

Die Wetter- Vorhersagekette

Methodik und technische Dokumentation

topo[^]alpin

Version 1.0 — 20. August 2026

Kurzfassung. Zwischen der Ausgabe eines Wettermodells und einer Zahl, die für einen benannten Gipfel gilt, liegt eine Kette aus Auswahl, Gewichtung, Umrechnung und Korrektur. Dieses Dokument beschreibt diese Kette für topo[^]alpin vollständig: welche sechs Modelle einfließen und mit welchem Gewicht, wie Nullgradgrenze, Regen-Schnee-Grenze, Niederschlagsphase, Neuschneemenge, Wind, Böen, Gewitterrisiko und Wettersymbol daraus entstehen, und welche Konstanten dabei wirken. Wo ein Verfahren aus der Literatur stammt, ist die Quelle genannt; wo ein Wert gesetzt ist, steht das dabei. Kein hier beschriebenes Verfahren ist gegen Beobachtungsdaten kalibriert — Kapitel 16 benennt die daraus folgenden Grenzen einzeln.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Zielgrößen für Tourenentscheidungen	4
2	Stand der Forschung	5
2.1	Schnee-Wasser-Verhältnis	5
2.2	Niederschlagsphase	5
2.3	Böenparametrisierung	6
2.4	Multi-Modell-Ensembles	6
3	Datengrundlage	7
3.1	Bezug	7
3.2	Modelle	7
3.3	Herleitung nicht dokumentierter Eingangsgrößen	8
3.4	Zeitliche Struktur	8
3.5	Höhenbezug	9
3.6	Vertikales Profil	10
4	Modell-Ensemble und Gewichtung	12
4.1	Grundgewichte	12
4.2	Vorlaufzeitabhängige Umgewichtung	13
4.3	Aggregationsvorschriften	13
4.4	Modellfamilien	14
5	Nullgradgrenze	15
5.1	Verfahren	15
5.2	Gültigkeitsbedingungen	15
5.3	Was die Zeile zeigt	15
5.4	Regen-Schnee-Grenze	16
5.5	Schneefallgrenze bei ICON	17
5.6	Feuchttemperatur am Standort	18
6	Niederschlagsphase	20
6.1	Eine Entscheidung, am Standort	20
6.2	Aufteilung für die Standorthöhe	20
6.3	Verzicht auf eine eigene Temperaturschwelle	21
7	Schnee-Wasser-Verhältnis	21
7.1	Anwendungsbereich	21
7.2	Temperaturabhängigkeit	22
7.3	Windkorrektur	23
7.4	Warum keine Dämpfung an der Nullgradgrenze	23
7.5	Vergleich mit dem profilbasierten Verfahren	24
8	Wind	25
8.1	Höhenzuordnung und Überblendung	25
8.2	Blockaggregation	25
8.3	Expositionszuschlag	25
8.4	Böen	25
9	Hebungskondensationsniveau	27
9.1	Berechnung	27
9.2	Was die Größe nicht beantwortet	27
9.3	Verwendung	27
10	Gewitterrisiko	28

10.1	Zusammensetzung	28
10.2	Angepasste CAPE-Schwellen	29
10.3	Feuchtebedingung	29
10.4	Wolkenschichten	30
10.5	Erreichbare Punktzahl	30
11	Wettersymbol	30
11.1	Rangfolge	30
11.2	Abstimmung	31
11.3	Korrekturkaskade	31
12	Weitere Größen	34
12.1	Sonnenscheindauer	34
12.2	Niederschlagstyp	34
12.3	Übrige Ensemble-Werte	34
12.4	Berechnet, aber nicht angezeigt	36
13	Höhenstufen	37
13.1	Phase je Höhenstufe	37
13.2	Welche Stufen gezeigt werden	38
14	Kennzeichnung geschätzter Werte	40
14.1	Warum die Schneemenge keine Kennzeichnung trägt	40
14.2	Wasserphase und Niederschlagsart	41
14.3	Symbol und Menge beantworten Verschiedenes	41
14.4	Wann statt einer Zahl ein Strich steht	42
15	Gesetzte Größen	43
16	Grenzen und offene Punkte	45
16.1	Punktgenauigkeit gegen Modellauflösung	45
16.2	Nicht dokumentierte Eingangsgrößen	45
16.3	Das Schnee-Wasser-Verhältnis bleibt eine Heuristik	45
16.4	Grenzen direkter Modellböen und Modellstreuung	46
16.5	Nicht kalibrierte Parameter	47
16.6	Unterschiedliche Grenzgrößen bei ICON	48
16.7	Rangfolge von Nebel	48
16.8	Unterschiedliche Modellmengen für Score und Symbol	48
16.9	Grenze der Phasenbestimmung	48
16.10	Höhenbezug der Phasenaufteilung	48
16.11	Wetterunabhängige Höhenkorrektur bei drei Modellen	49
16.12	Wechselnde Trägermenge der Wahrscheinlichkeit	50
16.13	Die vorhergesagte Niederschlagsmenge	50
16.14	Die Schicht über dem Standort	51
16.15	Einheitenführung in der Kette	51
16.16	Blitzpotential und Aufwind ohne Schwelle	51
17	Rechenbeispiele	52
17.1	Böe ohne Modellwert	52
17.2	Neuschneemenge	52
17.3	Phase am Standort	53
	Literatur	53

1 Einleitung

Wettervorhersagen für den Alpenraum stehen vor einem Auflösungsproblem: Die Maschenweite operationeller Modelle liegt zwischen 1,3 km und 25 km, während eine Tourenentscheidung an einem einzelnen Gipfel oder Grat getroffen wird. Zwischen der Modellausgabe und einer Zahl, die für einen benannten Punkt gilt, liegt daher eine Kette von Aggregations-, Umrechnungs- und Korrekturschritten.

Die Modelle selbst sind dokumentiert — AROME (Seity et al.¹), ICON (Zängl²) und das datengetriebene AIFS des ECMWF (Lang et al.³). Ihre relative Güte ist im DIMOSIC-Vergleich aus identischen Startbedingungen untersucht worden (Magnusson et al.⁴). Die nachgelagerte Verarbeitung dagegen — Gewichtung, Phasenbestimmung, Schneemengenschätzung, Symbolbildung — ist anwendungsspezifisch und in der Regel nicht offengelegt.

Dieses Dokument beschreibt, wie topo[^]alpin — eine Applikation für Tourenplanung, Navigation und Bergwetter im Alpenraum (Web und iOS) — diese Kette umsetzt. Es verfolgt denselben Zweck wie die Methodenpapiere zum Lawinengelände und zum Tour-Check. Wo Verfahren aus der Literatur übernommen sind, ist die Quelle angegeben; eigene Anpassungen und gesetzte Parameter werden als solche kenntlich gemacht und in Abschnitt 16 zusammengefasst.

Eine Einschränkung gilt für das gesamte Dokument und sei vorab genannt: **Kein hier beschriebenes Verfahren ist gegen Beobachtungsdaten kalibriert.** Die gesetzten Parameter — Modellgewichte, Böen- und Expositionsfaktoren, CAPE-Schwellen, Stützstellen der Schneemengenschätzung — sind fachlich begründet, aber nicht an Messungen angepasst. Abschnitt 16.5 führt sie vollständig auf; die Voraussetzungen für eine Validierung sind beschrieben, die Validierung selbst steht aus.

Nicht Gegenstand dieses Dokuments sind Physik, Assimilation und Gitterstruktur der Wettermodelle. Diese sind in den Modellbeschreibungen dokumentiert (Seity et al.¹, Zängl², Lang et al.³).

1.1 Zielgrößen für Tourenentscheidungen

Welche Größen eine Tourenentscheidung tragen, ergibt sich aus der Exposition, nicht aus meteorologischer Vollständigkeit. Wind und Böen bestimmen, ob man auf einem Grat noch handlungsfähig ist; Temperatur und Wind gemeinsam die thermische Belastung. Nullgradgrenze, Niederschlagsphase und Neuschneemenge legen fest, ob Fels, Wege und Zustiege sommerlich, nass, verschneit oder vereist anzutreffen sind. Konvektive Signale betreffen weniger das Ob als das Wann — sie verschieben Startzeiten und schließen exponierte Ziele aus.

Auf diese Größen ist die beschriebene Kette ausgerichtet. Sie erklärt, warum die folgenden Abschnitte sich mit Böen, Schnee-Wasser-Verhältnis, Nullgradgrenze und Gewitterrisiko befassen und nicht mit einer allgemeinen Wetterlage: Ein Tageswert für eine Region beantwortet keine der obigen Fragen.

Was die Kette leistet, ist eine Übersetzung — Modellfelder, die für Rasterzellen und genormte Höhen gerechnet werden, in eine Darstellung für einen benannten Punkt und dessen Höhenstufen. Was sie nicht leistet, ist eine Freigabe: Gelände, Route, Gruppe und Beobachtung vor Ort liegen außerhalb dessen, was ein Wettermodell abbilden kann.

2 Stand der Forschung

2.1 Schnee-Wasser-Verhältnis

Die Umrechnung von Niederschlag in Neuschneehöhe erfolgt über das Schnee-Wasser-Verhältnis (snow-to-liquid ratio, SLR). Vier Ansätze sind gebräuchlich.

Die **feste Annahme 10:1** ist verbreitet, aber nachweislich unzureichend: Roebber et al.⁵ zeigen, dass die Schneedichte von sieben Faktoren abhängt, darunter Temperatur in mehreren Schichten, relative Feuchte und externe Kompaktion durch Wind.

Temperaturbasierte Verfahren leiten die SLR aus einer einzelnen Temperaturgröße ab, üblicherweise dem Maximum der Luftsäule unterhalb 500 hPa. Sie sind einfach zu berechnen und benötigen kein Vertikalprofil.

Profilbasierte Verfahren gewichten schichtweise SLR-Werte über das Temperaturprofil. Cobb und Waldstreicher⁶ legen ein solches Verfahren vor; es liegt der operationellen Umsetzung des amerikanischen Wetterdienstes zugrunde⁷. Die zugehörige Tabelle erreicht ihr Maximum bei -16 °C und fällt zu tieferen Temperaturen wieder ab.

Statistische und lernende Verfahren modellieren die SLR als Funktion mehrerer Prädiktoren. Rosenow et al.⁸ vergleichen operationell eingesetzte Verfahren an fünf Winterstürmen.

Zwei neuere Arbeiten trainieren Random-Forest-Modelle auf Handmessungen von Neuschnee und Wasserwert. Veals et al.⁹ nutzen vierzehn Bergstationen im Westen der USA und erreichen ein Bestimmtheitsmaß von 0,43 bei einem mittleren absoluten Fehler von 2,94; die operationell eingesetzten Verfahren liegen im selben Vergleich zwischen 0,04 und 0,23 beziehungsweise zwischen 4,01 und 9,45. Pletcher et al.¹⁰ wiederholen das flächendeckend für die zusammenhängenden Vereinigten Staaten, aus den Meldungen eines Freiwilligennetzes und Reanalyse-Profilen, mit einem mittleren absoluten Fehler von 2,92 gegenüber 3,51 bis 4,76.

Für die hier beschriebene Anwendung ist daran zweierlei bemerkenswert: Die tragenden Prädiktoren sind bodennahe Größen — Temperatur, Windgeschwindigkeit, Feuchte —, und der Abstand zu den operationellen Kurven ist deutlich.

Ansatz	Eingangsgrößen	Vertikalprofil nötig	Referenz
Feste Ratio	–	Nein	–
Temperaturbasiert	Säulenmaximum	Nein	–
Profilbasiert	Schichtweise T , Feuchte, Vertikalwind	Ja	⁶⁷
Statistisch / lernend	Mehrere Prädiktoren	teils	⁵⁹¹⁰

Tabelle 1: Ansätze zur Bestimmung des Schnee-Wasser-Verhältnisses.

topo^alpin verwendet ein temperaturbasiertes Verfahren, da die Open-Meteo-Schnittstelle kein vollständiges Vertikalprofil je Modell und Zeitschritt liefert. Die Abweichung zum profilbasierten Verfahren ist in Abschnitt 7.5 quantifiziert.

2.2 Niederschlagsphase

Die Unterscheidung zwischen Regen und Schnee über eine feste Lufttemperatur von 0 °C ist empirisch widerlegt. Jennings et al.¹¹ werteten 17,8 Millionen Beobachtungen über 29 Jahre auf der Nordhalbkugel aus: Die Temperatur gleicher Häufigkeit liegt im Mittel bei $1,0\text{ °C}$ und für 95 % der Stationen zwischen $-0,4\text{ °C}$ und $2,4\text{ °C}$.

Verfahren auf Basis der **Feuchttemperatur** schneiden besser ab, da diese der Oberflächentemperatur eines fallenden Hydrometeors näher kommt und die Luftfeuchte berücksichtigt.

Wie viel damit zu gewinnen ist, grenzt eine hemisphärische Auswertung ein. Fontrodona-Bach et al.¹² prüfen an Stationsdaten von 1950 bis 2023, wie gut ein einfaches Temperatur-Index-Schneemodell mit Schwellen für Akkumulation und Schmelze arbeitet. Gegenstand ist also die Güte dieses Modells, nicht die Phasenbestimmung für sich — die Schwelle geht in das Modell nur als eine von mehreren Größen ein. Drei Ergebnisse sind für die Phasenfrage einschlägig: Die Schwelle 0 °C erfasst 89 % aller Tage mit Schneezuwachs — für Schmelztage liegt derselbe Wert bei 76 %, was hier nicht weiter verfolgt wird, weil das Verfahren keine Schmelze rechnet; im Tagesmittel trennt keine feste Schwelle Regen und Schnee optimal, weil niedrige Werte Schneetage als Regen und höhere Werte Regen als Schnee einordnen; und eine großflächig einheitliche Verschiebung der Schwellen verbessert die Modellgüte nicht durchgängig, sondern verschiebt sie je nach Zielgröße in beide Richtungen.

Für die Alpen halten die Autoren zugleich fest, dass gerade dort — maritim geprägt, mit mächtiger Schneedecke — Schneezuwachs bei Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt schwer zu erfassen ist, und empfehlen für solche Lagen ausdrücklich ein anderes Phasenverfahren, etwa über die Feuchttemperatur. Der Gewinn liegt damit im Grenzbereich, nicht in der Fläche.

Jennings et al.¹³ zeigen mit Methoden des maschinellen Lernens, dass die Genauigkeit der Phasenbestimmung aus bodennahen meteorologischen Größen eine obere Schranke hat, die auch komplexere Modelle nicht überschreiten. Dieser Befund begrenzt, was von einer Verbesserung des Verfahrens überhaupt zu erwarten ist.

2.3 Böenparametrisierung

Brasseur¹⁴ leitet Böen physikalisch aus der Ablenkung von Luftpaketen ab, die durch turbulente Wirbel aus höheren Schichten der Grenzschicht herabgeführt werden. Das Verfahren benötigt ein Profil von Windgeschwindigkeit und turbulenter kinetischer Energie.

Beide Verfahren setzen Grenzschichtgrößen voraus, die die verwendete Schnittstelle nicht liefert. topo^alpin verwendet daher einen empirischen höhenabhängigen Faktor (Abschnitt 8.4).

2.4 Multi-Modell-Ensembles

Die Zusammenfassung mehrerer Modelle kann gleichgewichtet oder gewichtet erfolgen. Eine belastbare Gewichtung setzt voraus, dass Modellgüte von Unterschieden in den Anfangsdaten getrennt werden kann. Magnusson et al.⁴ erreichen dies im DIMOSIC-Projekt, indem sieben globale Modelle über 122 Termine aus identischen Startbedingungen gerechnet wurden. In dieser Anordnung zeigt das IFS für die meisten Größen und Regionen den kleinsten quadratischen Fehler, ICON liegt an zweiter Stelle.

Die Hauptaussage der Studie relativiert allerdings jede Gewichtung nach Modellformulierung: Aus gleichen Anfangsdaten rechnen alle sieben Modelle ähnlich gut, weshalb die Autoren die Anfangsbedingungen als den stärkeren Faktor für Güteunterschiede zwischen den Vorhersagezentren bezeichnen. Für die operationelle Praxis, in der jedes Zentrum seine eigene Assimilation betreibt, bleibt der Unterschied bestehen — ableitbar ist aus DIMOSIC aber nur die Rangfolge unter **globalen** Modellen, nicht die Güte eines Regionalmodells.

3 Datengrundlage

3.1 Bezug

Alle Modelldaten werden über Open-Meteo¹⁵ bezogen; die Applikation fragt keine Wetterdienste direkt ab. Betrieben wird dafür eine eigene Open-Meteo-Instanz.

3.2 Modelle

Modell	Betreiber	Native Auflösung	Reichweite
ICON D2 ²	DWD	2,2 km	~ +47 h
AROME France ¹	Météo-France	2,5 km	~ +47 h
ICON EU ²	DWD	6,5 km	~ +118 h
ECMWF IFS	ECMWF	25 km	~ +230 h
AIFS ³	ECMWF	25 km	~ +230 h
GFS	NOAA	13 km	~ +230 h

Tabelle 2: Verwendete Modelle. Angegeben ist die native Auflösung des Betreibers, nicht das Ausgabegitter der Schnittstelle. Die Reichweiten schwanken über den Lauf-Zyklus um etwa ± 6 h.

AIFS ist das datengetriebene Vorhersagesystem des ECMWF (Lang et al.³). Es läuft seit dem 25. Februar 2025 operationell parallel zum physikbasierten IFS — das erste maschinell gelernte Modell, das ein Wetterdienst in den Regelbetrieb übernommen hat.

Größe	Verfügbar in
Niederschlag, Temperatur, 10-m-Wind, Feuchte	alle
Bodendruck	alle
Böen	alle außer AIFS
Höhenwind 850/700 hPa	alle
Drucklevel-Temperatur, -Feuchte und -Höhe	alle, je Modell auf verschiedenen Flächen (Abschnitt 3.6)
Schnee- und Regenmenge getrennt	alle
Schnee-Wasseräquivalent	alle
Feuchttemperatur-Grenze	ICON EU, ICON D2
WMO-Wettercode ¹⁶	alle
Niederschlagswahrscheinlichkeit	ECMWF, GFS, ICON EU
Niederschlagstyp	nur ECMWF
Sonnenscheindauer	alle
Schneehöhe	ICON EU, ICON D2, ECMWF, GFS
CAPE	alle außer AIFS
Schauer (konvektiver Niederschlag)	alle
Konvektive Hemmung, Lifted Index	nur GFS
Konvektive Wolkenobergrenze	ICON EU, ICON D2
Grenzschichthöhe	nur GFS
Bewölkung gesamt	alle

Größe	Verfügbar in
Bewölkung tief, mittel, hoch	alle

Tabelle 3: Verfügbarkeit der **ausgewerteten** Größen je Modell, an der Schnittstelle über alle sechs Modelle gemessen. Fehlende Werte werden aus der Mittelung ausgeschlossen, nicht als Null gewertet.

Die Abfrage holt darüber hinaus Größen, die **noch nicht ausgewertet** werden. Sie stehen hier getrennt, weil ihr Vorhandensein sonst als Verwendung gelesen würde: Sie sind Rohstoff für benannte offene Punkte, nicht Bestandteil einer Rechnung.

Größe	Verfügbar in
Feuchttemperatur des Dienstes	alle
Untergrenze der konvektiven Bewölkung	ICON EU, ICON D2
Blitzpotential	nur ICON D2
Aufwind	nur ICON D2
Wind in 80–200 m	alle
Sättigungsdefizit des Dampfdrucks	alle
Oberflächentemperatur	alle außer AROME
Direkte Normalstrahlung	alle
Säulengehalt Wasserdampf	ECMWF, GFS
UV-Index	nur GFS
Abfluss	nur ECMWF

Tabelle 4: Mitgeführte, aber nicht ausgewertete Größen. Die Verfügbarkeit ist an denselben Antworten gemessen wie oben. Wofür sie vorgesehen sind, steht in Abschnitt 16.

Tiefe und hohe Bewölkung liegen für alle Modelle vor, werden aber nur aus ICON ausgewertet — eine Entscheidung, keine Nichtverfügbarkeit (Abschnitt 10.4). Dass die konvektive Hemmung und der Lifted Index ausschließlich von GFS stammen, ist für den Gewitterrisiko-Score maßgeblich (Abschnitt 10.1, Abschnitt 16.8).

3.3 Herleitung nicht dokumentierter Eingangsgrößen

CAPE, Convective Inhibition, Lifted Index, Nullgradgrenze, Schneefall und gefühlte Temperatur werden nicht von den Modellen geliefert, sondern beim Datenanbieter abgeleitet. Die Dokumentation nennt für diese Ableitungen keine Referenzen; angegeben ist eine Quelle für die Bewölkung, ein Verweis auf FAO-56 für die Verdunstung und auf WMO-Richtlinien für den UV-Index. Für die gefühlte Temperatur wird die Skala nach Steadman¹⁷ angegeben; der Wert wird unverändert übernommen.

Die eigene Verarbeitung ist damit belegbar, die Herleitung dieser Eingangsgrößen nicht. Konsequenzen sind in Abschnitt 16.2 beschrieben.

3.4 Zeitliche Struktur

Abgerufen werden zehn Prognosetage und drei Vergangenheitstage in stündlicher Auflösung. Die Auswertung fasst je vier Blöcke zu sechs Stunden pro Tag zusammen (00–06, 06–12, 12–18, 18–24 Uhr Ortszeit); für die Kurzfristansicht bestehen dieselben Blöcke in drei- und einstündiger Länge. Alle drei Auflösungen durchlaufen dieselbe Verarbeitungskette.

Innerhalb eines Blocks werden Mengen summiert (Niederschlag, Schnee, Regen, Sonnenscheindauer), Zustandsgrößen gemittelt (Wind, Feuchte, Kondensationsniveau), Extremgrößen als Maximum oder

Minimum geführt (Temperatur, Böen, CAPE, gefühlte Temperatur) und der Wettercode aus der Blockmitte gelesen. Das gilt für die Stunden **innerhalb** eines Blocks; über die Modelle hinweg folgt die Böe einer eigenen Vorschrift (Abschnitt 8.4). Die Gesamtschneehöhe ist ein Zustandswert und wird mit dem letzten Stundenwert des Blocks angesetzt.

Der Wettercode aus der Blockmitte ist dabei ein **Startwert**, nicht das letzte Wort. Er liefert bei stabiler Wetterlage einen repräsentativen Zustand und verhindert, dass ein einzelner kurzer Schauer einen ganzen Block als Regen darstellt. Er beschreibt aber eine Stunde von sechs, und zwei Korrekturen greifen danach.

Dauert ein schwererer Zustand im Block lange genug an, übernimmt er (Abschnitt 11.2). Sonst trüge ein Block, in dem fünf Stunden Schauer fallen und die mittlere trocken bleibt, ein Wolkensymbol.

Steht der Code im Widerspruch zur Niederschlagsmenge des Blocks, greift die Korrekturkaskade (Abschnitt 11.3). Ein trockener Mittelpunktcode neben einer sichtbaren Menge wäre für sich genommen korrekt aggregiert, in der Zelle aber widersprüchlich, weil die Anzeige die unterschiedlichen Bezugszeiten nicht erklärt.

Schwellen, die auf Mengen wirken — die Korrekturkaskade des Wettersymbols (Abschnitt 11.3) — skalieren mit der Blocklänge, damit ein Einstundenblock nicht an einer Sechsstundenschwelle gemessen wird.

3.5 Höhenbezug

Drei Höhen sind zu unterscheiden.

Die **Standorthöhe** ist die Höhe des benannten Punktes, aus OpenStreetMap oder sonst aus dem eigenen Geländemodell. Sie wird der Schnittstelle mitgegeben, die daraufhin die bodennahen Felder auf diese Höhe umrechnet. Die Art dieser Umrechnung ist **modellabhängig** und beim Datenanbieter nicht dokumentiert (Abschnitt 3.3); sie lässt sich aber messen, indem dieselbe Koordinate zweimal mit verschiedener Höhenangabe abgefragt wird.

Über 48 Stunden an der Zugspitze, `elevation=1000` gegen `elevation=3000`:

Modell	ΔT Median	ΔT Spanne	K je 100 m
ICON EU	−10,25	−12,00 ... −8,40	0,51
ICON D2	−13,10	−15,00 ... −9,50	0,66
AROME	−13,10	−14,30 ... −11,90	0,66
ECMWF IFS	−13,00	−13,00 ... −13,00	0,650
GFS	−13,00	−13,00 ... −13,00	0,650
AIFS	−13,00	−13,00 ... −13,00	0,650

Tabelle 5: Wirkung der Höhenangabe auf die 2-m-Temperatur, gemessen an zwei Abfragen derselben Koordinate und desselben Zeitraums.

