Schneelast.Reform

Endbericht – Version Frühjahr 2023

Michael Winkler[1,*], Harald Schellander[1]

Ulrich Hübner[2,**]

unter Mitarbeit von

Alexander Radlherr[1], Susanne Drechsel[1]

[1] GeoSphere Austria, Regionalstelle Tirol und Vorarlberg, Fürstenweg 180, 6020 Innsbruck. *michael.winkler@geosphere.at
[2] Fachverband der Holzindustrie Österreichs, Wirtschaftskammer Österreich, Schwarzenbergplatz 4, 1045 Wien. **huebner@holzindustrie.at

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur Version Frühjahr 2023 **2**

1 Zusammenfassung **3**

2 Einleitung **4**

3 Motivation **4**

3.1 Das Projekt ***Schneelast.Reform*** 5

4 Datengrundlage **6**

4.1 Datenquellen 6

4.2 Anforderungen 6

4.3 Datenbearbeitung 7

4.4 Bemerkungen zur Qualität der Schneedaten 10

4.5 Eigenschaften der Schneedaten 10

5 Methode **12**

5.1 Schneehöhe → Schneelast 12

5.2 Extremwerte an den Messorten 15

5.3 Flächenhafte Extremwerte 16

5.4 Untersuchungen zur Genauigkeit 17

6 Ergebnisse **20**

6.1 Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts ***Schneelast.Reform*** 22

6.2 Kartendarstellungen 23

7 Diskussion **23**

8 Ausblick **29**

9 Danksagung **29**

10 Literaturverzeichnis **29**

Vorwort zur Version Frühjahr 2023

Der Endbericht zum Projekt ***Schneelast.Reform*** wurde ursprünglich Ende 2020 erstellt. Er war nicht öffentlich zugänglich. Zum Jahreswechsel 2022/23 sprachen drei Gründe für eine grundlegende Neubearbeitung und Veröffentlichung des Endberichts:

- Nach Inkrafttreten der ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) im Mai 2022, die zu einem wesentlichen Teil auf den Ergebnissen von ***Schneelast.Reform*** beruht, waren manche Formulierungen im ursprünglichen Endbericht missverständlich und nicht mehr aktuell.
- Seitens der Anwender·innen stieg das Interesse an Hintergrundinformationen nach Mai 2022 deutlich.
- Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), die im Projekt für die inhaltliche Arbeit verantwortlich war, fusionierte am 01.01.2023 mit der Geologischen Bundesanstalt (GBA) zur *GeoSphere Austria*.

Der vorliegende, finale Endbericht **– Version Frühjahr 2023 –** wurde durch diese drei Umstände motiviert. Er ist deutlich umfassender als der Bericht von 2020 und nimmt Bezug auf die aktuell gültige österreichische Schneelastnorm ÖNORM B 1991-1-3:2022-05.

M. Winkler
Innsbruck, Mai 2023

1. Zusammenfassung

Schneelast.Reform war ein 2019 und 2020 laufendes Projekt zur Erneuerung der **Schneelastkarte** (siehe unten) für Österreich. Es wurde durch die Zusammenarbeit von Vertretern der Bauindustrie – allen voran dem Wirtschaftskammer-Fachverband der Holzindustrie – und der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG; heute GeoSphere Austria) in der **Arbeitsgruppe 176 09 des Austrian Standards International** motiviert.

Die AG 176 09 beschäftigt sich mit der ÖNORM B 1991-1-3, der österreichischen **Schneelastnorm**, welche in entscheidendem Ausmaß auf der o.g. Schneelastkarte basiert. Bis Mai 2022 handelte es sich dabei um eine Zonenkarte, die es zusammen mit einer Berechnungsvorschrift erlaubte, für jeden Ort in Österreich unterhalb von 1500 m Seehöhe einen normativen Wert für die **charakteristische Schneelast** s_k zu bestimmen. s_k bildet die Grundlage der Bemessung von Gebäuden hinsichtlich der Schneelast.

Während der Überarbeitungen zur ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018), die nur geringfügiger Natur waren, wurde festgestellt, dass sich auch die Grundlage der Norm, also die Schneelastkarte, verbessern ließe; und zwar durch

- die Berücksichtigung von aktuellen Schneedaten,
- die Anwendung eines Schneemodells und zeitgemäßer extremwertstatistischer Methoden sowie
- eine möglichst objektive und nachvollziehbare Herangehensweise, inklusive Genauigkeitsanalysen und Veröffentlichungen von Hintergrundinformationen.

Obige Punkte steckten die Methodik von ***Schneelast.Reform*** ab. Die wichtigsten Resultate des Projekts sind

- ein qualitätsgeprüfter Schneedatensatz von 897 Messstationen,
- ein spezielles Schneemodell namens ΔSNOW,
- eine neue Strategie bzw. „Methodenabfolge“ zur Erstellung einer modernen Schneelastkarte und
- eine aktualisierte Schneelastkarte für Österreich, die nicht auf Zonen, sondern auf einem kontinuierlichen 50 $\times$ 50 m Raster beruht.

In der Folge wurde die neu entwickelte Schneelastkarte als Grundlage für die im Mai 2022 veröffentlichte **ÖNORM B 1991-1-3:2022-05** (ASI, 2022) herangezogen. Sie steht unter https://hora.gv.at **online** zur Verfügung.

2. Einleitung

Im Mai 2022 wurde die **ÖNORM B 1991-1-3:2022-05** (ASI, 2022) veröffentlicht. Sie und ihre Vorgängernormen werden häufig als (österreichische) **Schneelastnormen** bezeichnet. Der wichtigste Bestandteil dieser Schneelastnormen sind die sogenannte **Schneelastkarten**. Sie regeln in entscheidendem Maße welche Schneelast als Bemessungsgrundlage für Bauten in Österreich anzunehmen ist (z. B. ON, 1960, 1983, 2006). Während der Arbeiten zur ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018) wurde festgestellt, dass es möglicherweise modernere und transparentere Methoden gäbe, eine Schneelastkarte für Österreich zu erstellen und es wurde entschieden, ein entsprechendes Forschungs- und Entwicklungsprojekt zu initiieren. Die Ergebnisse dieses Projekts mit dem Namen ***Schneelast.Reform*** und deren Einbindung in die **ÖNORM B 1991-1-3:2022-05** (ASI, 2022) werden infolge präsentiert und erläutert.

Seit 2006 umfassen die österreichischen Schneelastnormen die „nationalen Festlegungen" Österreichs zum „Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten ÖNORM EN 1991-1-3"[1]. Im Kern legen sie die **charakteristische Schneelast am Boden** (s_k) fest. Dies ist der Wert der Schneelast, der an einem bestimmten Ort mit einer Wahrscheinlichkeit von 2 % ein- oder mehrmals pro Jahr erreicht oder überschritten wird. Man spricht von der **50-jährlichen Schneelast**, weil dieser Wert durchschnittlich[2] einmal in 50 Jahren erreicht oder überschritten wird. Die Schneelastkarten älterer Normen wiesen noch sogenannte **Schneelastzonen** aus; z. B. bei der ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018) ist Österreich in vier Schneelastzonen eingeteilt. Innerhalb derer konnte anhand einer Formel s_k für jede Seehöhe unter 1500 m berechnet werden. Über 1500 m wurde ein **Schneelastgutachten** benötigt, außer es handelte sich um einen von fünf Orten mit Sonderregelung (ASI, 2018).

Die Werte für s_k wurden zuletzt in den Jahren vor 2006 überarbeitet. Davor waren die Werte der ÖNORM B 4013 (ON, 1983) aus dem Jahr 1983 gültig[3]. Jedoch auch die Überarbeitung von 2006 (ON, 2006) deutet nicht darauf hin, dass in umfangreicher Weise neue Daten und Methoden verwendet wurden. Hauptsächlich ging es damals um die erstmalige Anpassung an den europäischen Standard **Eurocode** und dessen quadratische Berechnungsvorschrift: $s_\mathrm{k} = (0.642 \cdot Z + 0.009) \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{728}\right)^2\right]$, wobei Z den dimensionslosen Rechenwert je nach Schneelastzone und A die Seehöhe des Standorts in Meter darstellt (ON, 2006). Eine web-basierte Version der Zonenkarte war von 2018 bis 2022 (Gültigkeitszeitraum der ÖNORM B 1991-1-3:2018-12) auf https://hora.gv.at zu finden. Per Mausklick erhielt man s_k für jeden Standort in Österreich. Ungeachtet dieser modernen Abfragemöglichkeiten und obwohl die österreichische Schneelastnorm im internationalen Vergleich auch damals schon zu den Besten gehörte, gab es Ende der 2010er-Jahre gute Gründe für eine Überarbeitung der Bemessungsgrundlage s_k. Das Projekt ***Schneelast.Reform*** wurde dadurch motiviert.

3. Motivation

Die Festlegung der charakteristischen Schneelast s_k in der ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018) musste (Stand 2018/19) aus folgenden drei Gründen als verbesserungswürdig bezeichnet werden:

- Die **Datengrundlage** der ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 ist **veraltet**. Die zugrundeliegenden Aufzeichnungen der Schneehöhen enden meist in den 1980ern. Die aktuellsten Jahrzehnte fehlen, weshalb ein möglicher, bereits stattgefundener, klimawandelbedingter Trend nicht abgebildet wird.
- Es gab und gibt keine systematischen Messungen zur **Masse des Schnees** – respektive zum Schneewasserwert (SWE) oder zur Schneelast (SL)[4] – in Österreich. Um Bemessungswerte für die Schneelast abschätzen zu können, muss daher von Schneehöhenmessungen ausgegangen werden und eine Annahme für die Dichte des Schnees getroffen werden. Es ist unklar, wie das für

[1] Aktuelle Fassung im Mai 2023: CEN (2016).

[2] Mit „durchschnittlich" ist hier der Median einer - im Idealfall unendlich - großen Zahl von Samples aus der zugrundeliegenden Verteilung gemeint.

[3] Zwischenzeitliche Novellierungen haben nicht die Bemessungswerte s_k an sich betroffen. Einen Überblick über die Entwicklung der österreichischen Schneelastnormen findet man in Winkler u. a. (2020).

[4] Die Masse des Schnees wird, je nach Anwendungsgebiet, als „Schneewasserwert" (engl.: snow water equivalent, abgekürzt SWE, Einheit: kg/m^2) oder als „Schneelast" (abgekürzt SL, Einheit: N/m^2) dargestellt. Beide sind miteinander durch die Erdbeschleunigung $g \approx 9.81$ m/s^2 verbunden und mit der Schneehöhe HS durch die Dichte des Schnees ρ verknüpft: $SL = SWE \cdot g = HS \cdot \rho \cdot g$.

die ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 und ihre Vorgängerinnen gemacht wurde. Vermutlich wurde eine **konstante Schneedichte** verwendet.

- Um das 50-jährliche Ereignis s_k zu bestimmen, müssen die Schneedaten extremwertstatistisch ausgewertet werden. Höchstwahrscheinlich wurde für die ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 die Gumbelverteilung an die Jahreshöchstwerte angepasst. Das entspricht nicht mehr dem Stand der Technik (siehe z. B. SCHELLANDER & HELL, 2018). Außerdem müssen die an den einzelnen Standorten mit Messwerten berechneten Extremwerte für eine Kartendarstellung in die Fläche extrapoliert werden. Dies geschah für die ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 manuell und ist somit nicht reproduzierbar. Zwar steckt in der anschließend durchgeführten Zonierung viel meteorologisches Fachwissen, jedoch ist sie **nicht objektiv nachvollziehbar**. Zudem ist die Sinnhaftigkeit einer Zonierung bei der grundsätzlich kontinuierlichen Größe s_k ebenso zu hinterfragen, wie das Seehöhenlimit von 1500 m, ab dem ein Gutachten nötig ist und welches wahrscheinlich nur nach subjektiven Maßstäben gewählt wurde.

Alle drei oben genannten Restriktionen waren (Stand 2018/19) lösbar; es galt folgendes:

- Soweit es die Schneehöhen betrifft, ist die **Datenlage** in Österreich als ausgezeichnet zu bezeichnen. Sie ist vermutlich eine der besten weltweit. Es stehen hunderte langjährige Messreihen zur Verfügung, in Teilen mit modernen Methoden qualitätsgeprüft und homogenisiert. Darüber hinaus bestehen solche Daten auch im nahen Ausland und können miteinbezogen werden, um Unsicherheiten an den Landesgrenzen zu minimieren. Nicht zuletzt aufgrund des Klimawandels ist es sinnvoll, die Datengrundlage zumindest möglichst **aktuell** zu halten, wenn es schon kaum möglich ist, die zukünftige Entwicklung von Schneelastextrema abzubilden (siehe hierzu Abschnitt 7).

- Weiterhin gibt es keine systematische, flächendeckende Messung des Schneewasserwerts in Österreich. SWE-Messungen sind in Anzahl, Länge und Kontinuität bei weitem nicht vergleichbar mit Messungen der Schneehöhe (HS). Aufgrund dieses Mangels an regelmäßigen SWE-Messungen ist es unverändert sinnvoll, die gute Datenlage hinsichtlich der Schneehöhe zu nutzen, obwohl eine Dichteannahme getroffen werden muss, und nicht die wenigen SWE-Messungen direkt extremwertstatistisch auszuwerten. Für die Transformation von HS zu SWE bzw. für den Umgang mit der **Schneedichte** stehen **moderne Methoden** bereit, die über die Annahme einer konstanten Dichte weit hinausgehen[5]. (Diese Methoden konnten im Rahmen des Projekts ***Schneelast.Reform*** noch bedeutend verbessert werden; siehe Abschnitt 5.)

- Aktuelle mathematische Methoden ermöglichen die **Extrapolation von Extrema** in die Fläche auf eine reproduzierbare Weise. Einschränkungen aufgrund der Verwendung der Gumbelverteilung und der Notwendigkeit zur Zonierung können vermieden werden. (Auch diese Methoden konnten im Rahmen des Projekts ***Schneelast.Reform*** verfeinert und die speziellen Anforderungen einer Norm konnten berücksichtigt werden; siehe Abschnitt 5.)

3.1. Das Projekt *Schneelast.Reform*

Das Projekt ***Schneelast.Reform*** wurde durch das oben Beschriebene motiviert und entstand aus der langjährigen Zusammenarbeit in der Arbeitsgruppe „ON-AG 176 09 – Schneelasten“ zur ÖNORM B 1991-1-3 zwischen Dipl.-Ing. Dr.techn. Ulrich Hübner (Fachverband der Holzindustrie Österreichs) und Dr. Michael Winkler (ZAMG – Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik; seit 1.1.2023: GeoSphere Austria). Es wurde im Sommer 2018 bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) in der Förderschiene „Collective Research“ zur Förderung von kooperativen Forschungsprojekten eingereicht und am 10.12.2018 genehmigt (FFG Projektnummern 870909 und 879303; https://projekte.ffg.at/projekt/3170959). Die Projektdauer wurde mit 24 Monaten, (rückwirkend) von 1.11.2018 bis 31.10.2020, festgesetzt. Ein späterer Antrag auf Verlängerung bis 31.12.2020 wurde bewilligt.

Die Projektleitung erfolgte durch den **Fachverband der Holzindustrie Österreichs**. Ein Großteil (ca. 90 %) der inhaltlichen Leistungen wurde durch den größten Auftragnehmer, die **ZAMG**, erbracht, die auch wesentlich an der Projektplanung und -administrierung beteiligt war. Die Projektkosten beliefen

[5] Nicht zuletzt die in Zusammenarbeit mit der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG; seit 1.1.2023: GeoSphere Austria) entwickelten Methoden von GRUBER (2014) und GRUBER u. a. (2018).

sich auf ca. **150.000 €**, wovon 60 % von der **FFG gefördert** wurden. Wirtschaftskammer-Institutionen – allen voran der Fachverband der Holzindustrie Österreichs, außerdem: Fertighausverband Österreichs und Bundesinnung Holzbau – beteiligten sich an den verbleibenden Kosten ebenso wie der Verband der Versicherungsunternehmen Österreichs. Damit trugen Verbände aus der Bauwirtschaft und der Versicherungswirtschaft jeweils einen ausgewogenen Anteil der Differenz zwischen den Projektgesamtkosten und der FFG-Förderung. Dies sollte die breite Akzeptanz der Forschungsergebnisse sicherstellen.

4. Datengrundlage

Die markante Diskrepanz in Länge, Regelmäßigkeit und Verfügbarkeit zwischen Schneelast- bzw. Schneewasserwert-Messungen einerseits und Schneehöhen-Messungen andererseits rechtfertigt, wie erwähnt, auch heute noch den „Umweg“ über die Schneehöhenmessungen bei der Bemessung der charakteristischen Schneelast s_{k}.

4.1. Datenquellen

Im Rahmen von ***Schneelast.Reform*** konnten insgesamt 2713 Messreihen der Schneehöhe aus dem Zeitraum zwischen 6.1.1890 und 24.1.2020 analysiert werden. Es handelt sich um **tägliche Messungen der gesamten Schneehöhe** (HS), manuell mithilfe eines Zollstocks oder Meterstabs von geschulten Beobachtern und Beobachterinnen durchgeführt. Die Messorte dürfen für diese Art der Messung als geeignet angesehen werden: (a) repräsentativ für die Lokalität, (b) offen und eben, (c) nicht oder kaum vom Wind beeinflusst. Die meisten Messorte befinden sich in **Österreich** und wurden/werden von den Hydrographischen Diensten der Bundesländer oder der ZAMG/GeoSphere Austria betrieben. Der Zugriff auf diese Daten für ***Schneelast.Reform*** war uneingeschränkt. Einige Messorte befinden sich im grenznahen Ausland, innerhalb von etwa 50 km um Österreich. Für die **Schweiz und Liechtenstein** stehen diese Daten frei zum Download zur Verfügung (MeteoSchweiz, Institut für Schnee- und Lawinenforschung; https://opendata.swiss), ebenso für die deutschen Bundesländer **Bayern und Baden-Württemberg** (Deutscher Wetterdienst; https://cdc.dwd.de/portal). Des weiteren konnten Daten aus den angrenzenden italienischen Regionen **Trentino-Südtirol** (Provinz Südtirol; Amt für Meteorologie und Lawinenwarnung), **Venetien** (Provinz Belluno; ARPA Veneto) und **Friaul-Julisch Venetien** (ARPA Friuli Venezia Giulia) sowie aus **Slowenien** (Agencija Republike Slovenije za okolje) von den lokalen Behörden beschafft werden. Aus Tschechien, der Slowakei und Ungarn standen für ***Schneelast.Reform*** keine Schneedaten zur Verfügung[6].

