

FORSCHUNGSBERICHT
IM AUFTRAG DES LANDES TIROL

ANALYSE VON SCHNEEMESSREIHEN
DES HD TIROL
- VERGANGENHEIT

Konrad Andre, Mag. Roland Koch und Dr. Marc Olefs
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, Österreich

Dezember 2019

INHALT

1	Datenbasis und -aufbereitung.....	4
1.1	Schneezeitreihen: Analyse- und Referenzstandorte.....	4
1.2	Datenaufbereitung.....	7
1.2.1	Qualitätskontrolle.....	7
1.2.2	Vervollständigung der Beobachtungslücken, Zeitreihenverlängerung.....	7
1.3	Homogenisierung.....	10
1.3.1	Bruchdetektion und Korrekturfaktor	10
1.3.2	Berechnete Korrekturfaktoren, Homogenisierungseffekt.....	11
2	Entwicklung der klimatologischen Randbedingungen.....	13
3	Schneeindikatoren.....	17
3.1	Definition	17
3.2	Zeitreihen der Schneeindikatoren	17
3.2.1	mittlere Gesamtschneehöhe	20
3.2.2	maximale Gesamtschneehöhe	21
3.2.3	Schneedeckendauer ≥ 1 cm	22
3.2.4	Schneedeckendauer ≥ 5 cm	23
3.2.5	Schneedeckendauer ≥ 10 cm	24
3.2.6	Schneedeckendauer ≥ 30 cm	25
3.3	Anomalien	26
3.3.1	mittlere Gesamtschneehöhe	28
3.3.2	maximale Gesamtschneehöhe	29
3.3.3	Schneedeckendauer ≥ 1 cm	30
3.3.4	Schneedeckendauer ≥ 5 cm	31
3.3.5	Schneedeckendauer ≥ 10 cm	32
3.3.6	Schneedeckendauer ≥ 30 cm	33
4	Trendanalyse.....	34
4.1	Trends gewählter Schneeindikatoren für die Zeiträume 1950/1951 bis 2018/2019 und 1900/1901 bis 2018/2019.....	34
4.2	Regionale Verteilung 1950/1951 bis 2018/2019.....	39
4.2.1	mittlere Gesamtschneehöhe	39
4.2.2	maximale Gesamtschneehöhe	39
4.2.3	Schneedeckendauer ≥ 10 cm	40
4.3	Regionale Verteilung 1900/1901 bis 2018/2019.....	40

4.3.1	mittlere Gesamtschneehöhe	40
4.3.2	maximale Gesamtschneehöhe	41
4.3.3	Schneedeckendauer ≥ 10 cm	41
4.4	Höhenverteilung 1950/1951 bis 2018/2019	42
4.4.1	mittlere Gesamtschneehöhe	42
4.4.2	maximale Gesamtschneehöhe	42
4.4.3	Schneedeckendauer ≥ 10 cm	43
4.5	Höhenverteilung 1900/1901 bis 2018/2019	43
4.5.1	mittlere Gesamtschneehöhe	43
4.5.2	maximale Gesamtschneehöhe	44
4.5.3	Schneedeckendauer ≥ 10 cm	44
4.6	Regionale Verteilung: SNOWGRID–CL 1961/1962 bis 2017/2018	44
4.6.1	mittlere Gesamtschneehöhe	45
4.6.2	maximale Gesamtschneehöhe	46
4.6.3	Schneedeckendauer ≥ 10 cm	46
4.7	Gleitende Trends gewählter Schneeindikatoren	47
4.7.1	mittlere Gesamtschneehöhe	48
4.7.2	maximale Gesamtschneehöhe	50
4.7.3	Schneedeckendauer ≥ 1 cm	52
4.7.4	Schneedeckendauer ≥ 5 cm	54
4.7.5	Schneedeckendauer ≥ 10 cm	56
4.7.6	Schneedeckendauer ≥ 30 cm	58
5	Zusammenfassung	60
6	Literatur	62
7	Anhang	66
7.1	Saisonale Schneezeitreihen	66
7.2	Saisonale Anomaliezeitreihen	129
7.3	Gleitende Trends saisonaler Schneeindikatoren	192

1 DATENBASIS UND -AUFBEREITUNG

Als Datengrundlage der Analyse der vergangenen Entwicklung gewählter Schneeindikatoren dienen 99 Langzeit-Stationszeitreihen des Hydrographischen Dienstes (HD) Tirols zum Parameter Schneehöhe. Erweiternd zu diesen potentiellen Analysestandorten wurden Schneezeitreihen der ZAMG als Referenzzeitreihen herangezogen und zusätzliche Informationen aus Lufttemperatur- und Niederschlagszeitreihen des HD und der ZAMG für punktuelle Witterungseinschätzungen eingebunden.

1.1 SCHNEEZEITREIHEN: ANALYSE- UND REFERENZSTANDORTE

Unter dem Gesichtspunkt möglichst langzeitliche Aussagen zu gewinnen, wurde aus dem HD Datensatz eine Gruppe von 31 Schneezeitreihen (s. Tabelle 1.1) gewählt, deren Messzeiträume einerseits weit in die Vergangenheit zurückreichen und andererseits einen hohen Grad an präsenter Messdatenabdeckung, d.h. möglichst wenige Lücken, aufweisen. Zugleich gewährleistet die Selektion eine gleichmäßige geographische Abdeckung Nord- und Osttirols in unterschiedlichen Höhenlagen (s. Abb. 1.1). Alle durchgeführten Analysen beziehen sich im Folgenden auf diese gewählten 31 Untersuchungszeitreihen. Als Untersuchungszeitraum wurden die Winter 1895/1896 bis 2018/2019 festgelegt.

Tabelle 1.1 Gewählte Analysestandorte der Messzeitreihen der Schneehöhe des HD.

Lfd. Nr.	HZB Nr.	DBMS Nr.	geo. Länge [Grad Ost]	geo. Breite [Grad Nord]	Höhe [m. ü.M.]	Stationsort
1	101162	7000003	10,53521	47,26832	1320	Gramais
2	101212	7000008	10,58548	47,41913	910	Forchach
3	101220	7000009	10,68085	47,47092	874	Höfen
4	101246	7000011	10,75073	47,40719	1295	Berwang
5	101287	7000015	11,26355	47,38896	959	Scharnitz
6	101303	7000017	11,14207	47,37054	1135	Leutasch
7	101311	7000018	11,46329	47,47973	920	Hinterriß
8	101337	7000020	11,70282	47,44336	930	Pertisau
9	101956	7000065	10,47036	47,08408	1063	See im Paznaun
10	102046	7000074	10,86717	46,98702	1605	Plangeroß
11	102236	7000093	10,96961	47,07585	1180	Längenfeld
12	102251	7000095	10,88583	47,20540	760	Oetz
13	102319	7000101	11,15215	47,18810	1227	Gries im Sellrain
14	102368	7000106	11,41788	47,08392	1235	Trins
15	102384	7000108	11,40040	47,18339	1009	Schönberg im Stubaital
16	102467	7000116	11,56118	47,32112	875	St.Martin i.G.
17	102509	7000120	11,79950	47,38832	563	Rotholz
18	102681	7000138	12,02936	47,22396	1263	Gerlos
19	102756	7000145	11,79886	47,50887	1020	Steinberg am Rofan
20	102764	7000146	12,02611	47,42973	790	Wildschönau Mühlal
21	102772	7000147	12,13819	47,38572	801	Kelchsau
22	102798	7000149	12,08687	47,51614	496	Kirchbichl
23	102806	7000150	12,27801	47,52445	750	Ellmau
24	102830	7000153	12,42627	47,38211	950	Jochberg
25	102863	7000156	12,31607	47,44585	830	Kirchberg in Tirol
26	102905	7000160	12,40215	47,67110	590	Kössen
27	102913	7000161	12,31689	47,63805	687	Walchsee
28	103135	7000183	12,54965	47,46780	850	Fieberbrunn
29	113027	7000213	12,35902	46,80949	1400	Innervillgraten
30	113084	7000219	12,62518	46,90446	750	St.Johann im Walde
31	113589	7000222	12,61857	46,70822	1400	Obertilliach

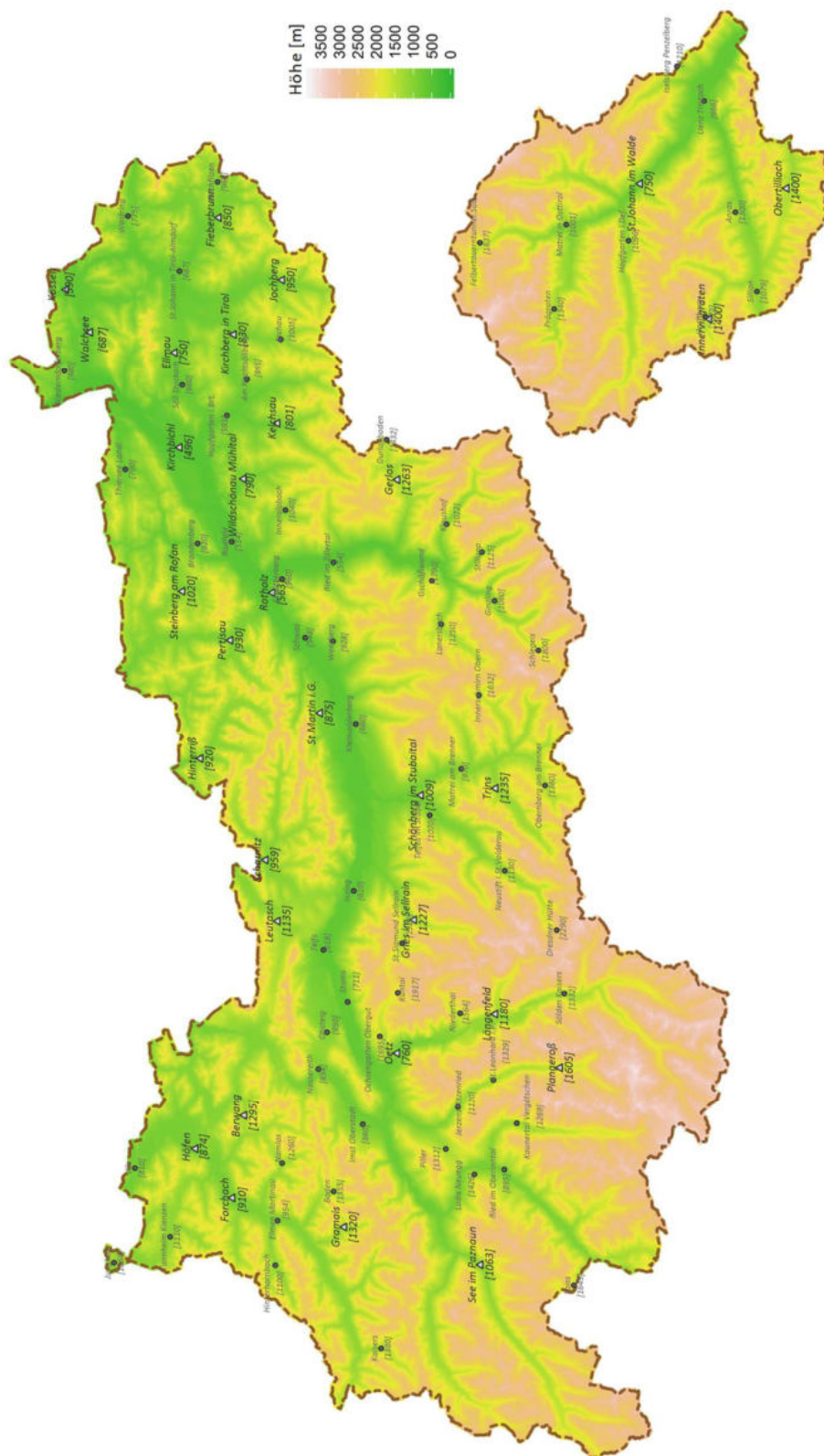


Abb. 1.1 Räumliche Verteilung der HD Messzeitreihen: die gewählten Untersuchungsstandorte sind mit einem Δ -Symbol und zugehöriger Höhenangabe gekennzeichnet.

Neben den 31 Untersuchungszeitreihen dienten 65 Schneezeitreihen des HD Tirol (s.Tabelle 1.2) und Informationen aus der ZAMG Datenbank, umfassend 666 Einzelzeitreihen, als Referenzzeitreihen im Zuge der Lückenfüllung und der Homogenitätstests.

Tabelle 1.2 Referenzstandorte der Messzeitreihen der Schneehöhe des HD.

Lfd. Nr.	HZB Nr.	DBMS Nr.	geo. Länge [Grad Ost]	geo. Breite [Grad Nord]	Höhe [m. ü.M.]	Stationsort
1	101147	7000001	10,29706	47,21273	1380	Kaisers
2	101170	7000004	10,60520	47,28415	1355	Boden
3	101188	7000005	10,45439	47,35858	1100	Hinterhornbach
4	101196	7000006	10,54331	47,35776	954	Elmen Martinau
5	101204	7000007	10,65797	47,35442	1260	Namlos
6	101261	7000013	10,50340	47,50064	1110	Tannheim Kienzen
7	101279	7000014	10,63796	47,55106	810	Vils
8	101493	7000036	10,44771	47,57439	1060	Junholz
9	101717	7000041	10,43619	46,95837	1643	Spiss
10	101790	7000049	10,66022	47,05688	895	Ried im Oberinntal
11	101816	7000051	10,64858	47,09671	1426	Ladis Neuegg
12	101873	7000057	10,75280	47,04238	1269	Kaunertal Vergötschen
13	102004	7000070	10,74074	47,24832	860	Imst Oberstadt
14	102061	7000076	10,83850	47,07559	1329	St.Leonhard i.P.
15	102079	7000077	10,78158	47,12195	1120	Jerzens Ritzenried
16	102228	7000092	11,01423	46,98440	1332	Sölden Kaisers
17	102269	7000096	10,91822	47,22944	1695	Ochsengarten Obergut
18	102277	7000097	10,98485	47,27388	711	Stams
19	102285	7000098	10,92321	47,30027	950	Obsteig
20	102301	7000100	11,08736	47,30833	618	Telfs
21	102350	7000105	11,42594	47,01782	1360	Obernberg am Brenner
22	102376	7000107	11,45487	47,13048	970	Matrei am Brenner
23	102400	7000110	11,36122	47,17113	1070	Telfes im Stubai
24	102434	7000113	11,54091	47,27307	660	Kleinvolderberg
25	102475	7000117	11,70510	47,30593	928	Weerberg
26	102483	7000118	11,71082	47,34334	548	Schwarz
27	102517	7000121	11,82725	47,37584	960	Schlitterberg
28	102632	7000133	11,79200	47,09087	1060	Ginzling
29	102640	7000134	11,74339	47,16170	1250	Lanersbach
30	102673	7000137	12,10889	47,23920	1432	Durлаßboden
31	102723	7000142	11,96501	47,37307	1040	Innernalpbach
32	102749	7000144	11,89501	47,48972	920	Brandenberg
33	102780	7000148	12,15213	47,45366	591	Hopfgarten i.Br.
34	102889	7000158	12,62100	47,46979	960	Hochfilzen
35	102954	7000165	10,84925	47,31004	854	Nassereith
36	102962	7000166	11,94253	47,15726	1022	Klaushof
37	102970	7000167	11,86238	47,30736	554	Ried im Zillertal
38	102988	7000168	11,69535	47,03088	1800	Schlegeis
39	102996	7000169	11,88837	47,10921	1125	Stillupp
40	103002	7000170	10,96907	47,12284	1564	Niederthai
41	103010	7000171	11,00590	47,20715	1917	Kühtai
42	103028	7000172	10,69708	47,13612	1312	Piller
43	103036	7000173	11,20672	47,26997	610	Inzing
44	103044	7000174	11,10494	47,20332	1521	St.Sigmund Sellrain
45	103051	7000175	11,60391	47,10908	1632	Innerschmirn Obern
46	103085	7000178	11,13959	46,99698	2290	Dresdner Hütte
47	103101	7000180	11,25449	47,06869	1130	Neustift i.St.Volderau
48	103119	7000181	11,90002	47,44417	514	Radfeld
49	103127	7000182	12,04110	47,58832	700	Thiersee Landl
50	103143	7000184	12,44165	47,51965	667	St.Johann in Tirol-Almdorf
51	103176	7000187	12,23757	47,67194	980	Niederndorferberg
52	103192	7000189	11,82945	47,17538	1790	Gschößwand
53	103218	7000191	12,30756	47,38291	1005	Aschau
54	103226	7000192	12,21275	47,51389	660	Söll Stockach
55	103333	7000203	12,22562	47,42739	995	Am Nachtsöllberg
56	103986	7000210	12,55096	47,58937	775	Waidring
57	113001	7000211	12,41438	46,74653	1079	Sillian
58	113019	7000212	12,36285	46,81486	1672	Hochberg
59	113035	7000214	12,57052	46,77649	1300	Anras
60	113043	7000215	12,37498	47,01757	1340	Prägraten
61	113050	7000216	12,54272	47,00276	1001	Matrei in Osttirol
62	113100	7000221	12,85795	46,85617	1210	Iselsberg Penzelberg
63	114900	7000223	12,50491	47,11790	1637	Felbertauerntunnel.Süd
64	114926	7000225	12,51208	46,91913	1096	Hopfgarten i.Def.
65	105015	7004474	12,78977	46,81971	666	Lienz Tristach

1.2 DATENAUFBEREITUNG

1.2.1 Qualitätskontrolle

Als Datenbasis der Beobachtungszeitreihen dient ein Datenbankauszug des Messstellenbetreibers Hydrographischer Dienst. In den beigefügten Metainformationen sind etwaige Stationsverlegungen mit Zeitpunkt, zugehörigen Koordinaten (geographischer Länge, geographischer Breite und Seehöhe) und der Prüfstatus der Datenqualität mit „MAXQUAL (2)“ angegeben. Bei prüfender Sichtung der Tageszeitreihen der Gesamtschneehöhe wurden in den HD Stationszeitreihen folgende Fehler beobachtet:

- o Phasenweise Verschiebung der Schneehöhe um einen Tag
- o Perioden mit Intervallwerten, die laut Metaangabe bis zum nächsten Zeitpunkt mit einem Wert oder Lücke gültig sind, jedoch als Fehlwerte gewertet werden müssen.
- o falsche Größenordnung bei Einzelwerten, fehlende Ziffern (z.B. 5 cm statt 50 cm)
- o unplausible Einträge
- o abruptes Ende in der Ablationsperiode

Im Zuge der Qualitätskontrolle wurden diese Fehler bestmöglich korrigiert.

1.2.2 Vervollständigung der Beobachtungslücken, Zeitreihenverlängerung

Die Füllung von Lücken in den Beobachtungszeitreihen der Gesamtschneehöhe innerhalb der erweiterten Wintersaison November-April basiert auf der Methode *gradient-plus-inverse-distance-squared* (GIDS) (Nalder and Wein, 1998). Hierbei handelt es sich um eine Kombination aus multipler linearer Regression (MLR) der Form $X = b_0 + b_1 Lon + b_2 Lat + b_3 h$ und inverser Distanzgewichtung (IDW), wobei X die vorherzusagende Gesamtschneehöhe und Lon (geographische Länge), Lat (geographische Breite) und h (Höhe der Station) die Prädiktoren sind. Die resultierenden Koeffizienten b_1 , b_2 und b_3 werden zur Adjustierung der Gesamtschneehöhe an jeder Referenzstation an den geographischen Ort der vorherzusagenden Gesamtschneehöhe verwendet. In weiterer Folge werden die adjustierten Gesamtschneehöhen mittels IDW gewichtet. Der vorherzusagende Wert der Gesamtschneehöhe X_p am Untersuchungsort $(Lon_p; Lat_p; h_p)$ ergibt sich aus

$$X_p = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right)^2 \right]^{-1} \times \sum_{i=1}^n \left\{ [(X_i + b_1(Lon_p - Lon_i) + b_2(Lat_p - Lat_i) + b_3(h_p - h_i))] \left(\frac{1}{d_i} \right)^2 \right\}$$

, wobei n die Anzahl der verwendeten Referenzstationen ist und d_i die jeweilige Entfernung zum Vorhersageort. Unter den Randbedingungen wie sie aus thematisch verwandten Projekten entwickelt wurden und in Abstimmung mit jenen die in der nachfolgenden Homogenisierung gegeben sind, wurde zu allen

Untersuchungszeitreihen ein größtmögliches Set an Referenz-Kombinationen gebildet und damit separate synthetische, interpolierte Zeitreihen zu den Analysestandorten mittels GIDS berechnet. Zur Füllung einzelner Tageswertlücken wurde jenes Modell, entsprechend der aktuellen Verfügbarkeit von Referenzen am betreffenden Tag gewählt, das aus einer Stichprobe von 1000 Wertepaaren Modellwerten—Beobachtungswerten die geringste Abweichung aufweist.

Randbedingungen:

- Horizontale Entfernung der Referenz vom Vorhersageort: ≤ 100 km
- Vertikale Entfernung der Referenz vom Vorhersageort: ≤ 200 m
- Anzahl der Referenzwerte: 4 bis 7
- Abdeckungsgrad der Referenzzeitreihe in der betreffenden Saison und bezüglich des gesamten Untersuchungszeitraums: $\geq 80\%$ bzw. ≥ 10 Jahre
- Korrelation der Referenzzeitreihe zur Beobachtungszeitreihe: $\geq 0,6$

Im Zuge der Plausibilitätsprüfung der gefüllten Zeitreihe wurden teilweise Sequenzen sichtbar, die methodisch bedingt hohe Variabilität zeigen. Diese wurden entsprechend spezifisch gewählter Referenzzeitreihen gewichtet reduziert.

Allgemein ist anzumerken, dass die Methode abhängig ist von der Anzahl und Repräsentativität der verwendeten Referenzstationen, ihr somit in dünnbesiedelten Abdeckungszeiträumen wie zu Beginn des 20. Jhd und in den Jahren der Weltkriege weniger Referenzinformation zur Verfügung steht als in Zeiträumen jüngerer Vergangenheit. Insbesondere betrifft das jene Untersuchungsstandorte deren Zeitreihen weit in die Vergangenheit zurück verlängert wurden und keine Stützstellen aus Beobachtungen in diesen Füllzeiträumen aufweisen. Entsprechend dieser über den langen Untersuchungszeitraum inhomogenen Datengrundlage empfiehlt es sich, diesen Umstand bei der Interpretation abgeleiteter Indikatoren aus den Ergebniszeitreihen zu beachten.

An einzelnen Standorten können aufgrund fehlender Referenzstationen bzw. nicht erfüllter Randbedingungen keine vollständige Füllung der Beobachtungslücken, d.h. der Fehlwerte in den Originalzeitreihen durchgeführt werden. Eine schematische Übersicht zum Abdeckungsgrad der Tageszeitreihen des finalen Analysedatensatzes ist in Abb. 1.2 dargestellt und in Tabelle 1.3 prozentuell aufgelistet.

Tabelle 1.3 Abdeckungsgrad der Zeitreihen der Gesamtschneehöhe in den Wintersaisons NDJFMA von 1.11.1895 bis 30.4.2019, der validen Messwerte, der gefüllten Lücken (Füllwerte) und verbliebenen Lücken (Fehlwerte) in den Tagesdaten.

Abdeckungsgrad [%] der Zeitreihen der Gesamtschneehöhe in den Wintersaisons NDJFMA des Untersuchungszeitraums 1.11.1895—30.4.2019																			
HZB Nr.	101162	101212	101220	101246	101287	101303	101311	101337	101956	102046	102236	102251	102319	102368	102384	102467	102509	102681	102756
Meßwerte	88,4	72,8	93,7	90,3	74,6	83,7	90,9	80,7	86,1	80,8	99,2	84,4	80,6	92,7	75,3	90,6	91,5	92,9	95,9
Füllwerte	11,6	26,2	5,7	9,6	25,4	16,3	9,1	19,3	13,7	0,9	0,8	3,5	19,3	7,3	24,7	9,4	6,9	7,1	4,1
Fehlwerte	0,0	1,0	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	18,3	0,0	12,1	0,1	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0
	102764	102772	102798	102806	102830	102863	102905	102913	103135	113027	113084	113589							
Meßwerte	64,6	97,8	93,7	63,6	96,3	91,2	68,4	87,9	85,1	88,2	76,3	87,0							
Füllwerte	35,4	2,2	3,7	36,4	3,7	8,8	4,2	10,2	14,9	11,8	1,1	12,9							
Fehlwerte	0,0	0,0	2,6	0,0	0,0	0,0	27,4	1,9	0,0	0,0	22,6	0,1							

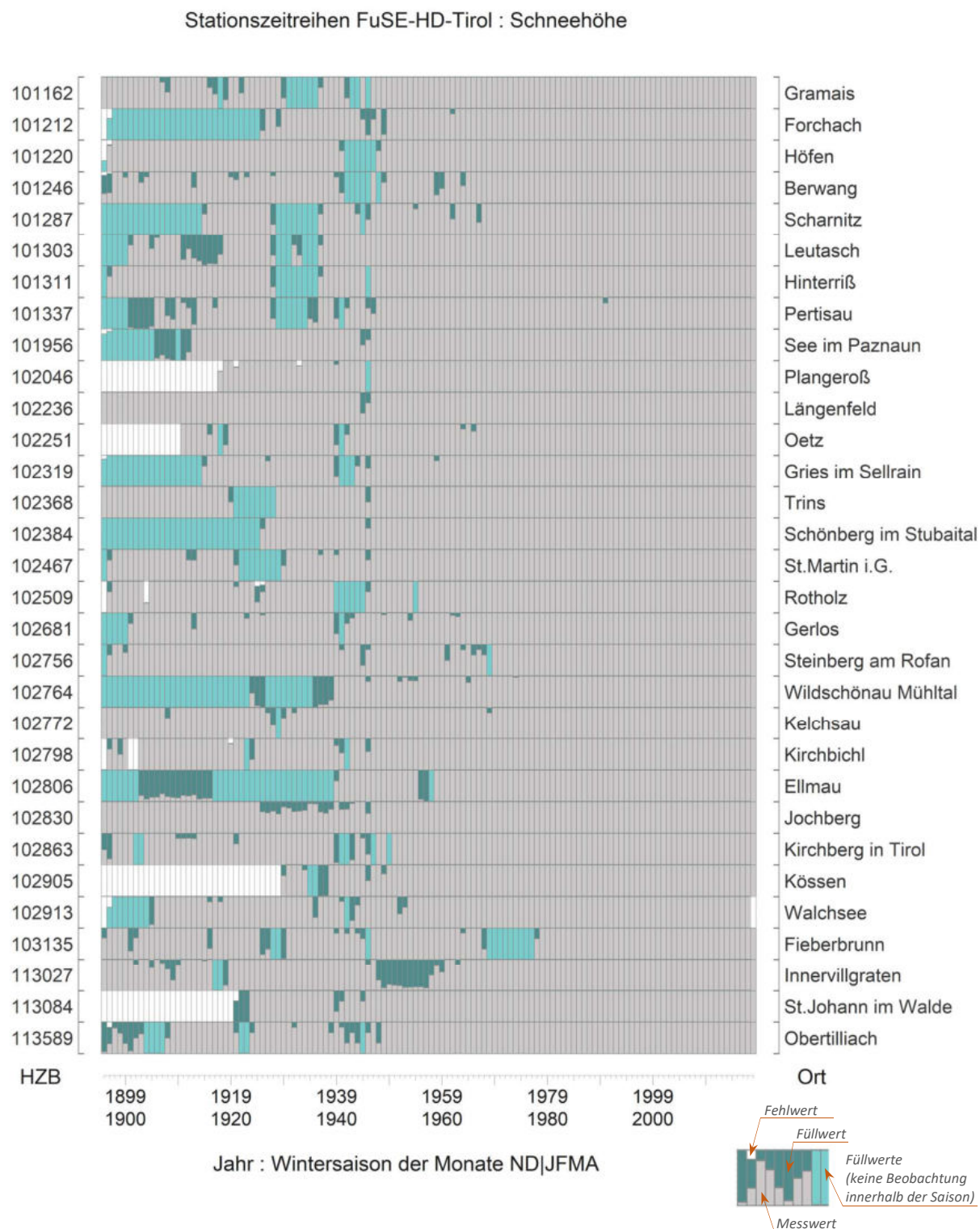


Abb. 1.2 Saisonale Zeitreihenbesetzung der Schneehöhe an den Untersuchungsstandorten Tirols. Die in grau gefärbten Anteile entsprechen präsenten Beobachtungswerten, grüne und türkise Anteile repräsentieren Füllungen originaler Lücken, wobei letztere symbolisieren, dass innerhalb der betreffenden Saison keine Stützstellen durch Beobachtungswerte vorhanden waren. Die weißen Felder entsprechen Fehlwerten, d.h. Lücken in den Originalzeitreihen die aufgrund unzureichender Referenzen nicht gefüllt werden konnten.

1.3 HOMOGENISIERUNG

Die Qualität von langjährigen Beobachtungszeitreihen ist mitunter durch Inhomogenitäten (Brüchen) beeinträchtigt, die Einflüsse nicht klimatischen Ursprungs wiedergeben. Aufgrund von Änderungen in den Messbedingungen (Stationsverlegung, Beobachterwechsel, Instrumentenwechsel, schleichende Umgebungsänderung am Messort) können künstliche Verschiebungen einer Beobachtungszeitreihe aufgeprägt werden, d.h. ggfls. die Messgröße und ihre zeitliche Variabilität verfälschen.

Die Inhomogenitätsprüfung und Homogenisierung aller 31 Untersuchungszeitreihen der mittleren täglichen Gesamtschneehöhe erfolgte mittels einer an der ZAMG entwickelten und kontinuierlich erweiterten Software-Kollektion (Gruber C., et.al., 2009), die sich im Kern auf publizierte Methoden stützt.

1.3.1 Bruchdetektion und Korrekturfaktor

In einem ersten Schritt wurde eine Bruchdetektion mit der Methode PRODIGE (Caussinus and Mestre, 2004, EU/COST-ES0601 Action) auf die Zeitreihen angewendet. Diese beruht auf der Detektion einer unbekannten Anzahl von Verschiebungspunkten und benötigt hierfür Referenzstationen, deren Zeitreihen mit der zu überprüfenden Zeitreihe (Testzeitreihe) auf Tagesbasis gut korrelieren (Korrelationskoeffizienten: $\geq 0,6$). Passend zu den Randbedingungen der multilinearen Interpolation GIDS wurden Referenzstationen ausgewählt, die in einem horizontalen Abstand von 100 km liegen, und der maximale Höhenunterschied ist mit 200m vorgegeben. Die durchschnittliche Anzahl an Referenzzeitreihen beträgt circa 20, wobei Bedacht darauf genommen wurde, zu jedem Zeitpunkt des Untersuchungszeitraums über zumindest 4 datenbesetzte Referenzen zu verfügen.

Naturgemäß besitzt die Schneehöhe im komplexen Terrain eine hohe Tag-zu-Tag Variabilität. Um diesen hochfrequenten Fluktuationen auf kleiner Zeitskala zu umgehen, erfolgen die Bruchdetektion und die Berechnung der Korrekturwerte auf saisonaler Basis, d.h. erfolgt in Bezug auf Änderungen der saisonalen (NDJFMA (November bis April), DJF (Dezember bis Februar)) Summen der Gesamtschneehöhe, somit werden saisonal akkumulierte Zeitreihen der Referenzstationen und der Teststation erstellt. Auf Basis der Annahme, dass saisonale Variationen der Schneehöhe durch eine multiplikative Komponente dominiert werden, wird der Quotient aus der konstruierten Testzeitreihe und der Referenzzeitreihen auf Inhomogenitäten getestet. In der Methode wird ein "penalized log-likelihood" Kriterium (Mestre et al., 2011) verwendet, um die "beste" Anzahl von Brüchen zu erhalten, d.h. ein "overfitting" wird minimiert. Die Kriterien von Caussinus and Lyazrhi (1997), Jong et al. (2003) und Lebarbier (2005) kommen bei der Bruchdetektion zur Anwendung. Entsprechend definierter Richtlinien die ein Bruchsignal anhand seiner Auftrittshäufigkeit durch Referenzstationen und dieser Kriterien bewerten, werden Bruchsignale nach Abgleich mit verfügbaren Metainformationen als Inhomogenität klassifiziert und gegebenenfalls einer Homogenisierung unterworfen.

Darin wird ein geeigneter Korrekturfaktor (Adjustment) mittels einer erweiterten Version der Methode INTERP (Vincent et al. 2002) berechnet. Im Hinblick auf die mittlere Gesamtschneehöhe beruht in diesem Falle die Berechnung auf saisonaler Basis (NDJFMA). Inhomogene Zeitabschnitte der Testzeitreihe werden schlussendlich mit einem abgeleiteten, monatlichen Korrekturfaktor multipliziert, der definiert ist als das Verhältnis

$$\text{median} \left(\frac{C_a}{R_a} \right) / \text{median} \left(\frac{C_b}{R_b} \right),$$

wobei die Indizes a und b die Zeitperiode nach und vor der detektierten Inhomogenität angeben und C bzw. R die Zeitreihe der akkumulierten saisonalen Gesamtschneehöhe der Teststation bzw. Referenzstation ist.

Die Gesamtschneehöhe besitzt eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität aufgrund von Änderungen der Temperatur, des Windfeldes, der Strahlungsbilanz usw. Es sollte verständlich sein, dass der monatliche Korrekturfaktor diese Einflussfaktoren nicht gänzlich berücksichtigen kann.

1.3.2 Berechnete Korrekturfaktoren, Homogenisierungseffekt

Generell ist die Bruchdetektion in Zeitreihen der Schneehöhe eine komplexe Aufgabenstellung, in die, neben rein statistischer Entscheidungsgrundlagen und Meta-Information zum Untersuchungsort auch unterschiedliche atmosphärische Parameter auf klimatologischer Skala Berücksichtigung finden, s. hierzu Marcolini et al., 2019. Insbesondere ist Augenmerk auf die natürliche Variabilität innerhalb der Zeitreihen und deren lokalspezifischer Charakteristik zu legen.

