

# **Entwicklung eines Trockenheitsbulletins für Graubünden**

**1. Stufe: Darstellung von Trockenheitsmanifestationen bei Grundwasser, Abfluss und Bodenfeuchte  
Konzept zur Ermittlung von Trockenheitsindikatoren (Warn- und Alarmstufen) für Phase 2**

Dr. Jürg Thudium  
Dr. Carine Chélala

26.03.2024 / 5484.40

Oekoscience AG

Postfach 452  
CH - 7001 Chur

Telefon: +4181 250 3310  
Thudium@oekoscience.ch



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Datenlage</b>	<b>2</b>
<b>3. Niederschlag (RR) von langjährigen Messstationen in Graubünden und Umgebung</b>	<b>4</b>
<b>4. Grundwasserspiegel</b>	<b>9</b>
4.1. Darstellung und Analyse der Messdaten	9
4.2. Auftreten von Trockenphasen	13
4.3. Messtechnischer Klärungsbedarf	16
<b>5. Abflüsse</b>	<b>17</b>
5.1. Darstellung und Analyse der Messdaten	17
5.2. Auftreten von Trockenphasen	21
5.3. Zusammenhang zwischen Grundwasserspiegel und Abfluss	23
<b>6. Modellierung der Bodenfeuchte: Soil Moisture Index (SMI)</b>	<b>25</b>
<b>7. Bodenfeuchte</b>	<b>31</b>
7.1. Darstellung und Analyse der Messdaten	31
7.2. Messtechnischer Klärungsbedarf	35
<b>8. Einfluss von Schnee</b>	<b>37</b>
<b>9. Konzept für ein Trockenheitsbulletin</b>	<b>38</b>
<b>10. Zusammenfassung</b>	<b>40</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Geographische Unterteilung des Kantons Graubünden in Regionen im Zusammenhang mit Messungen zu Trockenheit (Hintergrund Kartenquelle: geo.gr.ch, 2024).	2
Abbildung 3.1: 5-Jahr-gleitendes Mittel der Niederschlags-Jahressumme (RR), Graubünden und Umgebung, 1864-2023.	5
Abbildung 3.2: RR während der Vegetationsperiode März-August, relativ (%) zum entsprechenden Mittel 1924-2023. Mittel über die relativen Werte von Davos, Samedan, Sargans und Segl-Maria, 1900-2023.	5
Abbildung 3.3: 6-Monatssumme des Niederschlags während der Vegetationsperiode (März – August), Graubünden und Umgebung, 1991-2023, relativ (%) zum Mittel 1924-2023.	6
Abbildung 3.4: Jahressumme des Niederschlags, Graubünden und Umgebung, 1991-2022, relativ (%) zum Mittel 1924-2022.	6
Abbildung 3.5: Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Evapotranspiration (Minimalwert je Vegetationsperiode) für verschiedene Standorte in Graubünden und für Sion, 1984-2022. <i>Grafik zur Verfügung gestellt von Sabine Braun, Institut für angewandte Pflanzenbiologie.</i>	8
Abbildung 4.1: Jahresgang des Grundwasserspiegels (Mittelwerte je Monat und Streubereich) je Region, 2010-2023. Skalenspannweite 4 m, für Domleschg 6 m.	9
Abbildung 4.2: Abweichungen von der Norm: Grundwasser (GW; Monatswerte), RR (4-Monatssummen) und T (3-Monatsmittel) je Region, 2010-2023. Norm: Mittel je Monat 2010-2023.	12
Abbildung 4.3: Anzahl Monate mit Grundwasserspiegel (GW) < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Jahr über alle Regionen, 2010-2023. Perzentilbestimmung je Kalendermonat.	14
Abbildung 4.4: Anzahl Monate mit Grundwasserspiegel (GW) < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Kalendermonat über alle Jahre und Regionen, 2010-2023.	16
Abbildung 5.1: Jahresgang der Abflussmenge (Mittelwerte je Monat und Streubereich) je Region, 2006-2023.	17

Abbildung 5.2: Abweichungen von der Norm: Abflussmenge (Monatswerte), RR (3-Monatssummen) und T (3-Monatsmittel) je Region, 2006-2023. Norm: Mittel je Monat 2010-2023. 2006-2023.	20
Abbildung 5.3: Anzahl Monate mit Abflussmenge < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Jahr über alle Regionen, 2006-2023. Perzentilbestimmung je Kalendermonat.	22
Abbildung 5.4: Anzahl Monate mit Abflussmenge < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Kalendermonat über alle Jahre und Regionen, 2006-2023.	23
Abbildung 5.5: Abweichungen von der Norm: $\Delta$ Abfluss und $\Delta$ Grundwasserspiegel (Monatswerte) für Misox (oben) und Unterengadin (unten), 2010-2023. Norm: Mittel je Monat 2010-2023.	24
Abbildung 6.1: Anzahl Trockenmonate (Mittlerer SMI < 4.08 %; 10%-Perzentil über alle Stationen = ca. 10% der Feldkapazität) je Jahr und Region, 1991-2023. Rot: Mittel über alle Regionen.	27
Abbildung 6.2: Anzahl trockene Kalendermonate (mit mittlerem SMI < 4.08 %; 10%-Perzentil über alle Stationen = ca. 10% der Feldkapazität) je Region über die 33 Jahre von 1991-2023.	28
Abbildung 6.3: "Akkumulierte Trockenheit" je Jahr und Region auf Basis des SMI: Summe der Differenz {SMI-4.08%} über alle Tage, wenn SMI < 4.08%. (4.08 %: 10%-Perzentil des SMI über alle Stationen = ca. 10% der Feldkapazität). Rot: Mittel über alle Regionen. Angaben in Prozentpunkten.	29
Abbildung 6.4: "Akkumulierte Trockenheit" je Kalendermonat und Region auf Basis des SMI: Summe der Differenz {SMI-4.08%} über alle Tage, wenn SMI < 4.08%. (4.08 %: 10%-Perzentil des SMI über alle Stationen = ca. 10% der Feldkapazität). Angaben in Prozentpunkten.	30
Abbildung 7.1: Soil Water Tension (SWT), Volume Water Content (VWC) bzw. Differenz (Max-MW VWC) & Soil Moisture Index (SMI) bzw. Differenz (Max-MW SMI), für die 9 Regionen, 01.06.-30.11.2023.	34
Abbildung 7.2: Maximale Saugspannung SWT-20 bzw. SWT-35 an den neun Standorten, 01.06. – 30.11.2023.	36
Abbildung 9.1: Simulation von Warn- und Alarmschwellen für Bodenfeuchte, Landquart und Samedan, 01.06. – 31.08.2023. Phase gelb: SWT>60 cbar; Phase orange: SWT>300 cbar; Phase rot: SWT>500 cbar.	39

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Liste der von einem Trockenheitsbulletin einbezogenen Messungen je Region.	3
Tabelle 3.1: Niederschlag bei langjährigen Messstationen in Graubünden und Umgebung, 1924-2023.	4
Tabelle 4.1: Standardabweichung der Tageswerte des Grundwasserspiegels (Std. Abw.) und mittlere saisonale Spannweite (Differenz des maximalen und minimalen Monatsmittels) je Region, 2010-2023.	13
Tabelle 4.2: Anzahl Monate mit Grundwasserspiegel (GW) < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Jahr und Region, 2010-2023. Perzentilbestimmung je Kalendermonat.	14
Tabelle 4.3: Anzahl Monate mit Grundwasserspiegel (GW) < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Kalendermonat über alle Jahre je Region, 2010-2023. Perzentilbestimmung je Kalendermonat. Jeder Standort weist 17 Monate mit Tiefstand aus (Unterengadin 12 wegen späterem Messbeginn. Prättigau fehlt infolge zu kurzer Zeitreihe.	15
Tabelle 5.1: Anzahl Monate mit Abflussmenge < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Jahr und Region, 2006-2023.	21
Tabelle 5.2: Anzahl Monate mit Abflussmenge < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Kalendermonat über alle Jahre je Region, 2006-2023.	22
Tabelle 5.3: Bestimmtheitsmass $r^2$ zwischen Grundwasserspiegel und Abfluss (jeweils Abweichung von der Norm) je Region, 2010-2023.	24

# 1. Einleitung

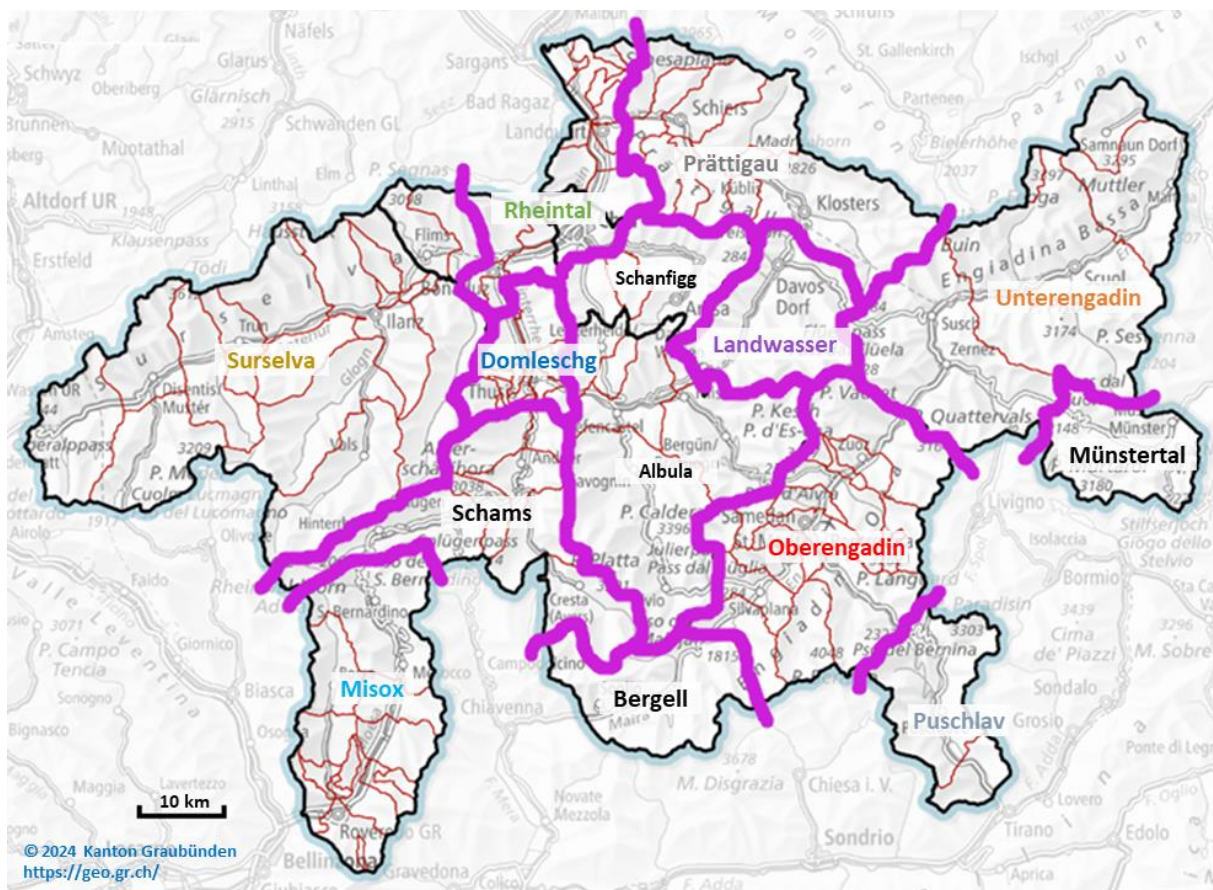
Der Kanton Graubünden möchte ein Trockenheitsbulletin herausgeben, in welchem für jede Region das Ausmass einer allfälligen Trockenheit für Landwirtschaft, Forst und Wasserversorgung übersichtlich entnommen werden kann. Dabei geht es im Kern um Bodenfeuchte, bei der Wasserversorgung auch um Abfluss und Grundwasser.

Der vorliegende Bericht umfasst die erste Phase der Entwicklung eines Trockenheitsbulletins. Die bestehende Messdatenlage im Kanton Graubünden bzgl. Bodenfeuchte (Saugspannung und Volumenwassergehalt in zwei Bodentiefen), Abfluss und Grundwasser wird dargestellt und analysiert. In Ergänzung dazu wird ein Modellwert der Bodenfeuchte von MeteoSchweiz (Soil Moisture Index) über 30 Jahre zurückverfolgt.

Ansätze für Warn- und Alarmwerte für Trockenheit werden diskutiert. Sie sind in einer zweiten Projektphase mit Einbezug entsprechender Fachpersonen zu konkretisieren.

## 2. Datenlage

Die im Kanton Graubünden gemessenen Parameter im Zusammenhang mit Trockenheit werden in Regionen zusammengefasst. Die folgende Karte gibt einen Überblick. In den Regionen Albula und Schanfigg gibt es noch gar keine Messungen. Auf Grund der geographischen Lage wird vorgeschlagen, die Gemeinden Flims und Trin meteorologisch der Surselva zuzuschlagen.



**Abbildung 2.1: Geographische Unterteilung des Kantons Graubünden in Regionen im Zusammenhang mit Messungen zu Trockenheit (Hintergrund Kartenquelle: geo.gr.ch, 2024).**

Die Tabelle 2.1 gibt Aufschluss über die im Kanton Graubünden gemessenen Parameter im Zusammenhang mit Trockenheit. Die Parameter werden von verschiedenen Instanzen erhoben. Die Bodenfeuchtemessungen des Kantons haben zu einem grossen Teil im 2023 begonnen.

**Tabelle 2.1: Liste der von einem Trockenheitsbulletin einbezogenen Messungen je Region.**

Kürzel	Messinhalt	Temperatur (T) und Niederschlag (RR)	Abfluss	Grundwasserspiegel	Bodenfeuchteindex aus Meteodaten	Bodenfeuchtemessnetz
	<b>Instanz</b>	MeteoSchweiz, ANU GR für T Domleschg	BAFU	Kanton GR	MeteoSchweiz	Kanton GR
	<b>Beginn</b>	1990	2006	2010 *2013 **2020	1991	*2010 **2011 ***2023
	<b>Region:</b>					
SUR	Surselva	Disentis	Vorderrhein (Ilanz)	Schnaus	Disentis	Disentis***
DOM	Domleschg	Rothenbrunnen T Thusis RR	Hinterrhein (Fürstentau)	Cazis		Cazis*
RHE	Rheintal	Chur	Rhein (Domat/Ems)	Chur	Chur	Landquart*
PRÄ	Prättigau	Schiers	Landquart (Felsenbach)	Schiers**		
LWA	Landwasser	Davos	Landwasser (Davos)	Davos	Davos	
OEG	Oberengadin	Samedan	Inn (St. Moritz)	Samedan	Samedan	Samedan**
UEG	Unterengadin	Scuol	Inn (Tarasp)	Zernez*	Scuol	
POS	Puschlav	Poschiavo/Robbia	Poschiavino (La Rösa)	Poschiavo	Poschiavo/Robbia	Poschiavo***
MES	Misox	S. Bernardino	Moesa (Lumino)	Dosseda	S. Bernardino (& Magadino)	Grono*** (San Vittore* bis 2022)
SCH	Schams					Andeer***
BER	Bergell					Vicosoprano***
MÜN	Münstertal					Sta. Maria***

### 3. Niederschlag (RR) von langjährigen Messstationen in Graubünden und Umgebung

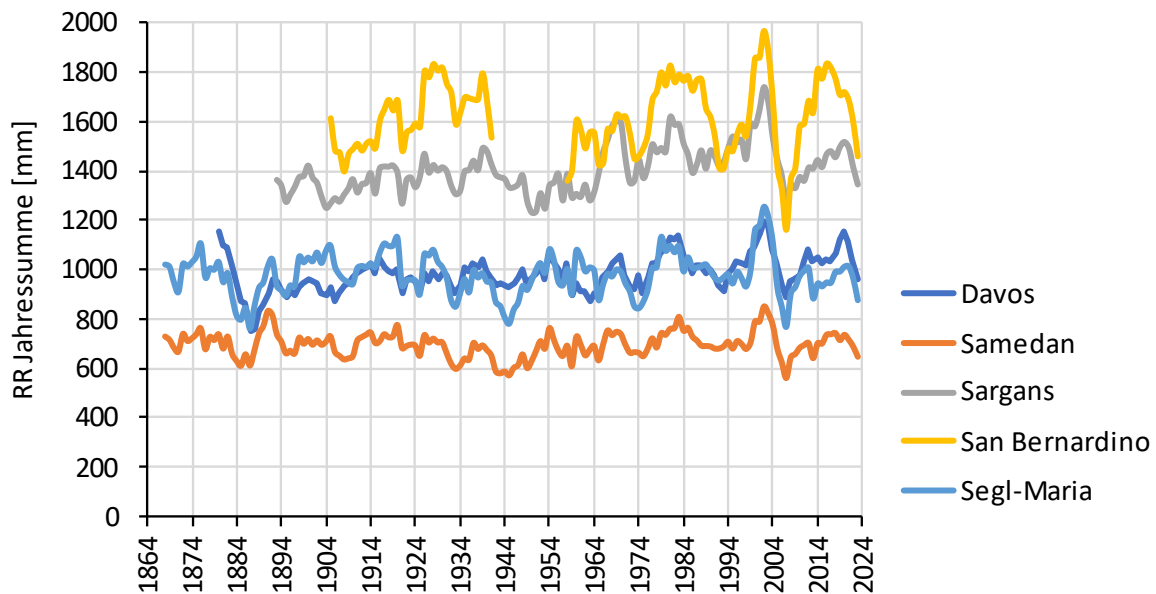
Es gibt in Graubünden und naher Umgebung fünf langjährige Messstationen für Niederschlag (RR), deren Messwerte von MeteoSchweiz homogenisiert (unter sich vergleichbar gemacht) wurden.

