

LEITFADEN ZUR ERSTELLUNG VON GEWITTERWARNUNGEN

Georg Pistotnik, Rainer Kaltenberger, Thomas Krennert, Alfred Neururer,

Christian Ortner, Christian Pehsl

Version 03.02.2021

1. Einleitung

Ziele und Nutzen dieser Initiative:

- Reduktion der „zutaten-basierten Gewittervorhersage“ in einen möglichst einfachen Entscheidungsprozess
- Angleichung von Gewitter-Vorwarnungen zwischen allen Forecastern durch einheitliche Methodik
- Bessere Interpretierbarkeit der Gewitter-Vorwarnungen für die Kunden bzw. Öffentlichkeit (inklusive Verfügbarkeit zu vorgegebenen Zeiten)
- Impakt-basierte Herangehensweise: Warnfarbe unter Berücksichtigung der erwarteten Häufigkeit und Heftigkeit von Gewittern
- Objektive Verifikation mit allen verfügbaren Datenquellen (Blitzdaten, Wetterstationen, qualitätskontrollierte Unwettermeldungen aus von Feuerwehr-Einsatzdaten und Augenzeugen)
- Einklang mit den Leitlinien der WMO für impakt-basierte Unwettervorhersagen
- Weiterentwicklung des „Sweet Spot Indicators“, Zusammenführung mit dem Entscheidungsbaum für Gewittervorhersage von Matthew D. Parker (North Carolina State University, 2015)

2. Konzept

2.1. Design der Warnmatrix

Das Gefahrenpotenzial einer Gewitter-Situation setzt sich zusammen aus der Häufigkeit von Gewittern (also der Wahrscheinlichkeit, von einem Gewitter getroffen zu werden) und deren Heftigkeit (also dem Impact im Falle eines Treffers, in den auch Vulnerabilität und Exposition mit einfließen). Diese beiden Komponenten werden mit einer jeweils dreistufigen Einteilung in eine entsprechende Warnfarbe übersetzt (Abb. 1).

The diagram shows a 4x3 grid matrix. The vertical axis is labeled 'Häufigkeit' (Frequency) and the horizontal axis is labeled 'Heftigkeit / Auswirkungen' (Intensity / Impacts). The rows are labeled 'Verbreitet', 'Regional', and 'Lokal'. The columns are labeled 'Gering bis mäßig (markantes Wetter)', 'Groß (Unwetter)', and 'Sehr groß (extremes Unwetter)'. The cells are colored as follows: (Verbreitet, Gering bis mäßig) is yellow; (Verbreitet, Groß) is orange; (Verbreitet, Sehr groß) is red; (Regional, Gering bis mäßig) is green; (Regional, Groß) is yellow; (Regional, Sehr groß) is orange; (Lokal, Gering bis mäßig) is green; (Lokal, Groß) is green; (Lokal, Sehr groß) is yellow.

Verbreitet	Yellow	Orange	Red
Regional	Green	Yellow	Orange
Lokal	Green	Green	Yellow
	Gering bis mäßig (markantes Wetter)	Groß (Unwetter)	Sehr groß (extremes Unwetter)

Abb. 1: Matrix für Gewitter-Vorwarnungen je nach erwarteter Häufigkeit und Heftigkeit von Gewittern.

Die Häufigkeit und Heftigkeit von Gewittern werden in den folgenden beiden Abschnitten 2.2 und 2.3 definiert. Eine Entscheidungssequenz, wie man die meteorologischen Bedingungen aus Vorhersagekarten in eine Warnfarbe übersetzt, folgt in Abschnitt 3.

2.2. Definition der Heftigkeit von Gewittern

Geringe bis mäßige Heftigkeit: „markantes Wetter“

Auftreten von Gewittern (Blitzentladungen).

Große Heftigkeit: „Unwetter“

Eines oder mehrere Kriterien aus der linken Spalte von Tabelle 1 ist/sind erfüllt.

Sehr große Heftigkeit: „extremes Unwetter“

Eines oder mehrere Kriterien aus der rechten Spalte von Tabelle 1 ist/sind erfüllt.

Phänomen	Unwetter	Extremes Unwetter
Hagel	Korngröße ≥ 2 cm, geschlossene Hageldecke oder Schäden, die Hinweise darauf geben	Korngröße ≥ 5 cm oder Schäden, die Hinweise darauf geben
Sturm	Windspitzen ≥ 90 km/h oder Schäden $\geq F0+$ nach Fujita-Skala	Windspitzen ≥ 120 km/h oder Schäden $\geq F1$ nach Fujita-Skala
Tornado	Beobachtung einer bis zum Boden auskondensierten Trichterwolke oder aufgewirbelten Materials, Windspitzen ≥ 90 km/h oder Schäden $\geq F0+$ nach Fujita-Skala	Windspitzen ≥ 120 km/h oder Schäden $\geq F1$ nach Fujita-Skala
Starkregen	Niederschlag $P[mm] \geq \sqrt{20 \cdot t[min]}$ oder Überflutung von mindestens zwei Objekten	Niederschlag $P[mm] \geq \sqrt{45 \cdot t[min]}$ oder Überflutungen, deren Bewältigung nicht mehr durch lokale Einsatzkräfte alleine oder nicht binnen 24 Stunden möglich ist, die Häuser oder Siedlungen isolieren oder eine Evakuierung von Gebäuden nötig machen

Tabelle 1: Definition für „Unwetter“ und für „extreme Unwetter“. Nähere Erklärungen im Text. Starkregen-Kurven in Abb. 2.