Im vorliegenden Datensatz wurde in sechs Zeitreihen jeweils ein potentieller Bruch angezeigt, wobei nur in zwei Zeitreihen, Schönberg im Stubaital und Wildschönau Mühlthal, ausreichend viele Referenzen diese Inhomogenitäten signalisierten. Diese Zeitreihen wurden einer Homogenisierung unterzogen. Bruchdatum und Adjustments der akzeptierten Homogenisierung des Standorts Schönberg im Stubaital sind in Tabelle 1.4 aufgelistet, ein Vergleich der originalen und homogenisierten mittleren saisonalen Schneehöhe in Abb. 1.3 dargestellt. Die homogenisierte Zeitreihe wurden einem abschließenden Inhomogenitätstest unterzogen, der negativ ausfiel. In den Metadaten der Station Schönberg im Stubaital sind in den 1970er-Jahren mehrere Standortverlegungen angeführt, unter denen eine im Frühsommer 1970 erstmalig seit Zeitreihenbeginn 1926 durchgeführte Verlegung voraussichtlich Ursache der detektierten Inhomogenität ist.

Die homogenisierte Zeitreihe zum Standort Wildschönau Mühlthal zeigt unabhängig von der Wahl der zugrunde gelegten Referenzzeitreihen für den abgeleiteten Schneeindikator maximale saisonale Gesamtschneehöhe (s. Kapitel 2.1) nicht plausible Werte. Dieser Effekt kann in dieser spezifischen Zeitreihe dadurch hervorgerufen sein, dass die Bruchdetektion und Homogenisierung i.A. auf Basis der mittleren saisonalen Schneehöhe erfolgt, die sich aus allen Tageswerten ableitet. Bei der Homogenisierung werden proportionale

Korrekturfaktoren auf die Originalwerte angewendet, damit auch auf die extremwertverteilten maximalen Schneehöhen. Methodisch kann dies gegebenenfalls zu einer nicht plausiblen Änderung der Verteilung dieser Extremwerte gegenüber den mittleren Schneehöhen führen. Aufgrund der Inkonsistenz gegenüber der gut abgesicherten regionalen Muster wurde die Originalzeitreihe für die nachfolgenden Analysen herangezogen.

Tabelle 1.4 Homoogenisierter Bruch

HZB Nr.	Stationsort	Stations- höhe	Bruch- datum	monatliche Korrekturfaktoren					
				N	D	J	F	M	A
102384	Schönberg im Stubaital	1009m	Dez. 1972	0,76	0,87	0,76	0,71	0,64	0,68

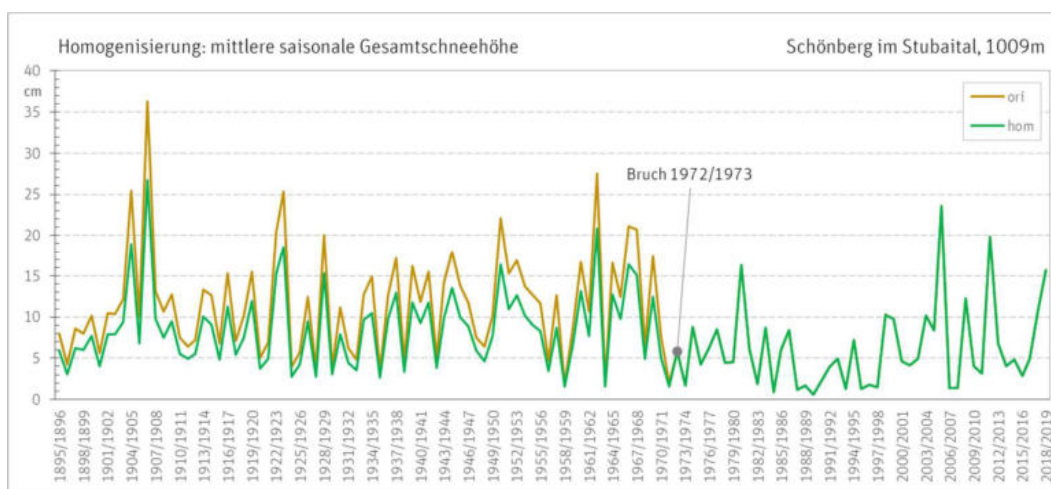


Abb. 1.3 Homogenisierungseffekt der mittleren saisonalen Gesamtschneehöhe für Schönberg im Stubaital.

2 ENTWICKLUNG DER KLIMATOLOGISCHEN RANDBEDINGUNGEN

Seit der vorindustriellen Zeit ist die mittlere jährliche Lufttemperatur im Tiefland Österreichs um 1,8°C angestiegen (1989-2018 vs. 1850-1900), d.h. etwa doppelt so stark wie im globalen Mittel (ZAMG HISTALP Jahres-Newsletter 2018; APCC, 2014) und 20% über dem Anstieg der mittleren Lufttemperatur von 1,5°C über den globalen Landflächen (IPCC, 2019). Ein Großteil dieser Erwärmung fand in den letzten 4 Dekaden seit 1980 mit einer enormen Rate von fast 0,5°C pro Dekade statt. Die Hauptursache für die im Vergleich zum globalen Mittel stärkere Temperaturzunahme sind raschere Erwärmung der Luft über Landflächen gegenüber der über thermisch trägeren Ozeanen (FAQ 2.1, Figure 2 in Hartmann et al., 2013; IPCC, 2019), aber auch der Einfluss gestiegener bodennaher solarer Einstrahlung seit den 1980er Jahren spielt höchstwahrscheinlich eine wichtige Rolle (Scherrer und Begert, 2019).

Die Erwärmungsphase des frühen 20. Jahrhunderts wird als Übergang vom natürlichen Klima, in dem für den Strahlungsantrieb solare und vulkanische Einflüsse praktisch allein ausschlaggebend waren, zum menschlich beeinflussten Klima mit einsetzendem anthropogenen Treibhauseffekt gesehen (Auer et al., 2014; Abb. 2.1). Die Abkühlung nach der Jahrhundertmitte in den Jahrzehnten des Wirtschaftswachstums ist durch den Effekt des anthropogenen Aerosolausstoßes, hauptsächlich von Sulfat aus der Verbrennung von Kohle und Erdöl verursacht, indem die Aerosole (Luftpartikel) die am Erdboden eintreffende Sonnenstrahlung durch Absorption und Reflektion abmindern (sog. „global dimming“). Als gegen Ende des 20. Jahrhunderts Maßnahmen zur Luftreinhaltung wirksam werden und sich zusätzlich die Treibhausgasemissionen aus Industrie und Verkehr verstärken, tritt die Erde endgültig ins anthropogene Treibhauszeitalter ein (sog. „global brightening“) (Manara et al., 2016; Wild, 2009). Es ist extrem wahrscheinlich, dass mehr als die Hälfte des beobachteten Anstiegs der globalen Mitteltemperatur zwischen 1951 und 2010 durch den anthropogenen Anstieg der Treibhausgaskonzentration und anderer anthropogener Antriebe verursacht wurde (IPCC, 2014).

Innerhalb Österreichs zeigen sich die Langzeitveränderungen der Temperatur in großer räumlicher Übereinstimmung. Nennenswerte Unterschiede in der Temperaturentwicklung gab es weder regional noch in Abhängigkeit von der Seehöhe: In den Gipfelregionen hat sich die Atmosphäre seit der vorindustriellen Zeit ebenfalls um 1,8°C erwärmt (1989-2018 vs. 1850-1900; ZAMG HISTALP Jahres-Newsletter 2018; Auer et al., 2007; Auer et al. 2014; Böhm, 2012). Saisonal betrachtet ist die Erwärmung im Tiefland im Frühjahr und Winter am stärksten (+2.1 °C bzw. +2.3 °C), gefolgt vom Sommer (+1.8°C), am schwächsten ist sie im Herbst (+1,3°C), s.Abb. 2.1. Den einzigen signifikanten Unterschied in der Erwärmung zwischen tiefen und hohen Lagen gibt es im Winter (+1.7°C in den Gipfelregionen vs. +2.3 im Tiefland) (Abb. 2.3, Tabelle 2.1; Kuhn und Olefs, in review). Nach einer kurzen Abkühlungsphase (zwischen 1995 und 2005 im Tiefland bzw. 1989 und 2012 in den Gipfelregionen) haben die Wintertemperaturen wieder deutlich zugenommen, (Abb. 2.1; Auer et al. 2014; Olefs et al., 2019). Die hochalpinen Wintertemperaturen einzelner Stationen der Ostalpen nördlich

und entlang des Alpenhauptkamms haben langfristig gesehen statistisch hochsignifikant zugenommen (z.B. +1,9 bis +2,4°C an den Stationen Zugspitze, Sonnblick, Säntis, Obergurgl, Patscherkofel, Schmittenhöhe innerhalb der letzten 90 Jahre). Gleichzeitig sind sie auch von der stärksten Jahr-zu-Jahr Variabilität aller 4 Jahreszeiten geprägt: die langfristige Erwärmung ist überlagert von kurz- bis mittelfristigen natürlichen Schwankungen des Klimas (Jahr-zu-Jahr bis zu ca. 20 Jahren) (Gobiet et al., 2017). Innerhalb dieser Phasen gibt es auch zufällig verteilte Perioden, die eine Abkühlung zeigen (z.B. Periode „C“ über den Zeitraum 1989 bis 2012 in Abb. 2.2, die aber statistisch nicht signifikant ist). Saffioti et al. (2016) konnten eindeutig zeigen, dass diese europäische winterliche Abkühlungsperiode ein Resultat der natürlichen Klimavariabilität aufgrund von entfernten Ozean-Atmosphäre Wechselwirkungen war, die sich in exponierteren Gipfellagen (s.o.) naturgemäß stärker als in Tallagen zeigt. Mittels einer sog. dynamischen Korrektur, die den Strömungs- bzw. Wetterlageneffekt entfernt, haben Saffioti et al. (2016) den im Hintergrund weiterwirkenden und erwarteten anthropogen angetriebenen Erwärmungstrend von +0.3°C pro Dekade für die Schweiz auch während dieser Periode klar zeigen können. Dies bedeutet gleichzeitig, dass für diese kürzeren Zeiträume, in denen natürliche Klimaschwankungen dominieren, zuverlässige Vorhersagen für die Zukunft derzeit noch nicht möglich sind, ganz im Gegensatz zum langfristigen Erwärmungstrend. Diese natürlichen Klimaschwankungen werden wesentlich von Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Ozean verursacht. Es wurde gezeigt, dass z.B. die sog. Nordatlantische Oszillation (NAO) starken Einfluss auf die Jahr-zu-Jahr und dekadischen Schwankungen der Wintertemperatur in Europa und auch Österreich haben (Hurrell, 1995; Schöner et al., 2009).

Abgesehen von der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts, die relativ niederschlagsreich ausfiel, und der trockensten Phase der Messgeschichte in den 1860er Jahren (Haslinger et al., 2018), gestaltete sich das Niederschlagsklima im Mittel über ganz Österreich auch saisonal ohne ausgeprägte langfristige Schwankungen (Auer et al., 2007). Allerdings zeigen sich in einzelnen Regionen Österreichs unterschiedliche, teilweise sogar gegenläufige Niederschlagstrends, die vor allem im Winter zu beobachten sind: In Westösterreich (Vorarlberg, Nordtirol) nahm der Niederschlag über den gesamten Zeitraum seit 1858 betrachtet um ca. 10-15% zu, während er im Südosten Österreichs (Unterkärnten, West- und Oststeiermark, Südburgenland) über die letzten 200 Jahre hinweg abnahm (Böhm, 2006).

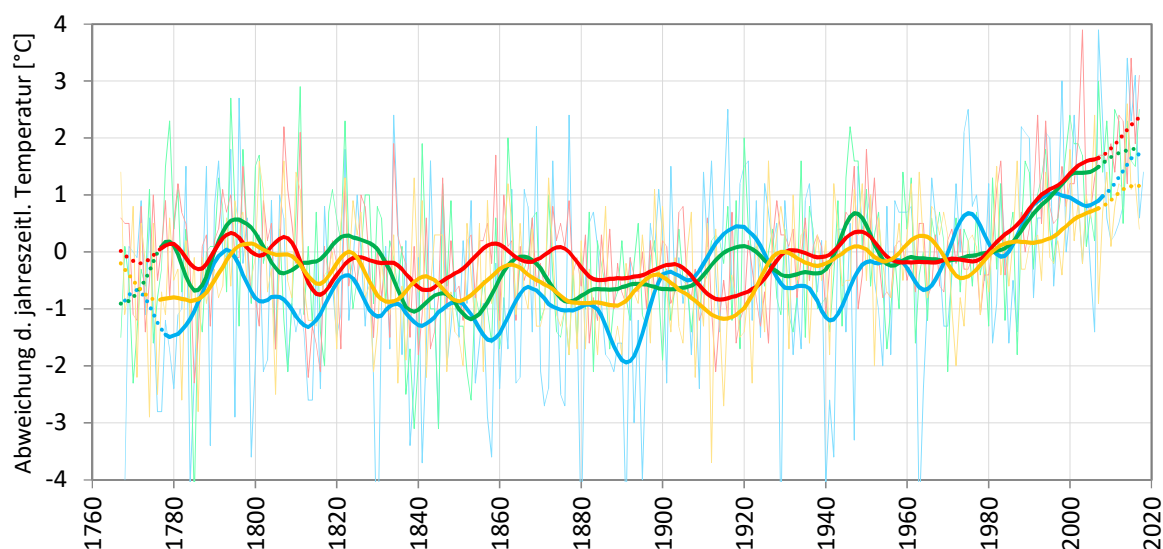


Abb. 2.1 Entwicklung der mittleren Winter- (blau), Frühlings- (grün), Sommer- (rot) und Herbsttemperatur (gelb) in Österreich 1767–2018. Dargestellt sind jährliche Abweichungen vom Mittel der Jahre 1961–1990 (dünne Linien) und deren geglättete Trends (dicke Linien, 21-jähriger Gauß'scher Tiefpassfilter) (Olefs et al., 2019).

Wintertemperaturen Sonnblick (3105 m) der letzten 90 Jahre

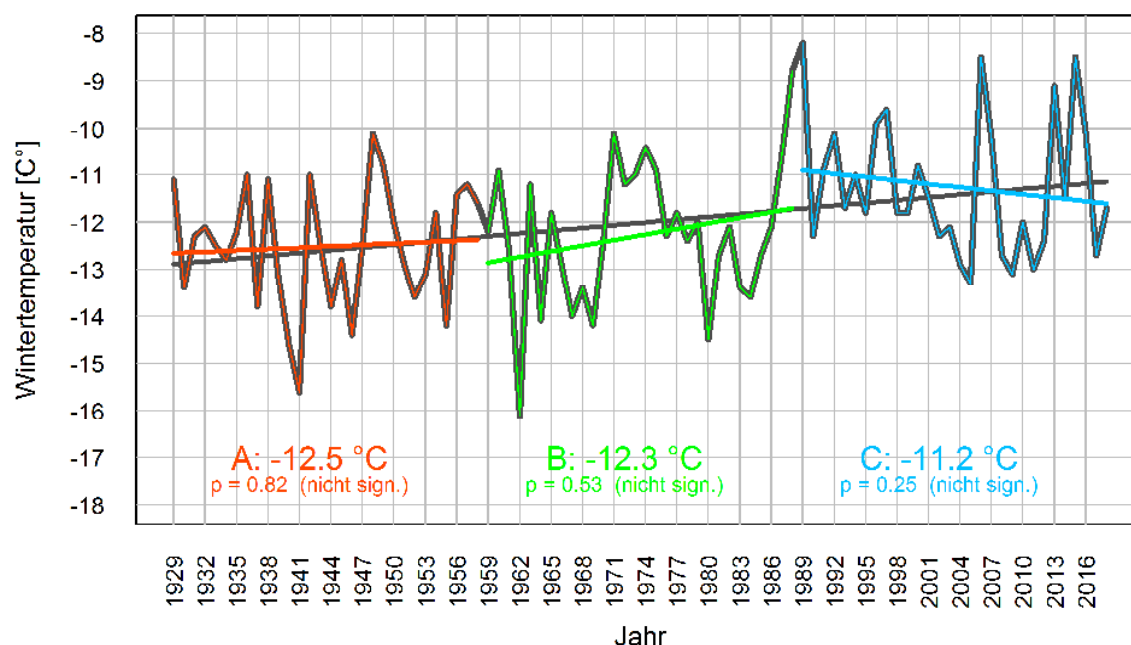


Abb. 2.2 Wintertemperaturen (DJF) der Station Sonnblick (3105 m) zwischen 1927/28 und 2018/19. Linearer Trend über die gesamte Periode (fett, schwarz) und über die 30-jährigen Teilperioden A, B und C (farbig) mit Angabe des jeweiligen Mittelwertes und des sog. p-Wertes zur Prüfung von etwaigen Trends (p-Werte kleiner 0,05 würden beim gewählten Signifikanzniveau einen statistisch signifikanten Trend bedeuten), (Gobiet et al., 2017, aktualisiert).

Tabelle 2.1 Änderungen der Lufttemperatur in Österreich 1989-2018 vs. 1850-1900 (°C), Daten: HISTALP, ZAMG.

HISTALP	Jahr	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
Tiefland	+1,8	+2,1	+1,8	+1,3	+2,3
Gipfel	+1,8	+2,1	+1,9	+1,4	+1,7

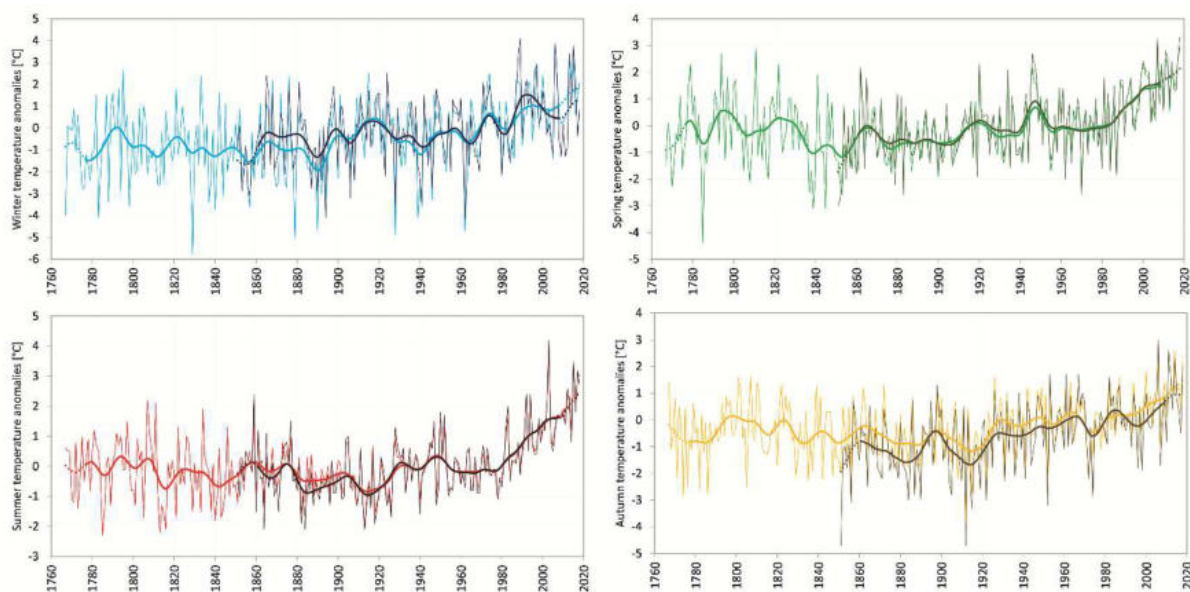


Abb. 2.3 Mittlere saisonale Lufttemperaturen österreichischer HISTALP (Auer et al., 2007) Tieflandstationen (farbige Kurven) und Gipfelstationen (schwarze Kurven), relativ zum Mittel 1961 – 1990. Fette Linien sind 21-jährige geglättete Gauss-Tiefpassfilter. Aktualisierung durch Kuhn und Olefs (in review).

3 SCHNEEINDIKATOREN

Bemerkung: aufgrund der umfangreichen Daten, werden in den Folgekapiteln des Berichtstextes der Übersichtlichkeit wegen die Ergebnisse gewählter Standorte gezeigt, eine vollständige Einsicht kann im Anhang genommen werden. Die gewählten Standorte repräsentieren exemplarisch räumlich unterschiedliche Regionen und Höhenlagen Tirols, und bestehen aus den folgenden Stationen:

- o 101220, Höfen, 874m
- o 102046, Plangeroß, 1605m
- o 102236, Längenfeld, 1180m
- o 102798, Kirchbichl, 496m
- o 113589, Obertilliach, 1400m

3.1 DEFINITION

Ein Schneeindikator ist eine aus der gemessenen Gesamtschneehöhe abgeleitete Größe (sog. Klimaindex):

gewählte Schneeindikatoren:

- | | |
|------------------------------------|---|
| <i>MEAN_SH</i> ... | Die mittlere saisonale Gesamtschneehöhe ist der saisonale Mittelwert der täglichen mittleren Gesamtschneehöhe innerhalb der Wintersaison. |
| <i>MAX_SH</i> ... | Die maximale saisonale Gesamtschneehöhe ist das saisonale Maximum der täglichen mittleren Gesamtschneehöhe innerhalb der Wintersaison. |
| <i>SCD_SH ≥ SH_G</i> ... | Die saisonale Schneedeckendauer ist die Anzahl der Tage innerhalb der Wintersaison, an denen die mittlere tägliche Gesamtschneehöhe mindestens dem Schwellenwert $SH_G = 1, 5, 20$ bzw. 30 cm entspricht. (Die Schneedeckendauer wird im Folgenden wie international gebräuchlich mit SCD (Snow Cover Duration) abgekürzt.) |

Die saisonalen Schneeindikatoren und deren Trendanalyse werden generell bezüglich des Kernwinters DJF (Dezember des Vorjahres bis inklusive Februar) und der erweiterten Winterperiode NDJFMA (November und Dezember des Vorjahres bis inklusive April des genannten Jahres) ausgewertet.

3.2 ZEITREIHEN DER SCHNEEINDIKATOREN

Die saisonalen Zeitreihen der Schneeindikatoren werden spaltenweise getrennt für die erweiterte Wintersaison NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts), zusätzlich basierend auf einem Gauß-

Tiefpassfilter mit einer Fensterbreite von 11 Jahren geglättet (schwarze Linie) in den folgenden Abbildungen dargestellt.

mittlere Gesamtschneehöhe:

Deutlich erkennbar ist an den Stationen nördlich des Alpenhauptkammes (Nordtirol) die abrupte Abnahme der mittleren Gesamtschneehöhe ab Mitte/Ende der 1980er Jahre mit darauffolgendem kontinuierlichem Anstieg (s. Marty, C., 2008 und Schöner et.al. 2018). Im Gegensatz dazu zeigen die Zeitreihen der Untersuchungsstandorte südlich des Alpenhauptkammes (Osttirol) eine weitere Abnahme der Gesamtschneehöhe bis circa zum Jahr 2005 (Vergleiche in 3.2.1 z.B. die Abbildungen der Standorte Längenfeld und Obertilliach). Generell weisen die Zeitreihen eine hohe zeitliche (Jahr zu Jahr) und räumliche (regional-spezifische) Variabilität auf.

Mit zunehmender Seehöhe nimmt der Einfluss der Temperatur auf die Gesamtschneehöhe ab, gegensätzlich dazu nimmt der Einfluss des Niederschlags zu (s. Schöner et.al. 2018).

Exemplarisch ist in Abb. 3.1 die mittlere Lufttemperatur des Kernwinters DJF für Obergurgl-Vent dargestellt. Neben der hohen jährlichen Variabilität ist darin deutlich der abrupte Temperaturanstieg circa Ende der 1980er Jahre mit nachfolgender kontinuierlicher Temperaturabnahme ersichtlich. Dem langfristigen Trend sind zeitlich-kurzskalige natürliche Schwankungen überlagert. Dies ist stimmig mit der vielfach beobachteten gegenläufigen Charakteristik der Zeitreihen der Gesamtschneehöhe insbesondere an höher gelegenen Standorten Nordtirols.

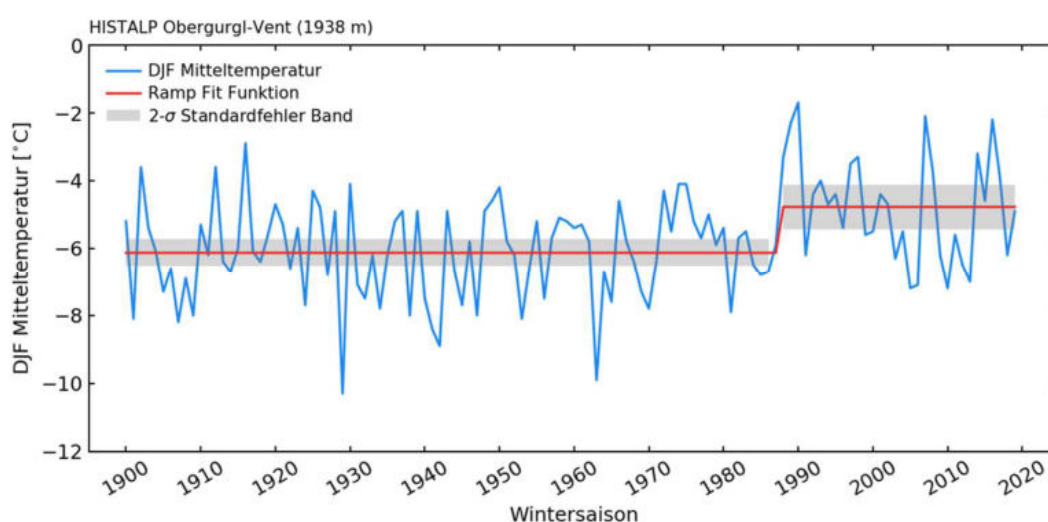


Abb. 3.1 langzeitlicher Verlauf der Lufttemperatur des Kernwinters für die Station Obergurgl-Vent

(Quelle: HISTALP <http://www.zamg.ac.at/histalp/>).

Die rote Linie stellt einen nichtlinearen fit dar (Mudelsee M., 2000).

maximale Gesamtschneehöhe:

Die Zeitreihen der maximale Gesamtschneehöhe zeigen in allen Höhenlagen eine analoge Charakteristik zu jener der zugehörigen mittleren Gesamtschneehöhe.

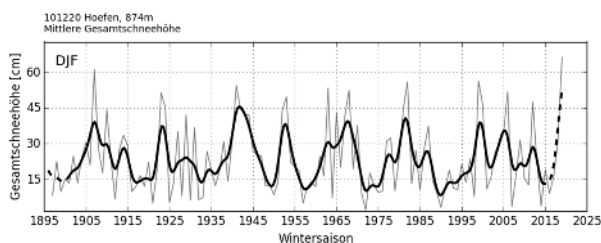
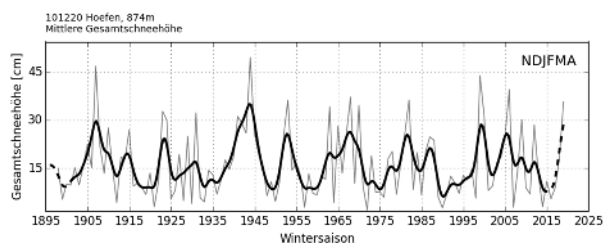
Schneedeckendauer:

Der Indikator Schneedeckendauer $\geq 1\text{cm}$ zeigt eine deutliche Höhenabhängigkeit. An höher gelegenen Standorten treten im Kernwinter DJF vereinzelt Jahre mit kürzerer Schneedeckendauer auf, auf Basis der Mann-Kendall Trendanalysen ist jedoch langfristig keine Tendenz erkennbar. Auffallend ist die geringe Schneedeckendauer um das Jahr 2015. In tiefer gelegenen Standorten zeigt sich jedoch eine klare Abnahme der Schneedeckendauer seit Ende der 1980er Jahre. Betrachtet man die erweiterte Wintersaison NDJFMA, ist eine Abnahme der Schneedeckendauer in allen Höhenlagen feststellbar.

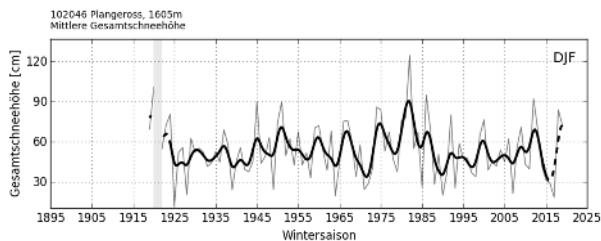
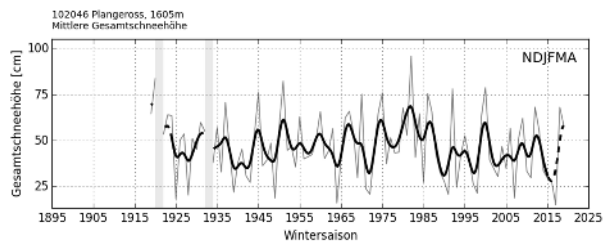
Mit höheren Schwellenwerten der Schneedeckendauer ist eine niedrigere Schneedeckendauer verbunden, die auch in den Zeitreihen höher gelegener Stationen eine zunehmende jährliche Variabilität und i. A. die Charakteristik der Gesamtschneehöhe zeigen. Tiefer gelegene Orte zeigen für hohe Schwellenwerte aufgrund der geringen Anzahl schwellenwertüberschreitender Tage vor allem im Kernwinter DJF vereinzelt signifikante Trends.

