

Auswertung von Klimadaten aus dem Schweizer Nationalpark

Datenformatierung und Analyse der Stationen
Val Trupchun und Munt Chavagl

Max Mayer

Universität Bern

max.mayer@students.unibe.ch

Bachelorarbeit in der Gruppe Klimatologie, FS2024

Eingereicht am 01.07.2024, Bern

Betreut von Prof. Dr. Stefan Brönnimann
Oeschger-Zentrum für Klimaforschung (OCCR),
Geographisches Institut Universität Bern (GIUB)

Co-betreut von Dr. Stefanie Gubler
Forschungskommission Schweizer Nationalpark (FOK-SNP)

Co-betreut von Dr. Samuel Wiesmann
Geoinformation und ICT
Schweizer Nationalpark (SNP)

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	3
1. Einleitung.....	4
2. Stationen und Standorte	6
2.1. Standortübersicht	6
2.2. Munt Chavagl	6
2.3. Val Trupchun.....	8
3. Materialien	9
3.1. Datenbereitstellung.....	9
3.2. Trupchun	10
3.3. Chavagl.....	13
4. Methoden.....	15
4.1. Datenverarbeitung	15
4.2. Formatierung Chavagl 1995-2024.....	15
4.2.1. Zeitstempel	15
4.2.2. Zuordnung der Parameter	16
4.3. Formatierung und Analyse Trupchun 1993-1997	19
4.3.1. Zeitstempel	19
4.3.2. Analyse Temperaturparameter	21
4.4. Formatierung Trupchun 2004-2024	23
4.4.1. Header.....	23
4.4.2. Zeitstempel	25
5. Endprodukte	26
5.1. Strukturierte Datenreihe Chavagl 1995–2024 und Trupchun 2004–2024.....	26
5.1.1. Datenreihen	26
5.1.2. Dateninformationsübersicht.....	26
5.2. Teilformatierte Datenreihe und Übersicht Trupchun 1993–1997.....	28
6. Schlussfolgerung	29
Verdankungen.....	30
Literaturverzeichnis.....	31

Abstract

Meteorologische Beobachtungen bilden das Rückgrat der Klimatologie und Meteorologie. Messdaten von Klimastationen sind die Grundlage für Klimamodellierungen und daraus folgenden Vorhersagen, die Dokumentation langfristiger Klimaveränderungen, die Bewertung von Klimarisiken und -auswirkungen und die Überwachung von Klimapolitiken. Auch für die Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit sind Klimadaten als Forschungsgrundlage wirksam. Im Schweizer Nationalpark (SNP) wird durch den Betrieb und die Auswertung von Klimastationen die Forschung von mikroklimatischen Bedingungen ermöglicht, welche dem lokalen Prozessverständnis dient. Die Bedingungen sind abhängig von mehreren Parametern unterschiedlicher Raum- und Zeitskalen. Dazu gehören unter anderem die Flora und Fauna, anthropogene Einflüsse wie auch globale Klimaveränderungen. Die zwei SNP-Stationen Val Trupchun und Munt Chavagl zeichnen seit 1993 und 1995 Klimadaten auf. Meine Arbeit hat das Ziel, bestehende Rohdaten zu einer strukturierten Datenreihe zu formatieren. Die Rohdaten weisen Differenzen in Qualität und Zeitauflösung auf. Auch weitere Faktoren wie Standortwechsel und Zerstörung der Stationen sind in der Analyse wichtig. In meiner Arbeit dokumentiere ich die Schritte der Formatierung. Die Formatierung beinhaltet unter anderem die Standardisierung von Zeitstempeln und die Zuordnung der Parameter, wobei Excel und Python zur Datenorganisation und -analyse verwendet werden. Zusätzlich werden bereits bestehende Dokumentationen in eine historische Übersicht integriert, um ein Verständnis für vergangene Ereignisse zu ermöglichen. Die zugehörige Dokumentation hat den Zweck, zukünftigen Forschenden die Informationen weiterzugeben, aus welchen Rohdaten die Datenreihe zustande gekommen ist und welche Schritte dafür nötig waren. Die Endprodukte der Arbeit sind strukturierte Datenreihen für beide Stationen sowie zugehörig umfassende Dateninformationsübersichten. Herausforderungen wie Unterschiede in der Datenqualität und Verfügbarkeit erforderten eine sorgfältige Verifikation und Validierung durch interne und externe Stationsvergleiche. Die Vielzahl an Klimastationen, die Naturgefahren und Umwelteinflüsse (z.B. Lawinen) und die Anzahl der beteiligten Personen und Institutionen an Projekten können eine lückenlose Aufzeichnung und Dokumentation erschweren. Die formatierten Daten sollen zukünftige Klimaforschungsprojekte im SNP unterstützen und unterstreichen die Bedeutung genauer und konsistenter Klimadaten für langfristige Klimastudien und weitere Forschungszwecke. Insgesamt zeigt die Arbeit, dass die sorgfältige historische Aufarbeitung und die Genauigkeit der Datenanalyse selbst, massgeblich entscheidend ist für den gewünschten Erfolg von einheitlich strukturierten Datenreihen.

1. Einleitung

Der Schweizerische Nationalpark ist das grösste Freiluftlaboratorium der Schweiz. Hier wird klimatologische Forschung seit über 100 Jahren betrieben. Der Park wurde 1914 gegründet und ist damit der älteste Nationalpark der Alpen wie auch das grösste Wildnisgebiet der Schweiz. Er umfasst 170 km² Fläche mit 100 km markierten Wanderwegen (SNP, 2024).

Tiere, Pflanzen, Lebensräume und natürliche Prozesse sind gemäss internationaler Naturschutzunion (IUCN) im SNP vor jeglichen menschlichen Eingriffen geschützt. Der SNP gehört zu den Reservaten der Kategorie 1a (höchste Schutzklasse, Wildnisgebiet). Die wissenschaftliche Forschung ermöglicht es, die natürlichen Prozesse ohne direkte anthropogene Eingriffe zu verstehen (SNP, 2024), wobei die Klimaforschung lediglich ein Teil aller Forschungsgebiete im SNP darstellt.

Bereits 1917 wurden am heutigen Stationsstandort Buffalora erstmals Temperaturdaten erhoben (Kupper, 2014). Auf Munt Chavagl werden seit 1977 Bewegungsraten der Bodenoberfläche wie auch Luft- und Bodentemperatur-Messungen durchgeführt. Dr. Martin Gamper hatte damals mit der systematischen Erforschung von ausgewählten Erdströmen westlich des Munt Chavagl begonnen (Gamper, 1981). Seine Forschung im SNP findet den Ursprung in der Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft als Forschungsprojekt des Geographischen Instituts der Universität Zürich. Für die terrestrisch-fotogrammetrischen Aufnahmen und benötigten Instrumente wurde für das Projekt die Unterstützung des Instituts für Geodäsie und Fotogrammetrie der ETH Zürich in Anspruch genommen. Gamper konnte einen Zusammenhang zwischen den Erdstrombewegungen und dem Zeitpunkt des Schneedeckenaufbaus im Herbst aufzeigen. Diese Forschungsergebnisse führten zu Erkenntnissen über die Klimageschichte der vergangenen 8000 Jahre. Für die Diskussion von bevorstehenden natürlichen und anthropogenen Klimaschwankungen liefern solche Arbeiten wertvolle Forschungsgrundlagen (Keller, 1996).

1995 wurde für das Forschungsprojekt der Universität Zürich unter der Leitung von Dr. Hansueli Gubler (Firma AlpuG, Davos) in Zusammenarbeit mit dem SNP und der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH-Zürich eine meteorologische Station auf Munt Chavagl errichtet. Die neue Station erlaubt es ab 1998, entscheidende Komponenten (Strahlung, Schneehöhe und Bodentemperatur) der Energiebilanz zu messen. Zudem ermöglicht die Messung der Schneehöhe den Zusammenhang zwischen Lufttemperaturen, Schneedecke und Bodentemperaturen zu quantifizieren ("Herbstschneeeffekt") und somit auch den Bezug zu den Bewegungsraten der Erdoberfläche herzustellen. Dadurch kann die Station einen Beitrag zur Permafrostforschung leisten, obwohl sie sich selbst nicht im Permafrost befindet (Keller und Tamas, 2003).

Die Station Val Trupchun (Trupchun) wurde 1993 erstmals errichtet. Nach mehreren Lawinenereignissen und 2 Standortverschiebungen wurde die Station 2004 mit beinahe identischen Messparametern wie die Station Munt Chavagl (Chavagl) am heutigen Standort errichtet. Die Station dient der Charakterisierung des Lokalklimas im Val Trupchun und bildet damit eine Ergänzung zur gleichartigen Station Munt Chavagl.

Aufgrund der Stationsähnlichkeiten wie auch der Möglichkeit einer mikroklimatischen Analyse der beiden Stationen bringt die geplante Datenauswertung und -bereitstellung eine sinnvolle zukünftige Forschungsgrundlage. Formatierte und dokumentierte Datenreihen sind für nachfolgende Projekte im Fall der Stationen Trupchun und Chavagl essentiell.

Dieser gewünschte Ausgangszustand kann lediglich durch die gründliche Aufbereitung und Analyse aller vorhandener Daten erreicht werden. Die momentane Relevanz in Bezug auf die Klimafolgenforschung in den Alpen sehe ich als Motivation für diese Arbeit.

Das Ziel dieser Arbeit ist demnach die Formatierung von strukturierten Datenreihen beider Stationen durch die Aufarbeitung und Analyse aller vorhandenen Daten. Diese sollen ins gleiche Format wie die Datensätze nach dem Umbau und der Modernisierung der Stationen in den Jahren 2016 (Chavagl) und 2018 (Trupchun) gebracht und zusammengefügt werden. Diese modernen Datenformate sind für die Datenbanken von MeteoSchweiz gut integrierbar (vgl. Abbildung 8 und 9). Das Sammeln und Analysieren von Metadaten bietet in dieser Arbeit die Informationsgrundlage für die zugehörige historische Stationsdokumentation.

Das Kapitel 2 "Stationen und Standorte" beschreibt die geografischen und die wichtigsten technischen Details der beiden Klimastationen Val Trupchun und Munt Chavagl, einschließlich der Standorte, Aufbauten und wichtigen Veränderungen, die die Stationen im Laufe der Jahre erfahren haben. Im Kapitel 3 "Materialien" wird eine detaillierte Übersicht über die verwendeten Daten und deren Quellen gegeben. Es umfasst auch die technischen Dokumentationen der verwendeten Messinstrumente. Das Kapitel 4 "Methoden" erläutert die methodischen Schritte zur Datenverarbeitung und -formatierung. Dazu gehört die Bereinigung der Daten, die Anpassung der Zeitstempel, die Zuordnung der Parameter und die Erstellung strukturierter Zeitreihen für beide Stationen. Der Hauptteil der Arbeit liegt im methodischen Teil, wobei die Methodik als Resultat der Arbeit gilt. Auch sind in der Methodik bereits nötige Diskussionsfragmente vorhanden, welche bei einer strikten Separierung zu wenig Kontext erhalten würden. Rund 500 Dokumente unterschiedlicher Formate und Quellen waren die Grundlage der methodischen Formatierung und Analyse. Aufgrund dieser Datenmenge und dem damit verbunden Zeitaufwand, kann aufgrund des vorgegebenen Umfangs meiner Arbeit im schriftlichen Teil nur auf die methodisch wichtigsten/essentiellen Punkte eingegangen werden. Auf eine ausführliche Beschreibung aller durchlaufenen Arbeits-, Lern- und Formatierprozesse mit den verbundenen Implementierungen neuer Ansätze wird verzichtet. Das Kapitel 5 "Endprodukte" fasst die Ergebnisse der Datenformatierung zusammen und präsentiert die letzten Schritte für die Erstellung der strukturierter Zeitreihen. Im Kapitel 6 "Schlussfolgerung" sind die Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf die zukünftige Nutzung der formatierten Daten für weitere Forschungsprojekte gegeben.

2. Stationen und Standorte

2.1. Standortübersicht

Die Station Munt Chavagl (Chavagl) liegt am Rande des schweizerischen Nationalparks (SNP) im Engadin. Die Messstation befindet sich auf einer Höhe von knapp 2400 Meter über Meer (m ü. M.) auf dem exponierten Hochplateau des Munt Chavagl. Der Berg ist charakterisiert durch seine alpine Landschaft, bestehend aus Felsformationen, alpinen Wiesen und der mehrmonatigen Schneedecke im Winter.

Die Station Val Trupchun (Trupchun) liegt im Val Trupchun, einem Seitental des Inn-Haupttals auf einer Höhe von ca. 2100 m ü. M. auf einem geneigten Grashang. Die steilen, nach Süden ausgerichteten, mageren Grashänge bieten eine Grunddisposition für Lawinen. Zudem prägen fluvial geformte Talstrukturen zwischen den Grashängen die Umgebung.



