



Wie Steine in einem Bachbett werden Gebirge von atmosphärischen Strömungen um- und überflossen und produzieren Wellen und Verwirbelungen. Das macht die Wetterprognose komplizierter als im Flachland. Foto: Lea Hartl



Numerische Wetterprognose

Datenberge & Modellunsicherheiten

Wetterstationen auf (fast) jedem Gipfel, Wetter-Apps mit minütlichen Updates – noch nie wussten wir so genau, wie das Wetter wird. Verbesserte Prognosen haben in den letzten 30 Jahren einen erheblichen Sicherheitsgewinn im Bergsport gebracht. Dennoch bleiben Unsicherheiten und Überraschungspotential.

Von Lea Hartl

Die höchsten Wetterstationen der Welt stehen am Mount Everest und haben einen Twitter-Account (@EVER_WEATHER). 2019 wurden entlang der Hauptroute auf der nepalesischen Seite fünf automatische Wetterstationen installiert, unter anderem im Camp 2 (6464 m), am South Col (7945 m) und am sogenannten Balcony (8430 m). Letztere wurde im Mai 2022 durch eine noch höhere Station am Bishop Rock (8810 m) ersetzt. Vom Basecamp aus kann man in Echtzeit via Satelliteninternet Temperatur und Wind am South Col nachschauen und sich überlegen, ob man da nun wirklich hinauf möchte.

Baker Perry, Professor an der Appalachian State University (USA, North Carolina) bemüht sich seit Jahrzehnten darum, die Hochgebirge der Welt mit meteorologischen Instrumenten zu bestücken. Er war einer der wissenschaftlichen Leiter der beiden Everest-Wetterstations-Expeditionen. Neben den technischen Problemen (Geräte gehen in der Kälte kaputt, werden vom Wind zerstört, eingeschneit, abgerissen, vom Blitz getroffen ...) haben er und sein Team dabei naturgemäß auch mit den Herausforderungen des Bergsteigens in großen Höhen zu tun. Während der medial viel beachteten Everest-Expedition 2019 war Perrys Team zur Hochsaison Ende Mai vor Ort. Nachdem die Station am South Col installiert war, wartete das Team in Camp 4 auf ein Wetterfenster, um die höhere Station im Gipfelbereich aufzustellen. Als von Helfern zuhause die Nachricht kam, dass der Wind lang genug nachlassen würde, um Auf- und Abstieg sowie einige Stunden Arbeit auf über 8000 m zu erlauben, machte sich das Team sofort auf den Weg. Genau wie alle anderen.

Schon bald stand Perrys Team im Stau und hörte die Uhr ticken. Quälend langsam schoben sich die Gipfelaspiranten die Fixseile entlang. Schnell war klar: Die Zeit für die Wissenschaftler würde nicht reichen, um die Station am Gipfel aufzustellen und noch innerhalb des sicheren Wetterfensters abzusteigen. Das Team entschied sich zähneknirschend für den niedrigeren Balcony als Alternativstandort für die Station.

Nicht nur beim Höhenbergsteigen sind hochaktuelle Wetterupdates und verlässliche Prognosen, mit denen man stundengenau planen kann, mittlerweile selbstverständlich. Wir können im Winter zielgenau die Region ansteuern, wo es gestern am meisten geschneit hat, oder im Sommer das Klettergebiet auswählen, wo das Gewitterisiko morgen am niedrigsten ist. Wetter-Apps und Niederschlagsradar begleiten uns am Smartphone auch während der Tour, so dass wir genau verfolgen können, ob doch eine Gewitterzelle zu uns zieht oder die nächste Kaltfront schneller da ist als gedacht.

Was heute so alltäglich ist, dass wir kaum noch darüber nachdenken, war Anfang der 1990er kaum vorstellbar. Die numerische Wetterprognose, also das Vorhersagen des Wetters basierend auf physikalischen Gleichungen, hat sich in den letzten Jahrzehnten immens weiterentwickelt. Eine 24-Stunden-Prognose ist mittlerweile zu über 90 % zutreffend. Der Wetterbericht für die nächsten fünf Tage ist heute etwa so gut, wie er vor 20 Jahren für die nächsten zwei Tage war. Entscheidend für diese Entwicklung sind verbesserte Modelle, mehr Daten und die extreme Steigerung der verfügbaren Computerrechenleistung, durch die man von der theoretischen Berechnung in die operationelle Praxis gelangt.