3.2.1 mittlere Gesamtschneehöhe

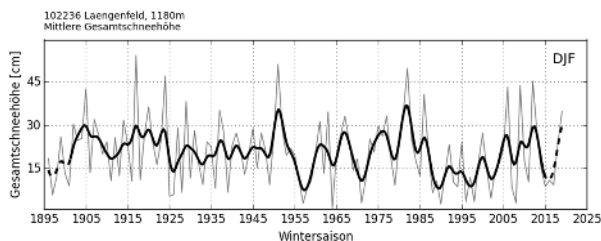
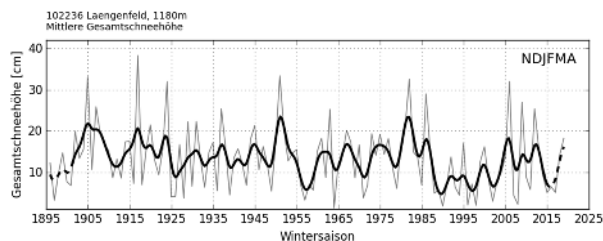
101220, Höfen, 874m



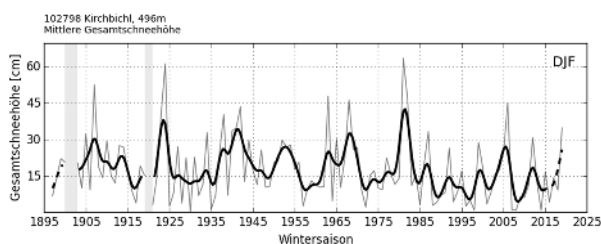
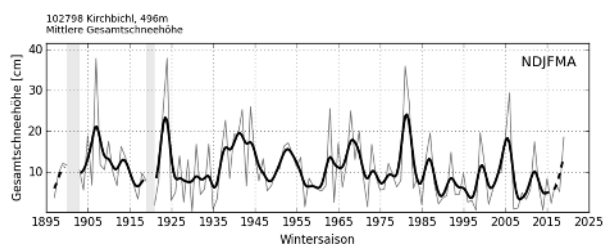
102046, Plangeröß, 1605m



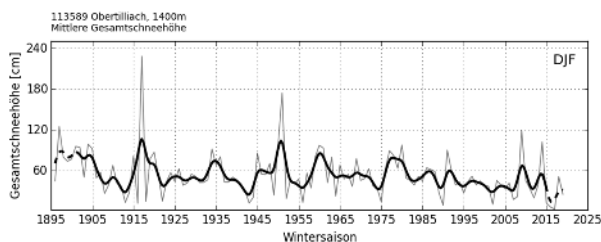
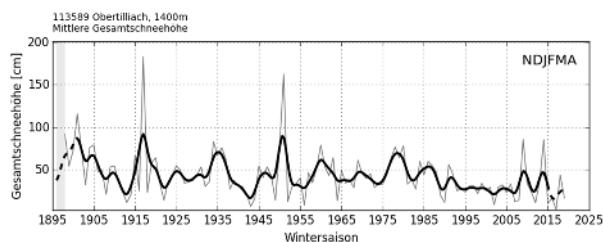
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

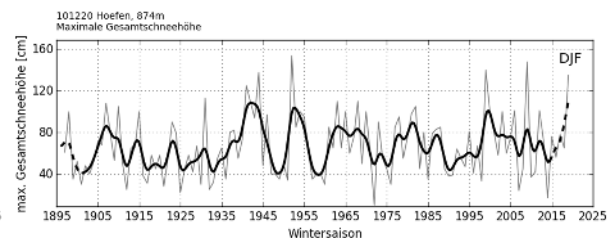
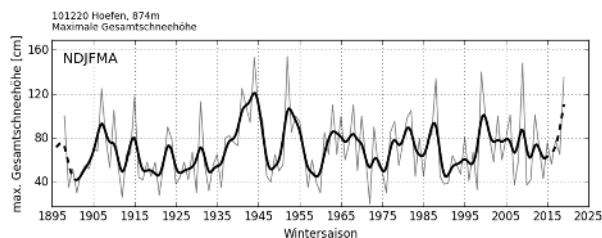


113589, Obertilliach, 1400m

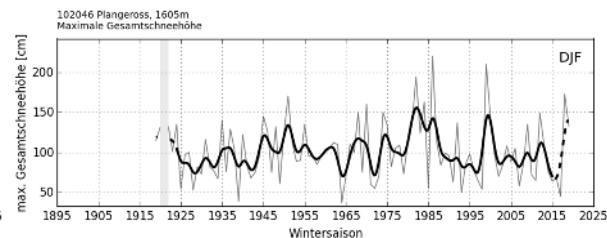
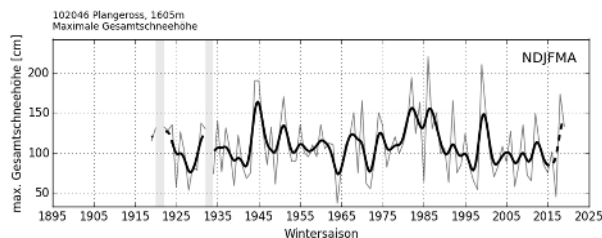


3.2.2 maximale Gesamtschneehöhe

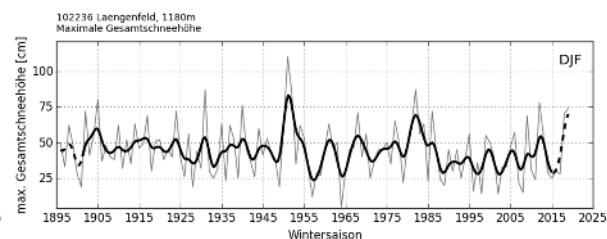
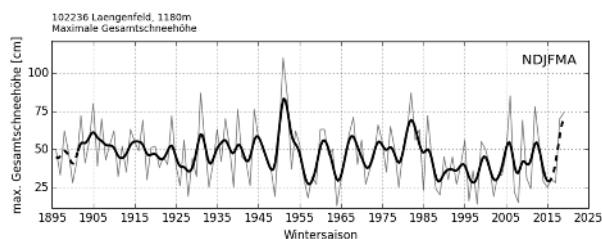
101220, Höfen, 874m



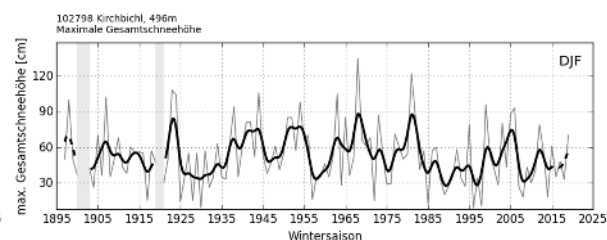
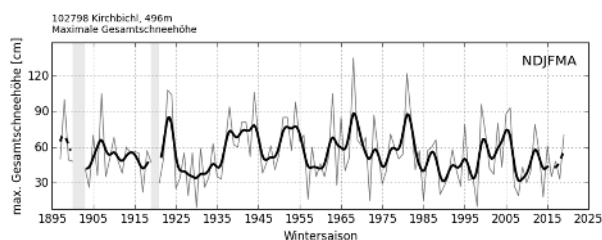
102046, Plangeroß, 1605m



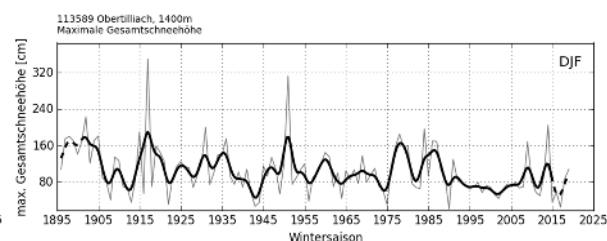
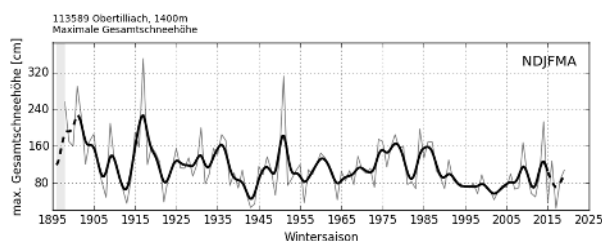
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

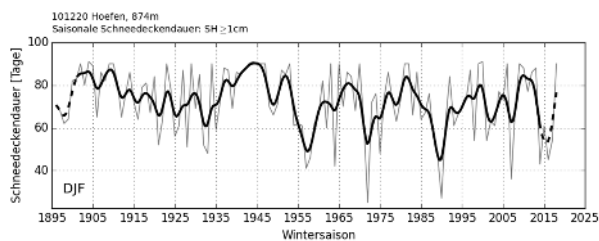
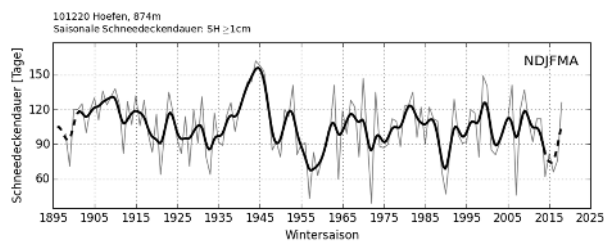


113589, Obertilliach, 1400m

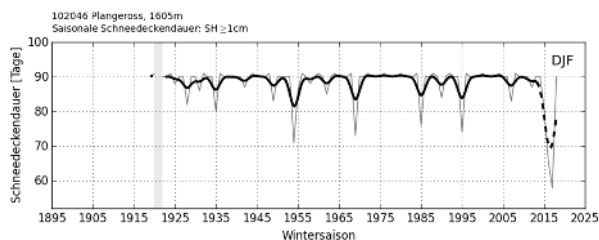
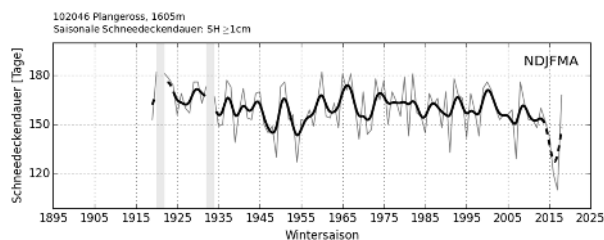


3.2.3 Schneedeckendauer ≥ 1 cm

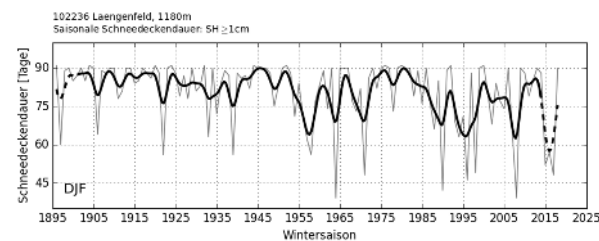
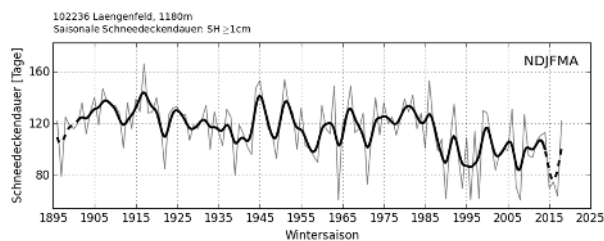
101220, Höfen, 874m



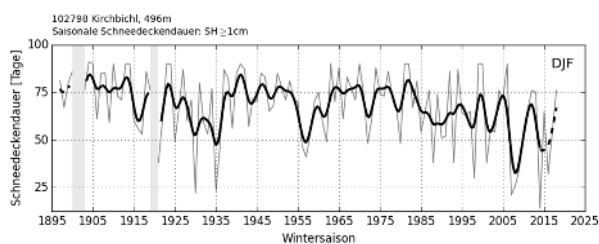
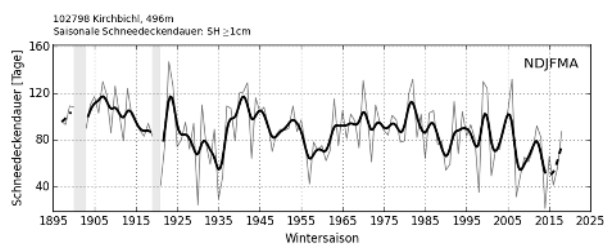
102046, Plangeroß, 1605m



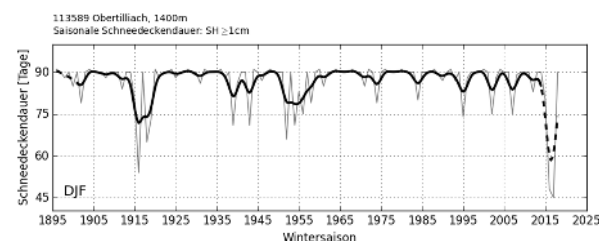
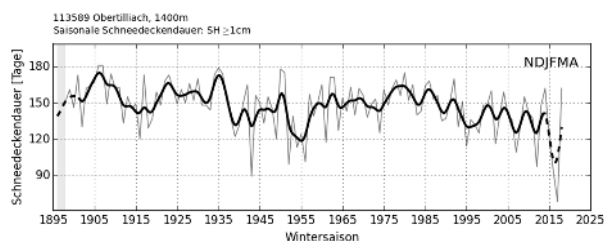
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

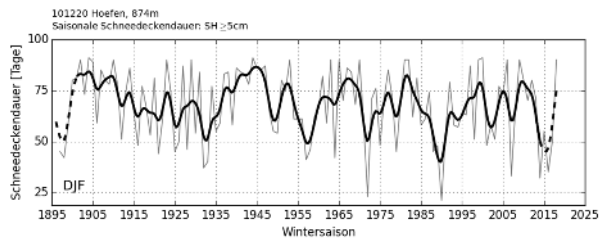
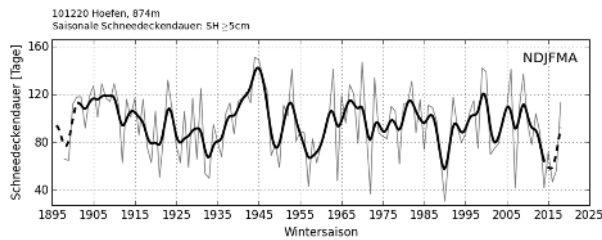


113589, Obertilliach, 1400m

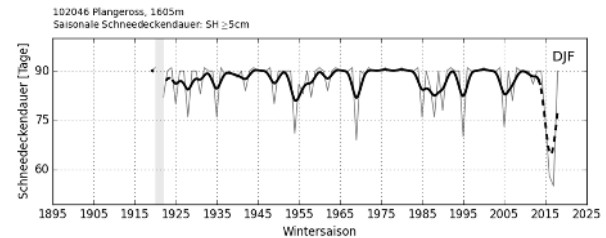
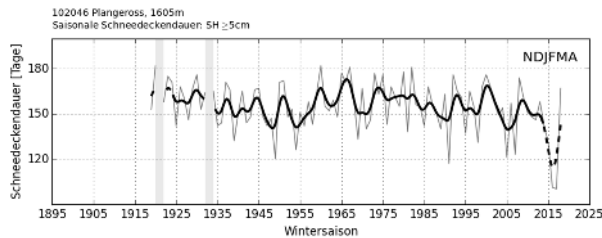


3.2.4 Schneedeckendauer ≥ 5 cm

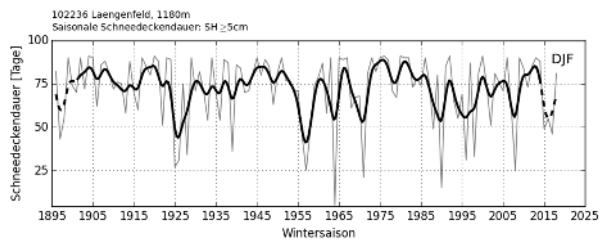
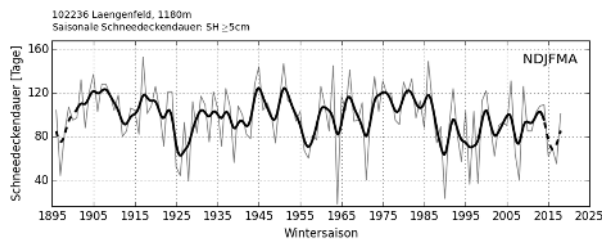
101220, Höfen, 874m



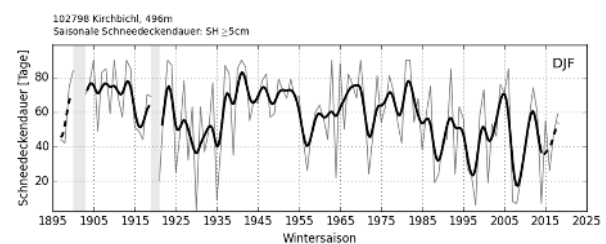
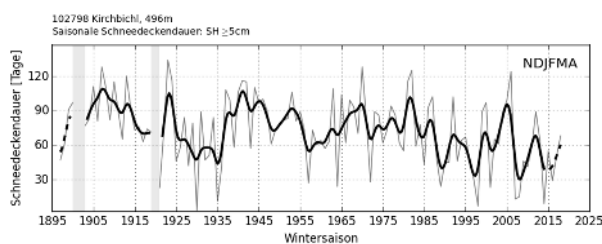
102046, Plangeroß, 1605m



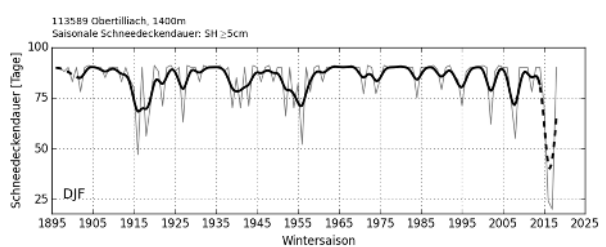
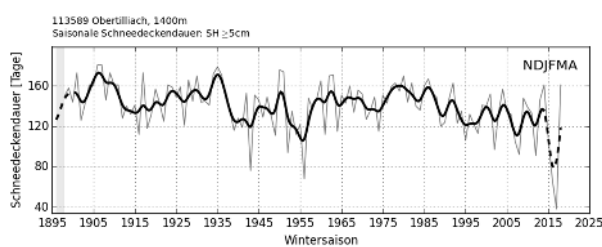
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

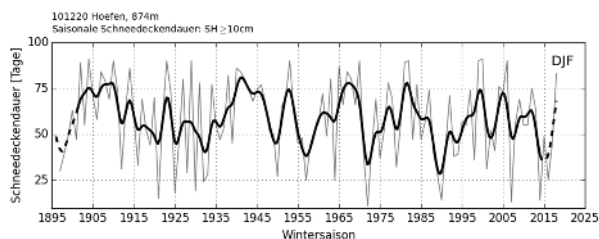
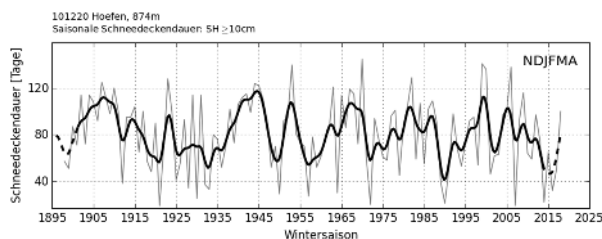


113589, Obertilliach, 1400m

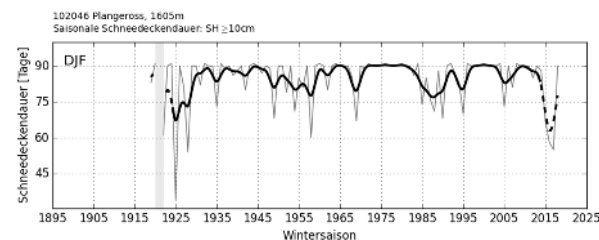
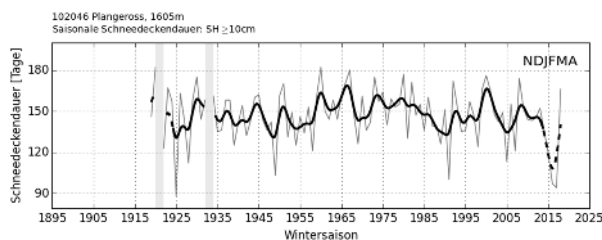


3.2.5 Schneedeckendauer ≥ 10 cm

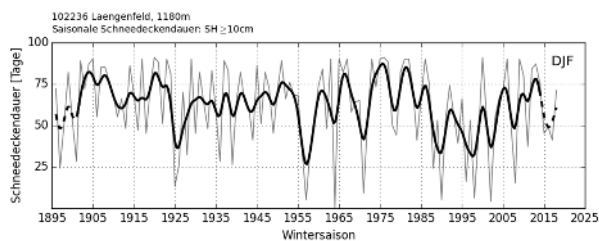
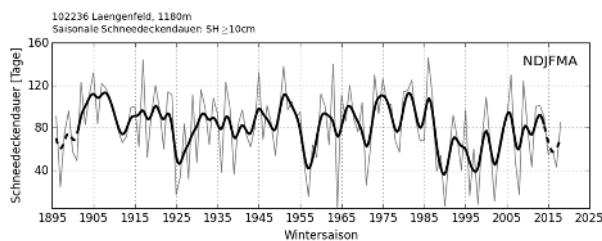
101220, Höfen, 874m



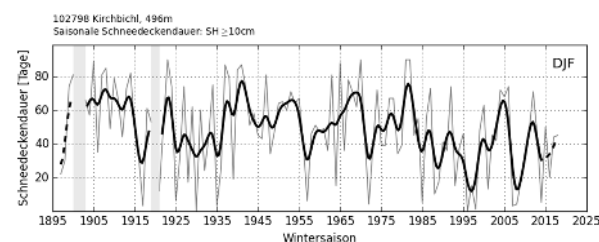
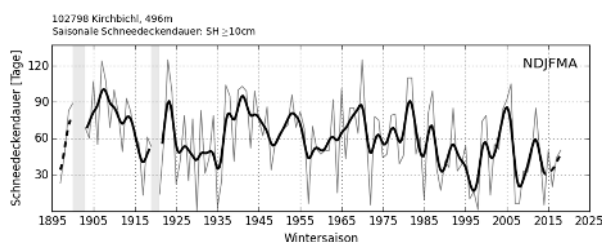
102046, Plangeroß, 1605m



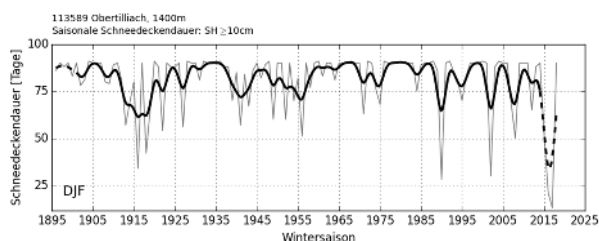
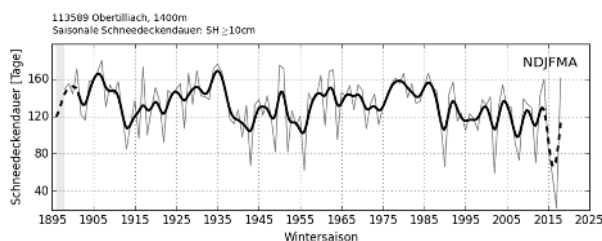
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

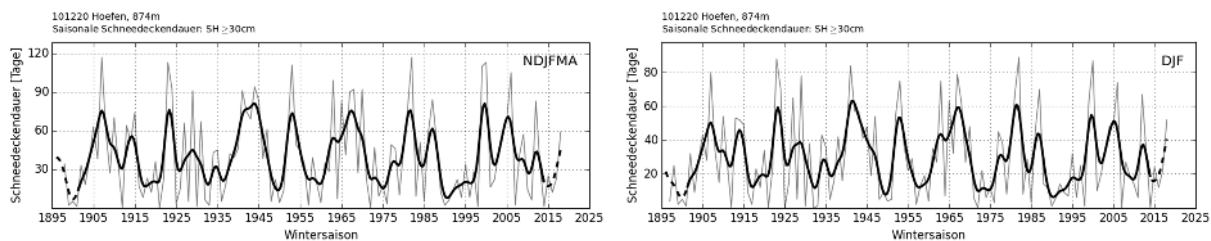


113589, Obertilliach, 1400m

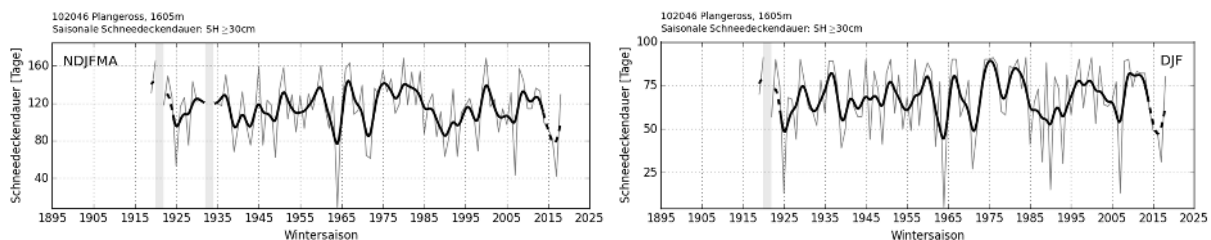


3.2.6 Schneedeckendauer ≥ 30 cm

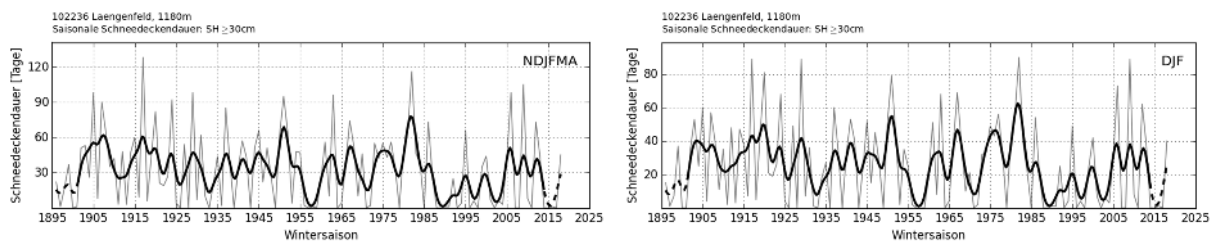
101220, Höfen, 874m



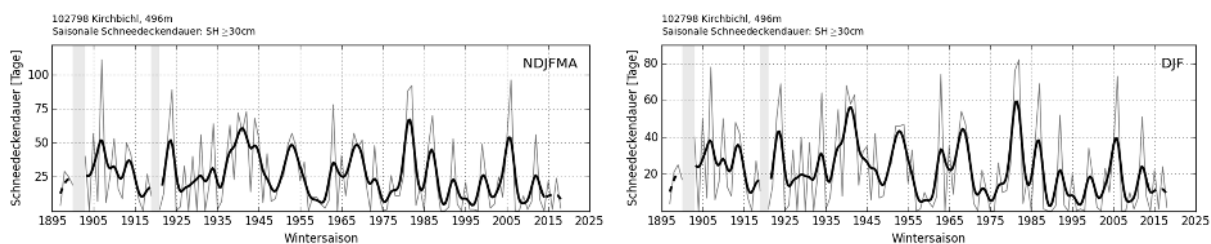
102046, Plangeroß, 1605m



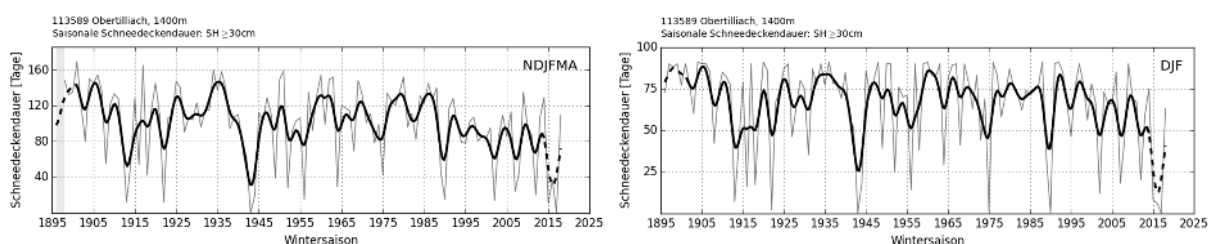
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m



113589, Obertilliach, 1400m



3.3 ANOMALIEN

Die Abweichung eines meteorologischen Parameters von seinem langjährigen Mittelwert wird in der Klimatologie als Anomalie bezeichnet. Die Berechnung erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird ein langfristiges Mittel des Parameters über eine definierte Referenzperiode berechnet. Dieser Mittelwert stellt die mittleren Verhältnisse dar. Anschließend wird von jedem Zeitpunkt (hier Wintersaisons) dieser Mittelwert abgezogen. Als Referenzperiode wurde die Klimanormalperiode 1981-2010 gewählt. Diese Referenzwerte sind für alle Schneeindikatoren für die erweiterte Saison und den Kernwinter in Tabelle 3.1 aufgelistet, die abgeleiteten Zeitreihen der Anomalien sind in 3.3.1-3.3.6 dargestellt. Allgemein ist daraus ersichtlich:

mittlere Gesamtschneehöhe: Die dargestellten Zeitreihen der mittleren Gesamtschneehöhe zeigen im Allgemeinen eine hohe jährliche Variabilität. Zu sehen ist circa ab Ende der 1980er Jahre ein vermehrtes Auftreten von Wintersaisons mit unterdurchschnittlichen Gesamtschneehöhen. Diese Charakteristik ist zwar unterschiedlich stark ausgeprägt, die Häufung aufeinanderfolgender Jahre mit negativen Anomalien jedoch an den meisten Standorten, unabhängig von der Seehöhe, erkennbar. Die jüngsten Wintersaisons 2017/2018 und 2018/2019 zeigen hingegen für Nordtirol wieder positive Abweichungen vom Referenzmittelwert, für Osttirol, das regional von anderen Wetterlagen beeinflusst ist, eine Abschwächung der Phase negativer Anomalien.

maximale Gesamtschneehöhe: Die Anomalien der maximalen Gesamtschneehöhe zeigen für die ausgewählten Standorte ein ähnliches Bild wie jenes der mittleren Gesamtschneehöhe. Auffällig ist in den niedrigen und mittleren Lagen Nordtirols eine ausgeprägte Phase unterdurchschnittlicher maximaler Gesamtschneehöhen vom Untersuchungsbeginn bis Mitte der 1930er Jahre, gegenläufig zum Verlauf des höhergelegenen Standorts in Osttirol.

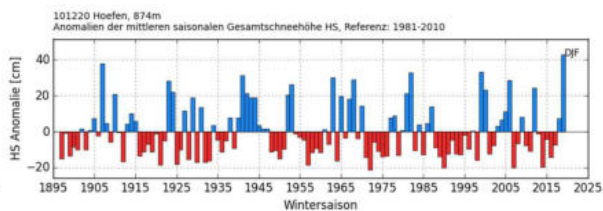
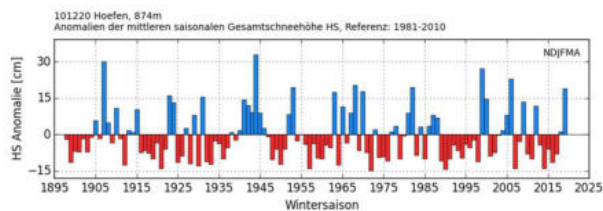
Schneedeckendauer: Im Vergleich zur Gesamtschneehöhe sind im Hinblick auf die saisonale Schneedeckendauer seehöhenabhängige Unterschiede erkennbar. An den höher gelegenen Standorten ist die Anzahl von deutlich unterdurchschnittlichen Wintersaisons ab Ende der 1980er Jahre geringer als bei niedrigeren Seehöhen. Die Anomalien zwischen ca. 1990 und 2013 sind vermehrt positiv bzw. weichen bis auf wenige Ausnahmen nur gering vom klimatologischen Mittelwert ab. Ein Grund dafür ist, dass in höheren Lagen Temperaturänderungen einen geringeren Einfluss haben, als in Tal- oder mittleren Lagen. So kann eine Temperaturerhöhung nicht nur zu einer Änderung des Anteils festen Niederschlags, sondern auch zu einer verfrühten Ausaperung im Spätwinter (März, April) führen. Der Rückgang der Schneereserven hat wiederum eine Abnahme der Schneedeckendauer zur Folge. Zwischen 2013 und 2017 sind auch in höheren Lagen vermehrt Wintersaisons mit einer deutlich unterdurchschnittlichen Schneedecke aufgetreten. Analysen von Schneezeitreihen in anderen Regionen Österreichs zeigen vergleichbare Ergebnisse (Schöner et al., 2018). Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die größten Änderungen ab den 1980er Jahren messbar stattgefunden haben, mit einer besonderen Ausprägung um das Jahr 2015.

Tabelle 3.1 Mittelwerte der Schneeindikatoren für die Referenzperiode 1981 – 2010.

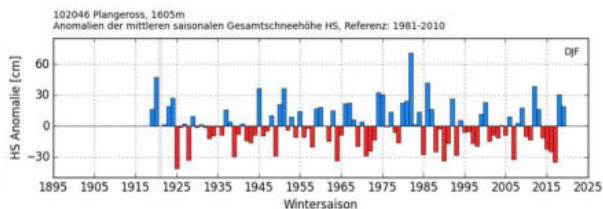
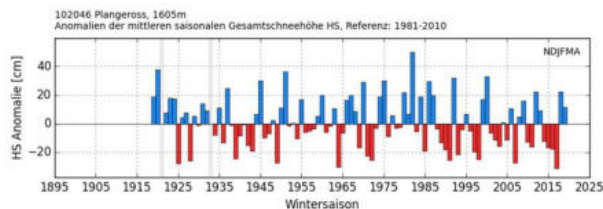
HZBNr. /	Stationsort /	Höhe [m]	Mittelwerte der Schneeindikatoren — Referenzperiode 1981 bis 2010											
			erweiterte Wintersaison NDJFMA						Kernwinter DJF					
			MEAN_SH [cm]	MAX_SH [cm]	SCD ≥ 1cm [Tage]	SCD ≥ 5cm [Tage]	SCD ≥ 10cm [Tage]	SCD ≥ 30cm [Tage]	MEAN_SH [cm]	MAX_SH [cm]	SCD ≥ 1cm [Tage]	SCD ≥ 5cm [Tage]	SCD ≥ 10cm [Tage]	SCD ≥ 30cm [Tage]
101162	Gramais	1320	22,3	77,9	124,4	116,1	103,2	55,5	30,7	73,6	79,4	77,3	71,1	38,8
101212	Forchach	910	14,9	60,1	111,5	99,4	83,4	32,2	21,1	58,2	74,4	68,2	58,9	22,3
101220	Höfen	874	16,7	72,7	105,1	97,3	82,6	41,3	23,3	69,6	70,3	66,3	57,1	29,4
101246	Berwang	1295	42,1	118,0	151,8	143,2	134,6	100,5	50,2	109,9	87,0	83,9	80,6	62,0
101287	Scharnitz	959	21,8	79,2	123,1	107,0	90,8	50,2	30,3	73,6	80,3	72,0	62,0	34,2
101303	Leutasch	1135	41,8	110,4	149,8	142,0	132,3	99,9	51,4	105,2	87,6	85,3	81,2	64,5
101311	Hinterriß	920	35,8	103,1	139,6	134,3	126,6	89,3	46,3	97,0	85,8	84,6	81,1	59,4
101337	Pertisau	930	27,1	91,3	126,0	114,8	104,6	62,8	36,3	87,6	79,7	74,6	69,4	40,9
101956	See im Paznaun	1063	18,6	66,0	118,2	100,9	85,6	47,0	27,0	64,4	81,1	72,7	61,8	33,8
102046	Plangeraß	1605	45,9	112,8	159,2	153,8	146,1	112,6	53,4	105,7	88,8	87,2	85,6	68,3
102236	Längenfeld	1180	11,7	41,9	104,5	91,0	71,2	27,2	18,4	40,7	76,1	70,2	55,9	21,6
102251	Oetz	760	4,9	25,7	67,0	50,2	37,0	6,0	8,4	24,6	53,6	42,3	31,5	5,3
102319	Gries im Sellrain	1227	21,0	61,7	134,0	121,5	104,2	54,7	28,7	59,5	85,8	81,8	73,0	37,3
102368	Trins	1235	11,4	49,8	107,3	86,9	68,7	25,2	18,0	46,5	72,5	63,2	52,4	21,3
102384	Schönberg im Stubaital	1009	5,7	34,7	77,9	54,4	38,4	10,2	8,9	31,8	56,5	41,3	29,7	8,6
102467	St.Martin i.G.	875	19,4	76,4	109,0	99,6	87,7	46,1	27,9	72,6	73,7	68,8	61,4	32,6
102509	Rotholz	563	9,6	49,0	79,6	65,5	51,6	24,9	15,0	46,8	57,9	48,9	38,7	19,8
102681	Gerlos	1263	41,8	107,5	150,6	145,9	137,7	108,6	52,7	98,8	88,2	87,5	85,2	70,9
102756	Steinberg am Rofan	1020	32,7	95,5	133,4	128,1	119,4	78,4	42,2	90,8	83,0	81,6	77,2	52,2
102764	Wildschönau Mühlal	790	12,7	56,1	97,2	85,6	69,9	30,3	19,5	53,8	68,7	62,3	52,5	23,0
102772	Kelchsau	801	20,8	68,7	124,1	113,7	102,8	54,0	29,5	65,9	82,7	78,3	72,6	38,5
102798	Kirchbichl	496	9,6	51,1	84,4	63,4	50,4	23,3	15,4	48,0	62,5	48,2	39,5	19,1
102806	Ellmau	750	19,8	77,3	113,9	103,1	89,0	45,6	28,7	72,9	78,2	73,2	64,3	32,3
102830	Jochberg	950	23,1	79,4	121,8	112,1	98,9	57,5	32,4	75,2	78,9	75,1	67,4	40,8
102863	Kirchberg in Tirol	830	25,3	82,6	123,1	112,7	104,8	60,8	36,1	79,1	82,7	78,3	74,2	41,8
102905	Kössen	590	20,8	83,4	110,1	103,2	90,1	49,1	30,4	77,3	76,8	73,5	65,8	35,2
102913	Walchsee	687	19,2	71,1	114,1	95,6	83,6	43,8	27,9	66,0	78,5	67,9	61,2	31,3
103135	Fieberbrunn	850	36,9	109,8	137,6	131,9	122,7	86,0	49,9	106,6	84,5	83,1	79,4	57,7
113027	Innervillgraten	1400	29,3	78,8	137,1	132,3	123,1	82,9	39,3	75,4	87,3	86,3	81,3	58,6
113084	St.Johann im Walde	750	7,4	39,6	77,3	60,6	45,4	11,2	12,4	37,7	60,8	49,0	37,6	9,3
113589	Obertilliach	1400	33,7	93,4	143,5	135,6	126,7	92,5	44,8	87,1	87,9	85,5	81,9	65,8