Abbildung 1: Standorte Klimastationen Trupchun und Chavagl im Einzugsgebiet SNP (transparentes Grün).
Daten: CNES, Spot Image, swisstopo, NPOC, MeteoSchweiz

2.2. Munt Chavagl

Die Klimastation Chavagl wurde 1995 mit Unterstützung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH-Zürich errichtet, um die Messgenauigkeit der Erdstrombewegungen der ersten Messstation (vgl. Tabelle 1) zu erhöhen. Dr. Felix Keller (Glaziologe, Academia Engiadina, Samedan) wurde von der WNPk (heute FOK-SNP) mit der Durchführung der Arbeiten beauftragt (Keller, 1996). Der Aufbau und die wissenschaftliche Auswertung erfolgten in Zusammenarbeit mit Dr. Hansueli Gubler. Die Datenauswertung wird alljährlich von der Academia Engiadina durchgeführt.

Stationsaufbau (1995):

- Mast: Stahl, verzinkt
- Verankerung: Eingegrabenes Stahlankersystem, Ankermantelrohr 1 m
- Ausleger: Ca. 2 m
- Energieversorgung: Solarpanel und Speicherbatterie

Sensorik (1995):

- Bodentempersensoren: Bodentemperaturmessung in ca. 10, 20, 40, 60, 100 cm Tiefe
- Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren: Messung von Lufttemperatur (Strahlungsschutzgehäuse)



Abbildung 2: Klimastation Chavagl im aktuellen Zustand. Foto: SNP

Ausbau Sensorik (1996):

- Windanemometer: Messung der Windgeschwindigkeit
- Ultraschallabstandssensor: Messung der Schneehöhe
- Pyranometer: Messung der einfallenden kurzwelligigen Sonnenstrahlung (Halbleiterinstrument mit Diffusor)
- IR-Strahlungsthermometer: Messung der Oberflächentemperatur

Ausbau Sensorik (2018):

- Windpfeil: Messung der Windrichtung
- Feuchtigkeitssensor: Messung der Luftfeuchte (Strahlungsschutzgehäuse)
- GSM Daten Übermittlung

Zeitpunkt	Ereignis
1977-1995	Erste Messungen
1995	Bau heutiger Klimastation
1996	Ausbau Sensorik (Daten ab 1998)
August 2015	Blitzschlag beschädigt die Sensoren
September 2015	Reparatur der Klimastation
2018	Installation moderner Logger und GSM Daten Übermittlung

Tabelle 1: Auflistung Stationsereignisse Chavagl

2.3. Val Trupchun

Die Station Trupchun wurde nach der Verschüttung am 1. Standort (vgl. Abbildung 3) im Jahr 2000 ursprünglich als Vergleichsstation zur Station Chavagl durch die Academia Engiadina bestellt, welche in der Folge deren Daten auch analysiert hat. Die Installation erfolgte durch die Firma AlpuG AG. Dokumentationen der 1. Station von 1993-1998/1999 sind keine vorhanden, lediglich die Lawinenschüttung 1998/1999 ist schriftlich festgehalten. Ab 2000 ist der Stationsaufbau von Trupchun der von Chavagl sehr ähnlich (Keller und Tamás, 2004), weshalb ich im Folgenden auf den Stationsaufbau ab 2000 eingehe.

Stationsaufbau (2000):

- Mast: Stahl, verzinkt, Durchmesser 80 mm, unten mit Innenrohr verstärkt
- Verankerung: Eingegrabenes Stahlankersystem, Ankermantelrohr 1 m
- Ausleger: Ca. 2 m
- Energieversorgung: Solarpanel und Speicherbatterie
- Verkabelung: Unten gegen Wildschäden geschützt

Sensorik (2000):

- Bodentempersensoren: Bodentemperaturmessung in ca. 5, 20, 40 cm Tiefe
- Temperatursensor: Messung von Lufttemperatur (Strahlungsschutzgehäuse)
- Windanemometer und Windpfeil: Messung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung
- Pyranometer: Messung der einfallenden kurzwelligigen Sonnenstrahlung (Halbleiterinstrument mit Diffusor)
- IR-Strahlungsthermometer: Messung der Oberflächentemperatur
- Ultraschallabstandssensor: Messung der Schneehöhe

Ausbau Sensorik (2016)

- Feuchtigkeitssensor: Messung der Luftfeuchte (Strahlungsschutzgehäuse)
- GSM Daten Übermittlung

Zeitpunkt	Ereignis
1993	Bau Klimastation am 1. Standort
Winter 1998/1999	Stationsbeschädigung durch Lawine
Frühling 2000	Neuaufbau Klimastation am 2. Standort
2003	Stationsbeschädigung durch Lawine, Aufbau am 3. Standort
Sommer 2004	Lawinenzug erreicht beinahe Station, Verschiebung der Klimastation zum 4. Standort
2016	Installation moderner Logger und GSM Daten Übermittlung

Tabelle 2: Auflistung Stationsereignisse Trupchun

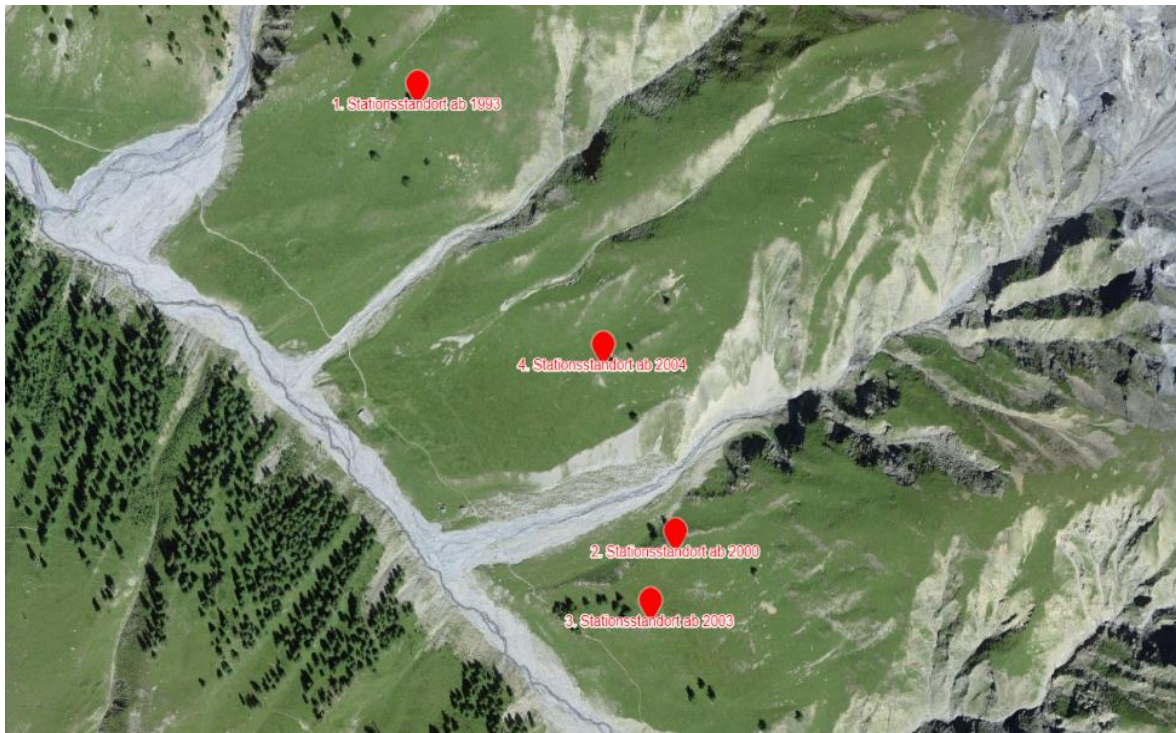


Abbildung 3: Detailansicht Standortverlauf Klimastation Trupchun. Daten: CNES, Spot Image, swisstopo, NPOC, MeteoSchweiz

3. Materialien

3.1. Datenbereitstellung

Im März 2024 reichte Dr. Stefanie Gubler, Leiterin der Forschungskommission des Schweizerischen Nationalparks (FOK-SNP) im Rahmen der geplanten Stationsanalysen Trupchun und Chavagl einen Antrag für ein Forschungsprojekt bei der FOK-SNP ein. Im Anschluss erhielt ich, nach Abschluss eines Datenvertrages, die vorhandenen Daten der beiden Stationen von Dr. Samuel Wiesmann, Leiter Geoinformation und ICT (SNP).

Von Joël Fisler, Partnernetz Koordinator und Datenmanager bei MeteoSchweiz, erhielt ich Daten in Form von formatierten Zeitreihen, Fotos und mündlichen Informationen. Die Zusammenarbeit zwischen der FOK-SNP und MeteoSchweiz umfasst den Austausch und die gemeinsame Nutzung von Klimadaten sowie die Integration von Messstationen des Nationalparks in das Messnetz von MeteoSchweiz.

Von Dr. Hansueli Gubler erhielt ich zusätzlich die zugehörigen Daten der Firma AlpuG für die beiden Stationen. Dazu gehören Dokumentationen, Plots, Programmierungen der Stationen, Offerten, Bilder und Erklärungen. Die Firma AlpuG hat die Stationen von 1995 und 2000 aufgebaut, in Betrieb genommen und seither gewartet.

Im folgenden Kapitel wird eine genaue Übersicht über die Datenformate und deren Einzelheiten gegeben, welche im Nachhinein für den methodischen Teil relevant sind. Auf mündliche und schriftliche persönliche Weitergabe von hilfreicher Information wird im methodischen Teil eingegangen, da diese im Formationsprozess entscheidend waren.

3.2. Trupchun

Datenübersicht Messreihe 1993-1997:

Daten	Menge und Datentyp	Datenformat und Details
Header-Dokument	1x Text-Datei (.txt)	-Tabellarisch; Wind speed 1, Wind speed 2, Temp 1, Temp 2, Temp 3, Temp 4, Azimuth Wind, Temp 5 -Trennzeichen: Leerschlag
Datenreihe zugehörig zum Header-Dokument	7x Text-Dateien (.txt)	-Tabellarisch; Jede Zeile repräsentiert eine Datenaufzeichnung der zugehörigen Parameter des jeweiligen Header-Dokumentes zu einem bestimmten Zeitpunkt (1. Spalte Indices, Zeitauflösung nicht notiert). -Trennzeichen: [*]

Tabelle 3: Datenübersicht Trupchun 1993-1997

```
header-1993_1997.txt
 1 Wind speed 1 Wind speed 2 Temp 1 Temp2 Temp3 Temp4 Azimuth Wind Temp5
 2
```

Abbildung 4: Header-Dokument Trupchun 1993-1997. Daten: SNP

```
Trup1 (13.6.93 bis 26.6.93, 18:50)
=====
 1*  0.0*  1.8* -43.3*  2.6*  4.4*  6.3*  7.9*  9.6
 2* 46.7*  1.2* -43.5*  2.8*  4.5*  6.4*  8.0*  9.7
 3* 46.8*  0.9* -43.7*  2.9*  4.4*  6.4*  8.1*  9.7
```

Abbildung 5: Ausschnitt aus 1. Datei der Datenreihe Trupchun 1993-1997. Daten: SNP

Datenübersicht Messreihe ab 2004

Datenbezeichnung	Menge und Datentyp	Datenformat und Details
Header-Dokument (Erstelldatum vor 2016)	1x Excel-Dokument (.xlsx)	-Tabellarisch; Nr, Jahr, Tag, Uhrzeit_1, Tboden 1, Tboden 2, Tboden 3, Tboden 4, Tboden 5, Tluft, Tluftmax, Tluftmin, Toberfl, Rad Ku, WindV, WindDir, WindMax, HS, Bodenfeuchte, Vbatt, Tlogger, .1 x Status, .1 x Quality -Feldgetrennt
Datenreihen 2004-2016	17x Excel- und Textdokumente (.dat/.xlsx/.txt)	-Tabellarisch; Jede Zeile repräsentiert eine Datenaufzeichnung der zugehörigen Parameter des jeweiligen Header-Dokumentes zu einem bestimmten Zeitpunkt. -Trennzeichen: [,] -Zeitauflösung: 3 h
Header-Dokument für Daten ab 2016	1x Excel-Dokument (.xlsx)	-Tabellarisch; TMStamp, RECNBR, Station, TBoden0, TBoden20, TBoden40, Lufttemperatur, Lufttempmax, Lufttempmin, Luftfeuchtigkeit, Tsurface, StrahlungKW, Windgeschw, Windrichtung, Windspitze, Schneehöhe, Loggertemp, Batteriespannung, Quality, FTPTransf -Feldgetrennt
Datenreihe ab 2016	1x Excel-Dokument (.dat)	-Tabellarisch; Jede Zeile repräsentiert eine Datenaufzeichnung der zugehörigen Parameter des jeweiligen Header-Dokumentes zu einem bestimmten Zeitpunkt. -Trennzeichen: [,] -Zeitauflösung: 1 h/10 min
Stationsdokumentation	Schriftliche Dokumente (.pdf/.txt), Fotos	-Technische Dokumentation -Stationsaufbau und Konfiguration -Sensorbeschreibung und -spezifikationen -Datenmanagement und -struktur -Material- und Ausrüstungsliste -Wartungs- und Betriebsanleitung -Datenverfügbarkeit und -lücken -Historischer Überblick der Station -Teilrekonstruktion und Betriebsgeschichte -Standorte und Lage