Ein Mitarbeiter des Instituts für interdisziplinäre Gebirgsforschung (Österreichische Akademie der Wissenschaften) bei der Wartung der höchsten Wetterstation in Tirol auf der Weißseespitze, 3498 m, Ötztaler Alpen. Foto: Lea Hartl



All models are wrong

Die grundsätzliche Unsicherheit in der Wetterprognose ergibt sich aus zwei Faktoren: Einerseits ist jedes Wettermodell eine Vereinfachung der sehr komplexen Realität und bildet nicht alle relevanten Prozesse vollständig ab. Andererseits braucht das Modell möglichst vollständige Informationen über den Ist-Zustand der Atmosphäre, um davon ausgehend in die Zukunft rechnen zu können.

Zum ersten Punkt, also zur Abbildung der Realität im Modell, gehört auch die räumliche Auflösung. Die Aufgabe von Wettermodellen ist es, zu berechnen, wie sich Parameter wie Luftdruck, Temperatur, Feuchtigkeit etc. an bestimmten Punkten in der Atmosphäre mit der Zeit verändern. Dafür wird die Atmosphäre in ein dreidimensionales Gitter unterteilt. Ist das Gitter engmaschiger, werden mehr Punkte berücksichtigt, ist es gröber, wird nur für wenige Punkte gerechnet. Je kleiner die Gitterkästchen sind und je höher die räumliche Auflösung ist, desto besser wird die lokale Topographie im Modell abgebildet. Im Gebirge wird das Wetter stark vom Gelände beeinflusst, etwa bei Stauniederschlag oder Föhn, daher ist es hier für ein gutes Modellergebnis besonders wichtig, das Gelände möglichst realitätsnah darzustellen.

Frühe globale Wettermodelle hatten Anfang der 1990er eine Auflösung von rund 100 km. Der Alpenbogen tauchte darin als vages, gleichförmiges Strömungshindernis auf. Die komplexen, wetterprägenden Details der realen Topographie waren im Modell nicht ansatzweise zu sehen. Schon damals liefen die großen Wettermodelle auf einigen der leistungsfähigsten Computern der Welt. Die maximal mögliche Rechenleistung hat sich seither so rapide gesteigert, dass es schwerfällt, sich die entsprechenden Zahlen vorzustellen. Mitte der 1990er wurde zum ersten Mal eine Rechenleistung von einem Teraflop erreicht. Ein Teraflop entspricht einer Billion Berechnungen pro Sekunde. Heute schaffen High-End-Spielkonsolen rund 10 Teraflops und jedes einigermaßen aktuelle Smartphone ist schneller als die damaligen Supercomputer.

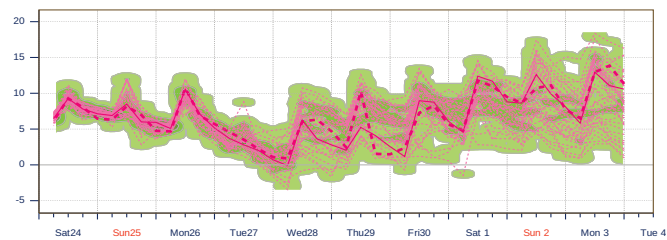
Das globale Modell des European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) hat seit 2016 eine horizontale Auflösung von 9 km und berechnet mehrmals am Tag für über 900 Millionen atmosphärische Gitterkästchen, wie das Wetter wird. Das ECMWF betreibt dafür zwei der potentesten High Performance Computer Cluster Europas mit einer Spitzenleistung von jeweils über 8000 Teraflops. Die Alpen mit ihren Höhen, Tiefen und kleinräumigen Wettersystemen sind damit mittlerweile ziemlich gut zu erkennen. Moderne regionale Modelle, wie sie beispielsweise bei der österreichischen ZAMG oder der MeteoSchweiz im Einsatz sind, haben eine noch deutlich höhere Auflösung von etwa einem Kilometer. Sie können lokale Effekte entsprechend besser vorhersagen, allerdings decken sie nur eine begrenzte Region ab.