3.3.1 mittlere Gesamtschneehöhe

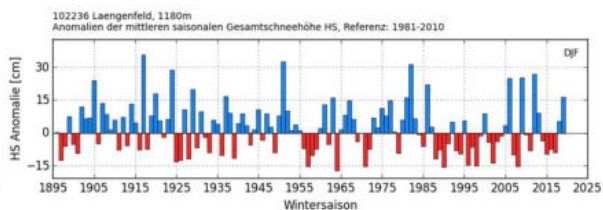
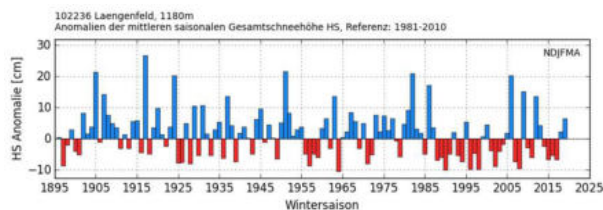
101220, Höfen, 874m



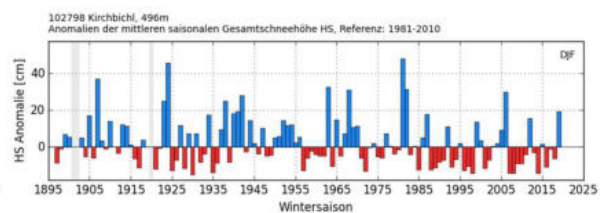
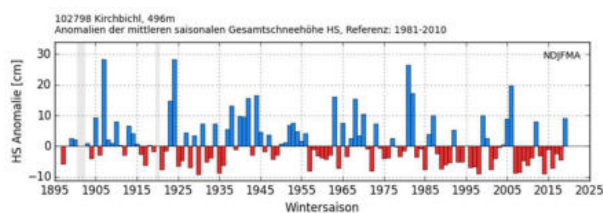
102046, Plangeroß, 1605m



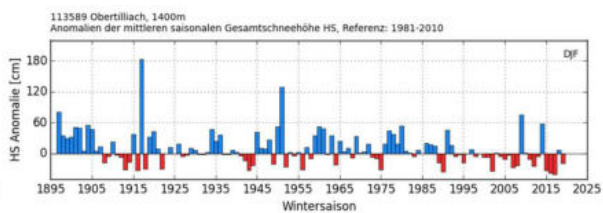
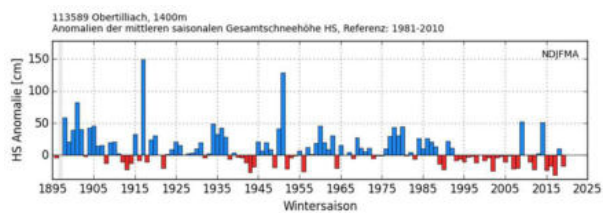
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

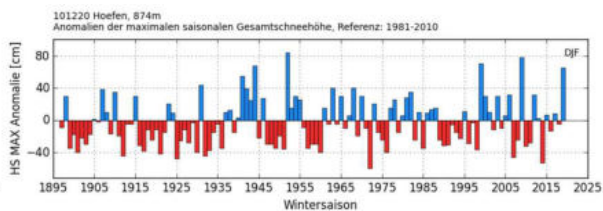
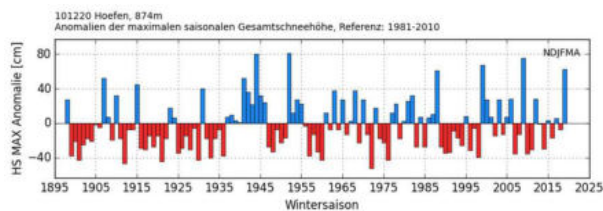


113589, Obertilliach, 1400m

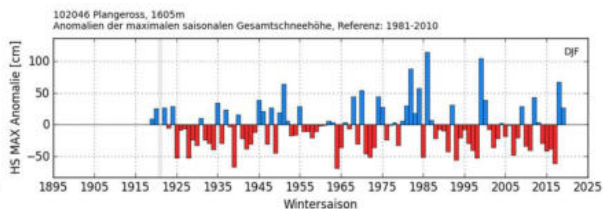
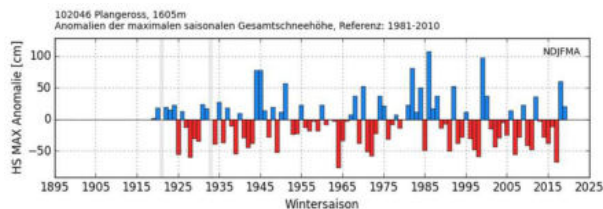


3.3.2 maximale Gesamtschneehöhe

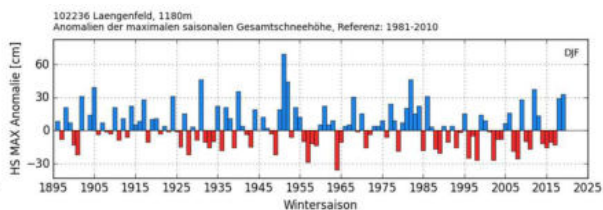
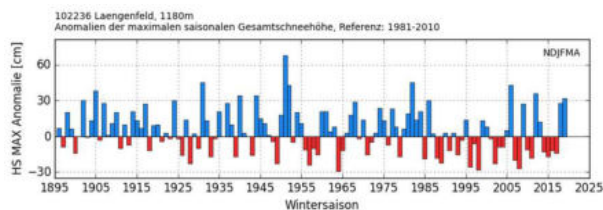
101220, Höfen, 874m



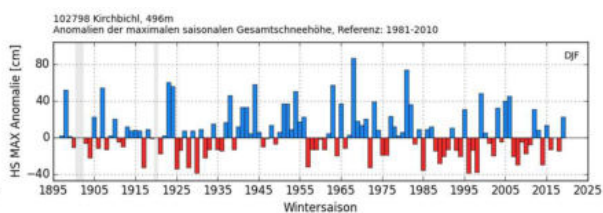
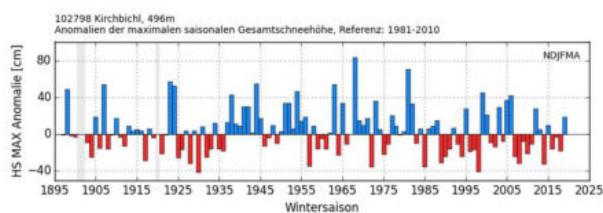
102046, Plangeröß, 1605m



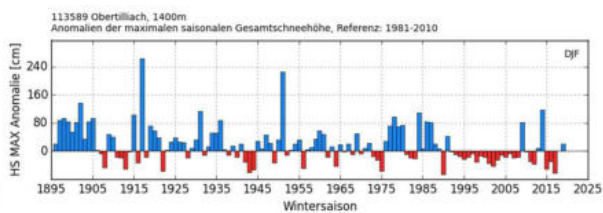
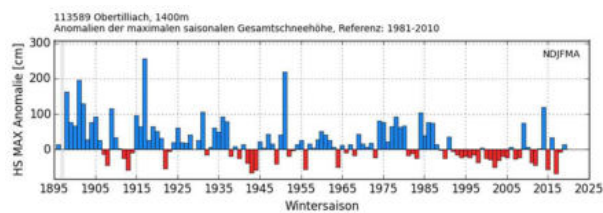
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

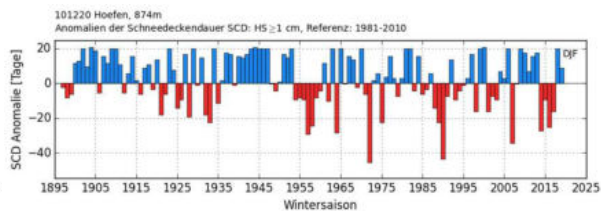
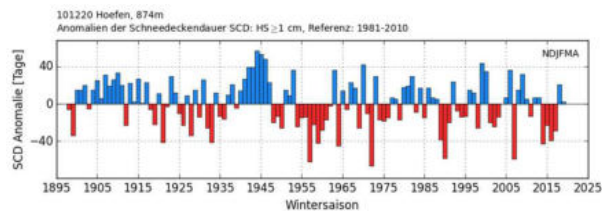


113589, Obertilliach, 1400m

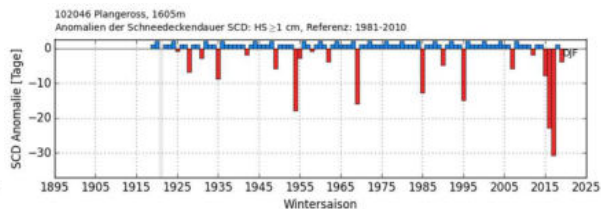
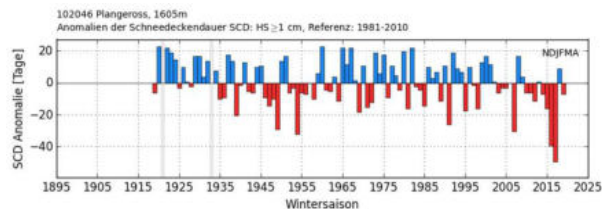


3.3.3 Schneedeckendauer ≥ 1 cm

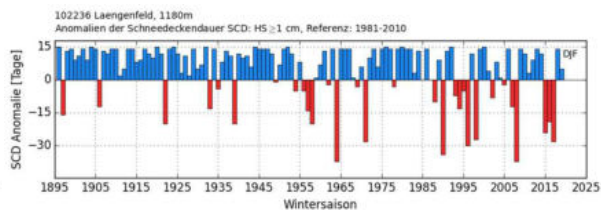
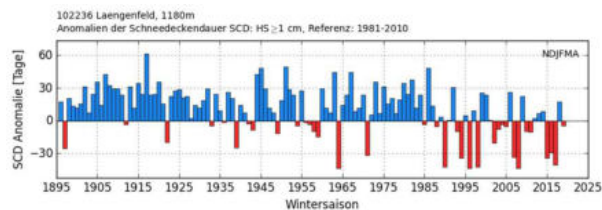
101220, Höfen, 874m



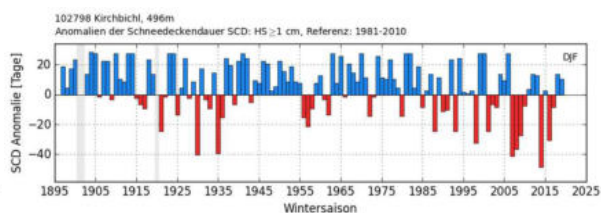
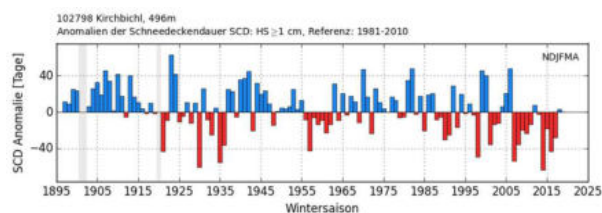
102046, Plangeroß, 1605m



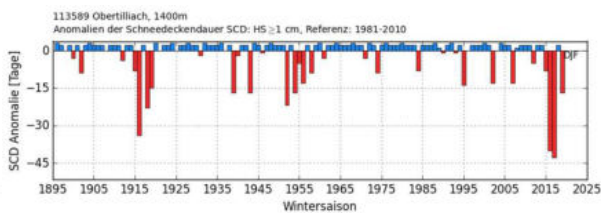
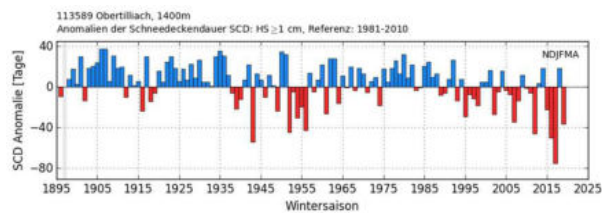
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

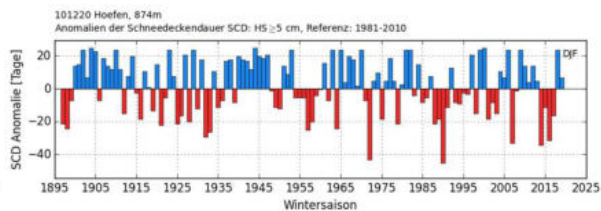
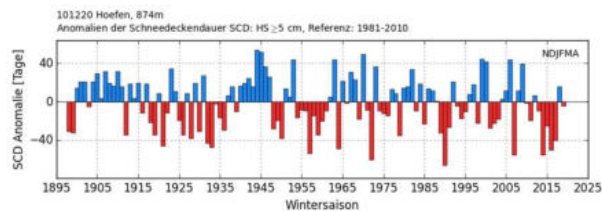


113589, Obertilliach, 1400m

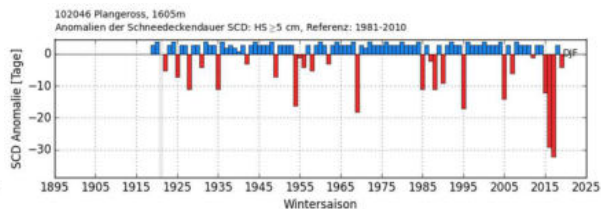
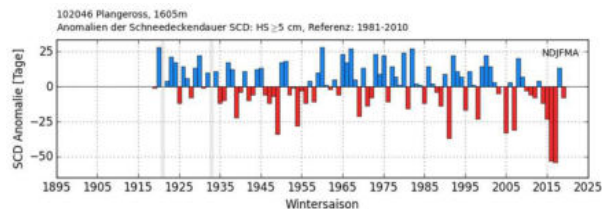


3.3.4 Schneedeckendauer ≥ 5 cm

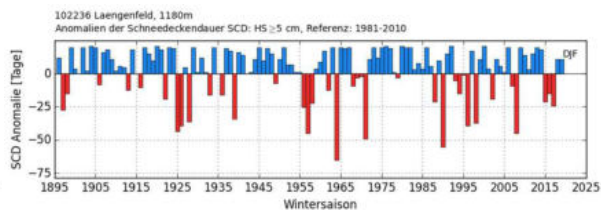
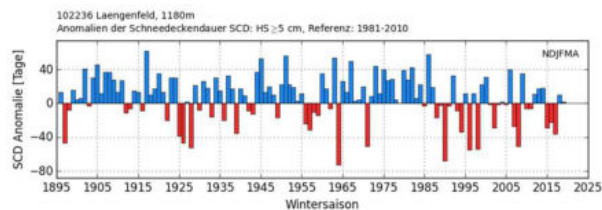
101220, Höfen, 874m



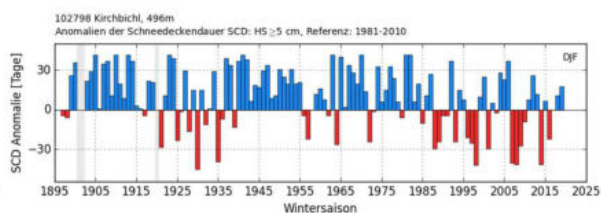
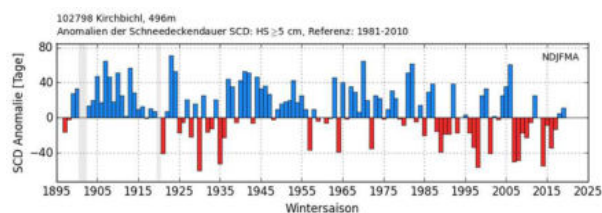
102046, Plangeroß, 1605m



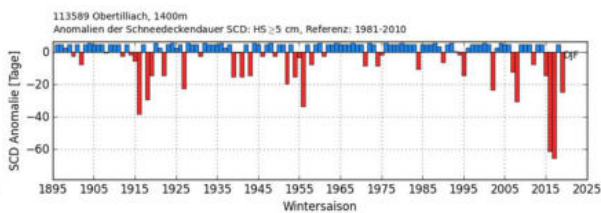
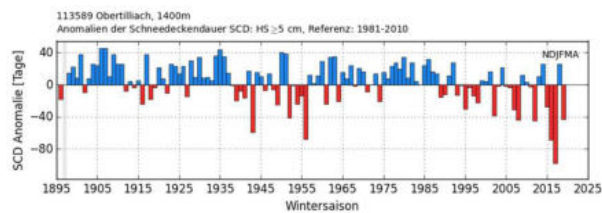
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

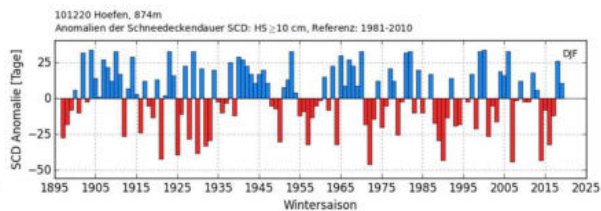
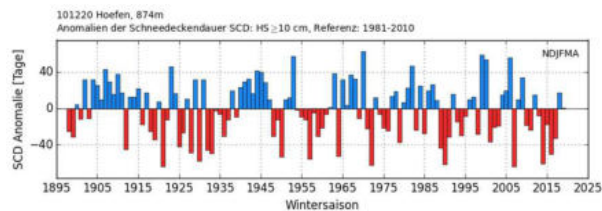


113589, Obertilliach, 1400m

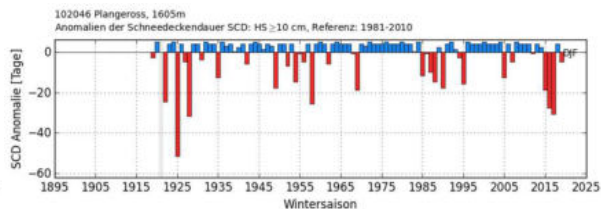
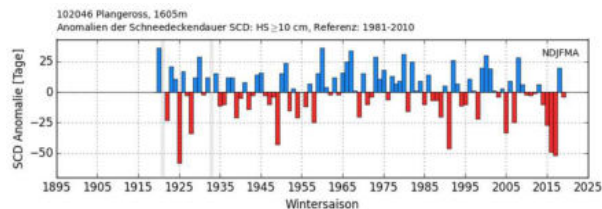


3.3.5 Schneedeckendauer ≥ 10 cm

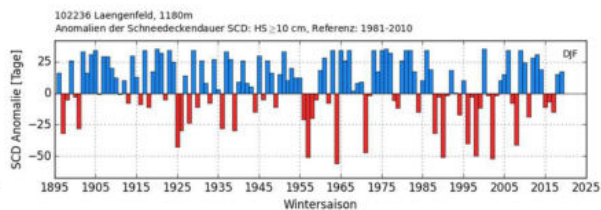
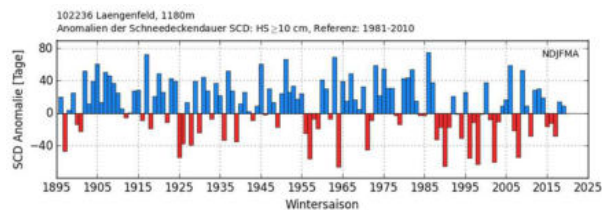
101220, Höfen, 874m



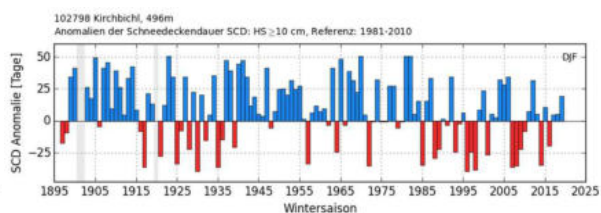
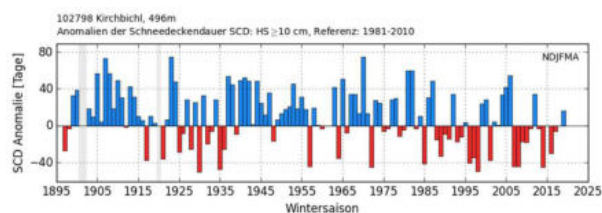
102046, Plangeroß, 1605m



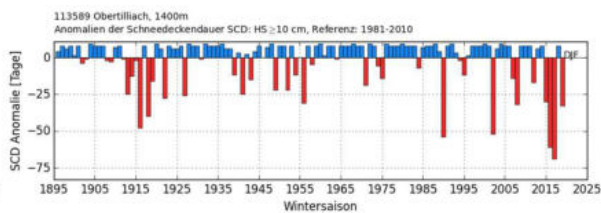
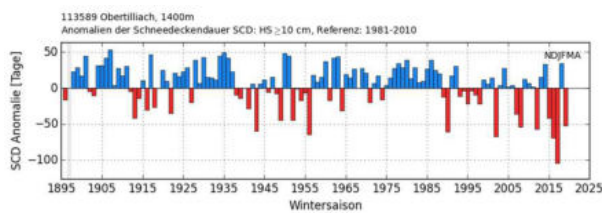
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

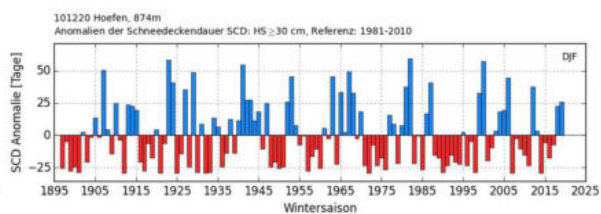
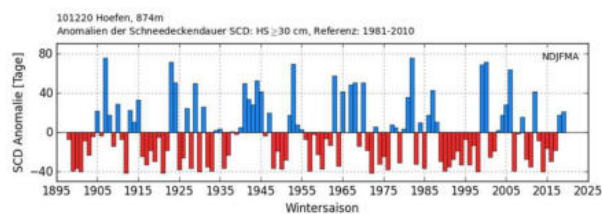


113589, Obertilliach, 1400m

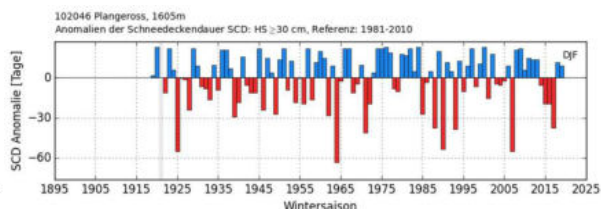
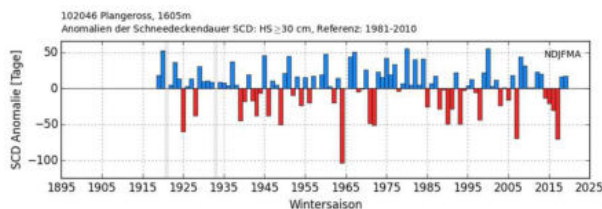


3.3.6 Schneedeckendauer ≥ 30 cm

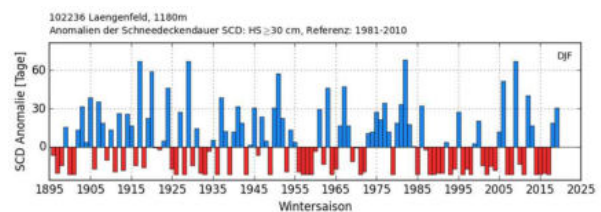
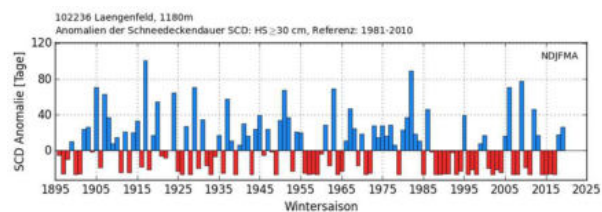
101220, Höfen, 874m



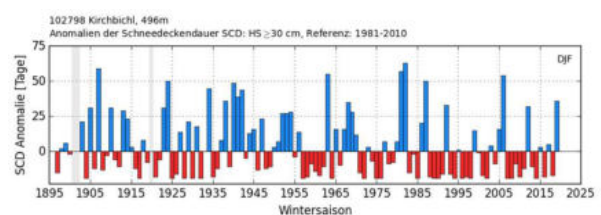
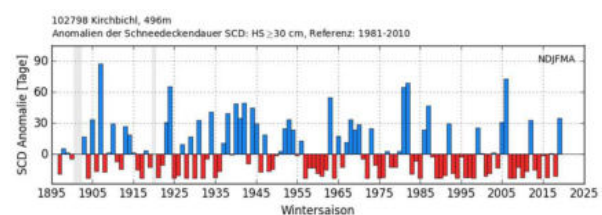
102046, Plangeroß, 1605m



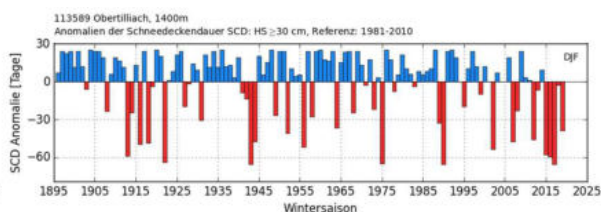
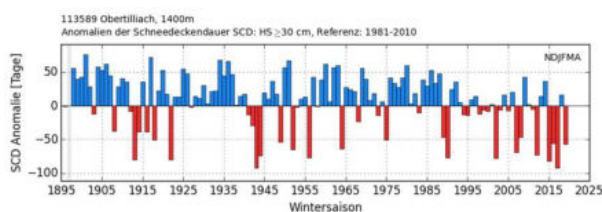
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m



113589, Obertilliach, 1400m



4 TRENDANALYSE

Die Trendanalyse wird mit dem parameterfreien Trendtest nach Mann–Kendall (MK) durchgeführt (Mann 1945; Kendall 1975; Lettenmaier et al., 1994). Dieser Test ist rangbasiert, sodass eine Anwendung auf Zeitreihen mit Ausreißern als sinnvoll erscheint. Es wird die Nullhypothese getestet, dass in der Zeitreihe kein Trend vorherrscht. Die Auswertung der Überschreitungswahrscheinlichkeit d.h. des p-value (2-seitiger Test) der Mann-Kendall Trendstatistik gibt hierbei Aufschluss, ob bezüglich eines vorgegebenen Signifikanzniveaus bzw. der Irrtumswahrscheinlichkeit α (z.B. $\alpha = 0.05$ für $p\text{-value} < \alpha$) die Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese (Trend in der Zeitreihe) verworfen werden kann. Das heißt, je größer der p-value ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass kein signifikanter Trend vorliegt. Betreffend den gewählten Grenzwert des p-value von 0,05 bedeutet das: ist $p < 0,05$ ist folglich der Trend signifikant, d.h. überzufällig, andernfalls nicht. Die Irrtumswahrscheinlichkeit gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Nullhypothese irrtümlich abgelehnt wird, obwohl sie richtig ist, d.h. ein Trend angegeben wird obwohl kein Trend in der Zeitreihe existiert. Die Abschätzung der Trendstärke erfolgt über das sogenannte Theil–Sen Verfahren (Sen 1968). Hierbei werden die Datenpaare (Zeit, Beobachtung) ansteigend geordnet, alle Wertepaare miteinander verknüpft und die Steigungen berechnet. Der Median aller Steigungen ist schließlich ein Maß für die Schätzung der Trendstärke (Sen-Slope).

Als Bezugszeitraum wurde für die Trendanalysen der Vergangenheit der Zeitraum 1950/1951 bis 2018/2019 gewählt, bei Vorliegen ausreichender Datenabdeckung zusätzlich der Zeitraum 1900/1901 bis 2018/2019. Die Trendanalysen der Gitterpunktzeitreihen des Schneedeckenmodells SNOWGRID (Olefs et al., 2013) beziehen sich auf den Zeitraum 1961/1962 bis 2017/2018.

Um die räumliche Datenabdeckung in Osttirol zu verbessern, wurden für die Trendanalysen vier lückengefüllte Referenzzeitreihen hinzugezogen, die ab 1950/1951 weitestgehend vollständige Originaldaten aufweisen: Prägraten (113043), Matrei in Osttirol (113050), Sillian (113001) und Iselsberg Penzelberg (113100).

4.1 TRENDS GEWÄHLTER SCHNEEINDIKATOREN FÜR DIE ZEITRÄUME 1950/1951 BIS 2018/2019 UND 1900/1901 BIS 2018/2019

Zu allen Schneeindikatoren wurde ein Mann–Kendall Trendtest bezogen auf die Wintersaisons 1950/1951–2018/2019 getrennt für den Kernwinter DJF und die erweiterte Wintersaison (NDJFMA) durchgeführt. Die statistischen Größen sind in den Übersichten Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 zusammengestellt. Für jene 25 Untersuchungsstandorte die ausreichende Datenabdeckung im Zeitraum 1900/1901–2018/2019 aufweisen, sind diese Ergebnisse in Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 angeführt. Zeitreihen mit signifikantem Trend sind grau hinterlegt, im jeweiligen Spaltenfuß ist eine zusammenfassende Information zum jeweiligen Schneeindikator angegeben.

Tabelle 4.1 Trendgrößen zu Mann Kendall Trendtest für die Schneeindikatoren der erweiterten Wintersaisons NDJFMA 1950/1951 bis 2018/2019 (Zeitreihen mit signifikantem Trend sind grau hinterlegt).

Trendgrößen: Mann Kendall Signifikanztest, Sen-slope

Zeitraum Indikator		1951-2019, NDJFMA MEAN_SH	1951-2019, NDJFMA MAX_SH	1951-2019, NDJFMA SCD ≥ 1cm	1951-2019, NDJFMA SCD ≥ 5cm	1951-2019, NDJFMA SCD ≥ 10cm	1951-2019, NDJFMA SCD ≥ 30cm
HZB Nr.	Stationsort	p-value Sen-slope [cm/Jahr]	p-value Sen-slope [cm/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]
101162	Gramais	0,00051 -0,31972	0,00037 -0,74106	0,00445 -0,41043	0,00330 -0,46341	0,00717 -0,53496	0,00116 -0,76923
101212	Forchach	0,18827 -0,06202	0,12636 -0,23905	0,01972 -0,33949	0,18642 -0,26201	0,33525 -0,21652	0,18442 -0,20000
101220	Höfen	0,78366 -0,01165	0,81153 -0,03280	0,81559 0,02564	0,40412 -0,12500	0,48112 -0,16542	0,66716 -0,07345
101246	Berwang	0,24382 -0,12500	0,36160 -0,27027	0,15560 -0,16667	0,07895 -0,23887	0,24354 -0,15849	0,46504 -0,13681
101287	Scharnitz	0,25665 -0,08750	0,29508 -0,23166	0,55826 -0,13333	0,30011 -0,21525	0,09424 -0,39010	0,11044 -0,37407
101303	Leutasch	0,02524 -0,27918	0,01489 -0,60357	0,00900 -0,31250	0,02838 -0,28571	0,02764 -0,31957	0,09526 -0,36940
101311	Hinterriß	0,32759 -0,09706	0,17955 -0,28759	0,35098 -0,13197	0,44927 -0,12348	0,44937 -0,10526	0,42196 -0,17647
101337	Pertisau	0,28131 -0,10278	0,49068 -0,17029	0,00786 -0,38348	0,03114 -0,36788	0,07992 -0,33333	0,19345 -0,34021
101956	See im Paznaun	0,01695 -0,24305	0,00695 -0,59537	0,11884 -0,20842	0,03772 -0,36700	0,03824 -0,44222	0,00859 -0,83333
102046	Plangeroß	0,18143 -0,14124	0,40995 -0,17289	0,17119 -0,12500	0,09210 -0,18519	0,11757 -0,20000	0,30987 -0,17029
102236	Längenfeld	0,13037 -0,06405	0,15265 -0,20204	0,00160 -0,46154	0,05521 -0,33333	0,07993 -0,36603	0,13744 -0,05263
102251	Oetz	0,00959 -0,06000	0,01175 -0,25000	0,01064 -0,56905	0,03075 -0,56195	0,01712 -0,42857	0,08597 0,00000
102319	Gries im Sellrain	0,08546 -0,11168	0,05717 -0,27273	0,15111 -0,17192	0,42169 -0,11325	0,08925 -0,25000	0,02839 -0,52013
102368	Trins	0,12775 -0,05590	0,08429 -0,22128	0,06140 -0,32231	0,05589 -0,39024	0,12515 -0,37090	0,08265 -0,10860
102384	Schönberg im Stubaital	0,06288 -0,05000	0,29501 -0,12195	0,05862 -0,34580	0,02588 -0,41101	0,08168 -0,31747	0,09449 -0,05381
102467	St.Martin i.G.	0,01792 -0,16548	0,02231 -0,57418	0,04892 -0,34994	0,01533 -0,45455	0,00775 -0,53775	0,02692 -0,45644
102509	Rotholz	0,09427 -0,05714	0,22717 -0,16905	0,01816 -0,45455	0,03323 -0,45081	0,04897 -0,43095	0,18336 -0,05480
102681	Gerlos	0,15433 -0,14791	0,25843 -0,23146	0,80756 0,03078	0,62985 -0,05714	0,27190 -0,14286	0,31733 -0,21690
102756	Steinberg am Rofan	0,04337 -0,23545	0,00042 -0,87500	0,46174 -0,11111	0,49388 -0,09091	0,41595 -0,13921	0,12902 -0,34629
102764	Wildschönau Mühlthal	0,00001 -0,35366	0,00002 -0,86319	0,00013 -0,68211	0,00003 -0,81174	0,00002 -0,97367	0,00010 -0,96173
102772	Kelchsau	0,23350 -0,08297	0,20585 -0,22500	0,99173 0,00000	0,88055 -0,02326	0,70526 -0,07418	0,18993 -0,30152
102798	Kirchbichl	0,03826 -0,08268	0,08724 -0,27586	0,07812 -0,28202	0,01642 -0,44444	0,02416 -0,39052	0,18675 -0,10128
102806	Ellmau	0,00664 -0,23441	0,02833 -0,49020	0,00304 -0,47997	0,00294 -0,50000	0,00862 -0,50000	0,00261 -0,74537
102830	Jochberg	0,13041 -0,12773	0,00725 -0,56832	0,76372 -0,02598	0,28116 -0,17131	0,15572 -0,25000	0,18992 -0,29894
102863	Kirchberg in Tirol	0,35922 -0,07958	0,06056 -0,41588	0,38683 -0,10526	0,09117 -0,20000	0,26974 -0,16667	0,27200 -0,27273
102905	Kössen	0,07998 -0,13141	0,26733 -0,22967	0,01940 -0,32500	0,00786 -0,40551	0,00739 -0,46362	0,04780 -0,40000
102913	Walchsee	0,00022 -0,25213	0,00030 -0,73571	0,00101 -0,47059	0,00000 -0,75717	0,00004 -0,84211	0,00097 -0,72144
103135	Fieberbrunn	0,41311 -0,08636	0,36994 -0,20833	0,39233 -0,10172	0,43391 -0,11201	0,43389 -0,12121	0,60081 -0,10000
113027	Innervillgraten	0,01114 -0,30767	0,01945 -0,50532	0,00256 -0,42857	0,00915 -0,41898	0,01919 -0,45308	0,01489 -0,72902
113084	St.Johann im Walde	0,06073 -0,05836	0,06271 -0,23607	0,14690 -0,26557	0,08173 -0,40825	0,04382 -0,38673	0,06493 0,00000
113589	Obertilliach	0,00213 -0,36847	0,00523 -0,66667	0,04275 -0,26517	0,03073 -0,32725	0,03871 -0,37269	0,00342 -0,68826
113001	Sillian	0,23757 -0,07480	0,03540 -0,50000	0,76374 -0,02941	0,91335 0,00000	0,90925 -0,02076	0,24362 -0,30662
113043	Prägraten	0,00595 -0,24444	0,03044 -0,37778	0,00055 -0,46154	0,00013 -0,63212	0,00037 -0,73333	0,00481 -0,78524
113050	Matrei in Osttirol	0,06592 -0,08954	0,02163 -0,35504	0,24373 -0,20498	0,14542 -0,30769	0,07300 -0,37377	0,01159 -0,20000
113100	Iselsberg Penzelberg	0,13039 -0,10516	0,11631 -0,32971	0,30496 0,18834	0,77567 -0,06838	0,26756 -0,24121	0,10249 -0,35826
Anzahl Zeitreihen mit signifikantem Trend:		13	15	15	16	15	12
mittlerer Trend (absolut ; relativ):		-16,2 cm ; -55,5 %	-38,9 cm ; -41,7 %	-28,6 Tage ; -22,6 %	-32,1 Tage ; -28,1 %	-34,9 Tage ; -34,7 %	-43,6 Tage ; -56,5 %
mittlerer Trend aller Standorte:		-9,8 cm ; -39,1 %	-25,4 cm ; -29,7 %	-17,0 cm ; -13,9 %	-21,2 cm ; -19,0 %	-23,4 cm ; -23,4 %	-23,4 cm ; -36,3 %

Tabelle 4.2 Trendgrößen zu Mann Kendall Trendtest für die Schneeindikatoren der Kernwinter DJF 1950/1951 bis 2018/2019
(Zeitreihen mit signifikantem Trend sind grau hinterlegt).