Tabelle 4: Datenübersicht Trupchun 2004-2024

101,2004,215,1500,28.13,14.34,13.4,6998,6998,18.36,20.45,16.53,32.77,1008,3.628,303.6,8.94,9.52,0,12.77,27.85,404.7,12.8
101,2004,215,1800,29.35,16.59,14.15,6998,6998,18.57,19.37,17.73,31.99,619.9,4.345,306.9,9.5,8.38,0,13.31,27.58,404.7,64
101,2004,215,2100,20.81,17.72,15.09,6998,6998,16,18.43,14.35,17.05,61.86,2.583,321.7,7.78,6.088,0,12.95,16.02,404.7,51.2

Abbildung 6: Ausschnitt der Datenreihe Trupchun von 2004. Daten: SNP

2016-09-06 15:00:00,0,"Trupchun2016",21.22,12.65,11.45,12.25,13.31,0,45.83,21.14,792.3,0.351,328.3,0,6999,15.71,14.78,14.78,16
2016-09-06 16:00:00,1,"Trupchun2016",21.51,13.08,11.65,12.14,12.8,11.55,46.91,20.18,708.5,2.747,232.6,0,15.57,15.17,14.68,14.68,16
2016-09-06 17:00:00,2,"Trupchun2016",20.96,13.44,11.79,12.07,13.12,11.39,46.94,19.25,491.8,2.061,263.7,0,17.85,19.64,14.42,14.42,16

Abbildung 7: Ausschnitt der Datenreihe Trupchun 2016-2024. Daten: SNP

Parameter	Trupchun
Nr	ID Datalogger
Jahr	yyyy
Tag	Julian day
Uhrzeit_1	hhmm
Tboden 1	Bodentemperatur -25 cm °C
Tboden 2	Bodentemperatur -50 cm °C
Tboden 3	Bodentemperatur -100 cm °C
Tboden 4	Bodentemperatur °C (kein Sensor)
Tboden 5	Bodentemperatur °C (kein Sensor)
Tluft	Lufttemperatur (mean) in °C
TLuftmax	Lufttemperatur Maximum in °C
TLuftmin	Lufttemperatur Minimum °C
Toberfl	Bodentemperatur Oberfläche 5 cm über Boden in °C
Rad Ku	Kurzwellige Strahlung in W/m2
WindV	Windgeschwindigkeit (mean) in m/s
WindDir	Windrichtung in °
WindMax	Windspitzengeschwindigkeit in m/s
HS	Totalschneehöhe in cm
Bodenfeuchte	Bodenfeuchte in Volumen % / 100 (ausgefallen)
Vbatt	Batteriestatus in V
Tlogger	Loggertemperatur in °C
.1 x Status	Binärwert, Bit gesetzt: Sensor ein
.1 x Quality	Plausibilitätstest

Trupchun:								
TMStamp	RECNR	Station	TBoden0	TBoden20	TBoden40	Lufttemperatur	Lufttempmax	Lufttempmin

Abbildung 9: Header-Dokument für Trupchun Daten ab 2016. Daten: SNP

Abbildung 8: Header-Dokument Trupchun Daten vor 2016. Daten: SNP

3.3. Chavagl

Datenbezeichnung	Menge und Datentyp	Datenformat und Details
Header-Dokument (Erstelldatum vor 2018)	1x Excel-Dokument (.xlsx)	Parameter, Nr, Jahr, Tag, Uhrzeit, Tboden1, Tboden2, Tboden3, Tboden4, TBoden5, Tluft, Tluftmax, Tluftmin, Toberfläche, KWStrahlung, Windmittel, Windmax, Hsschnee, Vbatt, Tmodul, Status, Quality
Datenreihen 1995-2018	22x Excel- und Textdokumente (.dat/.xlsx/.xls/.txt)	-Tabellarisch; Jede Zeile repräsentiert eine Datenaufzeichnung der zugehörigen Parameter des jeweiligen Header-Dokumentes zu einem bestimmten Zeitpunkt. -Trennzeichen: [,], teils auch Feldgetrennt -Zeitauflösung: 3 h (teils auch 1 h/5 h)
Header-Dokument für Daten ab 2018	1x Excel-Dokument (.xlsx)	-Tabellarisch; TMStamp, RECNBR, Station, TBoden0, TBoden20, TBoden40, TBoden60, TBoden100, Lufttemperatur, Lufttempmax, Lufttempmin, Luftfeuchtigkeit, Tsurface, StrahlungKW, Windgeschw, Windrichtung, Windspitze, Schneehöhe, Loggertemp, Batteriespannung, Quality, FTPTransf -Feldgetrennt
Datenreihe ab 2018	1x Excel-Dokument (.dat)	-Tabellarisch; Jede Zeile repräsentiert eine Datenaufzeichnung der zugehörigen Parameter des jeweiligen Header-Dokumentes zu einem bestimmten Zeitpunkt. -Trennzeichen: [,] -Zeitauflösung: 1 h/10 min
Stationsdokumentation	Schriftliche Dokumente (.pdf/.txt), Fotos	-Technische Dokumentation -Forschungsberichte der Academia Engiadina -Stationsaufbau und Konfiguration -Sensorbeschreibung und -spezifikationen -Datenmanagement und -struktur -Material- und Ausrüstungsliste -Wartungs- und Betriebsanleitung -Datenverfügbarkeit und -lücken -Teilrekonstruktion und Betriebsgeschichte -Standort und Lage

Tabelle 5: Datenübersicht Chavagl 1995-2024

	Jahr	Tag	Zeit	T-100	T-60	T--40	T-20	T-10	T-Luft	TLmax	TLmin	VBatt	Tlogger	Quality	
	100	1995	299	1400	5,048	4,306	3,666	3,033	2,68	7,83	9,22	6,192	14,11	14,87	127
	100	1995	299	1700	5,022	4,238	3,706	5,919	4,535	8,25	9,77	6,651	13,19	12,76	127
	100	1995	299	2000	4,975	4,186	4,042	6,11	5,615	4,446	7,47	3,029	13,14	2,962	127

Abbildung 10: Ausschnitt der Datenreihe Chavagl von 1995. Daten: SNP

2018-09-12 13:00:00,0,"MuntChavagl2018T",16.23,10.24,9.55,NAN,NAN,16.23,17.66,0,0,30.46,167.6,2.297,176.4,5.066,6999,19.06,14.02,16,0
2018-09-12 14:00:00,1,"MuntChavagl2018T",17.83,11.13,9.73,NAN,NAN,17.13,17.79,16.23,0,31.02,169.3,2.67,174.1,5.34,6999,20.08,14.15,16,0
2018-09-12 15:00:00,2,"MuntChavagl2018T",18.49,11.86,9.83,NAN,NAN,17.29,17.75,16.89,0,28.56,159.4,3.067,168.6,5.653,6999,20.2,14.19,16,0

Abbildung 11: Ausschnitt der Datenreihe Chavagl 2018-2024. Daten: SNP

Parameter	Chavagl
Nr	ID Datalogger
Jahr	YYYY
Tag	Julian day
Uhrzeit	hhmm
Tboden1	Bodentemperatur -100 cm °C
Tboden2	Bodentemperatur -60 cm in °C
Tboden3	Bodentemperatur -40 cm in °C
Tboden4	Bodentemperatur 20 cm in °C
TBoden5	Bodentemperatur -10 cm in °C
Tluft	Lufttemperatur (mean) in °C
Tluftmax	Lufttemperatur Maximum in °C
Tluftmin	Lufttemperatur Minimum °C
Toberfläche	Bodentemperatur Oberfläche 5 cm über Boden in °C
KWStrahlung	Kurzwellige Strahlung in W/m2
Windmittel	Windgeschwindigkeit (mean) in m/s
Windmax m/s	Windspitzengeschwindigkeit in m/s
Hsschnee,cm	Totalschneehöhe in cm
Vbatt	Batteriestatus in V
Tmodul	Loggertemperatur in °C
Status	Binärwert, Bit gesetzt: Sensor ein
Quality	Plausibilitätstest

Abbildung 12: Header-Dokument Trupchun vor 2018. Daten: SNP

Chavagl															
TMStamp	RECNR	Station	TBoden0	TBoden20	TBoden40	TBoden60	TBoden100	Lufttemperatur	Lufttempmax	Lufttempmin					

Abbildung 13: Header-Dokument für Chavagl Daten ab 2018. Daten: SNP

4. Methoden

4.1. Datenverarbeitung

Im ersten Schritt sortierte ich die Daten. Insbesondere für die nachfolgende Formatierung musste eine strukturierte Organisation vorliegen, um benötigte Daten effizient zu finden und passend abzuspeichern. Dabei bleibt der Versionsverlauf der Arbeitsschritte aller Dokumente erhalten, um eine saubere Dokumentation zu gewährleisten. Der Einbezug neuer Daten erfolgte stets so, dass rezenter Versionsverläufe von bereits erstellten Dokumenten nicht überschrieben wurden. Damit wird gewährleistet, dass der Verlauf der Datenverarbeitung nachvollziehbar bleibt.

Für die Erstellung von strukturierten Datenreihen reihte ich im nächsten Schritt die vorhandenen Datenpakete der spezifischen Datenreihen in einem Excel-Dokument zu einer einzigen Datenreihe aneinander. Im folgenden Kapitel wird dies stationsbezogen im Detailbeschrieb behandelt. Auch für die Formatierung verwendete ich vorwiegend Excel als Übersichts- und Arbeitswerkzeug. Excel eignet sich aufgrund der Möglichkeiten zur Datenübertragung aus anderen Formaten sowie der Skalierungsoptionen und einfachen grafischen Darstellungen gut als Werkzeug für die allgemeine Übersicht. Einfache Datenvergleiche führte ich mit Excel durch. Für anspruchsvollere Datenanalysen oder Neuforderungen nutzte ich entweder Funktionen in Excel-Makros oder Python mit den notwendigen Excel-Packages. Zudem verwendete ich Hilfestellungen und Ideen für Python-Codes des AI-Modells Chat-GPT 4.0 von OpenAI. Die AI-Inputs wurden dabei stetig auf ihre Korrektheit nachgeprüft. Zeitstempel der Datenreihen wurden bei Aufzeichnungslücken in allen folgenden Grafiken, ungleich zu den erstellten Datenreihen, fortlaufend dargestellt.

4.2. Formatierung Chavagl 1995-2024

Alle vorhanden Datenpakete führte ich mithilfe von Excel chronologisch übereinander zu einem Arbeitsdokument. Die Übergänge und Aufzeichnungslücken markierte ich durch einen Zeilenabstand, um nachfolgende spaltenverschobene Parameter zu erkennen.

4.2.1. Zeitstempel

Bei allen Datenpaketen vor 2016 liegen Zeitstempel im Julian Day-Format vor. Dies bedeutet, dass der Tag des jeweiligen Jahres als Laufnummer vorliegt.

Ab 2016 liegen die Zeitstempel im Format MM.JJJJ hh:mm vor. Die Zeitstempel der Datenreihen vor 2016 wurden ebenfalls ins Format MM.JJJJ hh:mm konvertiert. Dadurch sind die Zeitstempelformate durchgehend konsistent und im gewünschten Format (vgl. Kapitel 1). Um Daten aus dem Julian Day-Format in ein absolutes Datumsformat zu konvertieren, bestimmte ich zunächst das Startdatum durch Addition der Tage der Monate des gewünschten Jahres bis zum gewünschten Datum (z.B. 6. September 2016 als 250. Tag des Jahres). Das Ergebnis überführte ich in das Format MM.JJJJ hh:mm und wendete unter Berücksichtigung der Zeitintervalle (vgl. Kapitel 3.3.) den Zeitstempel auf die nachfolgenden Zeilen an. Schließlich überprüfte ich den letzten konvertierten Zeitstempel wiederum durch die Vergleichsrechnung mit dem letzten Zeitstempel des Datenpakets, um die Korrektheit der Konvertierung sicherzustellen. Bei allen Aufzeichnungslücken wiederholte sich dieses Verfahren.

