Lizenz: CC-BY ND 2.0)

Abbildung 2: Eigene Aufnahme

Abbildung 3: Bad Kleinkirchheim (Lizenz: CC BY 2.0)

Abbildung 4: Timo Newton-Syms (Lizenz: CC BY 2.0)

Abbildung 5: Statista (Lizenz: CC-BY ND 2.0)

Abbildung 6: Eigene Darstellung

Abbildung 7: DWD / Nationalpark Harz

Abbildung 8: ReKIS / TU Dresden

Abbildung 9: ReKIS / TU Dresden

Abbildung 10: ReKIS / TU Dresden

Abbildung 11: Eigene Darstellung

Abbildung 12: Eigene Darstellung

Abbildung 13: Eigene Darstellung

**Stichwortverzeichnis**

100-Tage-Regel.....	41
Adaption.....	60
Feuchtkugeltemperatur.....	25
Feuchttemperatur.....	25
Hochdruckdüsenteknik.....	20
IPCC.....	52
Klima.....	51
Klimawandel.....	52
Kryotechnik.....	21
Kühlgrenztemperatur.....	25
Lärm.....	34
Lichtverschmutzung.....	35
Luftfeuchtigkeit.....	24
Lufttemperatur.....	24
Mitigation.....	60
Niedrigdruckdüsenteknik.....	20
ReKIS.....	82
REMO.....	54
Schneemanagement.....	60
Schneesicherheit.....	41
SNOMAX.....	23
Tourismus.....	9
Weihnachtsindikator.....	42
Windgeschwindigkeit.....	26

**Anhang A: Ergebnisse der Literaturrecherche**

	Kunstschnee		Beschneigung		Künstlicher Schnee		Technischer Schnee		Schneesicherheit		Links
	Datum	$\Sigma$	Datum	$\Sigma$	Datum	$\Sigma$	Datum	$\Sigma$	Datum	$\Sigma$	$\Sigma$
Open Grey	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	0	0
EconBiz	20.01.	0	20.01.	1	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	1	1
BASE	20.01.	4	20.01.	8	20.01.	4	20.01.	0	20.01.	1	0
Science.gov	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	0	0
Google Scholar	20.01.	70	27.01.	113	20.01.	5	20.01.	17	27.01.	106	0
DOAJ	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	1	20.01.	0	20.01.	0	1
MS Academic Search	20.01.	0	20.01.	2	20.01.	0	20.01.	0	26.01.	2	6
Academia	27.01.	16	27.01.	13	27.01.	0	27.01.	3	27.01.	6	0
Mendeley	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	0	26.01.	0	0
ResearchGate	20.01.	2	20.01.	6	20.01.	0	20.01.	0	26.01.	4	2
arXiv	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	0	26.01.	0	0
SSOAR	20.01.	0	20.01.	1	20.01.	0	20.01.	0	26.01.	1	0
Statista	01.02.	8	01.02.	5	01.02.	0	01.02.	0	01.02.	1	0

*Tabelle 12: Ergebnisse der deutschsprachigen Literaturrecherche.*

	Snow-Making		Snowmaking		Artificial Snow		Technical Snow		Snow Reliability		Links
	Date	$\Sigma$	Date	$\Sigma$	Date	$\Sigma$	Date	$\Sigma$	Date	$\Sigma$	$\Sigma$
Open Grey	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	0	20.01.	0	0
EconBiz	26.01.	2	26.01.	3	26.01.	2	26.01.	1	26.01.	2	0
BASE	26.01.	4	27.01.	21	27.01.	16	27.01.	4	27.01.	7	0
Science.gov	27.01.	0	27.01.	0	27.01.	1	28.01.	0	28.01.	0	0
Google Scholar	03.02.	40	03.02.	100	03.02.	32	03.02.	20	03.02.	66	0
DOAJ	28.01.	1	28.01.	7	28.01.	5	28.01.	2	28.01.	1	0
MS Academic Search	30.01.	0	30.01.	19	30.01.	6	30.01.	2	30.01.	4	1
Academia	03.02.	28	03.02.	29	03.02.	5	01.02.	7	01.02.	36	0
Mendeley	27.01.	3	27.01.	13	27.01.	8	27.01.	2	27.01.	3	1
ResearchGate	30.01.	8	01.02.	62	02.02.	25	28.01.	8	30.01.	13	0
arXiv	27.01.	0	27.01.	1	27.01.	0	27.01.	0	27.01.	0	0
SSOAR	27.01.	0	27.01.	1	27.01.	0	27.01.	1	27.01.	1	0
Statista	01.02.	1	01.02.	1	01.02.	0	01.02.	0	01.02.	0	0