Es gibt beträchtliche Unterschiede in den mittleren Jahressummen des RR, auch innerhalb des Kantons. Im Mittel über die letzten 100 Jahre variieren sie von 690 bis 1633 mm. Das gleiche gilt für die Vegetationsperiode (VegP) von März bis August: Hier variieren die jährlichen RR-Summen von 409 bis 923 mm. Aber an allen 5 Standorten macht der RR während der Vegetationsperiode 56-59% des Jahresniederschlags aus. Trendberechnungen über die letzten 100 oder 30 Jahre führen zu nicht signifikanten Ergebnissen, auch wenn die Trends für jeden Kalendermonat einzeln bestimmt wurden zur Vermeidung von Autokorrelation. Hingegen konnte die mittlere Jahressumme bzw. RR-Summe während der Vegetationsperiode für 1991-2023 ins Verhältnis gesetzt werden zu den entsprechenden Werten für 1924-2023; so kann erkannt werden, ob sich das Niederschlagsgeschehen in den letzten 30 Jahren verändert hat im Vergleich zum letzten Jahrhundert.

**Tabelle 3.1: Niederschlag bei langjährigen Messstationen in Graubünden und Umgebung, 1924-2023.**

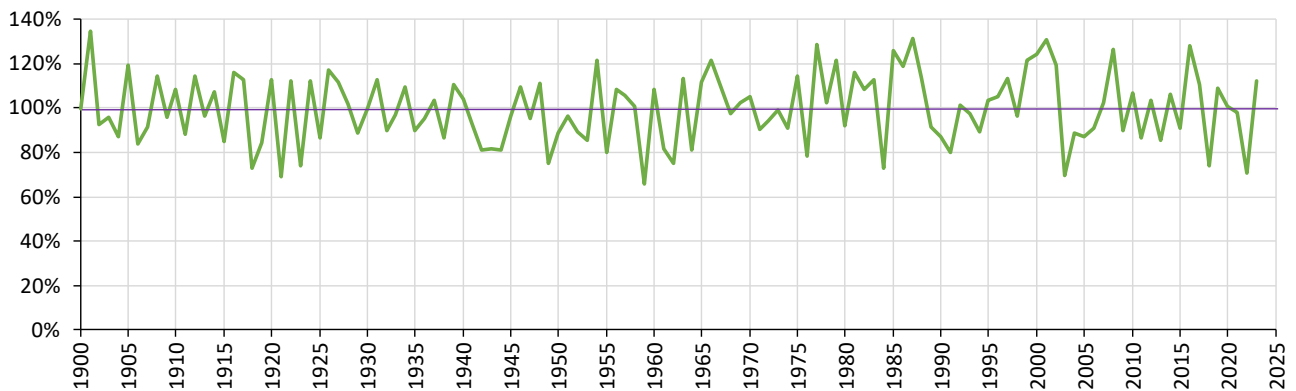
	Davos	Samedan	Sargans	San Bernardino	Segl-Maria
<b>1924-2023:</b>					
Mittlere Jahressumme	1002	690	1424	1633	977
Mittlere Summe Vegetationsperiode (VegP)	592	409	793	923	556
Anteil VegP an Jahressumme	59%	59%	56%	57%	57%
<b>1991-2023 im Verhältnis zu 1924-2023:</b>					
Mittlere Jahressumme	104%	103%	103%	100%	101%
Mittlere Summe VegP	102%	99%	104%	97%	98%

Die mittlere Jahressumme des RR war in den letzten 30 Jahren minim höher als im Mittel der letzten 100 Jahre (+2%), wohingegen der RR der Vegetationsperiode im Mittel genau gleichgeblieben ist und sich pro Standort in einer Bandbreite von 97-104% bewegt hat. Es ist also nicht so, dass es während der Vegetationsperiode in den letzten Jahrzehnten immer weniger RR gegeben hätte. Dieses Bild zeigt sich auch in den folgenden grafischen Darstellungen.



**Abbildung 3.1: 5-Jahr-gleitendes Mittel der Niederschlags-Jahressumme (RR), Graubünden und Umgebung, 1864-2023.**

Für Vegetationsperioden machen 5-Jahresmittel weniger Sinn. Es wurde für jede Station die relativen Mittel der Vegetationsperioden (im Verhältnis zum 100-jährigen Mittel) gebildet und davon für jedes Jahr das Mittel über alle Stationen ausser San Bernardino, wo es 1942-1954 einen Messausfall gab. Dieser Verlauf zeigt den generellen RR-Verlauf während der Vegetationsperiode von 1900-2023:



**Abbildung 3.2: RR während der Vegetationsperiode März-August, relativ (%) zum entsprechenden Mittel 1924-2023. Mittel über die relativen Werte von Davos, Samedan, Sargans und Segl-Maria, 1900-2023.**

Im dargestellten Zeitraum betrug der relative RR während der Vegetationsperiode 11-mal weniger als 80%, in den bekannten und auch weniger bekannten Trockenjahren von 1918 bis 2022. Es gab in den letzten Jahrzehnten keine Häufung von Trockenjahren, was den RR betrifft.

Im Folgenden wird die RR-Summe von 1991-2023 gezeigt, während der Vegetationsperiode und während des ganzen Jahres.

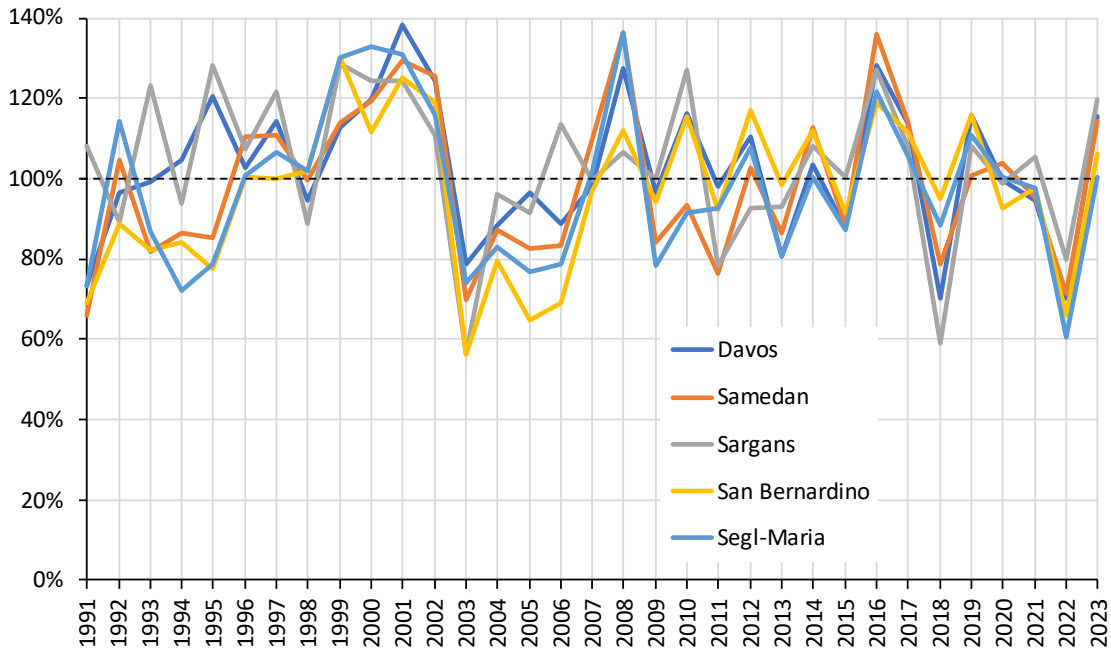


Abbildung 3.3: 6-Monatssumme des Niederschlags während der Vegetationsperiode (März – August), Graubünden und Umgebung, 1991-2023, relativ (%) zum Mittel 1924-2023.

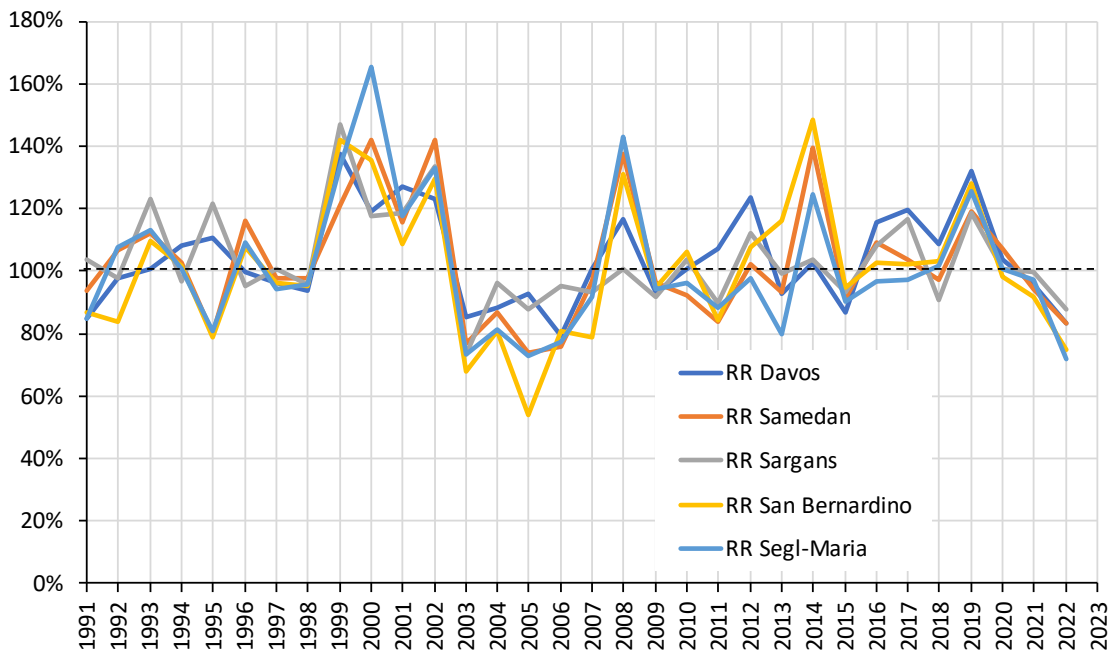
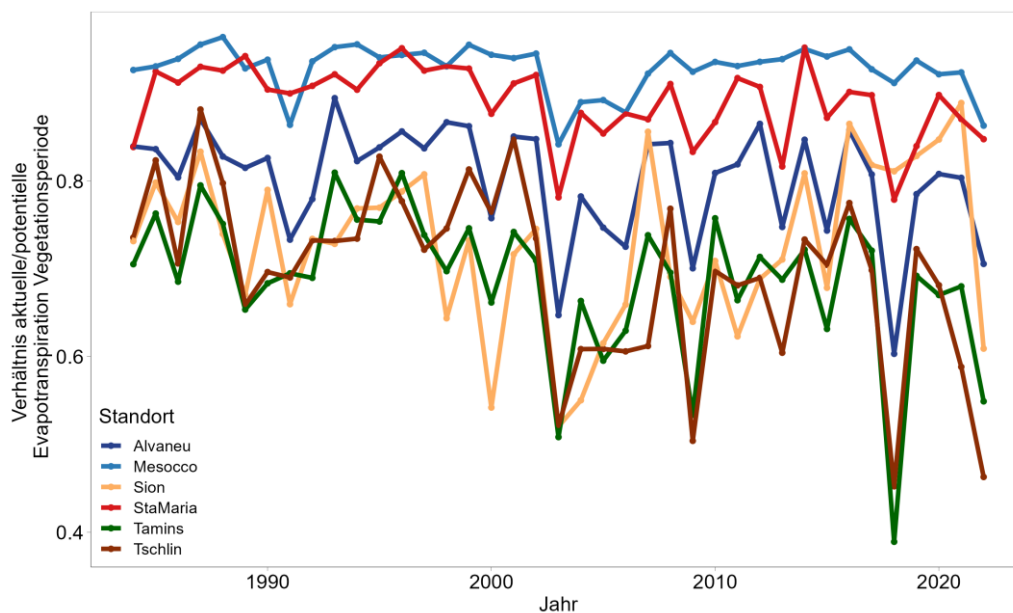


Abbildung 3.4: Jahressumme des Niederschlags, Graubünden und Umgebung, 1991-2022, relativ (%) zum Mittel 1924-2022.

Auf der anderen Seite wird in den letzten Jahrzehnten von zunehmender Bodentrockenheit und entsprechenden Folgen für Landwirtschaft und Wald berichtet. Beispielsweise wird vom Institut für angewandte Pflanzenbiologie (IAP) seit 38 Jahren der Zustand des Waldes anhand von über die ganze Schweiz verteilten Dauerbeobachtungsflächen untersucht (z.B. BRAUN, S., S. HOPF, S. TRESCH, L. DE WITTE, 2021: How is our forest? 38 years of forest observation. Intercantonal Permanent Forest Observation Program of the Cantons AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZH and of the Environmental Offices of Central Switzerland (LU, NW, OW, SZ, UR, ZG) and of the Federal Office for the Environment. Report 6 2017-2021. DOI: <https://zenodo.org/record/5674637>).

Es wurden auch Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf von Trockenheit und seinem Einfluss auf den Wald durchgeführt. Trockenheitsindikatoren je Beobachtungsfläche wurden dabei mit einem hydrologischen Modell ('Wasim-ETH') gerechnet, aufgrund von räumlich interpolierten Tagesmittelwerten von Temperatur, Luftfeuchte, Strahlung, Windgeschwindigkeit und Niederschlag. Für die Mortalität von Buchen und Fichten war das Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Evapotranspiration  $ET_a/ET_p$  der beste Indikator. Das Verhältnis  $ET_a/ET_p$  ist ein Mass für die Einschränkung der Transpiration infolge Trockenheit. Für die Auswertung verwendet wurde der geringste Wert pro Vegetationsperiode.

Die folgende Abbildung zeigt Minimalwerte für  $ET_a/ET_p$  je Vegetationsperiode für eine Reihe von Standorten in Graubünden und Sion von 1984-2022. Abgesehen von den auch niederschlagsmässig trockenen Jahren zeigt sich eine Tendenz zunehmend geringerer Werte für  $ET_a/ET_p$ , also zunehmender Trockenheit in der Vegetationsperiode. Da der Niederschlag sich nicht merklich geändert hat, kann aus physikalischer Sicht nur eine zunehmende Verdunstung dafür verantwortlich sein. Die Verdunstung hat zugenommen wegen des höheren Sättigungsdampfdrucks infolge höherer Temperatur und wegen höherer Sonneneinstrahlung an der Erdoberfläche.



**Abbildung 3.5: Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Evapotranspiration (Minimalwert je Vegetationsperiode) für verschiedene Standorte in Graubünden und für Sion, 1984-2022. Grafik zur Verfügung gestellt von Sabine Braun, Institut für angewandte Pflanzenbiologie.**

# 4. Grundwasserspiegel

## 4.1. Darstellung und Analyse der Messdaten

Im Kanton Graubünden wird der Grundwasserspiegel seit 2010 in neun Regionen durch das Amt für Natur und Umwelt erfasst, im Unterengadin seit 2013, im Prättigau erst seit 2020. Der mittlere Jahresgang zeigt grosse Unterschiede zwischen den Regionen.

Jahresgang des Grundwasserspiegels

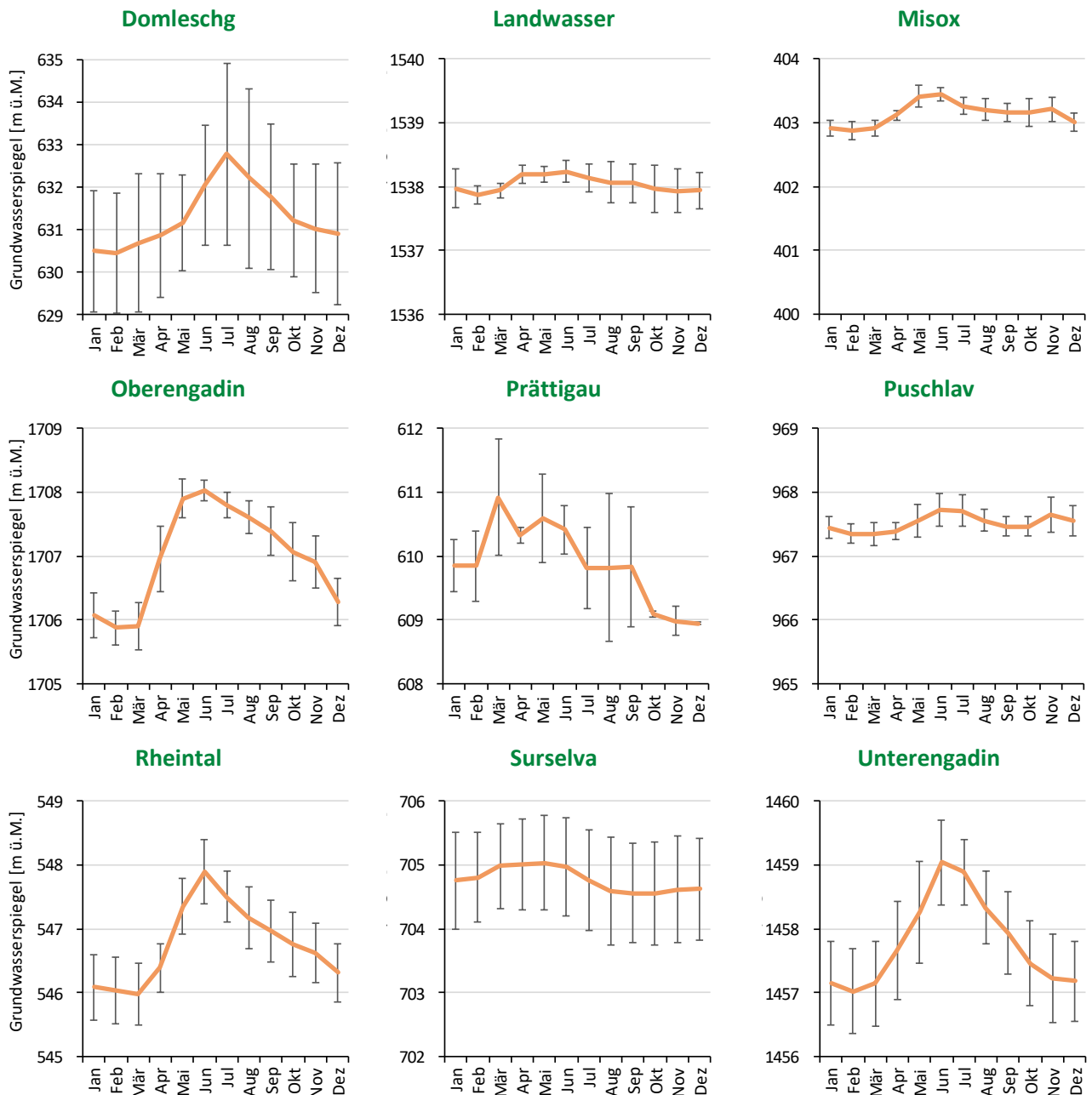


Abbildung 4.1: Jahresgang des Grundwasserspiegels (Mittelwerte je Monat und Streubereich) je Region, 2010-2023. Skalenspannweite 4 m, für Domleschg 6 m.