4.2.2. Zuordnung der Parameter

Als oberste Zeile des Arbeitsdokumentes verwendete ich vorerst den zugehörigen Header für die Datenreihe (vgl. Header auf Abbildung 12), um die Datenspalten den Headerparametern zuzuordnen. Die Lufttemperaturparameter liessen sich aufgrund der zusätzlich vorhandenen Headerspalten mit den zugehörigen maximalen und minimalen Lufttemperaturen schnell zuordnen (vgl. Abbildung 12 oder 13), denn es gilt: $\text{Lufttempmin} \leq \text{Lufttemp} \leq \text{Lufttempmax}$. Alle weiteren Parameter ausser diejenigen der Bodentemperaturen liessen sich ebenfalls logisch zuordnen, denn zusätzlich zu den Plausibilitätskriterien sind bereits vereinzelte Datenfragmente mit zugehörigen Parameter-Überschriften beim SNP vorhanden, welche als zusätzliche Vergleiche nach relativem Datenabgleich genutzt werden könnten. In diesen Datenfragmenten von 1995-2000 sind die Parameter T10 und T20 in der Spaltenbezeichnung (dokumentinterner Header von Datenfragment) vertauscht und damit nicht in der vom Header vor 2018 vorgegebenen Header-Reihenfolge (TBoden1:TBoden5). TBoden1 wird im Header vor 2018 für eine Tiefe von 100 cm definiert (Abbildung 12). Die charakteristischen Bodentemperaturen können durch den internen Vergleich mit den anderen vorhanden Bodentemperaturverläufen in den Sommermonaten gut zugeordnet werden. In den Sommermonaten sind die Temperaturtagesgänge aufgrund der Strahlungsdifferenzen zwischen Tag und Nacht typischerweise gut erkennbar. Umso grösser die Messtiefe, umso geringer die gemittelte Tages-Amplitude der Bodentemperatur (folgend aus Hillel, 1982). Temperaturplots mit allen 5 Bodentemperatur-Parametern für die August Perioden aller vorhandenen Jahre wurden für die grobe Einordnung der Spaltenhomogenität verwendet. Allfällige relative Spaltenverschiebungen in den Datenpaketen konnten durch diese erste Analyse bemerkt werden. Hierbei stellte ich fest, dass die zu erwartenden Bodentemperaturverläufe nicht strukturiert vorliegen. Zwischen 2000 und 2015 sind die Parameter TBoden10 und TBoden40 vertauscht (vgl. Abbildung 14 und 15). Auffällig sind auch die Ausreisser in den Bodentemperaturdaten ab 1998. Bei der Auswertung der Periode 1998-1999 stellte sich heraus, dass die Bodentemperaturfühler auf 10 cm und 40 cm Tiefe ausgefallen sind, was sich mit der Annahme aus der Datenanalyse bestätigt. Im August 2000 konnten die beiden defekten Fühler ausgetauscht werden. Dabei sind die Fühler vertauscht eingebaut worden. Die Fühler wurden dann im September 2015 nach dem Defekt einiger Sensoren aufgrund von Blitzschlag neu und in korrekter Reihenfolge eingebaut.

Alle festgestellten Spaltenwechsel zwischen den Datenpaketen und deren Begründung wurden somit detektiert und die überarbeitete Datenreihe mit nun strukturierten Datenspalten konnte dem Ziel-Header ab 2018 zugeordnet werden. Dieser liegt bereits in korrekter Reihenfolge (TBoden0:TBoden100) vor, was somit eine Umkehrung der Spaltenreihenfolge von allen Bodentemperaturen bedingt. TBoden0 wurde gemäss Gubler (2024) für eine lotrechte Tiefe von ca. 10 cm definiert. Dies bestätigt meine Vermutung, dass es sich bei den neuen Datensätzen um die gleichen Bodentemperaturparameter handeln muss wie in den Headerdokumenten vor 2018 (vgl. Abbildung 12 und 13). Gubler (2024) erklärte mir auch, dass sich die Messtiefen für die Station Chavagl über die ganze Zeitdauer von 1995–2024 nicht verändert haben. Die Korrektheit meiner Parameterzuordnung von den Bodentemperaturen konnte ich mit dem Plotten vollständiger Monatsmittelwerte der Tagesamplituden über die ganze Zeitreihe überprüfen (vgl. Abbildung 16).

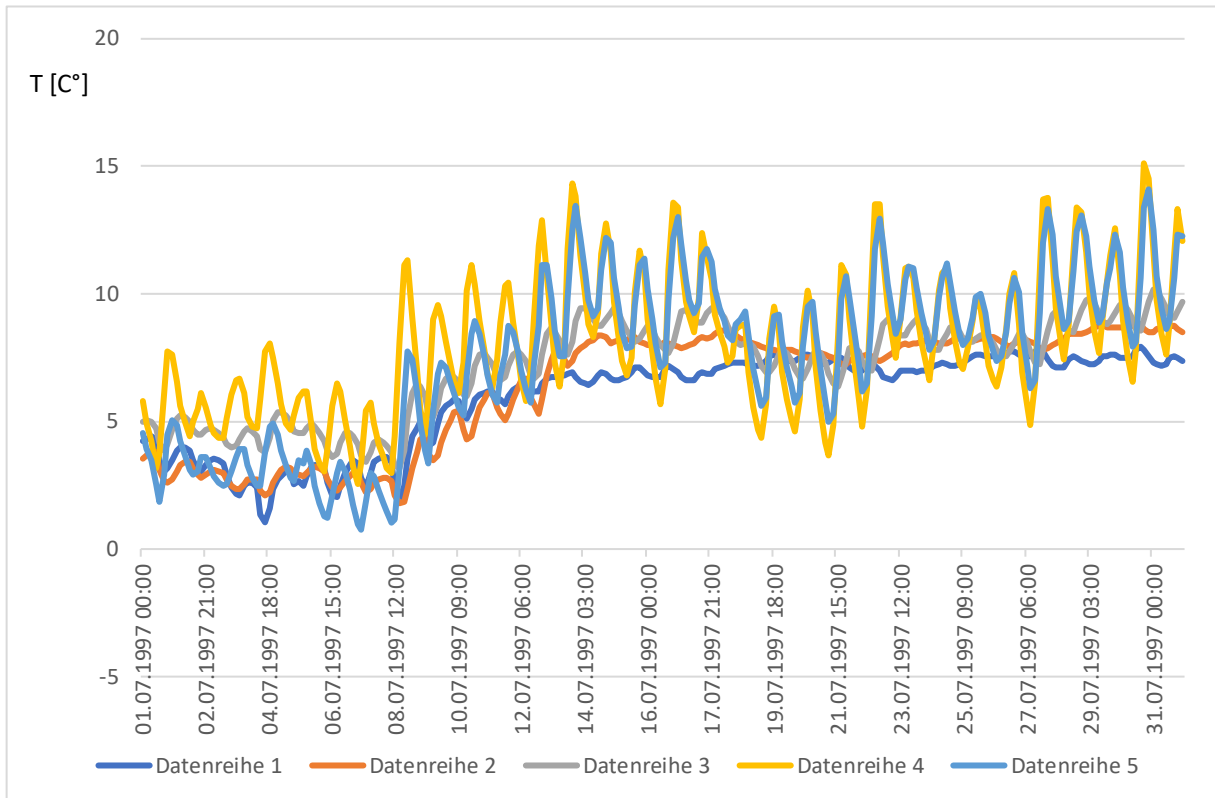


Abbildung 14: Ausschnitt der Bodentemperaturen Chavagl im Juli 1997 vor der Spaltensortierung

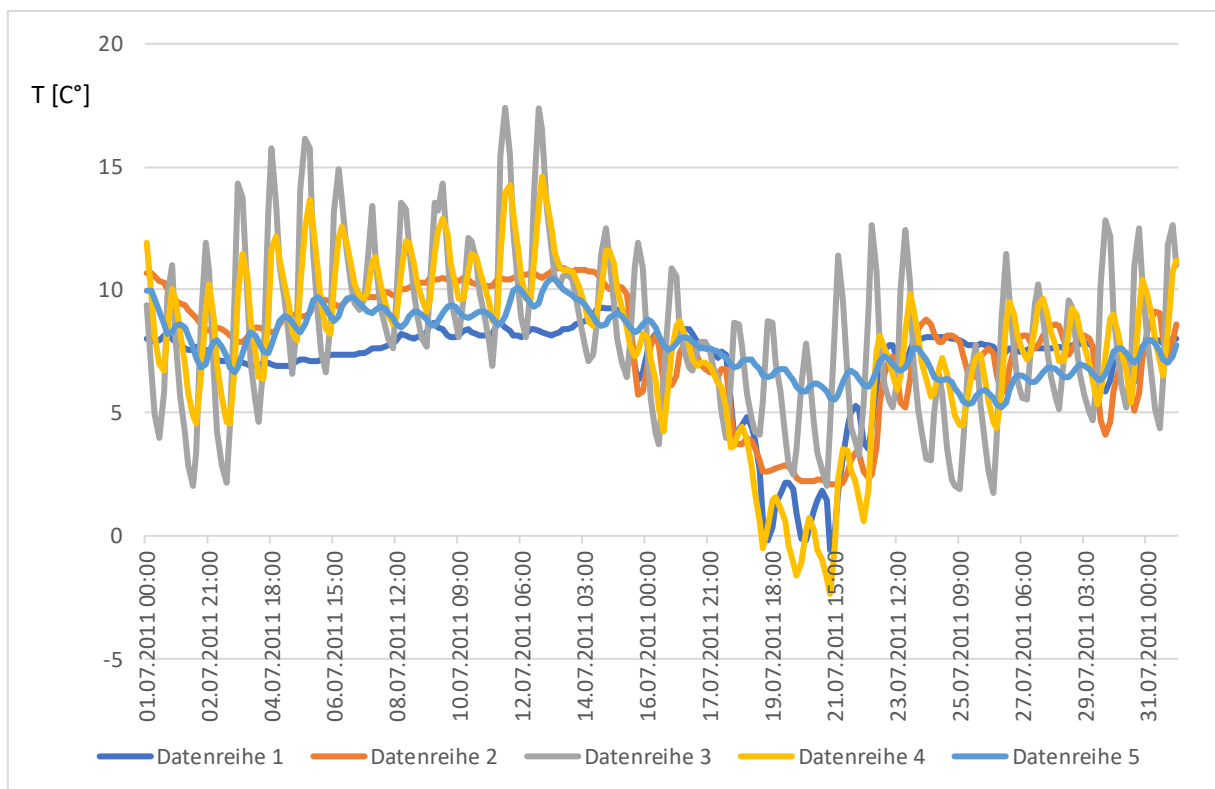


Abbildung 15: Ausschnitt der Bodentemperaturen Chavagl im Juli 2011 vor der Spaltensortierung

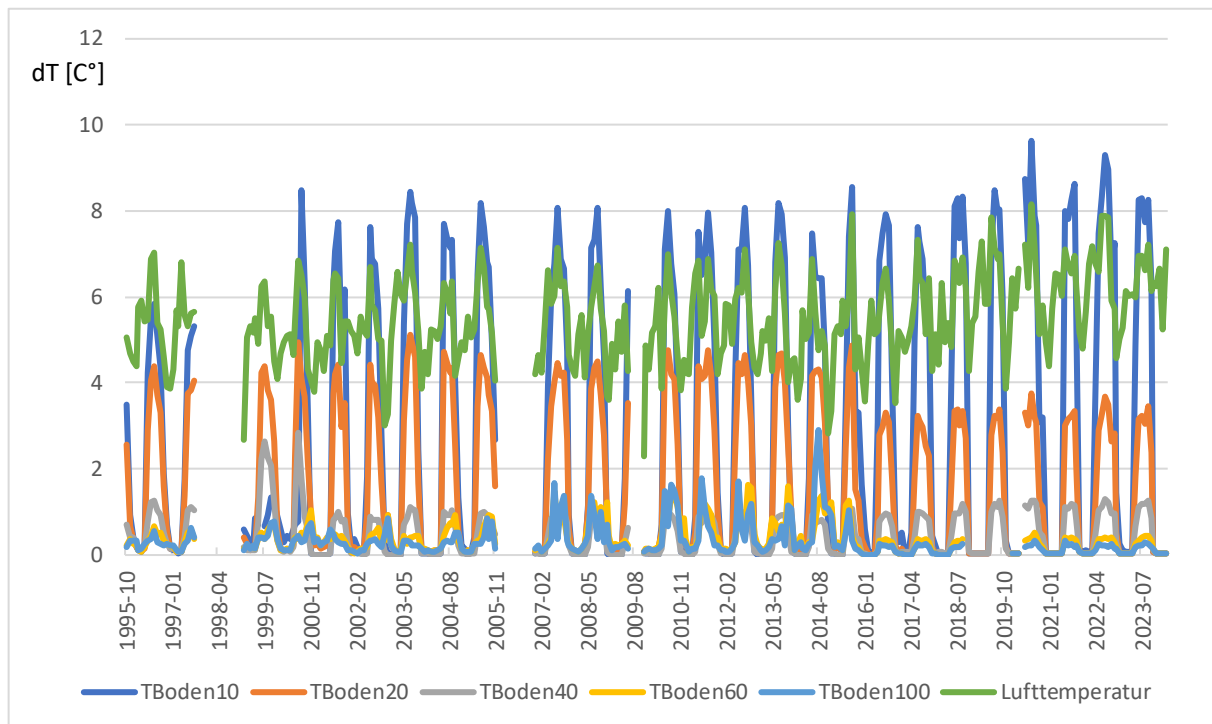


Abbildung 16: Monatsmittelwerte Tagesamplituden Chavagl über die Zeitreihe 1995-2024

4.3. Formatierung und Analyse Trupchun 1993-1997

Alle vorhandenen Datenpakete führte ich mithilfe von Excel chronologisch übereinander zu einem Arbeitsdokument. Die Übergänge und Aufzeichnungslücken markierte ich durch einen Zeilenabstand, um nachfolgende spaltenverschobene Parameter zu erkennen.