*Tabelle 13: Ergebnisse der englischsprachigen Literaturrecherche.*

**Anhang B: ReKIS-Auswertung zur Saison 2006/2007****Wintersaison 2006 / 2007**Modellparameter

Saisondauer	01.11. - 31.03.
Datenquelle	ReKIS
Messstation	Schierke (51.7656; 10.6536; 609 m)
Maximale Feuchttemperatur	-3°C
Minimale Schneedecke (Abfahrt)	30 cm
Minimale Schneedecke (Langlauf)	10 cm
Maximale Windgeschwindigkeit	11,31 m/s (< 6 Bft)
Maximale Lufttemperatur	10°C (> 2 Tage)
Maximale Regenmenge	20 mm (> 2 Tage)

Auswertungen

Tage	151	100,00%
Beschneigung ist möglich*	8	5,30%
Beschneigung ist unmöglich	143	94,70%
Alpin-Ski möglich (natürlich)	1	0,66%
Alpin-Ski unmöglich (natürlich)	150	99,34%
Ski-Langlauf möglich (natürlich)	12	7,95%
Ski-Langlauf unmöglich (natürlich)	139	92,05%
Tage mit zu starkem Wind	0	0,00%
Perioden zu hoher Temperatur	0	0,00%
Perioden mit zu viel Regenguss	0	0,00%
Mögliche Schneefalltage	15	9,93%
Beschneigung ist nötig und möglich***	8	5,30%

Bewertungen

100-Tage-Regel (01.11.-31.03)	Nicht erfüllt
(zu 50% natürlich eingehalten)	Nein
Beschneigung an > 10 Tagen möglich	Nein
Beschneigung an > 20 Tagen möglich	Nein
Disruptive Perioden (Wind, Regen)	0
Anzahl windbedingter Unterbrechnungen	0
Weihnachtsindikator (22.12.-04.01)	Nicht erfüllt
(zu 50% natürlich eingehalten)	Nein

\* Einflussfaktoren: Feuchttemperatur und Windstärke

\*\* Kalkuliert auf Basis von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit

\*\*\* Einflussfaktoren: Beschneibarkeit und Schneedeckenhöhe

Tag	Monat	Jahr	Lufttemperatur (in °C)	Luftfeuchtigkeit (in %)	Wind (in m/s)	Schneehöhe (in cm)	Niederschlag (in mm)	Feuchttemp. (in °C) ***
01	Nov.	2006	0,7	85	6,7	0	10,6	-0,2
02	Nov.	2006	-1,7	84	4,4	1	0,0	-2,6
03	Nov.	2006	-0,4	81	2,4	0	0,8	-1,5
04	Nov.	2006	3,0	91	2,4	1	15,0	2,5
05	Nov.	2006	6,2	92	6,7	0	5,4	5,8
06	Nov.	2006	7,1	86	4,4	0	0,0	6,2
07	Nov.	2006	5,9	74	2,4	0	0,0	4,1
08	Nov.	2006	6,6	70	4,4	0	19,6	4,4
09	Nov.	2006	4,9	90	6,7	0	5,8	4,3
10	Nov.	2006	2,8	86	2,4	0	0,0	2,0
11	Nov.	2006	3,4	84	4,4	0	20,8	2,4
12	Nov.	2006	2,1	91	4,4	0	7,1	1,6
13	Nov.	2006	4,6	91	4,4	0	11,4	4,1
14	Nov.	2006	8,0	86	2,4	0	3,8	7,1
15	Nov.	2006	9,4	87	2,4	0	0,0	8,6
16	Nov.	2006	11,3	72	2,4	0	0,0	9,0
17	Nov.	2006	9,2	83	2,4	0	5,1	8,1
18	Nov.	2006	6,9	91	2,4	0	0,7	6,4
19	Nov.	2006	3,7	94	2,4	0	6,3	3,4
20	Nov.	2006	2,1	87	4,4	0	6,6	1,3
21	Nov.	2006	4,2	93	2,4	0	6,0	3,8
22	Nov.	2006	1,4	92	2,4	0	0,0	0,9
23	Nov.	2006	4,5	92	4,4	0	23,8	4,1
24	Nov.	2006	6,8	91	4,4	0	3,2	6,3
25	Nov.	2006	8,5	91	4,4	0	0,3	8,1
26	Nov.	2006	6,9	88	2,4	0	0,0	6,2
27	Nov.	2006	5,6	91	2,4	0	0,0	5,1
28	Nov.	2006	6,6	91	2,4	0	0,0	6,1
29	Nov.	2006	6,1	90	4,4	0	0,2	5,5
30	Nov.	2006	0,0	94	0,9	0	0,0	-0,4
01	Dez.	2006	4,8	88	4,4	0	0,0	4,1
02	Dez.	2006	4,5	88	4,4	0	0,2	3,8
03	Dez.	2006	6,1	89	2,4	0	6,4	5,5
04	Dez.	2006	5,1	88	4,4	0	18,9	4,4
05	Dez.	2006	9,3	87	4,4	0	6,2	8,5
06	Dez.	2006	6,5	87	4,4	0	1,0	5,7
07	Dez.	2006	4,4	81	4,4	0	2,9	3,2
08	Dez.	2006	6,6	80	4,4	0	0,8	5,3
09	Dez.	2006	3,8	82	2,4	0	0,8	2,7
10	Dez.	2006	2,2	87	2,4	0	0,3	1,4
11	Dez.	2006	0,9	90	4,4	0	9,7	0,3