Bei ECMWF, GFS und AIFS folgt sie im geprüften Zeitraum einer festen Rate von 0,650 K je 100 m — in jeder einzelnen Stunde, ohne Streuung. Bei ICON EU, ICON D2 und AROME ist sie zeitvariabel; ICON EU liegt mit 0,51 K je 100 m zudem systematisch abseits der Standardrate. Ein zweiter Beleg derselben Trennung ist die relative Feuchte: Bei der ersten Gruppe verschieben sich Temperatur und Taupunkt um denselben Betrag, sodass sie über beide Höhen unverändert bleibt; bei ICON D2 wandert sie von 79 auf 85 %, bei AROME von 86 auf 97 %.

Die Verarbeitung übernimmt die auf Standorthöhe bereitgestellten Werte und führt keine zweite Temperatur-Höhenkorrektur aus. Was daraus für die Phasenbestimmung folgt, steht in Abschnitt 16.11.

Die Standorthöhe steuert außerdem die Wahl der Windquelle (Abschnitt 8.1), den Böenfaktor (Abschnitt 8.4) und — über die Feuchttemperatur — die Aufteilung des Niederschlags in einen festen und einen flüssigen Anteil (Abschnitt 6.2).

Die **Gitterpunkthöhe** ist die Geländehöhe, die das jeweilige Modell an dieser Stelle führt. Sie geht ausschließlich in das Hebungskondensationsniveau ein, das als Höhe über Grund berechnet und mit ihr auf Meereshöhe umgerechnet wird.

Liefert weder OpenStreetMap noch das Geländemodell eine Standorthöhe, tritt die Gitterpunkthöhe an ihre Stelle. Die Schnittstelle gibt bei einer Abfrage über mehrere Modelle nur einen Höhenwert zurück — den des ersten Modells —, sodass in diesem Rückfall die Höhe eines Modells die Verarbeitung aller sechs steuert. Der Fall ist im Datenmodell benannt und bleibt damit unterscheidbar.

Die Spannweite dieser Höhen ist erheblich und in Abschnitt 16.1 bewertet.

3.6 Vertikales Profil

Mehrere Größen brauchen den Zustand der Atmosphäre auf einer Höhe, die nicht die Standorthöhe ist: die Nullgradgrenze, die Regen-Schnee-Grenze und die Phase je Höhenstufe des Anzeigegitters. Grundlage ist dafür ein Profil aus den Druckflächen des jeweiligen Modells.

Abgefragt werden Temperatur, relative Feuchte und geopotentielle Höhe auf sechs Flächen. Welche davon ein Modell führt, ist verschieden:

Fläche	ICON EU	ICON D2	AROME	ECMWF	GFS	AIFS
950 hPa, $\approx$ 540 m	ja	ja	ja	–	ja	–
925 hPa, $\approx$ 760 m	ja	–	ja	ja	ja	ja
850 hPa, $\approx$ 1492 m	ja	ja	ja	ja	ja	ja
800 hPa, $\approx$ 2030 m	ja	ja	ja	–	ja	–
700 hPa, $\approx$ 3097 m	ja	ja	ja	ja	ja	ja
600 hPa, $\approx$ 4200 m	ja	ja	ja	ja	ja	ja
500 hPa, $\approx$ 5742 m	ja	ja	ja	ja	ja	ja

Tabelle 6: Druckflächen je Modell. Die Höhen sind Medianwerte aus 6940 Modellstunden über drei Alpengipfel; sie schwanken mit der Wetterlage um mehrere hundert Meter.

Die Auswahl folgt den Höhen, die das Anzeigegitter tatsächlich zeigt, nicht einer gleichmäßigen Staffelung. Mit 850, 700 und 500 hPa allein stünde die 1000-m-Zeile in **jeder** der 6940 gemessenen Modellstunden unter der tiefsten Fläche, und zwischen 700 und 500 hPa klaffte eine Lücke von 2645 m. 925 und 950 hPa decken die untere Zeile ab — zwei Flächen, weil kein einzelnes Niveau bei allen fünf Modellen vorliegt —, 800 hPa trägt das Tourenband, und 600 hPa halbiert die obere Lücke und sichert die 4000-m-Zeile.

800 hPa auf rund 2030 m schließt die Lücke im Tourenband. Ohne diese Fläche wäre 700 hPa auf 3097 m die tiefste über der Orographie, und jeder Gipfel darunter bliebe ohne Profilphase — obwohl das Modell dort rechnet. An zwölf Alpenstandorten über je 360 Stunden in Januar und Juli gemessen trägt sie die Gipfelzeile an der Zugspitze mit 0,60 statt 0,30 des Modellgewichts, am Nebelhorn mit 1,00 statt 0,50, am Triglav mit 0,80 statt 0,40. Die tieferen Zeilen sind auf sie nicht angewiesen, und hohe Gipfel wie der Mont Blanc tragen ihre Zeile ohnehin.

900 hPa bleibt unberücksichtigt. Es liegt auf rund 990 m — unter fast jedem Modellgelände im Alpenraum und unter jeder gezeichneten Zeile — und brachte in denselben 24 Fällen keinen einzigen zusätzlichen Wert.

3.6.1 Abgeleitete Flächen

Der Datendienst gibt Flächen heraus, die das Modell selbst nicht führt. ICON D2 liefert 925 hPa, obwohl seine Flächenleiter von 850 direkt auf 950 springt: Über 132 Stunden gemessen ist die relative Feuchte dort **exakt** die lineare Mischung der beiden Nachbarn, mit einer Abweichung von 0,0000 %. Bei ICON EU, das die Fläche wirklich führt, sind es bis zu 0,96 %, bei GFS 10,1 %.

Die Erkennung stößt aber an eine Grenze, und 900 hPa zeigt sie: Bei ICON D2 weicht die Feuchte dort über 4320 geprüfte Stunden um höchstens 0,6 Prozentpunkte von der Mischung aus 950 und 850 hPa ab. Das ist praktisch die Interpolation selbst, aber eben nicht **exakt** — eine Prüfung auf verschwindende Abweichung lässt sie durch. Eine Toleranzschwelle wäre der falsche Ausweg: In gut durchmischter Luft verläuft die Feuchte real fast linear, und dieselbe Fläche wäre dann je nach Wetterlage mal nativ, mal nicht. Eine Herkunft, die mit dem Wetter wechselt, ist keine.

Deshalb wird die Herkunft **festgeschrieben**, einmalig beim Aufnehmen einer Fläche und gegen das Nachbarpaar geprüft, das die Domain *ohne* sie führt. Das ist wesentlich: Läge 900 hPa in der Leiter, prüfte man 925 plötzlich gegen 950 und 900 statt gegen 950 und 850 — und der gesuchte Fall verschwände hinter der neuen Zwischenfläche. Die Erkennung aus den Werten bleibt daneben bestehen; sie fängt nur die exakte Interpolation, kann also nichts fälschlich verwerfen, und dient als Netz für Flächen, über die nichts festgeschrieben ist.

Solche Flächen werden aus dem Profil entfernt. In eine lineare Interpolation eingesetzt änderten sie nichts — sie liegen ja auf derselben Geraden —, aber sie täuschten eine vertikale Auflösung vor, die das Modell nicht hat, und diese Täuschung schlug sich in der scheinbaren Einigkeit der Modelle nieder. Geprüft wird über die gesamte Zeitreihe: Eine einzelne Stunde kann zufällig auf der Geraden liegen, hunderte hintereinander nicht.

3.6.2 Interpolation auf eine Zwischenhöhe

Zwischen zwei Flächen wird die Temperatur linear zur Höhe geführt, der Druck log-linear zwischen den beiden Druckkoordinaten — das passt zu Druckflächen und ist konsistenter, als vom Bodendruck aus barometrisch hochzurechnen.

Der Wasserdampf wird **nicht** als relative Feuchte interpoliert, sondern als Mischungsverhältnis. Aus T und RH ergibt sich je Fläche der Dampfdruck $e = RH \cdot e_s(T)$ und daraus

$$r = \epsilon \cdot \frac{e}{p - e}, \quad \epsilon \approx 0,622$$

Interpoliert wird $\ln r$, weil das Mischungsverhältnis mit der Höhe annähernd exponentiell abfällt; auf der Zielhöhe folgen daraus wieder Dampfdruck und relative Feuchte. Der Grund für den Umweg ist die exponentielle Temperaturabhängigkeit des Sättigungsdampfdrucks: Eine linear hochgezogene relative Feuchte erzeugt an Schicht- und Wolkengrenzen Verläufe, die es nicht gibt, während das Mischungsverhältnis den Wasserdampf gegen die trockene Luftmasse misst und bei Hebung erhalten bleibt.

Außerhalb der vorhandenen Flächen entsteht kein Wert. Liegt eine Zielhöhe unter der tiefsten oder über der höchsten Fläche, die das Modell führt, gibt es für diese Höhe keine Aussage.

3.6.3 Flächen unter der Modelloberfläche

Eine Druckfläche zählt nur, wenn sie mindestens 100 m über der Orographie des Modells liegt. Darunter ist sie keine gerechnete Luftsäule, sondern das Ergebnis der Druckflächen-Interpolation, die in die Modelltopographie hinein fortgeschrieben wird, damit Karten über Gebirge keine Lücken zeigen.

Der Unterschied ist messbar. An der Zugspitze liegen 950 und 925 hPa bei jedem Modell unter Grund; dort ist die relative Feuchte zwischen beiden Flächen in 253 von 253 Stunden identisch und die Temperaturdifferenz nie kleiner als +1,20 K. Über München, wo dieselben Flächen freie Atmosphäre sind, trifft die Feuchtegleichheit auf 6 von 240 Stunden zu und die Differenz reicht bis −6,20 K — dort erscheinen Inversionen, unter Grund nicht.

Genau das ist der Grund für die Grenze: Eine Fortschreibung von der Gitteroberfläche nach unten kennt weder Kaltluftsee noch Inversion. Sie fiel im Tal zu warm aus und zeigte Regen, wo Schnee fällt.

Die 100 m sind eine technische Qualitätsschwelle, keine meteorologische Größe, und werden nirgends angezeigt. Sie halten Abstand zu der Schicht, in der die Fläche zwar nominell über der Orographie liegt, aber bereits von der bodennahen Anpassung des Modells geprägt ist. Mit 50 m lag die 850-hPa-Fläche von GFS an der Zugspitze — Orographie 1455 m, Flächenhöhe je Stunde 1492 bis 1553 m — genau auf der Schwelle und wechselte stundenweise die Seite.

Welche Fläche als tiefste übrig bleibt, hängt damit vom Standort ab und nicht nur vom Modell. Die Orographie wird je Modell in **zwei Schritten** ermittelt.

Der Höhenparameter rechnet nämlich nicht nur die Bodengrößen um, er verschiebt zusätzlich die **Gitterzelle**: Der Dienst sucht in der Umgebung die Zelle, deren Gelände der angefragten Höhe am nächsten kommt. An der Zugspitze liefert dieselbe Koordinate ohne Höhenangabe die Zelle 47,4375/11,0 mit 1638 m, mit der Gipfelhöhe dagegen 47,375/10,9375 mit 1848 m — und die Druckflächen stammen aus der zweiten. Gemessen stimmen sie dort in 48 von 48 Stunden überein und in der ersten in keiner einzigen.

In der Antwort steht unter der Höhe nur der angefragte Wert, nicht das Gelände. Deshalb wird erst mit der Standorthöhe gefragt, **welche** Zelle gilt, und dann diese Zelle ohne Höhenangabe nach ihrem Gelände. Je Modell einzeln, weil eine Antwort für mehrere Modelle nur eine Koordinate führt.

Ohne diesen Umweg fiel die Orographie an drei Alpengipfeln 111 bis 220 m zu tief aus, und zwar bei ICON EU, ICON D2 und AROME — den drei Modellen, deren Zelle überhaupt wandert. Bei den groben Gittern bleibt sie stehen. Zu tief ist die unsichere Richtung: Die Untergrenze des Profils läge zu weit unten, und eine Fläche unter dem Modellgelände käme durch.

Wie weit die Orographie vom tatsächlichen Standort abweicht, führt Abschnitt 16.10 aus: Am Gipfel liegt sie stets darunter, im Tal stets darüber. Beides folgt aus derselben Glättung.

4 Modell-Ensemble und Gewichtung

4.1 Grundgewichte

Die Gewichtung folgt der Auflösung im Zielgebiet.

Modell	Gewicht	Begründung
ICON D2	2,0	Höchste Auflösung im Alpenraum

Modell	Gewicht	Begründung
ICON EU	2,0	Regionalmodell, hohe Auflösung
AROME	2,0	Regionalmodell, Westalpen
ECMWF IFS	1,5	Globales Referenzmodell
AIFS	1,5	Mittelfrist
GFS	1,0	Geringe Auflösung im Zielgebiet

Tabelle 7: Grundgewichte w_m . Summe bei allen aktiven Modellen: 10,0.

Die Werte sind gesetzt und nicht aus Verifikationsdaten abgeleitet (Abschnitt 16.5). Die Auflösung dient dabei als Stellvertreter für Güte — ein gängiger Ausgangspunkt, aber kein gemessener Zusammenhang. Ohne eigene Verifikation bleibt offen, ob diese Gewichtung im Alpenraum besser abschneidet als eine Gleichgewichtung aller Modelle. Sie ist damit eine überprüfbare Hypothese, keine nachgewiesene Modellgüte.

Diese Gewichte gelten deshalb **nur für Standortschätzungen** — für Größen also, bei denen die Frage lautet, welcher Wert an diesem Punkt der richtige ist. Für Konsensfragen gelten sie nicht; welche das sind, steht im folgenden Abschnitt.

4.2 Vorlaufzeitabhängige Umgewichtung

Ab einer Vorlaufzeit von drei Tagen gilt $w_{\text{GFS}} = 0,5$ und $w_{\text{ECMWF}} = w_{\text{AIFS}} = 2,0$; ICON EU behält 2,0.

Die Richtung dieser Anpassung ist durch den DIMOSIC-Vergleich gestützt (Magnusson et al. ⁴): Dort weist das IFS für die meisten Größen und Regionen den kleinsten Fehler auf, ICON folgt an zweiter Stelle. Zusätzlich sind die hochauflösenden Regionalmodelle ab Tag 3 überwiegend außer Reichweite (Tabelle 2).

Die Stütze ist allerdings schwächer, als die Zahlen nahelegen. DIMOSIC vergleicht sieben **globale** Modelle; ICON D2 und AROME sind nicht im Vergleich, und deren Gewichte lassen sich daraus nicht begründen. Zudem ist die Kernaussage der Studie, dass die Anfangsbedingungen stärker zur Güteunterscheidung beitragen als die Modellformulierung (Abschnitt 2.4). Die Umgewichtung ist damit eine Extrapolation aus einer verwandten Fragestellung, keine Ableitung.

Bezugsgröße ist die Vorlaufzeit ab dem ersten Prognosetag, nicht der Index im Datenfeld, das zusätzlich Vergangenheitstage enthält. Alle Ansichten (10 Tage, 48 h, 3 h) verwenden dieselbe Umrechnung.

4.3 Aggregationsvorschriften

Das Verfahren fasst Modelle auf drei Arten zusammen, und die Wahl richtet sich danach, was die jeweilige Größe aussagt.

Standortschätzungen — Nullgradgrenze, Wind, Kondensationsniveau, Niederschlag, Schnee, Regen, Feuchttemperatur, Sonnenscheindauer, Schneehöhe und Grenzschichthöhe — nutzen das gewichtete Mittel

$$\bar{x} = \frac{\sum_m w_m \cdot x_m}{\sum_m w_m}$$

über alle Modelle m mit gültigem Wert. Hier lautet die Frage, welcher Wert an diesem Punkt der richtige ist, und dafür ist die Auflösung ein vertretbarer Stellvertreter.

Konsensfragen zählen dagegen Modelle, statt sie zu wiegen: das Voting über den Wettercode, die Auswahl des schwersten Zustands im Block samt seiner Dauer, der Phasenkonsens, die Niederschlagswahrscheinlichkeit sowie die Indikatoren und Schwellen des Gewitter-Scores. Sie fragen nicht nach einem Wert, sondern danach, wie viele Modelle dasselbe sehen. Mit Gewichten gemessen entschiede dort die Gitterweite statt der Zustimmung: Zwei hochauflösende Alpenmodelle kämen auf eine Summe von 4,0, ECMWF und GFS zusammen auf 2,5 — bei gleicher Zahl zustimmender Modelle. Die Schwellen der Kaskade lauten deshalb auf Modellzahlen und nicht auf Gewichtssummen; sie liegen einheitlich bei zwei Modellen — der Ausreißerfilter der Abstimmung, der Rückfall ab Rang 80, der Phasenkonsens, das Schneesymbol und der Gewitterzuschlag.

Eine Größe im Konsensbereich bleibt bewusst gewichtet: die **Verbreitung** des Niederschlags (Abschnitt 11.3). Sie ist keine Schwelle, sondern ein Anteil — die Gewichtssumme der Modelle mit Niederschlag geteilt durch die Gewichtssumme derer mit einem Wert überhaupt. Wo eine Schwelle fragt, ob genug Modelle zustimmen, fragt ein Anteil, wie viel der verfügbaren Meinung nass ist; dort ist die Güte eines Modells im Alpenraum die richtige Währung. Die Begründung steht an der Stelle selbst.

Sicherheitsrelevante Extreme werden ungewichtet als Extremwert geführt: Die angezeigte Höchst- und Tiefsttemperatur sind das absolute Maximum beziehungsweise Minimum über die aktiven Modelle, ebenso die gefühlte Temperatur (Minimum) und CAPE (Maximum). Ein Modell, das eine Frostnacht vorhersagt, verschwindet damit nicht im Mittel. Die Böe folgt einer eigenen Vorschrift, die Modellwerte und eine höhenabhängige Untergrenze verbindet (Abschnitt 8.4).

4.4 Modellfamilien

Sechs Modellläufe sind nicht sechs unabhängige Meinungen. ICON D2 bezieht seine Ensemble-Randbedingungen aus dem übergeordneten ICON-System; die beiden sind im Nahbereich ein zeitlich gestaffelter Ansatz und keine zwei Stimmen.

Wo es um die **Breite** einer Zustimmung geht, zählt deshalb eine Quelle je Familie: ICON D2, solange es für die betrachtete Größe Daten liefert, danach ICON EU. Die Auswahl folgt damit dem Horizont des laufenden Modelllaufs, nicht einer festen Stundenzahl — die verschöbe sich mit dessen Alter. Betroffen sind das Kondensationsniveau und die angezeigte Datenbasis: Der Nutzer sieht fünf Vorhersageansätze, nicht sechs Modelle.

ECMWF IFS und AIFS bleiben getrennt. Sie teilen die Anfangsanalyse, verfolgen die Atmosphäre danach aber über grundverschiedene Ansätze — physikalische Integration gegen ein datengetriebenes Modell. Ihre Fehler sind korreliert, aber nicht redundant; sie zu halbieren wäre ein gesetztes Korrekturgewicht ohne Grundlage.

Beim **Erkennen** eines Gefahrenzustands gilt die Familienregel bewusst nicht. Dass ICON D2 und ICON EU dasselbe Gewitter melden, ist ein Hinweis, auch wenn beide aus einem Zweig stammen: Sie bilden verschiedene Auflösungen und Reichweiten ab. Die Kaskade prüft dort die Zahl der stützenden Modellläufe, nicht deren statistische Unabhängigkeit. Die Asymmetrie ist beabsichtigt — konservativ beim Erkennen, ehrlich beim Ausweisen der Breite. Blöcke, in denen ein schwerer Zustand ausschließlich aus einer Herkunft stammt, werden im Datenmodell festgehalten, damit sich später prüfen lässt, ob sie häufiger Fehlalarme oder häufiger frühe Warnungen sind.

Die Zuordnung folgt der Modellarchitektur, nicht einer gemessenen Fehlerkorrelation. Eine Auswertung an der Zugspitze über 312 Stunden stützt sie für die Temperatur — ICON D2 und ICON EU weichen dort im Mittel um 1,34 K voneinander ab, alle anderen Paare um 1,70 bis 2,87 K. Für

den Niederschlag zeigt dieselbe Auswertung keinen Unterschied: Alle Paare liegen zwischen 0,21 und 0,28 mm. Die Regel verhindert damit eine strukturelle Doppelzählung, ist aber keine aus Fehlerkorrelationen kalibrierte Gewichtung.

5 Nullgradgrenze

5.1 Verfahren

Die Nullgradgrenze wird nicht aus dem Feld `freezing_level_height` übernommen. Es ist über die Modelle nicht einheitlich definiert: An zwei Standorten über je 312 Winterstunden gemessen fällt ICON D2 in keiner Stunde unter seine Gitterhöhe und liegt in 299 beziehungsweise allen 312 Stunden exakt darauf — dort ist das Feld an der Modelltopographie abgeschnitten. ICON EU unterschreitet dieselbe Grenze in 280 von 312 und in allen 312 Stunden, GFS meldet in 104 beziehungsweise 73 Stunden null Meter. Ein Mittel über diese Felder verrechnete drei verschiedene Größen miteinander.

Stattdessen wird die Höhe gesucht, auf der die Temperatur im Profil des Modells (Abschnitt 3.6) ihr Vorzeichen wechselt. Zwischen zwei benachbarten Flächen mit $T_a > 0$ und $T_b \leq 0$ gilt

$$\text{FZ} = H_a + \frac{T_a}{T_a - T_b} \cdot (H_b - H_a)$$

Gesucht wird von unten nach oben, und die **erste** gefundene Grenze zählt. Bei einer Inversion schneidet die Null mehrfach; für eine Tour ist die unterste maßgeblich, weil oberhalb von ihr der kalte Teil des Berges liegt.

Alle sechs Modelle führen Druckflächen und können die Grenze tragen. Ob eines das in einer bestimmten Stunde tut, entscheidet die Geometrie: Die Nulllinie muss zwischen zwei Flächen liegen, die über dem Modellgelände des Modells selbst liegen. Über 360 Winterstunden an vierzehn Alpenstandorten gemessen trägt AROME an zehn davon keine Grenze bei, weil seine Säule durchgehend unter null bleibt; im Sommer trägt es an zehn Standorten durchgehend.

5.2 Gültigkeitsbedingungen

Extrapoliert wird nicht. Liegt die Nullgradgrenze unterhalb der tiefsten oder oberhalb der höchsten Fläche, die das Modell führt, trägt dieses Modell für diese Stunde keinen Wert bei. Die Untergrenze ist damit modellabhängig und folgt der Flächenleiter aus Tabelle 6, nicht einer gesetzten Zahl.

Kein Wert entsteht außerdem, wenn zwischen zwei Flächen weniger als 50 m Höhendifferenz liegen oder wenn ein Modell weniger als zwei vollständige Flächen führt — vollständig heißt: Temperatur, Feuchte und geopotentielle Höhe zusammen. Eine halbe Fläche stützt nichts.

Der Blockwert entsteht als gewichtetes Mittel über die Stunden mit gültigem Vorzeichenwechsel, der Ensemblewert als gewichtetes Mittel über die Modelle, die einen solchen führen.

5.3 Was die Zeile zeigt

Ohne Extrapolation gibt es Lagen, in denen kein Modell eine Höhe liefert. Im Winter ist das der Regelfall: Die Grenze liegt dann unter der tiefsten Fläche über Grund, an der Zugspitze in keiner einzigen von 312 Stunden im Profil gefunden. Eine leere Zeile wäre dort die falsche Antwort — nicht

weil sie unhöflich wäre, sondern weil die für eine Tour entscheidende Auskunft sehr wohl vorliegt:
Auf jeder dargestellten Höhe herrscht Frost.

Die Zeile führt deshalb drei Zustände:

Höhe in Metern Mindestens 60 % der Modelle, die diesen Zeitpunkt abdecken, finden einen Vorzeichenwechsel im eigenen Profil. Der Wert ist das gewichtete Mittel über sie.

UNT Keine Höhe, aber mindestens 75 % des Modellgewichts melden auf **jeder** Zeile des Gitters Frost. Die Grenze liegt damit unter dem dargestellten Bereich. Die Schwelle ist höher als für die Meterzahl, weil die Aussage für das ganze Gitter gilt und nicht für eine Höhe.

Strich Weder das eine noch das andere. Keine Aussage ist eine Aussage.