4.2. Anforderungen

Damit keine Probleme mit dem kalendarischen Jahreswechsel, der typischerweise mitten in eine Wintersaison fällt, entstehen, wurden die Jahre für ***Schneelast.Reform*** jeweils von **1.8. bis 31.7.** definiert. Damit beginnt auch an sehr hochgelegenen Stationen das Jahr mit $HS = 0$. Um den Qualitätsansprüchen des ***Schneelast.Reform***-Projekts gerecht zu werden, wurden die folgenden Anforderungen an die Daten gestellt:

- Für die Berechnung von extremen Ereignissen sind die Längen der Datenreihen ein entscheidender Faktor. Häufig wird empfohlen, zumindest ein Drittel der gewünschten Jährlichkeit an Daten zur Verfügung zu haben. Im Falle des 50-jährlichen Ereignisses entspräche dies einer minimalen Länge der Datenreihe von 17 Jahren. Aufgrund der sehr guten Datenlage konnte für ***Schneelast.Reform*** die deutlich großzügigere Verfügbarkeit von **mindestens 30 Jahren** gefordert werden, wobei diese nicht zusammenhängend vorhanden sein müssen.

[6] Im Falle dieser drei Nachbarländer sprengte der bürokratische, administrative und/oder monetäre Aufwand, Schneedaten in ausreichender Güte zu bekommen, den Rahmen des Projekts. Die Grenzbereiche zu Ungarn und zu Tschechien (westlich von Gmünd) konnten durch das sehr dichte Stationsnetz im Burgenland und in Oberösterreich sowie Bayern gut abgedeckt werden. Für die Grenzbereiche zur Slowakei und zu Tschechien (etwa zwischen Gmünd und Gänserndorf) musste eine etwas höhere Genauigkeitseinbuße akzeptiert werden, da die Datenlage in Niederösterreich vergleichsweise spärlich ist (vgl. Abbildung 2).

- Für extremwertstatistische Auswertungen sind Trends in den Datenreihen weitestgehend auszuschließen. Die Frage nach (klimatischen) Trends in den verwendeten Datenreihen konnte im Rahmen von ***Schneelast.Reform*** nicht geklärt werden (vergleiche hierzu Abschnitt 7). Damit mögliche Trends in den Datenreihen zumindest jeweils in ähnlicher Weise vorhanden sind, wurde der Zeitraum der Daten auf **1.8.1960 bis 31.7.2019** beschränkt[7]. Für jeden Messort stehen damit mindestens 30 und höchstens 59 Winter zur Verfügung.
- Um möglichst **aktuelle Daten** zu verwenden, wurde festgelegt, dass das jüngste Datenjahr aus einer Messreihe **zumindest bis 31.7.2009** reichen muss. Es wurden damit keine Datenreihen verwendet, die mehr als 10 Jahre vor den aktuellsten Daten enden. Ein möglicherweise bereits stattgefundener Einfluss des Klimawandels auf die Schneelastextrema wurde so bestmöglich berücksichtigt (vgl. Abschnitt 7).
- Damit es zu **keinen falschen, lokalen Gewichtungen** kommt, wurde im Falle des Vorhandenseins mehrerer Messreihen am selben Standort entweder nur die hochwertigste gewählt und die anderen verworfen oder es wurde aus mehreren Datenreihen eine zusammengesetzte produziert. Als „selber Standort“ wurden (a) gleichnamige Stationen gewertet sowie (b) Stationen innerhalb 0.1 Grad geographischer Breite oder Länge (ca. 8 bis 14 km) und mit Seehöhenunterschieden von weniger als 100 m, auch wenn sich ihre Ortsbezeichnung unterscheidet. Wenn für einen bestimmten Zeitraum Werte von mehr als einer Station „am selben Standort“ vorhanden waren, wurden (falls vorhanden) die ZAMG-Stationen auf Kosten von Stationen anderer Provider bevorzugt. Falls sich keine oder mehr als eine ZAMG-Station unter den eng benachbarten befanden, wurde die neueste Station behalten, die ältere(n) verworfen.

Es folgte eine aufwendige, teils quasi-manuelle **Vorauswahl** unter Zuhilfenahme der Programmiersprache R (R Core Team, 2019). Knapp 1200 Stationen wurden o.g. Anforderungen grundsätzlich gerecht. Infolge wurden (ebenfalls mit R) mehrere Schritte zur Datenbearbeitung durchgeführt, im Zuge derer manche weitere Datenreihe bzw. einzelne Jahre eliminiert werden mussten (siehe nächster Unterabschnitt).

4.3. Datenbearbeitung

Damit die in Abschnitt 5 beschriebene Modellierung der SWE-Reihen erfolgen kann, dürfen die Datenreihen **keine Fehlwerte** enthalten – und sie sollten natürlich auch **keine fehlerhaften Werte** enthalten. Um diesen Zustand zu erreichen, wurden diverse Qualitätskontrollen und Korrekturen durchgeführt sowie Datenlücken geschlossen.

4.3.1 Qualitätskontrollen

Häufig wurde für „Messung, aber kein Schnee“ der Wert $HS = -1$ archiviert. Für den ***Schneelast.Reform***-Datensatz wurden diese Werte auf $HS = 0$ gesetzt. Werte, codiert mit 9000, 999, 899 usw., sowie weitere negative Werte wurden auf „NA“ (not available) gesetzt, ebenso Werte von $HS > 2000$ cm. **Suspekte seehöhenabhängige Schneehöhen** wurden entsprechend Tabelle 1 detektiert und im Anschluss einzeln geprüft.

Seehöhe bis [m]	200	400	600	800	1000	1500	2000	3000	4000
Schneehöhe suspekt ab [cm]	50	75	100	150	200	250	500	700	1000

Tabelle 1: Seehöhenabhängige Definition suspekter Schneehöhen.

4.3.2 Korrekturen

Über die seehöhenabhängige Plausibilitätsprüfung (Tabelle 1) hinaus wurden bei 65 Stationen bestimmte Zeiträume auf „NA“ gesetzt oder manuell korrigiert, z. B. im Fall von offensichtlichen „10er-Fehlern“, wenn etwa 50 cm statt 5 cm angegeben worden sind.

[7] Ab 1961 steht außerdem SNOWGRID-CL zur Korrektur zur Verfügung, siehe Unterabschnitt 4.3.

Bei der seehöhenabhängigen Prüfung konnten außerdem Zeiträume detektiert werden, in denen unrealistische Zuwächse von HS aus der **Addition der täglichen Neuschneehöhen** (HN) stammen[8]. Das Ende solcher Perioden, die typischerweise ausgesprochen schneereich sind, und der Übergang zur ordnungsgemäßen HS-Messung sind ihrerseits durch eine unrealistisch hohe, aber leicht zu erkennende „Setzung“ gekennzeichnet. In diesen Fällen erfolgte zunächst eine Neueinschätzung der tatsächlichen Setzung mithilfe von Daten benachbarter Stationen und danach eine Skalierung der betroffenen HS-Werte.

4.3.3 Lückenschluss

Eine wesentliche Bedingung für die Anwendung des in Abschnitt 5 beschriebenen Schneemodells sind lückenlose Schneehöhenreihen. Viele der verwendeten Schneedaten weisen mehr oder weniger große Lücken auf.

Als eines der größten Probleme stellten sich „versteckte Lücken“ heraus. Während dieser Perioden enthielten die Datenreihen „0“-Werte, die aperen Boden suggerieren, obwohl tatsächlich nicht gemessen wurde und definitionsgemäß „NA“ notiert hätte werden sollen. Bis zu 30 solcher aufeinanderfolgender, scheinbar schneefreier Tage mit „0“-Werten wurden dann als tatsächliche Fehlwerte identifiziert, wenn davor und danach $HS > 0$ sowie außerdem HS vor den Tagen mit „0“-Werten über den in Tabelle 2 angegebenen Werten lag.

Lückenlänge [Tage]	1	2-3	4-6	7-30
Schneehöhe vor Lücke [cm]	>5	>10	>20	>30

Tabelle 2: Kriterien für Daten-Sequenzen, die mit „0“ (kein Schnee) gekennzeichnet sind, an denen aber eigentlich keine Messung („NA“) stattgefunden hat.

Um die Lücken nun zu schließen, kam das **ZAMG Schneedeckenmodell SNOWGRID** (Olefs u. a., 2013) in seiner Klimaversion SNOWGRID-CL (Olefs u. a., 2017) zum Einsatz, wobei erwähnt werden muss, dass diese in Bezug auf die Schneehöhe grundsätzlich eine schlechtere Qualität aufweisen als Handmessreihen. Mit SNOWGRID-CL steht ein Gitterdatensatz täglicher Schneehöhen in 1×1 km Auflösung für Österreich von 1.1.1961 bis 31.12.2018 zur Verfügung, nicht jedoch für die Nachbarländer. Für alle österreichischen Stationen wurde das Schneemodell zur **Lückenfüllung bis 31 Tage** verwendet. Jahre mit größeren Lücken wurden verworfen. Für den Lückenschluss (HS_{GAP}) an einer mit Fehlstellen behafteten Messstation wurde der Schneehöhenverlauf des nähesten SNOWGRID-CL Gitterpunkts (maximale Entfernung: 0.71 km) herangezogen (HS_{SG}) und **linear interpoliert**. Abbildung 1 illustriert das Verfahren.

Lücken der wenigen Stationen außerhalb der SNOWGRID-CL Domäne (Nachbarländer) und Lücken zwischen 1.8.1960 und 31.12.1960 sowie 1.1.2019 und 31.7.2019 wurden durch lineare Interpolation zwischen den beiden die Messlücke umschließenden HS-Werten gefüllt, wenn die Lücke nicht größer als 6 Tage war. Diese Dauer wurde als Grenze gewählt, weil in frühen Jahren öfters nur einmal pro Woche gemessen wurde – vor allem wenn es keine Schneefälle gab. Diese (wohlgemerkt insgesamt seltenen) wöchentlichen Daten wurden behalten, nur Jahre mit einer oder mehreren Lücken größer als 6 Tage wurden verworfen.

In den verschiedenen Datenreihen finden sich unterschiedliche Aufzeichnungsvarianten für die schneefreien Monate abseits der Wintersaison. Entweder wurde zu gewissen, teils fixen Zeiten grundsätzlich HS nicht gemessen oder es wurden sehr wohl auch mögliche Schneefälle außerhalb der „normalen“ Saison dokumentiert. **Lange schneefreie Zeiten** wurden des Weiteren teils mit „0“, teils mit Fehlwerten dokumentiert. Öfters ist unklar, ob „0“ zu einer gewissen Zeit „Messung stattgefunden, aber es liegt kein Schnee“ oder „keine Messung“ bedeutet. In der Definition der Daten für das ***Schneelast.Reform***-Projekt ist Ersteres eindeutig als „0“, Letzteres als „NA“ definiert. Mehrere Programmierungsschritte wurden angewendet um diesem Problem gerecht zu werden und einen konsistenten Datensatz zu erhalten. Die folgende Auflistung beschreibt die wichtigsten[9]:

[8] HN wird an manchen Stationen zusätzlich zu HS erhoben. Immer wieder kommt es vor, dass HN fälschlicherweise über mehrere Tage zu einer bestehenden HS addiert werden. Daraus ergeben sich unrealistische Zuwächse in HS, weil die mehrtägige Setzung des Schnees nicht beachtet wird.

[9] Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass etwaige Schneefälle außerhalb der „normalen“ Wintersaison, die nicht beobachtet wurden oder durch die Korrekturen fälschlicherweise beseitigt wurden, mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht das jeweilige Jahresmaximum bildeten und daher irrelevant für das Projektziel, die Neubemessung von Schneelast-Extrema, sind (vgl. Unterabschnitt 4.4).

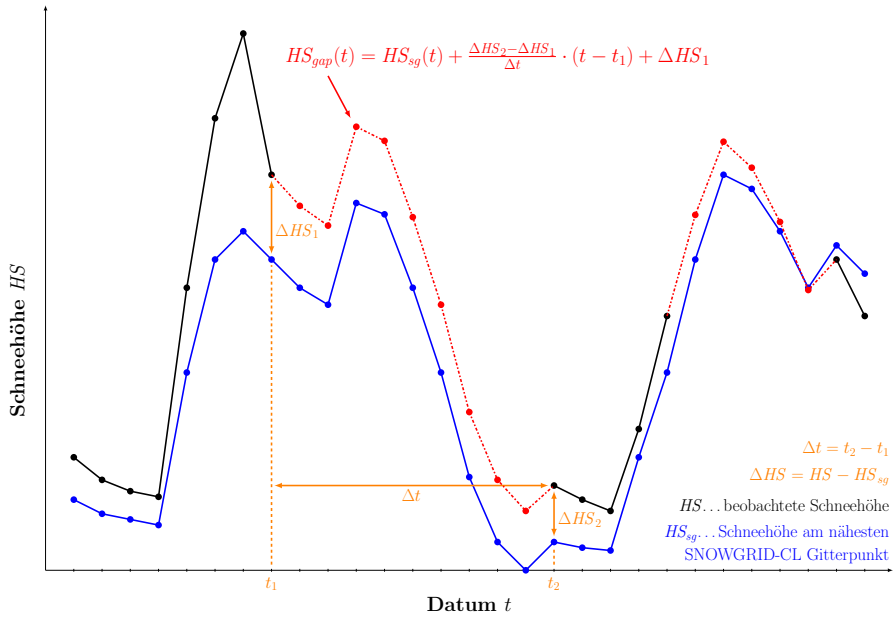

Abbildung 1: Illustration des Lückenschlusses mithilfe von SNOWGRID-CL.

- Ein seehöhenabhängiger „Kernwinter“ wurde gemäß Tabelle 3 (Zeilen 1 und 2) definiert. Wenn weniger als 90 % der Daten innerhalb eines „Kernwinters“ vorhanden waren, wurde das entsprechend Jahr verworfen.
- Stationen unter 250 m Seehöhe mit einem Jahr voll „0“-Werten wurden akzeptiert (ganzjährig schneefrei), bei höher gelegene Stationen mit nur „0“-Werten innerhalb eines Jahres wurde das entsprechende Jahr verworfen.
- *Saisonende:* Gilt für den letzten HS-Wert eines Jahres eine der beiden Bedingungen, „kleiner als die Hälfte des entsprechenden Jahresmaximums“ oder „< 20 cm“, so wurde für die Folgetage eine Schmelze von 10 cm pro Tag angesetzt bis schneefrei (0 cm). Auf diese Weise wurden Probleme durch unrealistische Sprünge am Saisonende, z. B. wegen plötzlichem, saisonalem Ende der täglichen Messung, entschärft.
- *Saisonbeginn:* Falls bereits zu Jahresbeginn (1.8.) $HS > 0$, so wurden alle Werte bis zum kleinsten Wert vor 1.12. auf 0 cm gesetzt. So konnten die wertvollen Daten der allerhöchsten Stationen, die gelegentlich erst nach dem 1.8. schneefrei werden, weitgehend berücksichtigt werden.
- Zumeist ist SNOWGRID-CL für die betroffene Station vorhanden. In diesen Fällen wurden *Saisonende* (vorletzter Punkt) und *Saisonbeginn* (letzter Punkt) mit dessen Hilfe analog zu Abbildung 1 gestaltet.
- Im Zweifelsfall wurde die maximale erste Schneehöhe eines Jahres seehöhenabhängig entsprechend Tabelle 3 (Zeilen 1 und 3) festgelegt. Einzelne Messjahre mussten dadurch verworfen werden.

Schneehöhe [m]	bis 1000	bis 1500	bis 2000	>3000
"Kernwinter": vom 1.1. bis	1.3.	1.4.	16.4.	1.5.
maximale erste Schneehöhe [cm]	30	40	50	50

Tabelle 3: Seehöhenabhängige Definition des „Kernwinters“ und maximale erste Schneehöhe der Saison.

4.3.4 Endkontrolle

In einem weiteren Schritt wurden **Ausreißer** in den Schneehöhenreihen (positive und negative) in Abhängigkeit ihres Ausmaßes, ihrer Dauer (meist nur ein Tag) und des Zeitpunkts ihres Auftretens herausgefiltert und mithilfe von SNOWGRID-CL oder linear geglättet. Danach erfolgte eine **Endkontrolle** aller möglicherweise immer noch fragwürdigen Stationen inkl. einiger weniger daraus resultierenden Korrekturen oder Eliminierungen. Diese Endkontrolle erfolgte zum einen visuell, zum anderen

wurde ein „extremwertstatistischer Check“ durchgeführt, bei dem Messreihen durchfielen, deren extremwertstatistische Auswertung (vor oder nach der Anwendung des Schneemodells ΔSNOW; siehe Unterabschnitt 5.1), fragwürdige Ergebnisse lieferte. Abschließend wurden noch jene Stationen verworfen, bei deren Datenreihen die angewandten Korrekturen dazu geführt haben, dass sie den im Unterabschnitt 4.2 erläuterten Kriterien nicht mehr gerecht werden. Letztendlich wurden die Schneehöhenmessungen von **897 Stationen** verwendet. Sie sind auf der Karte in Abbildung 2 verortet.

4.4. Bemerkungen zur Qualität der Schneedaten

Grundsätzlich ist die manuelle Schneehöhenmessung einfach durchzuführen und wenig fehleranfällig. Schließlich handelt es sich um eine simple Längenmessung. Außerdem war das Interesse an Schneedaten bereits im 19. Jahrhundert groß, auch in entlegenen Gebieten. Viele der österreichischen Schneehöhenreihen wurden von den k.u.k. Behörden bereits in den 1890er-Jahren initiiert. Nicht selten werden diese bis heute fortgeführt.