Tag	Monat	Jahr	Lufttemperatur (in °C)	Luftfeuchtigkeit (in %)	Wind (in m/s)	Schneehöhe (in cm)	Niederschlag (in mm)	Feuchttemp. (in °C) ***
12	Dez.	2006	2,6	90	2,4	0	5,6	2,0
13	Dez.	2006	3,5	94	4,4	0	1,8	3,2
14	Dez.	2006	4,8	89	4,4	0	0,0	4,2
15	Dez.	2006	5,8	62	2,4	0	0,0	3,1
16	Dez.	2006	4,4	74	6,7	0	3,8	2,7
17	Dez.	2006	0,9	91	2,4	0	5,0	0,4
18	Dez.	2006	0,7	93	0,9	1	0,0	0,3
19	Dez.	2006	0,4	86	2,4	1	0,0	-0,4
20	Dez.	2006	1,3	92	0,9	0	2,1	0,8
21	Dez.	2006	2,8	94	0,9	0	0,0	2,5
22	Dez.	2006	1,4	93	0,9	0	0,0	1,0
23	Dez.	2006	-0,9	96	0,9	0	0,0	-1,2
24	Dez.	2006	-0,8	94	0,9	0	0,0	-1,2
25	Dez.	2006	-0,4	98	0,9	0	0,0	-0,6
26	Dez.	2006	-1,3	90	0,9	0	0,0	-1,9
27	Dez.	2006	-2,4	85	0,9	0	0,0	-3,2
28	Dez.	2006	-1,7	96	2,4	0	8,2	-2,0
29	Dez.	2006	0,7	93	0,9	4	0,2	0,3
30	Dez.	2006	3,1	78	2,4	3	11,7	1,7
31	Dez.	2006	4,8	88	4,4	0	11,4	4,1
01	Jan.	2007	4,3	86	6,7	0	7,9	3,4
02	Jan.	2007	1,1	90	4,4	0	6,8	0,5
03	Jan.	2007	1,8	91	4,4	0	5,5	1,3
04	Jan.	2007	3,4	92	2,4	0	21,1	2,9
05	Jan.	2007	3,7	91	4,4	0	6,5	3,2
06	Jan.	2007	5,5	92	2,4	0	21,8	5,1
07	Jan.	2007	4,4	90	4,4	0	1,5	3,8
08	Jan.	2007	4,3	90	4,4	0	14,7	3,7
09	Jan.	2007	8,4	85	4,4	0	0,8	7,5
10	Jan.	2007	7,5	78	4,4	0	8,8	6,0
11	Jan.	2007	2,3	85	6,7	0	35,0	1,4
12	Jan.	2007	3,9	86	6,7	0	3,3	3,0
13	Jan.	2007	7,4	87	4,4	0	5,5	6,6
14	Jan.	2007	3,3	82	4,4	0	0,0	2,2
15	Jan.	2007	1,0	85	2,4	0	0,0	0,1
16	Jan.	2007	2,4	89	2,4	0	0,0	1,7
17	Jan.	2007	5,1	90	4,4	0	30,7	4,5
18	Jan.	2007	5,6	91	9,4	0	80,7	5,1
19	Jan.	2007	3,8	87	6,7	0	7,3	3,0
20	Jan.	2007	6,4	88	4,4	0	8,7	5,7
21	Jan.	2007	1,4	88	4,4	0	15,9	0,7

Tag	Monat	Jahr	Lufttemperatur (in °C)	Luftfeuchtigkeit (in %)	Wind (in m/s)	Schneehöhe (in cm)	Niederschlag (in mm)	Feuchttemp. (in °C) ***
22	Jan.	2007	-1,6	89	2,4	4	2,5	-2,2
23	Jan.	2007	-7,9	86	0,9	3	0,0	-8,4
24	Jan.	2007	-7,3	87	4,4	3	0,4	-7,8
25	Jan.	2007	-6,7	87	2,4	3	0,1	-7,2
26	Jan.	2007	-7,6	89	4,4	4	8,7	-8,0
27	Jan.	2007	-1,8	88	4,4	15	3,8	-2,5
28	Jan.	2007	0,4	94	4,4	17	18,2	0,0
29	Jan.	2007	1,5	89	6,7	15	3,0	0,8
30	Jan.	2007	2,0	87	4,4	10	1,3	1,2
31	Jan.	2007	2,7	84	6,7	6	2,9	1,7
01	Feb.	2007	2,5	86	2,4	3	3,7	1,7
02	Feb.	2007	4,4	92	2,4	0	1,1	4,0
03	Feb.	2007	2,7	87	6,7	0	3,6	1,9
04	Feb.	2007	1,3	92	0,9	0	0,0	0,8
05	Feb.	2007	-0,3	88	2,4	0	1,8	-1,0
06	Feb.	2007	-2,4	86	0,9	1	0,0	-3,1
07	Feb.	2007	-3,4	90	0,9	1	1,6	-3,9
08	Feb.	2007	-2,2	92	0,9	3	13,1	-2,7
09	Feb.	2007	-0,1	92	2,4	16	6,1	-0,6
10	Feb.	2007	-3,5	95	2,4	20	3,3	-3,8
11	Feb.	2007	0,4	95	2,4	21	10,9	0,1
12	Feb.	2007	3,0	94	2,4	16	21,0	2,7
13	Feb.	2007	2,8	92	4,4	5	19,8	2,3
14	Feb.	2007	1,6	93	0,9	0	8,3	1,2
15	Feb.	2007	1,4	93	4,4	1	1,3	1,0
16	Feb.	2007	0,1	92	0,9	0	0,0	-0,4
17	Feb.	2007	0,4	88	0,9	0	0,0	-0,3
18	Feb.	2007	2,3	85	0,9	0	0,0	1,4
19	Feb.	2007	0,0	79	0,9	0	0,0	-1,2
20	Feb.	2007	1,2	87	2,4	0	0,0	0,4
21	Feb.	2007	2,6	86	2,4	0	6,1	1,8
22	Feb.	2007	3,2	88	2,4	0	0,0	2,5
23	Feb.	2007	2,6	90	0,9	0	0,3	2,0
24	Feb.	2007	4,2	87	2,4	0	3,1	3,4
25	Feb.	2007	4,1	92	2,4	0	10,8	3,7
26	Feb.	2007	2,5	93	2,4	0	10,1	2,1
27	Feb.	2007	0,7	91	4,4	1	15,0	0,2
28	Feb.	2007	4,7	88	4,4	0	18,7	4,0
01	Mrz.	2007	3,9	89	2,4	0	18,6	3,2
02	Mrz.	2007	1,3	90	2,4	0	7,8	0,7
03	Mrz.	2007	0,6	95	0,9	1	13,9	0,3