Die Skalenspannweite beträgt überall 4 m, nur beim Domleschg 6 m. Ober- und Unterengadin, Rheintal und Domleschg weisen ein ausgeprägtes Maximum der grundwasserhöhe im Juni/Juli auf. Puschlav und Misox weisen ein wenig ausgeprägtes Maximum im Hochsommer auf. Landwasser, Prättigau und Surselva zeigen einen aus dem Rahmen fallenden Jahresgang. Im Domleschg weist der Grundwasserspiegel die grössten Fluktuationen auf. Die teilweise starken jährlichen Schwankungen machen klar, dass Kennzahlen mit Bezug zu 'Trockenheit' je Monat definiert werden müssten.

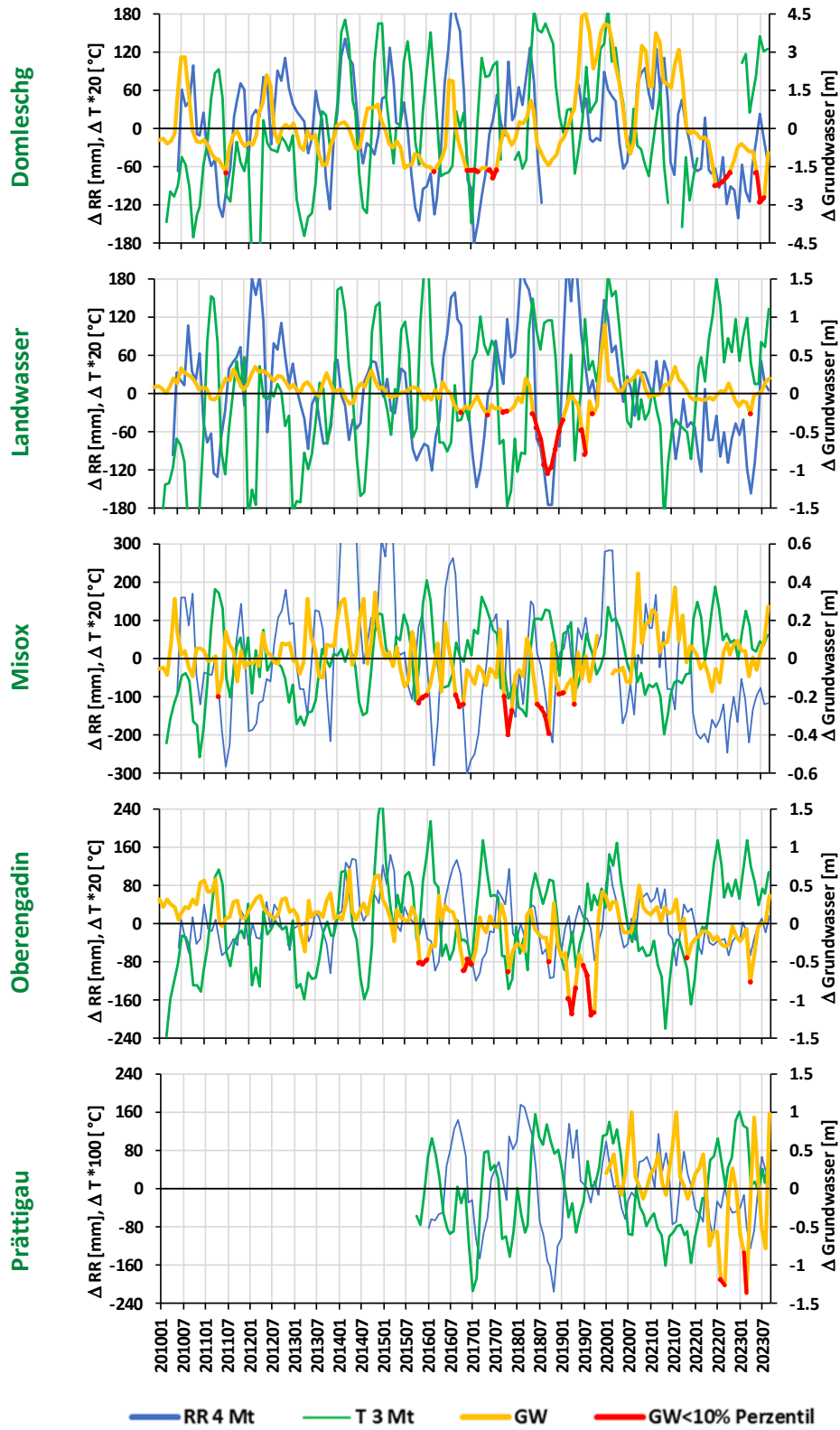
Die Entwicklung des Grundwasserspiegels seit 2010 wird im Folgenden auf der Basis von Monatsmittelwerten zusammen mit dem Verlauf von Temperatur (T) und Niederschlag (RR) gezeigt. Dabei werden alle Grössen als Abweichung von der 'Norm' dargestellt; die Norm ist jeweils der Mittelwert über die Messperiode von 2010-2023 je Monat. Beim RR wird die Summe der Abweichungen von der Norm über die letzten vier Monate dargestellt, bei der Temperatur dasselbe über die letzten drei Monate. Es hat sich gezeigt, dass damit am ehesten eine Entsprechung zwischen Grundwasserverlauf auf der einen und RR- bzw. T-Verlauf auf der anderen Seite erreicht wird. Der Grundwasserspiegel reagiert nur langsam auf Ereignisse an der Erdoberfläche wie RR und Verdunstung, vor allem in Richtung Trockenheit.

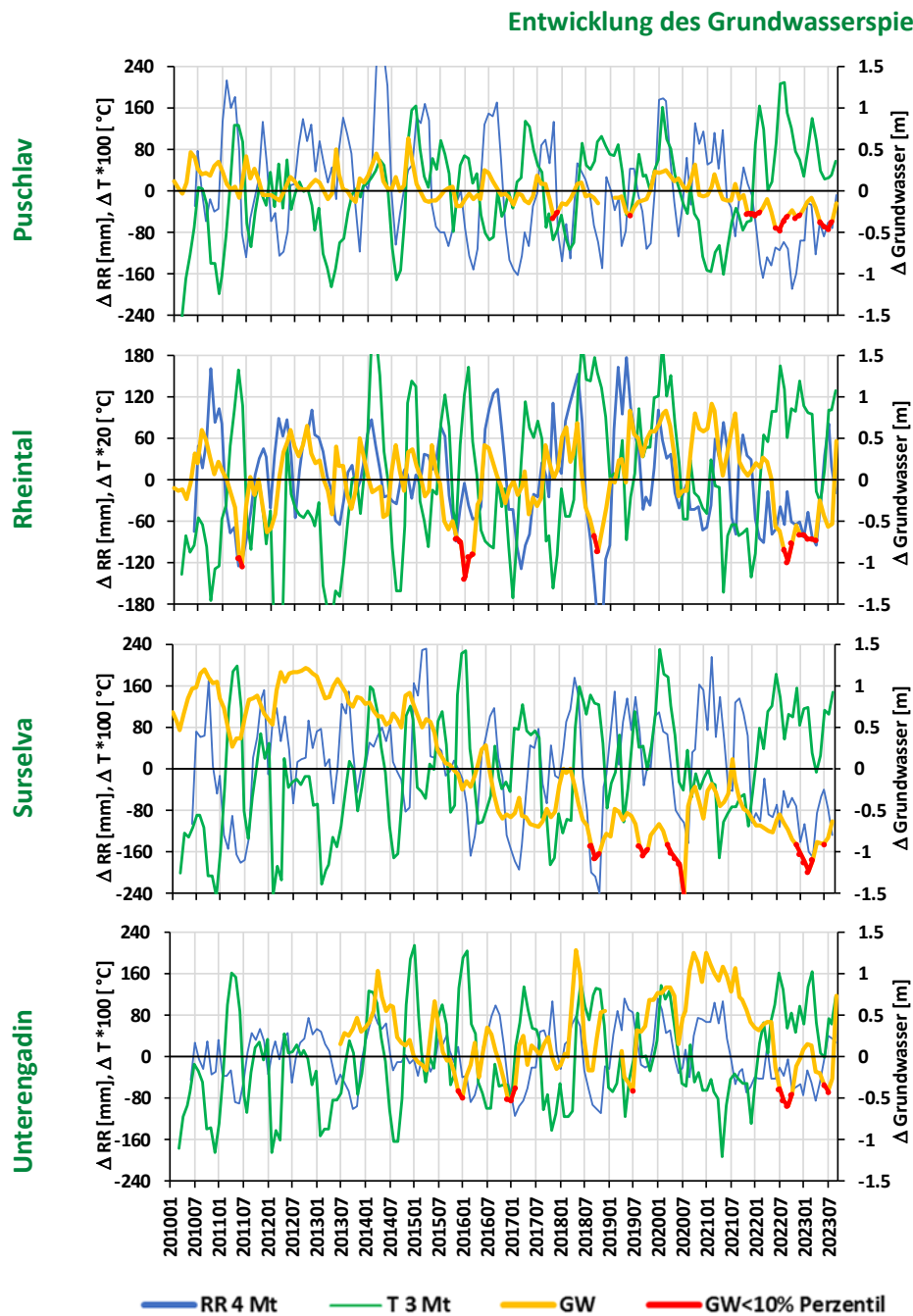
Die Skalenspannweite beim  $\Delta$ Grundwasser beträgt überall  $\pm 1.5$  m ausser beim Misox ( $\pm 0.6$  m) und beim Domleschg ( $\pm 4.5$  m). Der Einfluss von RR und T auf den Grundwasserspiegel ist deutlich zu sehen; hohe T und geringe RR führen mit zeitlicher Verzögerung typischerweise zu einem geringeren Grundwasserspiegel und umgekehrt. Allerdings finden sich auch manche Beispiele, wo dies nicht zutrifft. Man könnte also aus T und RR den Grundwasserspiegel nicht errechnen (Bestimmtheitsmass  $r^2$  zwischen  $\Delta$ GW und  $\Delta$ T bzw.  $\Delta$ RR  $< 0.1$  bis ca. 0.3).

Im Grundlegendokument "Beobachtung von Grundwasserständen und Quellabflüssen" im Rahmen der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA des BAFU, Abteilung Hydrologie heisst es:

*"Die Einordnung von Grundwasserständen bzw. Quellabflüssen in die langjährige Entwicklung wird in der Regel als Unterschreitung, Überschreitung oder Übereinstimmung in Bezug mit den zu erwartenden Verhältnissen dargestellt. Für die Berechnung werden Perzentile des Datensatzes der ganzen Messperiode bzw. einer Normperiode herangezogen. Eine deutliche Unterschreitung der mittleren Verhältnisse (tiefer Grundwasserstand bzw. Quellabfluss) ist erreicht, wenn der aktuelle Messwert unter dem langjährigen 10%-Perzentil liegt, d.h. zu den niedrigsten 10% aller während der Normperiode gemessenen Werte des betreffenden Zeitintervalls (Tag, Monat, Jahr) gehört. Ein Grundwasserstand bzw. Quellabfluss zwischen dem 10%-Perzentil und dem 90%-Perzentil bedeutet, dass normale Verhältnisse vorliegen."*

### Entwicklung des Grundwasserspiegels





**Abbildung 4.2: Abweichungen von der Norm: Grundwasser (GW; Monatswerte), RR (4-Monatssummen) und T (3-Monatsmittel) je Region, 2010-2023. Norm: Mittel je Monat 2010-2023.**

Entsprechend dieser Vorgabe des BAFU wurden in den obigen Grafiken alle Phasen rot markiert, wo das 10%-Perzentil unterschritten wurde. Dabei wurde auf die monatliche Norm abgestellt. Die Tiefstandphasen des Grundwassers treten oft aber nicht immer an mehreren Standorten in der gleichen Zeitperiode auf.

Die Fluktuationen des Grundwasserspiegels sind ebenfalls je Region sehr unterschiedlich. Als Mass dafür wird das Verhältnis zwischen Standardabweichung und saisonaler Spannweite (Differenz zwischen Maximum und Minimum des mittleren Monatsmittels) verwendet. Während im Ober- und Unterengadin die Fluktuationen fast die Hälfte der saisonalen Schwankung ausmachen, sind es am Standort Landwasser nur 14%.

**Tabelle 4.1: Standardabweichung der Tageswerte des Grundwasserspiegels (Std. Abw.) und mittlere saisonale Spannweite (Differenz des maximalen und minimalen Monatsmittels) je Region, 2010-2023.**

		Std. Abw.	Differenz Max-Min	Verhältnis StdAbw./((Max-Min)
DOM	Domleschg	1.73	7.37	23%
LWA	Landwasser	0.28	1.94	14%
MES	Misox	0.25	0.84	30%
OEG	Oberengadin	0.86	1.88	46%
POS	Puschlav	0.25	1.10	22%
PRÄ	Prättigau	0.85	2.36	36%
RHE	Rheintal	0.78	2.11	37%
SUR	Surselva	0.76	2.73	28%
UEG	Unterengadin	0.83	1.87	44%

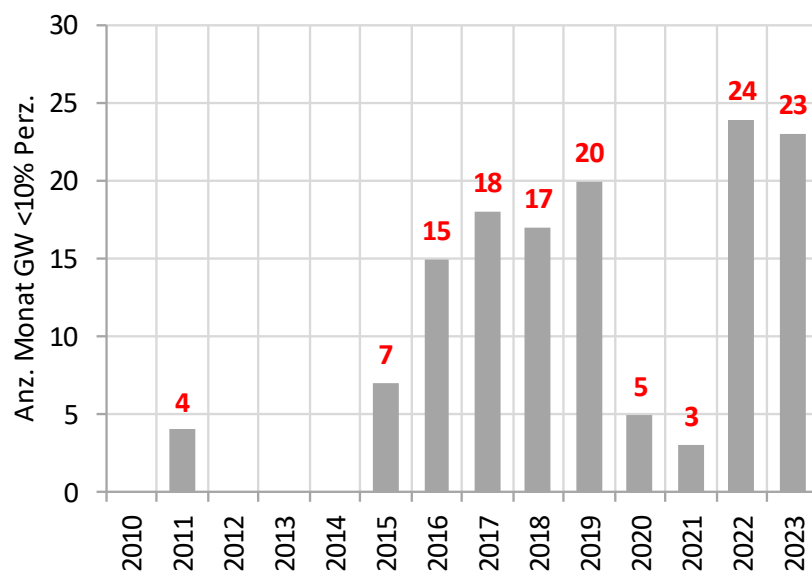
## 4.2. Auftreten von Trockenphasen

Als Trockenphase wird hier ein Grundwasserspiegel <10% Perzentil in den Abweichungen von der Norm je Monat definiert. Bei dieser Definition kommen regionale Unterschiede in der Trockenheit beim Grundwasser nicht zum Tragen, sondern nur allfällig andere zeitliche Verteilungen der gleichen Anzahl Trockenmonate.

In der Zeitspanne 2010-2023 gab es zwei Phasen mit häufigeren Tiefständen beim Grundwasser: 2016-2019 und 2022-2023. Das Puschlav verzeichnete 8 Monate im 2022 mit solchen Tiefständen, das Oberengadin im 2019 deren 7.