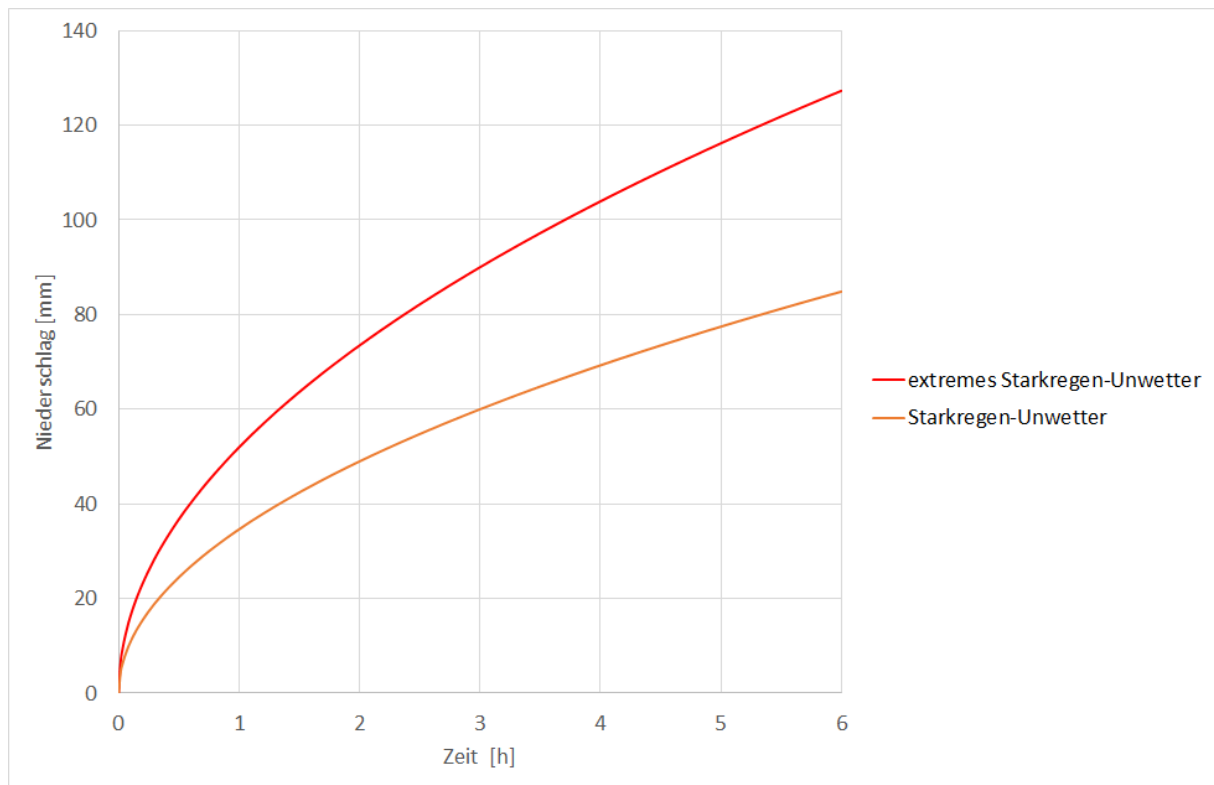


Abb. 2: Schwellwerte des Niederschlags in Abhängigkeit der Zeit für Starkregen-Unwetter und extreme Starkregen-Unwetter. Die untere Kurve entspricht der Niederschlagskurven für „Wolkenbruch“ nach Wussow (1922) und Nachtnebel (2003), die obere ist das 1,5-fache davon.

Anmerkungen:

- Ein Gewitter ist per se bereits ein markantes Ereignis. Für „**markantes Wetter**“ werden Blitzentladungen also nicht nur selbst als Gefahrenquelle interpretiert, sondern dienen gleichzeitig auch als Hinweis auf andere Wettererscheinungen (kräftiger Regen, Windböen, kleiner Hagel), die jedes Gewitter begleiten und Aktivitäten im Freien beeinträchtigen oder gefährden können, ohne schon als Unwetter im eigentlichen Sinne zu gelten.
- **Die Definitionen für „Unwetter“ und „extremes Unwetter“ setzen sich jeweils zusammen aus einem quantitativen Kriterium (Messwerte) und einem qualitativen Kriterium (Schäden).** Es wird empfohlen, das Auftreten von Schäden als zentral zu sehen und Messungen über den jeweiligen Schwellwerten als „Proxies“ für Schäden / extreme Schäden in der nahen Umgebung zu interpretieren, auch wenn keine direkte Schadensinformation vorliegen sollte. Diese Interpretation folgt einerseits dem Geist eines „impakt-bezogenen“ Denkens. Andererseits berücksichtigt sie den Umstand, dass Schadensinformation aus Feuerwehreinsätzen und/oder durch ehrenamtliche Wettermelder bis auf (Sub-)Gemeindeebene herab verfügbar ist, wohingegen es nur selten repräsentative Messungen von konvektiven Unwetterereignissen gibt.
- Für **Sturmböen** und **Tornados** wird diese Interpretation durch die Anwendung der Fujita-Skala, die ja eine Schadensskala darstellt, ohnehin schon gelebt. **Hagel** weicht davon insofern etwas ab, als die Hagelgröße viel leichter zu beobachten ist als die verursachten Schäden. Die grundlegende Interpretation bleibt jedoch die gleiche: ab einer Korngröße von 2 cm oder einer geschlossenen Hageldecke sind Schäden wahrscheinlich.

- **Starkregen** ist ein komplexeres Phänomen: seine Schadenswirkung entsteht nicht durch seinen unmittelbaren Impact, sondern durch eine Kombination aus Intensität und Einwirkdauer. Außerdem wird sie noch durch hydrologische und geologische Eigenschaften des Bodens moduliert. Eine objektive Definition ist hier also noch schwieriger, und es wird immer eine Grauzone bestehen bleiben.