Problematisch sind weniger die Messungen an sich, als Inhomogenitäten, die auf Verlegungen der Messorte oder Beobachterwechsel zurückzuführen sind. Auch durch das Aufschreiben und Abschreiben sowie die Archivierung entstanden über die Jahrzehnte öfters Ungereimtheiten (wie o.g. „Mehrfach-Stationen“, „HN statt HS“, „10er-Fehler“ u. dgl.) und Lücken. Diese Probleme wurden – wie in Unterabschnitt 4.3 beschrieben – für die im Projekt ***Schneelast.Reform*** verwendeten Daten bestmöglich ausgemerzt. Teilweise konnte auch auf bereits qualitätsgeprüfte und homogenisierte Daten, z. B. aus dem Projekt SNOWPAT (SCHÖNER u. a., 2016), zurückgegriffen werden.

Trotzdem sind die korrigierten Schneehöhendaten nicht „perfekt“ und man könnte viel strengere Kriterien ansetzen. Jedoch darf nicht unerwähnt bleiben, dass für die Neubemessung der Schneelast-Extrema weniger die Exaktheit der Einzelwerte von Bedeutung ist, als vielmehr eine **möglichst große Anzahl** von zeitlich sowie räumlich (horizontal und vertikal[10]) **homogen verteilten** Daten. Außerdem sind die **jährlichen Maxima** primär entscheidend, und davon streng genommen auch nur die überdurchschnittlich hohen. Zu guter Letzt geht es gar nicht um die Schneehöhen an sich, sondern um die entsprechenden Schneewasserwerte bzw. Schneelasten, die erst zu modellieren sind (siehe Abschnitt 5), was einer Art „Filter“ gleichkommt.

Obwohl nicht jedem Einzelwert der überarbeiteten Schneehöhen zentimetergenau zu vertrauen ist, stellt der gewonnene Datensatz eine **ausgezeichnete Grundlage** für die Überarbeitung der Schneelastnorm dar. Zudem kann er als einzigartige und hochwertige Basis für diverse Folgeprojekte und weitere Untersuchungen angesehen werden.

4.5. Eigenschaften der Schneedaten

Der im Rahmen des Projekts ***Schneelast.Reform*** für die Modellierungen und letztendlich für die Berechnung von s_k verwendete Datensatz umfasst

- **lückenlose, tägliche Schneehöhen,**
- von **897 Stationen**,
- verteilt über einen **Großteil der Ostalpen**,
- in Seehöhen zwischen 118 m und 3109 m,
- aus 30 bis 59 Jahren zwischen **1960 und 2019**;
- wobei die mediane Datenlänge **49 Jahre** beträgt.

Abbildung 2 illustriert die räumliche („horizontale“) Verteilung der Stationen, deren Daten für die folgenden Schritte verwendet wurden. Innerhalb Österreichs sowie in den grenznahen Bereichen Deutschlands, Liechtensteins und der Schweiz sind die Stationen horizontal grundsätzlich sehr gleichmäßig verteilt. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Datenqualität ist die Situation in Italien und Slowenien etwas schlechter. Aus den anderen Nachbarländern standen keine Daten zur Verfügung (siehe Unterabschnitt 4.1). Auch die Länge der Zeitreihen ist recht homogen verteilt. In Italien sind die Reihen tendenziell kürzer, aber wohlgemerkt allesamt über 30 Jahre.

[10] Im Gebirgsland Österreich ist es besonders wichtig, den Einfluss der Seehöhe auf die Schneelast abzubilden.

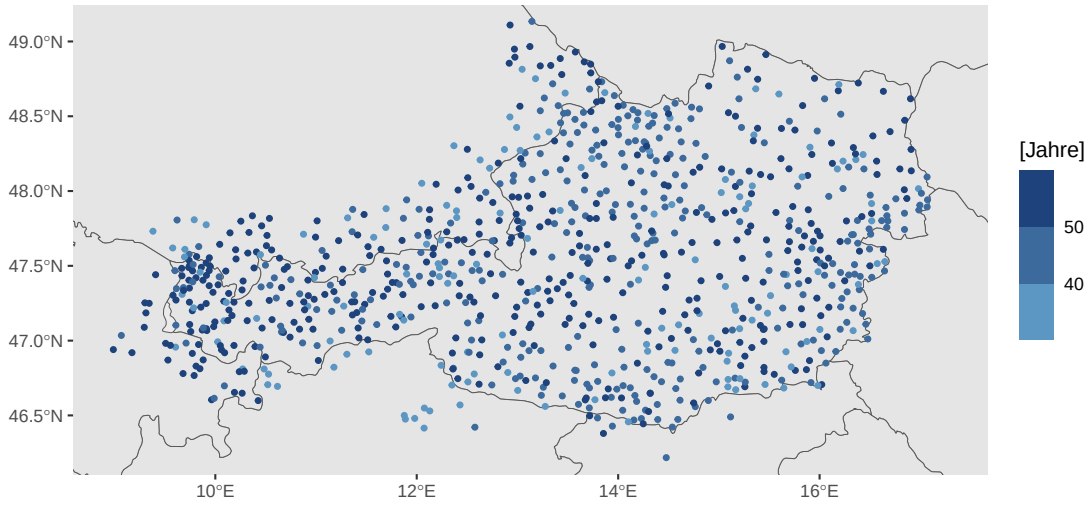

Abbildung 2: Übersicht der Stationen, deren Schneehöhenmessungen zur Berechnung der Schneelast-Extrema verwendet wurden. Die Stärke des Blautons illustriert die jeweilige Länge der Datenreihe.

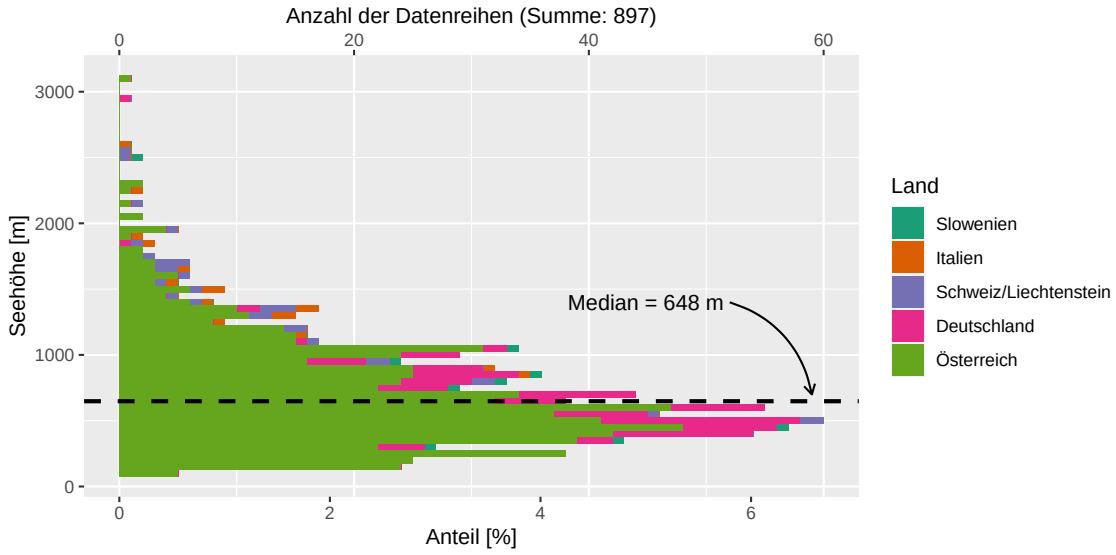

Abbildung 3: Seehöhenverteilung der verfügbaren Datenreihen der Schneehöhe. Die Balkenbreite ist 50 m.

Die Seehöhen-Verteilung („vertikale“ Verteilung) der Stationen bzw. der Datenreihen ist deutlich weniger homogen als die horizontale Verteilung. Abbildung 3 zeigt ein entsprechendes Histogramm inkl. der einzelnen Länderanteile. Naturgemäß liegen die meisten Messorte in besiedelten Gebieten und damit in tiefen und mittleren Höhenlagen. Die mediane Seehöhe der Stationen liegt auf 648 m. Allerdings sollte in diesem Zusammenhang nicht unerwähnt bleiben, dass die Berechnung der Schneelast-Extrema ja genau für den hier gut repräsentierten Dauersiedlungsbereich möglichst erfolgreich sein sollte. Gewisse Genauigkeitsabstriche im einerseits kaum besiedelten, andererseits wenig durch Daten abgedeckten hochalpinen Raum sind im Rahmen des ***Schneelast.Reform*** Projekts akzeptierbar.

Viele der verwendeten Datenreihen beginnen am 1.8.1960, dem nach obigen Kriterien frühestmöglichen Zeitpunkt, und enden erst zum spätestmöglichen Zeitpunkt am 31.7.2019, nach 59 Jahren (siehe Abbildung 4). Ein noch etwas größerer Anteil beginnt ein Jahr später. Der Grund für diese 58-jährigen Reihen sind die verbesserten Korrekturmöglichkeiten durch SNOWGRID-CL ab 1961 (siehe Unterabschnitt 4.3). Weiters gibt es eine Vielzahl an Datenreihen, die 49 Jahre umfassen (# 171), was zufällig auch der medianen Länge der Datenreihen entspricht. Davon wiederum liegt der Großteil in Österreich, wurde 1970 begonnen und wird bis heute geführt, meist in sehr hoher Qualität (# 155). Der Grund für die relative Häufigkeit dieser 49-jährigen Datenreihen ist, dass 1970 hierzulande viele hydrologische Messstationen installiert wurden, als Folge der Bestrebungen der „Internationalen Hydrologischen Dekade der UNESCO“, die von 1965 bis 1974 dauerte. Ein gutes Beispiel für die Sinnhaftigkeit langfristiger Investitionen in diesem Bereich.

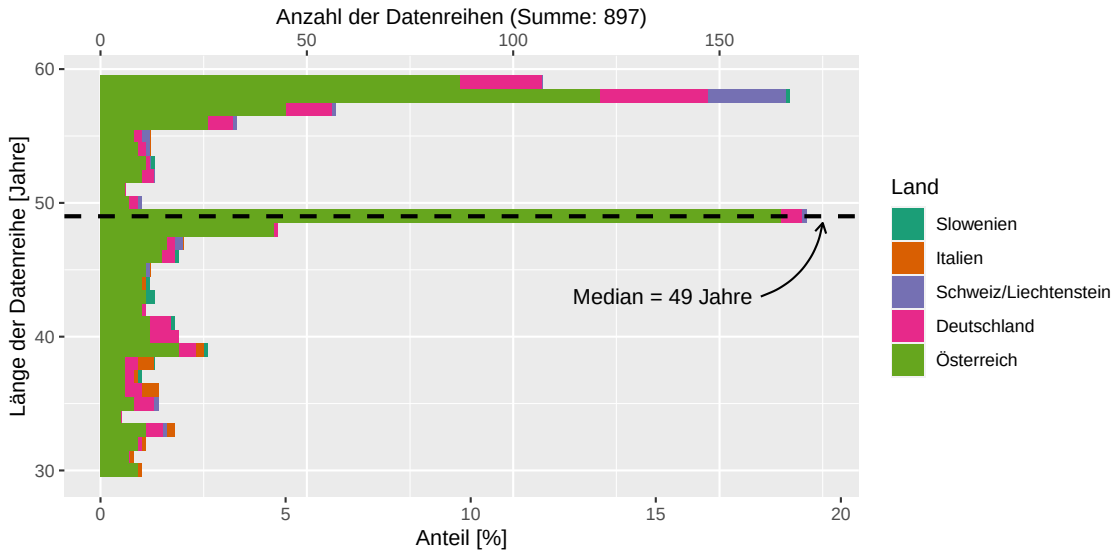

Abbildung 4: Verteilung der verfügbaren Schneehöhen-Datenreihen hinsichtlich deren Länge. Knapp 50 % der Reihen umfassen 59, 58 oder 49 Jahre. Die Balkenbreite ist ein 1 Jahr.

5. Methode

Die Methodik des ***Schneelast.Reform*** Projekts orientiert sich an den im Abschnitt 3 skizzierten modernen Möglichkeiten, die bei der Erstellung der ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018) noch nicht angewandt wurden. Es gilt aus den Punktdaten zur täglichen Schneehöhe eine flächenhafte Darstellung der Extrema der Schneelast zu produzieren. Hierfür wurde ein dreistufiger Prozess gewählt, der in Abbildung 5 als Flussdiagramm skizziert ist und in den folgenden Unterabschnitten 5.1 bis 5.3 beschrieben wird.

5.1. Schneehöhe → Schneelast

Bereits erwähnt wurde der große Unterschied in der Datenlage zu Schneehöhen („sehr gut“) und Schneelast („sehr dürftig“) sowie die daraus resultierende Notwendigkeit der Verwendung von Schneehöhen als Datengrundlage. Diese Datenbasis wurde hinreichend beschrieben (Abschnitt 4). Nun soll erklärt werden, wie aus den Schnee*höhen* (HS) Schnee*lasten* (SL) berechnet wurden.

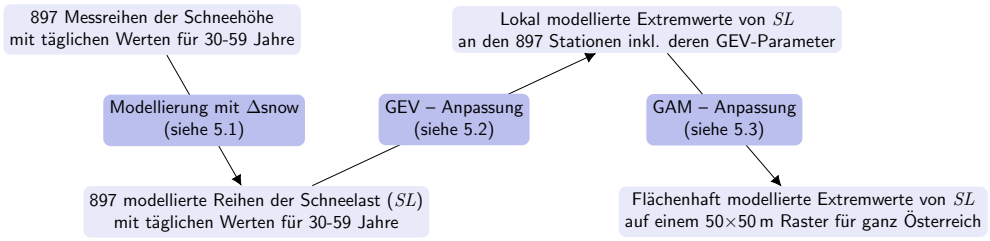

Abbildung 5: Flussdiagramm zur „Methodenkette“ des ***Schneelast.Reform*** Projekts. GEV steht für „Generalized Extreme Value (Distribution)“, GAM kürzt „Generalized Additive Model“ ab. Details siehe Text.

Es gilt der in Abschnitt 3 genannte Zusammenhang $SL = HS \cdot \rho \cdot g$, mit Erdbeschleunigung $g \approx 9.81$ m/s^2 und ρ, der Dichte des Schnees[11]. Die Umrechnung von HS zu SL ist damit gleichbedeutend mit der Berechnung bzw. Modellierung der Schneedichte ρ. Großzügig betrachtet stehen dafür vier Methoden zur Verfügung, die hier kurz diskutiert werden sollen:

- Simple **Annahme einer konstanten Schneedichte:** Räumlich ist ρ vergleichsweise wenig variabel. Häufig ist ρ an kilometerweit voneinander entfernten Standorten ähnlich, insbesondere wenn sich deren Seehöhe nur wenig unterscheidet. Innerhalb der Schneedecke ist die Dichte jedoch hochvariabel, weil jene ein stark geschichtetes Medium ist und jede Schicht sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen kann. Schichtdichten von unter 50 kg/m^3 (z. B. kalter Neuschnee) bis deutlich über 500 kg/m^3 (z. B. Eiskrusten) sind möglich. Außerdem verändern thermodynamische Prozesse, Eigenlast, Auflast und äußere Einflüsse (z. B. durch Wind) die Schneedichte mit der Zeit. Im Allgemeinen nimmt die Schneedichte dabei zu, die Schneehöhe nimmt ab, man spricht von „Setzung“. Unter Berücksichtigung dieser Gegebenheiten erscheint es wenig erfolgversprechend zur Umrechnung von HS in SL einfach eine konstante Dichte anzunehmen. Die Praxis[12] zeigt jedoch, dass mit dieser simplen Vorgehensweise plausible Ergebnisse erreicht werden können; z. B. ergibt sich für die maximale Schneelast einer Saison an einem Messort ein sinnvoller Richtwert, wenn die höchste Schneehöhe dieser Saison mit einer Dichte von 300-320 kg/m^3 multipliziert wird. Zum Zeitpunkt der höchsten Schneehöhe ist zwar die Dichte fast immer geringer als dieser Wert, zum Zeitpunkt der höchsten Schneelast ist sie dafür aber immer höher, bei gleichzeitig geringerer Schneehöhe. Diese gegenläufigen Effekte scheinen sich günstig auszugleichen und sind wohl letztendlich darauf zurückzuführen, dass die Schneehöhe einen Großteil der Varianz der Schneelast erklärt (vgl. hierzu Valt u. a. (2018), Gruber (2014) sowie weitere in Winkler u. a. (2021) zitierte Studien). Es ist anzunehmen, dass für die bis Mai 2022 gültige Schneelastnorm ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018) in ähnlicher Weise mit einer konstanten Dichte gerechnet wurde.
- Für die Neuberechnung der Schneelasten im Rahmen von ***Schneelast.Reform*** wurde versucht, über die Annahme einer konstanten Dichte hinauszugehen. **Empirische Regressionsmodelle**[13] würden sich anbieten. Diese Modelle simulieren die mittlere Schneedichte ρ unter Zuhilfenahme der Schneehöhe, des Datums, der Region und/oder der Seehöhe. Im Durchschnitt sind diese Modelle erfolgreicher als die „konstante Dichte“-Methode, aber das für die extremen Schneelasten so wichtige jährliche Maximum erfassen auch sie nur in ähnlich bescheidener Qualität.
- Deutlich genauer können **thermodynamische Schneemodelle** Schneelast und Schneewasserwert berechnen. Es handelt sich um Modelle, die die geschichtete Struktur der Schneedecke auflösen und zumindest zwei, oft jedoch beliebig viele Schichten unterscheiden[14]. Damit können auch bestimmte Tageswerte der Schneelast wie z. B. das Jahresmaximum vertrauenswürdig abgebildet werden. Außerdem können thermodynamische Schneemodelle noch eine Vielzahl weiterer Eigenschaften der Schneeschichten simulieren, die für die Schneelast aber keine direkte Bedeutung haben (z. B. Bruchfestigkeiten u.v.m.). Allerdings sind diese Modelle deutlich komplexer aufgebaut und für die Simulation hunderter „Stationsjahre“ (Stationen

[11] Exakter formuliert, entspricht ρ der mittleren Dichte der gesamten Schneedecke an einem bestimmten Ort.
[12] Hier sind nicht zuletzt die jahrelangen Gutachtertätigkeiten der ZAMG im Rahmen der bis Mai 2022 gültigen ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018) für Orte über 1500 m Seehöhe gemeint.
[13] Eine Definition der empirischen Regressionsmodelle findet sich in Winkler u. a. (2021), auch Avanzi u. a. (2015) bieten einen sehr guten Überblick.
[14] Für eine genauere Definition siehe Winkler u. a. (2021).