Geprüft wird die Frostlage aus denselben Quellen wie die Phase — natives Profil über der Modelloberfläche, sonst die auf die Stufe umgerechneten Bodenfelder. Keine Druckfläche unter Grund, kein fortgeschriebener Gradient. UNT ist damit eine schwächere Aussage als eine Höhe, steht aber auf derselben Grundlage.

Der Bezugswert der 60 % sind die Modelle, die den jeweiligen Zeitpunkt abdecken, nicht alle sechs. Ein Modell, dessen Lauf endet, fehlt nicht — es reicht schlicht nicht so weit. ICON D2 endet nach rund zwei Tagen, ICON EU nach etwa acht; danach tragen die mittelfristigen Modelle allein, und gegen das volle Gewicht gerechnet verlöre die zweite Vorhersageweche die Zahl vollständig. Gemessen sind das 53 gegenüber 91 % der Stunden, obwohl ECMWF und AIFS dort in jeder Stunde ihres Laufs eine Grenze finden.

Die Unterscheidung gilt nur für das Ende einer Modellreichweite. Ein technischer Ausfall und ein Wert, den die Gültigkeitsprüfung verwirft, bleiben im Nenner — sonst verbesserte ein Fehler die Abdeckung. Wie breit die Basis gemessen an allen Modellen ist, läuft als eigene Kennzahl mit, ohne über die Anzeige zu entscheiden.

5.4 Regen-Schnee-Grenze

Neben der Nullgradgrenze wird eine zweite Höhe geführt: die Höhe, auf der die Anzeige des Höhengitters von Schnee auf Regen umschlägt. Wo das Druckflächenprofil sie trägt, entsteht sie aus demselben Profil und demselben Feuchttemperatur-Verfahren wie die Farbe der Zellen — dann beschreiben Linie und Fläche dieselbe Sache. Wo es sie nicht trägt, treten Nachrangquellen an seine Stelle (Abschnitt 5.4.1); die Schwelle bleibt in jedem Fall dieselbe.

Gesucht wird der Vorzeichenwechsel nicht bei $T_w = 0\text{ °C}$, sondern am Halbierungspunkt der Übergangszone der Phasenkurve (Abschnitt 6.1):

$$T_w^{\text{mid}} = \frac{T_w^{\text{Schnee}} + T_w^{\text{Regen}}}{2} = 0,75\text{ °C}$$

Dort ist der Niederschlag definitionsgemäß zur Hälfte fest, dort kippt die Zellfarbe. Der Wert ist aus den beiden Zonengrenzen **abgeleitet** und nicht daneben gesetzt: Verschieben sie sich, wandert die Grenze mit.

Die Linie ist damit nicht die Höhe, oberhalb derer ausschließlich Schnee fällt — das wäre $T_w = 0\text{ °C}$, gemessen rund 120 m höher. Sie ist die Mitte einer Übergangszone, die im Alpenraum rund 240 m dick ist. Die Zone selbst bleibt als zweifarbige Balken sichtbar.

Gegenüber der Nullgradgrenze liegt sie tiefer, und der Abstand ist keine Konstante: über 156 Blöcke an drei Alpengipfeln im Mittel 421 bis 587 m. Beide Höhen werden deshalb getrennt geführt und

getrennt benannt. Die Zahlenzeile zeigt weiterhin die Nullgradgrenze der Lufttemperatur — sie ist die Größe, die Lawinenlageberichte und Bergwetterprognosen nennen und an der sich Erfahrung eicht.

5.4.1 Woher die Höhe stammt

Das Profil trägt die Grenze nur, solange sie über der tiefsten brauchbaren Fläche liegt. Im Winter liegt sie darunter: Die Übergangsschicht steht dann zwischen Modelloberfläche und 700 hPa, und dort führt kein Modell eine Fläche. An der Zugspitze fand das Profil die Grenze im Januar über 504 Stunden in 0 % der Stunden (ICON EU, ICON D2, GFS) beziehungsweise 7 % (ECMWF); im August waren es 65 bis 100 %. An der Marge liegt das nicht — mit 0 m statt 100 m bleibt es bei 0 bis 14 %.

Eine Linie, die es im Sommer gibt und in der Skitourensaison nicht, ist keine. Je Modell und Stunde gilt deshalb diese Rangfolge, und der Blockwert entsteht aus je **einer** Höhe pro Modell:

1. **Eigenes Druckflächenprofil**, wenn es einen Vorzeichenwechsel über der Orographie findet. Durchsichtig gerechnet und an nativen Flächen verankert.
2. **snowfall_height**, die Schneefallgrenze, die ICON EU und ICON D2 selbst diagnostizieren. Im selben Januarzeitraum in 504 von 504 Stunden vorhanden. Sie meint dieselbe Frage wie unsere Rechnung und nicht die trockene Nullgradgrenze; im August liegen beide im Median 105 m (ICON EU) und 109 m (ICON D2) auseinander. ECMWF, GFS und AIFS führen das Feld nicht.
3. **Die stufenweise abgefragten Bodenfelder**. Aus den Feldern jeder Höhenstufe folgt eine Feuchttemperatur; gesucht wird der tiefste Vorzeichenwechsel zwischen zwei benachbarten Stufen. Das ist keine Fortschreibung vom Gipfelwert nach unten, sondern eine Interpolation zwischen eigenständig abgefragten Diagnosen. Über die tiefste und höchste Stufe hinaus wird nicht fortgesetzt.
4. Sonst keine Linie.

Die Herkunft läuft je Modell in den Daten mit. Ohne sie ließe sich ein Sprung am Ende der ICON-Reichweite nicht von einer Wetteränderung unterscheiden.

Die Nachrangquellen sind gröber als das Profil, und das ist der Grund für ihre Reihenfolge. **snowfall_height** ist eine Anbieterdiagnose, deren Herleitung nicht vollständig dokumentiert ist. Die Stufenfelder stützen sich auf Punkte im Abstand von 1000 m; wendet das Downscaling des Dienstes dieselbe Lapse Rate auf alle Höhen an, ist der gefundene Vorzeichenwechsel eher eine systematische Verschiebung als eine abgebildete Schichtung, und Talinversionen erfasst er nicht. Die angezeigte Höhe ist eine Orientierungsgröße, keine punktgenaue Messung.

5.5 Schneefallgrenze bei ICON

ICON EU und ICON D2 liefern mit **snowfall_height** eine eigene Diagnose: die Höhe, in der die Feuchttemperatur beim Abstieg 1,3 °C überschreitet. Das Feld ist auch außerhalb von Niederschlagsstunden definiert, weil es aus der Feuchtestruktur der Säule folgt und nicht am fallenden Niederschlag hängt.

Schneefallgrenze und Nullgradgrenze sind **verschiedene Größen**, keine Varianten derselben. Die eine beantwortet, wo fallender Niederschlag zu Schnee wird, die andere, wo die Luft den Gefrierpunkt erreicht. Sie werden deshalb getrennt geführt: Die angezeigte Nullgradgrenze beruht für alle Modelle mit Drucklevel-Daten auf der Interpolation nach Abschnitt 5.1. **snowfall_height** geht ausschließlich in die Phasenseite ein — dort ist die Feuchttemperatur die passendere Größe, weil sie der Temperatur

eines fallenden Hydrometeors näher kommt. Innerhalb der Phasenseite trägt das Feld die Regen-Schnee-Grenze, wenn das Druckflächenprofil sie nicht findet (Abschnitt 5.4.1).

Die Begründung liefert die Literatur zur Phasenbestimmung: Die Feuchttemperatur kommt der Oberflächentemperatur eines fallenden Hydrometeors näher als die Lufttemperatur und berücksichtigt die Luftfeuchte. Jennings et al.¹³ verwenden sie als zentrale Größe ihrer Untersuchung; Fontrodona-Bach et al.¹² empfehlen sie ausdrücklich für Klimate mit häufigem Niederschlag nahe dem Gefrierpunkt und nennen dabei die Alpen — ein Argument für den Grenzbereich, kein Beleg für generelle Überlegenheit (Abschnitt 2.2).

Drei Höhen sind dabei strikt zu unterscheiden: die Nullgradgrenze als Höhe mit $T = 0\text{ °C}$, die Feuchtkugel-Nullgradgrenze als Höhe mit $T_w = 0\text{ °C}$, und die operationelle Schneefallgrenze als Höhe, oberhalb derer Schnee am Zielniveau erwartet wird. Bei gesättigter Luft fallen die ersten beiden nahezu zusammen; in ungesättigter Luft liegt die Feuchtkugel-Nullgradgrenze mehrere hundert Meter tiefer. Die dritte kann je nach Definition über oder unter der zweiten liegen — manche operationellen Systeme setzen sie nicht bei $T_w = 0\text{ °C}$ an, sondern bei einem positiven Schwellenwert.

Die Differenz zwischen diesen Höhen ist damit nicht konstant. Sie hängt von Temperatur- und Feuchteprofil, Druck, Niederschlagsintensität, Schmelz- und Verdunstungsprozessen sowie von der Definition der jeweiligen Diagnose ab. Mehrere hundert Meter sind in ungesättigter Luft physikalisch möglich. Die Größen werden deshalb nicht über einen festen Höhenversatz ineinander überführt.

5.6 Feuchttemperatur am Standort

Die Diagnose von ICON deckt zwei von sechs Modellen ab. Für die übrigen wird die Feuchttemperatur selbst gerechnet — stündlich, für die Standorthöhe, aus Temperatur, relativer Feuchte und Bodendruck.

Der Grund dafür liegt in einer Eigenheit der Datenaufbereitung. Der Dienst rechnet Temperatur, Taupunkt, Feuchte und Druck auf die angefragte Höhe um; die Aufteilung des Niederschlags in einen flüssigen und einen festen Anteil rechnet er **nicht** um. Diese Aufteilung beschreibt die Gitterhöhe des jeweiligen Modells, und die liegt an hohen Gipfeln weit unter dem Standort — an der Zugspitze zwischen 318 und 1619 m tiefer, je nach Modell (Tabelle 27).

Die Feuchttemperatur ist damit die einzige Phasengröße, die für den Standort gilt. Gerechnet wird die psychrometrische Gleichung

$$e = e_s(T_w) - \gamma \cdot p \cdot (T - T_w)$$

numerisch, mit Bisektion zwischen Taupunkt und Lufttemperatur — ein Intervall, das die Lösung sicher einschließt. Liefert ein Modell keinen Bodendruck, greift die Direktformel von Stull¹⁸ und wird als Näherung gekennzeichnet. Alle sechs Modelle führen Bodendruck; der Zweig ist damit eine Rückfallebene für einzelne Lücken, keine Regel für ein bestimmtes Modell.

Der Druck ist der Grund, warum die Näherung nicht durchgehend genügt. Sie ist für Meereshöhe aufgestellt; auf 2962 m liegt der Bodendruck bei rund 710 hPa, und die Feuchttemperatur fällt dort bei sonst gleichen Werten um bis zu 0,56 K tiefer. Am Phasenübergang verschiebt das die Schneefallgrenze um rund hundert Meter. Bei Feuchtwerten ab 40 % bleiben beide Rechnungen innerhalb von 0,8 K beieinander; in der kalten, trockenen Ecke, die Stull ausdrücklich ausnimmt, trennen sie sich um 2,4 K.

5.6.1 Wo die Näherung endet

Diese Ecke ist keine Randbemerkung. Stull weist die Formel für -20 bis 50 °C und 5 bis 99% relative Feuchte aus; darunter verlässt sie die Physik. Bei $-25,1\text{ °C}$ und 12% Feuchte liefert sie $-22,69\text{ °C}$ — eine Feuchttemperatur **über** der Lufttemperatur. Das kann nicht sein: Ein fallendes Hydrometeor kühlt sich durch Verdunstung ab, es erwärmt sich nicht. Über vier Fixtures und 6576 Stunden gemessen trifft das 655 Stunden, im Höchstfall um $4,37\text{ K}$.

Der ausgewiesene Bereich allein fängt den Überlauf nicht: 40 dieser Stunden liegen innerhalb. Geprüft wird deshalb beides zusammen — der Bereich und die Schranke $T_w \leq T$ selbst. Fällt eine der beiden durch, wird für diese Stunde **kein** Wert ausgewiesen. Insbesondere kein auf die Lufttemperatur gedeckelter: Der sähe aus wie gesättigte Luft und wäre keine.

Genau diesen Deckel setzt der Datendienst. Sein Feld `wet_bulb_temperature_2m` meldet in 100% der Stunden, in denen dieselbe Formel überläuft, eine Feuchttemperatur gleich der Lufttemperatur — am Mont Blanc in $34,6\%$ aller Winterstunden, bei Feuchtwerten von 7 bis 73% . Das Feld ist dort keine Feuchttemperatur mehr, sondern die Sichtbarkeit eines Überlaufs.

Nach unten wird dagegen nicht verworfen, sondern zurückgeholt. In gesättigter Luft — 96 bis 100% Feuchte — unterschreitet die Näherung den Taupunkt um bis zu $0,37\text{ K}$. Das ist ihr gewöhnlicher Fehler, dessen ausgewiesener Mittelwert bei $0,3\text{ K}$ liegt, und dort steht die richtige Antwort fest: Bei Sättigung fallen Taupunkt, Feucht- und Lufttemperatur zusammen. Verwerfen trafe genau die Stunden, in denen es niederschlägt. Die beiden Feuchtebereiche überschneiden sich nicht, und darauf ruht die Unterscheidung.

Die Phase bleibt auch ohne Wert bestimmt. Weil die Feuchttemperatur nie über der Lufttemperatur liegt, ist der Niederschlag bei Frost am Standort sicher fest — eine Schranke, keine Schätzung. Der Ausfall der Näherung trifft allein die Kälte, also die Lage, in der die Antwort ohnehin feststeht; die berechneten Neuschneemengen der Winterfälle ändern sich dadurch nicht.

Alle sechs Modelle führen Bodendruck. Die Näherung ist damit keine Regel für ein bestimmtes Modell mehr, sondern eine Rückfallebene für einzelne Lücken.

5.6.2 Warum das Anbieterfeld kein Maßstab ist

Es liegt nahe, die eigene Rechnung am Feld des Dienstes zu messen. Das trägt nicht, und zwar aus einem grundsätzlichen Grund: Der Dienst rechnet Stull ohne Druck, unser Produktionswert löst die psychrometrische Gleichung mit Druck. Der Abstand zwischen beiden misst den Druckeffekt, nicht die Richtigkeit.

Fall	Median	p95	Maximum	über $0,3\text{ K}$
Zugspitze Winter	$0,343\text{ K}$	$0,586\text{ K}$	$1,916\text{ K}$	$60,2\%$
Mont Blanc Winter	$0,300\text{ K}$	$0,875\text{ K}$	$3,092\text{ K}$	$49,3\%$
Zugspitze August	$0,195\text{ K}$	$0,348\text{ K}$	$0,933\text{ K}$	$11,0\%$
Großglockner August	$0,200\text{ K}$	$0,319\text{ K}$	$0,722\text{ K}$	$7,6\%$

Tabelle 8: Abstand der psychrometrischen Rechnung zum Anbieterfeld. Ein Alarm bei $0,3\text{ K}$ feuerte im Winter in jeder zweiten Stunde — er misst die Höhe, nicht den Fehler.

Als Regression gegen die **eigene** Näherung ist das Feld dagegen brauchbar: gleiche Formel gegen gleiche Formel, gemessen $0,03\text{ K}$ im Median und $0,15\text{ K}$ im Maximum, über alle vier Fälle nahezu identisch. Diese Prüfung schlägt an, wenn sich die Umsetzung, die Feldzuordnung oder das Verfahren des Dienstes ändert. Der Produktionswert bekommt keine Schwelle gegen das Feld.

Die Feuchttemperatur trägt damit die gesamte Phasenentscheidung: Aus ihr entsteht der feste Anteil des Niederschlags (Abschnitt 6.2), und aus dem die angezeigte Schneemenge (Abschnitt 7). Sie ist die einzige Größe der Kette, die für die Standorthöhe gilt und zugleich über die Phase entscheidet.

6 Niederschlagsphase

6.1 Eine Entscheidung, am Standort

Die Phase entsteht an genau einer Stelle: bei der Aufteilung des Niederschlags für die Standorthöhe, aus der Feuchttemperatur. Der folgende Abschnitt beschreibt sie. Alles Weitere — welches Symbol ein Block trägt, ob eine Menge als Schnee oder als Regen zählt — liest dieses Ergebnis, statt es neu zu entscheiden.

Bedingung	Phase
kein Niederschlag	–
ECMWF: gefrierender Regen	Regen
ECMWF: Nassschnee oder Eisgranulat	Mischung
fester Anteil über der Schwelle, flüssiger darunter	Schnee
flüssiger Anteil über der Schwelle, fester darunter	Regen
beide über der Schwelle	Mischung
beide darunter	Mischung

Tabelle 9: Phasenentscheidung je Modell; die erste zutreffende Bedingung bestimmt das Ergebnis. Die Schwelle ist dieselbe wie überall in der Kaskade, 0,1 mm.

Der ECMWF-Niederschlagstyp steht voran, weil er keine zweite Ableitung derselben Größe ist, sondern eine eigene Modellaussage: Gefrierender Regen und Nassschnee sind Zustände, die eine Feuchttemperatur allein nicht ausdrückt.

Liegen beide Anteile unter der Schwelle, obwohl Niederschlag fällt, heißt das entweder Spurenmenge oder fehlende Feuchttemperatur. Beides ergibt Mischung — hier im Sinne von „beides möglich“, nicht „beides gemessen“. Ein Modell, das nichts sagen kann, soll weder ein Schnee- noch ein Regensymbol allein tragen.

In den Ensemble-Schneewert gehen Modelle mit Phase Schnee oder Mischung ein, in den Regenwert solche mit Regen oder Mischung.

6.2 Aufteilung für die Standorthöhe

Die Modelle geben ihre eigene Aufteilung in Regen und Schnee für die Höhe ihres Gitterpunkts aus, nicht für den Standort (Abschnitt 16.10). An hohen Gipfeln liegt der mehrere hundert bis über tausend Meter tiefer, und dort fällt Regen, wo am Gipfel Schnee ankommt. Die Menge wird deshalb neu aufgeteilt — aus der Feuchttemperatur am Standort (Abschnitt 5.4), die für die angefragte Höhe gilt.

Die Gesamtmenge des Modells bleibt dabei unverändert. Bestimmt wird allein, welcher Anteil davon am Standort fest ankommt:

$$P_{\text{fest}} = P_{\text{gesamt}} \cdot f_{\text{Schnee}}(T_w), \quad P_{\text{flüssig}} = P_{\text{gesamt}} \cdot (1 - f_{\text{Schnee}})$$

f_{Schnee} blendet linear zwischen zwei Grenzen über: unterhalb 0,0 °C Feuchtttemperatur gilt der Niederschlag als vollständig fest, oberhalb 1,5 °C als vollständig flüssig. Eine harte Schwelle ließe ein Zehntelgrad zwischen null und der vollen Menge entscheiden. Die Grenzen sind **gesetzt, nicht kalibriert**: Sie liegen in der Größenordnung operationeller Diagnosen — 0,5 °C beim amerikanischen Wetterdienst, 1,3 °C bei ICON —, sind aber an keiner Beobachtung geprüft und nicht an die Schneefallgrenze eines anderen Anbieters angepasst.

Die Aufteilung erhält die Menge: Fester Anteil, flüssiger Anteil und der Rest, für den keine Feuchtttemperatur vorliegt, ergeben zusammen die Gesamtmenge. Der dritte Anteil wird gesondert geführt, statt still zu verschwinden.

Sie hängt allein an der Thermodynamik des jeweiligen Modells und damit **nicht** an der Modellauswahl des Nutzers.

Diese Aufteilung trägt die Anzeige. Aus dem festen Anteil entsteht die angezeigte Schneemenge (Abschnitt 7), aus dem Verhältnis der beiden Anteile die Phase des Blocks (Abschnitt 6.1). Zunächst lief sie nur als Diagnose mit, damit ihr Abstand zur Aufteilung der Modelle messbar war, bevor er wirksam wurde (Abschnitt 16.10); seit dem Umbau der Schneekette ist sie der einzige Weg.

6.3 Verzicht auf eine eigene Temperaturschwelle

Die von Jennings et al.¹¹ nachgewiesene räumliche Streuung der Regen-Schnee-Schwelle wird nicht nachgebildet. An ihrer Stelle steht eine feste Übergangszone in der Feuchtttemperatur am Standort (Abschnitt 6.2), überall dieselbe. Ein zweiter, davon unabhängiger Abgleich findet nicht statt: Die Feuchtttemperatur am Standort ist die einzige Phasenentscheidung des Verfahrens (Abschnitt 6.1).

Eine eigene Schwellenkarte wäre eine Kalibrierung, die für den Alpenraum nicht validiert wurde. Der zu erwartende Gewinn ist zudem doppelt begrenzt: durch die von Jennings et al.¹³ gezeigte obere Schranke der erreichbaren Genauigkeit und durch den Befund von Fontrodona-Bach et al.¹², wonach verschobene Schwellen die Modellgüte nicht durchgängig verbessern.

7 Schnee-Wasser-Verhältnis

7.1 Anwendungsbereich

Jede angezeigte Schneemenge entsteht auf demselben Weg. Wasserbasis ist der Gesamtniederschlag des Modells, davon der feste Anteil nach der Feuchtttemperatur am Standort (Abschnitt 6.2), umgerechnet mit dem Schnee-Wasser-Verhältnis:

$$\text{Schnee [cm]} = \frac{P_{\text{gesamt}}[\text{mm}] \cdot f_{\text{Schnee}}(T_w) \cdot \text{SLR}(T_{\text{max}}) \cdot f_{\text{Wind}}}{10}$$

Eingangsgröße der SLR-Kurve ist das Maximum der Luftsäule **über dem Standort** (Abschnitt 7.2) — nicht allein die Temperatur in 2 m Höhe, aber auch nicht ohne sie.

Drei Größen, die sich an dieser Stelle anböten, tragen die Rechnung nicht.

Der gemeldete Regen taugt nicht als Wasserbasis. Bei ICON D2 schließt die Bilanz dort nicht: **rain** zuzüglich Schauer und Schnee-Wasseräquivalent liegt in 83 von 116 Niederschlagsstunden unter der Gesamtmenge, nie darüber, im Extrem fehlen 7,7 von 11,4 mm. An hohen Gipfeln kommt hinzu, dass die Gitterpunkte Schnee melden statt Regen — am Mont Blanc summiert sich **rain** über einen ganzen Winter auf 1 mm gegen 873 mm Niederschlag. Die Schätzung lief dort ins Leere.

Die vom Modell **gemeldete** Schneemenge trägt die Anzeige ebenfalls nicht. Sie ist beim Datendienst keine modellierte Höhe, sondern das Wasseräquivalent mal konstant 0,7 — an 115 Stunden über vier Gipfel ausnahmslos 0,700 cm je Millimeter. Neben einer temperaturabhängigen Kurve stünde damit ein flaches 7:1, für dieselbe Wetterlage um den Faktor 1,1 bis 4,3 verschieden. Das gemeldete Feld dient deshalb als Kontrollgröße.

Eine Dämpfung an der Nullgradgrenze findet ebenfalls nicht statt; die Begründung steht in Abschnitt 7.4.

Auch ein Modell ohne getrenntes Regen-Feld trüge auf diesem Weg eine Menge bei: Die Rechnung braucht Niederschlag, Temperatur und Feuchte, mehr nicht.

Das Verhältnis ist dimensionslos: Es sagt, wie viel Neuschnee aus einer Wassermenge wird, in **derselben** Einheit. Ein Verhältnis von 13:1 macht aus 2 mm Wasser 26 mm Schnee — also 2,6 cm. Die Niederschlagsfelder liegen in Millimetern vor, die Anzeige führt Zentimeter; dazwischen steht die Division durch zehn.

7.2 Temperaturabhängigkeit

Kristallform und Ablagerungsdichte hängen primär von der Temperatur ab. Libbrecht¹⁹ fasst den physikalischen Stand zusammen: Zwischen etwa -12 °C und -18 °C wachsen verzweigte Dendriten, die sich locker ablagnern (dendritische Wachstumszone); darüber und darunter entstehen Plättchen und Säulen höherer Dichte.