**Tabelle 4.2: Anzahl Monate mit Grundwasserspiegel (GW) < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Jahr und Region, 2010-2023. Perzentilbestimmung je Kalendermonat.**

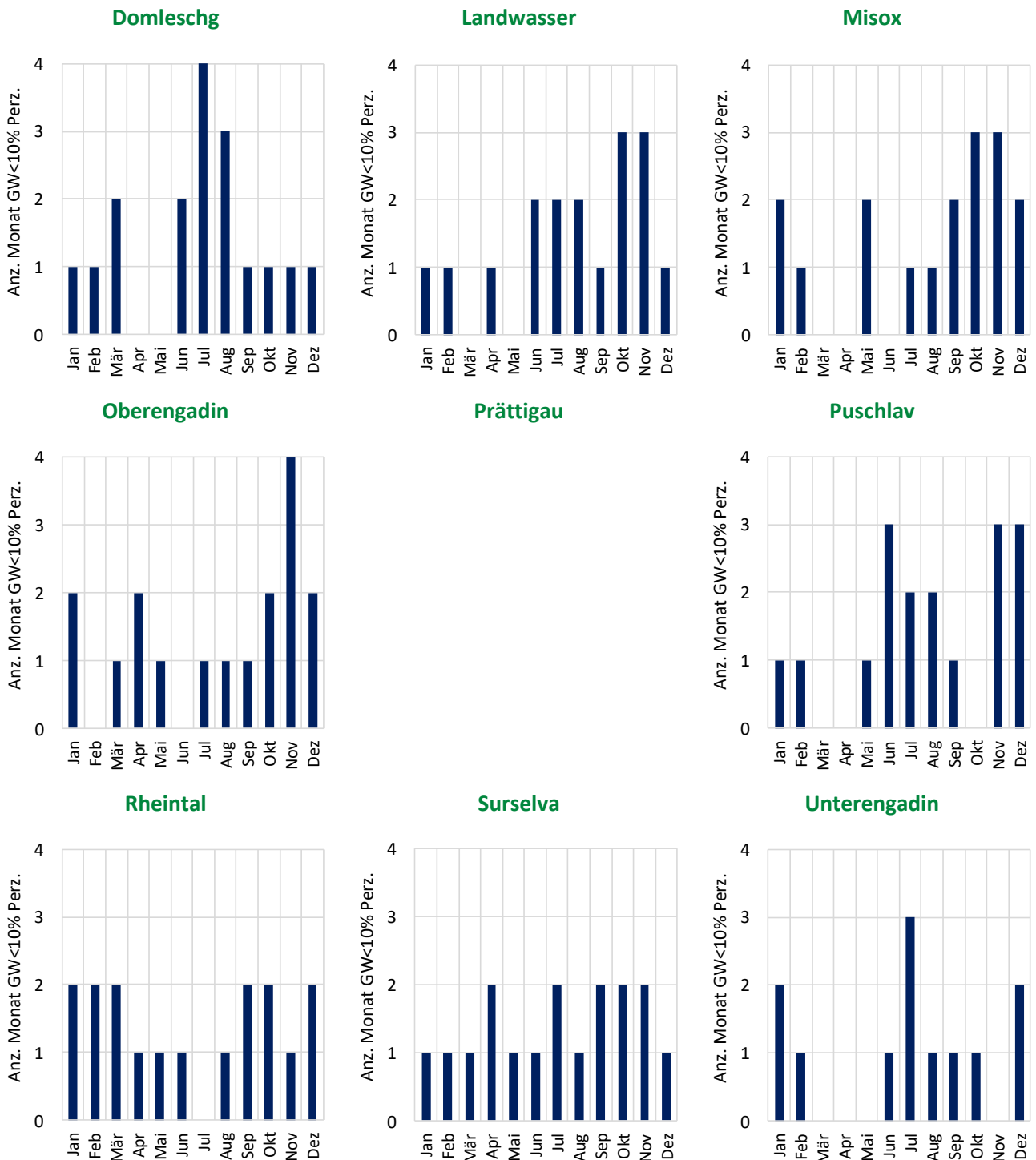
	DOM	LWA	MES	OEG	POS	PRÄ	RHE	SUR	UEG
	Domleschg	Landwasser	Misox	Oberengadin	Puschlav	Prättigau	Rheintal	Surselva	Untere Engadin
2010	0	0	0	0	0		0	0	
2011	1	0	1	0	0		2	0	
2012	0	0	0	0	0		0	0	
2013	0	0	0	0	0		0	0	0
2014	0	0	0	0	0		0	0	0
2015	0	0	2	2	0		2	0	1
2016	2	1	4	3	0		3	0	2
2017	6	3	3	2	2		0	0	2
2018	0	7	4	1	0		2	3	0
2019	0	5	3	7	1		0	3	1
2020	0	0	0	0	0	0	0	5	0
2021	0	0	0	1	2	0	0	0	0
2022	5	0	0	0	8	2	4	1	4
2023	3	1	0	1	4	3	4	5	2
<b>Summe</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>5</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>12</b>



**Abbildung 4.3: Anzahl Monate mit Grundwasserspiegel (GW) < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Jahr über alle Regionen, 2010-2023. Perzentilbestimmung je Kalendermonat.**

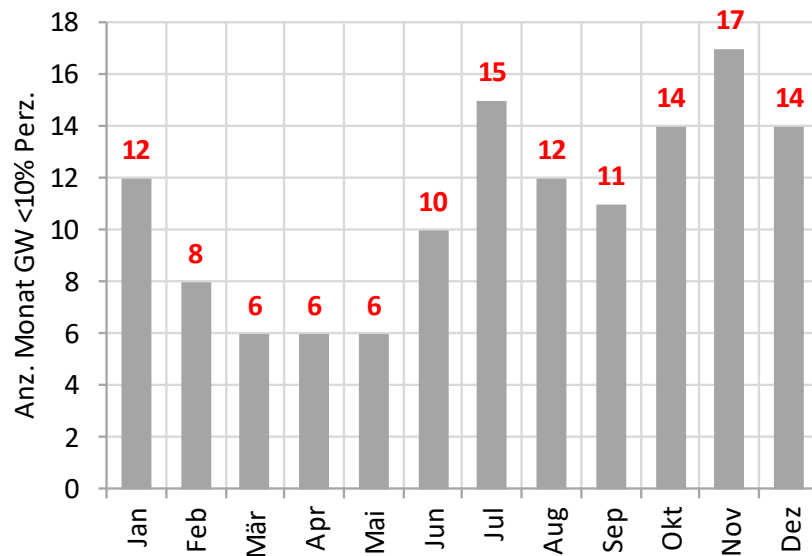
Im Folgenden wird das jahreszeitliche Auftreten von Grundwassertiefständen je Region betrachtet. Jede Region weist per definitionem 17 Monate mit Tiefstand auf.

Grundwasser



**Tabelle 4.3: Anzahl Monate mit Grundwasserspiegel (GW) < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Kalendermonat über alle Jahre je Region, 2010-2023. Perzentilbestimmung je Kalendermonat. Jeder Standort weist 17 Monate mit Tiefstand aus (Unterengadin 12 wegen späterem Messbeginn. Prättigau fehlt infolge zu kurzer Zeitreihe.**

Über alle Standorte (ohne Prättigau) zusammengefasst zeigt sich folgende jahreszeitliche Variation der Grundwassertiefstände:



**Abbildung 4.4: Anzahl Monate mit Grundwasserspiegel (GW) < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Kalendermonat über alle Jahre und Regionen, 2010-2023.**

Grundwassertiefstände sind im Frühjahr (März-Mai) am seltensten, ansonsten gibt es keine ausgeprägte Saisonalität.

### 4.3. Messtechnischer Klärungsbedarf

- Das Domleschg weist im Vergleich mit allen anderen Standorten grosse Schwankungen des Grundwasserspiegels auf. Wieso ist das so?
- In der Surselva (Schnaus) hat sich der Grundwasserspiegel im Zeitraum 2010-2023 offenbar um etwa 2 m nachhaltig gesenkt. Weshalb?

# 5. Abflüsse

## 5.1. Darstellung und Analyse der Messdaten

Im Kanton Graubünden wird der Grundwasserspiegel seit 2006 in neun Regionen vom BAFU erfasst. Der relative mittlere Janresgang ist in allen Regionen ähnlich.

### Abflussmengen

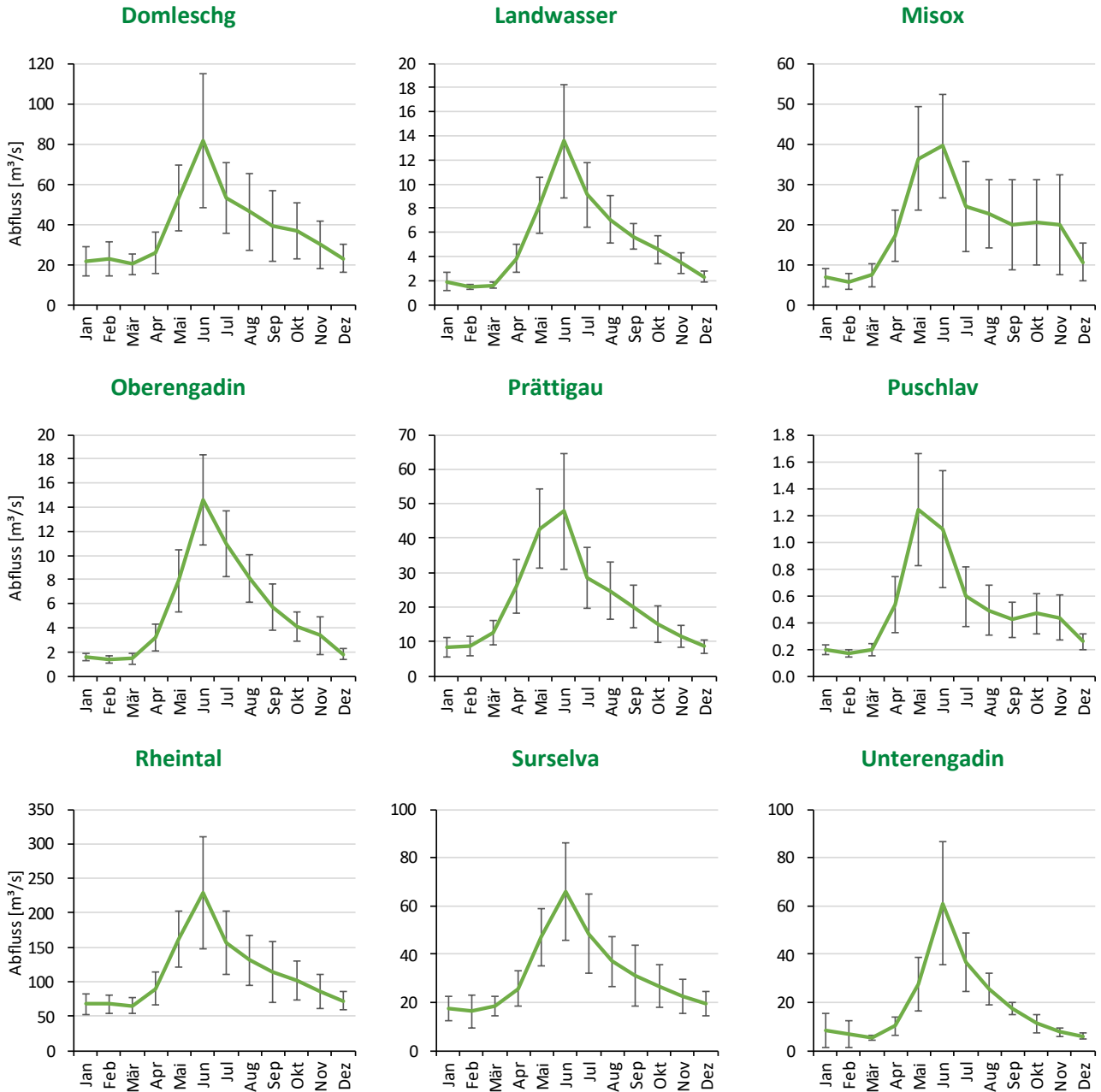


Abbildung 5.1: Jahrgang der Abflussmenge (Mittelwerte je Monat und Streubereich) je Region, 2006-2023.

Die Abflüsse der betrachteten Flüsse sind rund um einen Faktor 200 unterschiedlich. Aber überall ist der Juni der Spitzenreiter (Puschlav Mai). Die Standardabweichung ist in den Spitzenmonaten (Juni und im Misox, Prättigau und Puschlav auch der Mai) deutlich grösser als sonst, dann treten offensichtlich auch die grössten Fluktuationen auf (in den Monatsmitteln über die 18 Messjahre).

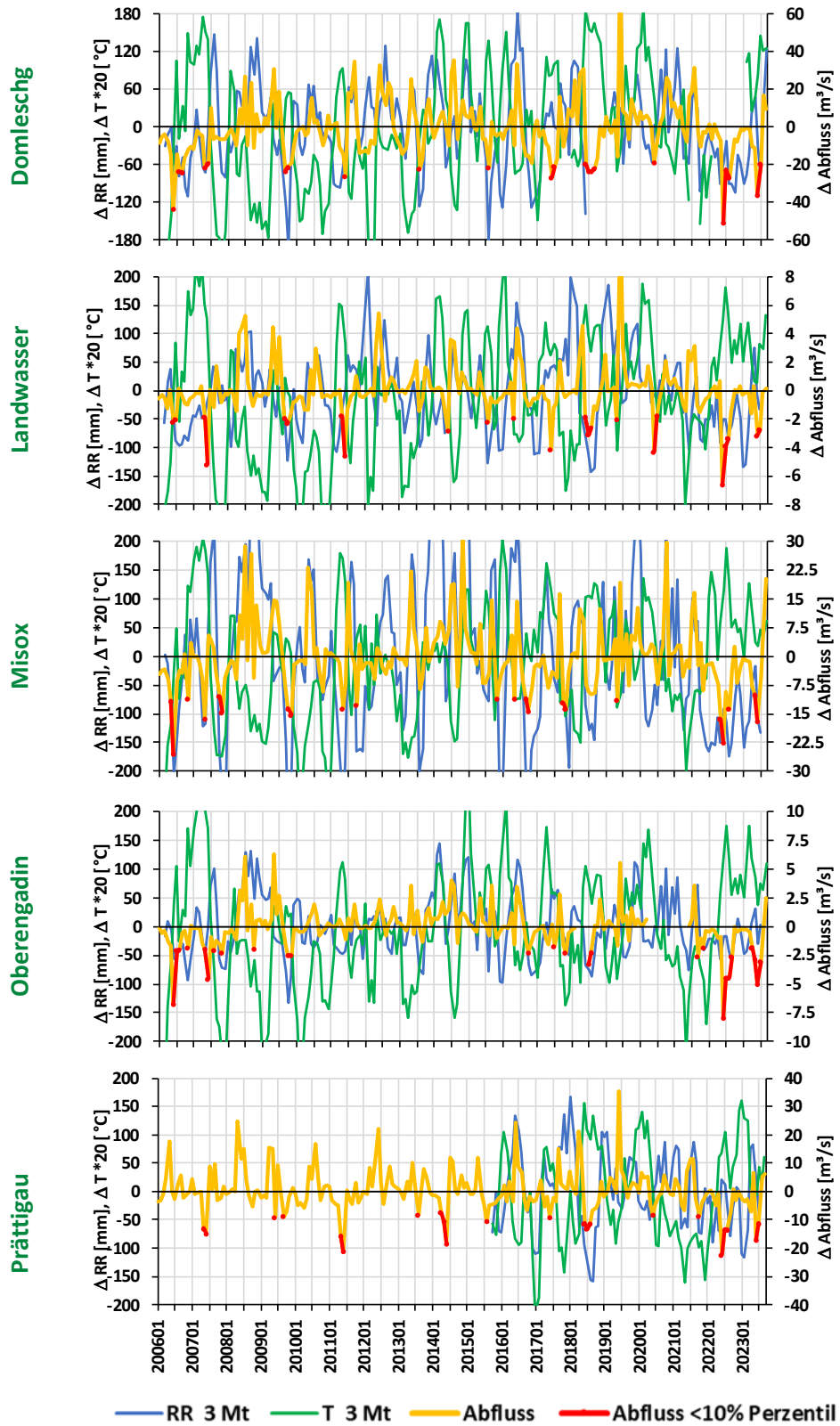
Die Entwicklung der Abflussmengen seit 2006 wird im Folgenden auf der Basis von Monatsmittelwerten zusammen mit dem Verlauf von Temperatur (T) und Niederschlag (RR) gezeigt. Dabei werden alle Grössen als Abweichung von der 'Norm' dargestellt; die Norm ist jeweils der Mittelwert über die Messperiode von 2006-2023 je Monat. Bei RR und T wird die Summe der Abweichungen von der Norm über die letzten drei Monate dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass damit am ehesten eine Entsprechung zwischen Abflussverlauf auf der einen und RR- bzw. T-Verlauf auf der anderen Seite erreicht wird. Der Abfluss reagiert nur langsam auf zunehmende Trockenheit infolge ausbleibenden RR bzw. erhöhter Verdunstung, und hier interessiert der Abfluss in Situationen von Trockenheit.