× Messjahre) nicht geeignet. Außerdem benötigen sie Inputvariablen, die für langjährige Reihen nur sehr eingeschränkt zur Verfügung stehen (Temperatur, Strahlungsverhältnisse, Luftfeuchtigkeit, Wind usw.). Mit diesen Modellen könnten Schneelasten nur für deutlich weniger Stationen und Jahre berechnet werden. Da jedoch gerade für die folgende flächige Extremwertmodellierung eine möglichst große Anzahl und Länge der Datenreihen immens wichtig ist, scheiden thermodynamische Modelle für die ***Schneelast.Reform*** aus.

- Schließlich lässt sich eine Modellgruppe identifizieren, die zwischen empirischen Regressionsansätzen und der thermodynamischen Schneemodellierung einzuordnen ist. Gruber (2014) bezeichnet diese Methoden als **semi-empirische Schneemodelle** und meint damit jene Schneelast- bzw. Schneewasserwert-Modelle, die die geschichtete Struktur der Schneedecke berücksichtigen, innerhalb der einzelnen Schichten aber die thermodynamischen und mechanischen Umwandlungsprozesse durch empirische Ansätze zur Schneesetzung vereinfachen. Damit lässt sich die Schneelast nicht nur „im Mittel" recht gut berechnen, sondern auch für einzelne Tageswerte und damit auch die so entscheidenden Schneelast-Jahresmaxima. Entscheidend ist, dass hierzu, abgesehen von der Schneehöhe, keine meteorologischen Eingangsgrößen nötig sind. Diese Methoden sind nicht neu – siehe etwa Martinec (1977), Rohrer & Braun (1994) oder Sturm & Holmgren (1998) – in neuerer Zeit wurden sie aber vermutlich erst von Gruber (2014) weiterentwickelt und in einen modernen Programmcode, in diesem Fall R (R Core Team, 2019), übersetzt. Im ***Schneelast.Reform*** Projekt wurde für den so entscheidenden Schritt der Transformation der Schnee*höhen* zu Schnee*lasten* an diesem Punkt angesetzt und ein weiteres semi-empirisches Schneemodell entwickelt, das ΔSNOW Modell.

5.1.1 Das ΔSNOW Modell

Ursprünglich war geplant, für die Neuberechnung der Schneelastextrema direkt das Modell von Gruber (2014) zu verwenden. Allerdings offenbarten sich einige Schwächen im Programmcode, weshalb entschieden wurde die gesamte Methode neu aufzusetzen. Bald stellte sich heraus, dass der Aufwand größer werden würde als erwartet, weshalb sich der Zeitplan des ***Schneelast.Reform*** Projekts veränderte. Dafür entstand aber ein umfangreicher Artikel (Winkler u. a., 2021) sowie ein gänzlich neues Schneemodell, das im open-source R-package **niXmass**[15] (Schellander & Winkler (2021), https://cran.r-project.org/package=nixmass) frei zur Verfügung steht und wohl auch für zukünftige schneehydrologische Anwendungen und Studien von Bedeutung sein könnte. Da das Schneemodell vordergründig auf der täglichen Änderung („Δ") der Schneehöhe basiert, wurde es ΔSNOW getauft[16].

Es handelt sich um ein semi-empirisches Modell zur Berechnung der Schneelast bzw. des Schneewasserwerts direkt aus Schneehöhen-Reihen. Es sind grundsätzlich keine weiteren Eingangsvariablen nötig, aber die Schneehöhenreihen dürfen keine Lücken aufweisen, weshalb meistens im Vorfeld der Anwendung eine sorgfältige Datenbearbeitung nötig ist. (Für ***Schneelast.Reform*** wurde diese ausführlich in Unterabschnitt 4.3 beschrieben.) Die Details zur Funktionsweise des ΔSNOW Modells sind in Winkler u. a. (2021) dargelegt und diskutiert, an dieser Stelle sollen nur die vier zentralen Eigenschaften genannt werden: ΔSNOW (1) basiert die Setzung der einzelnen Schneeschichten auf die Gesetze der Newton'schen Viskosität, (2) akzeptiert kleine Diskrepanzen zwischen Modellergebnis und Beobachtung als „irrelevante Fehler" und zieht daraus keine Konsequenzen für die Schneelast, (3) berücksichtigt verstärkte Setzung durch die Auflast von Neuschnee als „plötzliche Ereignisse abseits der Newton'schen Viskosität" und (4) verdichtet die Schneeschichten von oben nach unten während Schmelzphasen ohne dabei automatisch einen Massenverlust zu simulieren. Abbildung 6 wurde aus Winkler u. a. (2021) übernommen und illustriert die Funktionsweise des ΔSNOW Modells: Signifikante Schneezuwächse führen zu neuen Schichten in der Modellschneedecke, deren Dichte sich mit der Zeit, entsprechend der Schneehöhenentwicklung bzw. der Auflast, erhöht. Während der Schmelzphase erreichen die Schichten von oben nach unten die „Maximaldichte", jede weitere Abnahme der Schneehöhe wird nicht mehr als Setzung, sondern als Massenverlust durch Schmelze interpretiert.

Die Verbesserungen in der Modellierung der Schneelast im Vergleich zu den empirischen Regressionsmodellen und der simplen Annahme einer konstanten Dichte sind signifikant. Laut Winkler u. a. (2021)

[15] …zusammengesetzt aus dem lateinischen Wort für Schnee (nix) und dem englischen Wort für Masse (mass).

[16] Die bevorzugte Schreibweise ist ΔSNOW mit großem griechischem Delta und „snow" in Kapitälchen. Alternative Schreibweisen sind Δsnow mit „snow" in Kleinbuchstaben, wenn keine Kapitälchen möglich, und delta.snow, wenn kein Δ geschrieben werden kann.

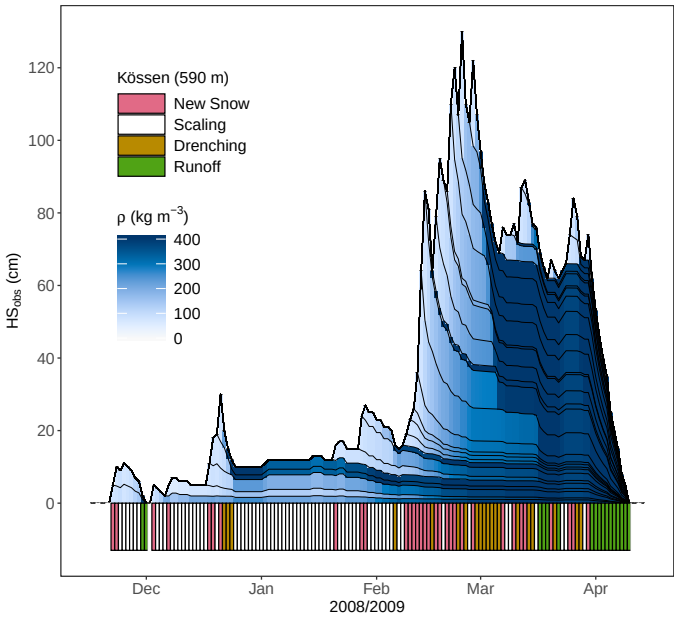

Abbildung 6: Der Winter 2008/09 an der Station Kössen als illustratives Beispiel der Funktionsweise des ΔSNOW Modells. Je dunkler die Blaufärbung der Modellschneeschichten, desto größer ihre Dichte. HS_{obs} ist die beobachtete Schneehöhe. Die farblichen Codierungen in pink, weiß, braun und grün weisen auf verschiedene Module des Modells hin. Details sind in Winkler u. a. (2021) beschrieben.

liegt der mittlere Fehler des ΔSNOW Modells (für alpine Stationen in mittleren und höheren Seehöhen) bei 31 kg/m^2. Das für die weiteren Schritte entscheidende Jahresmaximum der Schneelast kann mit dem ΔSNOW Modell vergleichbar genau wie das Mittel, mit einem Fehler von 36 kg/m^2, modelliert werden. Die anderen anwendbaren Modelle verhalten sich hier deutlich schlechter und verzeichnen eine Genauigkeit von bestenfalls 70 kg/m^2, bei einer deutlichen Tendenz zur Übertreibung der maximalen Schneelast. Eine neuere Untersuchung mit einer verbesserten Version des ΔSNOW Modells und Validierungsdaten aus Deutschland, die auch viele Flachlandstationen aus niederen Seehöhen enthalten, deutet darauf hin, dass der mittlere relative Fehler des ΔSNOW Modells für alle Seehöhenbereiche zwischen 20 und 25 % liegt (SCHELLANDER & WINKLER, 2022), bei einer geringen, systematischen Unterschätzung der Schneelast. Es ist davon auszugehen, dass der **relative Fehler des ΔSNOW Modells** bei den für die extremwertstatistische Auswertung relevanten jährlichen Höchstwerten geringer ist. Er liegt im Bereich von **15-20 %**.

Die mit den hier verwendeten Daten aller 897 Stationen (je 30 bis 59 Jahre) mithilfe von ΔSNOW modellierte, mediane Schneedichte beträgt 213 kg/m^3, das arithmetische Mittel liegt bei 227 kg/m^3.

5.2. Extremwerte an den Messorten

Nach Anwendung des Schneemodells ΔSNOW (Unterabschnitt 5.1) standen hochwertige, mindestens 30-jährige Schneehöhenreihen in Tagesauflösung mit zugehörigen, modellierten Schneelasten für alle in Abbildung 2 dargestellten Messorte/Stationen zur Verfügung.

Um daraus Extremereignisse ableiten zu können, wurde die **Generalisierte Extremwertverteilung** (GEV[17]; vgl. COLES (2001)) an die lokalen Jahresmaxima der Schneelast angepasst. In Abbildung 7 ist das Verfahren beispielhaft für die Station Klagenfurt-Flughafen auf etwa 450 m Seehöhe dargestellt. (Beachte die schwarzen und grauen Linien und Punkte; zur Bedeutung der roten Linien siehe Unterabschnitt 5.3.) Die schwarzen Punkte sind die Jahresmaxima der Datenreihe. In den meisten Jahren betrug die Schneelast weniger als 0.5 kN/m^2 in Klagenfurt, für drei Jahre seit 1960 wurde eine Schneelast von über 1 kN/m^2 berechnet. An alle diese Jahresmaxima wurde die GEV angepasst, das Resultat ist die schwarze Linie in Abbildung 7. Der Schnittpunkt dieser Linie mit der „return period“ von 50 Jahren (entspricht „Jährlichkeit 50“; siehe x-Achse) liegt bei einem „return value“ der Schneelast (SL) von ca. 1.3 kN/m^2. Mit anderen Worten: Das **50-jährliche Schneelastereignis** am Klagenfurter Flughafen ist bei 1.3 kN/m^2 zu erwarten.

[17] GEV… Generalized Extreme Value distribution

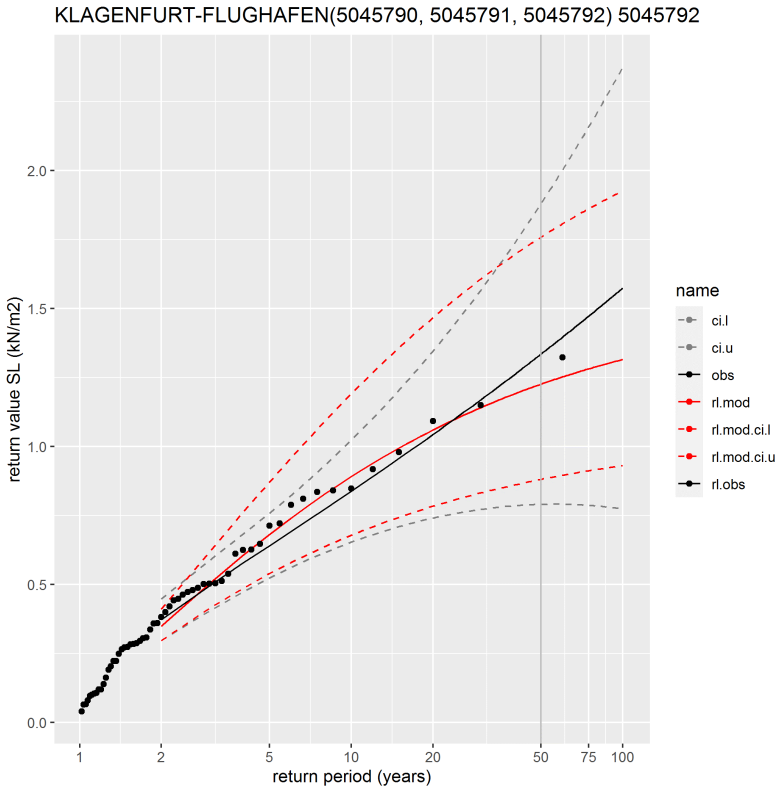

Abbildung 7: Der sogenannte „return level plot“ für die Station Klagenfurt-Flughafen. Details siehe Text.

Es besteht allerdings eine beachtliche, wenngleich nicht untypische Ungenauigkeit. Diese wird in Abbildung 7 durch die beiden strichlierten, grauen Linien illustriert, die das sogenannte 95 %-**Konfidenzintervall** abgrenzen. Für die Praxis kann gesagt werden: Die 50-jährliche Schneelast am Klagenfurter Flughafen liegt mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit zwischen ca. 0,8 kN/m^2 und 1,88 kN/m^2, am wahrscheinlichsten ist der o.g. **Erwartungswert** von 1.3 kN/m^2.

Die Verwendung der GEV anstatt der Gumbelverteilung (Gumbel, 1958), die höchstwahrscheinlich bei der Erstellung der Zonenkarten der Vorgängernormen von ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ON, 1983, 2006) zum Einsatz kam, führt zu realistischeren Ergebnissen (siehe z. B. Schellander & Hell, 2018). Damit konnte im Rahmen des Projekts ***Schneelast.Reform*** zusätzlich zur Verwendung aktueller, qualitätsgeprüfter Daten (Abschnitt 4) und zur verbesserten Berechnung der Schneelast mithilfe von ΔSNOW (Unterabschnitt 5.1) auch hinsichtlich der extremwertstatistischen Auswertung ein erhöhtes Niveau erreicht werden. Dieses schrittweise Vorgehen ist in Schellander u. a. (2021) detailliert beschrieben. Ebendort findet sich auch eine ausführliche Erklärung des im folgenden Unterabschnitt 5.3 dargelegten, abschließenden Schritts, mithilfe dessen die an den Stationsstandorten berechneten Schneelastextrema in eine flächenhafte Darstellung übergeführt wurden.

5.3. Flächenhafte Extremwerte

Die für die extremwertstatistische Auswertung verwendete GEV (siehe Unterabschnitt 5.2) wird durch drei Parameter (location, scale und shape) beschrieben. Um ein mathematisch konsistentes, flächenhaftes Bild zu erhalten müssen diese Parameter zwischen den Stationsstandorten interpoliert werden (Schellander & Hell, 2018). Nach intensiven und zeitaufwändigen Tests wurden ursprünglich geplante Methoden, mit denen dies bewerkstelligt hätte werden sollen (z. B. smooth spatial modeling), verworfen. Die 50-jährlichen Schneelasten aus dem flächigen Modell wichen so deutlich von den für einzelne Messstationen ermittelten ab, dass ein „manuelles“ Ausbessern für etwa zwei Dutzend Orte diskutiert werden musste. Daher wurde die mathematische Methode zur Erstellung des flächigen Schneelastmodells grundlegend geändert und sogenannte **Generalized Additive Models** (GAMs) angewendet.