Trendgrößen: Mann Kendall Signifikanztest, Sen-slope

Zeitraum Indikator		1951-2019, DJF MEAN_SH	1951-2019, DJF MAX_SH	1951-2019, DJF SCD ≥ 1cm	1951-2019, DJF SCD ≥ 5cm	1951-2019, DJF SCD ≥ 10cm	1951-2019, DJF SCD ≥ 30cm
HZB Nr.	Stationsort	p-value Sen-slope [cm/Jahr]	p-value Sen-slope [cm/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]
101162	Gramais	0,00398 -0,35399	0,00045 -0,71429	0,71713 0,00000	0,55233 0,00000	0,25334 -0,03846	0,03321 -0,35574
101212	Forchach	0,45574 -0,05249	0,14677 -0,20901	0,25620 -0,02564	0,71199 0,00000	0,81554 0,00000	0,33731 -0,10230
101220	Höfen	0,93395 0,01719	0,88460 0,00000	0,70854 0,00000	0,64783 -0,03078	0,61515 -0,06667	0,87644 0,00000
101246	Berwang	0,39563 -0,12222	0,25847 -0,28952	0,21142 0,00000	0,26766 0,00000	0,58945 0,00000	0,99172 0,00000
101287	Scharnitz	0,32251 -0,11479	0,21937 -0,28897	0,92068 0,00000	0,61657 0,00000	0,22455 -0,15000	0,10897 -0,26015
101303	Leutasch	0,07564 -0,28571	0,00944 -0,61471	0,19194 0,00000	0,30514 0,00000	0,41986 0,00000	0,57194 -0,07945
101311	Hinterriß	0,32760 -0,12988	0,22331 -0,30536	0,22172 0,00000	0,63251 0,00000	0,66770 0,00000	0,61880 -0,05334
101337	Pettisau	0,53423 -0,08000	0,50383 -0,16182	0,07132 -0,03923	0,29540 -0,02064	0,50529 -0,02632	0,37257 -0,14286
101956	See im Paznaun	0,03925 -0,27238	0,00453 -0,62382	0,38157 0,00000	0,23662 0,00000	0,26489 -0,08333	0,02440 -0,49528
102046	Plangeroß	0,41017 -0,12620	0,27884 -0,22222	0,26718 0,00000	0,42784 0,00000	0,55959 0,00000	0,74769 0,00000
102236	Längenfeld	0,40723 -0,06126	0,27641 -0,14286	0,31837 -0,02500	0,98756 0,00000	0,45794 -0,06667	0,30698 -0,02273
102251	Oetz	0,02296 -0,09099	0,01422 -0,22222	0,04025 -0,27273	0,05992 -0,34248	0,01761 -0,33333	0,06491 0,00000
102319	Gries im Sellrain	0,06369 -0,17500	0,08444 -0,23295	0,06759 0,00000	0,82746 0,00000	0,19265 -0,05714	0,02291 -0,36004
102368	Trins	0,22746 -0,07520	0,07465 -0,23905	0,24654 -0,08333	0,21698 -0,12774	0,27409 -0,16441	0,10935 -0,03846
102384	Schönberg im Stubaital	0,20623 -0,05795	0,14523 -0,16667	0,35072 -0,12000	0,24789 -0,18697	0,32745 -0,15930	0,11675 0,00000
102467	St.Martin i.G.	0,04391 -0,22278	0,03870 -0,47560	0,12272 -0,12251	0,06510 -0,18719	0,02984 -0,30769	0,06273 -0,29129
102509	Rotholz	0,11893 -0,07911	0,22325 -0,18019	0,01423 -0,31530	0,06511 -0,28388	0,08355 -0,28125	0,25772 -0,03182
102681	Gerlos	0,08740 -0,22632	0,11038 -0,30000	0,41096 0,00000	0,28096 0,00000	0,26528 0,00000	0,31343 -0,08000
102756	Steinberg am Rofan	0,06749 -0,30957	0,00073 -0,84699	0,87325 0,00000	0,94953 0,00000	0,72110 0,00000	0,25423 -0,18000
102764	Wildschönau Mühlthal	0,00007 -0,44661	0,00012 -0,78835	0,00194 -0,22515	0,00074 -0,33333	0,00043 -0,45455	0,00062 -0,60000
102772	Kelchsau	0,17149 -0,12014	0,17112 -0,24195	0,37938 0,00000	0,59717 0,00000	0,61725 0,00000	0,17787 -0,24357
102798	Kirchbichl	0,03973 -0,12829	0,08441 -0,26667	0,11257 -0,18182	0,02052 -0,31706	0,06207 -0,29756	0,18390 -0,06857
102806	Ellmau	0,01579 -0,27806	0,03629 -0,45455	0,03356 -0,06061	0,07541 -0,08108	0,21647 -0,11765	0,01195 -0,45644
102830	Jochberg	0,20075 -0,14671	0,01285 -0,55647	0,99581 0,00000	0,56235 0,00000	0,26526 -0,05719	0,24576 -0,16667
102863	Kirchberg in Tirol	0,47792 -0,08353	0,08521 -0,36899	0,83149 0,00000	0,46207 0,00000	0,95441 0,00000	0,16184 -0,25245
102905	Kössen	0,17311 -0,14306	0,31959 -0,22222	0,14791 -0,05556	0,13373 -0,06250	0,13116 -0,15047	0,16181 -0,23810
102913	Walchsee	0,00199 -0,31235	0,00084 -0,66667	0,04960 -0,05263	0,00880 -0,23669	0,02494 -0,31373	0,00490 -0,41101
103135	Fieberbrunn	0,68240 -0,05807	0,46499 -0,19049	0,99142 0,00000	0,84110 0,00000	0,75350 0,00000	0,89692 0,00000
113027	Innervillgraten	0,02329 -0,31319	0,02262 -0,45609	0,54615 0,00000	0,55813 0,00000	0,36738 0,00000	0,07797 -0,22222
113084	St.Johann im Walde	0,10606 -0,09250	0,11862 -0,20000	0,24533 -0,13793	0,08439 -0,30295	0,05006 -0,27429	0,12407 0,00000
113589	Obertilliach	0,00280 -0,44000	0,00849 -0,60000	0,30440 0,00000	0,21064 0,00000	0,20218 0,00000	0,00708 -0,33333
113001	Sillian	0,29303 -0,13018	0,17291 -0,29428	0,62856 0,00000	0,75904 0,00000	0,91309 0,00000	0,13791 -0,23845
113043	Prägraten	0,00654 -0,32176	0,00931 -0,45298	0,04613 0,00000	0,01405 0,00000	0,00980 -0,10000	0,01074 -0,44636
113050	Matrei in Osttirol	0,08737 -0,13274	0,05006 -0,31643	0,66883 0,00000	0,31144 -0,10620	0,13826 -0,25714	0,02340 -0,14550
113100	Iselsberg Penzelberg	0,14697 -0,14513	0,19334 -0,21320	0,41059 0,00000	0,55444 0,00000	0,19214 -0,11701	0,18872 -0,21739
Anzahl Zeitreihen mit signifikantem Trend: mittlerer Trend (absolut ; relativ):		11 -19,4 cm ; -51,9 %	13 -38,5 cm ; -41,8 %	6 -10,3 Tage ; -13,6 %	4 -14,9 Tage ; -19,0 %	5 -20,2 Tage ; -30,2 %	9 -26,8 Tage ; -51,4 %
mittlerer Trend aller Standorte:		-11,7 cm ; -33,8 %	-24,0 cm ; -29,7 %	-3,3 cm ; -4,4 %	-5,0 cm ; -7,3 %	-7,4 cm ; -12,0 %	-12,5 cm ; -27,0 %

Tabelle 4.3 Trendgrößen zu Mann Kendall Trendtest für die Schneeindikatoren der erweiterten Wintersaisons NDJFMA 1900/1901 bis 2018/2019 (Zeitreihen mit signifikantem Trend sind grau hinterlegt).

Trendgrößen: Mann Kendall Signifikanztest, Sen-slope

Zeitraum Indikator		1901-2019, NDJFMA MEAN_SH	1901-2019, NDJFMA MAX_SH	1901-2019, NDJFMA SCD ≥ 1cm	1901-2019, NDJFMA SCD ≥ 5cm	1901-2019, NDJFMA SCD ≥ 10cm	1901-2019, NDJFMA SCD ≥ 30cm
HZB Nr.	Stationsort	p-value Sen-slope [cm/Jahr]	p-value Sen-slope [cm/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]
101162	Gramais	0,01618 -0,08857	0,03473 -0,18584	0,00001 -0,23077	0,00030 -0,22059	0,00350 -0,20690	0,04795 -0,20000
101212	Forchach	0,01058 -0,06250	0,01616 -0,18750	0,00000 -0,28571	0,00975 -0,18868	0,02743 -0,18812	0,01593 -0,18947
101220	Höfen	0,62467 -0,01190	0,20055 0,09009	0,04343 -0,13636	0,08365 -0,12500	0,18048 -0,11881	0,83978 -0,01190
101246	Berwang	0,09959 -0,09385	0,42132 -0,09231	0,28636 -0,05556	0,04487 -0,11111	0,05679 -0,11364	0,18652 -0,12766
101287	Scharnitz	0,02243 -0,08333	0,55797 -0,05405	0,00000 -0,33929	0,00004 -0,30189	0,00026 -0,30693	0,01575 -0,24444
101303	Leutasch	0,34870 -0,05190	0,34159 -0,10448	0,00197 -0,14286	0,00930 -0,14433	0,08567 -0,11111	0,21390 -0,09524
101311	Hinterriß	0,95787 0,00267	0,56721 0,05128	0,11393 -0,08333	0,36412 -0,05556	0,79694 -0,01515	0,73906 -0,03704
101337	Pertisau	0,00632 -0,11341	0,06019 -0,21053	0,00000 -0,29787	0,00004 -0,27586	0,00136 -0,24138	0,01294 -0,26852
101956	See im Paznaun	0,02035 -0,08846	0,07277 -0,15789	0,00010 -0,23684	0,00023 -0,25581	0,00337 -0,25217	0,02741 -0,26316
102236	Längenfeld	0,01973 -0,04299	0,04318 -0,10714	0,00000 -0,27083	0,02693 -0,16438	0,02825 -0,20290	0,02196 -0,08163
102319	Gries im Sellrain	0,00051 -0,10822	0,00191 -0,20000	0,00002 -0,20833	0,00025 -0,20000	0,00021 -0,24242	0,00047 -0,35556
102368	Trins	0,00151 -0,06316	0,05218 -0,11340	0,00016 -0,23596	0,00175 -0,25714	0,00330 -0,28431	0,00685 -0,12987
102384	Schönberg im Stubaital	0,01567 -0,02903	0,12989 0,06186	0,00000 -0,55556	0,00000 -0,42857	0,00215 -0,27778	0,22247 0,00000
102467	St.Martin i.G.	0,51717 -0,01858	0,84338 -0,01370	0,05028 -0,12676	0,20070 -0,09524	0,33116 -0,09091	0,47062 -0,04902
102681	Gerlos	0,02635 -0,09070	0,45662 -0,05263	0,07421 -0,08235	0,13825 -0,07595	0,03695 -0,11111	0,08082 -0,13333
102756	Steinberg am Rofan	0,11197 -0,08000	0,18124 -0,15179	0,01034 -0,13846	0,03299 -0,12613	0,06374 -0,11940	0,10634 -0,17241
102764	Wildschönau Mühlthal	0,00054 -0,11143	0,02943 -0,17757	0,00000 -0,40698	0,00004 -0,33333	0,00049 -0,33803	0,00104 -0,34091
102772	Kelchsau	0,47219 -0,01860	0,49632 0,04000	0,21561 -0,07407	0,56882 -0,03175	0,40175 -0,06818	0,26423 -0,10390
102806	Ellmau	0,00281 -0,12000	0,02306 -0,23944	0,00000 -0,37931	0,00001 -0,29091	0,00030 -0,28125	0,00442 -0,32258
102830	Jochberg	0,03049 -0,07379	0,23034 -0,10294	0,00521 -0,15625	0,00225 -0,19277	0,00609 -0,18750	0,02776 -0,22826
102863	Kirchberg in Tirol	0,23323 -0,04000	0,99633 0,00000	0,04391 -0,10606	0,06987 -0,09836	0,25354 -0,07955	0,06576 -0,18750
102913	Walchsee	0,00027 -0,13117	0,00099 -0,32308	0,00299 -0,18182	0,00056 -0,25714	0,00082 -0,29310	0,00028 -0,37079
103135	Fieberbrunn	0,49223 -0,03171	0,98167 0,00000	0,33448 -0,04167	0,86681 0,00000	0,86862 0,00000	0,39791 -0,08451
113027	Innervillgraten	0,08412 -0,08095	0,01731 -0,23810	0,00192 -0,18605	0,02146 -0,15217	0,11036 -0,14286	0,29172 -0,13333
113589	Obertilliach	0,00170 -0,17500	0,00031 -0,46296	0,00023 -0,19000	0,00123 -0,20588	0,01657 -0,17647	0,00239 -0,31250
Anzahl Zeitreihen mit signifikantem Trend: mittlerer Trend (absolut ; relativ):		15 -10,8 cm ; -40,2 %	9 -27,6 cm ; -30,1 %	19 -28,9 Tage ; -20,5 %	18 -26,7 Tage ; -20,9 %	15 -28,0 Tage ; -25,1 %	13 -29,8 Tage ; -42,0 %
mittlerer Trend aller Standorte:		-8,5 cm ; -30,2 %	-13,7 cm ; -14,0 %	-24,1 Tage ; -17,2 %	-21,5 Tage ; -16,9 %	-20,8 Tage ; -18,5 %	-20,8 Tage ; -27,8 %

Tabelle 4.4 Trendgrößen zu Mann Kendall Trendtest für die Schneeindikatoren der Kernwinter DJF 1900/1901 bis 2018/2019
(Zeitreihen mit signifikantem Trend sind grau hinterlegt).

Trendgrößen: Mann Kendall Signifikanztest, Sen-slope

Zeitraum Indikator		1901-2019, DJF MEAN_SH	1901-2019, DJF MAX_SH	1901-2019, DJF SCD ≥ 1cm	1901-2019, DJF SCD ≥ 5cm	1901-2019, DJF SCD ≥ 10cm	1901-2019, DJF SCD ≥ 30cm
HZB Nr.	Stationsort	p-value Sen-slope [cm/Jahr]	p-value Sen-slope [cm/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]	p-value Sen-slope [Tage/Jahr]
101162	Gramais	0,01799 -0,11667	0,04947 -0,15873	0,00384 -0,02381	0,02026 -0,02885	0,01884 -0,04348	0,03956 -0,14815
101212	Forchach	0,02454 -0,08627	0,06506 -0,14706	0,01147 -0,04412	0,08731 -0,04545	0,06362 -0,08333	0,03605 -0,12903
101220	Höfen	0,74258 -0,01429	0,15625 0,10811	0,06078 -0,06154	0,11627 -0,07143	0,13169 -0,08421	0,85416 0,00000
101246	Berwang	0,22174 -0,08554	0,83798 -0,00962	0,15160 0,00000	0,14138 0,00000	0,21697 0,00000	0,52263 -0,02381
101287	Scharnitz	0,04798 -0,10656	0,44700 -0,07229	0,01434 -0,02128	0,01409 -0,05263	0,00917 -0,11111	0,01895 -0,18519
101303	Leutasch	0,23055 -0,08154	0,49508 -0,07407	0,47931 0,00000	0,55894 0,00000	0,90260 0,00000	0,41052 -0,03333
101311	Hinterriß	0,61657 -0,02581	0,45378 0,06944	0,51545 0,00000	0,64570 0,00000	0,99065 0,00000	0,36276 -0,04545
101337	Pertisau	0,01426 -0,13913	0,18268 -0,13514	0,00058 -0,03846	0,00883 -0,04762	0,03084 -0,06667	0,03372 -0,15517
101956	See im Paznaun	0,05571 -0,10300	0,11033 -0,13580	0,05371 0,00000	0,14468 0,00000	0,08746 -0,05000	0,03313 -0,16667
102236	Längenfeld	0,05426 -0,06038	0,15896 -0,07143	0,01270 -0,03333	0,50863 0,00000	0,18764 -0,06931	0,05534 -0,05128
102319	Gries im Sellrain	0,00121 -0,13846	0,00893 -0,16495	0,41595 0,00000	0,32349 0,00000	0,12334 -0,02083	0,00042 -0,25641
102368	Trins	0,00681 -0,08148	0,01211 -0,15385	0,00313 -0,08654	0,01787 -0,12000	0,01457 -0,16364	0,00914 -0,08421
102384	Schönberg im Stubaital	0,02483 -0,04355	0,66903 0,01333	0,00000 -0,22807	0,00001 -0,28261	0,00366 -0,21053	0,47120 0,00000
102467	St.Martin i.G.	0,53213 -0,02981	0,90673 0,00000	0,13251 -0,03883	0,24124 -0,03774	0,28214 -0,06061	0,33911 -0,05357
102681	Gerlos	0,04670 -0,11220	0,49787 -0,04545	0,46384 0,00000	0,82187 0,00000	0,82838 0,00000	0,21135 -0,03846
102756	Steinberg am Rofan	0,11458 -0,11348	0,31769 -0,11579	0,10974 0,00000	0,10168 0,00000	0,16469 0,00000	0,09759 -0,10811
102764	Wildschönau Mühlthal	0,00143 -0,14944	0,04159 -0,16667	0,00006 -0,09259	0,00260 -0,09639	0,00709 -0,12222	0,00157 -0,24615
102772	Kelchsau	0,36185 -0,03951	0,46913 0,04762	0,35021 0,00000	0,71828 0,00000	0,33906 -0,02128	0,15969 -0,09333
102806	Ellmau	0,00706 -0,15172	0,04110 -0,21591	0,00026 -0,03488	0,03325 -0,04348	0,01670 -0,08451	0,01360 -0,20312
102830	Jochberg	0,05903 -0,09577	0,37264 -0,07463	0,29289 0,00000	0,24474 -0,01020	0,09690 -0,04444	0,02773 -0,15385
102863	Kirchberg in Tirol	0,22086 -0,06000	1,00000 0,00000	0,81427 0,00000	0,85259 0,00000	0,74537 0,00000	0,01763 -0,18519
102913	Walchsee	0,00082 -0,17442	0,00118 -0,30769	0,30980 0,00000	0,15809 -0,02174	0,13207 -0,06522	0,00168 -0,25000
103135	Fieberbrunn	0,41486 -0,05909	0,82365 0,02174	0,84203 0,00000	0,84243 0,00000	0,81838 0,00000	0,23387 -0,06422
113027	Innervillgraten	0,27833 -0,06349	0,02824 -0,21739	0,52265 0,00000	0,44156 0,00000	0,69258 0,00000	0,49036 -0,02469
113589	Obertilliach	0,00815 -0,16316	0,00146 -0,38462	0,48602 0,00000	0,58895 0,00000	0,75204 0,00000	0,02039 -0,10959
Anzahl Zeitreihen mit signifikantem Trend: mittlerer Trend (absolut ; relativ):		12 -14,3 cm ; -37,9 %	8 -25,9 cm ; -30,0 %	9 -7,8 Tage ; -9,1 %	7 -11,2 Tage ; -14,1 %	7 -13,4 Tage ; -19,3 %	13 -20,5 Tage ; -39,0 %
mittlerer Trend aller Standorte:		-10,7 cm ; -27,8 %	-11,2 cm ; -12,7 %	-3,3 Tage ; -3,9 %	-4,0 Tage ; -5,1 %	-6,1 Tage ; -8,6 %	-13,1 Tage ; -25,1 %

4.2 REGIONALE VERTEILUNG 1950/1951 BIS 2018/2019

4.2.1 mittlere Gesamtschneehöhe

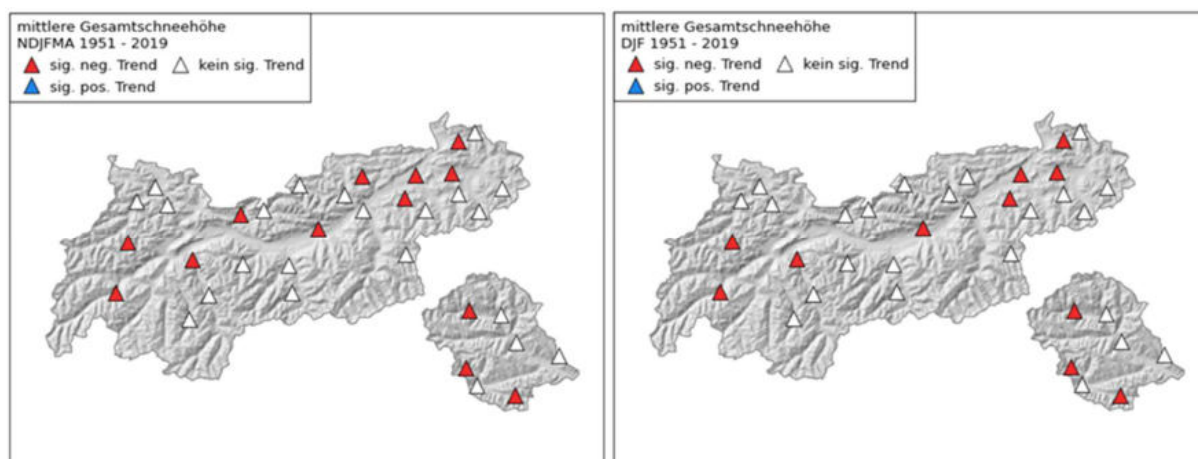


Abb. 4.1 Regionale Verteilung der Trends der mittleren Gesamtschneehöhe für die Saisons NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1951 bis 2019.

Signifikant negative Trends der mittleren Gesamtschneehöhe sind überwiegend an tiefergelegenen Standorten Nordtirols und in den Untersuchungszeitreihen Osttirols feststellbar. Des Weiteren sind in der erweiterten Wintersaison die Änderungen stärker ausgeprägt und weisen häufiger Signifikanz auf als im Kernwinter. Ein Grund dafür ist die Temperaturzunahme sowohl in der Vor-Wintersaison (November) als auch der Nach-Wintersaison (März, April).

4.2.2 maximale Gesamtschneehöhe

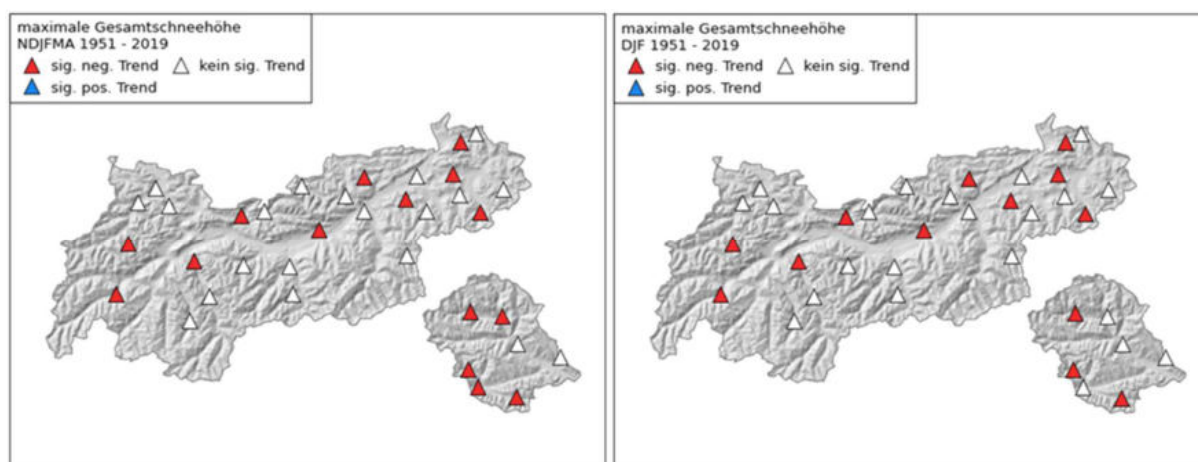


Abb. 4.2 Regionale Verteilung der Trends der maximalen Gesamtschneehöhe für die Saisons NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1951 bis 2019.

Die regionale Verteilung signifikanter Trends der maximalen Gesamtschneehöhe zeigt ein nahezu gleichartiges Muster wie jenes der mittleren Gesamtschneehöhe, mit einer gehäuft signifikanten Abnahme der maximalen Gesamtschneehöhe in der erweiterten Wintersaison an Osttiroler Untersuchungsstandorten.

4.2.3 Schneedeckendauer ≥ 10 cm

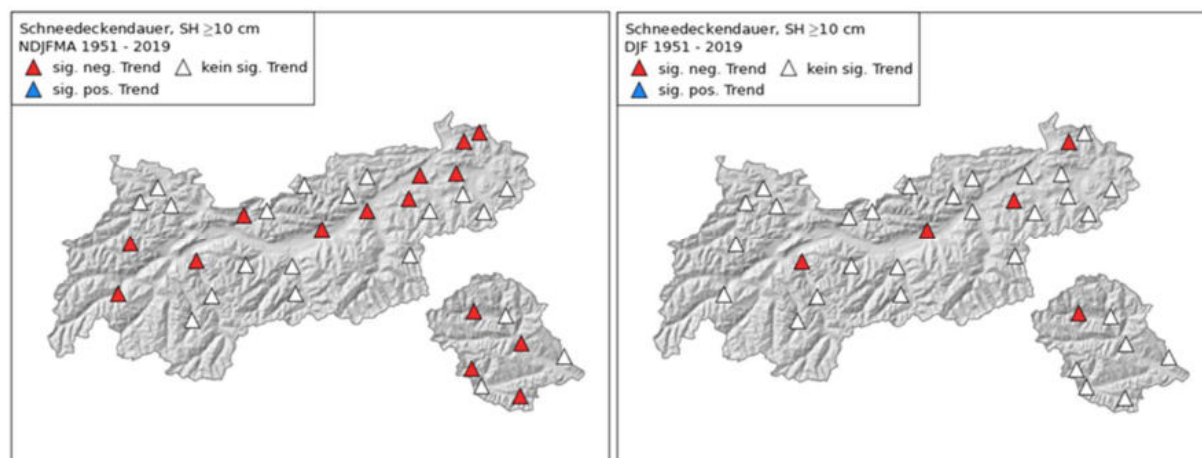


Abb. 4.3 Regionale Verteilung der Trends der Schneedeckendauer ≥ 10 cm für die Saisons NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1951 bis 2019.

Die Schneedeckendauer zeigt analoge Muster zur Gesamtschneehöhe, zusätzlich jedoch deutlichere Unterschiede in der Signifikanzhäufigkeit im Kernwinter gegenüber der erweiterten Wintersaison.

4.3 REGIONALE VERTEILUNG 1900/1901 BIS 2018/2019

4.3.1 mittlere Gesamtschneehöhe

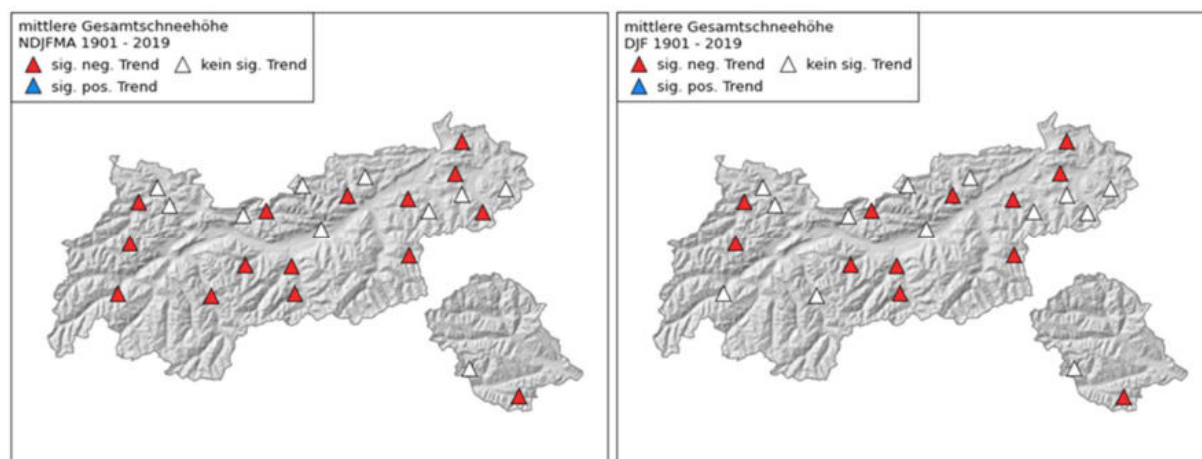


Abb. 4.4 Regionale Verteilung der Trends der mittleren Gesamtschneehöhe für die Saisons NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1901 bis 2019.

Im erweiterten Untersuchungszeitraum ab 1901 stehen 25 Stationszeitreihen gegenüber 35 Stationszeitreihen ab 1951 zur Verfügung. Dies ist bei Vergleich der regionalen Verteilung der beiden Zeiträume zu berücksichtigen. Erkennbar ist im Zeitraum ab 1901 gegenüber dem Zeitraum ab 1951 eine räumlich ausgedehntere Verteilung der Standorte mit signifikant negativem Trend, die zusätzlich auch höher gelegenen Stationen am Alpenhauptkamm (Ötztaler-, Stubai-er Alpen) umfasst.

4.3.2 maximale Gesamtschneehöhe

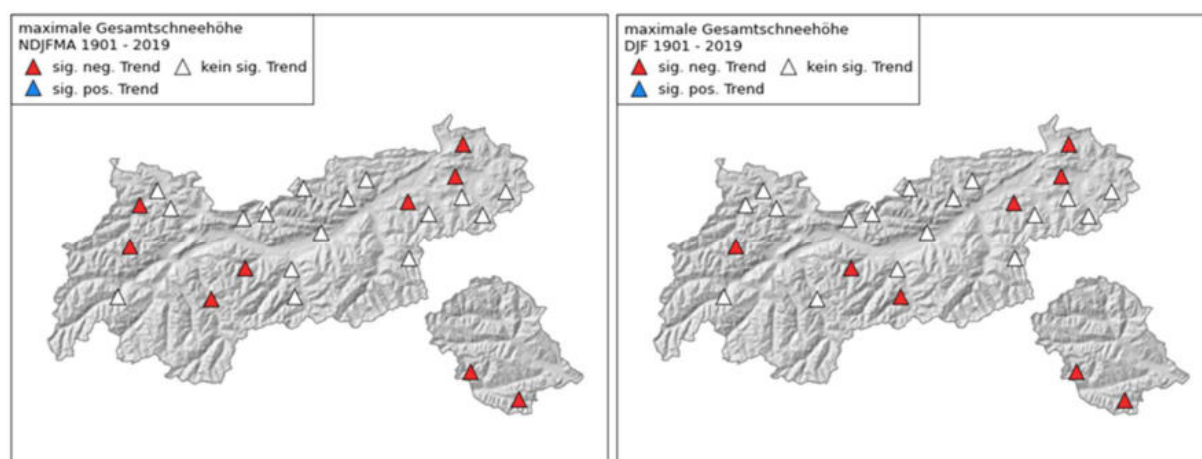


Abb. 4.5 Regionale Verteilung der Trends der maximalen Gesamtschneehöhe für die Saisonen NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1901 bis 2019.

Signifikante negative Trends der maximalen Gesamtschneehöhe zeigen sich vorwiegend in Tallagen und an Standorten, die von Wetterlagen südlicher Anströmung mitgeprägt sind. Die erweiterte Wintersaison und der Kernwinter zeigen in diesem Zeitraum ein analoges Muster.