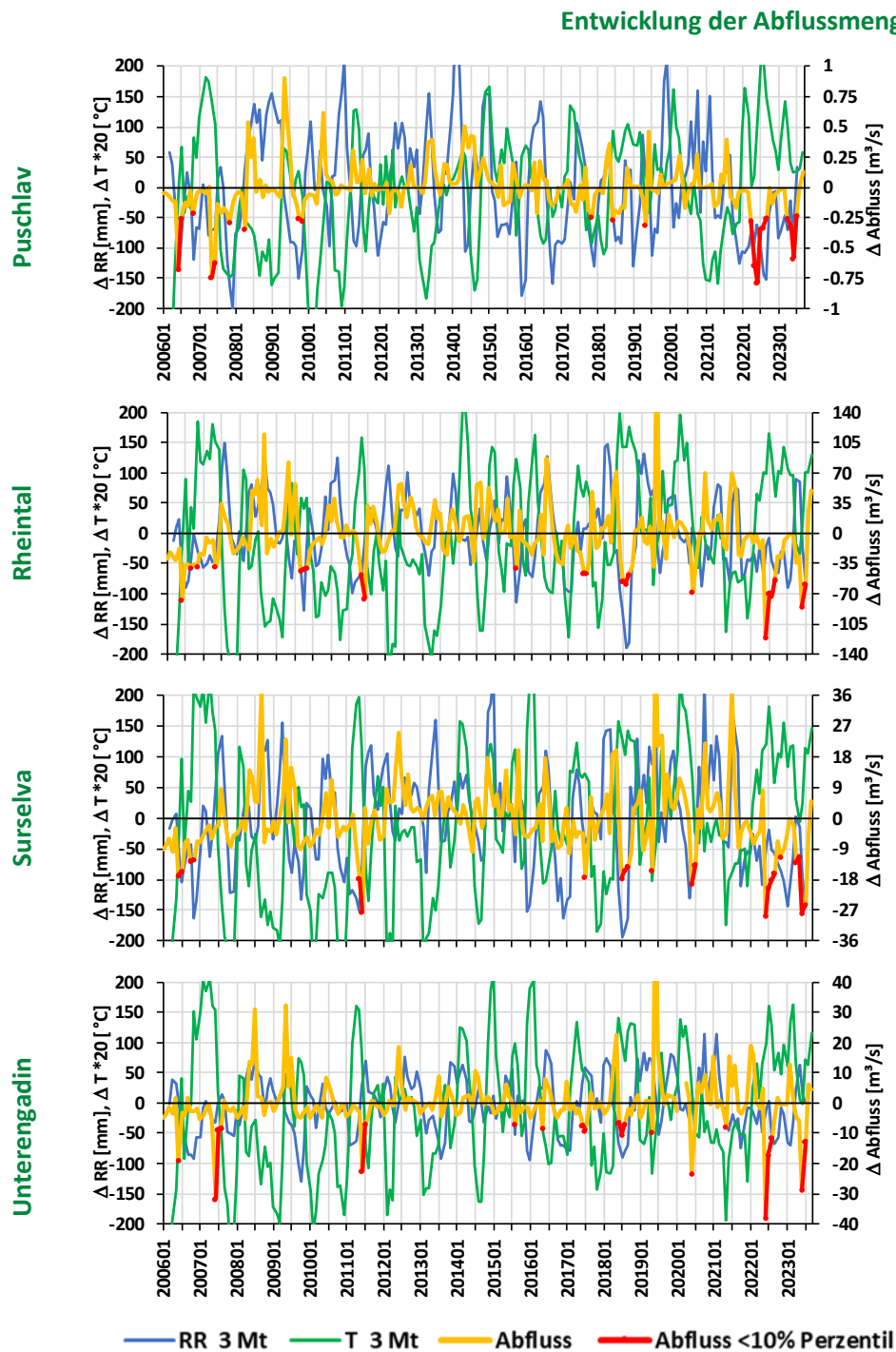
Die Skalenspannweite beim  $\Delta$ Abfluss ist sehr unterschiedlich je Region, weil die Abflüsse selbst sehr unterschiedlich sind. Der Einfluss von RR und T auf den Abfluss ist ansatzweise zu sehen (schlechter als beim Grundwasserspiegel); hohe Temperaturen und geringe RR führen mit zeitlicher Verzögerung typischerweise zu einem geringeren Abfluss. Der Kraftwerksbetrieb dürfte manchenorts aber einen erheblichen Einfluss auf den Abfluss haben. Das Bestimmtheitsmass  $r^2$  zwischen  $\Delta$ Abfluss und  $\Delta T$  bzw.  $\Delta RR$  ist zumeist  $<0.1$ .

Im Grundlagendokument "Beobachtung von Grundwasserständen und Quellabflüssen" im Rahmen der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA des BAFU, Abteilung Hydrologie heisst es:

*"Die Einordnung von Grundwasserständen bzw. Quellabflüssen in die langjährige Entwicklung wird in der Regel als Unterschreitung, Überschreitung oder Übereinstimmung in Bezug mit den zu erwartenden Verhältnissen dargestellt. Für die Berechnung werden Perzentile des Datensatzes der ganzen Messperiode bzw. einer Normperiode herangezogen. Eine deutliche Unterschreitung der mittleren Verhältnisse (tiefer Grundwasserstand bzw. Quellabfluss) ist erreicht, wenn der aktuelle Messwert unter dem langjährigen 10%-Perzentil liegt, d.h. zu den niedrigsten 10% aller während der Normperiode gemessenen Werte des betreffenden Zeitintervalls (Tag, Monat, Jahr) gehört. Ein Grundwasserstand bzw. Quellabfluss zwischen dem 10%-Perzentil und dem 90%-Perzentil bedeutet, dass normale Verhältnisse vorliegen."*

Entwicklung der Abflussmengen





**Abbildung 5.2: Abweichungen von der Norm: Abflussmenge (Monatswerte), RR (3-Monatssummen) und T (3-Monatsmittel) je Region, 2006-2023. Norm: Mittel je Monat 2010-2023. 2006-2023.**

Entsprechend dieser Vorgabe des BAFU wurden in den obigen Grafiken alle Phasen rot markiert, wo das 10%-Perzentil unterschritten wurde. Dabei wurde auf die monatliche Norm abgestellt. Die Tiefstandphasen des Grundwassers treten typischerweise an mehreren Standorten in der gleichen Zeitperiode auf. Im 2022 wurden verbreitet die bislang niedrigsten Abflüsse (seit 2006) registriert; im 2023 waren die Abflüsse nochmals sehr niedrig, ähnlich wie 2006/2007.

## 5.2. Auftreten von Trockenphasen

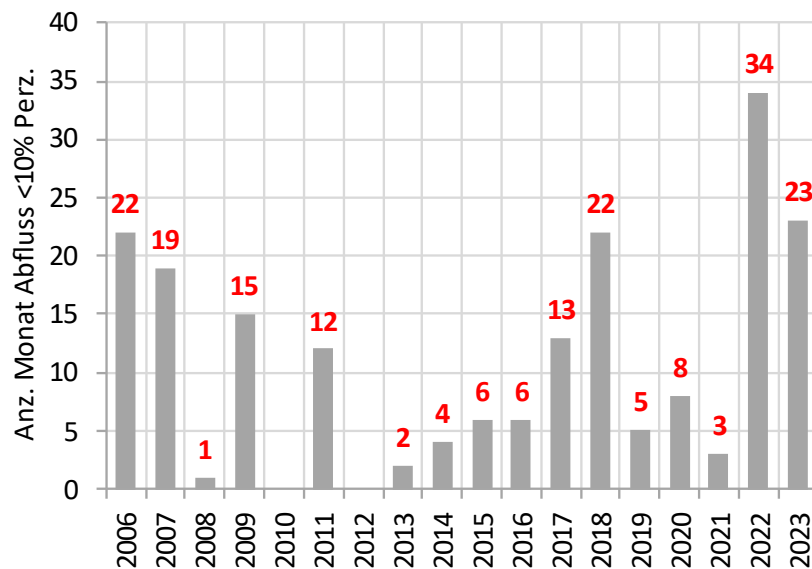
Als Trockenphase wird hier ein Abfluss <10% Perzentil in den Abweichungen von der Norm je Monat definiert. Bei dieser Definition kommen regionale Unterschiede in der Trockenheit beim Abfluss nicht zum Tragen, sondern nur allfällig andere zeitliche Verteilungen der gleichen Anzahl Trockenmonate.

In der Zeitspanne 2006-2023 stechen die Jahre 2006, 2007, 2018, 2022 und 2023 mit verbreitet mehreren Monaten mit niedrigen Abflüssen heraus.

**Tabelle 5.1: Anzahl Monate mit Abflussmenge < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Jahr und Region, 2006-2023.**

	DOM	LWA	MES	OEG	POS	PRÄ	RHE	SUR	UEG
	Domleschg	Landwasser	Misox	Oberengadin	Puschlav	Prättigau	Rheintal	Surselva	Untere Engadin
2006	3	2	3	3	3	0	3	4	1
2007	2	2	3	3	3	2	1	0	3
2008	0	0	0	0	1	0	0	0	0
2009	2	2	2	2	2	2	3	0	0
2010	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2011	1	1	2	0	0	2	2	2	2
2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2013	1	0	0	0	0	1	0	0	0
2014	0	1	0	0	0	3	0	0	0
2015	1	1	1	0	0	1	1	0	1
2016	0	1	3	1	0	0	0	0	1
2017	2	1	2	1	1	1	2	1	2
2018	4	3	0	2	1	3	3	3	3
2019	0	1	1	0	1	0	0	1	1
2020	1	2	0	0	0	1	1	2	1
2021	0	0	0	1	0	1	0	0	1
2022	3	3	3	4	6	3	4	5	3
2023	2	2	2	3	4	2	2	4	2
<b>Summe</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>21</b>

Im 2022 war im Puschlav die Abflussmenge während 6 Monaten (April-September) unterhalb des 10%-Perzentils, in der Surselva (Vorderrhein bei Ilanz) während 5 Monaten.



**Abbildung 5.3: Anzahl Monate mit Abflussmenge < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Jahr über alle Regionen, 2006-2023. Perzentilbestimmung je Kalendermonat.**

Das Jahr 2022 war in Sachen Abfluss ein Ausnahmejahr im Zeitraum seit 2006. Von Juni-August war die Abflussmenge in allen Regionen unterhalb des 10%-Perzentils.

Im Folgenden wird das jahreszeitliche Auftreten von Grundwassertiefständen je Region betrachtet. Jede Region weist per definitionem 17 Monate mit Tiefstand auf.

**Tabelle 5.2: Anzahl Monate mit Abflussmenge < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Kalendermonat über alle Jahre je Region, 2006-2023.**

	DOM	LWA	MES	OEG	POS	PRÄ	RHE	SUR	UEG
	Domleschg	Landwasser	Misox	Oberengadin	Puschlav	Prättigau	Rheintal	Surselva	Untere Engadin
Jan	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Feb	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mär	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Apr	0	0	0	0	3	1	0	1	0
Mai	1	3	7	1	4	3	2	3	3
Jun	8	9	3	4	5	9	6	5	8
Jul	4	5	0	4	3	3	4	6	6
Aug	5	3	1	4	1	4	3	2	4
Sep	3	1	1	2	1	1	4	2	0
Okt	1	1	5	2	1	1	1	1	0
Nov	0	0	5	3	4	0	2	2	0
Dez	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Summe</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>20</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>22</b>	<b>21</b>

Niedrige Abflüsse kommen überwiegend im Sommer (Mai - August) vor, zu einem kleineren Teil auch noch im Herbst (September - November). Spitzenreiter ist der Juni, der Monat mit dem im Mittel über die Messperiode höchsten Abfluss.

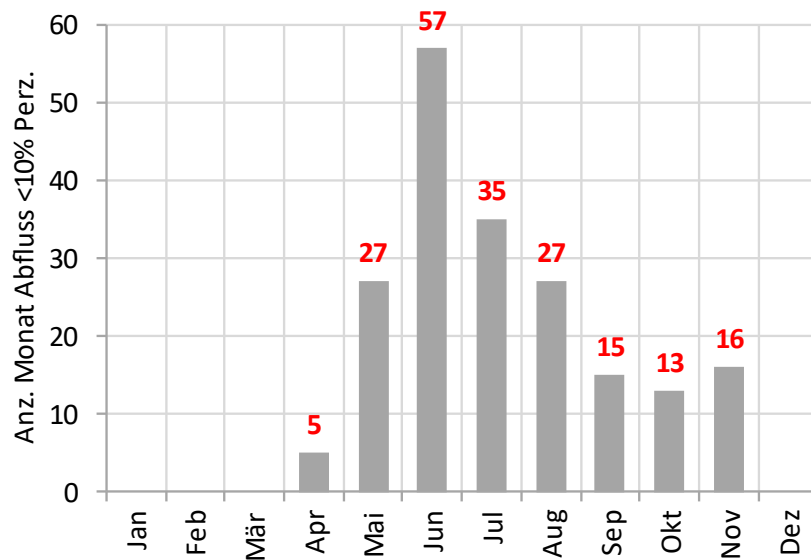


Abbildung 5.4: Anzahl Monate mit Abflussmenge < 10% Perzentil (Abweichung von der Norm) je Kalendermonat über alle Jahre und Regionen, 2006-2023.

### 5.3. Zusammenhang zwischen Grundwasserspiegel und Abfluss

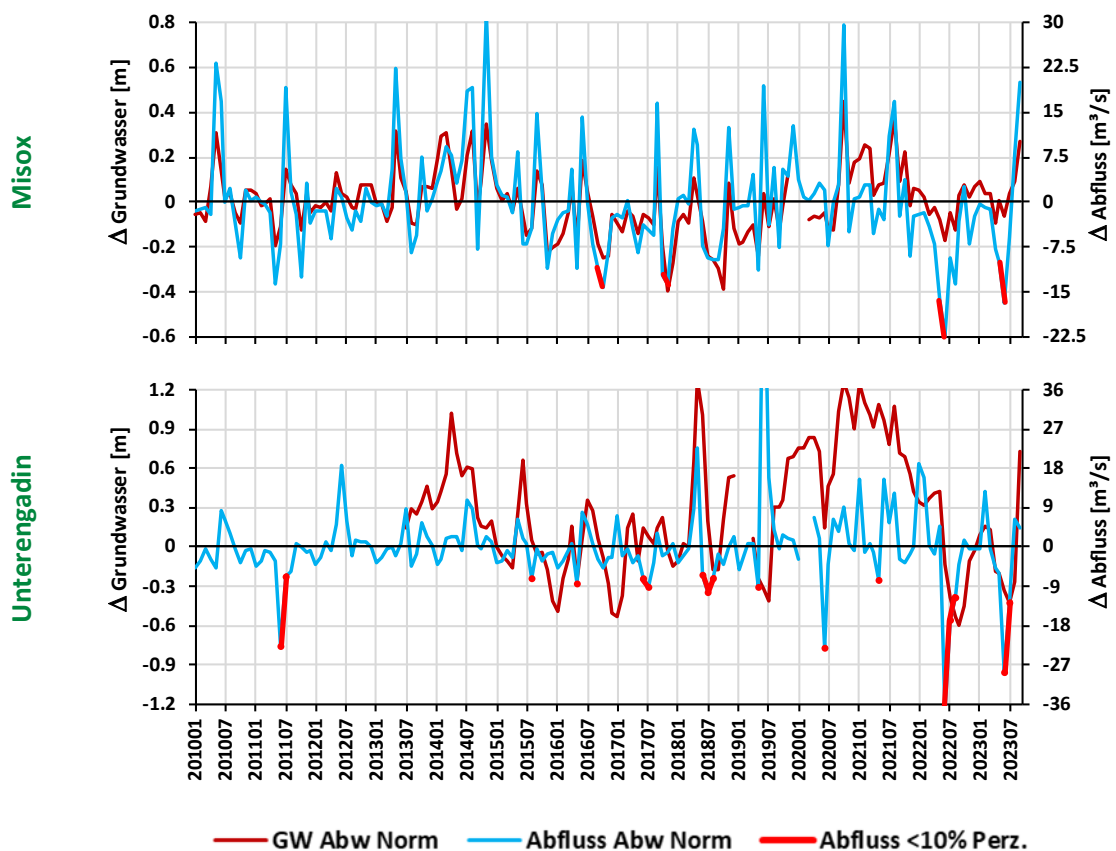
Grundwasser und Abfluss werden hauptsächlich durch Niederschlag und Verdunstung gesteuert, abgesehen von allfälligem menschlichen Einfluss. Auch hier sind die Wirkungen komplex, und ein einfacher direkter Zusammenhang zwischen Grundwasserspiegel und Abfluss ist nicht gegeben. Das Bestimmtheitsmass  $r^2$  zwischen Grundwasserspiegel und Abfluss (jeweils Abweichung von der Norm), das angibt, zu welchem Anteil eine Änderung in einer Grösse eine lineare Änderung in der anderen Grösse hervorruft, schwankt zwischen 0.04 und 0.58.

Im Falle des Misox ( $r^2=0.58$ ) kann schon von einem deutlichen Zusammenhang gesprochen werden. Dies zeigt sich auch in der folgenden Abbildung;  $\Delta$  Grundwasser und  $\Delta$  Abfluss zeigen einen recht guten Gleichlauf. Als Gegenbeispiel wird das Unterengadin gezeigt: Es gibt Phasen mit Gleichlauf, aber auch Phasen mit hohen Grundwasserständen, denen der Abfluss nicht entspricht, und sogar gegenläufige Bewegungen. Es wird vermutet, dass dies auch mit Kraftwerksbetrieb zu tun hat.