4.3.1. Zeitstempel

Die Herausforderung bei der Formatierung der Trupchun-Daten von 1993-1997 liegt im ersten Schritt in der korrekten Zuordnung der Zeitstempel. Die Startzeitpunkte sind gegeben (vgl. 1. Zeile auf Abbildung 5), jedoch fehlen in den Rohdaten teils die Endzeitpunkte in der Überschrift, was eine genaue Berechnung der Zeitintervalle erschwert. Durch die Umrechnung der Stunden zwischen Start und Ende eines Datenpakets und die Division durch den Index konnten die Zeitabstände approximiert werden. Vorausgesetzt, die angegebenen Zeiten sind korrekt und beide Zeitpunkte vorhanden. Falls ein Endzeitpunkt nicht angegeben ist, musste ich den Startpunkt des nächsten Datenpaketes als Endzeitpunkt des vorherigen

Trup3 (9.9.93, 17:49 bis 28.5.94, 16:20)									
=====									
1*	0.0*	0.0*	-43.6*	-36.2*	-43.1*	-42.9*	-42.9*	-40.0	
2*	8.4*	3.5*	7.9*	8.5*	7.0*	8.8*	8.7*	8.7	
3*	4.8*	3.6*	7.9*	8.5*	7.0*	8.8*	8.7*	8.7	
4*	4.2*	2.3*	7.8*	8.4*	7.0*	8.8*	8.7*	8.7	
5*	11.3*	6.0*	8.6*	9.0*	7.0*	8.5*	8.7*	8.7	
6*	8.1*	1.3*	6.0*	6.8*	6.6*	8.4*	8.7*	8.7	
7*	2.7*	0.7*	5.7*	6.7*	6.6*	8.3*	8.7*	8.7	
8*	8.4*	2.9*	7.7*	8.5*	6.3*	8.2*	8.7*	8.7	
9*	6.9*	2.1*	5.6*	6.7*	6.5*	8.1*	8.7*	8.7	
10*	7.5*	1.9*	6.0*	6.5*	5.4*	8.0*	8.6*	8.7	
11*	7.0*	93.0*	9.0*	10.0*	0.0*	50.0			
11*	6.3*	1.1*	3.8*	4.7*	4.7*	7.6*	8.6*	8.7	
12*	1.8*	0.5*	3.5*	4.3*	4.5*	7.4*	8.6*	8.7	

Abbildung 17: Datenpaket 3 Trupchun, 11. Laufnummer mit Doppelindices

Datenpaketes annehmen. In einigen der ursprünglichen Datenpaketen kommen alle 24. Stunden Indices doppelt vor (vgl. Abbildung 17), wobei die Funktion diese Doppelbelegung einer täglichen Kontrollzeile entspricht. Solche Kontrollzeilen in Klimadatenreihen gewährleisten die Integrität der Zeitstempel, ermöglichen die Erkennung von Erfassungsfehlern durch die Erkennbarkeit und überprüfen die Kalibrierung und Synchronisation der Messgeräte. Für die

Berechnung der Messintervalle sind diese Kontrollzeilen hinderlich, da sie die fortlaufende Datenreihe im Dokument zeitlich unterbrechen. Deshalb wurden die Zeilen in einer neuen Dokumentversion eliminiert.

Die Messintervalle wurden mit der oben beschriebenen Methode in allen Datenpaketen auf 1 h-Auflösung approximiert (+/-3 min). Bei der Annahme von exakten 1 h-Intervallen der Zeitstempel stimmen die letzten angenommenen Zeitstempel in den Datenpaketen nicht immer mit den im Dokument vorgegebenen Endzeitpunkten überein. Entweder sind folglich die angegebenen Zeitpunkte nicht immer korrekt, oder die stündliche Intervall-Annahme ist nicht korrekt; beispielsweise aufgrund von Zeitintervall-Variationen, welche möglicherweise durch den Zeitdrift der Stationsuhr zustande kommen könnten.

Um dieses Problem zu lösen, legte ich die 1 h-Intervalle der Zeitstempel vorerst für alle Datenzeilen fest, um die Zeitstempel auf ihre Korrektheit durch den Datenvergleich mit anderen Temperaturreihen zu überprüfen. Die Daten von Buffalora, die erst ab 1998 stündlich verfügbar waren, bieten aufgrund der geringen Zeitauflösung vor 1998 (teils nur tägliche Lufttemperatur-Messwerte) keinen Vergleichsmaßstab für frühere Jahre. Ein Vergleich mit den Daten von Chavagl scheint aussagekräftiger, da Temperaturdifferenzen hier deutlicher hervortreten. Die Chavagl-Daten liegen für den gewählten Zeitraum (1995-1997) in einer 3 h-Auflösung vor, während die Trupchun-Daten in 1 h-Auflösung vorliegen. Um die Daten vergleichbar zu machen, wurden sie zu einem Datensatz zusammengefügt, in welchem die Datenzeilen mit gleichem Stundenwert desselben Datums angereiht werden.

Es werden die Lufttemperaturen der beiden Stationsdaten verglichen. Die Vergleichsdaten von Chavagl sind ab 2015 bereits mit einem korrekten Zeitstempel versehen. Im relativen Vergleich korrelieren die Tagesverläufe von den verglichenen Lufttemperaturen beider Stationen insofern, dass die Punkte des Graphen bei Kurvensteigung von 0 kohärent übereinstimmen (vgl. Abbildung 18). Daraus konnte ich durch den wiederholenden Vergleich aller vorhandener Pakete im Zeitraum 1995-1997 der mittleren Lufttemperatur von Trupchun (Herkunft des Parameters in Kapitel 4.3.2. begründet) mit der mittleren Lufttemperatur von Chavagl, die Vermutung von 1 h-Messintervallen betätigen.

Es ist wichtig, dass für diesen Vergleich nicht Lufttemperaturen mit Bodentemperaturen verglichen werden, da die Temperaturreaktion auf Strahlungseinflüsse im Boden aufgrund des Bodenwärmeflusses zeitverzögert ist und zudem von der Tiefe der gemessenen Bodentemperatur abhängt. In tieferen Schichten dauert es länger, bis die Wärme, welche durch absorbierte Sonneneinstrahlung auf die Oberfläche gelangt, nach unten geleitet wird. Diese Verzögerung wird durch die thermische Leitfähigkeit und die Wärmekapazität des Bodens beeinflusst (Campbell und Norman, 1998).

Die Abweichung zwischen angegebenen Endzeitpunkten und dem angenommenen stündlichen Zeitstempel beträgt bei den Datenpaketen teils mehrere Stunden bis sogar Tage. Dies wiederum bedeutet, dass bei falscher Messintervall-Annahme für die relativen Tagesgangvergleiche, solche Zeitverschiebung in Vergleichsgraphen mit grosser Wahrscheinlichkeit feststellbar sind.

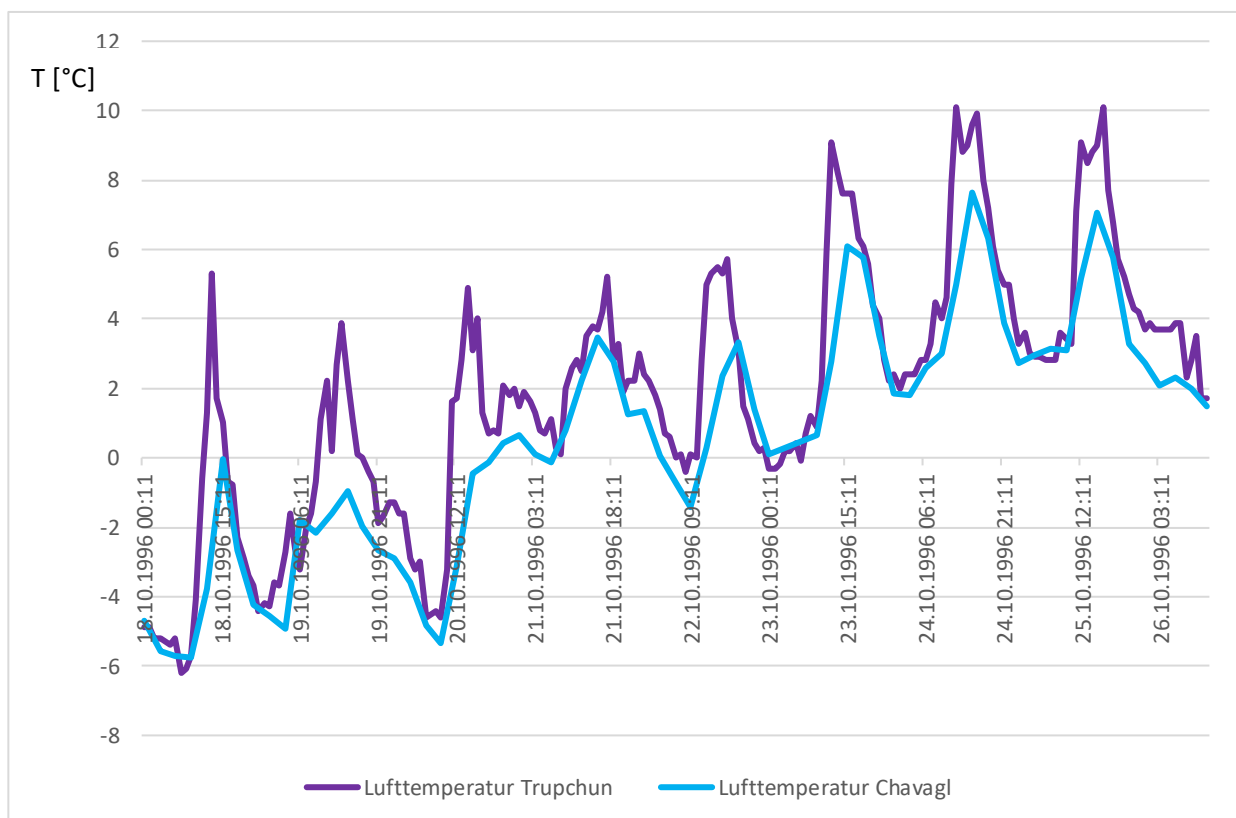


Abbildung 18: Lufttemperaturvergleich Trupchun und Chavagl im Oktober 1996

4.3.2. Analyse Temperaturparameter

Wie im Kapitel Methoden erwähnt, sind die genauen Parameter für Trupchun 1993–1997 aufgrund der fehlenden Dokumentation nicht bekannt. Im Anlass der ersten Analyse dieser Daten wollte ich durch die Bestimmung von Monatsmittelwerten die unbekannt absoluten Parameter bestimmen. Ausserdem kann mit Monatsmittelwerte der Jahresverlauf in vereinfachter Form als Trend dargestellt werden. Die sprunghaften Jahresverläufe aus den Monatsmittel der Rohdaten bedingten eine genauere Analyse aller Temperaturparameter, welche im Folgenden erläutert wird.

Zunächst wurde ein gesäuberter Datensatz mit den eruierten Zeitstempel erstellt, in welchem dann jegliche Werte über 35°C oder unter -30°C, eliminiert wurden. Auch langanhaltende konstante Werte ausserhalb der Winterperiode wurden eliminiert. Anschließend wurden die gesäuberten Daten in Monatsmittelwerte zusammengefasst und grafisch dargestellt, um saisonale Trends und Anomalien sichtbar zu machen.