Die verwendete Kurve ist stückweise linear:

$$\text{SLR}(T) = \begin{cases} 8 & \text{für } T \geq 0\text{ °C} \\ 8 + \frac{-T}{2} \cdot 4 & \text{für } -2\text{ °C} \leq T < 0\text{ °C} \\ 12 + (-2 - T) & \text{für } -16\text{ °C} \leq T < -2\text{ °C} \\ \text{Cobb-Stützstellen} & \text{für } T < -16\text{ °C} \end{cases}$$

Eingangsgröße T ist das Maximum über die 2-m-Temperatur am Standort und die Druckflächen darüber. Welche Fläche dazuzählt, entscheidet ihre geopotentielle Höhe: Sie muss auf oder über der Standorthöhe liegen, mit 50 m Toleranz für die numerische Unschärfe. Die Toleranz erweitert die Säule nicht, sie verhindert nur, dass eine Fläche auf Standortniveau je nach Rundung heraus- oder hineinfällt. Fehlt die geopotentielle Höhe, bleibt die Fläche draußen — ob sie über dem Standort liegt, ist dann nicht entscheidbar, und eine zu warme Säule ist genau der Fehler, den diese Auswahl behebt.

Die 2-m-Temperatur ist damit der Ausgangswert, den die Druckflächen nur anheben können. An einem hohen Gipfel unter kalter Luft bleibt sie das Maximum. Am Mont Blanc (4808 m) verbleibt allein die 500-hPa-Fläche: Über 312 Winterstunden liegen 850 und 700 hPa im Median bei 1387 und 2894 m und damit in keiner einzigen Stunde über dem Standort. Das ist die sachgerechte Folge der Höhe, kein Ausfall.

Bis -16 °C steigt die Kurve: Je kälter, desto lockerer der Schnee. Darunter gilt das nicht mehr. Die dendritische Wachstumszone, in der die lockersten Kristalle entstehen, liegt etwa zwischen -10 und -20 °C ; bei tieferen Temperaturen nimmt die dendritische Struktur wieder ab, und der Schnee wird dichter statt lockerer.

Eine monoton weiterlaufende, bei -20 °C gedeckelte Kurve bildet diesen Verlauf nicht ab. Bei -16 °C stimmt die verwendete Kurve exakt mit der operativen Tabelle nach Cobb und Waldstreicher

überein — beide geben 26:1 —, und das ist der natürliche Übergangspunkt, keine gesetzte Marke. Darunter folgt sie deren Stützstellen, linear interpoliert:

Säulenmaximum	monotone Kurve	Cobb 2011
−16 °C	26,0	26,0
−18 °C	28,0	23,0
−20 °C	30,0	18,0
−22 °C	30,0	12,0
−24 °C	30,0	8,8
≤ −30 °C	30,0	7,2

Tabelle 10: Der kalte Ast, gegen eine monoton fortgesetzte Kurve gestellt. Übernommen ist allein die Temperaturform, nicht Cobbs Verfahren: Das zieht zusätzlich Vertikalbewegung und Feuchte heran, die hier nicht vorliegen. Die Tabelle begrenzt eine extrapolierte Überhöhung; eine für den Alpenraum kalibrierte Kurve ist sie nicht.

7.3 Windkorrektur

Roebber et al.⁵ führen die externe Kompaktion durch Wind als einen von sieben Faktoren der Schneedichte. Gemeint ist ein bodennaher Vorgang: Wind verlagert und zerbricht frisch gefallene Kristalle an der Oberfläche, wodurch die Dichte der obersten Schicht zunimmt.

Für den Abschlag wird deshalb je Modell dessen 10-m-Wind am Gitterpunkt verwendet. Der für die Anzeige nach Standorthöhe aus 10 m, 850 hPa oder 700 hPa überblendete Höhenwind (Abschnitt 8.1) geht nicht ein: Er beschreibt die Strömung auf Gipfelniveau, nicht die Verdichtung am Boden. Ein Expositionszuschlag wirkt ebenfalls nicht, und der Faktor greift je Modell vor der Aggregation — nur Regen, Temperatur und Wind desselben Modelllaufs bestimmen die für dieses Modell geschätzte Menge. Fehlt das 10-m-Feld, bleibt das Verhältnis unverändert, statt auf eine andere Windgröße auszuweichen.

Umgesetzt ist ein linearer Abschlag: unterhalb 20 km/h wirkungslos, ab 40 km/h eine Reduktion um 30 %, dazwischen linear interpoliert. Die Schwellen entsprechen 5,6 und 11,1 m/s und rahmen die Größenordnung von etwa 9 m/s ein, ab der die Literatur windbedingte Oberflächenkompaktion beschreibt. Die lineare Form und die Obergrenze von 30 % sind gesetzt und für den Alpenraum nicht gegen Beobachtungen kalibriert.

7.4 Warum keine Dämpfung an der Nullgradgrenze

Bis zur Umstellung lief neben der Standortphase ein zweiter Faktor mit: Lag die Nullgradgrenze über der Standorthöhe, wurde die Menge linear gedämpft und entfiel ab 300 m Überhöhung ganz.

Beide Faktoren beantworten dieselbe Frage — kommt der Niederschlag hier fest an? Sie zu multiplizieren setzt den Phasenanteil zweimal an. Schwerer wiegt, dass sie einander widersprechen.

Die Feuchttemperatur ist stets kleiner oder gleich der Trockentemperatur. Das Niveau, auf dem $T_w = 0$ gilt, liegt deshalb **unter** der Nullgradgrenze. Ein Standort dazwischen hat $T > 0$ und $T_w \leq 0$ — genau der Fall, für den die Feuchttemperatur da ist: Schnee bei Lufttemperatur über null, wenn die Luft trocken genug ist. Die Dämpfung unterdrückte dort, was die Feuchttemperatur richtig erkennt.

Gemessen an den Fixture-Standorten, über alle Stunden mit festem Anteil:

Standort	Stunden	Dämpfung voll	Dämpfung aus
Zugspitze, Januar	454	454	0

Standort	Stunden	Dämpfung voll	Dämpfung aus
Mont Blanc, Januar	519	519	0
Zugspitze, August	195	0	195
Großglockner, August	596	187	117

Tabelle 11: Im Winter liegt die Nullgradgrenze ohnehin unter dem Gipfel, und die Dämpfung tut nichts. Im Sommer löscht sie an der Zugspitze jede einzelne Stunde aus, in der die Feuchttemperatur festen Niederschlag ergab.

Ihre 300 m sind zudem kein physikalischer Wert. Die Nullgradgrenze sagt, wo $T = 0$ gilt — nicht, wie mächtig oder wie warm eine Schmelzschicht ist. Eine Schicht von 50 m bei $+0,2$ °C und eine von 600 m bei $+3$ °C ergeben dieselbe Höhe und eine völlig verschiedene Wirkung. Wofür sie ein Stellvertreter war — die Phase am Standort — wird direkt gerechnet.

Der Einwand bleibt bestehen, dass eine warme Schicht **über** dem Standort einen fallenden Kristall schmelzen lassen kann, während es am Standort friert. Das ist richtig, verlangt aber Temperatur und Feuchte auf mehreren Ebenen samt Schichtenergie — nicht einen Höhenabstand. Als eigenes Vorhaben ist es in Abschnitt 16 vermerkt.

Die Nullgradgrenze wird weiterhin angezeigt; sie ist für die Höhenorientierung nützlich. Sie ist nur kein verdeckter Mengenfaktor mehr. Damit hängt die Schneemenge auch nicht mehr an der Modellauswahl des Nutzers.

7.5 Vergleich mit dem profilbasierten Verfahren

Unterhalb -16 °C folgt die verwendete Kurve den Stützstellen der operationellen Tabelle⁷ und stimmt dort mit ihr überein. Oberhalb bleibt sie die Kuchera-Gerade und liegt über der Tabelle.

T (°C)	topo [^] alpin	Cobb–Waldstreicher	Differenz
−10	20	12	+8
−14	24	22,5	+1,5
−16	26	26	±0
−18	23	23	±0
−20	18	18	±0
−24	8,8	8,8	±0

Tabelle 12: Vergleich der SLR-Kurven. Unterhalb -16 °C sind beide identisch, weil die verwendete Kurve dort die Stützstellen der operationellen Tabelle 2011⁷ übernimmt.

Der verbleibende Abstand liegt damit im **wärmeren** Ast, zwischen -16 °C und 0 °C, und dort ist er der Unterschied zwischen zwei publizierten Verfahren, nicht eine eigene Zutat.

Übernommen sind allerdings nur die Stützstellen, nicht das Verfahren. Cobb und Waldstreicher⁶ bestimmen die Ratio aus dem Vertikalprofil — aus Vertikalgeschwindigkeit und Feuchte im Aufstiegsbereich, gewichtet nach dem Anteil der Schichten in der dendritischen Wachstumszone. Diese Größen liefert die verwendete Schnittstelle nicht je Modell und Zeitschritt. Die Kurve bleibt deshalb eine Temperaturheuristik, die an zwei Enden an ein Profilverfahren angelehnt ist, ohne eines zu sein. Bewertung in Abschnitt 16.3.

8 Wind

8.1 Höhenzuordnung und Überblendung

Standorthöhe	Quelle
< 1200 m	10-m-Wind
1200–1600 m	Überblendung 10 m → 850 hPa
1600–2300 m	850 hPa
2300–2800 m	Überblendung 850 → 700 hPa
> 2800 m	700 hPa

Tabelle 13: Höhenabhängige Wahl der Windquelle.

In den Übergangszonen wird mit $t = \frac{h-h_{\text{low}}}{h_{\text{high}}-h_{\text{low}}}$ linear überblendet: $v = (1-t)v_{\text{lo}} + tv_{\text{hi}}$. Die Richtung wird vektoriell über Sinus- und Kosinuskomponenten interpoliert, da das arithmetische Mittel zyklischer Größen unbrauchbar ist.

8.2 Blockaggregation

Die Geschwindigkeit wird über die Stunden des Blocks arithmetisch gemittelt. Für die Richtung wird die Richtung im Moment der Maximalgeschwindigkeit verwendet: Bei Frontdurchgängen liefert die Vektormittelung über sechs Stunden Richtungen, die zu keinem Zeitpunkt aufgetreten sind.

8.3 Expositionszuschlag

Für Gipfel und Sättel wird der Wind um 40 % beziehungsweise 30 % erhöht, um die im Modellgitter nicht aufgelöste Beschleunigung an exponierten Punkten abzubilden. Le Toumelin et al.²⁰ zeigen für komplexes Gelände Effekte dieser Größenordnung.

Gemeint ist der Mittelwind und die aus ihm abgeleitete Untergrenze der Böe. Auf eine Modellböe wirkt der Zuschlag nicht: Sie enthält den Turbulenzanteil bereits, und beides zu multiplizieren zählte ihn zweimal (Abschnitt 8.4).

Zur erreichbaren Genauigkeit im Alpenraum liegt eine Messkampagne von MeteoSwiss vor: Bugnard et al.²¹ vergleichen bodengebundene Fernerkundung mit Modellprofilen in komplexer alpiner Topographie und finden eine systematische Überschätzung der Windgeschwindigkeit, in Talnähe mit deutlichem Bias.

Die Klassifikation als Gipfel oder Sattel stammt aus OpenStreetMap und bildet die tatsächliche Exposition nicht ab (Abschnitt 16.5).

8.4 Böen

Die Modelle liefern Böen ausschließlich für 10 m über ihrem Gitterpunkt. Der angezeigte Mittelwind stammt oberhalb 1200 m dagegen von einer Druckfläche auf Standorthöhe (Tabelle 13). Beide Größen gehören damit zu verschiedenen Höhen und, wegen der Gitterpunkthöhen (Abschnitt 3.5), oft zu verschiedenen Orten. Aus dieser Unstimmigkeit folgen zwei Regeln.

Erstens wird eine Modellböe, die unterhalb des für dasselbe Modell und denselben Standort gewählten Höhenwinds liegt, auf diesen Höhenwind angehoben. Sie ist als Talböe keine brauchbare Aussage über den Standort — im Hochgebirge ist das der Regelfall, nicht die Ausnahme. Verworfen wird sie aber nicht: Das ließe das Modell ganz aus der Böenaggregation fallen, obwohl sein Höhen-

wind in den Mittelwind eingeht, und verschöbe das Böenmittel systematisch nach oben. Angehoben bleibt jedes Modell mit Böenfeld vertreten, ohne dass seine Talböe als Standortaussage durchgeht. Ein Modell ganz ohne Böenfeld geht nicht ein; seine fehlende Böe wird als Herkunftsinformation geführt und nicht durch einen Ersatzwert gefüllt.

Zweitens werden die so gesicherten Modellböen als **gewichtetes Mittel** über alle Modelle mit Böenfeld aggregiert — mit derselben Modellgewichtung wie der Mittelwind. Das Maximum über die Modelle wird nicht verwendet: Es stellte eine Einzelmodell-Extremmeinung neben einen Ensemble-Mittelwert und hob das angezeigte Verhältnis von Böe zu Mittelwind strukturell an.

Drittens wirkt der Expositionszuschlag s (Abschnitt 8.3) **nicht** auf die direkte Modellböe. Er korrigiert die vom Gitter nicht aufgelöste Geländebeschleunigung der Mittelströmung; eine Modellböe enthält den Turbulenzanteil bereits. Beides zu multiplizieren zahlte ihn zweimal. In den Boden geht s weiter ein, denn dieser wird aus dem Mittelwind abgeleitet.

Viertens besteht eine konservative Untergrenze. Mit dem Ensemble-Mittelwind W_0 vor dem Expositionszuschlag s , dem höhenabhängigen Böenfaktor $g(h)$ und dem Deckel $G_{\max}$ von 1,7 gilt

$$\text{Boden} = W_0 \cdot \min(g(h) \cdot s, G_{\max}), \quad \text{Böe} = \max(\text{Modellböenmittel}, \text{Boden})$$

Der Boden wirkt also nicht nur, wenn kein Modell eine Böe liefert, sondern auch dann, wenn das Mittel der Modellböen darunter bleibt.

Der Böenfaktor $g(h)$ ist stückweise linear: 1,2 unterhalb 1400 m, von dort linear auf 1,3 bei 2500 m, weiter linear auf 1,45 bei 4000 m und darüber konstant.

Herkunft	Bedingung	Kennzeichnung
Modellmittel	über dem Boden	keine
angehoben	Modellmittel unter dem Boden	keine
abgeleitet	kein Modell liefert ein Böenfeld	Tilde

Tabelle 14: Herkunft des angezeigten Böenwerts. Ein unverändertes Modellmittel gilt auch dann als modelliert, wenn die Gitterpunkte tiefer liegen als der Standort — das ist eine andere Aussage als „geschätzt“. Mitgeführt wird zusätzlich, aus wie vielen Modellen das Mittel stammt, wie viele davon auf ihren Höhenwind angehoben wurden und wie viele aktive Modelle gar kein Böenfeld liefern.

Gekennzeichnet wird allein die dritte Zeile. Der angehobene Wert bleibt unmarkiert, denn er ist der Regelfall der Gipfelkonstruktion und nicht die Ausnahme: An den Fixture-Standorten trifft er 85 % (Zugspitze) beziehungsweise 37,5 % (Großglockner) der Blöcke, während der abgeleitete Fall dort in **keinem** einzigen Block auftritt. Hinzu kommt, dass in ihm eine verwertbare Modellböe vorliegt — die Kennzeichnung steht ausdrücklich für deren Fehlen.

Unmarkiert heißt damit **modellverankert**, nicht **unbearbeitet**: Das Anheben ist ein spürbarer Eingriff in den Modellwert, nur eben einer, der von einer Modellböe ausgeht. Wie oft er greift, steht in der Herkunftszählung und nicht im Symbol.

Die Markierung erscheint damit nur, wenn die Modellbasis wegbricht: bei abgewählten Modellen oder in der langen Vorlaufzeit. Die Herkunft der übrigen Fälle wird mitgeführt (Abschnitt 14).

Physikalisch begründete Verfahren setzen Grenzschichtprofile voraus (Brasseur¹⁴); mit den verfügbaren Feldern sind sie nicht umsetzbar. Der verwendete Faktor ist empirisch (Abschnitt 16.2).

9 Hebungs-kondensationsniveau

9.1 Berechnung

Aus der Taupunktdifferenz am Standort wird mit einem Faktor von 125 m je Grad das Hebungs-kondensationsniveau geschätzt. Lawrence²² gibt dafür die Näherung

$$z_{\text{LCL}} \approx \left(20 + \frac{t}{5}\right) \cdot (100 - \text{RH})$$

an (t in °C, z_{LCL} in m), aus der für Bergtemperaturen ein Faktor vergleichbarer Größenordnung folgt. Gerechnet wird die Höhe über Grund, die anschließend mit der Gitterpunkthöhe des Modells (Abschnitt 3.5) auf Meereshöhe umgesetzt wird.

9.2 Was die Größe nicht beantwortet

Der Wert sagt, in welcher Höhe Wolke entstünde, wenn Luft **vom Standort aus** gehoben wird. Er sagt nicht, ob der Standort in Wolke liegt, und er ist keine Wolkenuntergrenze im Sinne einer beobachteten oder modellierten Schicht.

Das ist keine Feinheit der Auslegung, sondern folgt aus der Konstruktion: Der erste Term ist nie negativ, addiert wird die Standorthöhe. Der Wert kann damit niemals unter den Standort fallen. Über 4203 Modellstunden an drei Alpengipfeln gemessen liegt er in Blöcken mit Niederschlag im Mittel 324 bis 462 m über dem Gipfel — und in keinem einzigen der 156 Blöcke darunter, obwohl die Taupunktdifferenz 0,00 K erreicht und in 47 bis 73 % der Stunden unter 3 K liegt.

Eine Zahl, die als Wolkenuntergrenze gelesen wird, aber keine sein kann, ist irreführender als keine Zahl. Sie wird deshalb **nicht angezeigt**.

ECMWF bestimmt seine Wolkenbasis aus dem dreidimensionalen Modellprofil, indem von der Oberfläche aus nach einer Schicht mit nennenswertem Wolkenanteil und Kondensatgehalt gesucht wird. Eine solche Größe liegt an der Schnittstelle nicht vor; sie ließe sich aus der Feuchte auf Druckflächen auch nicht ersetzen, weil relative Feuchte weder Wolkenanteil noch Kondensat ist und die Stützstellen zwischen 700 und 600 hPa über 1000 m auseinanderliegen.

9.3 Verwendung

Die Größe steuert eine Regel der Symbolkaskade (Abschnitt 11.3): Ein bewölktes Symbol wird zu „teilweise bewölkt“, aufgewertet, wenn das Kondensationsniveau mehr als 1500 m über dem Standort liegt und kein Niederschlag fällt. Die Marge entspricht einer Taupunktdifferenz über 12 K — so trockene Luft schließt Wolke am Standort aus, und die Höhenbedingung trägt die Aussage allein.

Neben dem Mittel entstehen je Modell auch das Minimum über die Stunden des Blocks und die Zahl der Stunden unter der Standorthöhe. Beide werden gewichtet über die Modelle gemittelt — auch das Minimum, denn ein Extremum über die Modelle ließe ein einzelnes über den Block entscheiden. Sie dienen der Diagnose; angezeigt wird keine der drei Größen.

10 Gewitterisiko

10.1 Zusammensetzung

Indikator	Schwelle	Punkte
CAPE	$> 500 \text{ J/kg}$	+2
	$> 200 \text{ J/kg}$	+1
Convective Inhibition	$< 25 \text{ J/kg}$	+1
Lifted Index	< -4	+2
	< 0	+1
Schauer	$> 0 \text{ mm}$	+1
Konvektive Wolkenobergrenze	ein Lauf $> 7000 \text{ m}$	+1

Tabelle 15: Basispunkte des Scores, höchstens 7. CAPE geht als höchster Wert der Modelle ein — eine vorsorgliche obere Einhüllende. Konvektive Hemmung und Lifted Index sind GFS-Einzelwerte. Schauer gehen als gewichtetes Mittel ein, die konvektive Wolkenobergrenze als Stimme.

Der Lifted Index ist die Temperaturdifferenz zwischen einem gehobenen Luftpaket und seiner Umgebung in 500 hPa; negative Werte zeigen Labilität an. Die Convective Inhibition wird als Absolutwert geliefert; kleine Werte entsprechen einer schwachen Sperre. Beide Größen liefert ausschließlich GFS (Tabelle 3).

Die Kennzahl ist ein vorsorglicher Hinweis auf eine gewitterfähige Lage, keine Blitzwahrscheinlichkeit. Sie verbindet eine konsensbasierte Feuchtebedingung (Abschnitt 10.3) mit Stabilitätsgrößen, von denen CAPE als oberer Modellwert eingeht. Ein hoher Score zeigt damit den oberen Rand der modellierten Instabilität; er bedeutet nicht, dass ein einzelnes Modell sämtliche Bedingungen zugleich abbildet.

CAPE hängt vom gehobenen Luftpaket ab. Die Größe ist zwar vertikal integriert, aber ihr Wert steht und fällt damit, welches Paket gehoben wird: eines von der Modelloberfläche, eines aus einer durchmischten Schicht oder das labilste Paket des Profils. Für die verwendeten Eingangswerte ist je Modell nicht dokumentiert, welche dieser Definitionen gilt und von welcher Höhe das Ausgangspaket stammt — an Zugspitze und Großglockner liegt die Modelloberfläche der Modelle mit CAPE-Feld zwischen 318 und 1619 m unter dem Gipfel (Tabelle 27). Die verschiedenen Modellwerte sind deshalb nicht ohne Weiteres austauschbar.

Der Wert wird daher als Hinweis auf modellierte konvektive Instabilität im Umfeld verwendet, nicht als standortgenaue Aussage über die Auslösung an einem bestimmten Gipfel.

Wie stark der Score an CAPE hängt, zeigt eine Gegenprobe an den Fixtures: Setzt man CAPE bei sonst unveränderten Eingangsgrößen auf null, fällt die Zahl der Blöcke ab Score 4 von 21 auf 6 (Zugspitze) beziehungsweise von 21 auf 5 (Großglockner), jeweils von 40. CAPE ist damit der stärkste Einzelbeitrag.

Der Befund misst die interne Abhängigkeit des Scores von diesem Feld, nicht seine Vorhersagegüte. Er beruht auf zwei Standorten und einem Zeitfenster und ist weder räumlich noch zeitlich verallgemeinerbar.

Die Wolkenobergrenze zählt Stimmen, statt eine Höhe zu mitteln. Sie kommt ausschließlich aus ICON EU und ICON D2, und beide melden ohne Konvektion keinen fehlenden Wert, sondern eine Höhe von null. Ein Mittel aus einer Obergrenze bei 12 km und einer Null ist keine Ensemble-Aussage

über eine Höhe — es halbiert sie. An den Fixtures kostete das in je drei von vierzig Blöcken den Punkt, durchweg in der Entwarnungsrichtung.

Der Indikator fragt deshalb, was er meint: Sieht mindestens ein Lauf eine hochreichende Konvektion? Das entspricht der Behandlung der übrigen Score-Bausteine als Konsensfragen (Abschnitt 4.3). Zwei Stimmen zu verlangen wäre bei zwei möglichen Trägern eine Einstimmigkeitsregel und schaltete den Punkt ab dem Ende der ICON-D2-Reichweite still. Ein Punkt aus einer einzigen Stimme ist damit ein Hinweis und kein Konsens; die Zahl der tragenden Läufe, die höchste gültige Obergrenze und ihre Spannweite laufen als Diagnose mit.

Fehlwerte tragen zwei Formen. ICON D2 meldet ohne Konvektion die Höhe null, ICON EU überwiegend -500 und daneben ebenfalls null; dokumentiert ist keine der beiden. Übernommen wird deshalb nur, was als Höhe über Meeresspiegel positiv ist. Was der Wert bedeutet, bleibt dabei offen: „keine Konvektion diagnostiziert,“ und „Größe nicht gerechnet“ sind an der Schnittstelle nicht unterscheidbar, und beides wird gleich behandelt — als fehlend, nicht als Aussage über die Atmosphäre.

Weil der Score Größen mit unterschiedlicher Modellbasis vereinigt, führt die Verarbeitung zusätzlich die höchste Punktzahl, die ein **einzelnes** Modell aus seinen eigenen Werten erreicht. Ihre Differenz zum angezeigten Wert beschreibt, wie stark er aus Teilwerten verschiedener Modelle zusammengesetzt ist. Sie wird als Diagnosegröße geführt und wertet nichts ab: Eine automatische Abwertung wäre ohne Vergleich gegen Blitzdaten eine verdeckte Kalibrierung.