GAMs lieferten die mit Abstand besten Ergebnisse, und das ohne Zuhilfenahme weitere Kovariablen

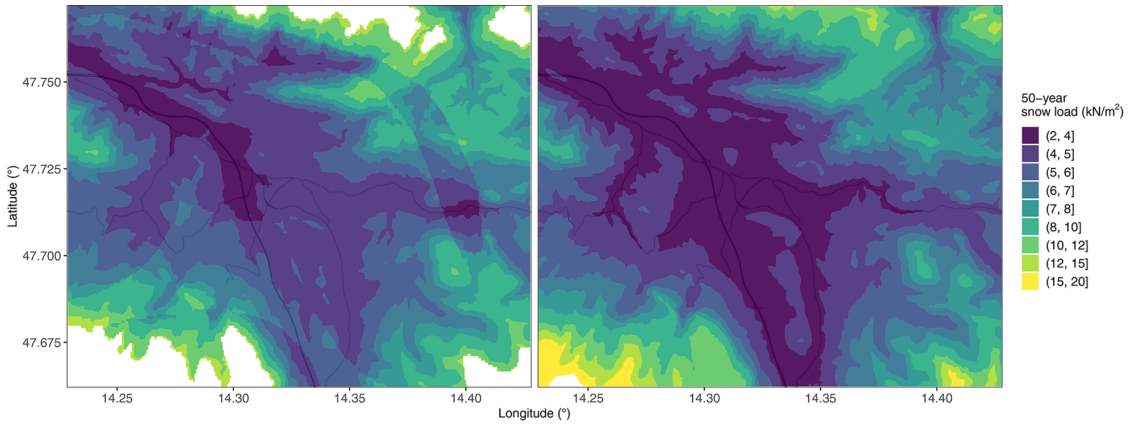

Abbildung 8: Aus Schellander u. a. (2021) entnommene, flächenhafte Darstellung der „charakteristischen Schneelast“ s_k der bis Mai 2022 gültigen ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018) am 50 × 50 m-Gitter (links) im Vergleich zum GAM-Ergebnis für die 50-jährliche Schneelast, der Grundlage für s_k der ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022). Es gibt Änderungen in den absoluten Werten. Hier soll aber vor allem verdeutlicht werden, dass es nach GAM-Anwendung keine Zonen und daher keine unnatürlichen Sprünge an deren Grenzen gibt sowie keine undefinierten Bereiche in Seehöhen über 1500 m. (Der Ausschnitt zeigt die Region um Windischgarsten, Oberösterreich.)

abseits der geographischen Länge und Breite sowie der Seehöhe. Die Programmierung erfolgte erneut in der Sprache R (R Core Team, 2019), insbesondere mithilfe des mgcv-Pakets (Wood, 2017). Es wurde beschlossen, ein **50 × 50 m Raster** der 50-jährlichen Schneelast für ganz Österreich zu entwickeln (zur Begründung siehe Unterabschnitt 5.4). Die rote Linie in Abbildung 7 ergibt sich aus den GAM-abgeleiteten Parametern der GEV am 50 × 50 m-Gitterpunkt der Station Klagenfurt-Flughafen. Das Ergebnis für das 50-jährliche Ereignis am Gitter ist etwas niedriger (ca. 1.23 kN/m^2) als jenes der standortspezifischen GEV-Anpassung an die jährlichen Schneelast-Maxima, aber es ist nicht minder plausibel. Demnach wäre der Allzeit-Höchstwert von etwa 1.3 kN/m^2 ein über 100-jährliches Ereignis (denn die rote Linie erreicht den Wert 1.3 kN/m^2 erst jenseits einer „return period“ von 100 Jahren). Das GAM-Ergebnis kann von den Ergebnissen umgebender Gitterpunkte profitieren („borrowing strength“; siehe Abschnitt 6) und genauer sein, als das GEV-Punktergebnis. Im Beispiel von Abbildung 7 ist das so: Für Jährlichkeiten (return periods) über 20–30 Jahre ist das 95 %-Konfidenzintervall für das GAM schmäler (strichliert, rot) als für die punktbezogene GEV (strichliert, schwarz). Es gilt daher nach GAM-Anwendung, dass der **Erwartungswert der 50-jährlichen Schneelast am Klagenfurter Flughafen bei ca. 1.23 kN/m^2** liegt; mit 95 %iger Wahrscheinlichkeit liegt er zwischen ca. 0,88 und 1.75 kN/m^2.

Das Ergebnis sind **Schneelastkarten für Österreich im GeoTIFF-Format** in der besagten Auflösung von 50 × 50 m – etwa 25 Millionen Pixel. Die Schneelastwerte verlaufen quasi kontinuierlich. Auf eine Zonierung, wie sie in den aktuellen Schneelastkarten der europäischen Normen (inkl. der bis Mai 2022 gültigen ÖNORM 1991-1-3:2018-12) vorgenommen wird, oder auf die Ausweisung von „Orten mit Sonderregelung“ (vgl. Abschnitt 5.1 in ASI, 2018) kann verzichtet werden. Außerdem gibt es theoretisch keine Seehöhengrenze (siehe Abbildung 8) und auch **Karten für Schneelastextrema anderer Jährlichkeiten** können produziert werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit die **Genauigkeit** der ermittelten Werte zumindest ungefähr anzugeben, was für Zonenkarten diverser anderer nationaler und internationaler Schneelastnormen nicht möglich war bzw. ist.

5.4. Untersuchungen zur Genauigkeit

Naturgemäß unterliegt die gesamte Methode gewissen Unsicherheiten. Eine Fehlerrechnung, die diesen Namen verdient, wäre aufgrund der nachvollziehbaren und transparent dargelegten Methodik grundsätzlich möglich. Sie war jedoch aufgrund zeitlich und monetär beschränkter Ressourcen im Projekt ***Schneelast.Reform*** nicht durchführbar. Die folgenden Aussagen sind jedoch möglich.

Den Messungen der Schneehöhe kann eine hohe Genauigkeit im Bereich von höchstens ein paar Zentimetern bzw. – ausgedrückt als Schneelast – nur wenigen daN/m^2 zugestanden werden. In relativen Zahlen handelt es sich somit hier meist um Fehler im einstelligen Prozentbereich. Für die Jahreshöchstwerte ist allgemein von einer Genauigkeit unter 5 % auszugehen. Die Genauigkeit der aus den Schneehöhen mittels ΔSNOW simulierten Schneelast liegt, wie erwähnt, für die Jahreshöchstwerte

bei schlechtestenfalls 20 %. Etwas höher ist die Genauigkeit der Extremwertmodellierung (GEV) inklusive flächiger Interpolation (GAM). Die einzelnen Genauigkeiten innerhalb der **„Methodenkette“** von ***Schneelast.Reform*** sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

	relative Genauigkeit [%]	typische absolute Genauigkeit [kN/m^2]
Schneehöhenmessung	< 5	< 0.1 [0.06, 0.28]
ΔSNOW	ca. 15-20	< 0.5 [0.23, 1.11]
GEV-Modellierung	$<$ 10-15	< 0.4 [0.17, 0.83]
GAM-Interpolation	$<$ 10-15	< 0.4 [0.17, 0.83]
generell (s_k)	**15-20**	-

Tabelle 4: Überblick über die Genauigkeit der einzelnen Methoden. Die relativen Genauigkeiten sind einfacher abzuschätzen, die absoluten Genauigkeiten wurden daraus abgeleitet: Der einzeln stehende Wert stellt hier (rechte Spalte) die Genauigkeit der mittleren Schneelast dar. Die Werte in den eckigen Klammern umfassen den typischen Bereich der Genauigkeiten von s_k (auf Basis des „interquartile range“ der Werte von s_k für ganz Österreich unter 2000 m). Eine generelle Angabe der absoluten Genauigkeit von s_k ist nicht sinnvoll, weil sich die Werte von s_k österreichweit über einen so großen Bereich erstrecken.

Dass die angewandte Methodik im Vergleich zur ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018) einen deutlichen Fortschritt bedeutet, illustrieren Abbildung 9 (entnommen aus SCHELLANDER u. a., 2021) und Abbildung 10.

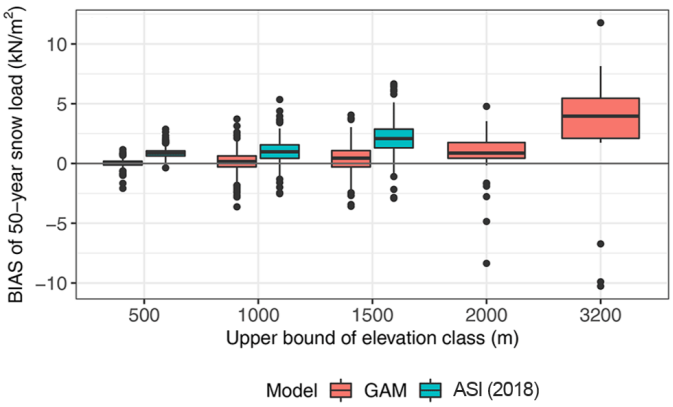

Abbildung 9: Abweichung (BIAS) der 50-jährlichen, ΔSNOW-modellierten und GEV-angepassten Schneelast zur hier entwickelten GAM-Schneelast und der bis Mai 2022 gültigen ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018); aufgeschlüsselt in Seehöhen-Klassen; entnommen aus Schellander u. a. (2021). Beachte, dass „ASI (2018)“ keine Schneelastwerte über 1500 m Seehöhe vorsieht.

Man erkennt, dass in den Normenwerken, die von 2006 bis 2022 gültig waren (ON (2006), ASI (2013), ASI (2018); In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind diese unter „ASI (2018)“ vereint.), in allen Höhenlagen meist zu hohe Werte für s_k angegeben wurden. Das Ergebnis der hier vorgestellten Methodik der Interpolation (GAM) liegt im Mittel deutlich näher an den GEV-modellierten Punktwerten[18]. **Der mittlere systematische Fehler (Bias) liegt bei nur +0.18 kN/m^2** für alle Stationen inklusive der (hoch)alpinen jenseits 1500 m (ASI, 2018: +1.16 kN/m^2, nur Orte unter 1500 m; siehe SCHELLANDER u. a., 2021). Der **relative systematische Fehler** der neuen Berechnung liegt für die allermeisten Orte **im einstelligen Prozentbereich** (Abbildung 10), ganz im Gegensatz zu den vorherigen Normwerten, die typischerweise um 30 % bis 100 % zu hoch sind, wobei die Überschätzung in den am dichtesten besiedelten, tief gelegenen Gebieten unter 500 m Seehöhe besonders hoch ausfällt.

Abbildung 9 verdeutlicht auch, dass es keinen objektiven Grund gibt, weshalb man der neuen Modellierung nicht bis zu einer Seehöhe von 2000 m vertrauen sollte. Erst darüber nimmt die Performanz deutlich ab (bzw. die Überschätzung der 50-jährlichen Schneelast deutlich zu), wobei darauf hingewiesen werden muss, dass über 2000 m nur 14 Stationen zur Modellierung und Validierung zur Verfügung standen.

[18] Für die Verifikation wurden unterschiedliche Modelle angepasst, bei denen jeweils der zu validierende Punkt ausgelassen wurde (cross validation).

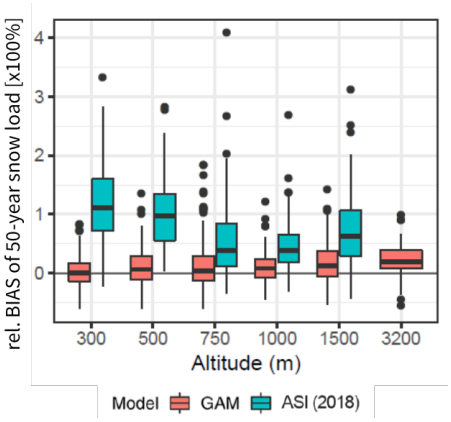

Abbildung 10: Wie Abbildung 9 nur für die relative Abweichung (rel. BIAS).

Eine weitere Darstellung des Genauigkeitsgewinns durch ***Schneelast.Reform*** ist in Abbildung 11 gegeben. Deutlich ist zu erkennen, dass die Berechnung mithilfe der GAMs zu geringeren Fehlern führt, als sie bei Schneelastnormen vor 2022 bestanden. Die Fehler sind nach Anwendung der neuen Methode recht gleichmäßig um Null verteilt, für die älteren Normen gibt es eine breitere Streuung und eine eindeutige Verschiebung hin zu positiven Werten, was gleichbedeutend mit einer systematischen Übertreibung von s_k ist.

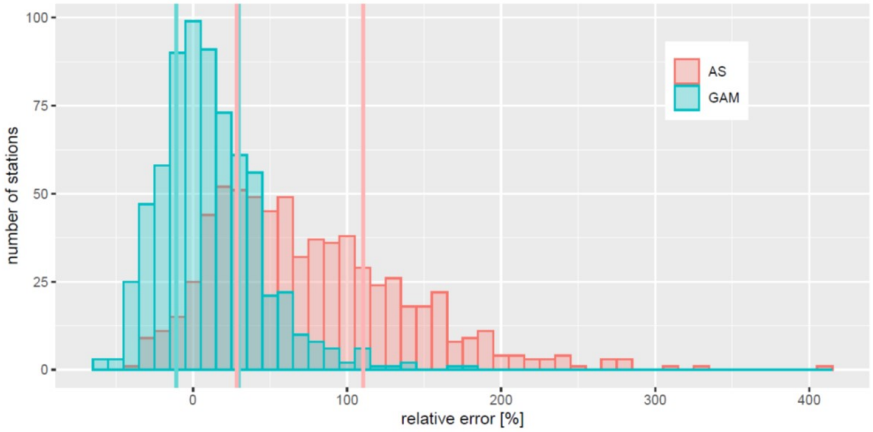

Abbildung 11: Histogramm des relativen Unterschieds bzw. Fehlers (relative error) zwischen den Normwerten, die zwischen 2006 und 2022 gültig waren (AS) und den seit Mai 2022 gültigen, auf Schneelast.Reform beruhenden Werten. Die vertikalen Linien grenzen das 1. und 3. Quartil ein. Zwischen den Linien liegen jeweils 50 % der Werte. Man erkennt die ausgeprägte Verschiebung von AS hin zu hohen Werten und die im Vergleich dazu sehr geringe Übertreibung der GAM-Methode.

Es darf in diesem Zusammenhang auf zweierlei hingewiesen werden: Erstens ist die erreichte Genauigkeit durchaus zufriedenstellend, wenn man bedenkt, dass die Genauigkeit von manuellen Schneelast- bzw. SWE-Messungen nur wenig höher ist (RADLHERR & WINKLER, 2022; vgl. WINKLER u. a., 2021). Zweitens zeigt sich, dass die ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018) mit ihrer Forderung auf 0.05 kN/m^2 zu runden, eine Genauigkeit suggerierte, die nicht der Realität entsprechen kann. Eine strengere Rundung als auf 0.1 kN/m^2 („eine Kommastelle“) muss jedenfalls als irreführend angesehen werden und wurde daher auch nicht für die endgültige Fassung der Schneelastkarte der ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) empfohlen.

Letztendlich entstanden Kartenprodukte zur Schneelast im Rasterformat. In Zusammenhang mit den hier unternommenen Überlegungen zur Genauigkeit der Methode stellte sich die Frage nach der besten Rasterzellengröße, zumal bei engmaschigen Rastern der Rechenaufwand stark erhöht ist. Eine geometrische Überlegung, illustriert in Abbildung 12, soll erklären wie es in diesem Punkt im ***Schneelast.Reform*** Projekt zu einer Entscheidung kam.

In räumlicher Hinsicht ist die Schneelast am stärksten von der Seehöhe abhängig. Im topographisch stark gegliederten Österreich muss dieser Umstand ständig beachtet werden. Voruntersuchungen zeigen, dass der Seehöhen-Gradient der Schneelastextrema bei höchstens 1-1.5 kN/m^2 pro 100 Höhenmeter

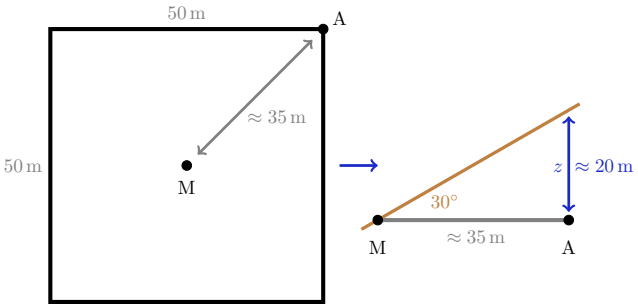

Abbildung 12: Darstellung des vertikalen Abstands (z) zwischen Rastermitte (M) und höchstmöglicher Entfernung davon (A). Bei 50 m Rasterweite und 30° Steigung liegt z bei ca. 20 m.

liegt[19]. Unter der Annahme, dass bebaubare Hänge kaum steiler als 30 Grad sind, ergibt sich entsprechend Abbildung 12 für ein 50 × 50 m Raster ein Höhenunterschied von maximal ca. 20 m zwischen einem Standort und der nächsten Rastermitte. Das entspricht gemäß obigen Überlegungen einem Schneelastunterschied von maximal 0.2-0.3 kN/m^2. Diese Werte wiederum liegen im Bereich der oben diskutierten Methodengenauigkeit oder darunter.

Folglich scheint ein 50 × 50 m Raster eine gute Auflösung zu bieten: Einerseits ist sie genau genug um auch im stark gegliederten Gelände keine „Sprünge“ zwischen zwei Rasterzellen zu provozieren, die jenseits der Methodengenauigkeit liegen. Andererseits ist sie grob genug für einen annehmbaren Rechenaufwand. Des weiteren entspricht 50 × 50 m einer hinreichend guten räumlichen Auflösung für die Baubranche, denn nur selten ist ein Gebäudegrundriss größer als 50 × 50 = 2500 m^2.

6. Ergebnisse

Viele der bereits unter „Methoden“ (Abschnitt 5) erwähnten Details können als Ergebnisse des Projekts ***Schneelast.Reform*** angesehen werden. Hier eine Zusammenfassung:

- Mangels einer entsprechend großen Zahl an langjährigen Schneelast- bzw. Schneewasserwert-messungen ist es weiterhin sinnvoll, die Schneelastkarte für die Schneelastnorm auf den vielerorts und jahrzehntelang vorhandenen **Schneehöhenmessungen** aufzubauen.
- Die in Abbildung 5 dargestellte **Methodenkette** ist geeignet um eine Schneelastkarte zu erstellen: hohe Zahl an qualitätsgeprüften Schneehöhendaten → ΔSNOW → simulierte Schneelasten → Extremwertmodellierung mittels GEV → Interpolation mittels GAM. Nachvollziehbarkeit und Transparenz sind gegeben, Genauigkeiten können zumindest grob angegeben werden und entscheidende Bausteine konnten in einschlägigen Fachjournalen veröffentlicht werden (SCHELLANDER u. a., 2021; WINKLER u. a., 2021). Zusammen mit dem eigens für das Projekt zusammengetragenen und korrigierten Schneehöhen-Datensatz steht die Methodik somit für andere Anwendungen zur Verfügung – nicht zuletzt auch als Vorschlag für die Nachbarstaaten: Wenn es dort Bestrebungen für eine Neubemessung von s_k gibt, könnten durch die Anwendung dieser oder ähnlicher Methoden „Sprünge“ von s_k an den Ländergrenzen vermieden oder minimiert werden (siehe SCHELLANDER u. a., 2021).
- Die **Werte für die charakteristische Schneelast** s_k der neu erstellten Schneelastkarte zeichnen sich durch einen relativen **Fehler von ungefähr 15-20 %** aus. Die Schneehöhenmessungen halten daran nur einen geringen Anteil. Sie weisen einen Fehler von höchstens ein paar Zentimetern auf, in relativen Zahlen sind das nur wenige Prozent. Mit etwa 15-20 % trägt die Modellierung mit ΔSNOW höchstwahrscheinlich den größten Anteil an der Ungenauigkeit. Wohlgemerkt konnte aber gezeigt werden, dass ΔSNOW im Vergleich zu anderen hier anwendbaren Methoden die genaueste darstellt (siehe WINKLER u. a., 2021). Der relative Fehler der extremwertstatistischen Modellierung liegt im Bereich von höchstens 10-15 %, wenn man das 75 %-Konfidenzintervall heranzieht, welches wiederum für die endgültig festgelegten, normativen Werte für s_k eine Rolle

[19] Meistens liegt dieser Gradient unter 0.5 kN/m^2 pro 100 Höhenmeter.

spielt (siehe unten). Schwierig zu bemessen ist der Fehler, der durch die flächige Modellierung mittels GAM entsteht. Tests (siehe Abschnitt 7) geben allerdings Grund zur Annahme, dass die Anwendung der GAMs so manche Probleme, die durch für die Umgebung nicht hinreichend repräsentative Punkt-Schneemessungen entstehen, sogar abfedern können (in der Art von „borrowing strength“ oder „borrowing information“; vergleiche Bradley & Morris (1977)). In anderen Worten: Mehrere gute bzw. gut extremwertstatistisch auswertbare Schneemessreihen in einer Region scheinen Unsicherheiten, die durch eine weniger gute Messreihe entstehen, zu einem gewissen Grad kompensieren zu können. Die Genauigkeit der GAM-Interpolation dürfte ebenso unter 10-15 % liegen (siehe Tabelle 4).