4.3.3 Schneedeckendauer ≥ 10 cm

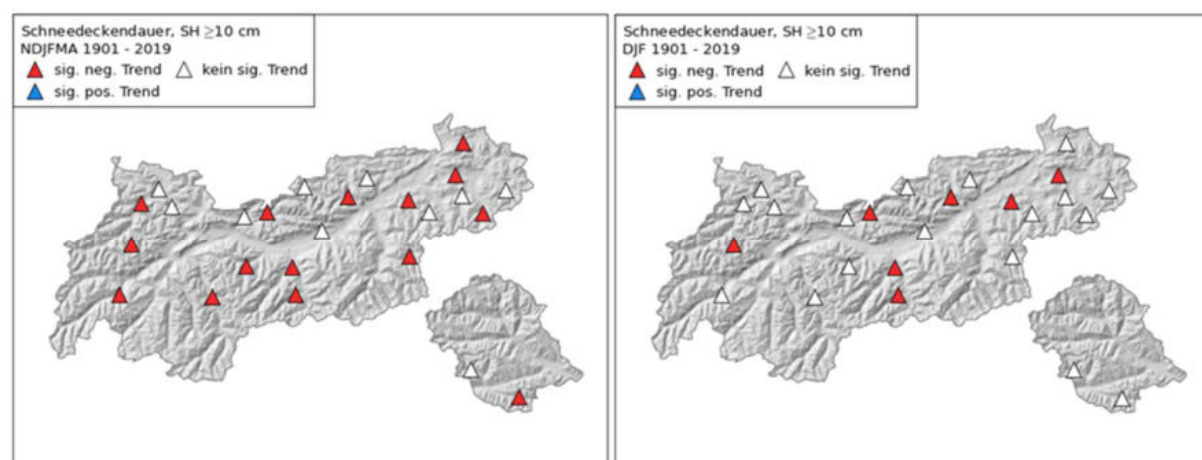


Abb. 4.6 Regionale Verteilung der Trends der Schneedeckendauer ≥ 10 cm für die Saisonen NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1901 bis 2019.

Die signifikanten negativen Trends der Schneedeckendauer ≥ 10 cm zeigen im erweiterten Untersuchungszeitraum ab 1901 eine ähnliche Verteilung wie jene der mittleren Gesamtschneehöhe. In der erweiterten Wintersaison NDJFMA sind jedoch deutlich mehr Standorte von signifikanter Abnahme betroffen als im Kernwinter DJF.

4.4 HÖHENVERTEILUNG 1950/1951 BIS 2018/2019

4.4.1 mittlere Gesamtschneehöhe

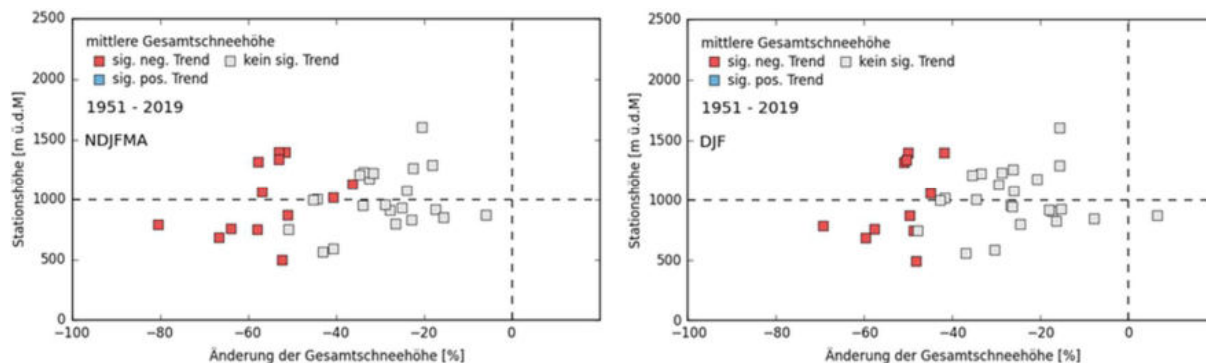


Abb. 4.7 Höhenverteilung der Trends der mittleren Gesamtschneehöhe für die Saisonen NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1951 bis 2019.

Die mittlere Gesamtschneehöhe zeigt sowohl in den Zeitreihen tiefer als auch höher gelegener Standorte sowohl signifikante negative Trends als auch nicht signifikante Tendenzen. Die Anzahl an Standorten mit signifikantem Trend ist in der erweiterten Wintersaison NDJFMA höher und die Abnahmen stärker ausgeprägt als im Kernwinter DJF.

4.4.2 maximale Gesamtschneehöhe

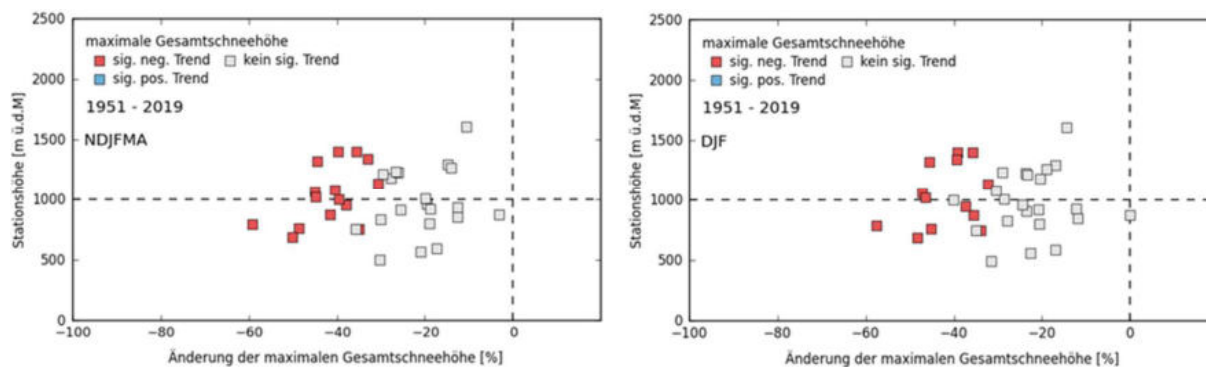


Abb. 4.8 Höhenverteilung der Trends der maximalen Gesamtschneehöhe für die Saisonen NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1951 bis 2019.

Die Höhenverteilung der Änderung der maximalen Gesamtschneehöhe zeigt wiederum in den Zeitreihen tiefer bis hin zu höher gelegenen Standorten sowohl signifikante negative Trends als auch nicht signifikante Tendenzen. Es ist erkennbar, dass die signifikanten Abnahmen im Kernwinter DJF wie auch in der erweiterten Wintersaison NDJFMA gehäuft im Bereich von circa -30% bis -60% liegen.

4.4.3 Schneedeckendauer ≥ 10 cm

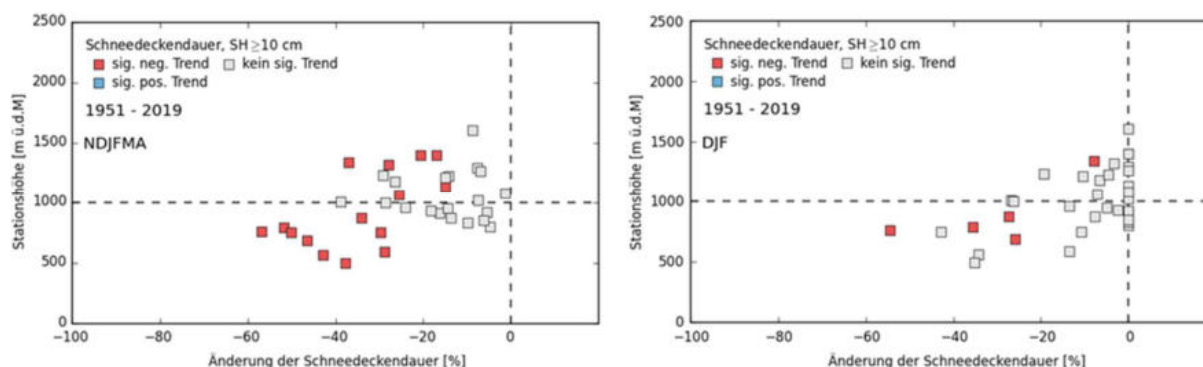


Abb. 4.9 Höhenverteilung der Trends der Schneedeckendauer ≥ 10 cm für die Saisons NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1951 bis 2019.

Im Kernwinter DJF sind in mittleren und höheren Lagen nur schwache bis keine Änderungen zu verzeichnen. In der erweiterten Wintersaison NDJFMA zeigen jedoch deutlich mehr Standorte einen signifikanten Trend, die zugleich eine deutliche verstärkte relative Abnahme mit abnehmender Seehöhe aufweisen. Grund dafür ist die maßgebliche Einflussgröße der Lufttemperatur in tieferen Lagen und ihr beobachteter historischer Anstieg.

4.5 HÖHENVERTEILUNG 1900/1901 BIS 2018/2019

4.5.1 mittlere Gesamtschneehöhe

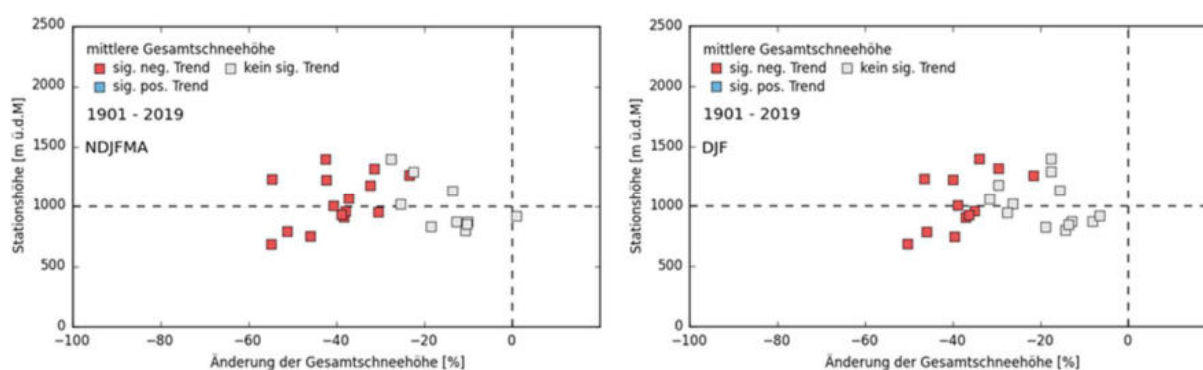


Abb. 4.10 Höhenverteilung der Trends der mittleren Gesamtschneehöhe für die Saisons NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1901 bis 2019.

Signifikante Änderungen der mittleren Gesamtschneehöhe im Zeitraum ab 1901 betreffen in nahezu der Hälfte der verfügbaren Zeitreihen alle Höhenlagen. Die Änderungen sind in der erweiterten Wintersaison NDJFMA ausgeprägter als im Kernwinter DJF.

4.5.2 maximale Gesamtschneehöhe

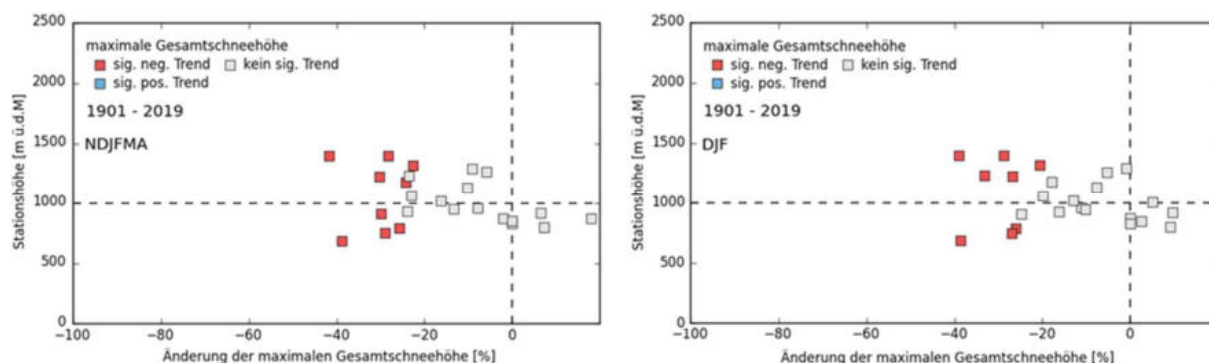


Abb. 4.11 Höhenverteilung der Trends der maximalen Gesamtschneehöhe für die Saisonen NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1901 bis 2019.

Die Höhenverteilung signifikant negativer Trends der maximalen Gesamtschneehöhe zeigt im Zeitraum ab 1901 für circa ein Drittel der Standorte eine relative Abnahme von circa -20% bis -40%. In mittleren Höhenlagen um 1000m sind statistisch nicht signifikante abnehmende Tendenzen und nicht signifikante schwache Zunahmen erkennbar.

4.5.3 Schneedeckendauer ≥ 10 cm

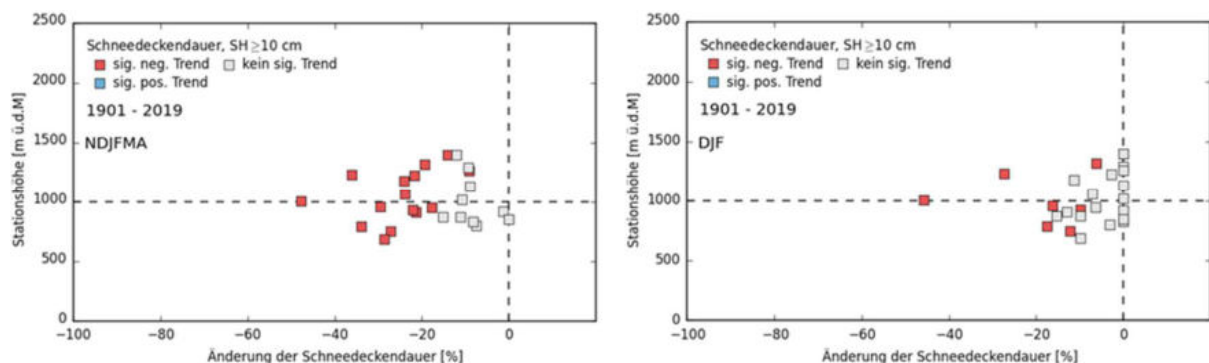


Abb. 4.12 Höhenverteilung der Trends der Schneedeckendauer ≥ 10 cm für die Saisonen NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1901 bis 2019.

Die signifikanten negativen Trends der Schneedeckendauer ≥ 10 cm zeigen sich ab 1901 in allen Höhenlagen, in der erweiterten Wintersaison deutlich häufiger und ausgeprägter als im Kernwinter DJF.

4.6 REGIONALE VERTEILUNG: SNOWGRID—CL 1961/1962 BIS 2017/2018

Das physikalisch basierte und räumlich verteilte Schneedeckenmodell SNOWGRID (Olefs et al., 2013) wurde an der ZAMG entwickelt. Im operationellen Betrieb liefert das Modell Schneedaten in sehr hoher räumlicher (100 m horizontaler Gitterpunktabstand) und zeitlicher Auflösung (stündlich).

Abhängig vom Modus wird SNOWGRID mit zwei Arten von meteorologischen Gitterdaten angetrieben. Der Analysemodus liefert Daten in naher Echtzeit und verwendet operationelle Daten von INCA (Integrated Now Casting and Analysis system; Haiden et al., 2011). Der 72-Stunden Vorhersagemodus basiert auf Daten der NWP Modellen ALARO und AROME (Wang et al., 2006; Seity et al., 2010), die ebenfalls operationell an der ZAMG betrieben werden.

Zur Erstellung einer flächendeckenden Schneeklimatologie seit 1961 wurde das Schneedeckenmodell SNOWGRID–CL entwickelt (Klimaversion des operationellen SNOWGRID Modells). Hierbei handelt es sich um ein erweitertes Gradtag-Modell, welches zusätzlich die Globalstrahlung auf die reale Fläche (komplexes Gelände) und die Oberflächenalbedo berücksichtigt (Pellicciotti et al., 2005). Das Modell wird auf Tagesbasis mit den gegitterten SPARTACUS Beobachtungsdatensätzen der Minimum- und Maximumtemperatur (Hiebl und Frei, 2016), des Niederschlags (Hiebl und Frei, 2017) und der Evapotranspiration (Haslinger und Bartsch, 2016) angetrieben. Die Ergebnisse sind tägliche Gitterdatensätze der Gesamtschneehöhe und des Gesamt-Schneewasseräquivalents (SWE) seit 1961 mit einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km.

4.6.1 mittlere Gesamtschneehöhe

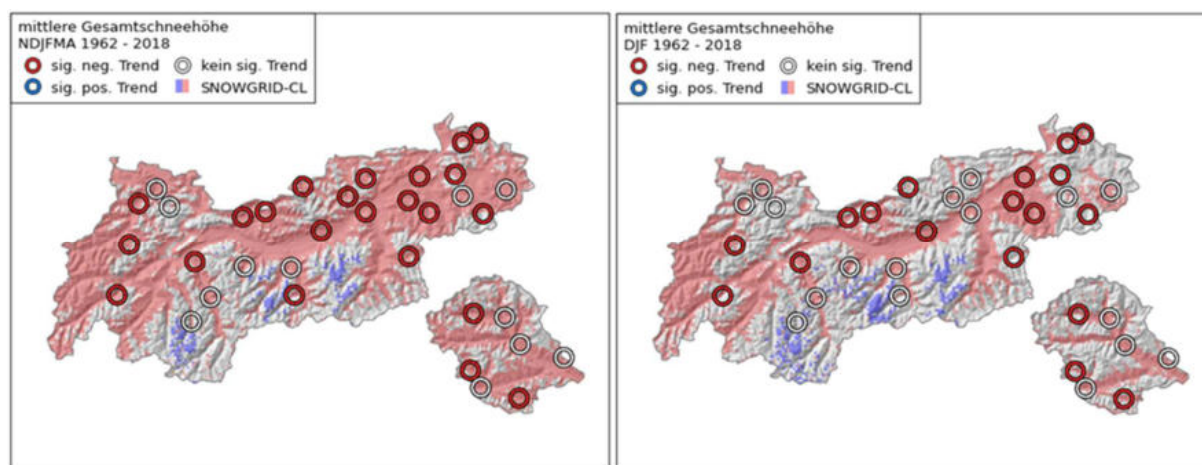


Abb. 4.13 Regionale Verteilung der Trends der mittleren Gesamtschneehöhe für die Saisonen NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1962 bis 2019.

Die rot/blau gefärbten Hintergrundpixel zeigen SNOWGRID–CL Gitterpunkte mit signifikant negativem/positivem Trend an.

Im Bezugszeitraum 1962–2018 zeigen die Trends der mittleren Gesamtschneehöhe aus SNOWGRID–CL weitestgehend übereinstimmende Ergebnisse zu jenen aus stationsbasierten Messzeitreihen. Eine räumliche Ausweitung in der erweiterten Wintersaison NDJFMA gegenüber dem Kernwinter DJF ist deutlich erkennbar. Durch die vollständige flächige Abbildung Tirols auf dem Modellgitter werden auch regional positive Trends in hoch gelegenen Bereichen der Ötztaler, Stubai-, Tuxer- und Zillertaler Alpen sichtbar, die aus den verfügbaren Stationszeitreihen nicht ableitbar sind.

4.6.2 maximale Gesamtschneehöhe

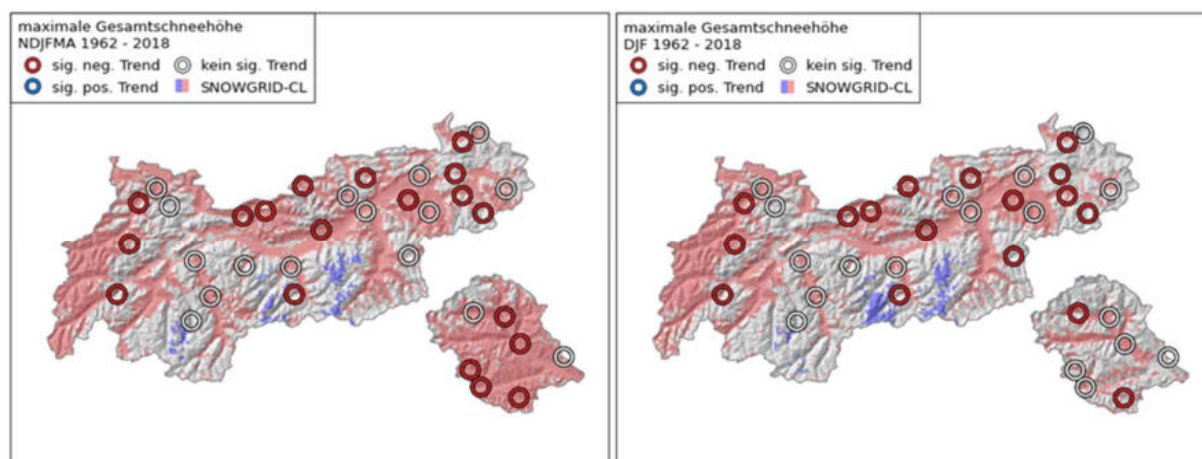


Abb. 4.14 Regionale Verteilung der Trends der maximalen Gesamtschneehöhe für die Saisonen NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1962 bis 2019.

Die rot/blau gefärbten Hintergrundpixel zeigen SNOWGRID–CL Gitterpunkte mit signifikant negativem/positivem Trend an.

Die regionale Verteilung signifikanter Trends der maximalen Gesamtschneehöhe stellt sich analog zur Verteilung der signifikanten Trends der mittleren Gesamtschneehöhe dar, wobei die Änderungen in der erweiterten Wintersaison NDJFMA gegenüber dem Kernwinter DJF in Nordtirol schwächer ausfallen und im Wesentlichen auf die Tallagen beschränkt sind, in Osttirol hingegen nahezu durchgängig signifikant negative Trends zeigen.

4.6.3 Schneedeckendauer ≥ 10 cm

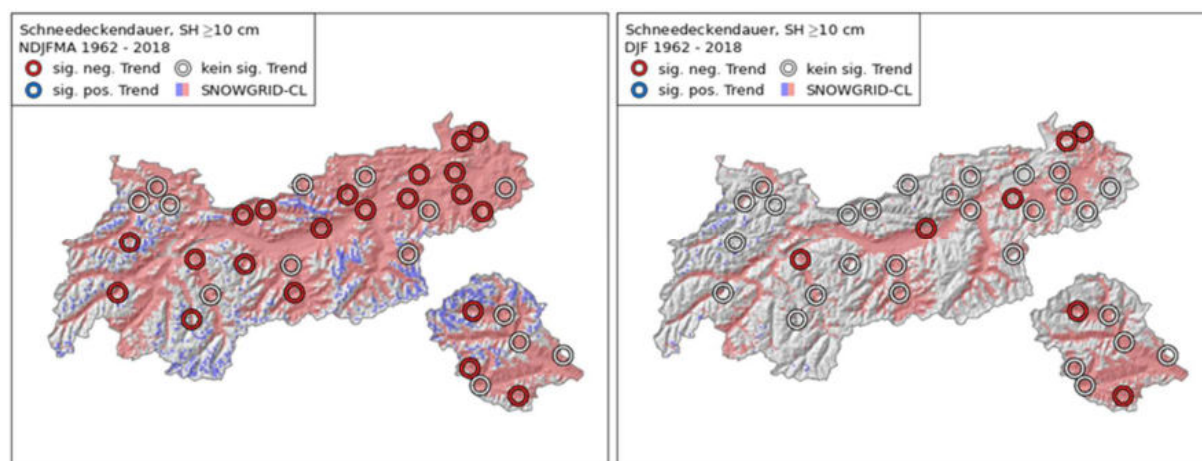


Abb. 4.15 Regionale Verteilung der Trends der Schneedeckendauer ≥ 10 cm für die Saisonen NDJFMA (links) und für den Kernwinter DJF (rechts) von 1962 bis 2019.

Die rot/blau gefärbten Hintergrundpixel zeigen SNOWGRID–CL Gitterpunkte mit signifikant negativem/positivem Trend an.

Die regionale Verteilung signifikanter Trends der Schneedeckendauer ≥ 10 cm zeigt eine deutliche Ausprägung in der erweiterten Winterperiode NDJFMA gegenüber der Kernperiode DJF, in den tiefen und mittleren Höhenlagen abnehmende, an hoch gelegenen, ausgesetzten SNOWGRID–CL Gitterpunkten z.B. entlang des Alpenhauptkammes, des Außerfern und des Karwendel zunehmende Schneedeckendauer. Ein Vergleich der Modellergebnisse mit den Trends der Stationszeitreihen bedarf im Einzelfall einer kleinräumigen Analyse.

Für den Zeitraum 1962 bis 2018 wurden unabhängig voneinander gleitende Trends der Schneeindikatoren (s. Kapitel 4.7) aus den Stationszeitreihen bzw. mittels SNOWGRID—CL berechnet. Die Fensterbreite der Trends wird hierbei bei 21 Jahren beginnend iterativ erhöht und gleichzeitig innerhalb der Zeitreihe schrittweise verschoben. Die Übereinstimmung dieser Ergebnisse (signifikant bzw. nicht signifikant) wird dabei mittels einer Kontingenztafel für alle Indikatoren und Zeiträume quantitativ evaluiert. Daraus ist ablesbar, in wie vielen Fällen die jeweilige Modellzeitreihe dasselbe Trendsignal wie die zugehörige Stationszeitreihe aufweist. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst.

Modell vs. Station: korrektes Trendsignal [%]		
Indikator	Saison	
	NDJFMA	DJF
MEAN_SH	87	89
MAX_SH	90	89
SCD $\geq$ 10cm	84	88

Tabelle 4.5 Übersicht zur kategorialen Auswertung der gleitenden Trends der Schneeindikatoren aus Modell- und Stationsdaten für übereinstimmende Trends signale.

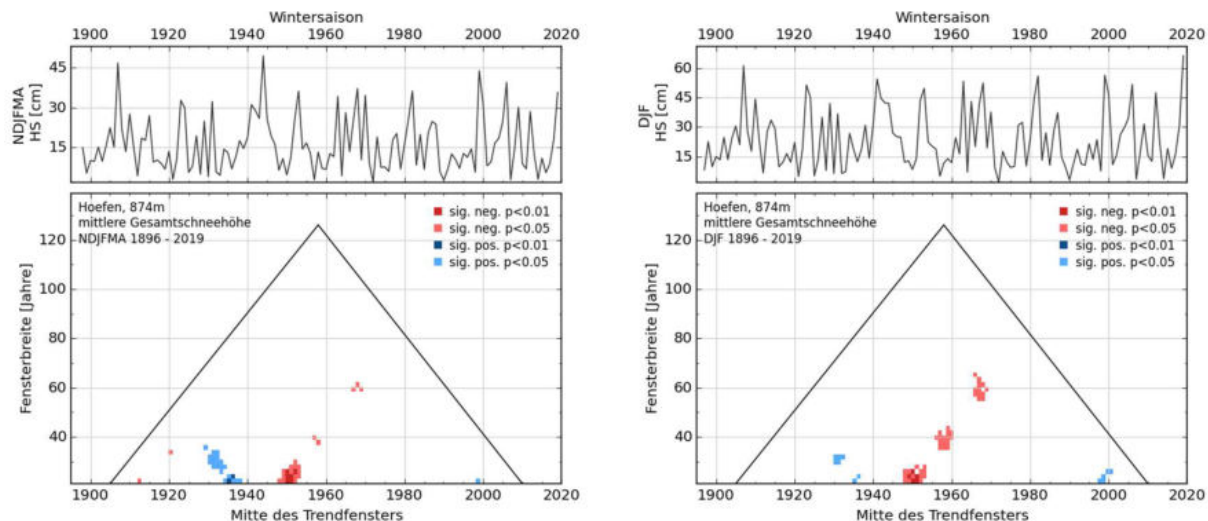
4.7 GLEITENDE TRENDS GEWÄHLTER SCHNEEINDIKATOREN

Trends bezüglich unterschiedlicher Zeitskalen werden mit Hilfe einer gleitenden Trendanalyse (Running-Trend Analysis) abgeschätzt (s. Abbildungen in Kapitel 3.7.1–3.7.6). Die Trend-Fensterbreite wird hierbei iterativ erhöht und gleichzeitig innerhalb der Zeitreihe schrittweise verschoben. Die Signifikanz bezüglich des 95% (99%) Konfidenzintervalls wurde mit dem parameterfreien Trendtest nach Mann-Kendall berechnet. Auf der Abszisse ist die Mitte des Zeitfensters und auf der Ordinate die Fensterbreite aufgetragen. Innerhalb des Dreiecks können Werte auftreten, wobei weiße Bereiche für keinen signifikanten Trend stehen, rot bzw. blau gefärbte Punkte entsprechen signifikant negativem bzw. positivem Trend bezüglich des jeweiligen Konfidenzintervalls. Im oberen Fenster der folgenden Abbildungen ist die Zeitreihe des analysierten Schneeindikators geplottet.

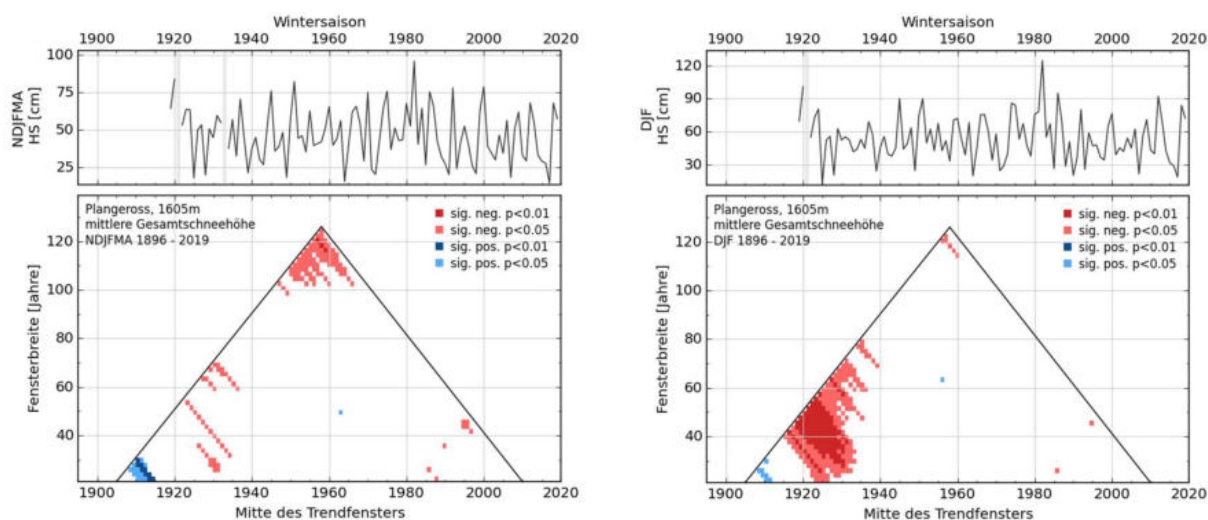
Allgemein zeigt sich, dass den beobachtbaren langfristigen Trends oftmals kurzzeitige natürliche Schwankungen mehrjähriger Dauer aufgeprägt sind. Die Trendanalyse bestätigt die bereits in den Anomalie-Zeitreihen erkennbaren Folgerungen: die Schneeindikatoren zeigen sich im Kernwinter DJF weitgehend unverändert, weisen in der erweiterten Wintersaison NDJFMA hingegen vermehrt (negative) Trends auf. Ebenso sind die größten Änderungen in der Schneedeckendauer circa ab Ende der 1980er Jahre erkennbar.