**Tabelle 5.3: Bestimmtheitsmass  $r^2$  zwischen Grundwasserspiegel und Abfluss (jeweils Abweichung von der Norm) je Region, 2010-2023.**

	Region	$r^2$ (GW-Abfluss)
DOM	Domleschg	0.14
LWA	Landwasser	0.04
MES	Misox	0.58
OEG	Oberengadin	0.11
POS	Puschlav	0.31
PRÄ	Prättigau	GW erst ab 2020
RHE	Rheintal	0.36
SUR	Surselva	GW-Änd. unklar
UEG	Unterengadin	0.05

**Zusammenhang Grundwasserspiegel und Abfluss**



**Abbildung 5.5: Abweichungen von der Norm:  $\Delta$  Abfluss und  $\Delta$  Grundwasserspiegel (Monatswerte) für Misox (oben) und Unterengadin (unten), 2010-2023. Norm: Mittel je Monat 2010-2023.**

## 6. Modellierung der Bodenfeuchte: Soil Moisture Index (SMI)

Beim Soil Moisture Index (SMI) handelt es sich um eine Modellgrösse von MeteoSchweiz, die für jeden Tag gebildet wird und bis zum Jahr 1991 zurückgerechnet wurde. Zur Erklärung wird von MeteoSchweiz zitiert:

*"Die Wasserbilanz ist definiert als Differenz von Niederschlagsmenge und potenzieller Evapotranspiration. In diesem Fall ist die Evapotranspiration allein durch meteorologische Grössen bedingt (Temperatur, Feuchte, Wind und Strahlung). Die Wasserbilanz aus Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration wird deshalb auch als meteorologische Wasserbilanz bezeichnet. Positive Werte zeigen an, dass über den betrachteten Zeitraum mehr Niederschlag gefallen ist als in die Atmosphäre verdunstet wurde.*

*Ein einfaches Bodenmodell erlaubt die Berechnung von Bodenfeuchte-Indikatoren. Dabei wird der Boden als Eimer behandelt: Niederschlag füllt den Eimer, die Evapotranspiration entnimmt Wasser. Aus den meteorologischen Grössen Niederschlag und potenzielle Evapotranspiration wird von Tag zu Tag die Bodenwasserbilanz gebildet. Ist der Eimer voll (der Boden wassergesättigt), gelangt Niederschlag nicht in den Boden, sondern fliesst oberflächlich ab. Ausserdem berücksichtigt das Modell, dass die Vegetation unterhalb einer bestimmten Bodenfeuchte weniger Wasser abgibt als bei optimaler Wasserversorgung. Die tatsächliche Evapotranspiration hängt dann von der Bodenfeuchte ab und ist kleiner als die potenzielle Evapotranspiration. Zur Bestimmung von Speicherfähigkeit und Wasserabgabe der Vegetation wird im Modell ein Boden mit mittleren Eigenschaften und Bewuchs mit Gras (dichter Bestand, kurz geschnitten) verwendet."*

Die Bodenfeuchte wird durch den SMI somit dargestellt als Bodenfeuchte des Modellbodens in Volumenprozent Wasser. Es sei noch angefügt, dass Niederschlag bei Wassersättigung des Bodens nur zu einem insgesamt kleinen Teil oberflächlich abfliesst, sondern in tiefere Schichten des Bodens versickert (und von dort durch Kapillareffekte auch wieder in Oberflächennähe aufsteigen kann). Der SMI kann auch mit Schnee und gefrorenem Boden nicht umgehen. Er ist sicher ein Mass für mögliche Trockensituationen, und dies für eine Zeitspanne über immerhin 33 Jahre.

Der Verlust an Bodenfeuchte wird im SMI durch die potenzielle Evapotranspiration (Verdunstung durch Boden und Pflanzen) beschrieben; diese ist eine rein meteorologische Grösse. Welchen Algorithmus MeteoSchweiz dafür genau verwendet, wurde bislang nicht offengelegt. Gemäss "Ermittlung der Bewässerungsbedürftigkeit landwirtschaftlicher Nutzflächen im Kanton Graubünden", Rebecca Göpfert,

2007 hat die Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL) in Zürich in den Jahren 1983 bis 2000 Versuche (Lysimeter- und Feldversuche zur Beregnung) zur Ermittlung der Evapotranspiration im Schweizerischen Mittelland durchgeführt. Dabei erwies sich die Penman Methode unter sechs Methoden als die am besten geeignete. Die Penman Methode wurde durch Nievergelt minimal an die Datenlage angepasst und wird als modifizierte Penman Methode bezeichnet. Die entsprechende Formel enthält Parameter für Temperatur, Höhenlage, kurz- und langwellige Nettostrahlung, Wind und Differenz zwischen Sättigungs- und aktuellem Dampfdruck. Es ist nicht bekannt, ob MeteoSchweiz mit dieser oder einer anderen Formel arbeitet.

Für diese Untersuchungen lagen Tageswerte des SMI für 8 Standorte von 1991-2023 vor. Die Werte wurden zu Monatsmitteln zusammengefasst. Als Trockenmonat im Sinne des SMI wurde definiert ein mittlerer SMI  $< 4.08\%$ . Dies ist das 10%-Perzentil aller Monatsmittel von 1991-2023 über **alle** Stationen; damit sind regionale Unterschiede in der Häufigkeit solcher Monate möglich. Die 4.08% entsprechen etwa 10% der Feldkapazität (des maximalen Volumengehalts an Wasser).

In den folgenden Darstellungen wird nach Grossregion unterschieden:

	Nord- und Mittelbünden
	Alpensüdseite
	Engadin

Bei der Verteilung der Trockenmonate auf die acht Regionen unterscheiden sich deutlich zwei Gruppen: Das Engadin (Samedan und Scuol), das Puschlav (Robbia) und das Rheintal (Chur) weisen recht viele Trockenmonate auf, Landwasser (Davos), die Surselva (Disentis) und das Misox (Magadino und San Bernardino) nur wenige. Im Mittel über alle Regionen zeigen sich die teilweise (!) auch anderweitig trockeneren Jahre 1991, 1997, 2003, 2005, 2011, 2018 und 2022.

Soil Moisture Index (SMI)

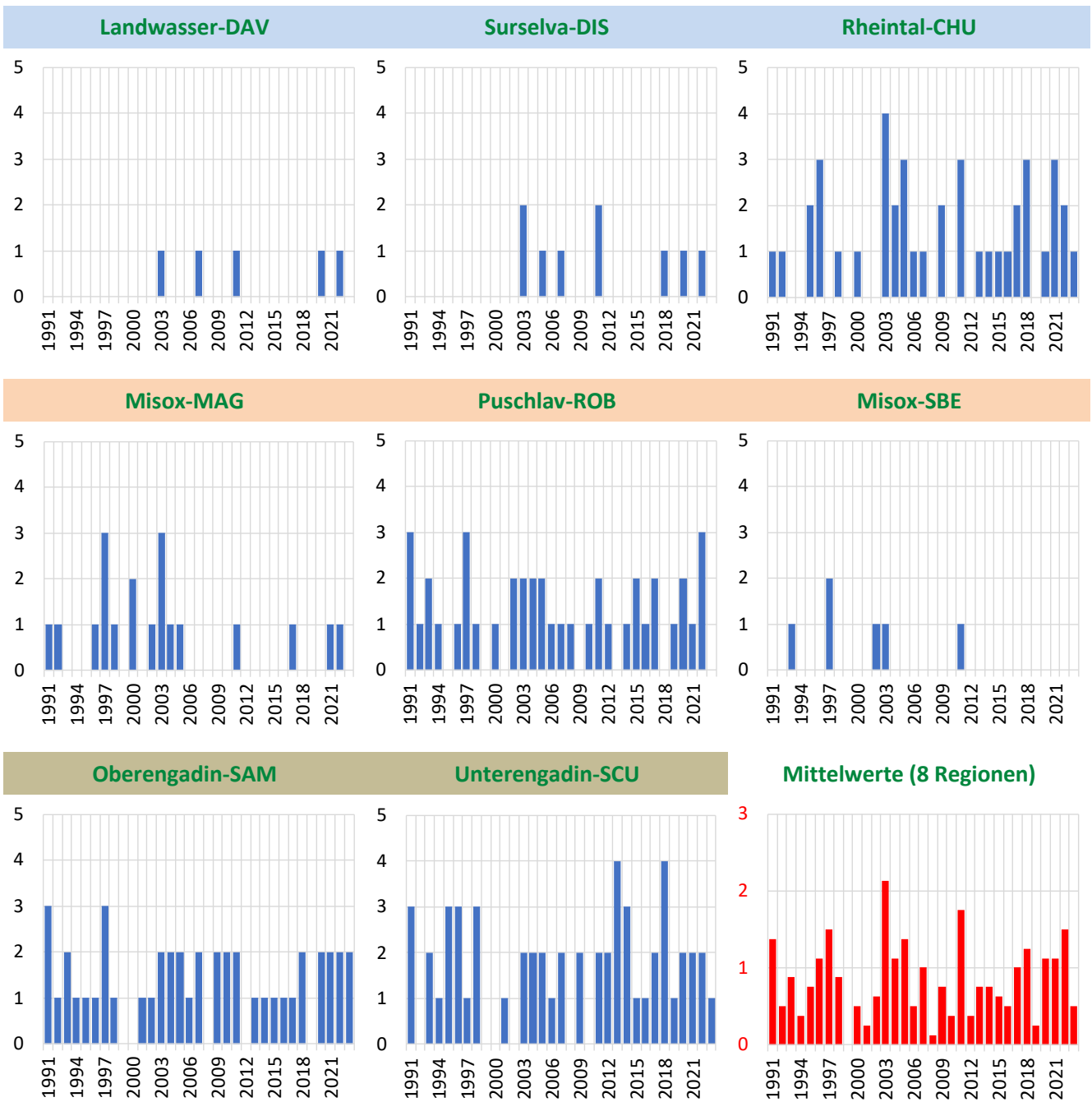
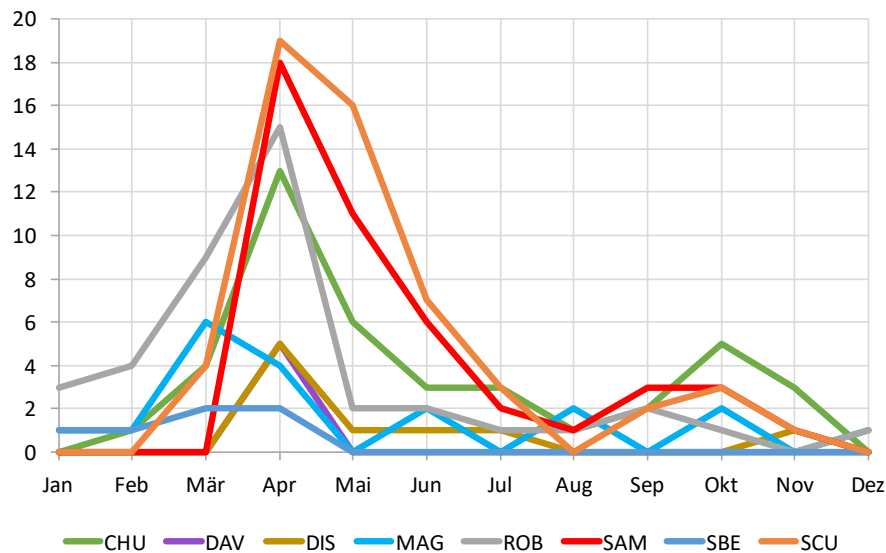


Abbildung 6.1: Anzahl Trockenmonate (Mittlerer SMI < 4.08 %; 10%-Perzentil über alle Stationen = ca. 10% der Feldkapazität) je Jahr und Region, 1991-2023. Rot: Mittel über alle Regionen.

Ordnet man die nämlichen Daten der SMI-Trockenmonate nach Kalendermonat und Region, erweist sich der April als trockenster Monat in Graubünden, zum Teil gefolgt vom Mai. Im Hochsommer gibt es nur relativ wenige Trockenmonate. Im Rheintal und Engadin gibt es noch im Oktober etwas vermehrt Trockenmonate.



**Abbildung 6.2: Anzahl trockene Kalendermonate (mit mittlerem SMI < 4.08 %; 10%-Perzentil über alle Stationen = ca. 10% der Feldkapazität) je Region über die 33 Jahre von 1991-2023.**

In der oben erwähnten Arbeit von Rebecca Göpfert werden ebenfalls die Standorte Chur, Samedan und Scuol als zeitweise bewässerungsbedürftig ausgewiesen, nicht aber Robbia, und vor allem bezieht sich die Phase der Bewässerungsbedürftigkeit auf Mai - Juli/August; da passt das obige Bild nicht dazu, denn ein tiefer Wert des SMI (Trockenmonat) heisst ja, dass die Evapotranspiration den Niederschlag deutlich übertrifft.

Da der Algorithmus des SMI nicht bekannt ist, kann nichts weiter dazu gesagt werden. Es erscheint nicht ratsam, den SMI als Indikator für Bodenfeuchte in einem Trockenheitsbulletin zu verwenden. Auch bzgl. Waldbrandgefahr wäre vielleicht eine kritische Prüfung zusammen mit Messwerten angezeigt.

Auch die Betrachtung akkumulierter Trockenheit führt zu einem sehr ähnlichen Ergebnis. Hierbei werden je Kalendermonat alle SMI-Werte < 4.08% (10%-Perzentil über alle Stationen) als negative Differenz {SMI - 4.08%} zusammengezählt (als Prozentpunkte). Sowohl bei der Betrachtung über die Jahre 1991-2023 als auch über die Kalendermonate zeigt sich ein ähnliches Bild wie oben: Die gleichen vier trockeneren Regionen und die gleichen trockeneren Jahre 1991, 1997, 2003, 2011, 2018 und 2022.

Soil Moisture Index (SMI)

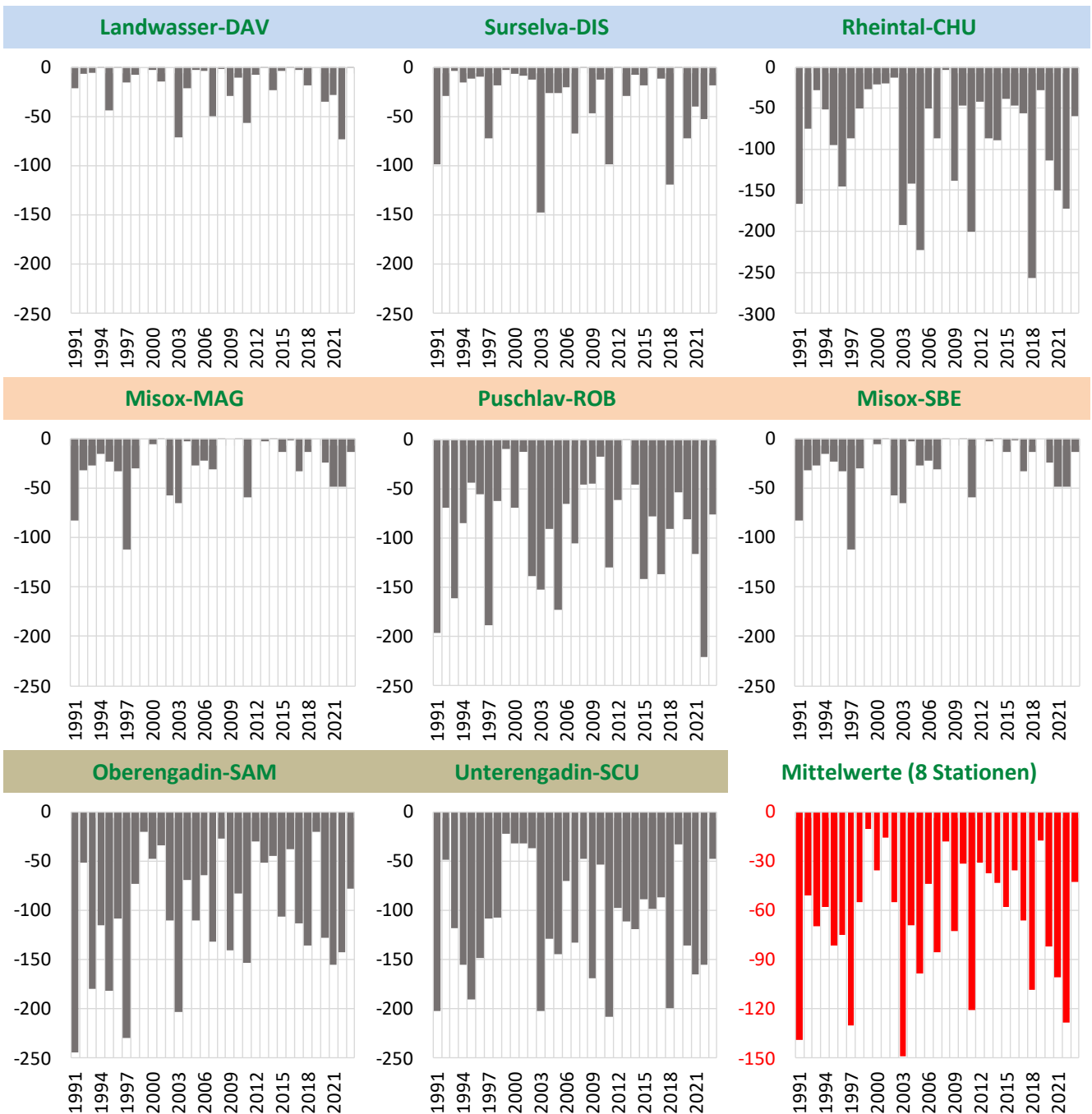
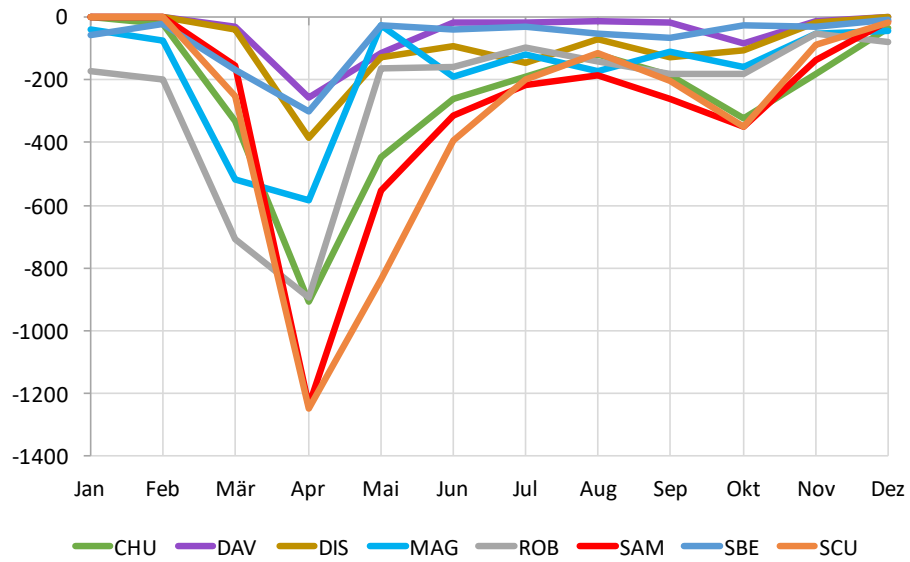


Abbildung 6.3: "Akumulierte Trockenheit" je Jahr und Region auf Basis des SMI: Summe der Differenz {SMI-4.08%} über alle Tage, wenn SMI < 4.08%. (4.08 %: 10%-Perzentil des SMI über alle Stationen = ca. 10% der Feldkapazität). Rot: Mittel über alle Regionen. Angaben in Prozentpunkten.