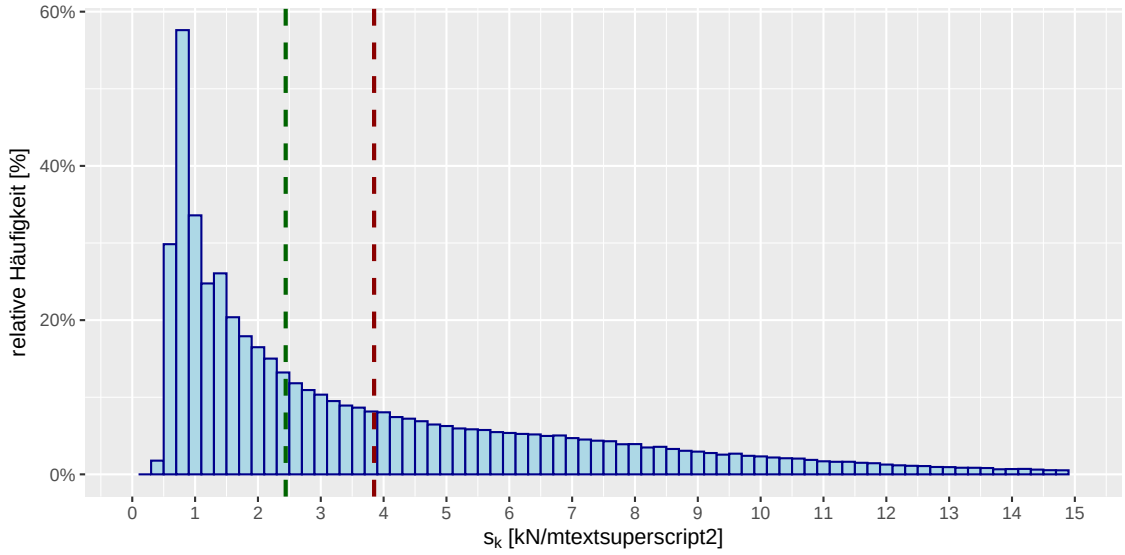

Abbildung 13: Verteilung der Werte für s_k in Österreich (unter 2000 m). Das arithmetische Mittel liegt bei 3.85 kN/m^2 (rote Linie), der Median bei 2.44 kN/m^2 (grüne Linie). Für jeweils weniger als 1 % der Fläche beträgt s_k weniger/mehr als 0.55 kN/m^2 bzw. 16.22 kN/m^2. Die Balkenbreite beträgt 0.2 kN/m^2

Quantile [%]	1	10	25	40	50	60	75	90	99
s_k [kN/m^2]	0.55	0.76	1.13	1.79	2.44	3.41	5.53	8.99	16.22

Tabelle 5: Diese Tabelle zeigt die Quantile von s_k: 50 % der Werte liegen zwischen 1.13 kN/m^2 und 5.53 kN/m^2.

- Die neue Methodik mündet in einem Ergebnis, das deutlich genauer ist als die Grundlage der Vorgängernormen (ON, 2006 und folgende), welche nach objektiven Maßstäben im Mittel zu hohe s_k-Werte vorsehen (siehe Abbildung 9). Im Unterschied dazu liegt der mittlere Bias der ***Schneelast.Reform***-Methode zur flächenhaften Darstellung von s_k innerhalb der Methodengenauigkeit. Es gibt im Vergleich mit den ΔSNOW- und GEV-modellierten, punktuellen 50-jährlichen Schneelasten an den Messorten **keine nennenswerte systematische Abweichung**. Das ist ein wesentlicher Fortschritt für die Erstellung einer Schneelastkarte. Wohlgemerkt unterliegen die punktuellen GEV- und ΔSNOW-Berechnungen ihrerseits möglicherweise einem systematischen Fehler. Unter 5.1.1 wurde darauf hingewiesen, dass durch die Anwendung von ΔSNOW eine leichte Unterschätzung von s_k zu erwarten ist. Mangels ausreichender Schneewasserwertmessungen gibt es aber keine Werte, anhand derer man dieses Problem quantifizieren könnte. Abbildung 13 zeigt die Verteilung der neu bestimmten Werte von s_k für ganz Österreich. In Tabelle 5 sind einige Quantile aufgelistet.
- Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird empfohlen, für das Raster einer überarbeiteten Schneelastkarte eine **Auflösung von 50 × 50 m** zu wählen (Abbildung 12).
- Außerdem wird eine Rundung von s_k auf 0.1 kN/m^2 empfohlen. Die Angabe von mehr als einer Kommastelle für die Schneelast in kN/m^2 suggerierte eine Genauigkeit, die nicht gegeben ist.

Weitere Ergebnisse des Projekts ***Schneelast.Reform*** bzw. daraus abgeleitete Empfehlungen für das Austrian Standards International Komitee ON-AG 176 09 („Schneelast-Ausschuss"), die letztlich alle angenommen wurden und in ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) Eingang gefunden haben:

- Nachdem die Datenlage bis etwa **2000 m Seehöhe** ausreichend gut ist, gibt es keinen objektiven Grund, die Gültigkeit der Schneelastkarte auf Seehöhen unter 1500 m zu beschränken und für höher gelegene Standorte ein Gutachten zu fordern, wie das bei den Vorgängernormen üblich war. Dies bedeutet, dass für alle[20] dauernd besiedelten Bereiche Österreichs ein (normativer) Wert für s_{k} zur Verfügung steht.

- Die Methodik ist dafür geeignet, auch andere Jährlichkeiten für die Schneelast anzugeben. Deshalb wurden neben einer Karte für s_{k} auch Karten für das **25- und das 100-jährliche Schneelastereignis** (s_{25} und s_{100}) produziert. Diese Werte sind auf https://hora.gv.at abrufbar und die ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) enthält entsprechende Anwendungsvorschriften. Damit wurde ein Regelwerk geschaffen, das die sehr fragwürdige Umrechnung des Eurocode EN 1991-1-3:2016-01 (CEN, 2016, Anhang D), die s_{k} in Schneelastwerte anderer Jährlichkeiten überführen soll, obsolet macht (siehe ASI, 2022, Anhang C).
- Wie oben erwähnt und unter 5.1.1 festgestellt, dürfte die ΔSNOW-Modellierung eine leichte Unterschätzung von s_{k} bewirken. Nachdem ein normatives Produkt nach Möglichkeit konservativ ausgestaltet sein sollte, wurde empfohlen, nicht die Erwartungswerte für s_{k} an sich für die Schneelastkarten heranzuziehen, sondern jeden Rasterwert um sein entsprechendes 75 %-Konfidenzintervall zu erhöhen. Die Berücksichtigung dieses Schwankungsbereichs ist auch in anderen Bereichen der Baubranche üblich. Trotz dieser „Sicherheitsmaßnahme" sind die Werte der neuen Schneelastkarte im arithmetischen Mittel um 0.81 kN/m^2 (28 %) und im Median um 0.74 kN/m^2 (32 %) niedriger als die Werte ihrer von 2006 bis 2022 gültigen Vorgängerinnen. Es gibt aber auch Bereiche, für die die Werte der ÖNORM 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) höher ausfallen (siehe Abbildung 16 und Abbildung 17).

Wesentliche Projektergebnisse stellen auch die im Rahmen von ***Schneelast.Reform*** erstellten Veröffentlichungen dar. Der folgende Unterabschnitt 6.1 gibt einen Überblick und ergänzt, was (innerhalb der Projektlaufzeit) an Öffentlichkeitsarbeit geleistet werden konnte. Allen voran ist die aktualisierte, seit Mai 2022 gültige österreichische Schneelastnorm ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) zu nennen. In der Diskussion mit dem Komitee ON-AG 176 09 wurde entschieden alle oben genannten Empfehlungen in die Norm einfließen zu lassen. Damit steht nun ein national und international bisher einzigartiges Normen-Produkt zur Verfügung, bei dem auf zukunftsweisende Art und Weise moderne Methoden zu einem digitalen Kartenprodukt geführt haben, auf das sich die Norm nicht nur explizit bezieht, sondern ohne dem diese nur sehr eingeschränkt anwendbar wäre.

6.1. Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts *Schneelast.Reform*

- **Schneelastkarte** der österreichischen Schneelastnorm ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022), verfügbar
  - online als interaktive Karte auf https://hora.gv.at und
  - als GeoTIFF auf Anfrage und unter Wahrung des Copyrights unter schneelast@geosphere.at.
- **Peer-reviewed Artikel**
  - WINKLER u. a. (2021)
  - SCHELLANDER u. a. (2021)
  - MATIU u. a. (2021)
- Teile der **Dissertation** von SCHELLANDER (2020)
- **Kapitel** in „ExtremA 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich": WINKLER u. a. (2020)
- **Code** des SWE-Modells ΔSNOW: https://cran.r-project.org/web/packages/nixmass (SCHELLANDER & WINKLER, 2021)

[20] Einzig die Rofenhöfe in Vent/Tirol (Seehöhe 2011 m) liegen über dieser Grenze. Für unmittelbar an diesen Weiler angrenzende Bereiche auf 2000 m wird s_{k} = 8.0 kN/m^2 modelliert.

- **Tagungsbeiträge:**
  - „forumBau 2019“ (Vortrag, Wels, 26.11.2019, *Extremes Wetter und Schneelast in Zukunft*)
  - „SnowHydro: Conference on Snow Hydrology – Challenges in Mountain Areas“ (oral presentation, Eurac Bozen, 29.1.2020, *Snow water equivalents exclusively from snow heights and their day-to-day changes*
  - WINKLER & SCHELLANDER (2020a, 2020b)
  - WINKLER & SCHELLANDER (2021)
- **Online-Präsentationen**
  - EUMeTrain Snow Event Week 2021 (11.02.2021) http://www.eumetrain.org/resources/snow_ew_2021_s7a.html (zuletzt abgerufen: 21.06.2022)
  - WetterZOOM – online Vortragsreihe der ZAMG (03.03.2021)
- **Sonstiges:**
  - Telefon-Interview zu *Schneelasten und Dachlawinen* (13.11.2019, im Auftrag der Wirtschaftskammer Österreich, durchgeführt von FOCUS Institut Feldforschungs Ges.m.b.H.)
  - ZAMG Newsletter (15.01.2019) https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/stellenweise-neuschneerekorde (zuletzt abgerufen: 21.06.2022)
  - Blogeintrag Alpinmesse–Forum: *Schneereiche Zeiten und was unsere Hauseinfahrten mit Meteorologie zu tun haben* https://www.alpinmesse.info/de/Schneereiche-Zeiten---ein-Jaenner-wie-selten (zuletzt abgerufen: 21.06.2022)
  - ZAMG Newsletter (26.12.2020) https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/news/anfang-der-woche-starker-schneefall-im-sueden-aber-nicht-so-extrem-wie-anfang-dezember (zuletzt abgerufen: 21.06.2022)

6.2. Kartendarstellungen

Seit Bestehen der österreichischen Schneelastnormen (ca. Ende der 1950er Jahre) bilden sogenannte Schneelastkarten deren Basis. 1983 wurde erstmals eine Zonenkarte eingeführt (ON, 1983), 2006 wurde diese grundlegend verändert (ON, 2006)[21]. Die jüngste Schneelastnorm mit Zonenkarte ist die ÖNORM B 1991-1-3:2018 (ASI, 2018), die von 2018 bis 2022 gültig war und in Abbildung 14 abgebildet ist. Sie weist vier Zonen auf, innerhalb derer mithilfe einer Formel für jeden Ort unterhalb von 1500 m ein Wert für die charakteristische Schneelast berechnet werden kann. Außerdem gibt es fünf kleinräumige Sonderzonen über 1500 m und Übergangsbereiche zwischen den Zonen (im Allgemeinen 5 km breit; in Wien 500 m). Die Werte für s_k an sich blieben von 2006 bis 2018 unverändert, im Zuge der Digitalisierung der Karte (2018) wurden allerdings die Sonderzonen und Übergangsbereiche klar definiert[22].

Abbildung 15 zeigt das praktische Endergebnis von ***Schneelast.Reform***. Es sind die Werte von s_k dargestellt, so wie sie auch in ÖNPORM B 1991-1-3:2022-05 veröffentlicht wurden. Gebiete über 2000 m Seehöhe sind weiß, weil dort – wie angegeben – keine Werte definiert wurden. Man sieht die naturgemäß sehr starke Seehöhenabhängigkeit der charakteristischen Schneelast. Dass es darüber hinaus allerdings auch eine wesentliche räumliche Abhängigkeit gibt, ist z. B. beim Vergleich verschiedener, an die 2000 m-Marke grenzender Gebiete zu erkennen: Im inneralpinen Raum, etwa zwischen Reschenpass und den Hohen Tauern, liegen die Werte für s_k nahe der 2000 m-Marke bei 6-9 kN/m^2 (violette Färbung in Abbildung 15). In den schneereichen Alpenrandgebieten, wie z. B. im Bregenzerwald oder im Dachsteingebiet liegt das Ergebnis für s_k an dieser Höhenmarke bei teils deutlich über 10 kN/m^2 (graue Färbung in Abbildung 15).

7. Diskussion

Ungeachtet dieser Vorteile und positiver Eigenschaften der Schneelastkarte der ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) gab und gibt es seit Beendigung des ***Schneelast.Reform*** Projekts (Ende 2020)

[21] Einen Abriss zur Geschichte der österreichischen Schneelastnorm geben WINKLER u. a. (2020).
[22] In den Normen ON (2006) und ASI (2013) gab es in diesen beiden Punkten Anlass für Missverständnisse.

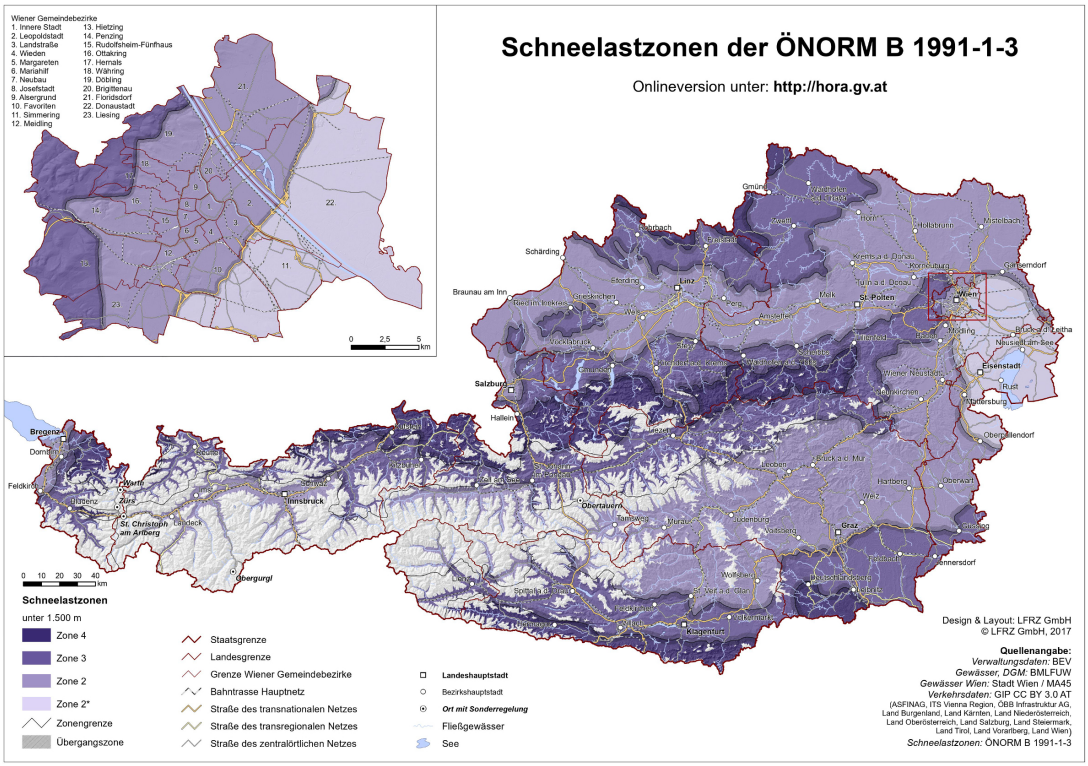

Abbildung 14: Die Schneelastkarte der ÖNORM B 1991-1-3:2018, die auch in digitaler Form zur Verfügung stand. Die Werte der charakteristischen Schneelast s_k waren indes dieselben wie in den 2006 und 2013 veröffentlichten Vorgängernormen (ÖNORM B 1991-1-3:2006 bzw. ÖNORM B 1991-1-3:2013). Weitere Details siehe Text.