Betroffene „Objekte“ im qualitativen Starkregen-Kriterium (Tabelle 1 links unten) bezeichnen Keller, Gebäude, Straßen, Bahnlinien, landwirtschaftliche Nutzflächen oder jegliche anderen Bauwerke, Strukturen oder Flächen, die dadurch Schaden nehmen können. Die Forderung, dass mindestens zwei Objekte überflutet sein müssen, soll jene Fälle herausfiltern, in denen eher ein Konstruktionsmangel als eine tatsächlich außergewöhnliche Niederschlagsmenge die Ursache war (z.B. die lokale Überflutung einer einzelnen Unterführung mit unzureichend dimensioniertem Abwasserkanal).

Bei extremem Starkregen (Tabelle 1 rechts unten) kann die Behebung der Schäden typischerweise nicht mehr von der lokal zuständigen Feuerwehr alleine bewältigt werden, sondern es werden auf Bezirks- oder gar Landesebene andere Feuerwehren zur Hilfeleistung abkommandiert. Die Andauer von Feuerwehreinsätzen über mehr als 24 Stunden, eine nötige Evakuierung von Gebäuden, die Isolation von Häusern oder Siedlungen von der Umwelt oder die Ausrufung des Katastrophenalarms sind weitere Indikatoren für Folgen eines extremen Starkregens.

Die begleitenden quantitativen Kriterien für Starkregen und extremen Starkregen folgen Intensitätskurven für „Starkregen“ und „Wolkenbruch“, die 1922 von Wussow entwickelt und 2003 von Nachtnebel geringfügig modifiziert wurden (Abb. 2; Formeln in Tabelle 1 unten).

2.3. Definition der Häufigkeit von Gewittern

Gewitter und Unwetter lassen sich prognostisch bestenfalls regional eingrenzen, jedoch nicht punktgenau vorhersagen. Deshalb wird jedem eingetroffenen Ereignis ein gewisser Einflussradius zugeordnet, innerhalb dessen eine Warnung vor diesem Ereignis als Treffer interpretiert werden soll (Abb. 3). Die Einhüllende all dieser Einflussradien ergibt dann eine insgesamt „betroffene“ Fläche, nach der die Häufigkeit bzw. Wahrscheinlichkeit von Gewittern, Unwettern und extremen Unwettern bestimmt werden kann (Tab. 2).

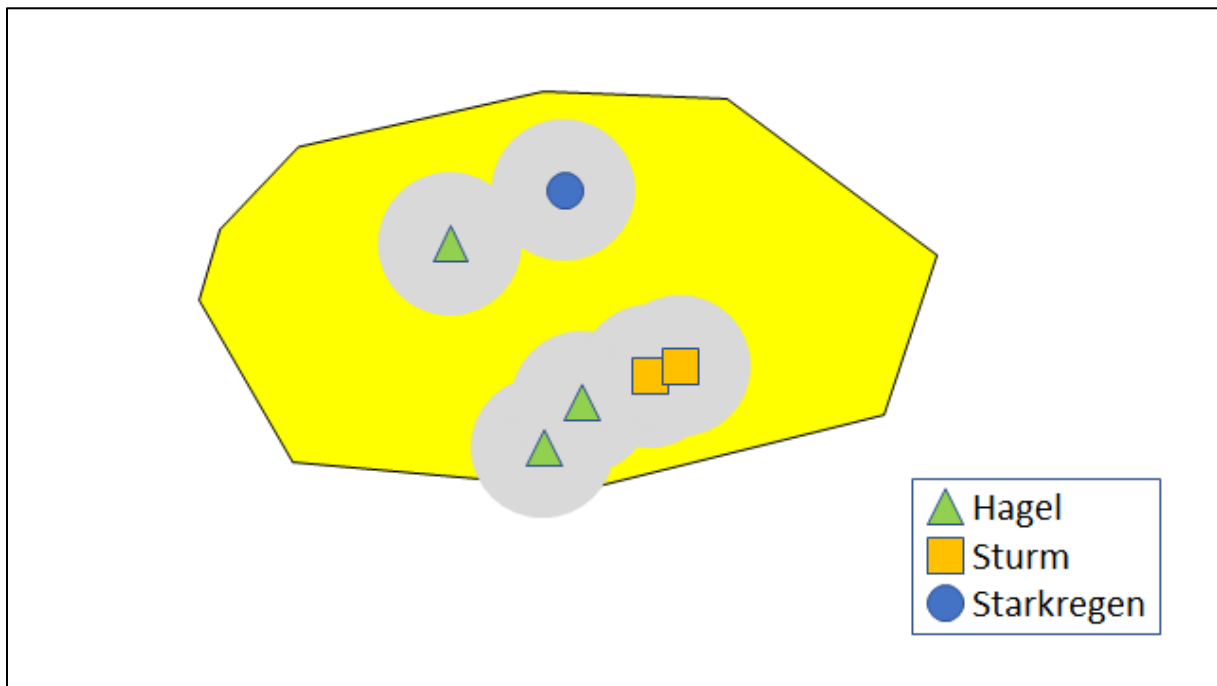


Abb. 3: Beispiel einer Gewitter-Vorwarnung (gelbe Fläche) und aufgetretenen Unwettern (Symbole) und deren jeweiligen Einflussradien (grau schattiert). Nähere Erklärungen im Text.