Auch die Abbildung der Realität in den Modellgleichungen profitiert von der gesteigerten Rechenleistung und der hohen räumlichen Auflösung. Komplizierte Berechnungen können

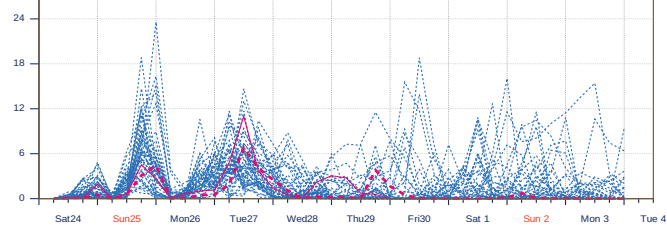
dank Computerpower schneller ausgeführt werden, so dass die Modelle mit weniger rechnerischen Vereinfachungen auskommen. Auf der großen, globalen Skala ist es mittlerweile beispielsweise möglich und üblich, atmosphärische Modelle an Ozeandaten und -modelle zu koppeln. Auch in der Realität sind Ozeane und Atmosphäre keine voneinander unabhängigen Systeme, daher nähern sich die Modelle so ein weiteres Stück der „echten“ Welt an. Im kleinskaligen Bereich gab es unter anderem deutliche Fortschritte bei der Modellierung von Konvektion und Gewittern.

Dennoch gilt nach wie vor der Grundsatz: All models are wrong, but some are useful. Die Frage ist nicht, ob ein Modell die Realität perfekt abbildet. Das tut es per Definition nicht. Die Frage ist: Wie nahe muss das Modell an der Realität sein, damit es nützlich ist? Daran schließen sich weitere Fragen an, über die man philosophisch wie auch statistisch lange nachdenken kann. Etwa: Was heißt nützlich? Im Sinne der Unsicherheit bleibt der zentrale Punkt aber unverändert – auch nützliche Modelle beinhalten eine gewisse Unsicherheit, die sich aus der Natur der Sache ergibt.

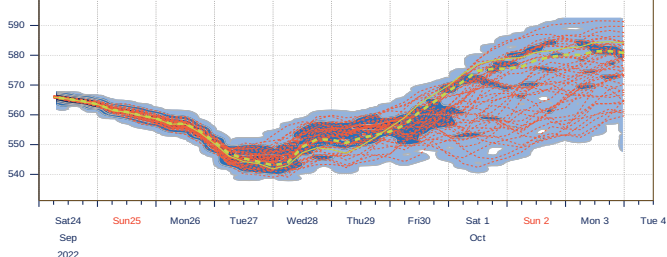
Temperature at 850 hPa - Probability for 1°C intervals



Ensemble members of Total Precipitation (mm/6h)



Geopotential at 500 hPa -- Probability for 2.5dam intervals



10-Tage-Ensemble-Prognose des European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) für Temperatur, Niederschlag und Geopotential. Die dünnen Linien zeigen die möglichen Verläufe bei leicht veränderten Anfangsbedingungen. Die dicken Linien zeigen den Kontrolllauf (CTR, Auflösung wie Ensembles, Originalanfangsbedingungen) und eine höher aufgelöste Version davon (HRES). Dunklere Schattierung zeigt wahrscheinlichere Verläufe. Grafik: ECMWF

Aller Anfang ist schwer

Neben dem Modell an sich ist der zweite große Unsicherheitsfaktor das sogenannte Anfangswertproblem, also das unvollständige Wissen über den Ist-Zustand, von dem aus wir das Modell in die Zukunft rechnen lassen. Diese Unvollständigkeit ist nach wie vor eine Herausforderung, obwohl sich auch hier in den letzten 30 Jahren viel getan hat. Informationen über das aktuelle Wetter stammen unter anderem von Bodenwetterstationen, Radiosonden, Schiffen, Bojen, Flugzeugen und Satelliten. Das ECMWF erhält täglich etwa 800 Millionen solcher Beobachtungsdatenpunkte, davon fließen um die 60 Millionen in die Routineprognose ein. Die Menge an verfügbaren Daten hat in den letzten Jahrzehnten rasant zugenommen, insbesondere durch die verstärkte Verfügbarkeit und operationelle Nutzung von Radar- und Satellitendaten. Trotzdem werden manche Regionen besser abgedeckt als andere. Die Polargebiete und das Hochgebirge sind beispielsweise chronisch unterrepräsentiert.