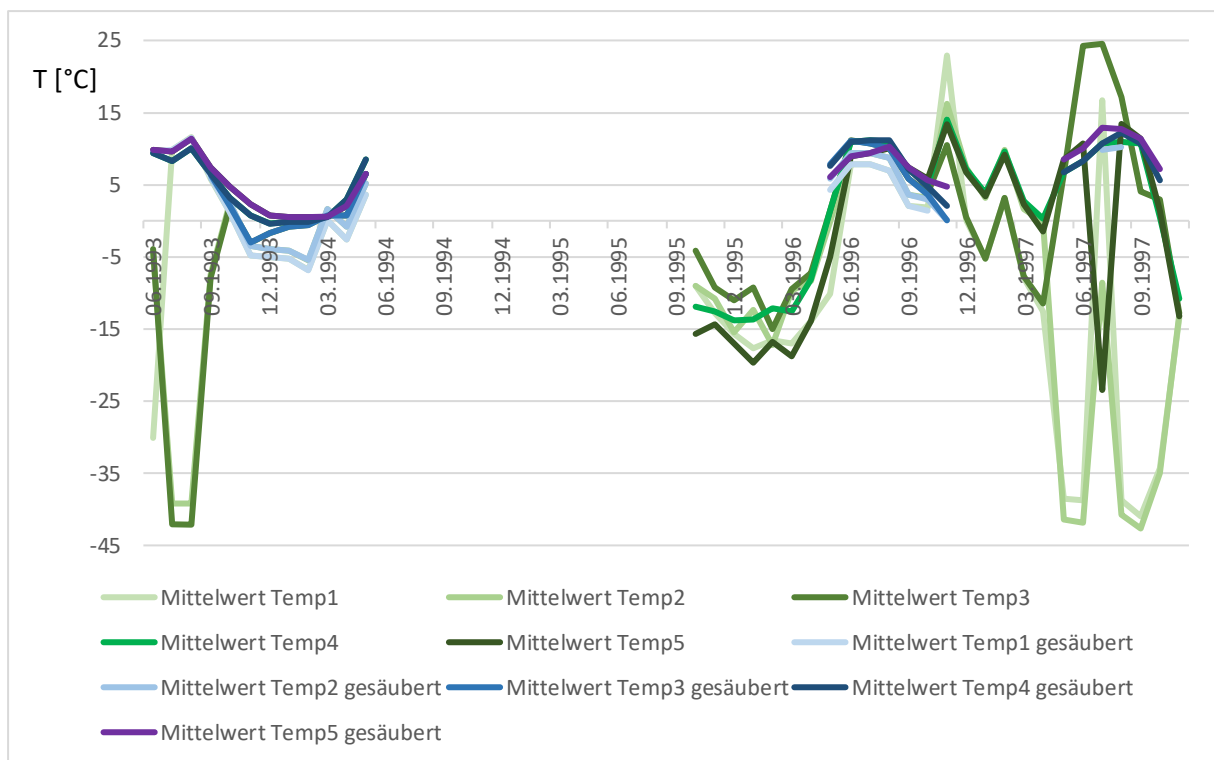


Abbildung 19: Übersicht gesäuberte und ungesäuberte Temperaturreihen von Monatsmittelwerten Trupchun 1993–1997

Für die detaillierte Analyse werden drei spezifische Datenpakete identifiziert: Juni 1993 bis Mai 1994, Mai 1996 bis November 1996 und Mai 1997 bis Oktober 1997. Diese Zeiträume wurden aufgrund ihrer relativen Datenvollständigkeit und Plausibilität der Temperaturverläufe ausgewählt. Innerhalb dieser Pakete analysierte ich die Tagesmittelwerte sowie Stundenwerte spezifischer Tage, um Tagesgangkurven und mögliche Messfehler wie auch inhomogene Spalten zu identifizieren.

Die Wintertemperaturen der Saison 1993-1994 weisen in zwei von fünf Parametern signifikante Abweichungen zu den restlichen Temperaturparametern auf, was auf zusätzliche Lufttemperaturmessungen für den kompletten Datensatz von 1993-1997 hindeutet.

Durch den Vergleich der Temperaturdaten mit Lufttemperaturen aus anderen Jahren (z.B. Trupchun 2005) vermute ich, dass 2 von 5 Parameter Lufttemperaturen darstellen. Diese Vermutung stützt sich auf den Tagesgangkurven, die typische Merkmale von Lufttemperaturverläufen aufweisen (vgl. Abbildung 20). Aus zusätzlicher Dokumentation entnahm ich ebenfalls, dass im Zeitraum von 1993-1997 stündliche Lufttemperaturmaximum und Lufttemperaturmittelwert gemessen wurden. Dies würde mit dem nicht überschneidenden Verlauf ($\text{Lufttemp} \leq \text{Lufttempmax}$) der beiden Temperaturkurven (Temp1 und Temp2) übereinstimmen (vgl. Abbildung 20). Ausserdem bleiben die Bodentemperaturen im Winter unter einer Schneedecke häufig bei ungefähr 0 Grad Celsius, weil die Schneedecke als Isolator fungiert. Der Wärmeverlust des Bodens an die kalte Luft wird reduziert und verhindert damit das Eindringen von kalten Temperaturen in tiefere Bodenschichten. Dies resultiert in Folge in Bodentemperaturen um den Gefrierpunkt und unterscheidet sich damit von der variableren Lufttemperatur.

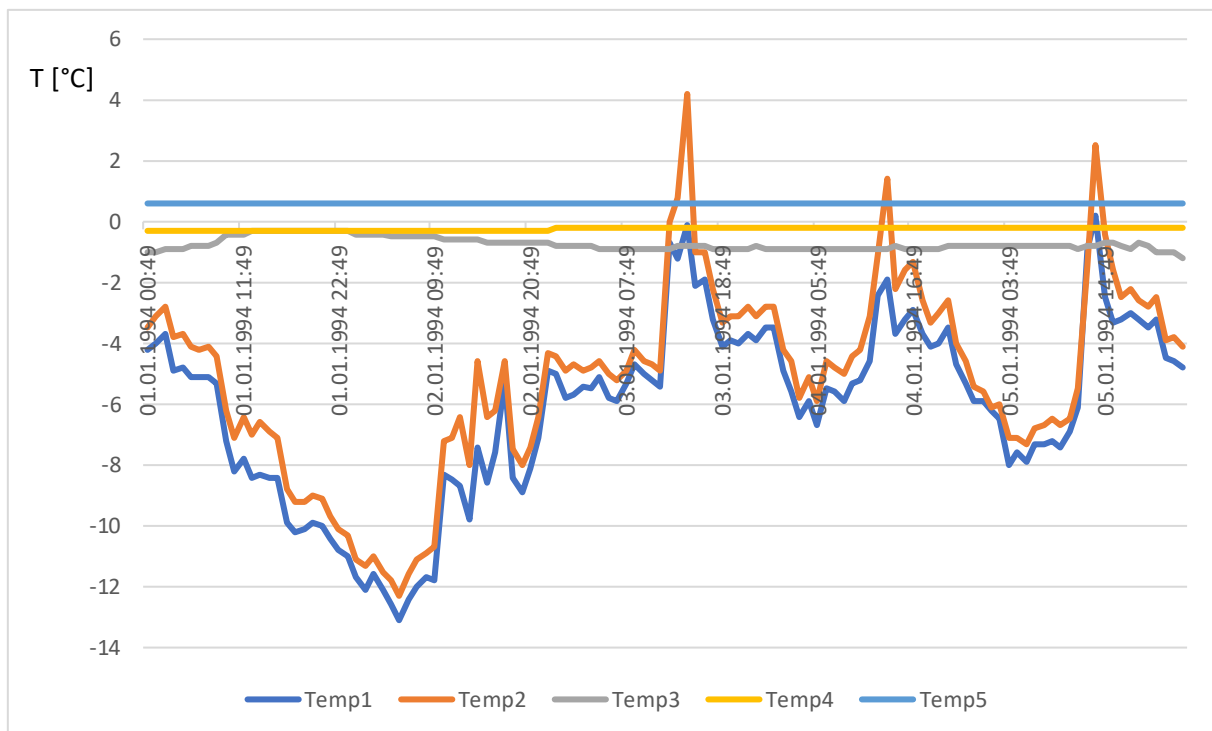


Abbildung 20: Temperaturreihen Trupchun im Januar 1994

Anschliessend wurde ein Vergleich der Lufttemperaturdaten mit den Lufttemperaturdaten der nahegelegenen Station Chavagl durchgeführt. Diese Vergleichsdaten dienen dazu, die Plausibilität der Lufttemperaturen zu bestätigen, da dadurch die gesamte Vergleichsunsicherheit minimiert werden kann. Trupchun weist eine Unsicherheit auf, weil die zu vergleichenden Daten nicht vom gleichen Jahr stammen, und Chavagl besitzt für den Vergleich mit Trupchun eine räumliche Unsicherheit (vgl. Abbildung 1). Die Klimastationen befinden sich in alpinem Gelände, welche von mikro- wie auch makroklimatischen Prozessen beeinflusst sind. Je nach vorherrschender Wetterlage können die lokalen Einflüsse einen direkten Vergleich aufgrund der geographischen Distanz bereits erschweren.

Die initialen Analyseergebnisse indizieren, dass die Datenpakete aus den Jahren 1993-1994 und 1996 nutzbar sind, sofern die Parameter richtig bestimmt werden können.

In diesen Zeiträumen sind keine Aufzeichnungslücken vorhanden. Die gesäuberten Daten entsprechen bei den genannten Perioden den ungesäuberten, was darauf hinweist, dass die Wahrscheinlichkeit, dass die Station korrekt gemessen hat, hoch ist. Im Unterschied dazu sind die Daten aus 1997 aufgrund zahlreicher Ausreißer im ungesäuberten Datensatz und den fehlenden Parameter weniger zuverlässig.

Da nur ein Teil des Datensatzes nutzbar ist, und dem entstehenden Aufwand diese Daten zu formatieren, wurde die Datenaufbereitung nicht weitergeführt. Die insgesamt aufaddierte maximal brauchbare Datenmenge, ausgehend vom Vergleich zwischen gesäubertem und ungesäubertem Datensatz, liegt bei maximal 25 Prozent, bezogen auf die ganze Datenreihe von 1993-1997. Zudem fehlt es an ausreichender Dokumentation und an Vergleichsstationen ab 1993, die für die Identifizierung der Parameter nützlich wären.

4.4. Formatierung Trupchun 2004-2024

Auch hier wurden alle vorhandenen Datenpakete mithilfe von Excel chronologisch zu einem Arbeitsdokument übereinander gebracht. Bei diesem Prozess war lediglich die Markierung von Aufzeichnungslücken notwendig, da ab 2004 keine spaltenverschobenen Parameter vorkommen.

4.4.1. Header

Die beiden Headerdokumente vor und nach 2016 enthalten nicht die gleichen Bodentemperaturparameter (vgl. Abbildung 8 und 9). Als Gesamtübersicht wurden wiederum direkte Bodentemperaturvergleiche (vgl. Abbildung 21 und 22) und Plots der mittleren Tagesamplituden aller Parameter der durchgehend zusammengeführten Zeitreihen erstellt (Abbildung 23), um allfällige Parameterwechsel analog zum Vorgang in Kapitel 4.2.2 zu erkennen. Dabei muss, aufgrund des theoretisch vorhandenen Wechsels der absoluten Parameter in den Headerdokumenten (vgl. Abbildung 21 und 22 mit Abbildung 8 und 9) eine Veränderung in den Datenwerten und Tagesgängen zu sehen sein. Die scheinbar gemessenen Bodentemperaturparameter variieren gemäss Headerdokument von 0 cm, 25 cm, 50 cm, 100 cm zu 0 cm, 20 cm, 40 cm. Diese Veränderung ist in keiner der Datenanalysen ersichtlich. Aufgrund der Ausgangslage, dass die Datenreihen ab 2016 für Trupchun und ab 2018 für Chavagl und die zugehörigen Headerdokument verifiziert sind, weil die Datensätze bereits bei MeteoSchweiz in der Datenbank aufgenommen wurden, ist davon auszugehen, dass die Parameter im Headerdokument vor 2016 folglich falsch sein müssen. Dies konnte Gubler (2024) ebenfalls bestätigen. Als möglichen Grund nannte er die damalige Verwendung von unpassenden Standard-Programmblöcken für den Header, welche dann in folgenden Zusammenstellungen vom SNP in Header-Dokumente integriert wurden. Auch bei der Datenreihe von Trupchun 2004–2024 haben sich laut ihm die Bodentemperaturparameter und ihre Messtiefen nicht verändert.