Tag	Monat	Jahr	Lufttemperatur (in °C)	Luftfeuchtigkeit (in %)	Wind (in m/s)	Schneehöhe (in cm)	Niederschlag (in mm)	Feuchttemp. (in °C) ***
04	Mrz.	2007	1,5	93	0,9	2	0,8	1,1
05	Mrz.	2007	2,7	88	0,9	0	4,1	2,0
06	Mrz.	2007	4,8	79	2,4	0	9,5	3,4
07	Mrz.	2007	4,6	89	0,9	0	0,4	4,0
08	Mrz.	2007	2,6	90	2,4	0	0,0	2,0
09	Mrz.	2007	3,3	84	2,4	0	2,7	2,3
10	Mrz.	2007	2,3	81	0,9	0	0,0	1,1
11	Mrz.	2007	5,2	78	0,9	0	0,0	3,7
12	Mrz.	2007	5,6	78	0,9	0	0,0	4,1
13	Mrz.	2007	7,3	78	0,9	0	0,0	5,8
14	Mrz.	2007	3,5	72	0,9	0	0,0	1,7
15	Mrz.	2007	2,8	83	0,9	0	0,0	1,8
16	Mrz.	2007	4,0	80	0,9	0	1,7	2,7
17	Mrz.	2007	4,8	90	2,4	0	14,9	4,2
18	Mrz.	2007	2,9	88	4,4	0	17,8	2,2
19	Mrz.	2007	-0,6	80	2,4	1	0,3	-1,7
20	Mrz.	2007	0,1	84	0,9	0	2,1	-0,8
21	Mrz.	2007	-1,1	92	0,9	0	20,9	-1,6
22	Mrz.	2007	-0,4	98	0,9	22	30,9	-0,6
23	Mrz.	2007	0,3	96	0,9	34	17,3	0,0
24	Mrz.	2007	3,8	85	2,4	24	0,0	2,9
25	Mrz.	2007	4,5	74	2,4	15	0,0	2,8
26	Mrz.	2007	4,1	73	2,4	8	0,0	2,3
27	Mrz.	2007	3,7	72	0,9	3	0,0	1,9
28	Mrz.	2007	4,6	72	2,4	0	0,0	2,7
29	Mrz.	2007	4,0	76	0,9	0	0,0	2,4
30	Mrz.	2007	4,1	86	0,9	0	5,5	3,2
31	Mrz.	2007	6,0	71	2,4	0	0,0	4,0