Vorhergesagte Häufigkeit / Wahrscheinlichkeit	Voraussichtlich betroffene Fläche
Lokal	3-10%
Regional	10-30%
Verbreitet	30-100%

Tabelle 2: Definition von „lokalen“, „regionalen“ oder „verbreiteten“ Ereignissen. Erklärung der „betroffenen“ Fläche im Text.

2.4. Verifikation

Als letzter Baustein für eine objektive Verifikation fehlt noch die Wahl eines Einflussradius. Aufgrund der asymmetrischen Kosten-Nutzen-Rechnung (potenziell hohe Kosten einer versäumten Warnung gegenüber vergleichsweise geringen Kosten einer Fehlwarnung) ist eine Überwarnung vor Gewittern und Unwettern akzeptabel, ja sogar erstrebenswert. Der Grad der Überwarnung lässt sich durch den Einflussradius steuern: je größer er gewählt wird, desto weniger Unwetterereignisse ergeben eine große „betroffene“ Fläche, desto höher wird also der akzeptable Grad der Überwarnung angesetzt. Diese Wahl ist subjektiv. **Ein Einflussradius von 20 Kilometern erleichtert die Interpretation der Warnungen:**

- Innerhalb von 20 Kilometern sind Gewitter meist gut hörbar und die zugehörigen Wolken auch gut (bedrohlich) sichtbar. Selbst wenn ein Ort also nicht direkt von einem Gewitter oder Unwetter betroffen ist, ist es im Allgemeinen wahrnehmbar. **Die Warnfarbe lässt sich also für einen Betrachter / eine Betrachterin direkt in jene Wahrscheinlichkeiten übersetzen, mit der in Sicht- und Hörweite ein Gewitter bzw. ein schadensträchtiges Unwetter niedergehen wird.**
- Ein Kreis mit 20 Kilometern Radius entspricht etwa der mittleren Fläche eines Bezirkes. **Die Warnfarbe lässt sich also für Einsatzkräfte auf Bezirksebene (Bezirksfeuerwehrverbände) direkt in jene Wahrscheinlichkeit übersetzen, mit der mindestens eine Feuerwehr in ihrem Bezirk zur Beseitigung von Unwetterschäden ausrücken wird müssen.**

Nach der Warnmatrix (Abb. 1) und der definierten Heftigkeit (Tab. 1) und Häufigkeit (Tab. 2) lassen sich die Vorwarnungen für den Konsumenten also wie folgt interpretieren:

- **Gelbe Vorwarnung:** Wahrscheinlichkeit über 30% für ein Gewitter, zwischen 10 und 30% für ein Unwetter oder zwischen 3 und 10% für ein extremes Unwetter...
- **Orange Vorwarnung:** Wahrscheinlichkeit über 30% für ein Unwetter oder zwischen 10 und 30% für ein extremes Unwetter...
- **Rote Vorwarnung:** Wahrscheinlichkeit über 30% für ein extremes Unwetter...

... jeweils innerhalb eines Umkreises von 20 Kilometern, innerhalb des Bezirkes oder in Sicht- und Hörweite, je nach bequemster Interpretation.

Die Verifikation erfolgt mit Blitzentladungen (in der Praxis: ATNT-Zellen) für markantes Wetter sowie mit den bekannt gewordenen und nach Heftigkeit eingestuftem Schadensereignissen für Unwetter und extreme Unwetter (in der Praxis: AWOB, Skywarn Trusted Spotter Network, qualitätsgeprüfte Feuerwehr-Einsatzdaten, gezielte a posteriori Recherche, Schadensanalysen).

Die fiktiven Warnung aus Abbildung 3 würde in einer Verifikation positiv abschneiden: die Einflussradien der aufgetretenen Unwetter decken tatsächlich 10-30% der bewarnten Fläche ab, wie es die gelbe Warnfarbe vorsieht.

3. Ausführung

Dieser Abschnitt schlägt eine konkrete Entscheidungssequenz vor, wie man gemäß der „zutatenbasierten“ Gewittervorhersage, also ausgehend von den Bedingungen für Gewitter, zu einer vorgeschlagenen Warnfarbe gelangen kann.

3.1. Bedingungen für Gewitter

Für die Bildung organisierter, schwerer Gewitter müssen die folgenden Bedingungen in der Atmosphäre zusammentreffen:

- **CAPE:**
Setzt sich zusammen aus einem ausreichend starken vertikalen Temperaturgradienten und ausreichend bodennaher Feuchtigkeit;
- **Hebung:**
Ein Mechanismus, der Luftpakete zum Aufsteigen zwingt und diese CAPE freisetzt;
- **Vertikale Windscherung:**
Führt zur Trennung von Auf- und Abwindbereich des Gewitters, erhöht damit seine Lebensdauer und Heftigkeit.

Jede dieser drei Bedingungen beeinflusst die Häufigkeit und/oder Heftigkeit von Gewittern, soll sich also entsprechend in die Warnfarbe übersetzen lassen. Ähnlich wie für die drei Warnfarben an sich wird auch hier eine jeweils dreistufige Einteilung der Bedingungen empfohlen. Abbildung 4 skizziert den daraus resultierenden „Warnwürfel“. Abbildung 5 zerlegt ihn in einzelne Ebenen, je nach Vorhandensein von negativem, neutralem oder positivem synoptischem Hebungsantrieb. Tabelle 3 listet Richtwerte für geringe, mäßige und hohe CAPE sowie für schwache, mäßige und starke vertikale Windscherung auf.