Hinzu kommt ein Zuschlag von zwei Punkten, wenn die Modelle selbst ein Gewitter vorhersagen: Melden mindestens zwei Modelle einen Wettercode ab 95 — dieselbe Schwelle wie im Symbol-Voting (Abschnitt 11.2) — oder trägt das Ensemble-Symbol bereits einen Gewittercode, so wird der Zuschlag gewährt. Das Ergebnis wird auf 8 begrenzt; aus 7 Basispunkten und 2 Zuschlag kann daher kein höherer Wert entstehen.

10.2 Angepasste CAPE-Schwellen

Die Schwellen liegen bei 200 und 500 J/kg statt der im Flachland gebräuchlichen 400 und 1000 J/kg, da alpine Konvektion bei geringerem CAPE ausgelöst wird (kürzere Schichtung, orographische und mechanische Auslösung).

Die Anpassung ist gesetzt und für den Alpenraum nicht validiert. Sie ist gleichgerichtet mit einem dokumentierten Befund: Taszarek et al.²³ verglichen 3,7 Millionen Radiosondierungen aus Europa und Nordamerika mit den Reanalysen ERA5 und MERRA-2 und wiesen eine systematische Unterschätzung von CAPE nach, besonders im oberen Wertebereich. Ein Vergleich von abgeleitetem CAPE mit Schwellen aus Beobachtungsklimatologien betrifft daher unterschiedlich skalierte Größen.

Übertragbar ist der Befund nur eingeschränkt: Er gilt für Reanalysen, nicht für die hier verwendeten operationellen Modellausgaben, und deren CAPE wird zudem beim Datenanbieter abgeleitet (Abschnitt 3.3). Ob dieselbe Verzerrung dort auftritt, ist ungeprüft. Die Unsicherheit der Schwellen ist damit eher größer als kleiner, als der Befund allein nahelegt.

10.3 Feuchtebedingung

Der Score wird nur wirksam, wenn die Niederschlagswahrscheinlichkeit über 20 %, die Schaueremenge über 0 mm oder die relative Feuchte über 70 % liegt. Andernfalls ist er null. Ohne diese Bedingung erzeugen Föhnlagen mit hohem CAPE bei geringer Feuchte systematisch Fehlalarme.

Die Bedingung prüft gewichtete Mittel, während CAPE als oberer Modellwert eingeht. Diese Ungleichbehandlung ist beabsichtigt: Für die Frage, ob die Atmosphäre instabil genug sein **kann**,

genügt ein hoher Einzelwert als Vorsorgehinweis; für die Frage, ob die Luft feucht genug ist, wird Konsens verlangt. Sie hat allerdings zur Folge, dass Bedingung und Punkte aus verschiedenen Modellen stammen können. Auch dafür ist die oben genannte Diagnosegröße gedacht.

10.4 Wolkenschichten

Tiefe und hohe Bewölkung werden ausschließlich aus ICON EU und ICON D2 gemittelt, da ECMWF und GFS diese Größen auf isobaren Druckflächen statt auf Sigma-Koordinaten definieren und die Schichtgrenzen nicht vergleichbar sind. Die mittlere Bewölkung ist einheitlich auf 800–400 hPa definiert und wird über alle aktiven Modelle gebildet.

10.5 Erreichbare Punktzahl

Ein Score von 5 bedeutet nicht überall dasselbe. Convective Inhibition und Lifted Index stammen nur von GFS, die konvektive Wolkenobergrenze nur von ICON; letzteres endet nach rund fünf Tagen (Tabelle 2). Ab Tag 6 sind damit nur noch 6 statt 7 Basispunkte erreichbar, und dieselbe Wetterlage ergibt in der zweiten Wochenhälfte einen strukturell niedrigeren Wert.

Die Verarbeitung führt daher neben dem Score die bei der jeweiligen Datenlage erreichbare Obergrenze mit — bewusst ohne den Zuschlag, weil dieser die Obergrenze wegen der Begrenzung auf 8 stets auf 8 hebt und damit genau den Befund verdecken würde, den die Kennzahl zeigen soll. Die Zelle selbst zeigt nur den Score; die Obergrenze steht daneben im Hinweistext, der ihn als „Gewitterrisiko x von y erreichbaren Punkten“ ausweist. Die schwindende Datenbasis ist zusätzlich im Tages-Header der Zehn-Tage-Ansicht vermerkt, der die Zahl der Modelle mit Daten gegen die der aktiven führt.

11 Wettersymbol

11.1 Rangfolge

Grundlage ist der WMO-Wettercode nach Code-Tabelle 4677¹⁶.

Rang	Codes	Bedeutung
90	≥ 95	Gewitter
80	85–86	Schneeschauer
80	66–67	Gefrierender Regen
70	71–79	Schneefall
60	56–57	Gefrierender Niesel
50	80–82	Regenschauer
47	65	Starker Regen
45	45, 48	Nebel
40	61, 63	Regen (leicht, mäßig)
30	51–55	Nieselregen
10	1–3	Bewölkt
0	0	Klar

Tabelle 16: Rangfolge über die Codes nach WMO-Tabelle 4677¹⁶. Die Skala läuft in Zehnerschritten, damit Nebel einen eigenen Rang zwischen Regen und Regenschauern erhält; sie wird ausschließlich vergleichend verwendet und nie als Zahl angezeigt. Zur Einordnung von Nebel und Starkregen siehe Abschnitt 16.7.

11.2 Abstimmung

Der Code wird je Modell in der Blockmitte ausgelesen; alle sechs liefern einen (Tabelle 3). Der höchste Rang bestimmt das Ergebnis. Innerhalb des gewinnenden Rangs entscheidet der höchste Code: Starker Schneefall (75) schlägt leichten (71). Ohne diese Regel hinge das Ergebnis an der Reihenfolge, in der die Modelle durchlaufen werden, und die wiederum an der Reihenfolge, in der der Nutzer sie zugeschaltet hat.

11.2.1 Der Block schlägt seine Mitte

Die Blockmitte ist eine Stunde von sechs. An den Fixture-Standorten führt sie in 33 bis 38 % der Blöcke einen harmloseren Zustand, als im Block auftritt.

Je Modell wird deshalb zusätzlich der schwerste Zustand des Blocks geführt — nach Rang, nicht nach Codezahl — und die Dauer, die er anhält. Über die Modelle stimmt er nach denselben Regeln ab wie die Blockmitte, einschließlich der Schwelle von zwei Modellen für Rang 80.

Übernehmen darf er nur, wenn er lange genug anhält:

Rang des Zustands	nötige Dauer
unter 60 — Niesel, Regen, Schauer, Nebel	2 von 6 Stunden
ab 60 — gefrierender Niesel, Schnee, gefrierender Regen, Schneeschauer, Gewitter	1 Stunde

Tabelle 17: Dauer, ab der ein schwererer Zustand das Symbol bestimmt.

Ohne die Dauer als Bedingung verdrängte eine einzelne Gewitterstunde fünf ruhige. Ab Rang 60 genügt eine Stunde, weil dort die Nichtanzeige das größere Übel ist.

Die Dauer zählt **nur über die Modelle, die den gewählten Zustand stützen**. Ein Mittel über alle vermischte Verschiedenes: Melden zwei Modelle je eine Stunde Gewitter und zwei andere sechs Stunden Niesel, ergäbe das rechnerisch fast drei Stunden — für einen Zustand, den keines der Modelle so lange sieht.

Innerhalb eines Rangs greift die Regel nicht: Eine Stunde starker Schneefall zieht den Block nicht von leichtem auf starken Schneefall.

Ab Rang 80 — Schneeschauer, gefrierender Regen, Gewitter — müssen mindestens zwei Modelle zustimmen; andernfalls erfolgt ein rekursiver Rückfall auf den nächstniedrigeren Rang, für den dieselbe Prüfung erneut gilt. Damit kann kein einzelnes Modell eine schwere Meldung durchsetzen — auch kein hochauflösendes, dessen Gewicht die Schwelle allein erreichte. Liefert kein Modell einen Code, wird der ECMWF-Referenzcode verwendet, sofern ECMWF überhaupt ausgewählt ist; sonst bleibt die Zelle ohne Symbol.

11.3 Korrekturkaskade

Bedingung	Korrektur
Schnee < 0,5 cm oder von < 2 Modellen gestützt	Abwertung zu leichtem Regen oder bewölkt; bei Sonnenanteil > 30 % zu leichten Schneeschauern
Regenschauer < 1,0 mm, Gewichtsanteil ≤ 50 %	Abwertung zu bewölkt
Niesel/Regen/Schauer < 0,5 mm, Gewichtsanteil < 40 %	Abwertung zu bewölkt, sonst klar
Bewölkt, < 0,1 mm, Kondensationsniveau > POI + 1500 m	Aufwertung zu teilweise bewölkt

Bedingung	Korrektur
Heiter bis bewölkt, $< 0,1$ mm, Sonnenanteil > 50 %	Aufwertung zu überwiegend sonnig
Klar bis bewölkt, Blocksumme $\geq 1,0$ mm oder $> 0,5$ cm Schnee	Aufwertung zu Regen- oder Schneeschauern
Klar bis bewölkt, Sonnenanteil > 30 %, Wächter erfüllt	Aufwertung zu Regen- oder Schneeschauern
Niederschlagssymbol, das der Phase am Standort widerspricht	Abbildung auf die andere Phase

Tabelle 18: Korrekturkaskade in tatsächlicher Anwendungsreihenfolge; jede Korrektur arbeitet auf dem Ergebnis der vorhergehenden. Die Mengenschwellen der Abwertungsregeln — 0,5 und 1,0 mm — skalieren mit der Blocklänge; die Schwellen 0,1 mm und 0,5 cm gelten unverändert für jede Blocklänge.

11.3.1 Das Symbol folgt der Phase am Standort

Die letzte Zeile der Kaskade behebt einen Widerspruch, den die vorangehenden nicht sehen können. Der Wettercode stammt aus den Modellfeldern und beschreibt die Höhe des jeweiligen Gitterpunkts; die Mengen entstehen aus der Phasenentscheidung für die Standorthöhe (Abschnitt 6). An hohen Gipfeln fallen beide auseinander: Am Großglockner zeigen 25 % der Blöcke Schnee und keinen Regen — und trügen ohne diese Regel ein Niesel- oder Regenschauersymbol.

Es sind keine konkurrierenden Aussagen über denselben Ort, sondern Aussagen über verschiedene Höhen (Abschnitt 16.10). Die Regel entscheidet deshalb nicht, welche Quelle recht hat; sie stellt her, dass Symbol und Zahlen dasselbe sagen. Für eine Tourenentscheidung ist „Niesel“ statt „Schneefall“ nicht dieselbe Information, und der Widerspruch ist für den Leser nicht auflösbar, weil die Anzeige die Höhenbezüge nicht erklärt.

Maßgeblich ist der **Phasenkonsens**, nicht die Menge. Ein gerundetes 0,0 mm oder ein fehlendes Regenfeld dürfen kein Symbol umdrehen; die Mengen sind eine zusätzliche Plausibilitätsprüfung. Drei Bedingungen müssen zugleich gelten: Das Symbol widerspricht der Phase, die Phase wird von mindestens zwei Modellen getragen — dieselbe Schwelle wie der Ausreißerfilter der Abstimmung —, und die angezeigten Mengen passen dazu.

Die Abbildung erhält die Niederschlagscharakteristik:

Ausgangscode	bei fester Phase
Niesel 51 / 53 / 55	Schneefall 71 / 73 / 75
Regen 61 / 63 / 65	Schneefall 71 / 73 / 75
Regenschauer 80	Schneeschauber 85
Regenschauer 81 / 82	Schneeschauber 86

Tabelle 19: Abbildung der Phase. Regenschauer haben drei Intensitätsstufen, Schneeschauer nur zwei — die beiden oberen fallen deshalb zusammen. Die Gegenrichtung gilt entsprechend.

Gefrierender Niesel (56/57) und gefrierender Regen (66/67) bleiben unberührt. Sie tragen eine eigene Gefahrenaussage — eine warme Schicht über einer kalten, unterkühlte Tropfen — und sind keine Intensitätsvariante von Niesel oder Regen. Eine Phasenbestimmung aus Temperatur, Nullgradgrenze und Mengen ist bei solchen Profilen nicht zwingend besser als die Diagnose des Modells.

Die Regel steht am Ende der Kaskade und nicht an ihrem Anfang: Aus einem wegen zu geringer Menge abgewerteten Schauer soll nicht nachträglich ein Schneesymbol werden.

Menge und Verbreitung sind zwei getrennte Kriterien. Die Mengenschwellen der Abwertungsregeln prüfen das gewichtete Mittel über die Modelle, die überhaupt Niederschlag melden — also wie viel diejenigen erwarten, die welchen sehen. Wie breit die Modellgruppe das trägt, prüfen die Regeln daneben als eigene Bedingung.

Die Verbreitung ist dabei ein **Gewichtsanteil**, keine Modellzahl: Sie setzt die Gewichtssumme der Modelle mit Niederschlag ins Verhältnis zur Gewichtssumme derer, die für den Block überhaupt einen Wert liefern. Die Gewichte stehen im ganzen Verfahren für die Güte eines Modells im Alpenraum (Abschnitt 4.1); sie an dieser Stelle zu ignorieren wäre inkonsistent — zwei hochauflösende Alpenmodelle tragen einen Konsens anders als zwei grobe. Modelle ohne Wert fallen aus Zähler **und** Nenner: Im Nenner allein zählten sie faktisch als trocken, und die Verbreitung schwankte mit der Datenverfügbarkeit statt mit dem Wetter.

Ein Mittel über alle Modelle wäre hier die falsche Größe: Darin senken die Nullen der trockenen Modelle den Wert, und die Regel prüfte dieselbe Unsicherheit ein zweites Mal. Ein einzelnes Modell hätte dann das Fünffache der genannten Schwelle liefern müssen, damit sein Symbol die Kaskade übersteht — und das ausgerechnet in der Lage, in der ein einzelnes hochauflösendes Modell am meisten wert ist, dem konvektiven Sommerschauer. Übersteht ein Symbol die Kaskade mit schmaler Modellbasis, wird das als Herkunft geführt.

Die Aufwertungsregeln arbeiten dagegen mit dem Mittel über alle Modelle. Eine Abwertung zu „bewölkt“ wegen gering gestütztem Niederschlag wird deshalb nicht durch die anschließenden Sonnenregeln aufgehoben, solange dieses Mittel mindestens 0,1 mm beträgt. Die Kaskade bevorzugt dort die zurückhaltende Darstellung: Wenig gestützter Niederschlag bleibt sichtbar, auch wenn die Modelle viel Sonne erwarten. Für die Frage, ob die Gesamtlage noch nass ist, ist die Niederschlagslast aller Modelle die passende Größe — sonst könnte ein einzelnes nasses Modell die Aufwertung für alle blockieren.

Die beiden letzten Regeln beschreiben dieselbe Wetterlage — Niederschlag mit Aufhellungen —, unterscheiden sich aber in ihrer Bedingung. Die erste prüft die Blocksumme und kennt die Sonne nicht; sie wirkt deshalb nachts genauso wie tagsüber. Zuvor gab es nur die zweite: Sie verlangt einen Sonnenanteil und benutzt ihn als Stellvertreter für Wechselhaftigkeit — nachts ist die Sonnenscheindauer null, und die Regel konnte dort nie greifen. Sie bleibt für die leichten Tageslagen unterhalb der Mengenschwelle zuständig.

Geprüft wird gegen den **angezeigten** Ensemble-Mittelwert, also gegen genau den Wert, der neben dem Symbol steht — eine Übersteuerung gegen eine andere Größe ginge am Widerspruch vorbei. Eine zusätzliche Verbreitungsschwelle besteht nicht: Sie würde den Einzelmodell-Schauer wieder unterdrücken, den die Kaskade seit der Trennung von Menge und Verbreitung bewusst stehen lässt, und der angezeigte Mittelwert enthält die Verbreitung ohnehin, weil die Nullen der trockenen Modelle ihn senken. Verlangt wird nur, dass überhaupt ein Modell Niederschlag führt.

Der Wächter der Sonnenregel verlangt mehr als 0,5 cm Schnee, mehr als 1,0 mm Niederschlag oder einen Schnee- beziehungsweise Gefrierniederschlagscode vor der Kaskade; ohne ihn erzeugt Sprühniederschlag ein Schauersymbol. Die Schwellen sind gesetzt (Abschnitt 16.5).

Mitgeführt werden Größen, die nicht in die Anzeige gehen: die Zahl der Stunden mit Niederschlag, die Niederschlagsmenge während der Stunden im schwersten Rang, die stärkste einzelne Stunde darin und die Zahl der stützenden Modelle.

Die **Menge** ist dabei ausdrücklich keine Bedingung der Eskalation. Ein trockenes Gewitter erzeugt Blitze bei sehr wenig Niederschlag und ist am Gipfel gleichwohl ein Ereignis; umgekehrt rechtfertigt ein kurzer Starkschauer kein Symbol für sechs Stunden. Erfasst wird sie, damit sich später an Daten entscheiden lässt, ob sie eine Rolle spielen soll.

12 Weitere Größen

12.1 Sonnenscheindauer

Die Schnittstelle liefert Sekunden je Stunde, serverseitig berechnet — für ICON aus der Direktstrahlung mit einer Schwelle von 120 W m^{-2} , für die übrigen Modelle aus der Differenz von Global- und Diffusstrahlung. Über den Block wird summiert (Maximum 6,0 h), über das Ensemble gewichtet gemittelt.

Der Wert gilt für den Modellgitterpunkt und wird nicht auf die Standorthöhe umgerechnet. Anders als bei Temperatur oder Druck gibt es dafür keine zulässige Transformation: Die Sonnenscheindauer an einem Gipfel hängt am Horizont, an der Abschattung durch benachbarte Grate, an Hangneigung und Exposition sowie an der vertikalen Schichtung der Bewölkung. Die Fehlerrichtung ist nicht einmal einheitlich — ein Gipfel über einer Hochnebeldecke bekommt mehr Sonne als sein Gitterpunkt, ein Gipfel im Schatten eines Nachbargrats weniger.

Die Größe steuert zwei Aufwertungen der Korrekturkaskade (Abschnitt 11.3). Wie stark, zeigt eine Gegenprobe an den Fixtures: Setzt man die Sonnenscheindauer einmal auf null und einmal auf die volle Blocklänge, ändert sich das Symbol in 3 von 40 Blöcken an der Zugspitze und in keinem am Großglockner. Beide Regeln bleiben deshalb unverändert; sie an hohen Standorten zurückzunehmen wäre eine Korrektur ohne Beleg.

Auch dieser Befund beruht auf zwei Standorten und einem Zeitfenster mit verwandten Wetterlagen und ist keine allgemeine Fehlerquote.

12.2 Niederschlagstyp

Nur ECMWF liefert diese Größe (Tabelle 3). Ausgewertet werden gefrierender Regen (3), Nassschnee (6) und Eisgranulat (8), gesucht über alle Stunden des Blocks. Die Flags gehen in die Phasentrennung ein (Tabelle 9).

12.3 Übrige Ensemble-Werte

Größe	Block	Ensemble
Niederschlagswahrscheinlichkeit	Mittel	ungewichtetes Mittel
Schneehöhe	letzter Wert	gewichtetes Mittel
CAPE	Maximum	Maximum
Gefühlte Temperatur ¹⁷	Minimum	Minimum
Relative Feuchte	Mittel	nur im Feuchtegate (Abschnitt 10.3)

Tabelle 20: Aggregation der übrigen Größen. Die Schneehöhe ist ein Zustandswert und wird daher nicht summiert. Für die relative Feuchte entsteht kein Ensemble-Anzeigewert.

Die Gesamtschneehöhe wird nicht angezeigt: ICON EU endet nach rund fünf Tagen, ICON D2 nach zwei (Tabelle 2), sodass der Wert ab Tag 6 allein aus GFS stammt. Die gewichtete Mittelung würde einen Einzelmodellwert als Ensemble-Wert darstellen.

Die Niederschlagswahrscheinlichkeit wird dagegen angezeigt, obwohl auch sie eine schmale Basis hat: Nur ECMWF, GFS und ICON EU führen sie (Tabelle 3), das Mittel läuft also über höchstens drei der sechs Modelle. Der Unterschied zur Schneehöhe liegt in der Größe selbst — sie ist bereits ein Ensemble-Maß des liefernden Modells, nämlich der Anteil seiner Läufe über 0,1 mm in der jeweiligen

Stunde, und trägt ihre Unsicherheit im Wert. Ist keines der drei Modelle aktiv, entfällt die Zeile, statt eine Sicherheit zu suggerieren, für die keine Datenbasis vorliegt.

Angezeigt wird sie nur neben einer sichtbaren Menge. Das ist eine Anzeigeregeln und keine meteorologische: Behauptet wird nicht, die Wahrscheinlichkeit sei null, sondern entschieden, ab wann sie in einer Zelle erklärbar ist.

Maßgeblich ist dabei genau das, was die Zellen zeigen: die Regenmenge in Millimetern und die Schneehöhe in Zentimetern, jede gegen die Schwelle ihrer eigenen Dimension. Der Blockniederschlag taugt dafür nicht — er mittelt über alle aktiven Modelle, während die Zellen phasenbedingte Mittel führen, in die ein Modell ohne Niederschlag gar nicht eingeht. Die beiden Größen laufen auseinander: An fünf Aufzeichnungen weichen sie in 16 von 260 Blöcken so weit ab, dass die Anzeigeentscheidung kippt, im Winter in jedem zehnten.

Ohne Menge stünde dort eine Null — an Mont Blanc und Zugspitze im Winter in mehr als der Hälfte aller Blöcke. Eine Null liest sich als Zusage, und sie gilt für den falschen Ort: Die Größe reagiert nicht auf die angefragte Höhe (Abschnitt 3.5) und beschreibt den Gitterpunkt, an der Zugspitze rund 1600 m unter dem Gipfel.

Der Preis sind seltene trockene Blöcke mit nennenswerter Wahrscheinlichkeit — an den Sommeraufzeichnungen je zwei von vierzig, im Höchstfall 51 %. Auch sie zeigen allerdings gerade an, dass Menge und Wahrscheinlichkeit auseinanderlaufen.

Gerechnet wird über alle Quellen, die eine Wahrscheinlichkeit führen. Menge und Wahrscheinlichkeit stammen aus verschiedenen Modellmengen: die Menge aus den Modellen mit der jeweiligen Phase, die Wahrscheinlichkeit aus ICON EU, ECMWF und GFS. AROME, AIFS und ICON D2 tragen Menge bei, nie eine Wahrscheinlichkeit.

Diese Trennung ist strukturell und keine Störung. Ein Schnitt beider Mengen — die Modelle, die **zugleich** Menge und Wahrscheinlichkeit tragen — taugt deshalb nicht als Bedingung: Wo allein AIFS, AROME oder ICON D2 die Menge führen, ist er nicht selten leer, sondern zwangsläufig. Er unterdrückt dann keine widersprüchliche Paarung, sondern die einzige Aussage, die überhaupt vorliegt. An fünf Aufzeichnungen betrifft das 19 Blöcke, darunter 2,58 cm Schnee am Großglockner und 0,6 mm neben 52,5 % an der Zugspitze.

Eine hohe Prozentzahl neben deterministisch null Millimetern ist dabei kein Widerspruch, sondern gerade der Fall, für den die Größe existiert: Streuung im Ensemble bei trockener Hauptlösung.

Die Wahrscheinlichkeit ist damit eine eigenständige Ensembleaussage ihrer eigenen, systembedingt schmalen Modellbasis — nicht die Wahrscheinlichkeit der danebenstehenden Menge. Diese Unterscheidung trägt der Text, nicht eine Sperre.

Ob beide Zahlen auf derselben Modellmenge stehen, läuft als Diagnose mit (`precipBasisState`): **structural-basis-difference**, wenn die Menge allein von Modellen ohne Wahrscheinlichkeitsfeld getragen wird, und **model-disagreement**, wenn die Wahrscheinlichkeitsmodelle zusätzlich kaum Aussicht auf Niederschlag melden. Die Schwelle dafür liegt bei 5 % und ist Produktlogik, keine meteorologische Grenze.

Unter einem halben Millimeter oder Zentimeter steht keine Zahl. Die Darstellungsschwelle liegt bei 0,5 — über der Spurengrenze, unterhalb derer auch nationale Dienste nicht mehr beziffern: Der US-Wetterdienst führt Regen unter 0,25 mm und Schnee unter 0,25 cm als „trace“ ohne Zahl, Kippwaagen lösen erst ab 0,1 bis 0,2 mm auf. Darunter ist eine Zelle wie „0,1 cm bei 10 %“, keine Aussage, sondern Scheingenauigkeit.