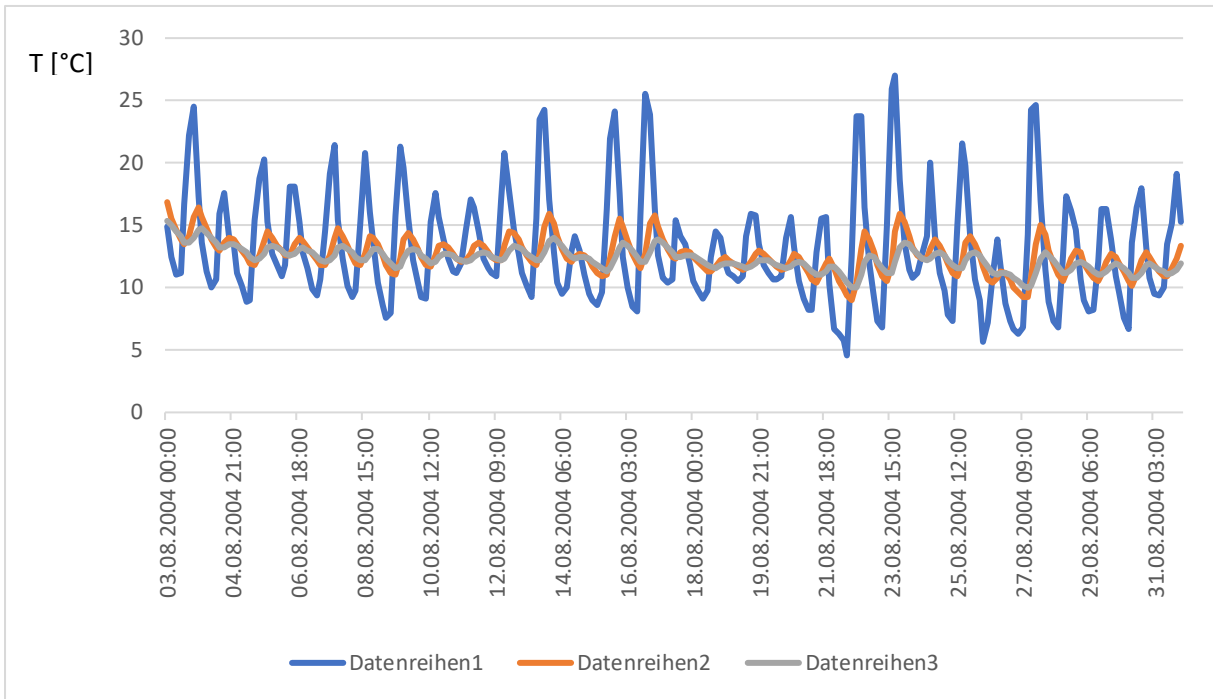


Abbildung 21: Ausschnitt der Bodentemperaturen Trupchun im August 2004

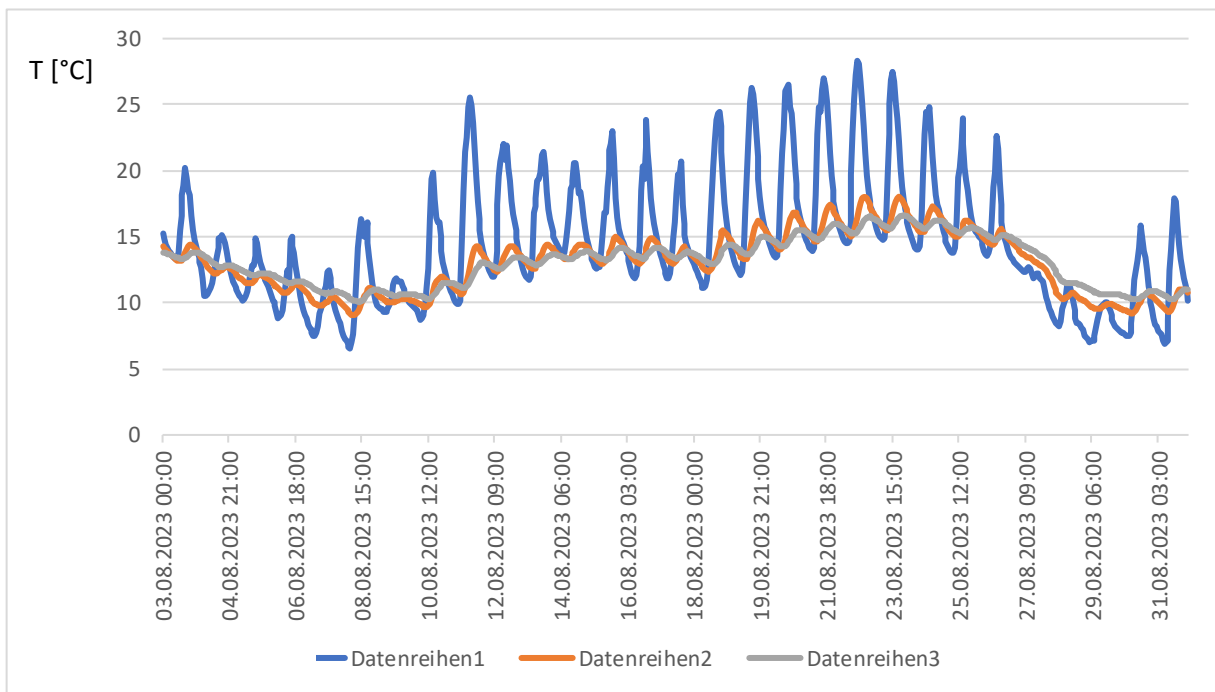


Abbildung 22: Ausschnitt der Bodentemperaturen Trupchun im August 2023

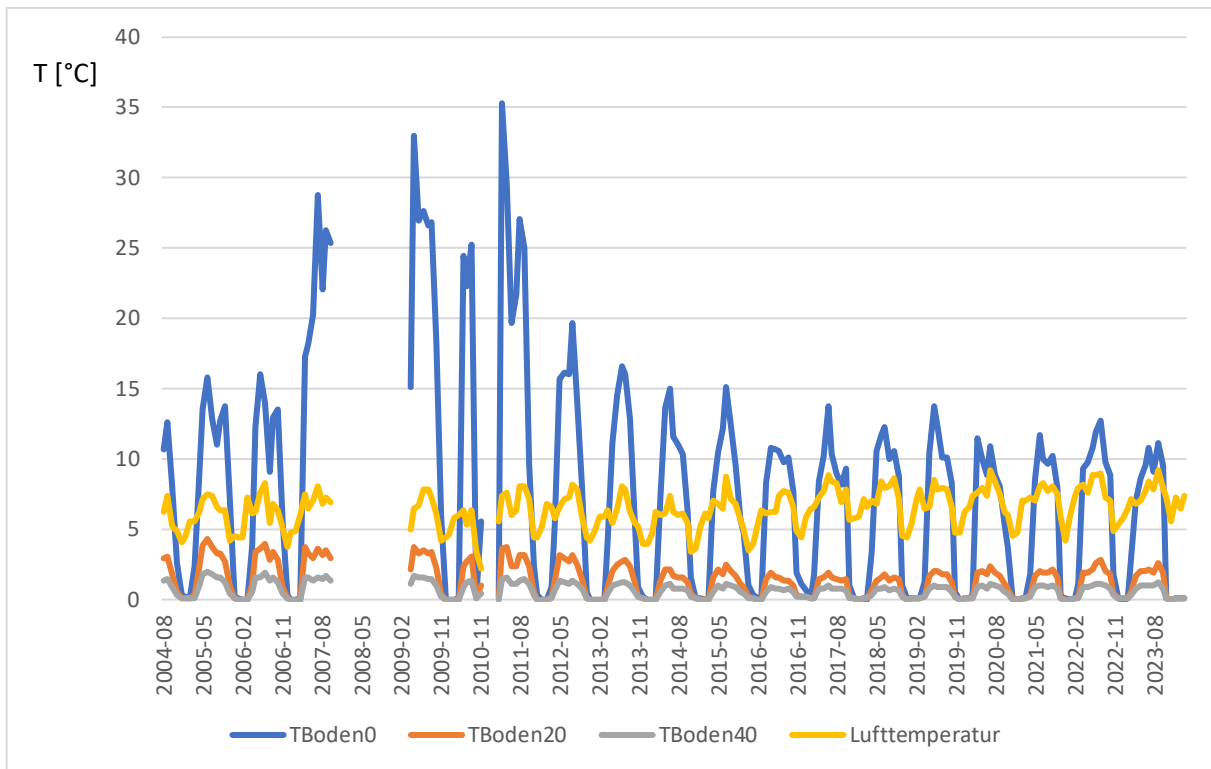


Abbildung 23: Monatsmittelwerte Tagesamplituden Trupchun über die Zeitreihe 2004-2024

4.4.2. Zeitstempel

Bei der Datenreihe Trupchun 2004–2024 liegen Zeitstempel bei den Daten vor 2016 ebenfalls im Julian Day-Format vor. Die Formatierung der Zeitstempel wurde analog zum Kapitel 4.2.1. vorgenommen. Anschliessend wurde das Arbeitsdokument mit dem neusten Headerdokument überschrieben und die jeweiligen Spalten aufgrund des alten Headers den Header-Parametern des Headers ab 2016 zugeordnet. Zudem wurden die Daten ab 2016 angefügt.

5. Endprodukte

5.1. Strukturierte Datenreihe Chavagl 1995–2024 und Trupchun 2004–2024

5.1.1. Datenreihen

Aufgrund der unterschiedlichen Zeitauflösungen (vgl. Kapitel 3.1.) wurden keine fortlaufenden Zeitstempel ohne aufgezeichnete Daten an Aufzeichnungslücken fortgeführt, sondern eine NAN-Zeile in die Datenreihe eingefügt. Ausserdem wurden alle Aufzeichnungslücken in der formatierten Datenreihe, wie auch in der Dateninformationsübersicht (vgl. Kapitel 5.1.2.) als solche schriftlich markiert. Leere Felder, wie auch Felder, welche Konstanten und Fehlerwerte beinhalten, sind als NAN-Felder vorzufinden. Unplausible Werte (Wert vorhanden) wurden nicht als NAN-Felder ausgegeben, da der Datensatz nicht auf plausibilitätsbezogene Fehlerwerte gesäubert wurde. Im folgenden Kapitel werden die Kriterien für die Feldzuordnung genauer beschrieben.

5.1.2. Dateninformationsübersicht

Zusätzlich zu den Datenreihen wurde eine Datenübersicht in Monatsauflösung aller Parameter erstellt. Darin enthalten sind Informationen über Aufzeichnungslücken, wichtige Ereignisse wie beispielsweise Sensorwechsel oder Blitzschlag, wie auch eine erste monatliche Qualitätseinordnung für die Daten nach Kriterien. Daraus folgte, falls in bereits bestehender Dokumentation Sensordefekte beschrieben sind, die Zuweisung "DEF" für die betroffenen Felder (vgl. Abbildung 24). Auch wurden, falls einige nacheinander folgende Datenwerte mit dem Wert 6999 in einem Monat vorkamen, die Felder im Übersichtsdokument entsprechend mit der Markierung "OFF" gekennzeichnet (vgl. Abbildung 24), da die Station den Wert 6999 nur ausgibt, falls der Sensor nicht eingeschaltet oder angeschlossen ist. Beim Parameter Schneehöhe wurden alle Werte (ausser 6999), welche grösser als 6000 sind, als "NO" ausgegeben (vgl. Abbildung 24), falls die Schneemessung aufgrund der Vegetation nicht möglich war. Bei Doppelzuweisungen ist unklar, welche Fehlerkonstante priorisiert werden muss. Alle übrigen Werte über/unter 6000 aller Parameter (ausser Parameter Schneehöhe) fallen in die Subkategorie "Weitere Fehlerwerte" (vgl. Abbildung 24). Die genannten Subkategorien wurden zusammengefasst unter der Kategorie Fehlercodes/Konstanten. Unplausible Werte werden ebenfalls beschrieben. Die Kriterien dafür sind parameterabhängig. Beispielsweise dauerhaft gleichbleibende Lufttemperaturdaten können bei einer visuellen Analyse im Dokument auffallen und darauf hinweisen, dass möglicherweise die Sensoraufzeichnung behindert wurde. Dies bedingt jedoch nicht die Ausgabe eines Fehlerwertes. Da unplausible Werte parameterspezifisch nach klar definierten Kriterien beurteilt werden müssen, wurden diese in der erstellten Übersicht nur grob nach eigenem Ermessen abgebildet und sollen zukünftigen Forschenden oder Qualitätsprüfenden lediglich dabei helfen, sich schneller in den Daten und ihrer Qualität zu orientieren. Auch sind in der Übersicht Zeitauflösungen und die Parameter mit den zugehörigen Einheiten vorhanden.

In Tabelle 6 und 7 wird für beide Stationen eine Schnellübersicht für alle gemessenen Parameter und deren Messdauer und Zeitauflösung gegeben. Die Grundlage dieser Übersicht ist die jeweilige Dateninformationsübersicht. Die dabei integrierten Parameterbezeichnungen von Trupchun 1993-1997 bleiben in der Rohform erhalten.