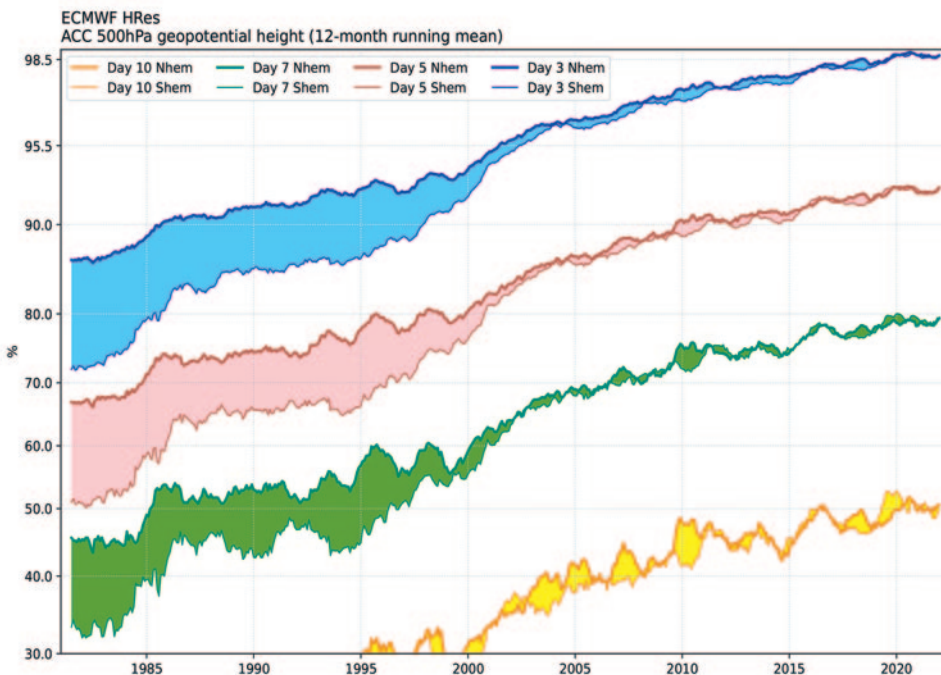
Um aus all den Punktinformationen einen Anfangszustand für das Modell zu produzieren, muss neben Qualitätskontrollen auch räumlich und zeitlich interpoliert werden, weil natürlich nicht überall gleichzeitig gemessen wird und die Datendichte sehr unterschiedlich ist. Fortschritte bei der Datenassimilation, also dem Prozess der Einbindung der Anfangsdaten in die Modellierung, haben seit den 1990ern mehrfach zu sprunghaften Verbesserungen in den Prognosen geführt. Dennoch können kleine Änderungen und Unschärfen in den Anfangsbedingungen große Auswirkungen auf die Prognose haben.

Unsicherheiten quantifizieren

Ein meist wenig geschätztes Ergebnis moderner Wetterprognosen sind quantitative Angaben zur Unsicherheit der Prognose.

Die Unsicherheit, die sich aus den Anfangsbedingungen und den Modelleigenschaften ergibt, ist nicht immer gleich groß, sondern ändert sich je nach Wetterlage. Genau wie in anderen Aspekten des Bergsports ist es auch beim Wetter gut, wenn man die Bandbreite möglicher Szenarien (Unsicherheiten) realistisch einschätzen kann. Wetter-Apps, die automatisiert ein Sonnen- oder Wolkensymbol ausspucken, erscheinen oft sehr selbstbewusst in ihrer Prognose. Wenn Unsicherheiten nicht erwähnt werden, heißt das aber nicht, dass es keine gibt. Im Gegenteil, es nimmt uns als Wetterbericht-Leser*innen die Möglichkeit, unsere Planung an bekannte Unsicherheiten anzupassen. Auch wenn wir uns vielleicht definitive, deterministische Prognosen wünschen – wir kommen um die grundlegenden Unsicherheiten der Prognose (Modelleigenschaften, Anfangswertproblem) nicht herum. Daher erhöht sich die Nützlichkeit der Prognose als Entscheidungshilfe, wenn Angaben zur Unsicherheit gemacht werden (Murphy, 1993).