**Anhang C: Detailergebnisse der Standortanalyse**

1950er	Tage mit mindestens 10 cm Naturschnee	Tage mit mindestens 30 cm Naturschnee	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
1950/51	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
1951/52	97	65	34	40	0
1952/53	123	107	48	62	0
1953/54	87	57	24	43	0
1954/55	98	55	39	67	0
1955/56	85	57	46	59	0
1956/57	54	7	20	33	1
1957/58	106	68	45	60	0
1958/59	60	20	30	34	0
1959/60	49	14	28	39	0
Mittel	84	50	35	49	Summe: 1

*Tabelle 14: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 1950er.*

1960er	Tage mit mindestens 10 cm Naturschnee	Tage mit mindestens 30 cm Naturschnee	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
1960/61	87	58	40	23	1
1961/62	100	45	52	61	0
1962/63	122	107	68	84	0
1963/64	87	18	40	68	0
1964/65	101	78	65	59	0
1965/66	118	99	66	48	0
1966/67	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
1967/68	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
1968/69	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
1969/70	124	117	n.b.	n.b.	n.b.
Mittel	106	75	55	57	Summe: 1

*Tabelle 15: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 1960er.*

1970er	Tage mit mindestens 10 cm Naturschnee	Tage mit mindestens 30 cm Naturschnee	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
1970/71	53	17	n.b.	n.b.	n.b.
1971/72	67	8	n.b.	n.b.	n.b.
1972/73	72	11	n.b.	n.b.	n.b.
1973/74	104	55	n.b.	n.b.	n.b.
1974/75	49	19	n.b.	n.b.	n.b.
1975/76	99	37	56	50	1
1976/77	78	19	50	40	0
1977/78	131	100	65	43	0
1978/79	102	90	76	73	0
1979/80	110	84	57	46	1
Mittel	87	44	61	50	Summe: 2

Tabelle 16: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 1970er.

1980er	Tage mit mindestens 10 cm Naturschnee	Tage mit mindestens 30 cm Naturschnee	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
1980/81	116	83	78	61	1
1981/82	97	57	81	53	0
1982/83	79	32	44	37	0
1983/84	117	83	71	59	1
1984/85	80	51	66	60	0
1985/86	109	89	84	71	0
1986/87	106	102	70	70	1
1987/88	57	48	52	31	0
1988/89	25	0	23	14	0
1989/90	26	9	25	20	1
Mittel	81	55	59	48	Summe: 4

Tabelle 17: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 1980er.

1990er	Tage mit mindestens 10 cm Naturschnee	Tage mit mindestens 30 cm Naturschnee	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
1990/91	61	24	41	46	0
1991/92	39	8	n.b.	n.b.	n.b.
1992/93	72	36	38	42	0
1993/94	106	29	53	31	1
1994/95	66	29	49	27	2
1995/96	100	43	79	87	0
1996/97	99	37	52	41	0
1997/98	44	14	40	31	1
1998/99	77	29	54	40	0
1999/00	78	10	50	28	0
Mittel	74	26	51	41	Summe: 4

Tabelle 18: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 1990er.

2000er	Tage mit mindestens 10 cm Naturschnee	Tage mit mindestens 30 cm Naturschnee	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
2000/01	55	2	45	40	0
2001/02	57	39	44	35	0
2002/03	47	23	39	51	0
2003/04	81	39	55	46	0
2004/05	85	63	54	47	0
2005/06	115	97	63	70	0
2006/07	12	1	15	8	0
2007/08	37	10	25	22	1
2008/09	104	33	41	41	0
2009/10	107	83	50	59	0
Mittel	70	39	43	42	Summe: 1

Tabelle 19: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 2000er.

2010er	Tage mit mindestens 10 cm Naturschnee	Tage mit mindestens 30 cm Naturschnee	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
2010/11	75	46	50	63	0
2011/12	77	37	24	21	0
2012/13	91	41	65	67	0
2013/14	15	0	15	10	0
2014/15	69	33	32	24	1
2015/16	28	6	27	21	1
2016/17	52	37	23	31	0
Mittel	58	29	34	34	Summe: 2

Tabelle 20: Detailergebnisse der ReKIS-Standortanalyse für die 2010er.