Der Preis ist nachgerechnet: Über 65 Tage gibt es keinen einzigen, an dem alle vier Blöcke unter 0,5 fielen, obwohl die Tagessumme 1 cm oder 1 mm erreicht — die kleinen Werte stehen nie allein für einen Tag, an dem etwas passiert. Erst ab 1,0 kippt das. Eine Tagessumme zeigt die App nicht an, deshalb war diese Rechnung nötig.

In keiner Zelle steht „0 %“. Rundet ein Wert auf null, erscheint „<1 %“ — gleichgültig, ob er knapp darüber liegt oder exakt null ist. Eine Null neben einer Menge liest sich als Zusage, die die Zahl nicht deckt: Sie besagt, dass kein Ensemble-Mitglied die Schwelle von 0,1 mm reißt, nicht dass nichts fallen kann. Ein Weglassen wiederum verschwiege, dass überhaupt etwas möglich ist.

Für den exakten Nullfall ist „<1 %“ die schwächere Aussage, als die Daten hergeben — aber keine falsche: Sind es null Mitglieder, ist die Wahrscheinlichkeit ebenfalls kleiner als ein Prozent.

Sie ist außerdem die einzige Größe des Verfahrens, die **ungewichtet** gemittelt wird. Die Modellgewichte aus Tabelle 7 beantworten die Frage, welcher deterministische Mengenwert an einem Gipfel plausibler ist; dort rechtfertigt die feine Auflösung von ICON EU sein höheres Gewicht. Eine Ereigniswahrscheinlichkeit beantwortet eine andere Frage: Jeder Träger liefert bereits das Ergebnis seines eigenen Ensembles, und deren Mittelung richtet sich nach probabilistischer Güte, nicht nach Gitterweite. Mit den Mengengewichten trüge ICON EU 44 % der Gewichtssumme; an einem Standort gemessen sanken dadurch 19 von 25 Blöcken, um bis zu 19 Prozentpunkte, allein weil das stärkste Gewicht auf dem trockensten Modell lag. Auch eine Gewichtung nach Mitgliederzahl (ICON EU 39, ECMWF 50, GEFS 30) wäre keine Lösung: Sie steuert die Stichprobenauflösung innerhalb eines Ensembles und ist kein Gütemaß. Gleichgewichtung ist damit der belastbare Ausgangspunkt, solange keine Kalibrierung gegen Beobachtungen vorliegt.

Für ICON EU kommt die Größe auf einem Umweg. Die eigene Open-Meteo-Instanz gibt sie nicht unter dem Modellschlüssel selbst heraus, sondern nur unter dem Sammelschlüssel des ICON-Verbands. Weil die Instanz allein das EU-Ensemble vorhält und weder das D2- noch das globale, hat dieser Verbund dort nur eine Stufe: Über sieben Tage geprüft stimmen 133 von 133 Werten mit dem überein, was der öffentliche Dienst unter ICON EU ausgibt. Der Schlüssel ist damit ein Transportweg, nicht der fachliche Name des Werts.

Zwei Bedingungen sichern das ab, und beide stehen im Verfahren, nicht in einer Serverkonfiguration. Übernommen wird ein Wert nur für Stunden, in denen ICON EU selbst Daten liefert — das ist der Horizont des laufenden Modelllaufs, während eine feste Stundenzahl sich mit dessen Alter verschöbe. Käme das globale Ensemble je hinzu, setzte der Verbund jenseits dieses Horizonts fort; am öffentlichen Dienst sind das 59 Stunden, und genau diese werden verworfen. Scheitert der Abruf oder fehlt der Horizont, entfällt ICON EU vollständig, und es bleibt bei ECMWF und GFS.

12.4 Berechnet, aber nicht angezeigt

Die Verarbeitung erzeugt einige Größen, die derzeit keinen Konsumenten in der Anzeige haben. Sie stehen benannt im Datenmodell, statt still mitzulaufen.

Größe	Grund
Zustimmende und beteiligte Modelle je Symbol	Konsensmaß; die Zelle bietet den Platz nicht (Abschnitt 14)
Spannweite des Windes über die Modelle	Kandidat für eine Bandbreitendarstellung
Gesamtschneehöhe	siehe oben
CAPE, Konvektiv-Anteil (Schauer je Niederschlag)	Diagnose zum Gewitterrisiko

Größe	Grund
Bewölkung tief, mittel, hoch	für eine Wolkenschichten-Darstellung erhoben, die es nicht gibt
Grenzschichthöhe	Thermik; faktisch nur GFS
Zusammensetzung der Böe: Zahl der beitragenden, der angehobenen und der Modelle ohne Böenfeld, dazu der höchste abgeleitete Wert	Herkunftsdiagnose (Abschnitt 8.4)
Herkunft des Wolkenobergrenzen-Punkts: Zahl der Stimmen, höchste gültige Obergrenze, Spannweite der gültigen	hält fest, ob ein Punkt aus einem Lauf oder aus beiden stammt (Abschnitt 10.1)
Konvektive Wolkenbasis	erhoben, noch ohne Auswertung
Hebungskondensationsniveau: Mittel, Minimum und Stunden unter dem Standort	Diagnose; die Zahl selbst ist keine Wolkenuntergrenze (Abschnitt 9.2)
Zahl der Modelle hinter Nullgradgrenze und Regen-Schnee-Grenze	beide beruhen auf den Modellen mit gültigem Vorzeichenwechsel im eigenen Profil und damit auf einer wechselnden Trägersmenge (Abschnitt 5.2)
Ungeklärter Anteil der Niederschlagsmenge je Höhenstufe	hält die Bilanz geschlossen, wo ein Profil eine Zeilenhöhe nicht trägt (Abschnitt 13.1)
Blitzpotential, Aufwind	nur ICON D2; mitgeführt ohne Schwelle — siehe Abschnitt 16.16

Tabelle 21: Berechnete, aber nicht dargestellte Größen.

13 Höhenstufen

Gipfelhöhe	Stufen
> 3500 m	Gipfel, dann volle Tausender abwärts — höchstens 2000 m unter dem obersten Tausender und nie unter 1000 m
2500–3500 m	Gipfel, dann 2500 m (bei weniger als 500 m Abstand stattdessen 2000 m), dann Tausenderschritte, solange sie bei mindestens 1000 m liegen
< 2500 m	Gipfel und eine Stufe bei 1500 m; liegt der Gipfel weniger als 500 m darüber, stattdessen 1000 m

Tabelle 22: Ableitung der Höhenstufen. Mindestabstand zum Gipfel 500 m, Spannweite der Zusatzstufen im Hochalpinen höchstens 2000 m.

13.1 Phase je Höhenstufe

Jede Zelle des Höhengitters trägt einen Balken je aktivem Modell. Seine **Höhe** ist die Niederschlagsmenge des Modells, seine **Farbe** die Phase auf der Höhe dieser Zeile.

Die Phase folgt in beiden Fällen derselben Übergangszone wie am Standort (Abschnitt 6.2); verschieden ist nur, woher Temperatur, Feuchte und Druck auf der Zeilenhöhe stammen. Je Modell, Zeile und Stunde gilt diese Rangfolge:

Natives Profil Die Zeilenhöhe liegt zwischen zwei Druckflächen, die das Modell führt und die beide über seiner Orographie liegen (Abschnitt 3.6.3). Temperatur und Feuchte werden dorthin interpoliert. Das ist gerechnete Modellatmosphäre auf dieser Höhe und deshalb erste Wahl.

Standortkorrigierte Bodenfelder Die Zeilenhöhe liegt über der Orographie, aber unter der tiefsten brauchbaren Fläche. Diese Lücke ist nicht selten: Am Mont Blanc reicht sie bei ICON EU von 2868 m bis rund 3100 m, und der Gipfel liegt darüber, aber die 3000-m-Zeile mittendrin. Dann tragen die Felder, die der Dienst auf **genau diese Höhe** umrechnet.

Keine Aussage Die Zeilenhöhe liegt unter der Orographie des Modells. Dieses Modell zeichnet in dieser Zeile keinen Balken.

Für jede Höhenstufe wird eine eigene Abfrage gestellt. Der Höhenparameter des Dienstes gilt je Anfrage; den Wert der Gipfelzeile für die 2000-m-Zeile zu übernehmen hieße zu behaupten, eine Höhe gelte für eine andere.

Die Bodenfelder werden bewusst **nicht** mit den Druckflächen zu einem gemeinsamen Profil verbunden. Eine lineare Brücke durch die Grenzschicht sähe glatt aus und wäre Scheinpräzision: Die 2-m-Temperatur ist selbst eine Diagnose aus Oberfläche und unterstem Modellniveau, kein unabhängiger Anker für eine Interpolation zur nächsten Druckfläche. Das gilt unabhängig davon, wie weit diese entfernt liegt — die Länge der Strecke ändert nichts daran, dass ihr unteres Ende die Größe nicht trägt, die es tragen müsste.

Dass verschiedene Modelle in derselben Zeile verschiedene Wege gehen, ist zulässig — welcher trägt, hängt daran, wie hoch die Orographie des Modells liegt. Nicht zulässig wäre, verschiedene Gültigkeitsgrenzen als gleiche Informationsqualität auszugeben; die Herkunft wird deshalb je Modell und Zeile mitgezählt.

Eine Zeile wird erst gezeigt, wenn die Phase in mindestens zwei Dritteln der Niederschlagsstunden des Blocks herleitbar war. Die Gültigkeit selbst wird weiterhin je Stunde entschieden — ob eine Fläche über der Orographie liegt, ist eine physikalische Frage und keine der Darstellung. Stabilisiert wird nur die Anzeige: Ein Balken, der zwischen benachbarten Spalten erscheint und verschwindet, ist schwerer zu lesen als einer, der durchgehend fehlt.

Die Menge ist in jeder Zeile dieselbe. Höhen aufgelösten Niederschlag gibt keine Quelle her: Der Dienst rechnet Temperatur und Feuchte auf die angefragte Höhe um, die Menge nicht. Ein Höhengradient wäre eine Annahme über Stau, Abschattung und Exposition, die weder gemessen noch validiert ist. Die Balkenhöhe bleibt deshalb über alle Zeilen gleich; höhenabhängig ist allein die Farbe.

Dieselbe Trennung gilt für die Neuschneehöhe in Zentimetern: Sie bleibt eine Standortgröße und wird nicht je Zeile neu gerechnet. Eine Zentimeterzahl je Höhenstufe behauptete gleichzeitig dieselbe Wasserbasis auf jeder Höhe, eine höhengenaue Kristallbildung und eine verlässliche Höhenverteilung des Niederschlags.

Ein fehlender Balken neben anderen zeigt ein Modell ohne Aussage zu dieser Höhe; ein eigener Farbton dafür wäre eine Phase, die es nicht gibt.

13.2 Welche Stufen gezeigt werden

Tabelle 22 leitet die Stufen aus der Standorthöhe ab. Gezeigt wird davon nur, was die Modelle tragen: Eine Zusatzstufe bleibt im Gitter, wenn mindestens 60 % des Modellgewichts sie mindestens 100 m über der eigenen Orographie sehen.

Bezugsgröße ist das Gewicht aller sechs Modelle, nicht das derjenigen, deren Orographie vorliegt. Ein Modell, dessen Geländehöhe nicht zu ermitteln war, zählt als nicht tragend — nicht als nicht vorhanden. Eine bewegliche Bezugsgröße kehrte die Bedeutung eines Abrufproblems um: Blicke am Mont Blanc gerade die Höhe von ICON D2 aus — dem Modell, das die 3000-m-Zeile ohnehin nicht trägt —, stiege die Abdeckung von 60 auf 75 %. Eine Störung im Abruf darf die

Sichtbarkeit einer Aussage nicht erhöhen. Aus demselben Grund bleibt bei gänzlich unbekannter Orographie nur die Standortzeile: Über keine Stufe ist dann etwas belegt, und Unkenntnis ist kein Beleg.

Standort	abgeleitet	gezeigt
Zugspitze, 2962 m	2962 / 2000 / 1000	2962 / 2000
Großglockner, 3798 m	3798 / 3000 / 2000 / 1000	3798 / 3000
Mont Blanc, 4808 m	4808 / 4000 / 3000 / 2000	4808 / 4000 / 3000
Chamonix, 1035 m	1035	1035

Tabelle 23: Wirkung der Abdeckungsschwelle. Gestrichen werden genau die Stufen, die in keinem Modell einen Balken tragen könnten.

Weder „ein Modell genügt“, noch „alle müssen“ taugt als Schwelle: Ersteres ließe das Gitter lang, obwohl die Stufe für die Mehrzahl der Modelle unter Grund liegt; Letzteres nähme ein einzelner Orographie-Ausreißer allen anderen weg. Am Mont Blanc tragen vier der sechs Modelle die 3000-m-Zeile — ICON D2 liegt dort mit 4080 m darüber, AROME mit 3887 m —, und sie bleibt.

Die vier tragenden Modelle bringen zusammen 6,0 der insgesamt 10,0 Gewichtspunkte auf und treffen die Schwelle damit exakt. Dasselbe gilt an der Zugspitze auf 2000 m und am Großglockner auf 3000 m, mit derselben Besetzung: **Im Alpenraum liegt jede Zeile unterhalb des Gipfels bei genau 60 %**. ICON D2 und AROME führen ihre Orographie so hoch, dass sie dort strukturell ausfallen.

Gegen das Gesamtgewicht gemessen sähe damit jede untere Zeile dauerhaft knapp aus — obwohl jedes Modell trägt, das die Höhe überhaupt abbilden kann. Deshalb gibt es eine **zweite Bezugsgröße**: das Gewicht der Modelle, deren Gelände unter der Stufe liegt und die sie folglich darstellen könnten. Für die unteren Alpenzeilen sind das dieselben 6,0 — die Abdeckung innerhalb des Möglichen beträgt dort 100 %.

Die beiden Größen beantworten verschiedene Fragen und werden nicht vermischt:

Gegen alle Modelle Darf die Zeile überhaupt stehen? Der Nenner ist fest, damit ein Abrufproblem die Sichtbarkeit nicht erhöht.

Gegen die geeigneten Modelle Ist die mögliche Basis ausgeschöpft? Der Nenner hängt an Modell, Ort, Höhe und Orographieregel — nicht an Antwortfehlern. Ein Modell ohne ermittelbare Orographie bleibt darin enthalten, sonst schönte gerade sein Ausfall das Ergebnis.

Vier Zustände fassen das zusammen: **vollständig** (alle geeigneten Modelle tragen), **ausreichend** (mindestens drei Viertel des möglichen Gewichts), **unvollständig** (darunter) und **nicht darstellbar** (kein Modell kann die Höhe abbilden). Der letzte ist kein Mangel, sondern eine Grenze der Modellkette; „unvollständig“, hieße, es gäbe etwas, das fehlt.

Die Matrix trägt diese Unterscheidung nicht — bei 40×28 Pixel großen Zellen wäre jede zusätzliche Markierung teurer als ihre Aussage. Sie wird je Stufe in den Vorhersagedaten mitgeführt und steht in diesem Papier; angezeigt wird sie nicht.

Wie eng die Lage gegen das Gesamtgewicht bleibt, zeigt der Wegfall eines einzelnen Modells: Ohne GFS — mit 1,0 dem kleinsten Gewicht von allen — verbleiben 5,0 von 10,0, und am Mont Blanc verschwinden beide Zeilen unterhalb des Gipfels. Nicht weil GFS besonders wichtig wäre, sondern weil die tragende Gruppe ohnehin genau auf der Schwelle steht.

Ob eine Stufe überhaupt getragen wird, entscheidet sich einmal je Vorhersagelauf, nicht je Zeitblock. Ein Modell trägt eine Zeile, wenn es in mindestens zwei Dritteln der Stunden **seines**

eigenen Laufs dort eine Phase herleiten könnte — nicht des angefragten Zeitraums, sonst fiel ICON D2 mit seinen 48 Stunden gegen 312 immer durch. Damit bestimmt die Wetterlage den Inhalt der Zellen, aber nicht die Form des Gitters.

Gerechnet wird über alle unterstützten Modelle, nicht über die vom Nutzer aktivierten. Sonst verschöbe die Anzeigerauswahl die topographische Aussage der Ansicht. Welche Balken dann in einer Zeile stehen, entscheiden die aktiven Modelle sehr wohl.

Die Standortzeile bleibt immer. Für sie sind die auf ihre Höhe umgerechneten Bodenfelder auch dann zulässig, wenn der Ort unter der Modelloberfläche liegt — im Alpenraum ist das der Normalfall: In Chamonix, Zermatt, Innsbruck und Grindelwald liegt die geglättete Orographie 99 bis 1765 m über dem tatsächlichen Ort. Die Felder beantworten „was ist am angefragten Ort wahrscheinlich,“; genau dafür stellt der Dienst sie bereit. Was sie nicht beantworten, ist „wie ändert sich die Atmosphäre mit der Höhe“ — deshalb tragen sie unterhalb der Orographie keine weitere Stufe.

Damit steht nie eine dauerhaft leere Zeile im Gitter. Die Gültigkeitsgrenze gehört in dieses Papier, nicht als Dauermarkierung in eine Matrix aus 40×28 Pixel großen Zellen.

Über dem Gitter liegt die Regen-Schnee-Grenze (Abschnitt 5.4) als Linie. Sie schneidet das Band dort, wo die Farbe kippt, und wird an den Rändern nicht festgehalten: Liegt sie außerhalb der dargestellten Höhen, endet die Linie am Schnittpunkt mit der Kante statt an der letzten Spalte innerhalb des Bandes. Eine Lücke ist die ehrlichere Aussage als eine Linie, die am Rand klebt und verschweigt, wie weit die Grenze in Wahrheit entfernt ist.

14 Kennzeichnung geschätzter Werte

Geschätzte Größen — Böen ohne verwertbaren Modellwert (Tabelle 14) — müssen als solche erkennbar sein. Clive et al.²⁴ weisen für Wetterwarnungen nach, dass visuelle Gestaltungsvariablen Verständnis und Entscheidungsverhalten messbar beeinflussen und eine extrinsische Kennzeichnung von Unsicherheit zu genaueren Einschätzungen führt als eine intrinsische. Die Wahl des Kennzeichnungsmittels ist hier zusätzlich durch die Zellgeometrie eingeschränkt.

Eine Zelle misst auf Mobilgeräten 40×28 Pixel. In dieses Raster sind bereits zwölf visuelle Bedeutungen eingeschrieben: Zellhintergründe für Temperatur, gefühlte Temperatur, Sonnenanteil, Gewitterscore und Wind; Textfarben für Schnee, Regen und Nullgradgrenze; Schriftstärke für Warnung und Konfidenz; Opazität für Vergangenheitswerte; Spaltenhintergrund für den Tageswechsel; eine farbige Kante für den aktuellen Tag.

Farbe, Opazität und Schriftstärke sind damit belegt. Verfügbar bleiben ein Zeichen innerhalb des Werts, eine zusätzliche Zeile und Text außerhalb des Rasters. Umgesetzt ist die Kennzeichnung durch eine vorangestellte Tilde.

Eine Anzeige der Modellanzahl je Zelle ist bei dieser Geometrie nicht darstellbar und wäre je Spalte bis zu fünfzehnfach redundant, da die Modellbasis von der Vorlaufzeit und nicht von der dargestellten Größe abhängt.

14.1 Warum die Schneemenge keine Kennzeichnung trägt

Eine Kennzeichnung der Schneemenge müsste anzeigen, dass mindestens ein beitragender Wert aus Niederschlag und Temperatur abgeleitet ist statt vom Modell gemeldet. An hohen Standorten trifft das nahezu immer zu: Die Gitterpunkte der Modelle liegen dort mehrere hundert bis über tausend Meter tiefer (Abschnitt 16.10) und melden Regen. An den Fixture-Standorten liegt der Anteil bei

0 % (Zugspitze, 2962 m) und 67,5 % (Großglockner, 3798 m) — er schwankt also nicht mit der Wetterlage, sondern mit der Gitterhöhe des Standorts. Am Mont Blanc (4808 m) käme kein einziger Wert ohne sie aus.

Eine Markierung, die an nahezu jedem Wert steht, unterscheidet nichts; ihr Fehlen ließe umgekehrt einen Wert wie eine unmittelbare Modellaussage erscheinen. Mit der Repartitionierung nach Abschnitt 16.10 wird jede Schneemenge zu einer abgeleiteten Größe, und die Frage erledigt sich vollständig.

Die Herkunft läuft in den Daten mit — sie gehört ins Verfahren und in dieses Papier, nicht in eine Zelle von 40×28 Pixeln. Die Böenkennzeichnung bleibt davon unberührt; dort unterscheidet sie.

14.2 Wasserphase und Niederschlagsart

Zwei Fragen, die auseinandergehalten gehören. Die **Wasserphase** sagt, wohin eine Menge in der Bilanz gehört: flüssig, fest oder beides. Die **Art** sagt, was daraus am Berg folgt. Gefrierender Regen ist flüssig und trotzdem kein Regen.

Die Phase entsteht stündlich aus der Feuchttemperatur am Standort. Die Art fällt in der Regel mit ihr zusammen — außer bei drei Lagen, die allein ECMWF meldet, weil nur es ein `precipitation_type`-Feld führt.

Gefrierender Regen überschreibt die Aufteilung. Er wird aus dem vertikalen Temperaturprofil diagnostiziert: Schnee schmilzt in einer warmen Schicht und fällt unterkühlt durch eine bodennahe Frostschrift weiter. Eine Feuchttemperatur am Boden kann diese Schichtung nicht rekonstruieren — sie sieht Frost und schließt auf Schnee. An der Zugspitze wies sie 2,40 mm zu 100 % als fest aus, woraus 5,40 cm Neuschnee geworden wären. Tatsächlich waren 0,50 mm davon gefrierender Regen. Die beiden Lagen verlangen entgegengesetzte Entscheidungen, und der Unterschied zwischen Blankeis und Pulver ist keine Nuance.

Die Überschreibung wirkt **stündlich**, nicht über den ganzen Block: Ein Block kann eine Stunde gefrierenden Regen und fünf Stunden Schnee führen, und genau so steht er dann in den Zahlen.

Eisgranulat liefert keine Neuschneehöhe. Es fällt fest und bleibt in der Wasserbilanz, lagert sich aber nicht wie Neuschnee ab. Das Schnee-Wasser-Verhältnis beschreibt das Volumen von Schneekristallen; auf Eiskörner angewandt liefert es eine Höhe, die es nicht gibt.

Nassschnee bleibt Schnee und behält seine Höhe, wird aber als eigene Art geführt.

Alle drei sind Einzelmodellaussagen — kein anderes Modell der Auswahl führt das Feld. Das macht sie nicht wertlos: Eine vertikalprofilbasierte Diagnose wegzumitteln, weil die übrigen fünf Modelle die Größe nicht kennen, verwürfe gerade bei einem seltenen und folgenreichen Ereignis die einzige vorhandene Information. Die Herkunft wird deshalb mitgeführt, nicht die Aussage unterdrückt.

14.3 Symbol und Menge beantworten Verschiedenes

Das Wettersymbol stammt aus der Abstimmung der Modell-Wettercodes und beschreibt den **Gitterpunkt** des Modells. Die Mengen rechnen wir für den Standort. Beide dürfen auseinandergehen, und das ist kein Widerspruch: Ein kurzer Schneeschauer ist ein Ereignis — er beeinflusst Sicht, Nässe und Vereisung —, auch wenn am Ende nichts Messbares liegen bleibt. Das Symbol beantwortet die Frage nach dem Ereignis, die Zelle die nach der Ablagerung.

Die Schwellen sind deshalb bewusst verschieden: Ein Symbol darf erscheinen, wo die Mengenzelle einen Strich zeigt. An fünf Aufzeichnungen betrifft das vier von 260 Blöcken, mit Mengen zwischen 0,07 und 0,41 cm.

Eine Grenze gilt trotzdem. Ein Schneesymbol setzt ein Schneesignal am Standort voraus — mindestens ein Modell mit fester Phase und eine Menge über null. Verwirft die Standortphase den Schnee in allen Modellen, darf kein nachgelagerter Zweig ihn wiederherstellen. Genau das geschah zuvor: Der Zweig, der bei Auflockerungen „Schneeschaumer“ statt „bedeckt“ setzt, ersetzte einen Schneecode durch Code 85 — selbst einen Schneecode — und stellte damit her, was die Mengenschwelle gerade verworfen hatte. Sonne kennzeichnet ein vorhandenes Schneesignal näher; sie erzeugt keines.