**Abbildung 6.4: "Akkumulierte Trockenheit" je Kalendermonat und Region auf Basis des SMI: Summe der Differenz {SMI-4.08%} über alle Tage, wenn SMI < 4.08%. (4.08 %: 10%-Perzentil des SMI über alle Stationen = ca. 10% der Feldkapazität). Angaben in Prozentpunkten.**

## 7. Bodenfeuchte

### 7.1. Darstellung und Analyse der Messdaten

Der Kanton Graubünden misst die Bodenfeuchte auf drei verschiedene Arten:

- Teros-32 (T32), Keramikkerzen, Saugspannung ("Soil water tension"), Messwerte in cbar (pro Station je drei in 20 cm und 35 cm Tiefe)
- Teros-21 (T21), Keramikplättchen, Saugspannung ("Soil water tension T21", Messwerte in cbar (in Samedan, Grono und Poschiavo pro Station je 2 in 20 cm und 35 cm, in den übrigen Stationen je eine in 20 cm und 35 cm) → SWT-20 und SWT-35.
- Teros-12 (T12), Stahlnadeln, relativer Wassergehalt "Volume Water Content", Messwerte in % (pro Station je eine in 20 cm und 35 cm) → VWC-20 und VWC-35.

Die Teros-32 erfassen vor allem das Wasser in groben Poren des Bodens, welches nach einem Niederschlag relativ rasch dort wieder verschwindet, so dass der Boden seine Stabilität zurückerhält. Die mit dem Teros-32 erfasste Saugspannung ist deshalb vor allem ein Mass für die Belastbarkeit des Bodens (z.B. durch schwere Fahrzeuge); die Pflanzen können Wasser zu einem guten Teil auch aus feineren Poren aufnehmen, weshalb die Teros-21 besser zur Erfassung pflanzenbezogener Bodentrockenheit geeignet scheinen. Im Folgenden wird deshalb mit 'SWT' mit einer Ausnahme immer eine Messung mit Teros-21 bezeichnet.

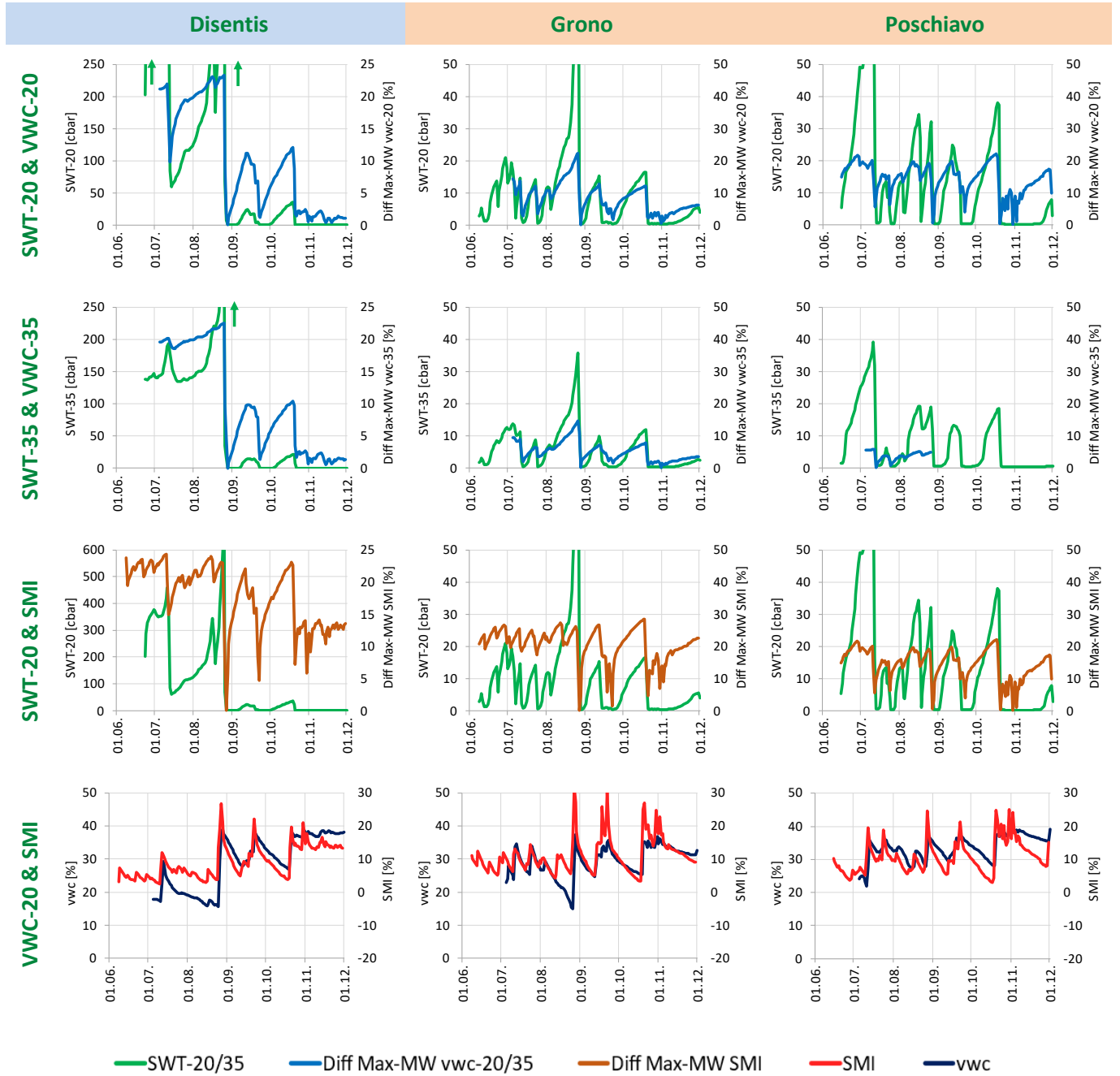
Die Wasseraufnahmemöglichkeit der Pflanzen wird im Wesentlichen durch die Saugspannung gesteuert, gegen die die Pflanzen ankommen müssen bis zum 'Permanenten Welkepunkt' PWP, wo die Wasserversorgung der Pflanzen nicht mehr gewährleistet ist. Der PWP scheint 'nahezu allgemeingültig' bei 4.2 pF zu liegen ( $pF = \log_{10}(SWT [hPa])$  = dekadischer Logarithmus der Saugspannung in hPa;  $pF=4.2$  entspricht einer SWT von ca. 15 bar = 1500 cbar), währenddem der dann herrschende VWC von der Bodenbeschaffenheit abhängt und so im Bereich von 10-25% liegt. Im Boden ist relativ viel Adsorptions- und teilweise auch Kapillarwasser, das für die Pflanzen nicht verfügbar ist. Bei Wassersättigung des Bodens liegt die Saugspannung im Bereich von null, des VWC bei den Messungen in Graubünden im Bereich um die 40%.

Im Folgenden werden zeitreihen der Messungen in Graubünden und des SMI vom 01.06.-30.11.2023 gezeigt; die Messungen begannen im 2023. Um Gleichlauf besser zeigen zu können, wurden auch die Grössen 'Max-MW vwc' bzw. 'Max-MW SMI' gebildet: Differenz des Messwertes (vwc) bzw. Modellwertes (SMI) zum Maximalwert in der Betrachtungsperiode.

Soil Water Tension (SWT), Volume Water Content (VWC) & Soil Moisture Index (SMI)



Soil Water Tension (SWT), Volume Water Content (VWC) & Soil Moisture Index (SMI)



Soil Water Tension (SWT), Volume Water Content (VWC) & Soil Moisture Index (SMI)

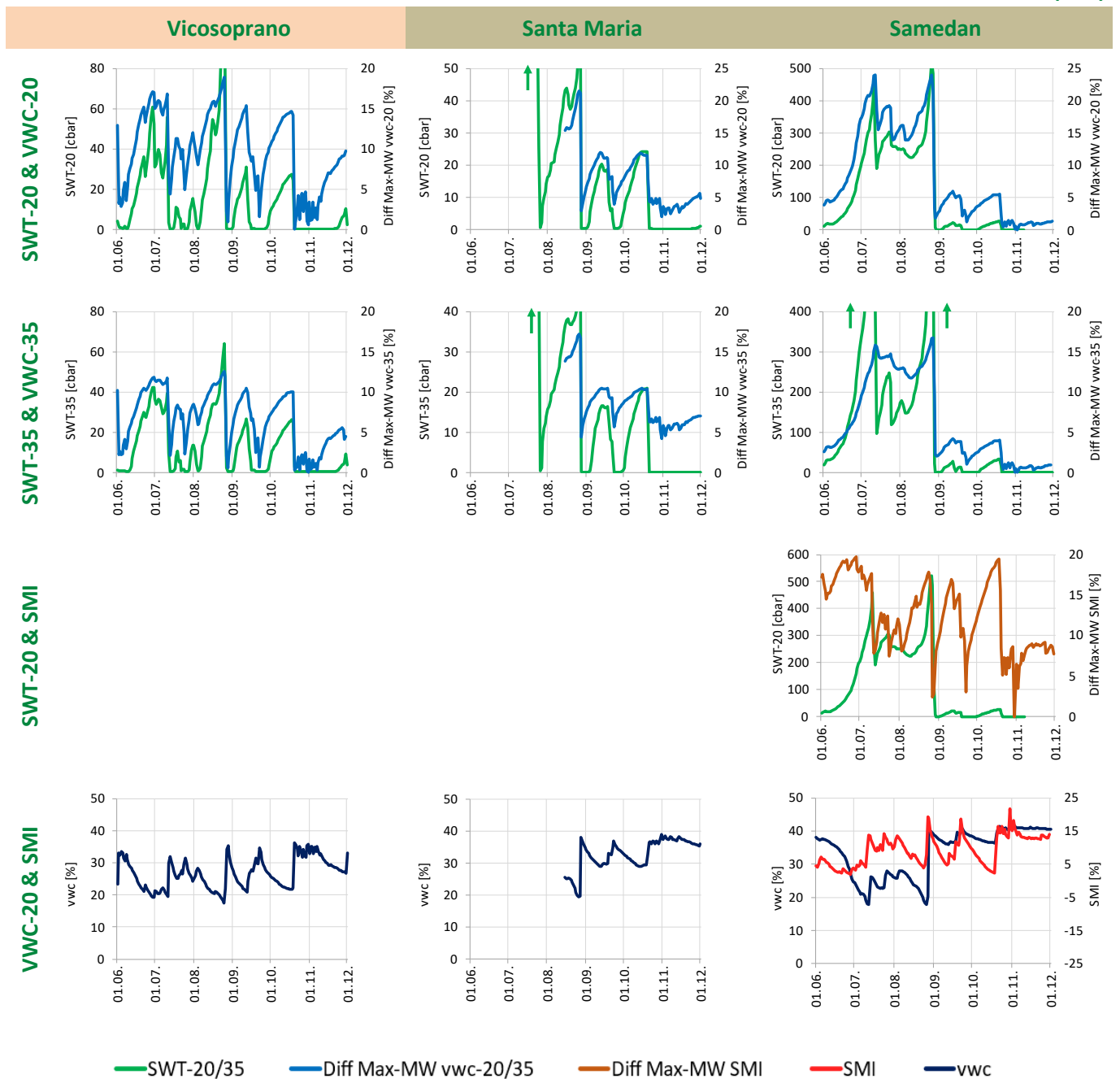


Abbildung 7.1: Soil Water Tension (SWT), Volume Water Content (VWC) bzw. Differenz (Max-MW VWC) & Soil Moisture Index (SMI) bzw. Differenz (Max-MW SMI), für die 9 Regionen, 01.06.-30.11.2023.

SWT und (Max-Messwert(VWC)) zeigen einen guten Gleichlauf, sowohl bei 20 cm als auch 35 cm Bodentiefe. Allerdings zeigen ab 01.09. bei fast allen Stationen die Werte für SWT eine geringere Reaktion auf zunehmende Trockenheit als die Werte der VWC im Vergleich zu den Sommermonaten mit ähnlicher Reaktion. Die Frage hier ist weniger "Was ist richtig?" als vielmehr "Welche Grösse entspricht eher der Wasserversorgungssituation für die Pflanzen?"

Der SMI, an sich ein Modellwert für Bodenwassergehalt in %, reagiert betragsmässig stärker auf unterschiedliche Verhältnisse als der gemessene VWC. Deshalb muss die Skala beim SMI ins Negative gehen, um Gleichlauf mit dem VWC zeigen zu können. In Disentis, Poschiavo und Samedan zeigt der SMI ab 01.09. – im Vergleich zu den Sommermonaten – jeweils stärkere Trockenheit an als es der gemessene VWC zum Ausdruck bringt. Bei Grono und Landquart ist das nicht so.

Die Saugspannung SWT scheint uns am besten geeignet als Bodentrockenheitssignal für das geplante Trockenheitsbulletin, vorbehaltlich der Klärung der messtechnischen Fragen (s. später). Grundsätzlich wäre auch der Bodenwassergehalt VWC denkbar, aber Schwellenwerte für Warnung und Alarm wären stärker lokal geprägt (auch bzgl. Verschiedener Böden in der jeweiligen Region) und damit schwieriger erfassbar und vermittelbar, und der VWC ist im Bereich von grösserer Trockenheit weniger sensitiv als die SWT (man beachte die Peaks bei SWT in diesen Fällen).

## 7.2. Messtechnischer Klärungsbedarf

- In Grono, Poschiavo und Samedan werden jeweils zwei T21-Sensoren je Bodentiefe eingesetzt. In Samedan und Poschiavo - im Gegensatz zu Grono – zeigen die Sensoren in der gleichen Tiefe deutlich unterschiedliche Messwerte, wo man zumindest ähnliche erwarten würde. Diese Frage ist bei Meteo-Test in Abklärung.
- Ab 01.09. zeigen bei fast allen Stationen die Werte für SWT eine zwar zeitgleiche, aber geringere Reaktion auf zunehmende Trockenheit als die Werte des VWC, im Vergleich zu den Sommermonaten. Auch im Herbst einen guten Gleichlauf zeigen Grono und teilweise Andeer.
- Die Maximalwerte der SWT in der Untersuchungsperiode vom 01.06.-30.11.2023 zeigen enorme Unterschiede zwischen den Standorten. Es ist klar, dass diese Werte unterschiedlich sind aufgrund unterschiedlicher Meteorologie und unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit, aber so grosse Unterschiede wie in den bisherigen Messungen vorgefunden scheinen auffällig, wie die nächste Abbildung zeigt. Die SWT reagiert auf Trockenheit stets zeitgleich wie der VWC, das Messsignal ist 'vernünftig'. Aber die Maximalwerte variieren zwischen den Standorten je nach Bodentiefe um einen Faktor 16 - 30. Könnte dies eventuell an einer Kalibration liegen? Werden die Sensoren einer Parallelmessung unterzogen?

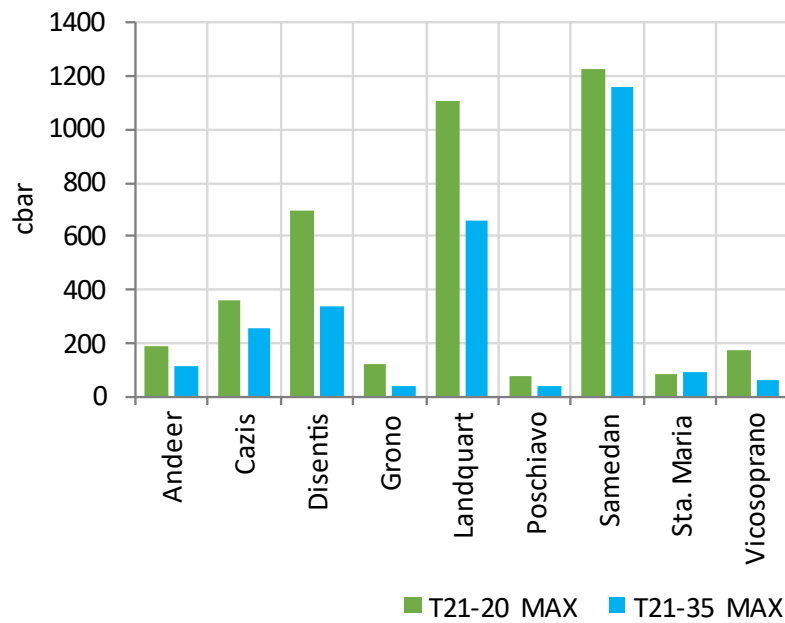


Abbildung 7.2: Maximale Saugspannung SWT-20 bzw. SWT-35 an den neun Standorten, 01.06. – 30.11.2023.

- Der SMI von MeteoSchweiz ist ein Index für einen Modellboden mit Modellvegetation. Es ist klar, dass die SMI-Werte je nach Standort sehr unterschiedlich sein können. Aber die Maximalwerte (bei Wassersättigung) sollten doch überall gleich sein, da ja überall der gleiche Modellboden mit Modellvegetation verwendet wird? Dies ist aber nicht der Fall:

	CHU	DAV	DIS	MAG	ROB	SAM	SBE	SCU
SMI max	26	29	35	41	29	28	37	28

MeteoSchweiz wurde in dieser Sache angefragt. Eine Antwort steht aus.