Beschrieb	Markierung	Folgende Kriterien führen zu NAN-Werten:											
Messvorgang	gemessen	nicht gemessen											
	zeitweise gemessen	Alle Fehlercodes/Konstanten (Werte >6000 und <-6000)											
	nicht gemessen												
Fehlercodes/Konstanten		Folgende Kriterien führen nicht zu NAN-Werten:											
Sensor off/nicht angeschlossen	OFF	Unplausible Werte											
Sensormessung unmöglich	NO	Aufzeichnungslücken führen nicht zu fortlaufenden NAN-Werten, da die Zeitintervalle nicht konstant sind! Aufzeichnungslücken sind als einzelne NAN-Zeilen im Datensatz vorzufinden											
Bekannter Sensordefekt	DEF												
Weitere Fehlerwerte	XXX												
Vereinzelte Fehlercodes werden nicht markiert!													
Unplausible Werte	???												
Parameter-Einheit/Format	TT:MM:JJJJ hh:mm	Index; num	Bezeichnung	°C	°C	°C	cm	°C	V	binär	No.	h oder min	
Header	TMStamp	RECNR	Station	TBoden0	TBoden20	TBoden40	Schneehöhe	Loggertem	Batteriespa	Quality	FTPTransf	Zeitauflösu	Bemerkung
Jul 95				???	???	???						3h	
Aug 95				???	???	???						3h	
Sep 95												3h	Aufzeichnungslücke 15.09.1995 - 16.09.1995
Oktober 95												3h (1h/5h)	
Nov 95												3h (1h/5h)	
Dez 95												3h (1h/5h)	
Jan 96												3h (1h/5h)	
Feb 96												3h (1h/5h)	
März 96												3h (1h/5h)	
Apr 96												3h (1h/5h)	
Mai 96												3h (1h/5h)	
Jun 96												3h (1h/5h)	
Juli 96												3h (1h/5h)/3h	
Aug 96												3h	

Abbildung 24: Ausschnitt aus Dateninformationsübersicht Chavagl 2004-2024

Parameter	Messdauer (Zeitauflösung)
Bodentemperaturen T10, T20, T40, T60, T100	1995-2018 (3 h) 2018-2023 (1 h) 2023-2024 (10 min)
Lufttemperatur-Mittelwert, -Minimum, -Maximum	
Loggertemperatur, Batteriespannung	
Luftfeuchtigkeit	2018-2023 (1 h)
Windrichtung	2023-2024 (10 min)
Oberflächentemperatur, Strahlung, Windgeschwindigkeit, Windspitze, Schneehöhe	1998-2018 (3 h) 2018-2023 (1 h) 2023-2024 (10 min)

Tabelle 6: Schnellübersicht Parameter und Messdauer Chavagl 1995-2024

Parameter	Messdauer (Zeitauflösung)
Temp1, Temp2, Temp3, Temp4, Temp5	1993-1997 (1 h)
Windgeschwindigkeit 1, Windgeschwindigkeit 2, Windrichtung	
Bodentemperaturen T5, T20, T40, Lufttemperatur-Mittelwert, -Minimum, -Maximum	2004-2007 (3 h) 2008-2016 (3 h) 2016-2023 (1 h) 2023-2024 (10 min)
Oberflächentemperatur, Strahlung, Windgeschwindigkeit, Windspitze, Windrichtung, Schneehöhe	
Loggertemperatur, Batteriespannung	
Luftfeuchtigkeit	2016-2023 (1 h) 2023-2024 (10 min)

Tabelle 7: Schnellübersicht Parameter und Messdauer Trupchun 1993-2024

5.2. Teilformatierte Datenreihe und Übersicht Trupchun 1993–1997

Wie in Kapitel 4.3.2. erwähnt, ist der Versuch einer vollständig formatierten Datenreihe nicht sinnvoll. Aufgrund dessen liegt als Endresultat eine zusammengestellte Datenreihe mit möglicherweise spaltenverschobenen Inhalten und korrekten Zeitstempel vor.

Spaltenverschiebungen in den genannten Datenpaketen von 1993-1994 und 1996 sind jedoch unwahrscheinlich (vgl. Abbildung 20). Die Zeitüberlappungen und Aufzeichnungslücken wurden in der Datenreihe wie auch in der Dateninformationsübersicht gekennzeichnet. Auch wurden fortlaufende Indices eingefügt. Zusätzlich wurden die gesäuberten Temperaturdaten Temp1-Temp5 auf einem separaten Excel-Blatt ausgegeben.

Eine vollständige spaltenhomogene Datenreihe und die zugehörige Dateninformationsübersicht können in dieser Arbeit nicht einheitlich strukturiert umgesetzt werden. Einerseits fehlt jegliche Dokumentation aus dieser Zeit, was die Formatierung und Parameterbestimmung nur von der Datenanalyse selbst abhängig macht. Ausserdem liegen folgende Herausforderungen vor: Die exakten Messtiefen der 3 Bodentemperaturen sind unbekannt, die Gründe für die Spaltenverschiebungen sind ebenfalls unbekannt und folgen keinem zeitlichen Abhängigkeiten (wie z.B. Datenpaketübergänge) und die Messdaten haben viele Fehlerwerte ausserhalb der genannten Pakete (vgl. Kapitel 4.3.2.).

Die Datenreihe selbst beinhaltet alle Werte der Rohdaten im ursprünglichen Sortierungszustand. Zeitüberlappungen wurden nicht eliminiert, jedoch wurde in der Dateninformationsübersicht beschrieben, welche Zeilen bei der Erstellung einer strukturierten Zeitreihe priorisiert werden müssen. Weiter werden keine NAN-Werte ausgegeben, da in der ungesäuberten Datenreihe von 1993 -1997 keine Fehlercodes oder Konstanten vorkommen. Den Legendenbeschrieb habe ich dementsprechend vereinfacht. Lediglich unplausible Werte sind neben den Messvorgängen als Feldmarkierung im Übersichtsdokument möglich. Diese wurden durch die vorgängige Analyse der Temperaturen und dem dazu nötigen gesäuberten Datensatz für alle Temperaturparameter akkurat in der Übersicht gekennzeichnet. Bei einer zukünftigen Weiterarbeit an den Daten muss beachtet werden, dass die Kennzeichnungen aufgrund der möglichen Spaltenverschiebungen nur für den Datensatz und nicht für die beschrifteten Parameter selbst gültig sind.

6. Schlussfolgerung

Die Aufbereitung der Rohdaten zeigte signifikante Unterschiede in der Datenqualität und deren Auflösung. Trotz dieser Herausforderungen konnten die Daten für Chavagl ab 1995 und Trupchun ab 2004 strukturiert werden.

Rückblickend sind die notwendigen methodischen Schritte schnell zusammengefasst, im Prozess selbst gab es jedoch einige Herausforderungen. Um die Wichtigsten zu nennen, will ich auf die Rahmenbedingungen eingehen. Da die Stationshistorie bei beiden Stationen mehr als drei Jahrzehnte zurückreicht, ist die Anzahl beteiligter Personen und Projekte gross. Dies führte im Fall von Trupchun und Chavagl zu vielen teilformatierten wie auch unformatierter Daten (vgl. Kapitel 1.). Im Zusammenspiel mit der kurzen Projektdauer von drei Monaten hat die Anzahl der Ansprechpartner und deren unterschiedliche Verfügbarkeit zur Herausforderung geführt, dass ich mich nach Anfragen über benötigten Informationen auf Antworten gedulden musste. Für die effiziente Weiterarbeit an den Daten benötigte ich andere Wege, welche deutlich zeitaufwendiger waren. Ein Mitgrund für diesen Zeitaufwand ist die Vertrauenswürdigkeit der Dokumente. Die Qualität war nicht bekannt; wie beispielsweise die falschen Parameter in den Headerdokumenten. Die Einschätzungen über die Vertrauenswürdigkeit liessen sich nur mit erheblichem Zeitaufwand durch Datenanalysen und Vergleiche vermuten. Gubler (2024) konnte mir gegen Ende alle meine Vermutungen bestätigen. Dies verifizierte mir meine eigenhändig erarbeitete Methodik.

Bei den Trupchun-Daten aus den Jahren 1993–1997 erwies sich eine vollständige Strukturierung als nicht praktikabel, aufgrund zahlreicher Ausreisser, Aufzeichnungslücken, fehlender Parameterdokumentationen und der Spalteninhomogenität (vgl. Kapitel 4.3.2.). Ausserdem ist der benötigte Aufwand zu gross für diese Arbeit (vgl. Kapitel 5.2.). Für Arbeiten an diesem Datensatz empfehle ich nur die Verwendung der beschriebenen Perioden von September 1993 – Mai 1994 und Mai 1996 – Oktober 1996. Mit unterschiedlichen Datenanalysen könnten in den genannten Perioden die Parameter mit entsprechendem Zeitaufwand möglicherweise bestimmt werden.

Die sorgfältige Korrektur und Vereinheitlichung von Zeitstempeln sowie die präzise Zuordnung von Temperaturparametern ist entscheidend für die Erstellung strukturierter Zeitreihen. Der Vergleich der beiden Stationsdaten erwies sich als wertvoll, um systematische Fehler zu identifizieren und die Plausibilität der Daten zu überprüfen. Die formatierten Datenreihen bieten eine robuste Grundlage für zukünftige Forschungsprojekte und langfristige Klimastudien. Es muss beachtet werden, dass die Daten noch keiner vollständigen Qualitätskontrolle bezüglich der Aussortierung von unplausiblen Daten unterzogen wurden, was in einem nächsten Schritt bei der Integration in die Datenbank von MeteoSchweiz durchgeführt werden könnte.

Zukünftige Arbeiten könnten sich um mikroklimatische Vergleiche der beiden Stationen ab 2004 handeln. Auch könnten dafür die täglich aufgelösten historischen Wetterlagen-Klassifikationen von MeteoSchweiz miteinbezogen werden. Die Möglichkeiten in der Entwicklung von Methoden zur automatisierten Fehlererkennung wie auch der Datenbereinigung, um Effizienz und Genauigkeit der Datenaufbereitung zu verbessern, sind ebenfalls vorhanden. Eine weitere Modernisierung der Sensoren könnte dazu beitragen, die Datenqualität zu steigern und bisher unerkannte Anomalien zu identifizieren.

Verdankungen

Ein herzlicher Dank geht an meinen Betreuer, Prof. Dr. Stefan Brönnimann. Seine laufende Unterstützung wie auch seine Bereitschaft, stets als Ansprechpartner jeglicher Themen zur Verfügung zu stehen, haben maßgeblich zum Fortschritt meiner Arbeit beigetragen.

Zudem gilt mein besonderer Dank Dr. Stefanie Gubler. Sie hat die Arbeit co-betreut, das Projekt aufgezogen und beantragt, sowie viele hilfreiche Inputs für die Datenanalyse gegeben.

Ich danke Dr. Samuel Wiesmann herzlich für die Co-betreuung und die Bereitstellung der Daten inklusive der detaillierten Erklärungen.

Ein besonderer Dank geht an Dr. Hansueli Gubler für die großzügige Bereitstellung seiner privaten Daten und die entscheidenden Erklärungen, die halfen, Wissenslücken aus den Daten zu schließen.

Joël Fisler von MeteoSchweiz danke ich für seine Unterstützung durch die Bereitstellung von privater Stationsdokumentation. Auch die bereits prozessierten Datensätze waren von großem Wert.

Mein Dank gilt auch allen beteiligten Personen des Schweizerischen Nationalparks für ihre Ermöglichung und Vorarbeit des Projektes.

Mein Dank gehört ebenfalls den Entwicklern von Excel, das eine hervorragende Arbeitsplattform für die Datenformatierung bot, sowie den Programmierern von Python, dessen Einsatz wesentlich für die Programmierung der Datenreihen war.

Schließlich möchte ich OpenAI danken, das durch die Bereitstellung von Programmierideen, Automatisierung und hilfreichen Tipps zur Effizienz der Arbeit beigetragen hat.

Literaturverzeichnis

Campbell, G.S. und Norman, J.M., 1998. *An Introduction to Environmental Biophysics* (2nd ed.). New York, NY: Springer. ISBN: 978-0387949376.

Gamper, M., 1981. *Heutige Solifluktionsträger von Erdströmen und klimamorphologische Interpretation fossiler Böden*. Ergebnisse der wissenschaftlichen Untersuchungen im Schweizerischen Nationalpark, Band XV. Zürich: Geographisches Institut der Universität Zürich.

Gubler, H., 2024. *Mailaustausch über Vergrabungstiefen der Sensoren* [E-Mail], 01. Juni 2024.

Hillel, D., 1982. *Introduction to Soil Physics*. San Diego, CA: Academic Press.

Keller, F., 1996. *Periglazialforschung im Schweizerischen Nationalpark: Bericht über die Installation der Klimastation und über die Erdstrommessungen in den Jahren 1995 und 1996*.

Keller, F. und Tamás, M., 2003. *Klimastation und Erdstrommessungen am Munt Chavagl 2003: Periglazialforschung im Schweizerischen Nationalpark*. Samedan: Academia Engiadina.

Keller, F. und Tamás, M., 2004. *Klimastation und Erdstrommessungen am Munt Chavagl 2004: Periglazialforschung im Schweizerischen Nationalpark*. Samedan: Academia Engiadina.

Kupper, P., 2014. *Creating Wilderness: A Transnational History of the Swiss National Park*. New York, NY: Berghahn Books. ISBN: 978-1782382334.

Schweizerischer Nationalpark, 2024. *Besonderheiten des Nationalparks*. Verfügbar unter: <https://www.nationalpark.ch/de/flora-und-fauna/besonderheiten/> [abgerufen am 30. Juni 2024].