14.4 Wann statt einer Zahl ein Strich steht

Menge und Wahrscheinlichkeit stehen in derselben Spalte untereinander, beantworten aber nicht dieselbe Frage. Die Wahrscheinlichkeit ist ein Mittel je Stunde und stammt allein aus den Modellen mit Ensemble; AROME und AIFS tragen Menge bei, aber nie eine Wahrscheinlichkeit.

Die angezeigte Menge ist eine Summe über die sechs Stunden des Blocks, gemittelt über **alle** Modelle mit gültigem Niederschlag — auch über die, die null melden. Sie beantwortet damit die Frage, die neben einer Ensemblewahrscheinlichkeit steht: wie viel im Mittel zu erwarten ist, nicht wie viel in denjenigen Modellen fällt, die gerade diese Phase erwarten. Ein Mittel nur über die Träger einer Phase hebt eine Einzelmeinung auf das Niveau eines Konsenses.

Grundlage ist die standortkorrigierte Aufteilung, nicht das Rohfeld des Anbieters. `rain` und `snowfall` gelten für die Modellorographie (Abschnitt 3.5) und schließen die Bilanz nicht: An fünf Aufzeichnungen gab es Blöcke, in denen drei Modelle Niederschlag führten, die Standortlogik ihn als flüssig auswies und die Regenzeile dennoch null zeigte. Ein unbedingtes Mittel über die Rohfelder wäre keine Lösung — es erzeugte am Mont Blanc im Winter aus null sichtbaren Regenblöcken neun.

Was das bewegt, ist gemessen: Die großen Mengen bleiben, wo alle Modelle dieselbe Phase tragen — 8,3 cm am Großglockner, 14,9 cm an der Zugspitze, 29,7 cm am Mont Blanc, jeweils unverändert. Kleiner wird nur, was zuvor von wenigen Modellen getragen und durch die bedingte Mittelung überhöht wurde.

Ein Balken kann über einem Strich stehen. Die beiden Zeilen beantworten verschiedene Fragen: Der Balken zeigt die Lösung **eines** Modells, die Zeile das gewichtete Mittel über alle. Sieht ein einzelnes Modell 0,5 mm und bleiben die übrigen trocken, steht ein Balken da, während das Mittel unter der Anzeigeschwelle bleibt. An fünf Aufzeichnungen betrifft das 5 von 260 Blöcken, alle mit einem Trägeranteil von 15 bis 19 %.

Die Schwelle prüft dabei den **gerundeten** Wert, weil die Zelle rundet: 0,45 erscheint als „0,5“ und gilt damit als sichtbar. Gegen den Rohwert geprüft bliebe dort ein Strich unter einem Balken, ohne dass die Modelle uneins wären.

Der Strich behauptet dort nicht „es fällt nichts“, sondern „keine sichtbare Ensemblemenge“. Beide Aussagen stimmen, und die Balken bleiben stehen: Sie sind gerade an Übergängen, bei lokalen Schauern und unsicheren Frontzeitpunkten das frühe Signal, das ein Mehrmodellprodukt liefern soll. Sie an die Schwelle der Zeile zu koppeln nähme der Zelle diese Information.

Wie breit der Niederschlag getragen wird, läuft als `precipConsensus` mit — der Gewichtsanteil der Modelle mit nennenswerter Menge. Er trennt die beiden Lagen, die in der Zelle gleich aussehen: ein Strich bei breitem Konsens gegen einen Strich neben einem Minderheitssignal. **Eine Kennzeichnung dieses Zustands in der Zelle fehlt und ist offen** — sie darf weder ein weiteres Zeichen neben die Zahl setzen noch die Balken abschwächen, die in kleinen Zellen ohnehin nur wenige Pixel hoch sind.

Meldet ein Modell ohne Ensemble über mehrere Stunden eine Spur, ergibt das eine sichtbare Blockmenge, während die Ensembles der übrigen korrekt null sagen. Beide Zahlen stimmen für sich. Nebeneinander stünde dann „null Prozent Niederschlag“, neben ausgewiesenem Niederschlag — ein Widerspruch, den der Leser nicht auflösen kann, weil die verschiedenen Bezugsgrößen nicht danebenstehen.

Deshalb erscheint dort „<1 %“ statt einer Null. Maßgeblich ist der gerundete Wert, weil die Anzeige rundet: 0,4 % stünde sonst als „0 %“, da, und der Widerspruch wäre derselbe.

Der Strich bedeutet an dieser Stelle nicht „keine Daten“, sondern: Zur angezeigten Menge gibt es keine Wahrscheinlichkeit auf derselben Ereignisbasis. Die Regel ist kein Flächenschnitt — an einer geprüften Aufzeichnung greift sie in einem von 27 Blöcken mit Niederschlag, und sie trifft dort eine Spurenmenge unter einem Millimeter. Stünde dort ein Millimeterbetrag, wäre nicht die Anzeige das Problem, sondern die Rechnung.

Bleibt der Block trocken, steht die Null weiterhin. Dann widerspricht sie nichts, sondern ist die Aussage selbst.

15 Gesetzte Größen

Die folgenden Werte sind in der Verarbeitung fest hinterlegt. Sie stehen hier vollständig, weil ohne sie keine der beschriebenen Rechnungen nachvollziehbar ist; ihre Herkunft und ihr Kalibrierungsstand sind in Abschnitt 16.5 bewertet.

Größe	Wert	Abschnitt
Phase am Standort		
Übergangszone, vollständig fest	$T_w \leq 0,0 \text{ °C}$	6.2
Übergangszone, vollständig flüssig	$T_w \geq 1,5 \text{ °C}$	6.2
Untergrenze der Näherung, Temperatur	-20 °C	5.4.1
Untergrenze der Näherung, Feuchte	5 %	5.4.1
Schnee-Wasser-Verhältnis		
Toleranz der Säulenauswahl	50 m	7.2
Ende der SLR-Geraden	-16 °C	7.2
SLR unterhalb davon	Cobb-Stützstellen	7.2
Kleinstes Verhältnis	7,2	7.2
Beginn des Windabschlags	20 km/h	7.3
Volle Wirkung des Windabschlags	40 km/h	7.3
Stärkster Windabschlag	0,7	7.3
Wind und Böen		
Überblendung 10 m → 850 hPa	1200–1600 m	8.1
Überblendung 850 → 700 hPa	2300–2800 m	8.1
Expositionszuschlag Gipfel / Sattel	1,4 / 1,3	8.3
Böenfaktor unterhalb 1400 m	1,2	8.4
Böenfaktor bei 2500 m	1,3	8.4
Böenfaktor ab 4000 m	1,45	8.4
Deckel des gestapelten Produkts	1,7	8.4

Größe	Wert	Abschnitt
Kondensationsniveau und Höhenstufen		
Faktor der Taupunktdifferenz	125 m je Grad	9
Schritt der Höhenstufen	1000 m	13
Mindestabstand zum Gipfel	500 m	13
Spannweite im Hochalpinen	2000 m	13
Abstand einer Fläche zur Modelloberfläche	100 m	3.6.2
Modellgewicht, damit eine Stufe gezeigt wird	60 %	13.2
Gültige Stunden, damit eine Stufe gezeigt wird	2/3	13.1

Tabelle 24: Gesetzte Größen der Verarbeitungskette.

Größe	Wert	Abschnitt
Gewitterrisiko		
CAPE-Schwellen	200 / 500 J/kg	10.1
Schwelle der konvektiven Hemmung	25 J/kg	10.1
Lifted-Index-Schwellen	0 / -4	10.1
Konvektive Wolkenobergrenze, je Lauf	7000 m	10.1
Zuschlag bei Modell-Gewitter	2 Punkte	10.1
Modelle für den Zuschlag	2	10.1
Obergrenze des Scores	8	10.1
Feuchtegata: Wahrscheinlichkeit	20 %	10.3
Feuchtegata: relative Feuchte	70 %	10.3
Symbol und Korrekturkaskade		
Dauer für die Symbol-Eskalation	2 h	11.2
dieselbe ab Rang 60	1 h	11.2
Rang, ab dem eine Stunde genügt	60	11.2
Untergrenze der Niederschlagsanzeige	0,1 mm	11.3
Abwertung bei leichtem Niederschlag	0,5 mm	11.3
Modellanteil dazu	40 %	11.3
Abwertung bei schwachen Schauern	1,0 mm	11.3
Modellanteil dazu	50 %	11.3
Mindestschnee für das Schneesymbol	0,5 cm	11.3
Mindestzahl stützender Modelle	2	11.3
Sonnenanteil für Schauersymbole	30 %	11.3
Modelle für den Phasenabgleich	2	11.3
Sonnenanteil für Schönwetter	50 %	11.3
Kondensationsniveau über dem Standort	1500 m	11.3
Modelle für schwere Meldungen	2	11.2
Umgewichtung nach Vorlaufzeit		
Ab Vorlaufzeit	3 Tage	4.2
Gewicht GFS / ECMWF / AIFS	0,5 / 2,0 / 2,0	4.2

Tabelle 25: Gesetzte Größen der Symbolbildung, des Gewitterrisikos und der Umgewichtung.

16 Grenzen und offene Punkte

16.1 Punktgenauigkeit gegen Modellauflösung

Ausgegeben werden Werte für einen benannten Punkt, mit Höhenkorrektur, Expositionszuschlag und höhenabhängigem Böenfaktor. Die Maschenweite der Modelle liegt zwischen 1,3 km und 25 km (Tabelle 2).

Jedes Modell führt am zuständigen Gitterpunkt eine eigene Geländehöhe, und im Hochgebirge weicht sie von der Gipfelhöhe erheblich ab — bei den grob aufgelösten Globalmodellen um mehr als tausend Meter, weil ein Gitterpunkt über 25 km mittelt und der Gipfel darin verschwindet. Der 10-m-Wind eines Modells gilt für diese Höhe, nicht für den Gipfel.

Die Korrekturen überbrücken die Differenz und erzeugen dabei eine Punktgenauigkeit, die die Datenbasis nicht trägt; dies ist eine Modellierungsentscheidung, keine Messung. Bugnard et al.²¹ weisen für alpine Täler systematische Abweichungen in Temperatur und Wind nach, die auf Ebene der Modellphysik liegen.

16.2 Nicht dokumentierte Eingangsgrößen

CAPE, CIN, Lifted Index, Nullgradgrenze, Schneefall und gefühlte Temperatur werden beim Datenanbieter ohne dokumentierte Herleitung abgeleitet (Abschnitt 3.3). Unterschiede zwischen Modellen oder Änderungen der Ableitung sind daher nicht auszuschließen. Für CAPE kommt hinzu, dass Reanalysen den Wert systematisch unterschätzen (Taszarek et al.²³) — ein Befund zu ERA5 und MERRA-2, dessen Übertragbarkeit auf die hier verwendeten Ausgaben offen ist (Abschnitt 10.2).

Die eigene Absicherung deckt diesen Fall nicht ab. Sie vergleicht die Verarbeitung gegen aufgezeichnete Antworten der Schnittstelle und schlägt an, sobald sich das **eigene** Verfahren ändert. Ändert der Anbieter dagegen die Herleitung einer Eingangsgröße, ändern sich die Antworten selbst — und die Prüfung bleibt still. Bemerkbar würde das erst an Symptomen: an Werten, die nicht mehr zur Wetterlage passen.

16.3 Das Schnee-Wasser-Verhältnis bleibt eine Heuristik

Im kalten Ast folgt die Kurve unterhalb -16 °C den Stützstellen der operationellen Tabelle (Abschnitt 7.2). Eine monoton fortgesetzte Kurve läge dort deutlich höher — bei -20 °C 30:1 gegen 18, bei -24 °C 30:1 gegen 8,8.

Was bleibt, ist grundsätzlicher. **Erstens** liegt die Kurve im wärmeren Ast weiter über der Tabelle, bei -10 °C mit 20 gegen 12. Das ist der Unterschied zwischen zwei publizierten Verfahren; welches im Alpenraum näher an der Beobachtung liegt, ist hier nicht geprüft.

Zweitens sind beide Enden übernommen, nicht kalibriert. Die Stützstellen stammen aus einem amerikanischen Stationsnetz, die Gerade aus einer Auswertung über der Nordhalbkugel; ein alpines Trainingsset gibt es für keines von beiden.

Drittens ist die Eingangsgröße eine einzige Temperatur. Ein Profilverfahren gewichtet die Schichten nach ihrem Anteil an der dendritischen Wachstumszone; die verwendete Kurve kann zwischen einer tiefen, mächtigen Wachstumsschicht und einer dünnen in derselben Höhe nicht unterscheiden, solange das Säulenmaximum gleich ist.

Ebenso wenig lässt sich die Abweichung als Fehler gegen ein besseres Verfahren messen. Rosenow et al.⁸ verglichen vier operationell eingesetzte SLR-Verfahren an fünf Winterstürmen und fanden **kein** eindeutig bestes oder schlechtestes: Selbst die feste Annahme 10:1 lieferte in drei der fünf Fälle

an mindestens 19 % der Stationen die beste Vorhersage, während das profilbasierte Verfahren nach Cobb in keinem Fall den größten Anteil bester Vorhersagen erreichte. Die Streuung zwischen den Verfahren ist demnach größer als der Vorsprung eines einzelnen.

Die jüngeren Random-Forest-Verfahren (Veals et al.⁹, Pletcher et al.¹⁰) brauchen dieses Profil nicht; sie kommen mit bodennahen Prädiktoren aus und wären damit auf die verfügbaren Felder anwendbar. Ihr Abstand zu den operationellen Kurven ist erheblich (Abschnitt 2.1).

Zwei Einschränkungen bleiben. Trainiert sind beide an nordamerikanischen Stationen; ein alpinen Trainingsset gibt es nicht. Und Pletcher et al. benennen selbst, wo ihr Verfahren schwächelt: bei Verhältnissen über 20 in kalter, ruhiger Luft — also im Band zwischen -10 und -19 °C, in dem auch die hier verwendete Kurve ihre höchsten Werte erreicht, mit 26 bei -16 °C. Beide Verfahren sind damit gerade dort am unsichersten, wo aus wenig Wasser viel Schnee wird. Der datengetriebene Ansatz ist der konkreteste Weg aus der Heuristik, aber kein fertiger Ersatz für den kritischen Bereich.

16.4 Grenzen direkter Modellböen und Modellstreuung

Für die angezeigte Böe besteht keine Deckelung gegen den **angezeigten** Mittelwind. Beide Größen gehören zu unterschiedlichen Höhen und teils zu unterschiedlichen Gitterpunkten (Abschnitt 16.1); ein Verhältnis aus ihnen ist deshalb kein Böenfaktor, und eine daraus abgeleitete Obergrenze wäre keine physikalische Schranke, sondern eine willkürliche.

Davon zu unterscheiden ist ein **modellinterner** Vergleich: Die 10-m-Böe und der 10-m-Wind desselben Modelllaufs beziehen sich auf dasselbe Feld, denselben Gitterpunkt und dieselbe Diagnosekonvention. Ihr Verhältnis ist ein echter Böenfaktor, und eine Schranke darauf wäre zulässig. Sie ist derzeit nicht gesetzt: Dazu müsste bekannt sein, welche Böendefinition und welche Mittelungszeit jedes Quellmodell verwendet, und der gewählte Wert müsste gegen gemessene Böen an Gipfelstationen bestehen. Beides steht aus. Die Herkunft wird stattdessen mitgeführt (Tabelle 14), sodass sich auffällige Fälle nachträglich auswerten lassen.

Nach unten ist die Anzeige gedeckelt: Das Produkt aus Böen- und Expositionsfaktor darf 1,7 nicht überschreiten. Dieser Wert ist gesetzt, nicht abgeleitet — er begrenzt, wie viel die gestapelte Heuristik behaupten darf, und lässt Modellböen unberührt.

Drei Entscheidungen der Aggregation begrenzen die Streuung bereits ohne eine solche Schranke. Die Modellböen gehen als gewichtetes Mittel ein, nicht als Maximum — ein einzelnes Modell bestimmt die Anzeige damit nicht mehr allein. Der Expositionszuschlag wirkt nicht auf sie, sodass der im Modell bereits enthaltene Turbulenzanteil nicht ein zweites Mal verstärkt wird. Und eine zu tiefe Modellböe wird angehoben statt verworfen, sodass die Mittelung nicht über eine nach oben zensierte Teilmenge läuft.

Aus dem Hochgebirge liegt eine Messung vor: Naaïm-Bouvet et al.²⁵ werten einen Winter am Col du Lac Blanc aus, 2700 m in den französischen Alpen. Der dort bestimmte Böenfaktor — das Verhältnis der Sekundenspitze zum Zehnminutenmittel — streut breit bis etwa 5,5 und hängt von der Anströmrichtung ab. Die Wahrscheinlichkeit, dass er den Wert 2 übersteigt, liegt bei Nordwind bei 7 %, bei Süd- und Ostwind bei 14 % und bei Westwind über 60 %; auf Westwind entfallen allerdings nur 2 % der Messungen, die Autoren weisen ausdrücklich darauf hin.

Wegen der kürzeren Mittelungszeit ist diese Größe mit den hier verwendeten Modellböen nicht unmittelbar vergleichbar. Sie taugt deshalb weder als Beleg für eine Obergrenze noch als Beleg gegen eine — sie zeigt lediglich, dass Verhältnisse über 2 im alpinen Gelände vorkommen.

Letson et al.²⁶ kommen für komplexes Gelände zu einem zweiten Befund: Böen fallen dort nicht nur größer aus als im Flachland, sie zerfallen auch räumlich. Die mittlere Wahrscheinlichkeit, dass eine

Böe an zwei benachbarten Masten gleichzeitig auftritt, liegt bei 0,27. Ein Böenwert gilt damit noch weniger für den Nachbargrat, als es ein Mittelwind täte.

Eine belastbare Obergrenze erfordert den Vergleich mit gemessenen Böen an Gipfelstationen; Modellvergleiche allein sind dafür nicht geeignet.

16.5 Nicht kalibrierte Parameter

Größe	Wert	Herkunft
Böenfaktoren	1,2 / 1,3 / 1,45	gesetzt
Expositionszuschläge	1,4 / 1,3	Erfahrungswerte, nur auf den Wind
Deckel der gestapelten Heuristik	1,7	gesetzt, Größenordnung eingeordnet
Faktor des Kondensationsniveaus	125	Literatur ²²
CAPE-Schwellen	200 / 500	gesetzt, nicht gegen Blitzdaten geprüft
SLR-Stützstellen	8 ... 26	Literatur ⁷ , unterhalb -10 °C ungeprüft
Modellgewichte	2,0 / 1,5 / 1,0	gesetzt
Kaskadenschwellen	0,1 ... 1,0 mm	gesetzt

Tabelle 26: Gesetzte Parameter und ihre Herkunft.

Kein Verfahren ist gegen Beobachtungsdaten kalibriert. Die Klassifikation als Gipfel oder Sattel stammt aus OpenStreetMap und bildet die Exposition nicht ab: Ein bewaldeter Voralpengipfel erhält denselben Faktor wie ein freistehender Grat.

Für den Wind in komplexem Gelände liegen Messkampagnen (Bugnard et al.²¹) und Modellansätze (Le Toumelin et al.²⁰) vor, an denen sich eine Kalibrierung ausrichten ließe.

An welche Bedingungen eine solche Kalibrierung gebunden ist, lässt sich unabhängig davon benennen. Die Vergleichsstationen müssen für die Böe auf Gipfelniveau liegen, sonst vergleicht die Auswertung erneut zwei Höhen miteinander statt zwei Größen am selben Ort. Sie muss mindestens eine volle Wintersaison umfassen: Böenverhältnis und Schnee-Wasser-Verhältnis verschieben sich winterlich systematisch, konvektive Böen treten zurück, gradientgetriebene nehmen zu. Und die Anpassung ist gegen andere Zeiträume zu prüfen als die, aus denen sie stammt — sonst misst die Prüfung sich selbst.

Wie grob die Klassifikation ist, zeigt eine Auswertung des isländischen Stationsnetzes: Ágústsson und Ólafsson²⁷ finden den mittleren Böenfaktor unabhängig von der Schichtung, aber deutlich abhängig von Windgeschwindigkeit und Nahrelief. Er sinkt mit zunehmendem Wind und mit der Stationshöhe, und er erreicht 1,6 und mehr, sobald ein luvseitiger Berg die Station um mindestens 200 m überragt und näher liegt als das Zehnfache dieser Höhe. Maßgeblich ist demnach das Relief in Anströmrichtung, nicht das Etikett eines Punktes.

Der hier verwendete Böenfaktor steigt dagegen mit der Höhe. Er bezieht sich allerdings auf eine andere Größe — auf den Höhenwind einer Druckfläche statt auf den gemessenen Stationswind —, sodass beide Befunde nicht unmittelbar im Widerspruch stehen. Geprüft ist das nicht.

Für den Expositionszuschlag zeichnet sich ein anderer Weg ab als eine Kalibrierung der beiden Faktoren: Geländebasierte Downscaling-Verfahren leiten die Beschleunigung aus dem Höhenmodell ab, statt aus einer Ortsklassifikation. Forthofer et al.²⁸ vergleichen ein massenerhaltendes und ein zusätzlich impulserhaltendes Verfahren mit dem homogenen Windfeld eines grob aufgelösten Vorhersagemodells und messen beide gegen Beobachtungen. Ein solches Verfahren würde den Zuschlag

an die tatsächliche Geländeform binden — an Gratlage, Sattelform und Anströmrichtung — statt an die Frage, ob OpenStreetMap den Punkt als Gipfel führt.

16.6 Unterschiedliche Grenzgrößen bei ICON

ICON liefert neben der interpolierten Nullgradgrenze eine Feuchttemperatur-Diagnose der Schneefallgrenze. Beide Größen können mehrere hundert Meter auseinanderliegen. Gemeinsam gemittelt ergäben sie eine Größe ohne einheitliche Bedeutung — und da ICON EU bei etwa +118 h endet (Tabelle 2), wechselte beim Übergang von Tag 5 auf Tag 6 das angezeigte Konzept, was die Anzeige ohne Änderung der Wetterlage springen ließe.

Die angezeigte Nullgradgrenze wird deshalb einheitlich aus der Lufttemperatur berechnet; die Schneefallgrenze bleibt der Phasenbestimmung vorbehalten (Abschnitt 5.3). Die Zahlenzeile wechselt am Reichweitenende damit nicht das Konzept. Ob die Trennung im Alpenraum das bessere Ergebnis liefert, ist nicht gegen Beobachtungen geprüft.

Für die Regen-Schnee-Grenze bleibt ein Quellenwechsel dagegen möglich: Fällt ICON EU aus der Reichweite, kann ein Modell von `snowfall_height` auf eine der übrigen Quellen wechseln (Abschnitt 5.4.1). Die Schwelle bleibt dabei dieselbe, die Herleitung nicht. Wie groß der Versatz an dieser Stelle ausfällt, ist nicht quantifiziert; die Herkunft läuft je Modell in den Daten mit, damit ein solcher Sprung als Quellenwechsel erkennbar ist und nicht als Wetteränderung gelesen wird.

16.7 Rangfolge von Nebel

Die Einordnung von Nebel in Tabelle 16 über Regen, aber unter Regenschauern, ist eine Produktentscheidung. Begründung: Sichtverlust erschwert Orientierung und Abstieg; zudem ist Regen in der Anzeige mehrfach vertreten (Mengenzeile, Balken, Wahrscheinlichkeit), Nebel ausschließlich im Symbol. Starker Regen (Code 65) rangiert über Nebel, da bei hohen Intensitäten Gefahren hinzukommen, die reine Sichtbehinderung nicht aufweist.

16.8 Unterschiedliche Modellmengen für Score und Symbol

Der Gewitterscore rechnet über alle Modelle mit Daten, quantitative Größen nur über die vom Nutzer aktivierten. Begründung: CIN und Lifted Index sind Instabilitätsgrößen ohne Auflösungsbezug und dürfen für einen Warnwert konservativ einbezogen werden; abgelesene Zahlen dürfen dagegen nicht aus abgewählten Modellen stammen. Score und Symbol können daher auseinanderlaufen.

16.9 Grenze der Phasenbestimmung

Jennings et al.¹³ zeigen eine obere Schranke der aus bodennahen Größen erreichbaren Genauigkeit der Regen-Schnee-Trennung. Eine Umstellung auf ortsabhängige Schwellen (Jennings et al.¹¹) bliebe von dieser Schranke begrenzt — und Fontrodona-Bach et al.¹² zeigen für die Nordhalbkugel, dass eine Verschiebung der Schwellen die Güte gar nicht durchgängig verbessert.