Die messtechnischen Fragen, die die SWT betreffen, müssten vor einer Verwendung für das Trockenheitsbulletin geklärt werden.

## 8. Einfluss von Schnee

Der Einfluss von Schnee auf Trockenheit wurde in der vorliegenden Phase 1 nicht behandelt, mit Ausnahme beim SMI. Für ein Trockenheitsbulletin, welches sich auf Messungen von Trockenheitsparametern stützt, scheint dies nicht unbedingt erforderlich. Jedoch könnten Kenntnisse über den konkreten Einfluss von Schnee auf Trockenheit bessere Einschätzungen erlauben, wie sich eine Situation weiterentwickeln könnte.

Der Boden ist bei einer Schneedecke vor Austrocknung geschätzt, und auch im zeitlichen und räumlichen Nahbereich der Schneeschmelze ist dies weitgehend der Fall. Das Schmelzwasser einer geringen Schneedecke kann weniger in tiefere Schichten einsickern, so dass auch das Befeuchten des Bodens von unten her verringert wird. Dieser Effekt kann eher in höheren Lagen eine Rolle spielen.

Abfluss und Grundwasser können gerade im Frühjahr von Schnee bzw. Schneeschmelze beeinflusst sein, wobei der Abfluss wie immer auch dann vom Kraftwerksbetrieb beeinflusst ist. Wir schlagen vor, dies in Phase 2 insofern zu untersuchen, ob niedrige Schneemengen in einem Winter Abfluss und Grundwasser – allenfalls in welchen Regionen – nachteilig beeinflussen. Beispielsweise nach dem schneearmen Winter 2022/23 zeigten die meisten Regionen geringe Abflüsse trotz 'ansprechenden' Niederschlags, Tiefstände beim Grundwasser verzeichneten nur einige Regionen.

## 9. Konzept für ein Trockenheitsbulletin

Beim Trockenheitsbulletin geht es um Information zu drei 'trockenheitsaffinen' Parametern: Grundwasserspiegel, Abfluss, Bodenfeuchte. Zu Grundwasserspiegel und Abfluss bestehen aufs Kantonsgebiet verteilt Messungen seit 2010 bzw. 2006. Zur Bodenfeuchte bestanden zwar schon früher Messungen, für diese Zwecke aber erst seit 2023.

Die Realisierung dieses Bulletins soll im Rahmen der Phase 2 geschehen. Wir schlagen vor, in einem Trockenheitsbulletin nebst der Aufbereitung 'historischer Daten' (wie bisher) für jede Region und jeden der drei Parameter eine Warn- und eine Alarmschwelle ('orange' und 'rot') zu definieren, welche auf ausserordentliche Belastung durch Trockenheit hinweist. Im Falle der Landwirtschaft könnte es noch eine Phase 'gelb' geben, welche auf Bewässerungsbedürftigkeit hinweist. Die Höhe der Schwellenwerte ist durch das Amt für Natur und Umwelt festzulegen. Wir schlagen vor, zur Festlegung die entsprechenden Fachstellen miteinzubeziehen (Hydrologie, Landwirtschaft, Wald), und dass die Schwellenwerte ausserordentliche Situationen indizieren, die spezielle Massnahmen sinnvoll machen.

Im Folgenden konzeptuelle Bemerkungen zu den drei Parametern für das Trockenheitsbulletin:

### **Grundwasserspiegel und Abfluss:**

Entsprechend dem Grundlagendokument "Beobachtung von Grundwasserständen und Quellabflüssen" des BAFU (s. Seite 10) könnte das 10%-Perzentil der Schwellenwert für die Phase rot sein, ev. 15%- oder 20%-Perzentil für die Phase orange. Aufgrund der langsamen zeitlichen Änderungen dieser beiden Parameter wäre jedenfalls genug Zeit zwischen den beiden Phasen. Dieses Konzept würde zur Folge haben, dass es in jeder Region gleich viele Tage mit Phase rot bzw. orange gäbe. Sind da die regionalen Unterschiede bedeutsam, wäre zusammen mit den hydrologischen fachstellen ein anderes regionalspezifisches Schwellenwert-Konzept umzusetzen.

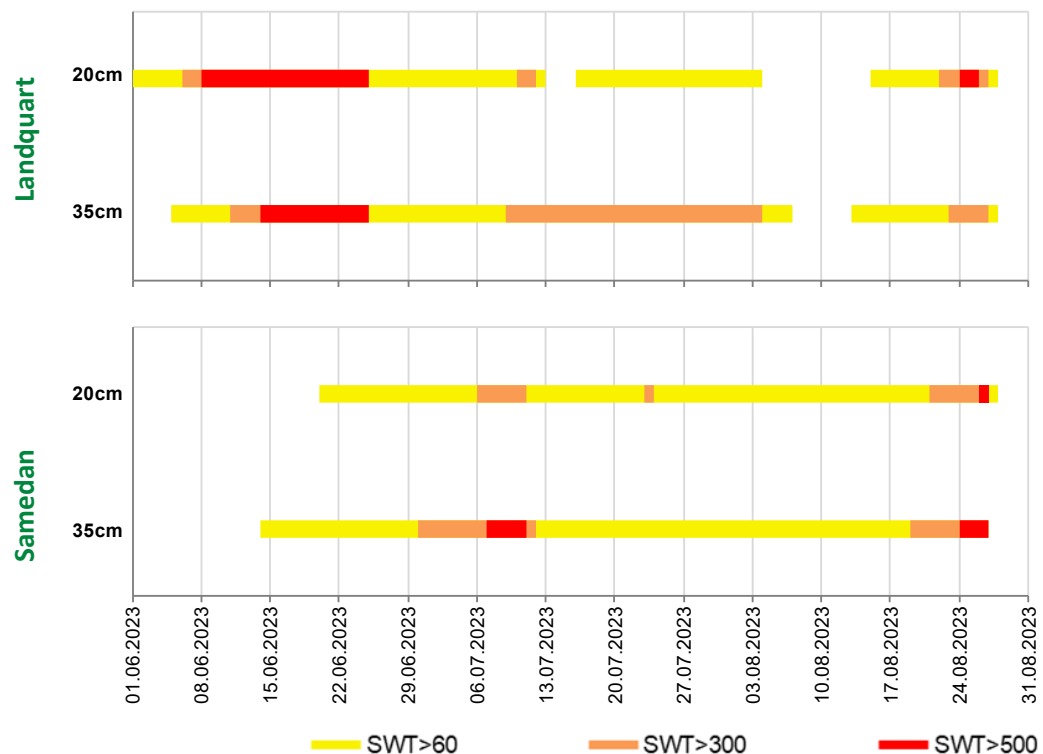
### **Bodenfeuchte:**

Zwar ist es eine Hypothek, dass für unsere Zwecke brauchbare Messungen der Bodenfeuchte erst seit 2023 vorliegen. Dennoch schlagen wir die Verwendung der eigenen Messungen für das Trockenheitsbulletin vor. Die Modellwerte wie der SMI können Schnee und die Nachbefeuchtung des Bodens aus tieferen Schichten infolge von Kapillareffekten nicht berücksichtigen; zudem wird in den Modellen für die Evapotranspiration eventuell der Einfluss der Strahlung unterschätzt; beides könnte erklären, warum der SMI die Trockenheit im Herbst teilweise überschätzt (s. Seite 35). Wie in Kapitel 7 dargelegt, schlagen wir die Verwendung der

Saugspannung (SWT T-21) für das Trockenheitsbulletin vor. Voraussetzung dabei wäre, dass die messtechnischen Fragen, die die SWT betreffen, geklärt werden.

Bezüglich der Höhe der Warn- bzw. Alarmschwelle gibt es einen Fixpunkt: den permanenten Welkepunkt (PWP), der gemeinhin zu 1500 cbar angesetzt wird. Einen solchen Wert gab es aber in den bisherigen Messungen nie; Maximalwerte waren 1100-1200 cbar, aber zu den Maximalwerten gibt es noch eine messtechnische Frage (s. Seite 35/36). In einer Pilotuntersuchung wurden Schwellen von 300 und 500 cbar postuliert und damit das Auftreten von orangen und roten Phasen simuliert. Daneben gab es noch eine gelbe Phase mit Schwelle von  $SWT=60$  cbar; darüber besteht eine Bewässerungsbedürftigkeit der Landwirtschaft (Aussage Plantahof).

### Simulation von Warn- und Alarmschwellen für Bodenfeuchte



**Abbildung 9.1: Simulation von Warn- und Alarmschwellen für Bodenfeuchte, Landquart und Samedan, 01.06. – 31.08.2023. Phase gelb:  $SWT > 60$  cbar; Phase orange:  $SWT > 300$  cbar; Phase rot:  $SWT > 500$  cbar.**

Phase gelb bestand fast immer. Die regionalen Unterschiede bzgl. orange und rot sind gross. Es ist möglich, dass in 35 cm Tiefe 'orange' ist und in 20 cm Tiefe nur 'gelb'. Unser Vorschlag ist, dass der schlechtere Wert der beiden Bodentiefen für das Trockenheitsbulletin herangezogen wird. Das Hauptproblem besteht aktuell darin, die grossen regionalen Unterschiede in den hohen SWT-Werten zu klären. Diese Erkenntnisse in die Aufnahme der Bodenfeuchte in das Trockenheitsbulletin umzusetzen, wird ebenfalls Aufgabe der Phase 2 sein.

## 10. Zusammenfassung

Der Kanton Graubünden möchte ein Trockenheitsbulletin herausgeben, in welchem für jede Region das Ausmass einer allfälligen Trockenheit für Landwirtschaft, Forst und Wasserversorgung übersichtlich entnommen werden kann. Da-bei geht es um Bodenfeuchte, Abfluss und Grundwasser.

In fast allen Regionen Graubündens gibt es Messungen im Zusammenhang mit Trockenheit. Die Parameter werden von verschiedenen Instanzen erhoben.

### Niederschlag (RR) von langjährigen Messstationen in Graubünden und Umgebung

Es gibt in Graubünden und naher Umgebung fünf langjährige Messstationen für Niederschlag (RR), deren Messwerte von MeteoSchweiz homogenisiert wurde. Es gibt beträchtliche Unterschiede in den mittleren Jahressummen des RR, auch innerhalb des Kantons. Im Mittel über die letzten 100 Jahre variieren sie von 690 bis 1633 mm.

Die mittlere Jahressumme des RR war in den letzten 30 Jahren minim höher als im Mittel der letzten 100 Jahre (+2%), wohingegen der RR der Vegetationsperiode (März - August) im Mittel genau gleichgeblieben ist. Es gab in den letzten Jahrzehnten keine Häufung von Jahren, in welchen der RR während der Vegetationsperiode weniger als 80% des langjährigen Mittels betrug. Auf der anderen Seite wird in den letzten Jahrzehnten von zunehmender Bodentrockenheit und entsprechenden Folgen für Landwirtschaft und Wald berichtet. Da der Niederschlag sich nicht merklich geändert hat, kann aus physikalischer Sicht nur eine zunehmende Verdunstung dafür verantwortlich sein.

### Grundwasserspiegel

Die Variationen der Grundwasserspiegel zeigen grosse Unterschiede zwischen den Regionen. Sie reagieren nur langsam auf Niederschlag, Temperatur und Verdunstung. Im Grundlagendokument "Beobachtung von Grundwasserständen und Quellabflüssen" im Rahmen der Nationalen Grundwasserbeobachtung NAQUA des BAFU, Abteilung Hydrologie wird von einer Unterschreitung der zu erwartenden Verhältnisse (also Trockenheit) gesprochen, wenn der aktuelle Messwert unter dem langjährigen 10%-Perzentil liegt. In der Zeitspanne 2010-2023 gab es zwei Phasen mit häufigeren solchen Tiefständen beim Grundwasser: 2016-2019 und 2022-2023. Das Auftreten solcher Tiefstände zeigt keine ausgeprägte Saisonalität.

### Abflüsse

Die mittleren Abflüsse sind in allen Regionen im Mai/Juni am höchsten. Der Abfluss reagiert nur langsam auf zunehmende Trockenheit infolge ausbleibenden RR bzw. erhöhter Verdunstung. Auch bei den Abflüssen wurde gemäß Vorgabe des

BAFU ein Wert unterhalb des langjährigen 10%-Perzentils als Tiefstand bezeichnet. Die Tiefstandphasen des Grundwassers treten typischerweise an mehreren Standorten in der gleichen Zeitperiode auf. Im 2022 wurden verbreitet die bislang niedrigsten Abflüsse (seit 2006) registriert; von Juni-August war die Abflussmenge in allen Regionen unterhalb des 10%-Perzentils. Im 2023 waren die Abflüsse nochmals sehr niedrig, ähnlich wie 2006/2007.

### Modellierung der Bodenfeuchte: Soil Moisture Index (SMI)

Beim Soil Moisture Index (SMI) handelt es sich um eine Modellgrösse von MeteoSchweiz, die anhand von Temperatur, Feuchte, Wind und Strahlung für jeden Tag gebildet wird und bis zum Jahr 1991 zurückgerechnet wurde. Die Bodenfeuchte wird durch den SMI somit dargestellt als Bodenfeuchte eines Modellbodens mit Modellvegetation in Volumenprozent Wasser.

Als Trockenmonat im Sinne des SMI wurde ein mittlerer SMI  $< 4.08\%$  definiert. Bei der Verteilung der Trockenmonate auf die acht Regionen unterscheiden sich deutlich zwei Gruppen: Das Engadin (Samedan und Scuol), das Puschlav (Robbia) und das Rheintal (Chur) weisen recht viele Trockenmonate auf, Landwasser (Davos), die Surselva (Disentis) und das Misox (Magadino und San Bernardino) nur wenige. Im Mittel über alle Regionen zeigen sich die teilweise (!) auch anderweitig trockeneren Jahre 1991, 1997, 2003, 2005, 2011, 2018 und 2022.

Gemäss SMI erweist sich der April als trockenster Monat in Graubünden, zum Teil gefolgt vom Mai. Im Hochsommer gibt es nur relativ wenige Trockenmonate. Im Rheintal und Engadin gibt es noch im Oktober etwas vermehrt Trockenmonate.

### Bodenfeuchte

Der Kanton Graubünden misst die Bodenfeuchte mit zwei Systemen für die Saugspannung und einem System für den Volumenwassergehalt des Bodens. Die Wasseraufnahmemöglichkeit der Pflanzen wird im Wesentlichen durch die Saugspannung gesteuert, gegen die die Pflanzen ankommen müssen bis zum 'Permanenten Welkepunkt' PWP, wo die Wasserversorgung der Pflanzen nicht mehr gewährleistet ist. Der PWP scheint 'nahezu allgemeingültig' bei 4.2 pF zu liegen ( $pF = \log_{10}(SWT [hPa]) = \text{dekadischer Logarithmus der Saugspannung in hPa}$ ;  $pF=4.2$  entspricht einer SWT von ca. 15 bar = 1500 cbar), währenddem der dann herrschende VWC von der Bodenbeschaffenheit abhängt und so im Bereich von 10-25% liegt.

### Konzept für ein Trockenheitsbulletin

Beim Trockenheitsbulletin geht es um Information zu drei 'trockenheitsaffinen' Parametern: Grundwasserspiegel, Abfluss, Bodenfeuchte. Zu Grundwasserspiegel und Abfluss bestehen aufs Kantonsgebiet verteilt Messungen seit 2010 bzw. 2006.

Zur Bodenfeuchte bestanden zwar schon früher Messungen, für diese Zwecke aber erst seit 2023.

Die Realisierung dieses Bulletins soll im Rahmen der Phase 2 geschehen. Wir schlagen vor, in einem Trockenheitsbulletin nebst der Aufbereitung 'historischer Daten' (wie bisher) für jede Region und jeden der drei Parameter eine Warn- und eine Alarmschwelle ('orange' und 'rot') zu definieren, welche auf ausserordentliche Belastung durch Trockenheit hinweist. Im Falle der Landwirtschaft könnte es noch eine Phase 'gelb' geben, welche auf Bewässerungsbedürftigkeit hinweist. Die Höhe der Schwellenwerte ist durch das Amt für Natur und Umwelt festzulegen. Wir schlagen vor, zur Festlegung die entsprechenden Fachstellen miteinzubeziehen (Hydrologie, Landwirtschaft, Wald), und dass die Schwellenwerte ausserordentliche Situationen indizieren, die spezielle Massnahmen sinnvoll machen.

Bei Grundwasserspiegel und Abfluss könnte entsprechend dem Grundlegendokument "Beobachtung von Grundwasserständen und Quellabflüssen" des BAFU das 10%-Perzentil der Schwellenwert für die Phase rot sein. Dieses Konzept würde zur Folge haben, dass es in jeder Region gleich viele Tage mit Phase rot bzw. orange gäbe. Sind da die regionalen Unterschiede bedeutsam, wäre zusammen mit den hydrologischen Fachstellen ein anderes regionalspezifisches Schwellenwert-Konzept umzusetzen.

Bei der Bodenfeuchte scheint uns die Saugspannung mit T21-Sensoren am besten geeignet als Bodentrockenheitssignal für das geplante Trockenheitsbulletin, vorbehältlich der Klärung verschiedener messtechnischer Fragen. Auch die Festlegung der Höhe der Warn- bzw. Alarmschwellen hängt von dieser Klärung ab. Grundsätzlich wäre auch der Bodenwassergehalt als Bodentrockenheitssignal denkbar, aber weniger gut geeignet.