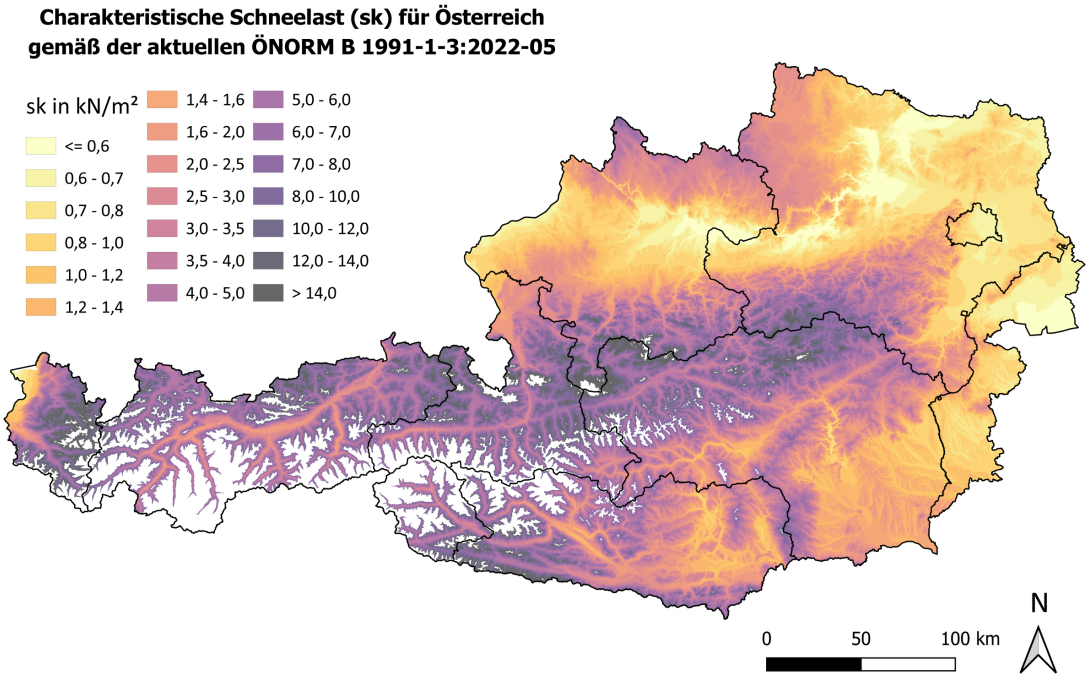

Abbildung 15: Hier ist das für die Praxis wohl relevanteste Ergebnis des ***Schneelast.Reform*** Projekts abgebildet: die Österreichkarte mit den Werten für die charakteristische Schneelast s_k, also die 50-jährliche Schneelast am Boden.

einige Aspekte, die zu Diskussion und Kritik anreg(t)en. Die folgende Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll illustrieren, dass die geäußerten Bedenken nicht berechtigt waren oder zumindest keine strukturelle Schwäche der neuen Schneelastkarte offenbarten, insbesondere nicht im Vergleich zu den deutlich ungenaueren Vorgänger-Normen und auch nicht im Vergleich mit den Schneelastnormen anderer Länder.

Eine naheliegende und berechtigte Forderung an eine neue Schneelastkarte ist die **Miteinbeziehung des Klimawandels**, zumal Gebäude, die auf Basis der aktuellen Norm gebaut werden, möglicherweise auch in stark verändertem (Schneelast-)Klima noch bestehen werden. Es gibt Analysen historischer Trends und auch Projektionen für zukünftige Klimasituationen im Alpenraum für mittlere Schneehöhen (z. B. Matiu u. a., 2021). Für Schneewasserwerte bzw. Schneelasten gab es während der Projektlaufzeit (und gibt es auch aktuell noch) deutlich weniger Studien, aber in diesem Bereich wird intensiv geforscht (siehe z. B. Colombo u. a., 2022 für den italienischen Alpenraum). Noch dürftiger ist die derzeitige Erkenntnislage zur zukünftigen Entwicklung entsprechender **Extrema**. Erste Ansätze (Croce u. a., 2021; z. B. Le Roux u. a., 2020) standen für ***Schneelast.Reform*** noch nicht zur Verfügung. Eigene Untersuchungen zu dem Thema für Österreich hätten den Rahmen des ***Schneelast.Reform*** Projekts gesprengt. Zumindest die eventuell bereits stattgefundene klimabedingte Veränderung der extremen Schneelasten konnte durch die Wahl von möglichst aktuellen Daten berücksichtigt werden (Abschnitt 4). Damit wurde die allgemeine Forderung nach Berücksichtigung des Klimawandels, die wahrscheinlich im nächsten Eurocode (siehe Entwurf „prEN 1991-1-3:2023“ sowie CEN, 2020) erstmalig artikuliert sein wird, weitestmöglich berücksichtigt. Darüber hinausgehende Betrachtungen seien der nächsten Generation von Schneelastkarten vorbehalten.

**Charakteristische Schneelast (sk) für Österreich.
Vergleich der aktuellen ÖNORM B 1991-1-3:2022-05
mit der Vorgängernorm (gültig 2006 bis 2022).**

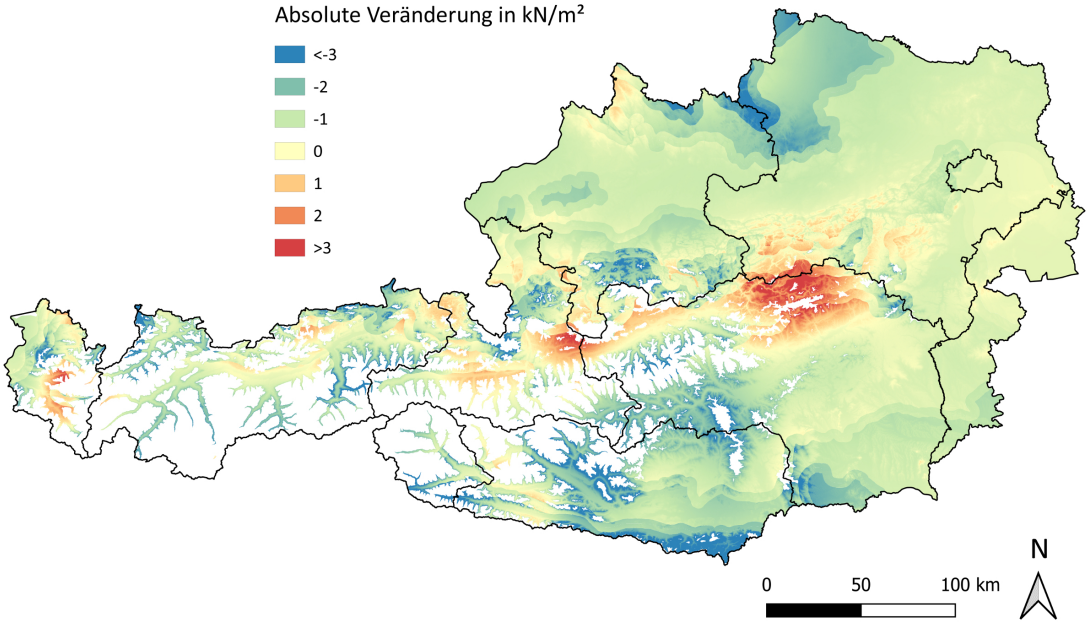

Abbildung 16: Absoluter Unterschied in der charakteristischen Schneelast s_k zwischen ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 und ihren Vorgängerinnen (ÖNORM B 1991-1-3:2006-04 bis ÖNORM B 1991-1-3:2018-12) in kN/m^2. Negative Werte signalisieren eine Abnahme, d. h. die Werte der ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 sind niedriger als die ihrer Vorgängerinnen. Im arithmetischen Mittel und im Median für ganz Österreich ergibt sich eine Abnahme von 0.81 kN/m^2 bzw. 0.74 kN/m^2. Die Differenz für Flächen über 1500 m Seehöhe ist nicht definiert und daher weiß dargestellt, weil es vor 2022 für diese Höhen keine normativen Werte gab.

Zudem ergab sich einige Kritik, die auf dem Vergleich der „neuen“ und der „alten“ Schneelastkarten basiert. Hierzu darf daran erinnert werden, dass im Rahmen des ***Schneelast.Reform*** Projekts erstmalig Anstrengungen unternommen wurden, die Genauigkeit der Werte für s_k festzustellen. Insbesondere in Unterabschnitt 5.4 wurde dargelegt, dass die während ***Schneelast.Reform*** entwickelte und in ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) Eingang gefundene Methodik deutlich genauer und nachvollziehbarer ist als alle bisher angewandten Methoden. Damit ist klar, dass die Differenzen, die zwischen den

Schneelastkarten von ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) und ihren Vorgängerinnen bestehen (siehe Abbildung 16 und Abbildung 17), vor allem auf die Ungenauigkeit der „alten“ Darstellungen für s_k zurückzuführen sind.

Pauschale Kritik der Art: „Die neue Bemessung von s_k kann nicht akzeptiert werden, da sie sich so stark von der alten unterscheidet.“, muss daher entschieden zurückgewiesen werden, denn in diesen Fällen war die „alte“ Bemessung mit sehr großer Wahrscheinlichkeit unrichtig. Im Allgemeinen muss bzw. darf davon ausgegangen werden, dass s_k der ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) deutlich näher an der „Wahrheit“ liegt, als alle älteren Werte. Im Mittel liefert die ***Schneelast.Reform***-Methodik erwiesenermaßen genauere Ergebnisse als frühere Vorgehensweisen (siehe Unterabschnitt 5.4).

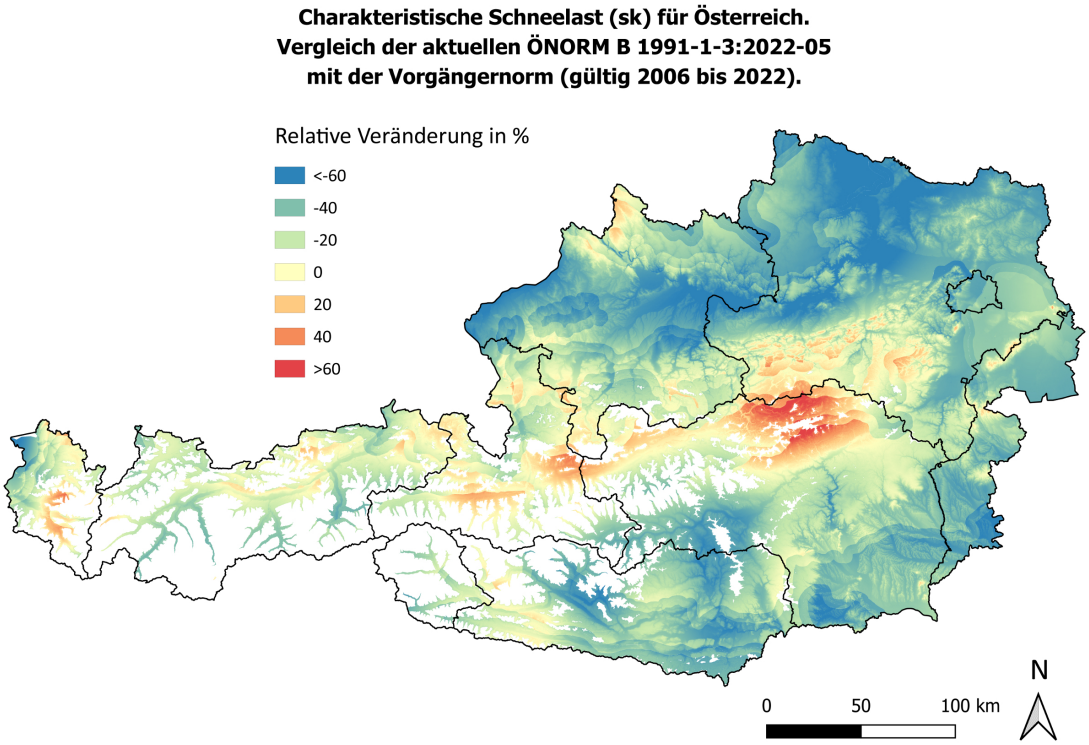

Abbildung 17: Relativer Unterschied in der charakteristischen Schneelast s_k zwischen ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 und ihren Vorgängerinnen (ÖNORM B 1991-1-3:2006-04 bis ÖNORM B 1991-1-3:2018-12), bezogen auf ÖNORM B 1991-1-3:2018-12, in %. Negative Werte signalisieren eine Abnahme, d.h. die Werte der ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 sind niedriger als die ihrer Vorgängerinnen. Im arithmetischen Mittel und im Median für ganz Österreich ergibt sich eine Abnahme von 28 % bzw. 32 %. Die Differenz für Flächen über 1500 m Seehöhe ist nicht definiert und daher weiß dargestellt, weil es vor 2022 für diese Höhen keine normativen Werte gab.

Im Einzelfall bleibt eine fehlerhafte Modellierung von s_k möglich. Bedenken von Anwendern konnten jedoch in vielen Fällen ausgeräumt werden. Im Folgenden sind – ohne Anspruch auf Vollständigkeit – einige konkrete, ortsbezogene Kritikpunkte, die seit Veröffentlichung der Norm geäußert wurden, aufgelistet.

- Im Zentrum von **Klagenfurt** (450 m Seehöhe) ist das Ergebnis für die 50-jährliche Schneelast am Boden s_k = 1.5 kN/m^2. Laut ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018) waren 2.65 kN/m^2 anzunehmen. Das entspricht einer beachtlichen „Reduktion “ von 1.15 kN/m^2 bzw. 43 % und seitens eines Anwenders wurde dieses Ergebnis verständlicherweise kritisch hinterfragt.
  Ein Blick auf die Schneedaten aus Klagenfurt zeigt, dass es dort seit 1950 dreimal über 60 cm, viermal über 50 cm und weitere fünfmal genau 50 cm Schnee gegeben hat. Außerdem gibt es einen großen Ausreißer: Am 15. Februar 1952 wurden 106 cm gemessen, was als ein über 300-jährliches Ereignis eingeordnet werden muss. Dieser Messwert darf trotzdem als realistisch angesehen werden, denn z. B. im nahen Villach wurden am selben Tag 110 cm registriert, wobei dieser Wert dort keinen derart extremen Ausreißer darstellt. Die 50-jährliche Schneehöhe liegt in Klagenfurt bei ca. 78 cm ($\pm$ ca. 10 cm). Nimmt man in erster Näherung an, so eine Schneehöhe würde zur errechneten 50-jährlichen Schneelast von 1.5 kN/m^2 führen, müsste man eine mittlere Dichte

von ca. 200 kg/m^3 ($\pm$ ca. 25 kg/m^3) annehmen. Das ist in dieser Lage und Seehöhe ein durchaus realistischer Wert. Für 2.65 kN/m^2 (ÖNORM B 1991-1-3:2018-12) müssten ca. 350 kg/m^3 ($\pm$ ca. 50 kg/m^3) angenommen werden, was bedeuten würde, dass die 50-jährliche Schneehöhe erreicht würde bei gleichzeitig stark gesetztem und verfestigtem oder durchfeuchtetem Schnee. Das ist höchst unwahrscheinlich und der Wert der alten ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018) damit eindeutig zu hoch. Die neue Schneelastkarte bildet die tatsächlichen Verhältnisse in Klagenfurt eindeutig besser ab.

- In **Lienz** (670 m Seehöhe) ergibt die neue Berechnung s_k = 3.0 kN/m^2, gemäß ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018) waren 3.6 kN/m^2 anzunehmen. Diese „Reduktion " ist nicht allzu groß, jedoch gab es im Dezember 2020 in der Region extreme Schneefälle, die besonders in Lagen unter 1100 m zu außergewöhnlichen Schneelasten führten. (Auch darüber waren die Schneelasten enorm, aber in diesen höheren Lagen ist dies nicht so etwas Besonderes.)
  Tatsächlich wurden Mitte Februar 2021 – nach einigen weiteren Schneefällen war dies mit großer Sicherheit der Zeitpunkt der maximalen Schneelast in Lienz – 3.9 kN/m^2 gemessen, in den nahe gelegenen Orten Tristach und Leisach gar 4.1 bzw. 4.6 kN/m^2. Damit wurden alte Normwerte überschritten und auch die neue Berechnung geriet in Kritik. Allerdings wurde festgestellt, dass es sich damals um ein etwa 150-jährliches Ereignis gehandelt hat. Wenn das Ergebnis für s_k aus dem ***Schneelast.Reform*** Projekt korrekt ist, *muss* es daher unter diesen Messwerten liegen. In den Daten, die für das Projekt verwendet wurden, war der Extremwinter 2020/21 nicht enthalten, denn jene endeten 2019. Tatsächlich zeigt sich aber, dass sich das Ergebnis für s_k von Lienz auch unter Miteinbeziehung dieser außergewöhnlichen Werte des Winter 2020/21 nur um 0.1 bis höchstens 0.2 kN/m^2 nach oben verändert.

- Am **Pass Thurn** (1274 m Seehöhe) ergibt sich für s_k laut ***Schneelast.Reform*** ein Wert von 4.9 kN/m^2. Die Gegend gilt als grundsätzlich schneereich, daher erschien dieser Wert als gering. Insbesondere der Vergleich zum nahen Glemmtal (Hinterglemm: 1150 m Seehöhe; Saalbach: 1000 m Seehöhe; beide s_k = 6.0 kN/m^2) wirft die Frage auf, ob hier möglicherweise fehlerhafte Daten eingeflossen sind oder die Methodik versagte.
  Völlig klären ließ sich dieser Umstand auch nach geflissentlicher Überprüfung der Daten bzw., ob jene auch umfänglich in die Berechnungen eingeflossen sind, nicht. Die Daten sind gut und wurden zur Berechnung herangezogen. Möglicherweise ist das Nord-Süd verlaufende oberste Leukental mit dem Pass Thurn als dessen südlichen Ausgang einfach deutlich weniger schneereich als das Ost-West verlaufende Glemmtal. Diese Einschätzung könnte durch den Umstand weiter gestützt werden, dass auch die westlichen Paralleltäler des Leukentals (Kelchsau, Windautal, Spertental) laut ***Schneelast.Reform*** relativ geringe Werte für s_k aufweisen. Ein Versagen der Methode ist jedenfalls nicht zu erkennen.