Um die aus dem unvollständigen Wissen über den Ist-Zustand resultierende Unsicherheit sowie die Modellunsicherheit einzuzugrenzen, haben sich sogenannte Ensembleprognosen bewährt. Dabei wird die gleiche Prognoserechnung bei leicht veränderten Anfangsbedingungen und Modelleinstellungen mehrfach ausgeführt. Neben dem Kontrolllauf, der auf dem „echten“ Anfangszustand beruht, erhält man so eine Reihe von Alternativprognosen (Ensembles), die zeigen, wie sich die Unsicherheit im Anfangszustand auf das Ergebnis auswirkt. Je besser die Ensembles übereinstimmen, desto geringer ist die Unsicherheit der Prognose. Erste operationelle Ensembles gab es bereits in den 1990ern. Seit etwa Mitte der Nullerjahre sind sie kaum noch aus der Welt der Wetterprognose wegzudenken. Ensembleprognosen werden oft als sogenannte Spaghetti-Plots dargestellt, mit vielen Spaghetti-artigen Linien, die am Anfang nahe beieinander liegen und weiter auseinanderdriften, je weiter man sich in die Zukunft bewegt.



Der Anomaly Correlation Coefficient (ACC) ist ein Maß dafür, wie gut die Prognose mit den tatsächlich eingetretenen Bedingungen übereinstimmt. Die Abbildung zeigt die Entwicklung des ACC für das globale Modell des European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) für die Nord- und Südhalbkugel (dicke und dünne Linien) für Prognosen für die nächsten 3, 5, 7 und 10 Tage. Die stetige Verbesserung ist auf eine bessere Datenlage und Änderungen in der Prozessierung sowie im Modell an sich zurückzuführen. Vor flächendeckend verfügbaren Satellitendaten gab es von der Südhalbkugel deutlich weniger Beobachtungsdaten, so dass die Prognosen dort merklich schlechter waren als im Norden. Grafik: ECMWF

Wellenwolke – *Alto cumulus undulatus*.

Foto: Lea Hartl



Als Baker Perry und sein Team im Frühjahr 2022 erneut am Everest waren, um ihre Wetterstationen zu warten und die Balcony Station weiter in Richtung Gipfel zu versetzen, nahmen sie wie üblich solche Ensemble-Prognosen zu Hilfe. Um nicht wieder im Menschenstau wertvolle Zeit zu verlieren, waren sie diesmal schon früh in der Saison – Anfang Mai – im Basecamp. Von Helfern zuhause kam die Information:

Wenig Wind am 10. Mai, dann Wetterverschlechterung. Macht euch auf den Weg! Das Team verließ am 6. Mai das Basecamp und verbrachte zwei Pausentage in Camp 2. Die morgendliche Prognose am 8. Mai gab Anlass zur Sorge. Viele Ensemblelinien sahen nun auf einmal Windgeschwindigkeiten von 24 m/s am 10. Mai – zu viel, um sich sicher im Gipfelbereich zu bewegen. Das Team entschied sich, die 1500 Höhenmeter ins Camp 4 in einem Stück aufzusteigen, und machte sich nach ein paar Stunden Pause in den frühen Morgenstunden am 9. Mai auf zum Gipfel. Trotz grenzwertig starkem Wind und tiefen Temperaturen gelangen die Installation der Wetterstation am Bishop Rock (8810 m) sowie der Abstieg ins Camp. Als am 10. Mai wie prognostiziert Böen mit Orkanstärke eintrafen, zeichnete die neue Station sie bereits auf (Matthews et al., 2022).