2010er	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
2017/18	32	12	0
2018/19	34	21	0
2019/20	44	39	0
Mittel	39	30	Summe: 0

Tabelle 21: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2010er.

2020er	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
2020/21	36	26	0
2021/22	37	31	1
2022/23	29	18	0
2023/24	58	45	0
2024/25	21	15	0
2025/26	25	17	0
2026/27	34	28	0
2027/28	31	23	0
2028/29	47	45	0
2029/30	27	14	0
Mittel	35	26	Summe: 1

Tabelle 22: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2020er.

2030er	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
2030/31	10	10	0
2031/32	26	10	0
2032/33	33	19	0
2033/34	50	44	0
2034/35	53	30	0
2035/36	27	31	0
2036/37	28	15	1
2037/38	44	41	0
2038/39	16	5	0
2039/40	18	5	0
Mittel	31	21	Summe: 1

Tabelle 23: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2030er.

2040er	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
2040/41	24	18	2
2041/42	16	6	0
2042/43	23	5	0
2043/44	20	4	1
2044/45	18	6	0
2045/46	46	33	0
2046/47	41	28	1
2047/48	15	7	1
2048/49	38	18	0
2049/50	35	26	0
Mittel	28	15	Summe: 5

Tabelle 24: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2040er.

2050er	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
2050/51	35	15	0
2051/52	25	23	0
2052/53	21	17	0
2053/54	13	7	1
2054/55	23	18	2
2055/56	26	29	0
2056/57	32	31	0
2057/58	12	18	0
2058/59	7	2	0
2059/60	5	0	0
Mittel	20	16	Summe: 3

Tabelle 25: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2050er.

2060er	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
2060/61	17	7	0
2061/62	18	19	0
2062/63	27	30	0
2063/64	32	28	1
2064/65	28	4	0
2065/66	28	14	0
2066/67	11	5	1
2067/68	15	8	0
2068/69	17	7	0
2069/70	13	6	0
Mittel	21	13	Summe: 2

Tabelle 26: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2060er.

2070er	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
2070/71	32	24	1
2071/72	32	19	0
2072/73	30	29	1
2073/74	11	10	2
2074/75	5	2	1
2075/76	15	12	0
2076/77	26	10	0
2077/78	16	10	1
2078/79	14	3	0
2079/80	9	8	0
Mittel	19	13	Summe: 6

Tabelle 27: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2070er.

2080er	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
2080/81	10	8	0
2081/82	14	3	0
2082/83	28	10	0
2083/84	4	5	0
2084/85	0	0	0
2085/86	17	7	0
2086/87	7	6	0
2087/88	4	1	0
2088/89	6	1	0
2089/90	1	0	0
Mittel	9	4	Summe: 0

Tabelle 28: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2080er.

2090er	Tage mit natürlichem Schneefall	Tage, an denen eine Beschneigung möglich wäre	Disruptive Perioden pro Saison
2090/91	5	3	0
2091/92	16	3	0
2092/93	5	1	0
2093/94	14	7	0
2094/95	22	18	0
2095/96	23	10	1
2096/97	5	1	0
2097/98	8	6	0
2098/99	28	30	0
2099/00	6	3	1
Mittel	13	8	Summe: 2

Tabelle 29: Detailergebnisse der REMO-Standortprognose für die 2090er.

**Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Thema „Die Zukunft der künstlichen Beschneidung in Mitteleuropa: Konzeptionierung eines Decision Support Systems“ ohne fremde Hilfe erstellt habe. Alle verwendeten Quellen wurden angegeben. Ich versichere, dass ich bisher keine Studien- oder Prüfungsarbeit mit gleichem oder ähnlichem Thema an der FernUniversität oder an einer anderen Hochschule eingereicht habe.

Wernigerode, den 26.06.2019

**Christian Reinboth**