16.10 Höhenbezug der Phasenaufteilung

Der Datendienst rechnet Temperatur, Taupunkt, Feuchte und Bodendruck auf die angefragte Höhe um, die Aufteilung des Niederschlags in einen flüssigen und einen festen Anteil dagegen nicht. Diese Aufteilung beschreibt die Gitterhöhe des Modells. Das Verfahren stellt damit zwei Größen nebeneinander, die verschiedene Orte beschreiben.

Der Versatz ist keine Eigenheit einzelner Punkte. Über sechs Alpengipfel und sechs Modelle gemessen — 36 Kombinationen — liegt der Gitterpunkt in 35 Fällen unter dem Gipfel, im Mittel 1156 m, im Extrem 2732 m. Modellgelände glättet Gipfel weg, und zwar fast ausnahmslos in eine Richtung. Die einzige Ausnahme ist AROME am Jungfraujoch, wo das Gitter 53 m über den Gipfel reicht — die Glättung hebt dort den Sattel zwischen zwei höheren Graten an, statt eine Spitze abzutragen.

Gipfel	ICON EU	ICON D2	AROME	ECMWF	GFS	AIFS
Mont Blanc, 4808 m	−1940	−728	−921	−2732	−2492	−2732
Großglockner, 3798 m	−1267	−847	−566	−1529	−1594	−1529
Jungfraujoch, 3466 m	−917	−103	+53	−667	−1096	−667
Sonnblick, 3106 m	−793	−912	−399	−1115	−1104	−1115
Zugspitze, 2962 m	−1324	−785	−728	−1619	−1507	−1619
Säntis, 2502 m	−1137	−586	−460	−1304	−1434	−1304

Tabelle 27: Höhe des Modellgitterpunkts gegenüber dem Gipfel, in Metern. ECMWF und AIFS tragen dieselben Werte, weil sie an jedem der sechs Punkte dieselbe Gitterzelle des 0,25°-Gitters treffen — die Spalten sind nicht doppelt gesetzt.

Gezählt über sieben Tage an der Zugspitze weisen ICON EU und ICON D2 in 29 beziehungsweise 28 % der Niederschlagsmenge einen flüssigen Anteil aus, obwohl ihre eigene Schneefallgrenze auf oder unter dem Gipfel liegt. Am Mont Blanc (4808 m) melden vier von fünf Modellen über zehn Tage überhaupt keinen Schnee, bei 30 bis 51 mm Niederschlag und Tiefstwerten zwischen −11 und −15 °C — allein ICON D2, dessen Gitterpunkt mit 4080 m in Gipfelnähe liegt, weist welchen aus.

Dagegen steht die Repartitionierung (Abschnitt 6.2): Die Menge bleibt die des Modells, ihre Aufteilung entsteht aus der Feuchttemperatur am Standort. Sie ist die einzige Phasenentscheidung des Verfahrens, keine Größe neben der Aufteilung des Gitterpunkts.

Verbessert wird damit die **Phase** am Standort. Die räumliche Genauigkeit der vorhergesagten Niederschlagsmenge bleibt unberührt — sie ist die Menge des Gitterpunkts, mit dessen Orographie. Wie groß dieser verbleibende Anteil ist, zeigt der folgende Abschnitt.

Für die Zeilen des Höhengitters unterhalb des Gipfels gilt dieselbe Trennung noch einmal, aber auf anderer Grundlage: Dort trägt nicht die Feuchttemperatur am Standort die Phase, sondern das Druckflächenprofil auf der jeweiligen Zeilenhöhe (Abschnitt 13.1). Die Menge bleibt auch dort die des Gitterpunkts. Ein Höhengitter zeigt damit eine höhenaufgelöste **Phase** über einer höhenkonstanten **Menge** — zwei Aussagen mit verschiedener Reichweite in einem Bild. Die Balkenhöhe ist keine Behauptung über den Niederschlag auf dieser Höhe.

16.11 Wetterunabhängige Höhenkorrektur bei drei Modellen

Die Höhenumrechnung des Datenanbieters folgt zwei verschiedenen Verfahren (Tabelle 5). Für ECMWF, GFS und AIFS ist sie eine feste Rate von 0,650 K je 100 m, unabhängig von Inversion, Schichtung und Advektion.

Das trifft die tragende Größe: Jede Schneemenge entsteht aus der Feuchttemperatur am Standort (Abschnitt 6.2), und deren drei Eingangsgrößen stammen genau aus dieser Umrechnung. Für die Hälfte der Modelle ruht die Phasenentscheidung damit auf einer wetterunabhängigen Annahme, über Distanzen, die der Gitterversatz vorgibt (Tabelle 27): an der Zugspitze 1619 m bei ECMWF und AIFS, am Mont Blanc 2732 m. Im zweiten Fall werden 17,8 K allein aus der festen Rate gewonnen.

Beobachtungsstudien zeigen, dass der bodennahe Temperaturgradient mit Tageszeit, Jahreszeit und Wetterlage erheblich schwankt und die verbreitete Standardrate nicht allgemein überträgt. Gerade

die Lagen, auf die es hier ankommt — Frontdurchgang, Inversion, feuchte Grenzschicht unter trockener Höhenluft — sind die, in denen sie am wenigsten trägt.

Was daraus nicht folgt. Der Vergleich zeigt eine methodische Asymmetrie, nicht deren Vorzeichen: Ob die feste Rate schlechtere Phasen liefert als eine aus der Modellvertikale abgeleitete, ist nicht geprüft. Eine robuste Konstante kann über 2000 m weniger Schaden anrichten als eine grob aufgelöste Vertikale. Die Verarbeitung behandelt deshalb alle sechs Modelle unverändert gleich; eine Distanzschwelle, ab der Modelle aus der Phasenbestimmung fielen, wäre beim gegenwärtigen Kenntnisstand eine verdeckte Kalibrierung.

Die Frage ist entscheidbar, und zwar in der geplanten Validierung gegen Stationsdaten: Die Extrapolationsdistanz und die Zugehörigkeit zur festen oder zur zeitvariablen Gruppe gehören dort als eigene Schichtungsmerkmale hinein, zusammen mit ihrer Wechselwirkung. Wächst der Phasenfehler mit der Distanz bei der festen Rate stärker als bei den übrigen Modellen, liegt eine belastbare Grundlage für eine Korrektur vor. Ohne diese Messung gibt es keine.

Ein technischer Weg steht daneben offen und ist nicht erprobt: Temperatur und geopotentielle Höhe der Druckflächen liegen je Modell vor und werden bereits für die Nullgradgrenze und das Säulenmaximum verwendet. Aus ihnen ließe sich die Standorttemperatur vertikal interpolieren, statt die mit fester Rate korrigierte 2-m-Temperatur zu übernehmen. Die gelieferte 2-m-Temperatur enthält allerdings bodennahe Modellphysik, die eine Druckfläche der freien Atmosphäre nicht hat — am Gipfel kann das ein Vorteil sein, in anderen Lagen ein Verlust. Der Ansatz gehört offline geprüft, nicht ausgerollt.

16.12 Wechselnde Trägermenge der Wahrscheinlichkeit

Die Niederschlagswahrscheinlichkeit mittelt über alle Modelle, die eine liefern (Abschnitt 12.3) — höchstens ICON EU, ECMWF und GFS. Welche davon in einem Block Daten führen, wechselt. Die angezeigte Zahl ist deshalb keine durchgängig gleich zusammengesetzte Multi-Modell-Größe: Ein Wert kann auf drei Ensembles ruhen oder auf einem einzigen.

Die Zahl der Träger wird mitgeführt, sperrt aber nichts. Bei einem einzigen Träger zu sperren nähme gerade am Rand der Vorhersagereichweite den größten Teil der verbleibenden probabilistischen Information — dort laufen ICON D2 und AROME aus. Für eine spätere Prüfung gegen Beobachtungen sind ein, zwei und drei Träger getrennt auszuwerten.

Dieselbe Zurückhaltung gilt für die Modellmenge hinter der Menge: Dass sie eine andere ist als die hinter der Wahrscheinlichkeit, ist bei dieser Feldverfügbarkeit der Normalfall und wird als Lage vermerkt, nicht als Fehler behandelt.

Hinzu kommt, dass die Größe den Gitterpunktbezug trägt: Sie reagiert nicht auf die angefragte Höhe (Abschnitt 3.5) und ist nicht gegen Stationsdaten kalibriert.

16.13 Die vorhergesagte Niederschlagsmenge

Beim Abgleich der Schneekette gegen die Beobachtung fiel eine Abweichung auf, die nicht im Verfahren liegt, sondern in seinem Eingang.

Für den 4. bis 13. Januar 2026 sagten alle sechs Modelle an der Zugspitze zwischen 24,1 und 39,4 mm Niederschlag voraus. Die Station des Deutschen Wetterdienstes an derselben Stelle maß 68,7 mm.

Quelle	Niederschlag
AROME	39,4 mm
ICON D2	36,5 mm

Quelle	Niederschlag
ICON EU	36,4 mm
ECMWF IFS	27,6 mm
AIFS	24,9 mm
GFS	24,1 mm
Station DWD 05792	68,7 mm

Tabelle 28: Zugspitze, 4.–13. Januar 2026. Die Differenz belegt eine erhebliche Abweichung zwischen Modell- und Stationswert. Ihre Zerlegung in Modellfehler und messbedingten Unterfang bleibt ohne stationsspezifische Metadaten und Windkorrektur offen — bei Schnee und Wind fängt ein Niederschlagsmesser eher zu wenig als zu viel, der Stationswert kann also selbst zu niedrig sein.

Das begrenzt, was über die absolute Neuschneemenge gesagt werden kann. Die Kette rechnet die Phase am Standort und das Verhältnis physikalisch begründet — aber auf einer Wasserbasis, deren Größe hier nicht bestätigt ist. Ein einzelner Zeitraum an einem Standort reicht nicht, um daraus eine Korrektur abzuleiten.

16.14 Die Schicht über dem Standort

Die Phase entsteht aus der Feuchttemperatur **am** Standort. Eine warme Schicht darüber kann einen fallenden Kristall schmelzen lassen, auch wenn es am Standort friert; die Phase am Boden hängt also nicht allein vom Standortwert ab.

Eine Dämpfung an der Nullgradgrenze (Abschnitt 7.4) wäre dafür kein tauglicher Stellvertreter: Sie kennt weder Mächtigkeit noch Temperatur einer Schmelzschicht. Ein tauglicher bräuchte Temperatur und Feuchte auf mehreren Ebenen über dem Standort samt integrierter Schichtenergie — Größen, die in der nötigen vertikalen Auflösung nicht vorliegen und für den Alpenraum nicht kalibriert wären. Der Punkt bleibt offen.

16.15 Einheitenführung in der Kette

Die Umrechnung von Millimetern in Zentimeter geschieht an einer benannten Stelle (Abschnitt 7.1). Robuster wäre, sämtliche Niederschlags- und Wasseräquivalentmengen durchgehend in Millimetern zu führen, erst an der Ausgabe umzurechnen und die Feldbezeichnungen die Einheit tragen zu lassen: Eine Verwechslung wäre dann nicht mehr möglich, sondern als Typfehler sichtbar.

Die Umstellung steht aus. Sie ist keine Korrektur eines bestehenden Fehlers — die Umrechnung ist an ihrer Stelle richtig — sondern eine Absicherung gegen künftige. Sie rangiert damit hinter den Punkten dieses Kapitels, die ein laufendes Verfahren betreffen.

16.16 Blitzpotential und Aufwind ohne Schwelle

Zwei Größen zielen auf das Gewitter selbst, statt es wie der Score aus Umgebungsbedingungen zu erschließen: das Blitzpotential und der Aufwind. Beide liefert allein ICON D2, und nur für dessen Reichweite von rund zwei Tagen.

Sie werden erhoben und mitgeführt, gehen aber in keine Punktzahl und in keine Anzeige ein. Der Grund ist die fehlende Vergleichsgröße: Eine Schwelle ließe sich nur an Blitzdaten prüfen, und ohne diese wäre jede gesetzte Grenze eine Behauptung. An den vorliegenden Aufzeichnungen — zwei Sommerstandorte, je 48 Stunden — liegt das Blitzpotential an der Zugspitze durchgehend bei null, am Großglockner zwischen null und 0,8; der Aufwind erreicht 3,0 beziehungsweise 3,6. Das genügt, um Einheit, Verfügbarkeit und Fehlwertkonvention festzustellen, nicht aber, um eine Schwelle zu begründen.

Was dafür nötig wäre: mindestens eine vollständige Gewittersaison mit Ereignissen und Nicht-Ereignissen, räumlich passende Blitzortungen mit definiertem Zeit- und Radiusfenster, getrennte Auswertung nach Vorlaufzeit, Tageszeit, Höhe und Wetterlage, und Gütemaße, die Treffer und Fehlalarme gegeneinander stellen. Bis dahin bleiben beide Größen Rohstoff.

17 Rechenbeispiele

Drei Größen, vollständig durchgerechnet. Die Werte stammen aus dem Produktionscode, nicht aus einer Nachbildung; wer sie nachvollziehen will, findet in Klammern die Abschnitte mit den Vorschriften.

17.1 Böe ohne Modellwert

Ein Gipfel auf 3000 m, Mittelwind 45 km/h auf Gipfelniveau, kein aktives Modell liefert ein Böenfeld (Abschnitt 8.4).

Schritt	Wert	Herkunft
Mittelwind	45 km/h	Ensemble, höhenüberblendet
Böenfaktor $g(3000)$	1,35	Abschnitt 8.4
Expositionszuschlag Gipfel	1,4	Abschnitt 8.3
Produkt, ungedeckelt	1,89	$1,35 \times 1,4$
Stapelgrenze greift	1,7	Abschnitt 8.4
angezeigte Böe	76,5 km/h	$45 \times 1,7$

Tabelle 29: Konservative Untergrenze, wenn keine Modellböe vorliegt.

An diesem Fall greift die Stapelgrenze: Böenfaktor und Expositionszuschlag ergeben zusammen 1,89, gerechnet wird mit 1,7. Das ist kein Sonderfall, sondern der Regelfall — an einem als Gipfel eingestuftem Standort überschreitet das Produkt den Deckel bereits ab 1558 m, an einem Sattel ab 2577 m. Oberhalb dieser Höhen ist die angezeigte Untergrenze also nicht mehr das Produkt der beiden Heuristiken, sondern der Deckel selbst.

Der Wert trägt die Kennzeichnung für abgeleitete Böen (Abschnitt 14), weil kein Modell einen Anker liefert.

17.2 Neuschneemenge

4 mm Niederschlag bei einem Säulenmaximum von -6 °C und 25 km/h Bodenwind, an einem Standort auf 3000 m, dessen Feuchttemperatur unter null liegt (Abschnitt 7).

Schritt	Wert	Herkunft
Gesamtniederschlag	4,0 mm	Modellwert
fester Anteil bei $T_w < 0\text{ °C}$	1,00	Abschnitt 6.2
Wasser als Schnee	4,0 mm	$4,0 \times 1,00$
Schnee-Wasser-Verhältnis bei -6 °C	16	Abschnitt 7.2
Windkorrektur bei 25 km/h	0,925	Abschnitt 7.3
Produkt	59,2 mm	$4,0 \times 16 \times 0,925$
angezeigte Menge	5,9 cm	$59, \frac{2}{10}$

Tabelle 30: Die Division durch zehn ist der Übergang von Millimetern zu Zentimetern; das Verhältnis selbst ist dimensionslos (Abschnitt 7.1). Die Nullgradgrenze kommt in dieser Rechnung nicht mehr vor — warum, steht in Abschnitt 7.4.

17.3 Phase am Standort

1,5 °C Lufttemperatur, 65 % relative Feuchte, 710 hPa Bodendruck — die Werte eines Gipfels auf rund 2900 m (Abschnitte 5.4 und 6.2).

Schritt	Wert	Herkunft
Lufttemperatur	1,5 °C	auf Standorthöhe gerechnet
Feuchttemperatur, psychrometrisch	−1,09 °C	Abschnitt 5.4
fester Anteil	1,00	Abschnitt 6.2

Tabelle 31: Das Thermometer steht über null, die Feuchttemperatur darunter — der Niederschlag kommt vollständig als Schnee an.

Zum Vergleich: Dieselbe Gleichung mit Meereshöhendruck statt der 710 hPa des Standorts ergäbe −0,61 °C, also 0,48 K höher. Das ist der reine Druckeffekt — am Phasenübergang je nach Temperaturgradient rund hundert Höhenmeter.

Die Direktformel nach Stull, die ohne Bodendruck greift, käme hier auf −1,29 °C. Sie liegt damit nicht zwischen den beiden Druckfällen, sondern unterhalb beider: Ihr eigener Näherungsfehler und der fehlende Druckbezug zeigen in diesem Punkt in dieselbe Richtung.

Das ist der Regelfall, aber keine Regel. Über die gültige Domäne abgetastet liegt die Näherung in 80,9 % der Fälle unter der psychrometrischen Rechnung bei Meereshöhendruck und in 19,1 % darüber, mit bis zu −1,47 beziehungsweise +2,23 K. Der Abstand zwischen Näherung und Produktionswert setzt sich also aus zwei Anteilen zusammen, deren Vorzeichen sich unabhängig voneinander ändern. Er taugt deshalb nicht als Maß für die Richtigkeit des Produktionswerts (Abschnitt 5.4.2).

Literatur

- [1] Y. Seity u. a., „The AROME-France convective-scale operational model“, *Monthly Weather Review*, Bd. 139, Nr. 3, S. 976–991, 2011, doi: 10.1175/2010MWR3425.1.
- [2] G. Zängl, „ICON — the icosahedral nonhydrostatic modelling framework: key aspects for computational efficiency and scalability“, in *ECMWF Workshop on Scalability, Reading*, 2014.
- [3] S. Lang u. a., „AIFS — ECMWF's data-driven forecasting system“, *arXiv preprint*, 2024, doi: 10.48550/arXiv.2406.01465.
- [4] L. Magnusson u. a., „Skill of medium-range forecast models using the same initial conditions“, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Bd. 103, Nr. 9, S. E2050–E2068, 2022, doi: 10.1175/BAMS-D-21-0234.1.
- [5] P. J. Roebber, S. L. Bruening, D. M. Schultz, und J. V. Cortinas Jr., „Improving snowfall forecasting by diagnosing snow density“, *Weather and Forecasting*, Bd. 18, Nr. 2, S. 264–287, 2003, doi: 10.1175/1520-0434(2003)018<0264:ISFBDS>2.0.CO;2.
- [6] D. K. Cobb Jr. und J. S. Waldstreicher, „A simple physically based snowfall algorithm“, in *21st Conference on Weather Analysis and Forecasting / 17th Conference on Numerical Weather Prediction*, Washington, DC, American Meteorological Society, 2005, S. 2.
- [7] NOAA/National Weather Service, Meteorological Development Laboratory, „Snow/liquid ratio“.

- [8] A. A. Rosenow, H. D. Reeves, und D. D. Tripp, „Evaluation of ensemble snowfall forecasts using operationally used snow-to-liquid ratios in five winter storms“, *Weather and Forecasting*, Bd. 38, Nr. 10, S. 2135–2152, 2023, doi: 10.1175/WAF-D-22-0202.1.
- [9] P. G. Veals u. a., „Predicting snow-to-liquid ratio in the mountains of the western United States“, *Weather and Forecasting*, Bd. 40, S. 1825–1838, 2025, doi: 10.1175/WAF-D-24-0233.1.
- [10] M. D. Pletcher u. a., „Snow-to-liquid ratio prediction over the contiguous United States using machine learning“, *Weather and Forecasting*, Bd. 41, S. 317–338, 2026, doi: 10.1175/WAF-D-25-0124.1.
- [11] K. S. Jennings, T. S. Winchell, B. Livneh, und N. P. Molotch, „Spatial variation of the rain–snow temperature threshold across the Northern Hemisphere“, *Nature Communications*, Bd. 9, S. 1148, 2018, doi: 10.1038/s41467-018-03629-7.
- [12] A. Fontrodona-Bach, B. Schaeffli, R. Woods, und J. R. Larsen, „Estimating robust melt factors and temperature thresholds for snow modelling across the Northern Hemisphere“, *Hydrology and Earth System Sciences*, Bd. 30, S. 2613–2636, 2026, doi: 10.5194/hess-30-2613-2026.
- [13] K. S. Jennings u. a., „Machine learning shows a limit to rain-snow partitioning accuracy when using near-surface meteorology“, *Nature Communications*, Bd. 16, 2025, doi: 10.1038/s41467-025-58234-2.
- [14] O. Brasseur, „Development and application of a physical approach to estimating wind gusts“, *Monthly Weather Review*, Bd. 129, Nr. 1, S. 5–25, 2001, doi: 10.1175/1520-0493(2001)129<0005:DAAOAP>2.0.CO;2.
- [15] P. Zippenfenig, „Open-Meteo.com weather API“. 2024. doi: 10.5281/zenodo.14582479.
- [16] „Manual on Codes, Volume I.1 — Code table 4677: Present weather reported from a manned station“, Nr. WMO-No. 306. Genf.
- [17] R. G. Steadman, „A universal scale of apparent temperature“, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Bd. 23, Nr. 12, S. 1674–1687, 1984, doi: 10.1175/1520-0450(1984)023<1674:AUS-OAT>2.0.CO;2.
- [18] R. Stull, „Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature“, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Bd. 50, Nr. 11, S. 2267–2269, 2011, doi: 10.1175/JAMC-D-11-0143.1.
- [19] K. G. Libbrecht, „The physics of snow crystals“, *Reports on Progress in Physics*, Bd. 68, Nr. 4, S. 855–895, 2005, doi: 10.1088/0034-4885/68/4/R03.
- [20] L. Le Toumelin, I. Gouttevin, N. Helbig, C. Galiez, M. Roux, und F. Karbou, „Emulating the adaptation of wind fields to complex terrain with deep learning“, *Artificial Intelligence for the Earth Systems*, Bd. 2, Nr. 1, S. e220034, 2023, doi: 10.1175/AIES-D-22-0034.1.
- [21] A. Bugnard, M. Collaud Coen, M. Hervo, D. Leuenberger, M. Arpagaus, und S. Monhart, „Comparison of temperature and wind profiles between ground-based remote sensing observations and numerical weather prediction model in complex Alpine topography: the Meiringen campaign“, *Atmospheric Measurement Techniques*, Bd. 18, S. 1039–1061, 2025, doi: 10.5194/amt-18-1039-2025.
- [22] M. G. Lawrence, „The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: a simple conversion and applications“, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Bd. 86, Nr. 2, S. 225–234, 2005, doi: 10.1175/BAMS-86-2-225.

- [23] M. Taszarek, N. Pilgaj, J. T. Allen, V. Gensini, H. E. Brooks, und P. Szuster, „Comparison of convective parameters derived from ERA5 and MERRA-2 with rawinsonde data over Europe and North America“, *Journal of Climate*, Bd. 34, Nr. 8, S. 3211–3237, 2021, doi: 10.1175/JCLI-D-20-0484.1.
- [24] M. A. T. Clive, E. E. H. Doyle, S. H. Potter, C. Noble, und D. M. Johnston, „How visual design of severe weather outlooks can affect communication and decision-making“, *Weather, Climate, and Society*, Bd. 15, Nr. 4, S. 979–997, 2023, doi: 10.1175/WCAS-D-23-0010.1.
- [25] F. Naaim-Bouvet, M. Naaim, H. Bellot, und K. Nishimura, „Wind and drifting-snow gust factor in an Alpine context“, *Annals of Glaciology*, Bd. 52, Nr. 58, S. 223–230, 2011, doi: 10.3189/172756411797252112.
- [26] F. Letson, R. J. Barthelmie, W. Hu, und S. C. Pryor, „Characterizing wind gusts in complex terrain“, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Bd. 19, Nr. 6, S. 3797–3819, 2019, doi: 10.5194/acp-19-3797-2019.
- [27] H. Ágústsson und H. Ólafsson, „Mean gust factors in complex terrain“, *Meteorologische Zeitschrift*, Bd. 13, Nr. 2, S. 149–155, 2004, doi: 10.1127/0941-2948/2004/0013-0149.
- [28] J. M. Forthofer, B. W. Butler, und N. S. Wagenbrenner, „A comparison of three approaches for simulating fine-scale surface winds in support of wildland fire management. Part I. Model formulation and comparison against measurements“, *International Journal of Wildland Fire*, 2014, doi: 10.1071/WF12089.