4.7.1 mittlere Gesamtschneehöhe

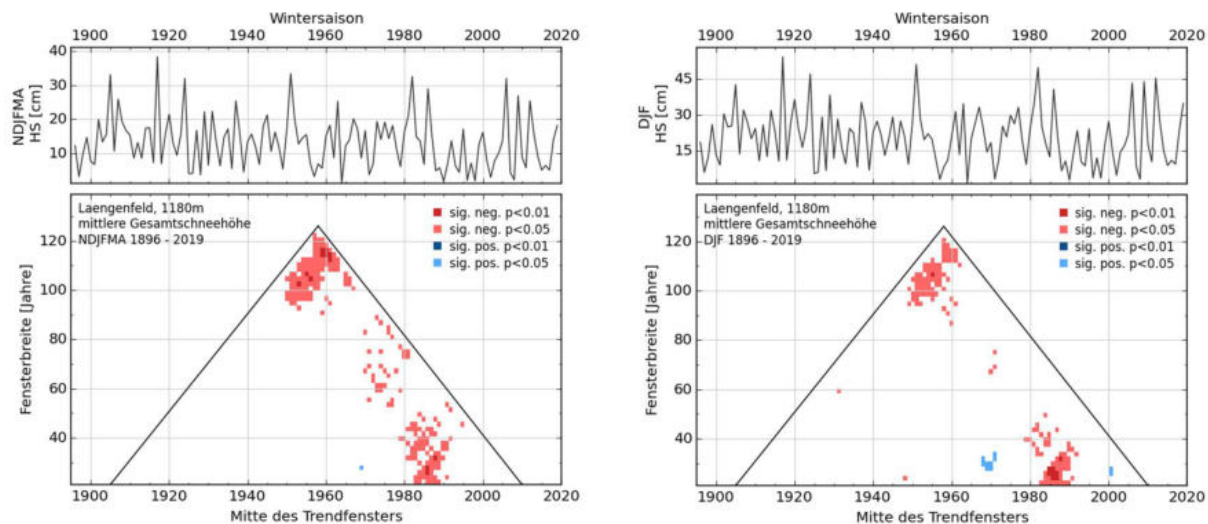
101220, Höfen, 874m



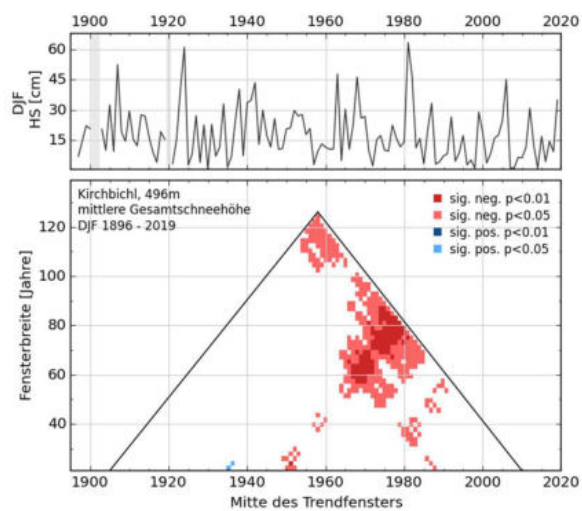
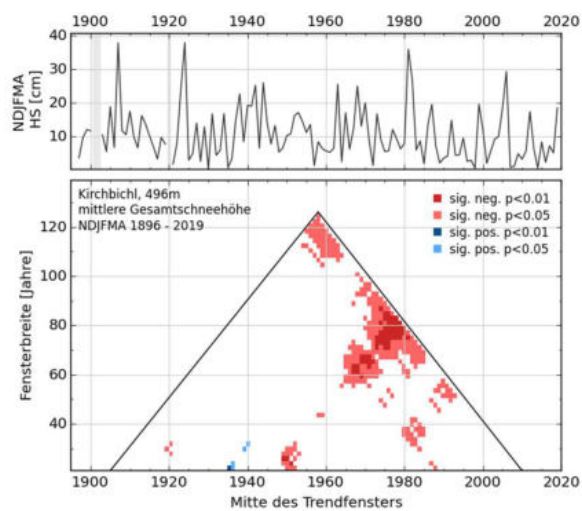
102046, Plangeröß, 1605m



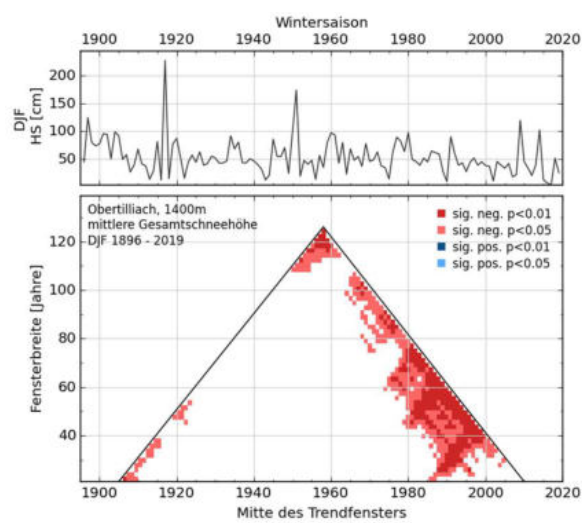
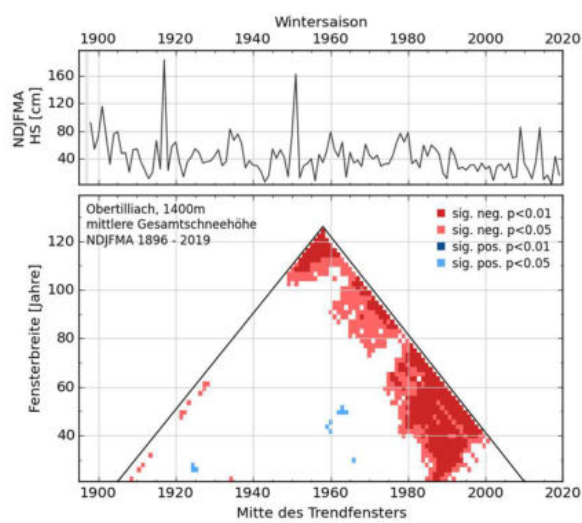
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

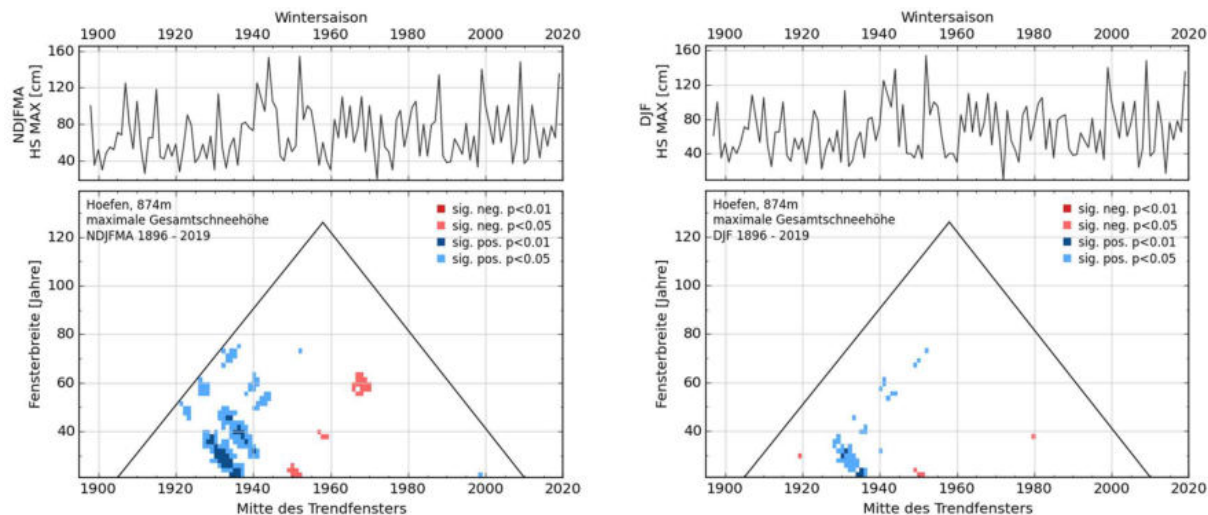


113589, Obertilliach, 1400m

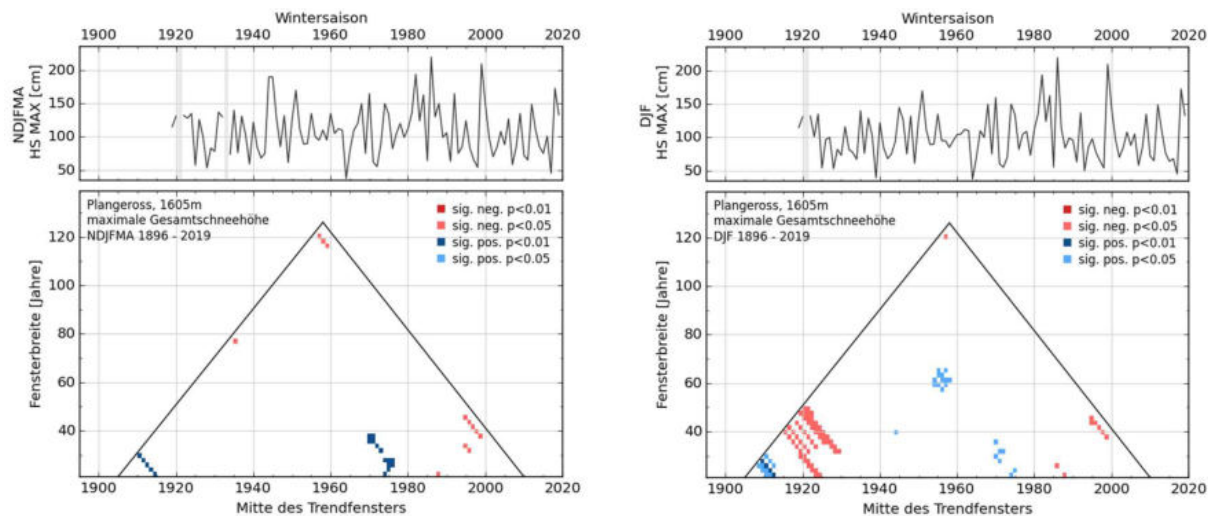


4.7.2 maximale Gesamtschneehöhe

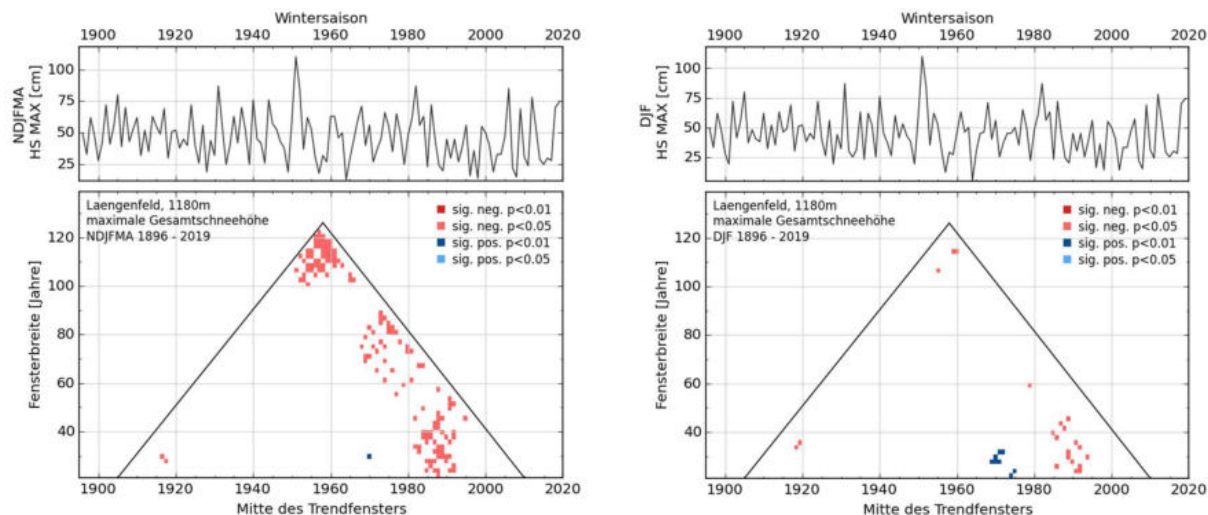
101220, Höfen, 874m



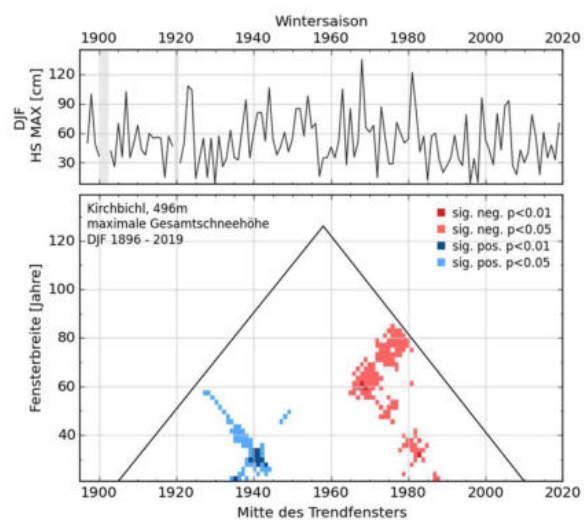
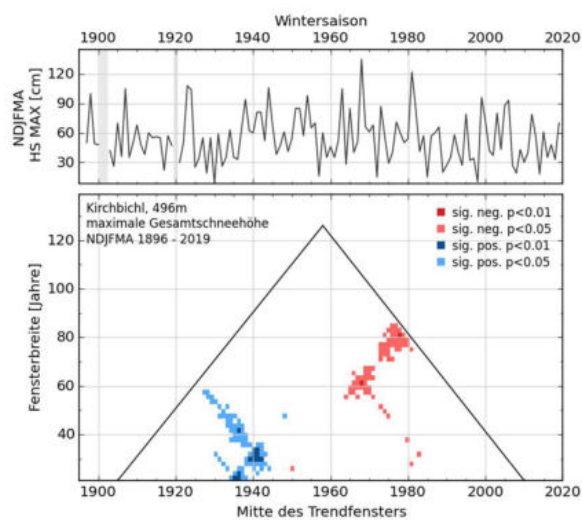
102046, Plangeröß, 1605m



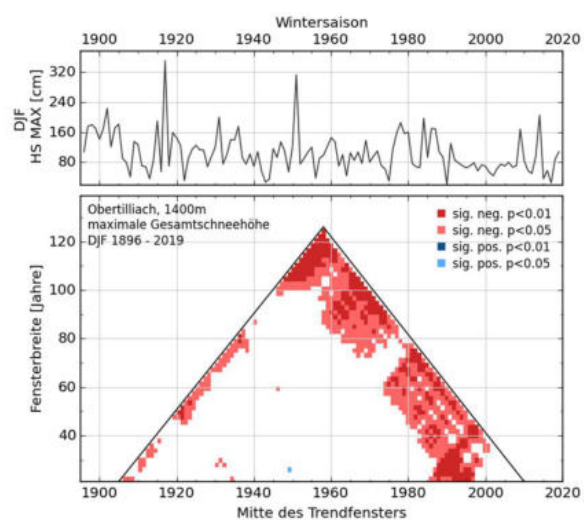
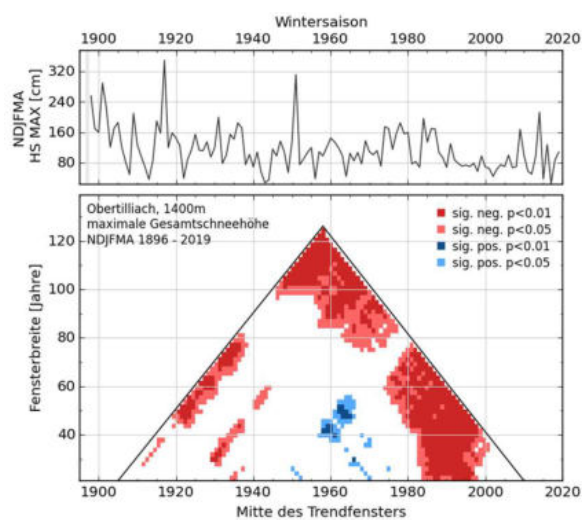
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

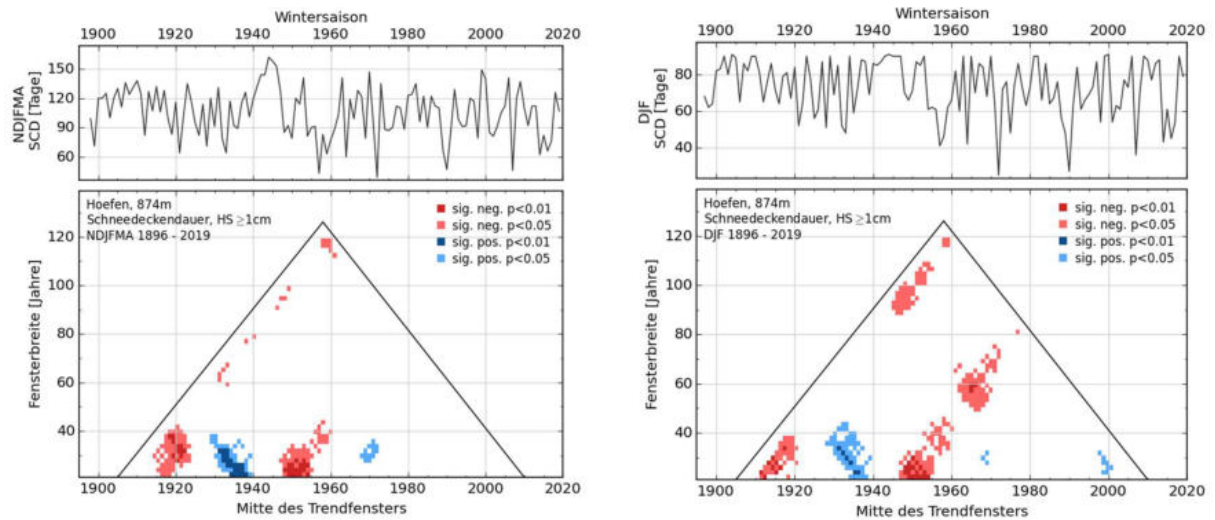


113589, Obertilliach, 1400m

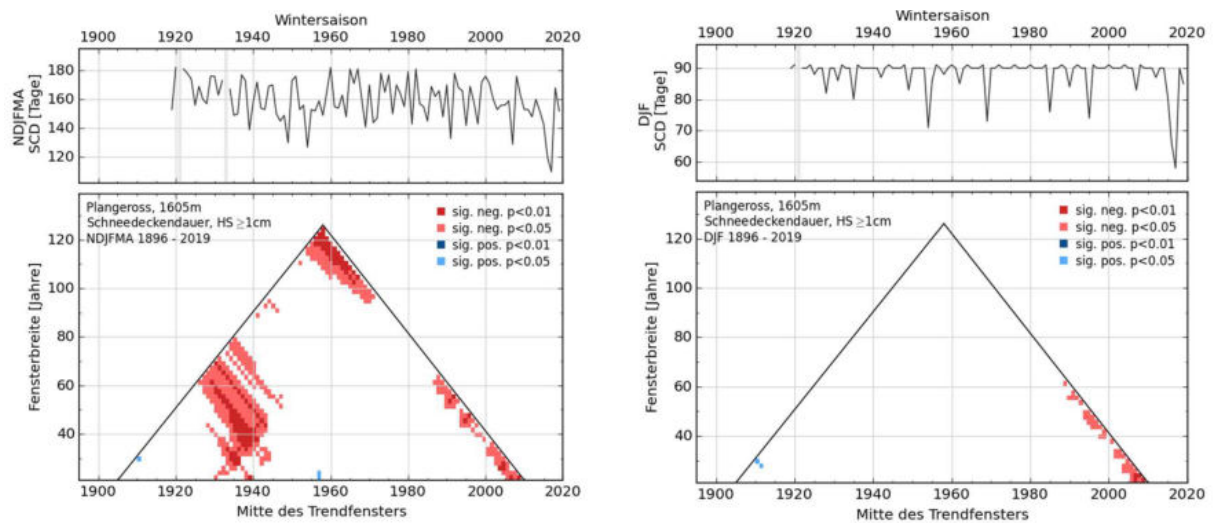


4.7.3 Schneedeckendauer ≥ 1 cm

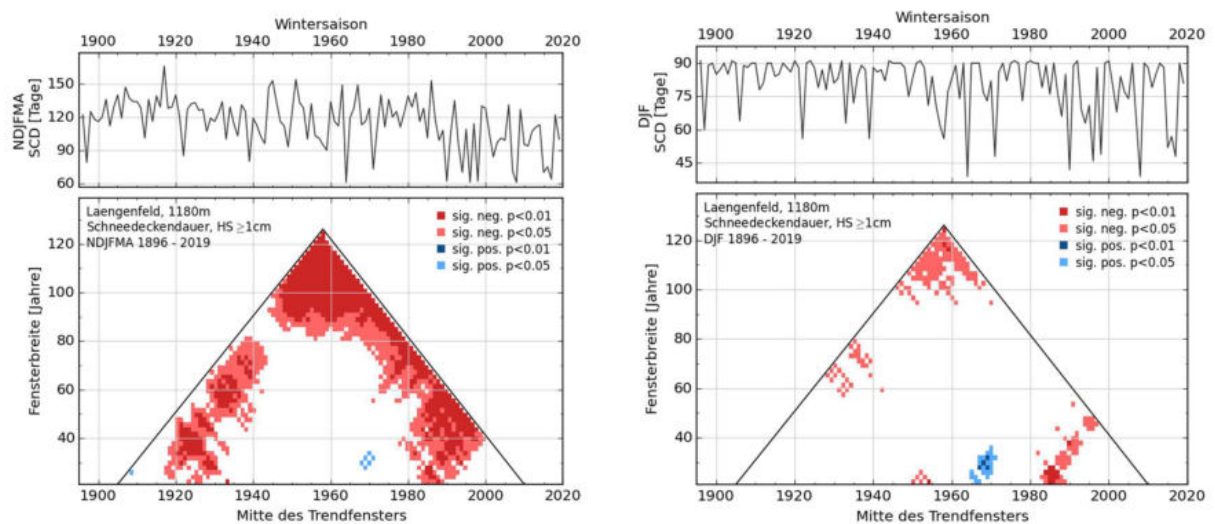
101220, Höfen, 874m



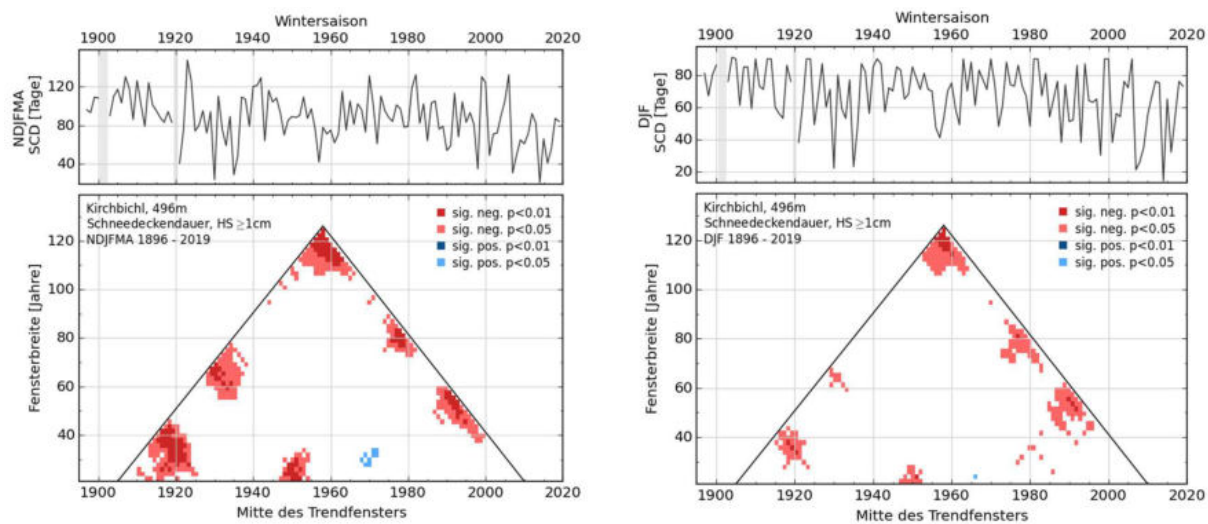
102046, Plangeroß, 1605m



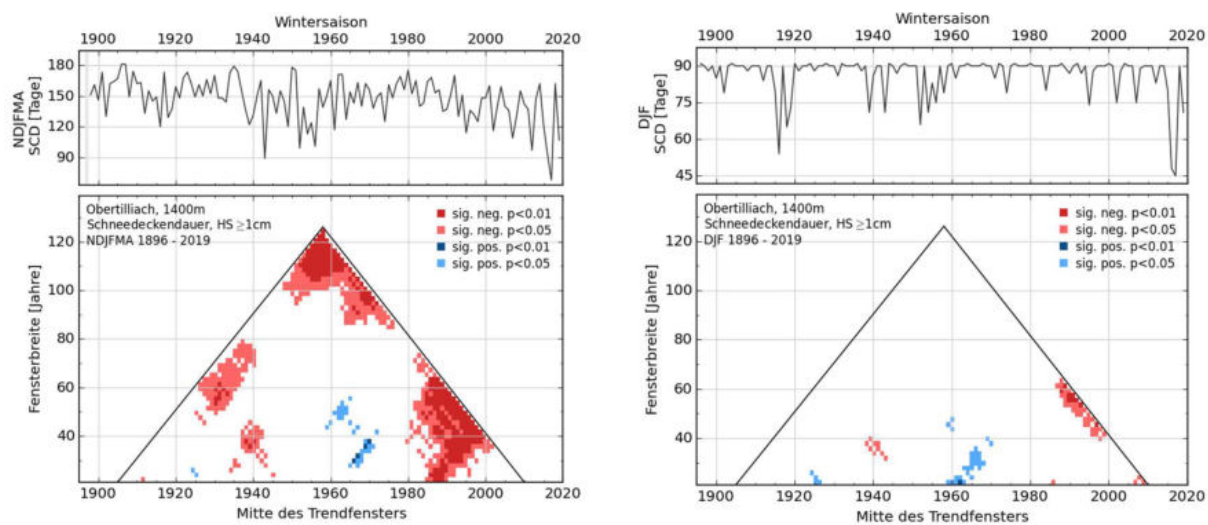
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

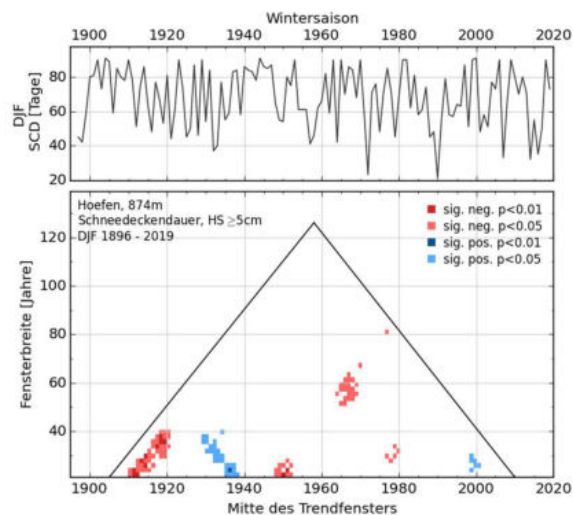
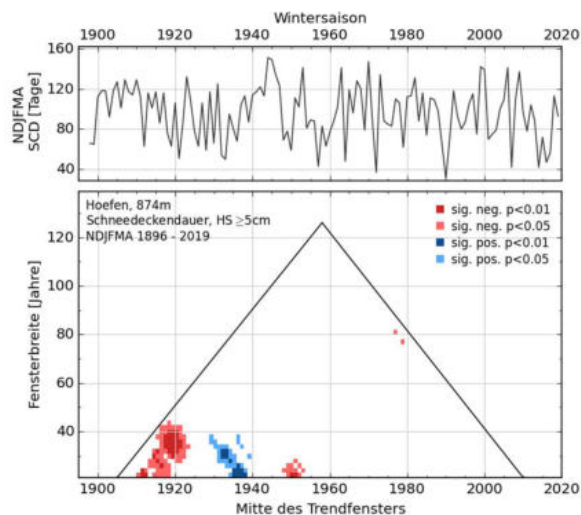


113589, Obertilliach, 1400m

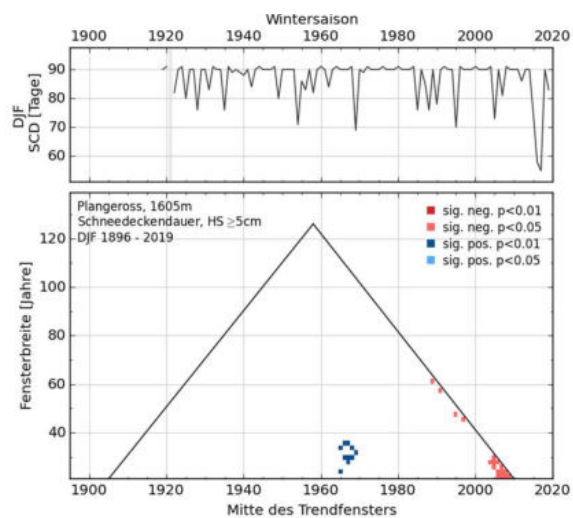
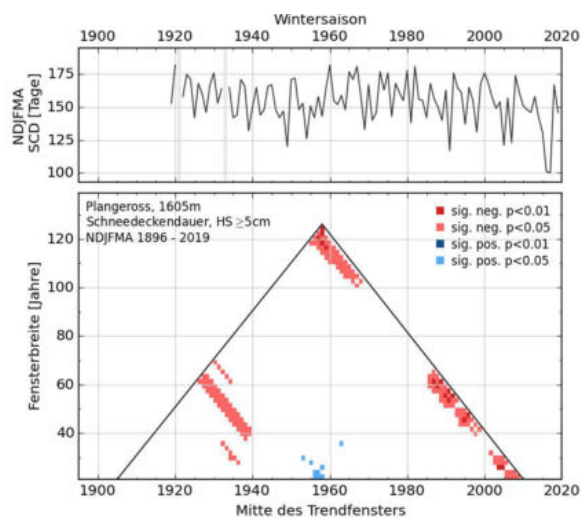


4.7.4 Schneedeckendauer ≥ 5 cm

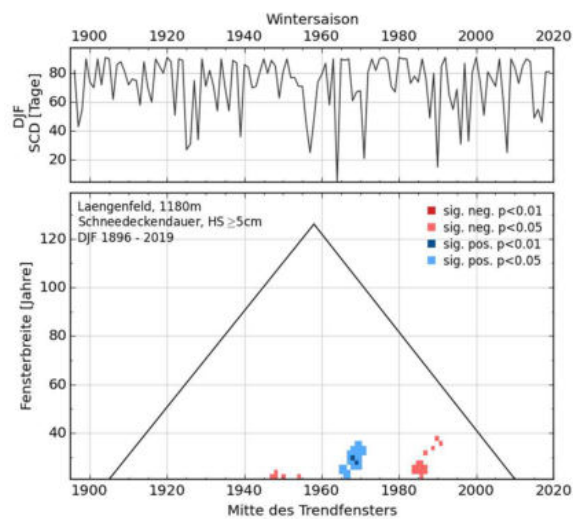
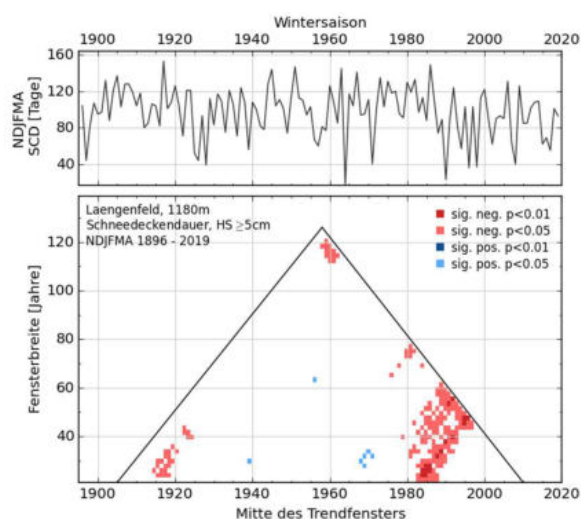
101220, Höfen, 874m



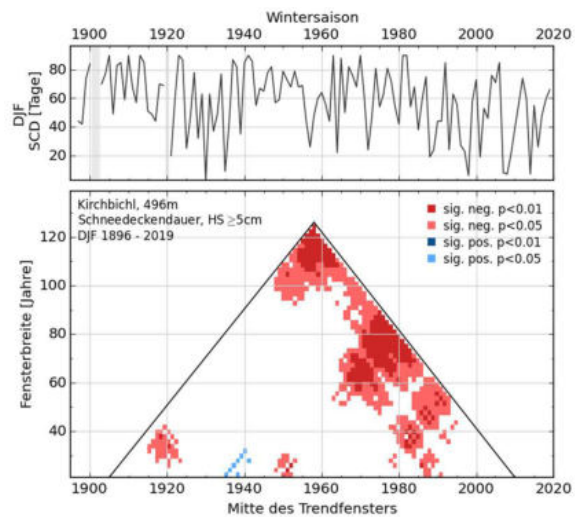
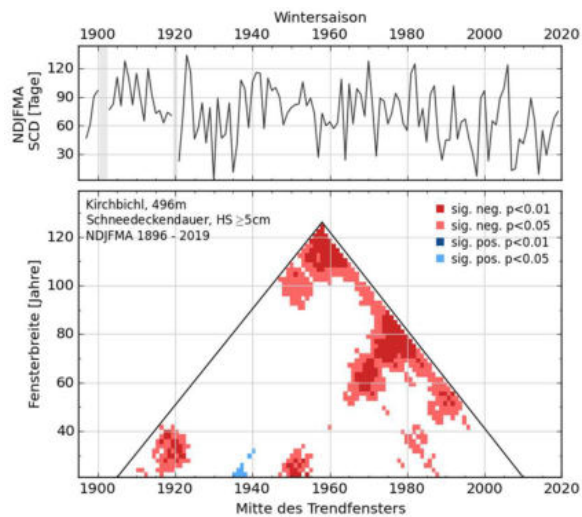
102046, Plangeross, 1605m



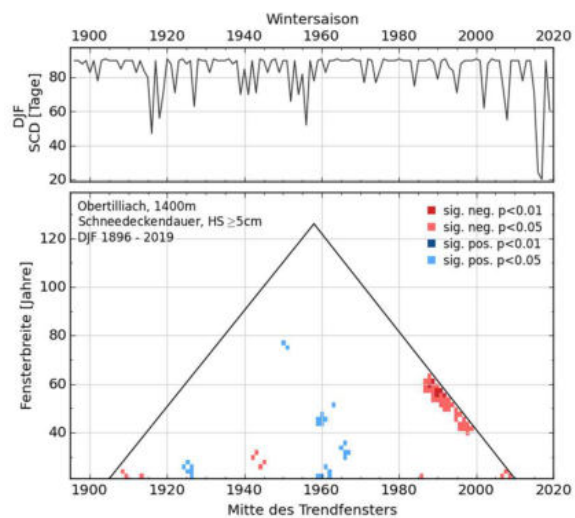
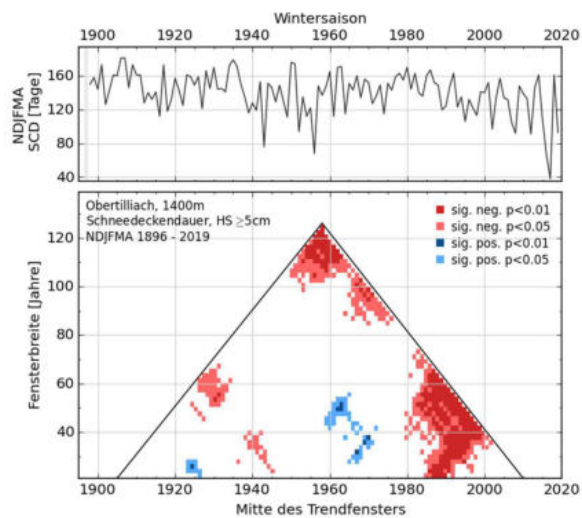
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