- In **Wien** liegt das 50-jährliche Schneelastereignis laut den neuen Berechnungen meist bei 0.7 kN/m^2, Richtung Wienerwald bei bis zu 1.0 kN/m^2. Im Vergleich zur bisher gültigen ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018), die ein s_k von 1.1-1.8 kN/m^2 angibt, wirken diese Werte gering. Die Datenanalyse zeigt wenig überraschend, dass die höchsten in Wien gemessenen Schneehöhen kaum über 40 cm liegen, in höheren Lagen nahe des Wienerwalds bei höchstens 70 cm. Analoge Überlegungen wie jene, die oben zu Klagenfurt angestrengt wurden, legen nahe, dass die Neuberechnungen von s_k auch in Wien realistischer sind als Werte jenseits von 1.0 kN/m^2.

- Wie oben (Abschnitt 6) erwähnt, sind die Werte der neuen ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022), die auf den Ergebnissen des Projekts ***Schneelast.Reform*** beruhen, durchschnittlich um 0.81 kN/m^2 geringer als die der ÖNORM B 1991-1-3:2018-12 (ASI, 2018). Nichts desto trotz gibt es Bereiche, wo das Gegenteil der Fall ist. Am augenscheinlichsten ist die **Erhöhung in der nördlichen Steiermark**, nördlich von Leoben, insbesondere rund um das Salzatal, wo sie bis zu über 3 kN/m^2 bzw. über 60 % ausmacht.
  Zum einen darf in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen werden, dass die höchsten Abweichungen in unbewohnten, alpinen Bereichen auftreten. Diese Bereich sind nicht selten stark windbeeinflusst und als exponiert zu betrachten. Hierfür gilt gemäß ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022, Anhang B) folgende Feststellung:

  „Des Weiteren wird in folgenden Fällen das Einholen eines Schneelastgutachtens empfohlen:
  – für exponierte Standorte, insbesondere oberhalb der Waldgrenze, an denen gemäß Karte der charakteristischen Schneelast ein sehr hoher Wert von s_k anzusetzen wäre;

– für mutmaßlich stark vom Wind beeinflusste Bereiche im alpinen Raum (z. B. Rinnen- oder Muldenlagen, Gipfelbereiche, Kammlagen)."

Im Falle der deutlich nach oben korrigierten Werte für s_k in der nördlichen Steiermark gilt außerdem, dass in den Vorgängernormen klar übersehen wurde, die Lastzonen 3 und 4 nach Süden auszudehnen (vgl. Abbildung 14). Analysen von Schneedaten belegen: **Die Region ist deutlich schneereicher als angenommen.** Insofern stellt die neue Berechnung eine **Richtigstellung** dar.

- Sachliche, aber durchaus harsche Kritik erreichte die Autoren von ***Schneelast.Reform*** aus dem **Waldviertel**, insbesondere zu den s_k-Werten im Raum Krems. Die Werte seien viel zu niedrig. Außerdem seien die starken Schwankungen zwischen den verschiedenen Normen seit den 1960ern sehr groß, nicht nachvollziehbar und gegenüber Bauherren u. dgl. nicht argumentierbar. Es stimmt, die Werte für s_k sind in dieser Gegend ausgesprochen niedrig, häufig liegen sie unter 0.5 kN/m^2. Auch die „Reduktion" durch das Inkrafttreten der ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) ist mit bis zu über 60 % besonders groß.
  Zum einen ist die Gegend um und südlich der Thaya die trockenste Österreichs und ausgesprochen schneearm. Eine Analyse der langjährigen Schneedaten aus Krems zeigt, beispielsweise, dass hier in den letzten 75 Jahren nur dreimal über 30 cm Schnee lagen, der Höchstwert beträgt 40 cm. Werte um 0.4 kN/m^2 für das 50-jährliches Schneelastereignis erscheinen vor diesem Hintergrund nicht als fragwürdig, sondern als sehr realistisch. Des weiteren kann mangels nachvollziehbarer Methodik kein eindeutiger Grund für die Schwankungen zwischen den Normen während der letzten Jahrzehnte dingfest gemacht werden. Die Verantwortung dafür bei den Ersteller·innen der aktuellen, erstmals nach möglichst objektiven Kriterien erstellten Norm zu suchen, ist nicht zielführend. Mutmaßlich sind die Schwankungen hauptsächlich zufällig entstanden, insbesondere durch die unterschiedliche Ziehung von Zonengrenzen. Soweit es die von 2006 bis 2022 gültige Schneelastkarte der Vorgängerinnen der ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) betrifft, muss kritisiert werden, dass der damaligen Ausweisung der Region als Zone 4 die Datengrundlage gänzlich fehlt, und auch die Zone 3 hätte sich wohl besser nicht ost- und südostwärts über den Raum Gmünd hinaus erstrecken sollen (vgl. Abbildung 14).

- Seit Inkrafttreten der ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) im Mai 2022 wurde ihr und der dahinterstehenden Methodik international viel Aufmerksamkeit geschenkt. In Deutschland gibt es konkrete Bestrebungen, das dortige Pendant, die DIN EN 1991-1-3/NA:2019-04 (DIN, 2019), nach österreichischem Vorbild weiter zu entwickeln. Die Anwendung einer vergleichbaren Methodik hätte auch den großen Vorteil, dass „Sprünge" an den Ländergrenzen weitgehend vermieden oder zumindest deutlich reduziert werden könnten. In diesem Zusammenhang ist es verständlich, dass die für die eidgenössische Schneelastnorm Verantwortlichen des Schweizer Instituts für Schnee- und Lawinenforschung hellhörig wurden, als die Werte für s_k im **österreichisch-schweizerischen Grenzgebiet** entlang des Rheins veröffentlicht wurden. Schließlich war s_k an der Mündung des Alten Rheins im Bereich **Altenrhein (CH) bis Lustenau (AT)** (ca. 400 m Seehöhe) auf österreichischer Seite bis 2022 mit 1.65 kN/m^2 bemessen. Seitdem die ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) gültig ist, beträgt s_k hier nur mehr 0.6 kN/m^2, was einer Abminderung um 64 % entspricht. Der Wert auf der schweizerischen Seite beträgt laut SIA (2020) 1.57 kN/m^2. Damit besteht hier aktuell ein großer „Sprung" zwischen Österreich und der Schweiz[23].
  Die wiederholte Analyse der Schneedaten am Rhein im Grenzgebiet Österreich-Schweiz zeigt, dass dort an den langjährigen Schneemessstandorten Werte über 60 cm äußerst selten auftreten, es handelt sich um Ereignisse mit einer Jährlichkeit von etwa 50 oder mehr. In den durchwegs sehr langen Datenreihen tauchen Werte über 40 cm in etwa 10 % der Jahre auf. Ein etwaiger „lake effect" des Bodensees ist in den Daten enthalten. Möglicherweise würde ein besseres Schneemodell, das auch sogenannte „Rain-on-Snow Events" aufzulösen in der Lage ist, höhere Werte für s_k ergeben. Allerdings bleibt dies reine Spekulation und das tatsächliche 50-jährliche Schneelastereignis scheint aufgrund der Datenlage näher an den „österreichischen" 0.6 kN/m^2 (und höher) zu liegen, als an den „schweizerischen" 1.57 kN/m^2 (und höher).

[23] Die Unterschiede weiter südlich am Rhein sind geringer; auch an der gemeinsamen Grenze zwischen Graubünden und Tirol liegen sie meist im Bereich von „nur" 20-30 %.

8. Ausblick

Nicht zuletzt die in Abschnitt 7 aufgezeigten Überlegungen zu den Gebieten am Rhein, im Waldviertel und auch in Wien motivieren zur Diskussion einer normativen **Untergrenze für die charakteristische Schneelast** s_{k}: Nachdem Normen grundsätzlich konservativen Charakter aufweisen sollten, könnte es sinnvoll sein, ein kleinstes anzunehmendes s_{k} zu definieren. Dieses würde wohl im Bereich um 0.5 kN/m^2 bis 0.8 kN/m^2 angesiedelt sein. Die Diskussion wird für die nächste Novelle der ÖNORM B 1991-1-3 in der ON-AG 176 09 des Austrian Standards International zu führen sein.

Aktuell (Mai 2023) ist eine neue EN 1991-1-3 in Ausarbeitung. Der Entwurf dazu (prEN 1991-1-3:2023) wird gerade in den nationalen Gremien diskutiert. Es ist zu erwarten, dass nationale Anhänge, die auf die erneuerte EN 1991-1-3 Bezug nehmen, in den Jahren um 2025 folgen werden. Im Entwurf ist ein eigenes Anhangskapitel dem Umgang mit dem **Klimawandel** gewidmet. Außerdem wird darauf verwiesen, dass „Schneekarten regelmäßig aktualisiert werden [sollten], vorzugsweise alle 20 Jahre“. Die aktuell gültige ÖNORM B 1991-1-3:2022-05 (ASI, 2022) fußt auf der Schneelastkarte des ***Schneelast.Reform*** Projekts, in dem wiederum Daten bis 2019 verwendet wurden. Das Wissen um die Entwicklung der zukünftigen Schneelasten im Alpenraum schreitet derzeit ebenso rasch voran wie der Ausbau der Möglichkeiten des Umgangs mit zukünftigen Extrema. Beides motiviert dazu, mit der Erstellung der nächsten Generation von Schneelastkarten nicht allzu lange zu warten. Dies bedeutet, dass entsprechende Projekte wohl ab der zweiten Hälfte der 2020er-Jahre initiiert werden sollten, damit zu Beginn der 2030er-Jahre eine neue Schneelastnorm für Österreich entwickelt werden kann, die den klimawandel-bedingten Anforderungen gerecht wird.

9. Danksagung

Tobias Hell (Institut für Mathematik, Universität Innsbruck) hat essentielle Beiträge zur Extremwertmodellierung geliefert und nicht zuletzt bei der Erstellung der Schneelast-Karten maßgeblich mitgewirkt, vielen Dank dafür. Außerdem möchten sich die Autoren bei Gilbert Kotzbek und Manuel Illmeyer (beide Land-, forst- und wasserwirtschaftliches Rechenzentrum GmbH, Wien) bedanken, die ebenso maßgeblich an der Kartenerstellung beteiligt waren. Danke an Alexander Radlherr und Susanne Drechsel (GeoSphere Austria, Innsbruck) für viele wertvolle Diskussionen und ihre große Unterstützung bei der Datenbearbeitung. Nicht zuletzt gilt dem „Schneelast-Ausschuss“ (ON-AG 176 09 des Austrian Standards International) Dank für die produktive Mitarbeit, durch die aus der „anwendungsorientiert-wissenschaftlichen“ Beschäftigung mit Österreichs extremen Schneelasten ein „normtaugliches“ Produkt entstehen konnte.

Dieses Dokument wurde mit R Markdown (bookdown package: https://bookdown.org) erstellt; unter Verwendung dieser Vorlage: Sébastien Rochette, pdfreport (2018), GitHub repository, https://github.com/statnmap/pdfreport.

10. Literaturverzeichnis

ASI: *ÖNORM B 1991-1-3:2013-09*. Vienna, Austria : Austrian Standards Institute, 2013

ASI: *ÖNORM B 1991-1-3:2018-12*. Vienna, Austria : Austrian Standards Institute, 2018

ASI: *ÖNORM B 1991-1-3:2022-05*. Vienna, Austria : Austrian Standards International, 2022

Avanzi, F. ; De Michele, C. ; Ghezzi, Antonio: On the performances of empirical regressions for the estimation of bulk snow density. In: *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria* (2015), Nr. 38.2, S. 105–112

Bradley, Efron ; Morris, Carl: Stein's paradox in statistics. In: *Scientific American* Bd. 236 (1977), Nr. 5, S. 119–127

CEN: *EN 1991-1-3:2016-01*. Brussels, Belgium : European Committee for Standardization, 2016

CEN: *SC1.T2; N 1469; Final Draft EN 1991-1-3 "Snow Loads"*. Brussels, Belgium : European Committee for Standardization, 2020

Coles, Stuart: *An introduction to statistical modeling of extreme values*, *Springer Series in Statistics*. London : Springer-Verlag, 2001 — ISBN 1-85233-459-2

Colombo, Nicola ; Valt, Mauro ; Romano, Emanuele ; Salerno, Franco ; Godone, Danilo ; Cianfarra, Paola ; Freppaz, Michele ; Maugeri, Maurizio ; u. a.: Long-term trend of snow water equivalent in the Italian Alps. In: *Journal of Hydrology* Bd. 614 (2022), S. 128532

Croce, Pietro ; Formichi, Paolo ; Landi, Filippo: Extreme Ground Snow Loads in Europe from 1951 to 2100. In: *Climate* Bd. 9 (2021), Nr. 9

DIN: *DIN EN 1991-1-3/NA:2019-04*. Berlin, Germany : Deutsches Institut für Normung e.V., 2019

Gruber, Stefanie: *Modelling snow water equivalent based on daily snow depths*, University of Innsbruck, Master Thesis, 2014

Gruber, Stefanie ; Winkler, Michael ; Schellander, Harald: Modelling snow load from historical snow depth series. In: *Geophysical Research Abstracts*. Bd. 20. Vienna, Austria, 2018, S. EGU2018–3650

Gumbel, Emil Julius: *Statistics of Extremes* : Columbia University Press, 1958

Le Roux, E. ; Evin, G. ; Eckert, N. ; Blanchet, J. ; Morin, S.: Non-stationary extreme value analysis of ground snow loads in the French Alps: a comparison with building standards. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* Bd. 20 (2020), Nr. 11, S. 2961–2977

Martinec, J.: Expected snow loads on structures from incomplete hydrological data. In: *Journal of Glaciology* Bd. 19 (1977), Nr. 81, S. 185–195

Matiu, Michael ; Crespi, Alice ; Bertoldi, Giacomo ; Carmagnola, Carlo Maria ; Marty, Christoph ; Morin, Samuel ; Schöner, Wolfgang ; Cat Berro, Daniele ; u. a.: Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019. In: *The Cryosphere* Bd. 15 (2021), Nr. 3, S. 1343–1382

Olefs, Marc ; Girstmair, Anna ; Hiebl, Johann ; Koch, Roland ; Schöner, Wolfgang: An area-wide snow climatology for Austria since 1961 based on newly available daily precipitation and air temperature grids. In: *Geophysical Research Abstracts*. Bd. 19. Vienna, Austria, 2017, S. EGU2017–12249

Olefs, Marc ; Schöner, Wolfgang ; Suklitsch, Martin ; Wittmann, Christoph ; Niedermoser, Bernd ; Neururer, Alfred ; Wurzer, Arnulf: SNOWGRID - A New Operational Snow Cover Model in Austria. In: *International snow science workshop proceedings 2013*. Grenoble - Chamonix Mont Blanc, France, 2013, S. 38–45

ON: *ÖNORM B 4000-4:1960-10*. Vienna, Austria : Österreichisches Normungsinstitut, 1960

ON: *ÖNORM B 4013:1983-12*. Vienna, Austria : Österreichisches Normungsinstitut, 1983

ON: *ÖNORM B 1991-1-3:2006-04*. Vienna, Austria : Österreichisches Normungsinstitut, 2006

R Core Team: *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria : R Foundation for Statistical Computing, 2019

Radlherr, Alexander ; Winkler, Michael: Comparing Manual Measurements Of Snow Water Equivalent. In: *International Mountain Conference*. Innsbruck, Austria, 2022

Rohrer, M. B. ; Braun, L. N.: Long-Term Records of Snow Cover Water Equivalent in the Swiss Alps. In: *Nordic Hydrology* Bd. 25 (1994), S. 65–78

Schellander, Harald: *On the spatial modeling of meteorological extreme values*, University of Innsbruck, Austria, PhD Thesis, 2020

Schellander, Harald ; Hell, Tobias: Modeling snow depth extremes in Austria. In: *Natural Hazards* Bd. 94 (2018), Nr. 3, S. 1367–1389

Schellander, Harald ; Winkler, Michael: *niXmass - R package*, 2021

Schellander, Harald ; Winkler, Michael: Historical trends of alpine snow water equivalents. In: *International Mountain Conference*. Innsbruck, Austria, 2022

Schellander, Harald ; Winkler, Michael ; Hell, Tobias: Towards a reproducible snow load map – an example for Austria. In: *Advances in Science and Research* Bd. 18 (2021), S. 135–144

Schöner, Wolfgang ; Strasser, Ulrich ; Marty, Christoph: *SNOWPAT: Snow in Austria during the instrumental period - spatiotemporal patterns and their causes - relevance for future snow scenarios* : ACRP Climate; Energy Fund, 2016

SIA: *SN 505261:2020*. Zürich, CH : Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2020

Sturm, Matthew ; Holmgren, Jon: Differences in compaction behavior of three climate classes of snow. In: *Annals of Glaciology* Bd. 26 (1998), S. 125–130

Valt, Mauro ; Romano, Emanuele ; Guyennon, Nicolas: Snowcover density and snow water equivalent in the Italian Alps. In: *Proceedings ISSW*. Innsbruck, Austria, 2018

Winkler, Michael ; Kaufmann, Hildegard ; Schöner, Wolfgang ; Kuhn, Michael: Schnee- und Eislast. In: *ExtremA 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich* : Vienna University Press, 2020 — ISBN 978-3-8471-1092-7, S. 97–122

Winkler, Michael ; Schellander, Harald: Snow Water Equivalents exclusively from Snow Heights and their temporal Change: The ΔSNOW.MODEL. In: *EGU2020–11298*. online, 2020a

Winkler, Michael ; Schellander, Harald: The ΔSNOW.MODEL: A novel model for snow load and water equivalent. In: *Disaster Research Days 2020 - Konferenzband*. Webinar Series : Disaster Competence Network Austria, 2020b, S. 142–145

Winkler, Michael ; Schellander, Harald: Extreme snow loads in Austria. In: *EGU2021–3331*. online, 2021

Winkler, Michael ; Schellander, Harald ; Gruber, Stefanie: Snow water equivalents exclusively from snow depths and their temporal changes: the Δsnow model. In: *Hydrology and Earth System Sciences* Bd. 25 (2021), Nr. 3, S. 1165–1187

Wood, S. N.: *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. 2. Aufl. : Chapman; Hall/CRC, 2017