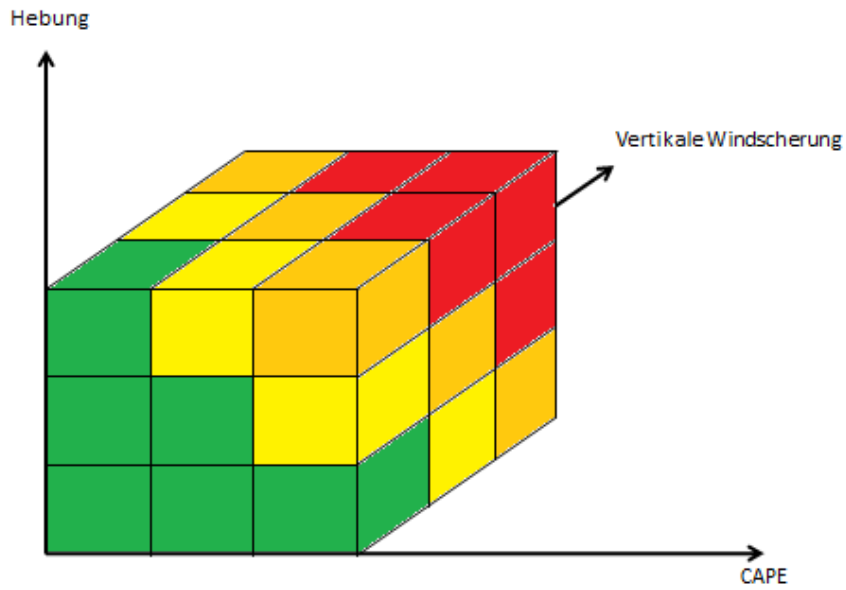


Abb. 4: Übersetzung von CAPE, vertikaler Windscherung und Hebungsantrieb in eine Warnfarbe. Die jeweils dreistufige Einteilung der einzelnen Bedingungen wird im Text genauer beschrieben. Abb. 5 stellt die drei Ebenen dieses „Warnwürfels“ separat dar.

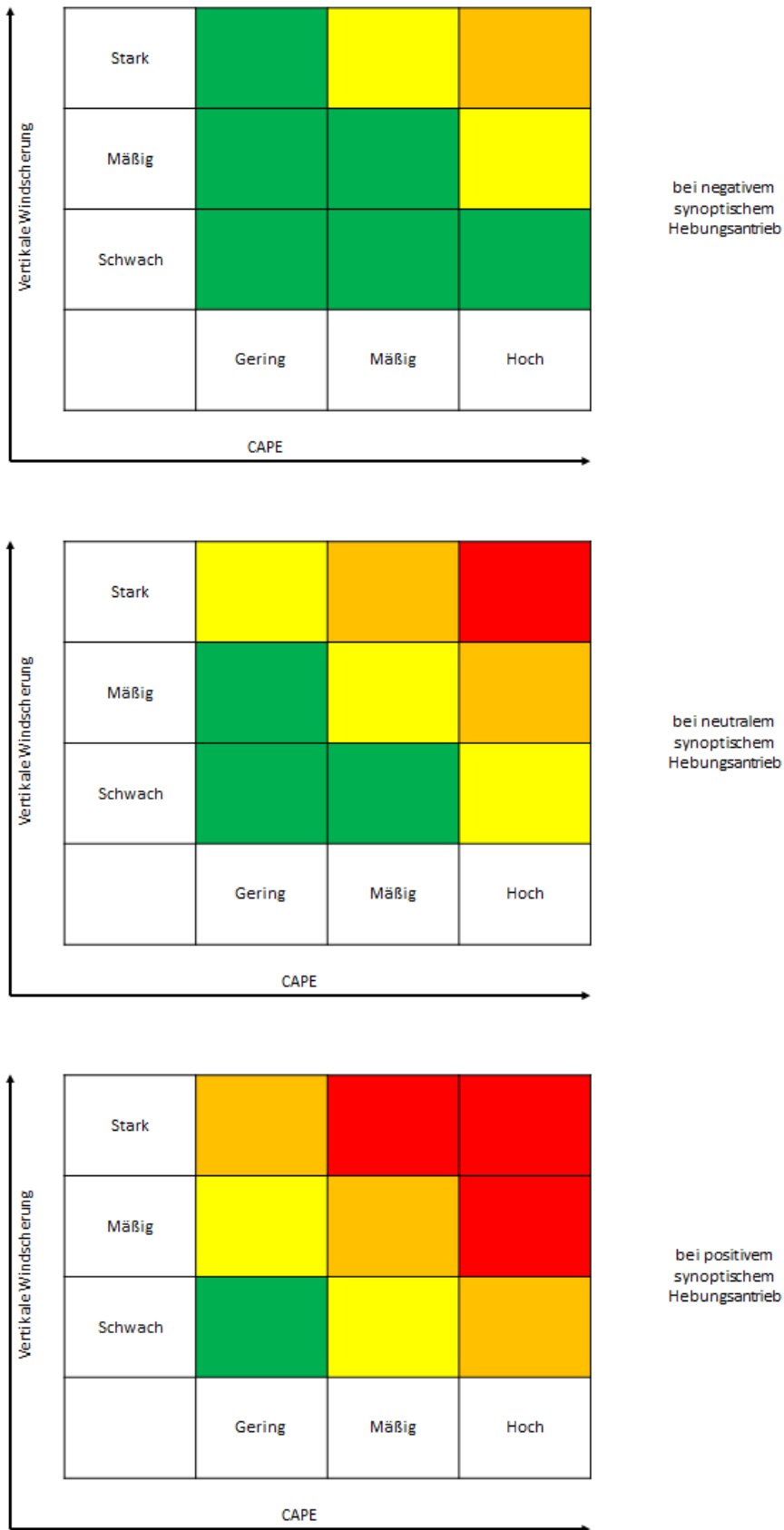


Abb. 5: Übersetzung von CAPE und vertikaler Windscherung in Warnfarben für negativen (oben), neutralen (Mitte) und positiven (unten) synoptischen Hebungsantrieb. (Anschaulich: separate Darstellung der einzelnen Ebenen des Würfels aus Abb. 4.)