Für Perry zeigt die Erfahrung einerseits, wie gut und genau die Prognosen mittlerweile sind. Wetterfenster von wenigen Stunden können identifiziert und genutzt werden. Andererseits stellt er fest, dass sich das Team in der Planung vielleicht zu sehr auf die Prognose verlassen hat – sie wussten, dass die Phase mit wenig Wind kurz sein würde, und hätten den zweiten Ruhetag in Camp 2 für den weiteren Aufstieg verwenden können, um schon vorsorglich etwas Zeit zu gewinnen. Er betont, dass sowohl die Wettervorhersagen als auch das Wetter gerade im Gebirge nach wie vor Überraschungen bereithalten können. Im Flachland kann man, so Perry, den hochaufgelösten Output der Wettermodelle fast wie Echtzeitbeobachtungen interpretieren. Im Gebirge merkt man noch immer deutlich stärker, dass man es mit einem Modell (All models are wrong!) und nicht mit einer Beobachtung zu tun hat.

Genauso wichtig wie die Entwicklung der Prognosen an sich ist deren Verfügbarkeit. Auf die Frage, was sich an seiner Arbeit in den letzten 20 Jahren am meisten verändert hat, nennt Perry neben den Menschenmassen, die ihm vor allem am Everest das Leben schwer machen, das Satellitentelefon, das heutzutage zu seiner Standardausrüstung gehört. Erschwingliche Satellitenkommunikationstechnologien tragen die detaillierten Prognosen dorthin, wo sie gebraucht werden, sei es am Everest oder in der Antarktis. Und in den Alpen haben wir sowieso unsere persönlichen Supercomputer dabei, die sich jederzeit in ein ziemlich flächendeckendes Handynet einwählen können. Für populäre Berge wie den Everest sieht Perry für die Zukunft viel Potential im sogenannten Nowcasting, also in sehr kurzfristigen Prognosen, die auf lokalen Echtzeitdaten beruhen: Wenn man in Camp 3 sitzt und die Entwicklung der Windstärke am South Col mit Hilfe einer Wetterstation genau beobachten kann, lassen sich Modellprognosen genauer und ortsspezifischer interpretieren und unerwünschte Überraschungen noch besser vermeiden.

Bei allen technischen Meilensteinen, die in den letzten Jahrzehnten erreicht wurden, bleibt die Frage, was die Nutzer*innen damit machen. Perry übernimmt manchmal auch die Rolle des Prognostikers, der von zuhause aus Expeditionswetterberichte liefert. Er weiß, dass neben zu wenig auch zu viel Information für die Entscheidungsfindung zum Problem werden kann. Prognosen müssen für den jeweiligen Anwendungsbezug interpretierbar bleiben. Die Vorhersagenden müssen die relevantesten Datenpunkte herausfiltern, um keinen Informations-Overload zu produzieren, aber trotzdem die zentralen Punkte inklusive der Unsicherheiten zu kommunizieren. Darin liegt auch heute noch die Stärke von Spezialprognosen und erfahrenen menschlichen Prognostiker*innen gegenüber vollautomatisierten Vorhersagen.

Vor allem im Gebirge, wo das Wetter besonders kompliziert sein kann und zudem ein zentraler Sicherheitsfaktor ist, sind auch die Nutzer*innen der Wetterberichte gefordert. Es empfiehlt sich, Prognosen zu Rate zu ziehen, die Angaben zur Unsicherheit machen, wie etwa den Bergwetterbericht der Alpenvereine, und diese Angaben nicht zu ignorieren, sondern als zusätzliche Information in den Planungsprozess einzubeziehen. Auch in Zeiten von Wetterstationen mit Social-Media-Accounts müssen wir gewisse Unsicherheiten akzeptieren – im Leben wie im Wetterbericht.

Das weiß auch Baker Perry: Während die Station am South Col tapfer vor sich hin tweetet, herrscht seit ein paar Wochen Funkstille an der höchsten Station am Bishop Rock. Ist die Elektronik irreparabel kaputt oder nur temporär ausgefallen? Liegt es an den Sensoren oder an einem Problem mit der Stromversorgung? Er wird es erst erfahren, wenn jemand ganz klassisch, mühsam und analog nachschauen geht.

Literatur

■ Murphy, A. H. (1993). What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting. *Weather and forecasting*, 8(2), 281-293.

■ Matthews, T., Perry, B., Khadka, A., Sherpa, T.G., Shrestha, D., Aryal, D., Tuldahar, S., Thapa, N., Pradhananga, N., Athans, P. and Sherpa, D.Y., (2022). Weather observations reach the summit of Mount Everest. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1(aop).