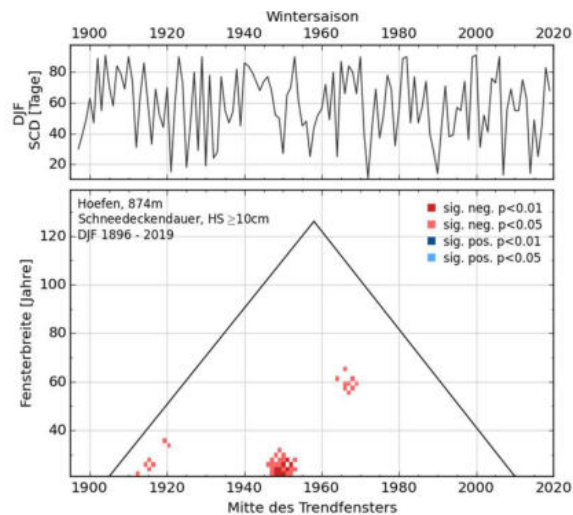
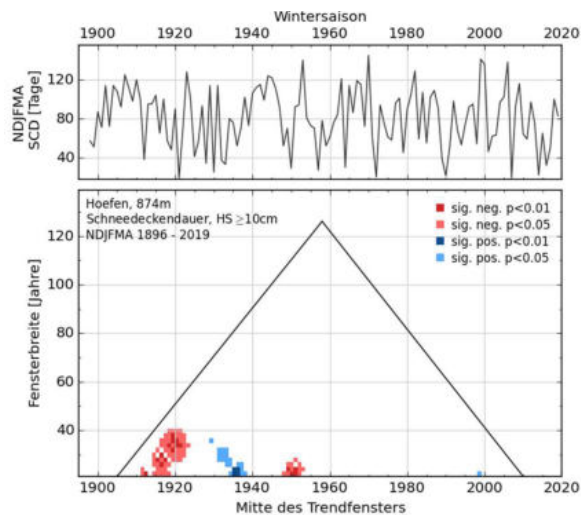


113589, Obertilliach, 1400m

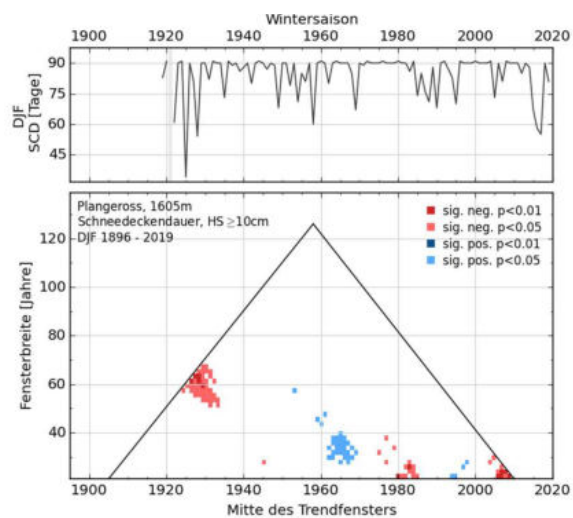
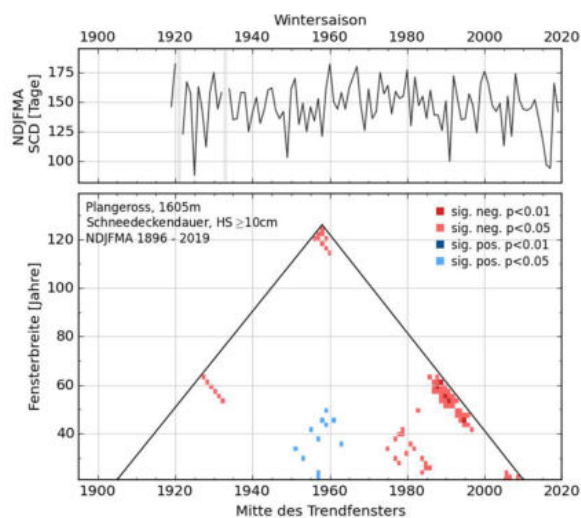


4.7.5 Schneedeckendauer ≥ 10 cm

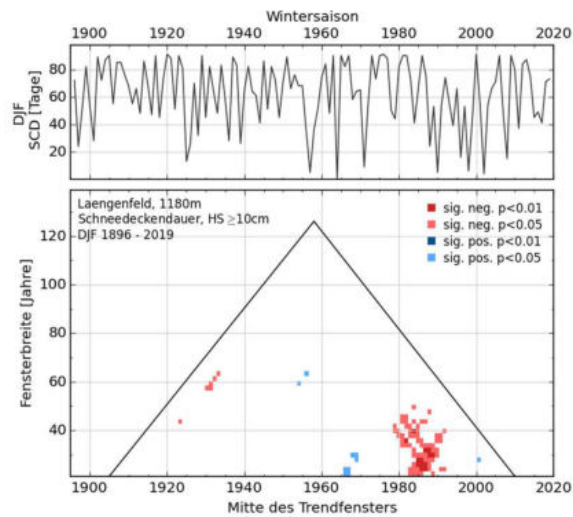
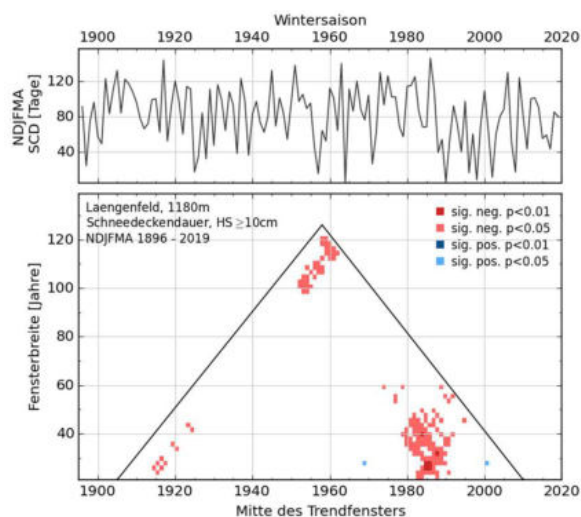
101220, Höfen, 874m



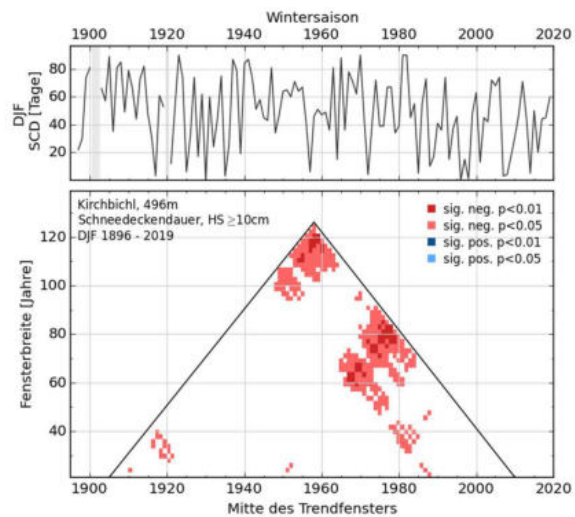
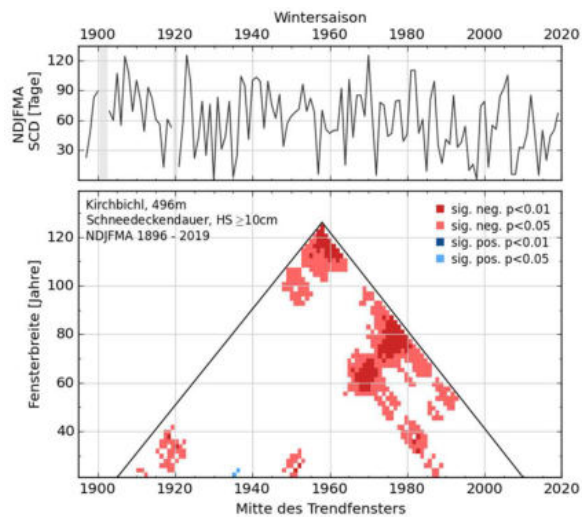
102046, Plangeross, 1605m



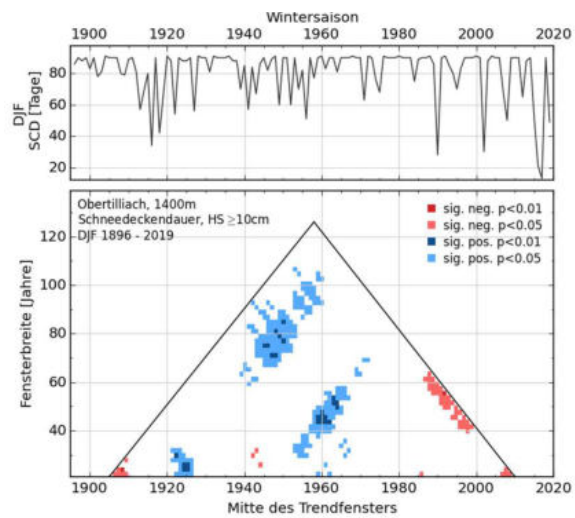
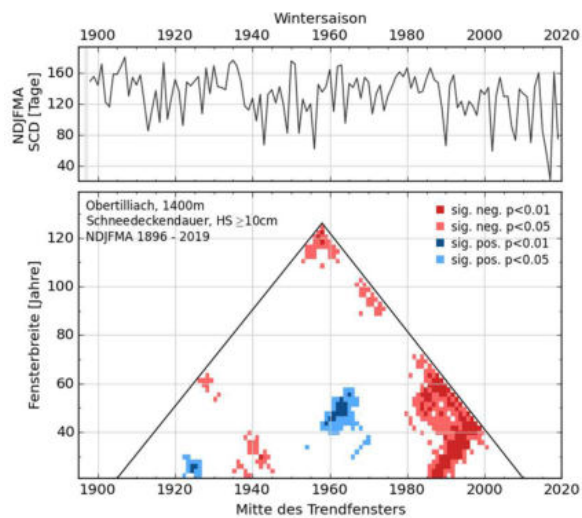
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m

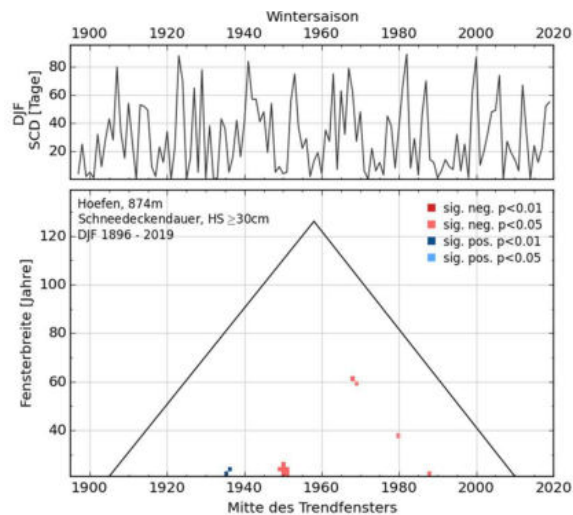
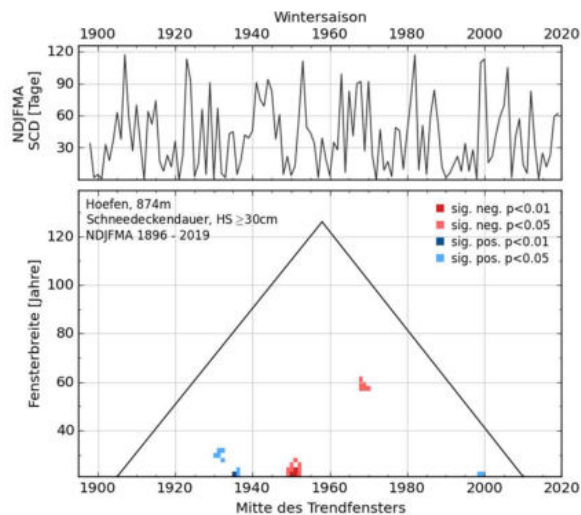


113589, Obertilliach, 1400m

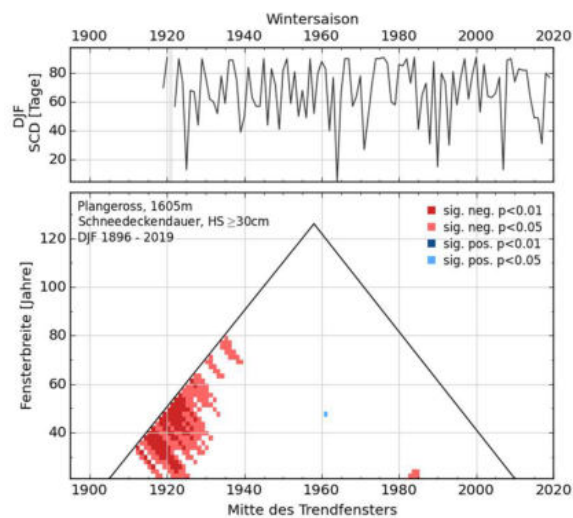
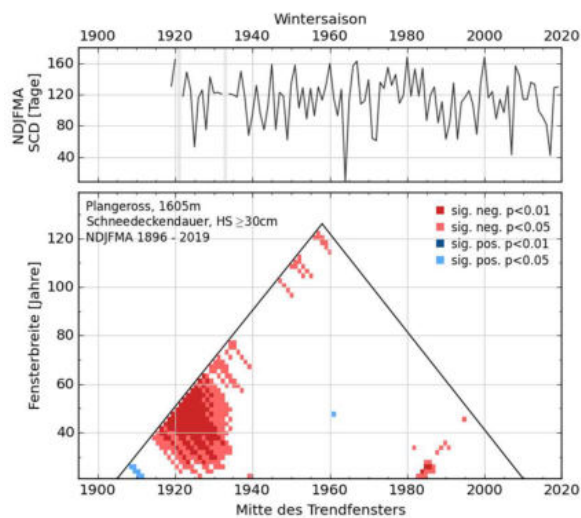


4.7.6 Schneedeckendauer ≥ 30 cm

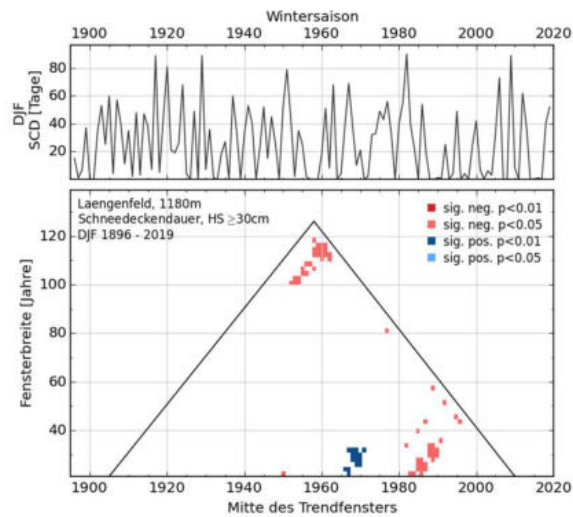
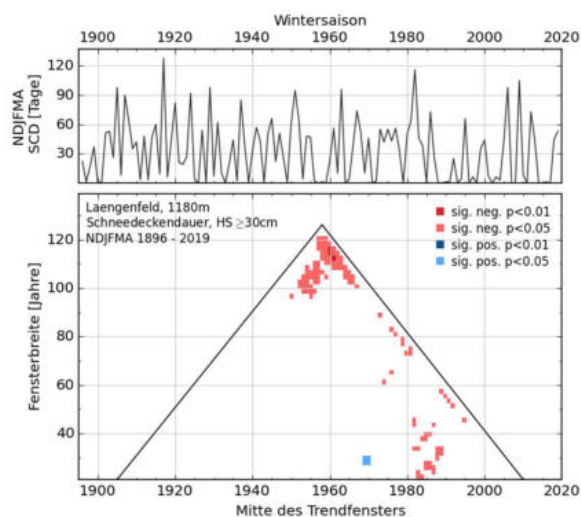
101220, Höfen, 874m



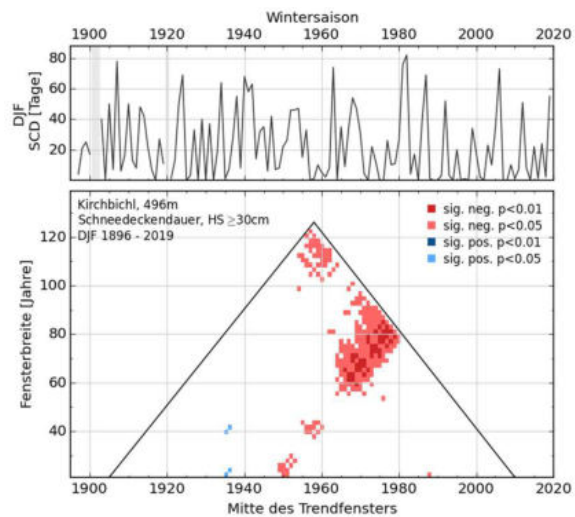
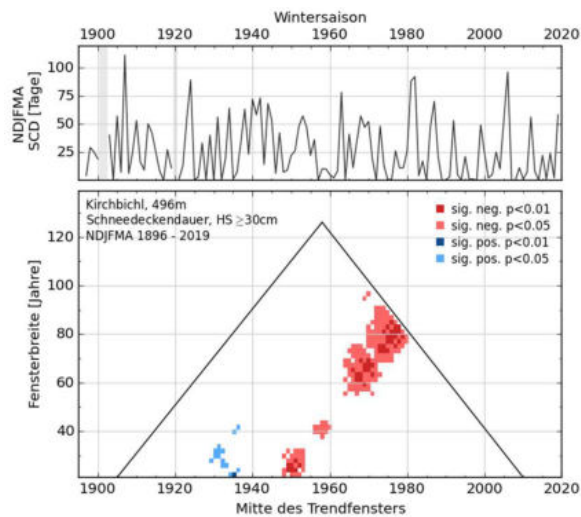
102046, Plangeross, 1605m



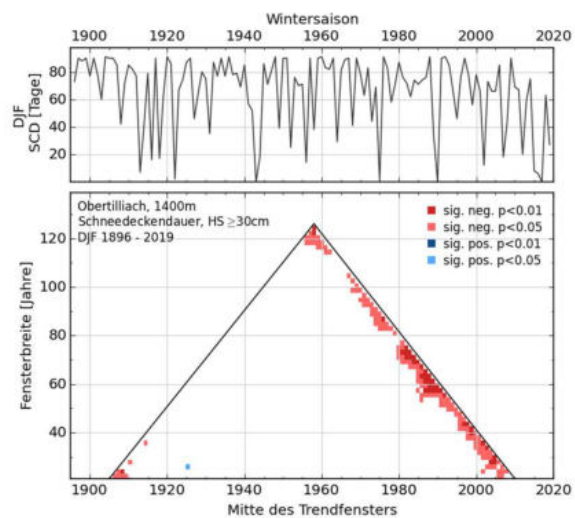
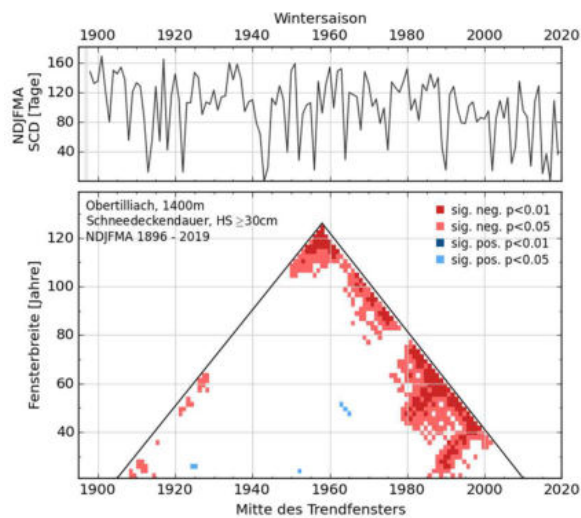
102236, Längenfeld, 1180m



102798, Kirchbichl, 496m



113589, Obertilliach, 1400m



5 ZUSAMMENFASSUNG

Die winterliche Schneedecke weist im Allgemeinen große natürliche Schwankungen auf und reagiert innerhalb unterschiedlicher Höhenlagen und Regionen sensibel auf Klimaänderungen. Die hohe zeitliche (Jahr zu Jahr) und räumliche Variabilität kann den langfristigen Trend überdecken, und Aussagen betreffend Trends erschweren. Auch können innerhalb einer Wintersaison die vorherrschenden Wettersysteme und atmosphärischen Luftdruckverteilungen den Charakter einzelner Wintermonate wesentlich bestimmen. Aufgrund dessen ist die Variabilität (kalt-warm, feucht-trocken) in den Wintermonaten naturgemäß höher als im Sommer. Für den Winter bedeutet dies, dass neben der Temperatur auch die Häufigkeit und Intensität niederschlagsbringender Wetterlagen eine große Rolle im Schneedeckenverlauf spielen. Ein Blick in die jüngere Vergangenheit deutet darauf hin, dass sich ab Mitte/Ende der 1980er Jahre die winterlichen Bedingungen in den Untersuchungsstandorten geändert haben.

Die Lufttemperatur ist in Österreich seit Ende des 19. Jahrhunderts in allen Höhenlagen und Saisons signifikant angestiegen (Im Jahresmittel um $+1.8^{\circ}\text{C}$, im Herbst um $+1.3^{\circ}\text{C}$, im Frühjahr um $+2.1^{\circ}\text{C}$ und im Winter um $+2.3^{\circ}\text{C}$ bzw. 1.7°C (Tiefland bzw. Gipfelregionen)). Seit Mitte der 1980er Jahre sind die Monate März und April deutlich wärmer geworden, in den letzten Jahren auch die Monate November und Dezember, wobei der Einfluss der Lufttemperaturerhöhung mit zunehmender Seehöhe geringer ist. Im Gegensatz dazu ist die Niederschlagssumme innerhalb der einzelnen Wintersaisons von Jahr zu Jahr sehr variabel und weist keinen erkennbaren Trend auf. Viel mehr wechseln sich trockene und feuchte Perioden ab.

Die Trendanalysen der Schneeindikatoren wurden bezüglich der Zeiträume 1951 bis 2019 bzw. 1901 bis 2019 basierend auf gegebener Vollständigkeit der Zeitreihen an 35 bzw. 25 Standorten Tirols durchgeführt.

Im Kernwinter (Dezember bis Februar) sind in mittleren und höheren Lagen nur schwache bis keine Abnahmen der Schneedeckendauer zu verzeichnen, in tiefen Lagen (unterhalb ca. 1000m Seehöhe) sind diese stärker ausgeprägt. In der erweiterten Wintersaison (November bis April) zeigen jedoch deutlich mehr Standorte einen signifikanten negativen Trend im Zeitraum 1951 bis 2019 (1901 bis 2019), der sich mit abnehmender Seehöhe deutlich verstärkt. Grund dafür ist die maßgebliche Einflussgröße der Lufttemperatur in tieferen Lagen. Ab 1951 (1901) zeigen in der erweiterten Wintersaison 15 (19) Standorte eine statistisch signifikante Abnahme der Schneedeckendauer $\text{SCD} \geq 1\text{cm}$, verglichen mit 6 (9) Standorten im Kernwinter. Für die $\text{SCD} \geq 5\text{cm}$ und $\text{SCD} \geq 10\text{cm}$ zeigen nahezu die gleichen Stationszeitreihen eine signifikante Abnahme, die Anzahl nimmt jedoch mit zunehmendem Schwellenwert zu. Für den Schwellenwert 30cm beträgt die Anzahl von Standorten mit signifikant abnehmendem Trend in der erweiterten Wintersaison 12 (13) und im Kernwinter 9 (13). In der erweiterten Wintersaison zeigt die Schneedeckendauer $\text{SCD} \geq 1\text{cm}$ eine durchschnittliche Abnahme von 23% (21%), im Kernwinter ist diese Abnahme mit 14% (9%) deutlich niedriger. Die durchschnittlichen relativen Abnahmen in der Schneedeckendauer nehmen in beiden Untersuchungszeiträumen und saisonalen Bezügen für steigende Schneehöhen zu. Die Schneedeckendauer

SCD $\geq$ 30cm zeigt in der erweiterten Wintersaison eine durchschnittliche Abnahme von 57% (42%) und im Kernwinter eine Abnahme von 51% (39%).

Die mittlere Gesamtschneehöhe hat in beiden Untersuchungszeiträumen 1951 bis 2019 und (1901 bis 2019) in allen Höhenbereichen abgenommen. Die Anzahl an Standorten mit signifikant abnehmendem Trend ist in der erweiterten Wintersaison mit 13 (15) etwas höher als im Kernwinter mit 11 (12) bezogen auf den Zeitraum ab 1951 (1901). Ebenso sind die durchschnittlichen Abnahmen ab 1951 (1901) in der erweiterten Wintersaison mit 56% (40%) geringfügig stärker ausgeprägt als jene im Kernwinter mit 52% (38%).

Für die maximale Gesamtschneehöhe ist im Zeitraum 1951 bis 2019 (1901 bis 2019) die Anzahl an Standorten mit signifikanter Abnahme in der erweiterten Wintersaison mit 15 (9) nur geringfügig höher als jene im Kernwinter mit 13 (8). Sowohl für die erweiterte Wintersaison als auch für den Kernwinter, zeigen diese Standorte eine durchschnittliche Abnahme von 42% (30%).

Die Analysen der Messzeitreihen mittels gleitender Trends für Subzeiträume ab 21 Jahren bestätigen diese Ergebnisse. Unabhängige Berechnungen mit Hilfe des Schneedeckenmodells SNOWGRID–CL zeigen im Zeitraum 1962 bis 2018 für durchschnittlich 88% der Fälle übereinstimmende Änderungssignale mit den gleitenden Trendanalysen der 35 Stationszeitreihen.

6 LITERATUR

APCC (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 Seiten. ISBN 978-3-7001-7699-2.

Auer I., Böhm R., Jurkovic A., Lipa W., Orlik A., Potzmann R., Schöner W., Ungersböck M., Matulla C., Briffa K., Jones P.D., Efthymiadis D., Brunetti M., Nanni T., Maugeri M., Mercalli L., Mestre O., Moisselin J.M., Begert M., Müller-Westermeier G., Kveton V., Bochnicek O., Stastny P., Lapin M., Szalai S., Szentimrey T., Cegnar T., Dolinar M., Gajic-Capka M., Zaninovic K., Majstorovic Z., Nieplova E. (2007): HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760–2003. *International Journal of Climatology* 27, 17–46, doi: 10.1002/joc.1377.

Auer, Ingeborg, U. Foelsche, Reinhard Böhm, Barbara Chimani, Leopold Haimberger, H. Kerschner, K. Koinig, u. a. 2014. „Kapitel 3: Vergangene Klimaänderung in Österreich“. In Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014, herausgegeben von Helga Kromp-Kolb, Nebojsa Nakicenovic, Karl Steininger, Andreas Gobiet, Herbert Formayer, Angela Köppl, Franz Prettenhaler, Johann Stötter, und Jürgen Schneider, 227–300. Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. <https://doi.org/10.1553/aar14s227>.

Böhm, R., 2006. ALP-IMP (EVK-CT-2002-00148) Multi-centennial climate variability in the Alps based on Instrumental data, Model simulations and Proxy data. Short version. (Final report for RTD-project). ZAMG, Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna, Austria.

Böhm, R., 2012. Changes of regional climate variability in central Europe during the past 250 years. *The European Physical Journal Plus* 127. doi:10.1140/epjp/i2012-12054-6.

Caussinus, H. and Mestre, O. (2004): Detection and correction of artificial shifts in climate series. *Applied Statistics*, 53, 405–425.

Gobiet, A., K. Ulreich, M. Hofstätter, A. Podesser, M. Olefs, J. Vergeiner, and G. Zenkl, 2017: Langfristige Entwicklung Hochalpiner Wintertemperaturen. ZAMG-Newsletter (https://www.zamg.ac.at/cms/de/dokumente/klima/dok_news/2017/gobiet_et_al-2017-hochalpinewintertemperaturen/at_download/file).

Gruber C, Auer I, Böhm R. (2009): Endbericht HOM-OP Austria, Aufbau und Installierung eines Tools zur operationellen Homogenisierung von Klimadaten mit Annexen: Gruber C, Auer I. 2009. Description of a procedure for the homogenization of daily temperature time series, Annex zu Endbericht HOM-OP-Austria; Gruber C, Auer I. 2009. Working instructions for HOMOP-A Procedure for the Homogenization of Daily Temperature Time Series. Annex 2 zu Endbericht HOM-OP Austria; Gruber C, Auer I. 2009. Working instructions for HOMOP – A Procedure for Homogenization of Daily Temperature Time Series: Extensions, Annex3 zu Endbericht HOM-OP Austria

Haiden, T., Kann, A., Wittmann, C., Pistotnik, G., Bica, B. and Gruber, C. (2011): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region, *Weather Forecast.*, 26(2), 166–183, doi:10.1175/2010WAF2222451.1, 2011.

Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M., Zhai, P.M., 2013. Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA.

Haslinger K. and Bartsch A. (2016): Creating long-term gridded fields of reference evapotranspiration in Alpine terrain based on a recalibrated Hargreaves Method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 1-13, doi:10.5194/hess-20-1-2016.

Haslinger, Klaus, Franz Holawe, and Günter Blöschl. 2018. “Spatial Characteristics of Precipitation Shortfalls in the Greater Alpine Region—a Data-Based Analysis from Observations.” *Theoretical and Applied Climatology*, May. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2506-5>.

Hiebl J. and Frei C. (2016): Daily temperature grids for Austria since 1961 – concept, creation and applicability. *Theoretical and Applied Climatology* 124, 161–178, doi:10.1007/s00704-015-1411-4

Hiebl J. and Frei C. (2017): Daily precipitation grids for Austria since 1961 – development and evaluation of a spatial dataset for hydro-climatic monitoring and modelling. *Theoretical and Applied Climatology*, doi:10.1007/s00704-017-2093-x.

Hurrell, J. W. 1995. “Decadal Trends in the North Atlantic Oscillation: Regional Temperatures and Precipitation.” *Science* 269 (5224): 676–79. <https://doi.org/10.1126/science.269.5224.676>.

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, 2019: *Climate Change and Land. An IPCC Special report on climate change, desertification, land, degradation, sustainable land management, food security and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems: Summary for Policymakers (Approved draft)*, [Arnell et al.]. IPCC, Geneva, Switzerland, 43 pp.

Kendall, M.G. (1975): *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin, London.

Kuhn, M., and M. Olefs. 2019. “Elevation Dependent Climate Change in the European Alps: A Short Summary as of 2019.” *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science* (in review), September.

Lebarbier, E. (2005): Detecting multiple change-points in the mean of gaussian process by model selection. *Signal Process.* 85 (4), 717-736.

Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Wallis, J.R. (1994): Hydro-Climatological Trends in the Continental United States, 1948-88. *Journal of Climate*, Vol. 7, S. 586–607.

Manara, V., Brunetti, M., Celozzi, A., Maugeri, M., Sanchez-Lorenzo, A., and Wild, M.: Detection of dimming/brightening in Italy from homogenized all-sky and clear-sky surface solar radiation records and underlying causes (1959–2013), *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 11145-11161, doi:10.5194/acp-16-11145-2016, 2016.

Mann, H.B. (1945): Non-parametric test against trend. *Econometrica*, Vol. 13, S. 245–259.

Marcolini, G., Koch, R., Chimani, B., Schöner, W., Bellin, A., Disse, M., Chiogna, G., (2019): Evaluation of homogenization methods for seasonal snow depth data in the Austrian Alps, 1930-2010. *International Journal of Climatology*, <https://doi.org/10.1002/joc.6095>.

Marty, C. (2008): Regime shift of snow days in Switzerland, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12501, doi:10.1029/2008GL033998.

Mestre, O., Gruber, C., Prieur, C., Caussinus, H., and S Jourdain, (2011): SPLIDHOM: A Method for Homogenization of Daily Temperature Observations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 2343-2358.

Mudelsee, M. (2000): Ramp function regression: a tool for quantifying climate transitions. *Computers and Geosciences*, 26.293-307.

Nalder, I.A., Wein, R.W., (1998): Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agric. Forest Meteorol.* 92, 211–225.

Olefs, M., Schöner, W., Suklitsch, M., Wittmann, C., Niedermoser, B., Neururer, A. and Wurzer, A. (2013): SNOWGRID – A New Operational Snow Cover Model in Austria, in *Proceedings of the international snow science workshop Grenoble Chamonix Mont Blanc, Grenoble.*, 2013.

Olefs, M., Koch, R., Gobiet, A., 2019, Klima und Schnee in Österreich – Beobachtete Vergangenheit und erwartete Zukunft, *Fachzeitschrift FdSnow*, Heft 53, ISSN 1864-5593 53.

Pellicciotti, F., Brock, B., Strasser, U., Burlando, P., Funk, M. and Corripio, J. (2005): An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Switzerland, *J. Glaciol.*, 51(175), 573–587, doi:10.3189/172756505781829124, 2005.

Saffioti, Claudio, Erich M. Fischer, Simon C. Scherrer, and Reto Knutti. 2016. "Reconciling Observed and Modeled Temperature and Precipitation Trends over Europe by Adjusting for Circulation Variability: CIRCULATION AFFECTING TRENDS OVER EUROPE." *Geophysical Research Letters* 43 (15): 8189–98. <https://doi.org/10.1002/2016GL069802>.

Scherrer, Simon C., and Michael Begert. 2019. "Effects of Large-Scale Atmospheric Flow and Sunshine Duration on the Evolution of Minimum and Maximum Temperature in Switzerland." *Theoretical and Applied Climatology*, March. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02823-x>.

Schöner, W., Koch, R., Matulla, C., Marty, C., Tilg, A-M., (2018): Spatiotemporal patterns of snow depth within the Swiss-Austrian Alps for the past half century (1961 to 2012) and linkages to climate change. *International Journal of Climatology*, <https://doi.org/10.1002/joc.5902>.

Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Benard, P., Bouttier, F., Lac, C., Masson, V., (2010): The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 976-991.

Sen, P.K. (1968): Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 63 (324), S. 1379–1389.

Venema V, Ament F, Simmer C. 2006c. A Stochastic Iterative Amplitude Adjusted Fourier Transform Algorithm with improved accuracy, *Nonlinear Proc. Geophys.* 13: 247-363.

Vincent LA, Zhang X, Bonsal BR, Hogg WD. 2002. Homogenization of Daily Temperature over Canada, *Journal of Climate* 15: 1322-1334.

Wang, Y., Haiden, T. and Kann, A. (2006): The Operational Limited Area Modelling System at ZAMG: ALADIN-AUSTRIA, *Österr. Beitr. Zu Meteorol. Geophys.*, 37 [online] Available from: <https://books.google.at/books?id=VKzXtwAACAAJ>, 2006.

Wild, M.: Global dimming and brightening: A review, *J. Geophys. Res.*, 114, D00D16, doi:10.1029/2008JD011470, 2009.

ZAMG HISTALP Jahres-Newsletter 2018, http://www.zamg.ac.at/histalp/download/newsletter/HISTALP_AT_Jahresnewsletter_2018.pdf