CAPE [J/kg]:	gering	mäßig	hoch
	10-200	200-1000	>1000

Vertikale Windscherung [m/s]:	schwach	mäßig	stark
0-6 km	<10	10-20	>20
0-3 km	<7	7-15	>15
0-1 km	<5	5-10	>10

Synoptische Vertikalbewegung:	Absinken	neutral	Hebung
--------------------------------------	-----------------	----------------	---------------

Table 3: Dreistufige Einteilung der Bedingungen für Gewitter: CAPE, vertikale Windscherung (jeweils mit Richtwerten) sowie synoptische Vertikalbewegung. Nähere Erklärungen im Text.

3.2. Warnfarbe je nach Hebungsantrieb, CAPE und vertikaler Windscherung

Synoptische Hebungs- und Absinkprozesse prägen auch in nicht-konvektiven Situationen den Wettercharakter. Sie bilden daher den logischen Startpunkt für eine Betrachtung der Großwetterlage.

Synoptische Vertikalbewegungen setzen sich aus der Überlagerung von Vorticity- und Temperaturadvektion zusammen. Ihre Abschätzung ist nicht immer eindeutig und zweifelsfrei: nur selten überlagern sich beide Komponenten positiv, in vielen Fällen liefert eine der beiden Komponenten ein Signal und die andere nicht. Dann übernehmen kleinskaligere Vertikalbewegungen die Regie, die sich über die **Vergenzen des Bodenwindfeldes** abzeichnen.

Bei dynamischen Wetterlagen sind bodennahe Konvergenzen stärker an Höhenträge gekoppelt (und bodennahe Divergenzen an Höhenkeile), werden also tendenziell die Signale der Vorticityadvektion bestätigen. Bei gradientschwachen Wetterlagen sind die Vergenzen im Bodenwindfeld hingegen eher entkoppelt von der Synoptik und stattdessen stärker an thermische Windsysteme gebunden; dann wäre eine taugliche Lösung, im Zweifelsfall im Bergland die höhere, im Flachland die niedrigere Kategorie für die Vertikalbewegung zu wählen.

Nach Identifikation der Vertikalbewegungen gelangt man über die jeweilige Ebene in Abbildung 5 und den Schwellwerten in Tabelle 3 je nach CAPE und vertikaler Windscherung zur entsprechenden Warnfarbe.

3.3. Abschätzung des Hauptrisikos, Teil 1: Starkregen vs. Sturm und Hagel

Wichtig für die Differenzierung zwischen Starkregen einerseits sowie Sturm und Hagel andererseits sind vor allem der vertikale Temperaturgradient und die vertikale Windscherung (Abb. 6).

Typische Starkregen-Situationen sind oft gekennzeichnet durch relativ schwache vertikale Temperaturgradienten (nicht selten nur wenig über der feuchtisentrophen Rate), aber viel Feuchtigkeit und nahezu gesättigte Luft über weite Schichten. Dann sind konvektive Wolken sehr effizient in der Niederschlagsbildung (wenig Entrainment), und es verdunstet auch kaum Niederschlag während des Fallens. Ist hingegen CAPE vor allem auf einen starken vertikalen Temperaturgradienten aufgebaut, dann begünstigt die Verdunstungskälte die Produktion von Sturmböen und Hagel, während die Niederschlagseffizienz selbst sinkt. Der zweite Diskriminator ist die vertikale Windscherung: Da das Risiko von Sturm und Hagel deutlich stärker mit dem Organisationsgrad anwächst als das Risiko von Starkregen, treten die erstgenannten Phänomene bei organisierten Gewittern in den Vordergrund.

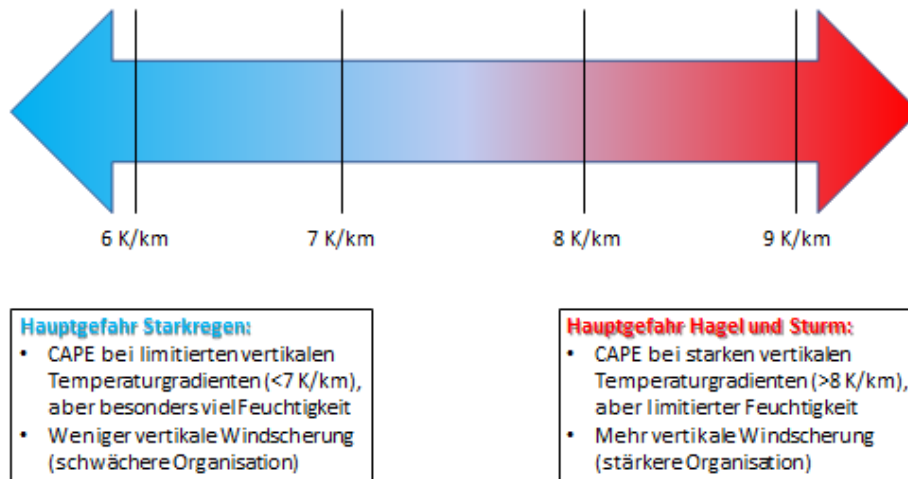


Abb. 6: Abschätzung zwischen Starkregen und Sturm und/oder Hagel als Hauptrisiko. Zahlenwerte beziehen sich auf den mittleren vertikalen Temperaturgradienten in der unteren bis mittleren Troposphäre (z.B. zwischen 850 und 500 hPa). Nähere Erklärungen im Text.

Typische Starkregen-Situationen treten oft bei gradientschwachen Wetterlagen auf, wenn schwache vertikale Windscherung, nicht allzu starke vertikale Temperaturgradienten und reichlich Feuchtigkeit am besten zusammentreffen. Typische Situationen für Sturm und Hagel sind „Loaded-Gun“-Muster, wenn starke vertikale Temperaturgradienten (etwa eine „Elevated Mixed Layer“) und erhöhte vertikale Windscherung oft Hand in Hand gehen. In vielen anderen Situationen wird die Unterscheidung nicht so eindeutig sein. Im Zweifel muss man mit allen Risiken in annähernd gleichem Maße rechnen.

3.4. Abschätzung des Hauptrisikos, Teil 2: Sturm oder Hagel

Sturmböen und Hagel treten insgesamt unter sehr ähnlichen Bedingungen, ausgedrückt durch CAPE und vertikaler Windscherung, auf. Insbesondere lässt sich daher aus Radiosondenaufstiegen alleine kaum vorhersagen, welches dieser beiden Risiken im Vordergrund steht. Das Hauptrisiko wird im Wesentlichen durch den Gewittertyp bestimmt: großer Hagel bei diskreten Gewittern (Multi- und vor allem Superzellen), Sturmböen bei Gewitterlinien. Auch wenn konvektionsauflösende Modelle (z.B. AROME) inzwischen manchmal verblüffend realistische Szenarien simulieren können, gehört die Unterscheidung zwischen diskreter und linienförmiger Konvektion immer noch zu den schwierigsten Aspekten der Gewittervorhersage.

Linienförmige Gewitter bilden sich bevorzugt bei den folgenden Bedingungen:

- Linienförmiger Hebungsmechanismus (idealerweise noch dazu rechtwinkelig zur vorherrschenden Strömungsrichtung, d.h. schnell ziehend):
 - Konvergenzlinie am Boden
 - Scharfer Höhentrog
- Vertikale Windscherung eher auf unteren Schichten konzentriert, also 0-3 km oder sogar 0-1 km (Bildung von Böenfronten wird begünstigt)
- Besonders trockene Grenzschicht und besonders hohe Wolkenbasis (Richtwerte: Taupunktdifferenz >15K oder Wolkenbasis >2000m Seehöhe)

Schlagen diese Indikatoren nur wenig oder gar nicht aus, sind diskrete Gewitter mit Hagel als Hauptgefahr wahrscheinlicher.

3.5. Notizen zu Tornados

Es gibt durchschnittlich nur etwa vier Tornados pro Jahr in Österreich. Sie stellen nie das Hauptrisiko dar und sind auch nur selten als Nebenrisiko überhaupt erwähnenswert. Aufgrund ihres potenziell hohen Impakts lohnt es sich trotzdem, begünstigende Faktoren für Tornados im Hinterkopf zu behalten, auch wenn sich diese manchmal nur schwierig oder erst im Nowcasting erkennen lassen:

- Starke bodennahe Windscherung (Richtwert: 0-1 km Scherung > 10 m/s);
- Tiefe Wolkenbasis (Richtwerte: Taupunktdifferenz <7K, Wolkenuntergrenze <1000m Seehöhe);
- Superzellen mit stark abweichender Bewegung (besonders günstig für Kippen von horizontaler Vorticity aus Umgebungswind in die Senkrechte) – dann ist gleichzeitig auch sehr großer Hagel wahrscheinlich;
- Zugbahn einer Superzelle entlang einer bestehenden Konvergenzlinie, z.B. einer „Outflow Boundary“ aus vorangegangenen Gewittern (besonders günstig für Streckung von senkrechter Vorticity).

3.6. Notizen zu extremen Starkregen-Ereignissen

Starkregen-Ereignisse mit extremen Folgen (siehe nochmals Tabelle 1 rechts unten) treten bevorzugt dann auf, wenn organisierte Gewitter (vor allem Multizellen, in manchen Fällen auch Superzellen), entweder orografisch oder durch wiederholte Neubildungen an der Rückseite über einen längeren Zeitraum verankert werden. Auch hier lassen sich die gefährlichsten Situationen oft erst kurzfristig vorher erkennen. Begünstigende Faktoren für solche Extremereignisse sollten aber stets im Hintergrund behalten werden:

- Konvergenzzone parallel zur erwarteten Zugrichtung der Gewitter (Wind in 3-5 km Höhe);
- Rückwärtiger Anbau von organisierten Gewittern durch dynamische Effekte (begünstigt durch geradlinige Windprofile) oder durch Tochterzellen (begünstigt durch relativ schwachen Outflow, d.h. bei generell günstigen Starkregen-Bedingungen nach Abschnitt 3.3);
- Rückwärtiger Anbau durch orografische Effekte (möglicher Hinweis in Satellitenbildern: sich entwickelnde Cumuluswolken stromaufwärts von bereits entstandenen Gewittern).

4. Einbettung in einen internationalen Kontext

Die Methodik wurde soweit wie möglich mit bestehenden Initiativen vereinheitlicht.

- **Einklang mit den Leitlinien der WMO für impakt-basierte Unwettervorhersagen:**
Die WMO empfiehlt in ihren „WMO Guidelines on Multi-hazard Impact-based Forecast and Warning Services“ eine Warnmatrix nach der Häufigkeit und Heftigkeit von Ereignissen: https://www.wmo.int/pages/prog/www/DPFS/Meetings/ET-OWFPS_Montreal2016/documents/WMOGuidelinesonMulti-hazardImpact-basedForecastandWarningServices.pdf (S. 14)
Dieses Konzept legten wir auch unserer Warnmatrix zugrunde. Zwecks Vereinfachung wurde die originale 4x4-Matrix um die unterste Zeile („very low likelihood“) und die linkeste Spalte („very low impact“), die jeweils nicht warnrelevant sind, reduziert. Die Farbgebung der verbliebenen 3x3-Matrix wurde geringfügig adaptiert, damit nicht je zwei Elemente bei gleichem „impact“ aber unterschiedlich hoher „likelihood“ die gleiche Farbe erhalten. Da im WMO-Dokument weder die Häufigkeit noch der Impact von Ereignissen objektiv definiert werden und die drei Warnfarben sowieso nur eine willkürliche Diskretisierung eines an sich kontinuierlichen Spektrums darstellen, ergibt sich kein Widerspruch.
- **Vereinheitlichung unserer Kriterien für Unwetter mit der European Severe Weather Database (ESWD):**
Siehe die dortigen Meldekriterien (http://www.eswd.eu/cgi-bin/download_criteria.php).
- **Weiterentwicklung des „Sweet Spot Indicators“, Zusammenführung mit dem Entscheidungsbaum für Gewittervorhersage nach Parker (2015)**
Der von Matthew D. Parker (North Carolina State University) entwickelte Entscheidungsbaum ermöglicht in wenigen Schritten eine Identifikation des wahrscheinlichsten Gewittertyps (Einzelzellen, Multizellen, Superzellen oder Linien; siehe Abb. 7).
Parallel dazu wurde an der ZAMG 2015 der sogenannte „Sweet Spot Indicator“ implementiert, der anhand von Kombinationen von Prädiktoren einen „First Guess“ für die Gefahr von Starkniederschlägen, Hagel und Sturmböen liefert.
Dieser Leitfaden möchte also beide bisherigen Initiativen auf die optimale Weise zusammenführen.
Neuigkeiten gegenüber dem ursprünglichen Entscheidungsbaum von Parker:
 - Weitere Reduktion des Entscheidungsbaumes in eine lineare Entscheidungssequenz;
 - Probabilistischer, dreistufiger Ansatz mit prominenterer Berücksichtigung der Rolle von synoptischen Vertikalbewegungen;
 - Übersetzung des Gewittertyps in konkrete Unwetterrisiken.Neuigkeiten gegenüber dem bisherigen „Sweet Spot Indicator“:
 - Vorschlag der Warnfarbe;
 - Verbesserte Abschätzung des Hauptrisikos;
 - Quantifizierung des Risikos und damit Möglichkeit einer objektiven Verifikation.

5. Zusammenfassung und Schlussbemerkungen

Der vorliegende Leitfaden reduziert die Entscheidung für eine Warnfarbe und die Abschätzung des Hauptrisikos im Zuge von Gewittern auf die folgende, einfache und lineare Entscheidungssequenz:

- (1) Sind synoptische Vertikalbewegungen unterstützend, neutral oder unterdrückend für Gewitterbildungen?
- (2) Welche Warnfarbe soll gemäß CAPE und vertikaler Windscherung gewählt werden?
- (3) Stellen Starkregen oder Sturm und Hagel die Hauptrisiken dar?
- (4) Ist vorrangig Sturm oder Hagel zu erwarten?

Der vorliegende Leitfaden soll Entscheidungen in der Gewittervorhersage erleichtern, beschleunigen und zwischen individuellen Forecastern/-innen weitgehend vereinheitlichen.

Die vorgestellte Entscheidungssequenz liefert binnen weniger Minuten einen Erstvorschlag für eine Warnfarbe und ein Hauptrisiko, der den Forecastern/-innen den Rücken stärken und ihnen zudem Zeit verschaffen soll, diesen Erstvorschlag mit dem verfügbaren Datenmaterial zu hinterfragen und nötigenfalls begründet zu modifizieren. Insbesondere fallen darunter die Identifikation des in der vorliegenden Situation glaubwürdigsten Vorhersagemodells (manchmal „model of the day“ genannt) und die Berücksichtigung von allfälligen systematischen Vorhersagefehlern, insbesondere auch in Abhängigkeit des Vorhersagemodells und der Wetterlage. Auch von den Modellvorhersagen abweichende Entwicklungen sollen erkannt und berücksichtigt werden (auch wenn dieser Punkt erst später im Nowcasting vorrangig wird).

Zwei Schritte der Entscheidungssequenz, nämlich die synoptischen Vertikalbewegungen und die Frage, ob sich vorrangig diskrete oder linienförmige Gewitter bilden werden, lassen sich nicht durch Richtwerte irgendwelcher Größen festlegen. Gerade hier wird der Mensch also die größte Rolle in der Identifikation einnehmen. Auch bei den Entscheidungen für CAPE und vertikaler Windscherung bleibt es eine Aufgabe des Menschen, die Modellvorhersagen auf ein realistisches Maß zu glätten (also Signale vom Rauschen zu trennen) und gegebenenfalls nach unten oder oben zu korrigieren, wenn es konkrete Hinweise dafür gibt. Und nicht zuletzt fällt der Grad der räumlichen Differenzierung in die Verantwortung der Forecaster/-innen.

Die vorgestellten Richtwerte für CAPE und vertikale Windscherung werden nach Vorliegen einer objektiven Verifikation kritisch geprüft und im Bedarfsfall nach unten oder oben kalibriert. Dabei wird eine Abwägung nötig sein, ob der Nachteil weniger „runder“ Schwellwerte für den Vorteil einer exakten Kalibrierung in Kauf genommen werden soll.