

# ZUSAMMENFASSUNG

Während ich dies hier schreibe, werden weite Teile Mitteleuropas von einer Reihe heftiger Regenfälle heimgesucht, die viele Flüsse in weniger als zwei Tagen in reißende Ströme verwandeln, Überschwemmungen verursachen, Infrastruktur und Eigentum beschädigen, und Menschen verletzen. Die Häufigkeit solcher Extremereignisse, die mit hohen wirtschaftlichen Schäden und menschlichen Opfern verbunden sind, nimmt seit Jahrzehnten zu. Wie ist das möglich? Und worin besteht der Zusammenhang zwischen extremen konvektiven Niederschlagsereignissen und steigenden Temperaturen, wie jenen, die wir derzeit aufgrund des Klimawandels erleben?

Um diesen Fragen auf den Grund zu gehen, betrachten wir die folgende vereinfachte Version eines konvektiven Regenereignisses. Wir stellen uns eine Luftsäule vor, einen Teil der Atmosphäre mit einer Wolke darin. Nahe der Oberfläche strömt Luft in die Säule, wo sie dann vertikal aufsteigt. Mit zunehmender Höhe kühlt die Luft ab, bis ab einem bestimmten Punkt der enthaltene Wasserdampf in Form kleiner Tröpfchen kondensiert. Ab dieser Höhe, der sogenannten Wolkenuntergrenze, steigt die Luftmasse weiter auf, während die Menge kondensierten Wassers immer weiter zunimmt, sodass die Wolkentröpfchen an Größe wachsen. Letztendlich setzt Niederschlag ein – im Extremfall erreicht sogar das gesamte Wolkenwasser als Regen den Boden. Diesem konzeptionellen Modell folgend, besteht eine Möglichkeit zur Erhöhung der Niederschlagsmenge darin, den Feuchtigkeitsgehalt der in die Wolke strömenden Luft zu erhöhen.

In diesem Zusammenhang spielt die sogenannte Clausius-Clapeyron-Gleichung (CC-Gleichung) eine wichtige Rolle. Sie beschreibt das Wasserhaltevermögen der Luft in Abhängigkeit von ihrer Temperatur. Erwärmt sich die Atmosphäre in Folge des Klimawandels bei gleichbleibender relativer Luftfeuchtigkeit, nimmt die in der Atmosphäre enthaltene Feuchtigkeitsmenge um etwa 7 % pro Grad Erwärmung zu. Tatsächlich wurde festgestellt, dass diese Änderungsrate eine Grenze für weltweite extreme Tagesniederschlagsmengen darstellt. Es wurde jedoch auch ermittelt, dass lokale Niederschlagsextreme auf stündlicher Veränderung und noch kürzeren Zeitskalen höhere Raten aufweisen, als es von der Clausius-Clapeyron-Beziehung erwartet wird. Dieses Phänomen wird allgemein als “Super CC-scaling” bezeichnet. Eine gängige Theorie versucht dies dadurch zu erklären, dass sich die Energiemenge, die durch Kondensation in einer konvektiven Wolke freigesetzt wird, erhöht, wenn die Feuchtigkeitsmenge zunimmt. Dies führt zu stärkeren Aufwinden und schließlich zu einem stärkeren Feuchtigkeitsstrom in die Wolkensäule.

Trotz der Tatsache, dass Stationsbeobachtungen kurzfristiger Niederschlagsextreme Super CC-scaling aufweisen können, ist der genaue Prozess hinter diesem Phänomen noch unbekannt. Darüber hinaus bleibt unklar, wie sich die Eigenschaften einzelner konvektiver Ereignisse, wie Größe und Niederschlagsintensität, in einer wärmeren und feuchteren Atmosphäre verhalten. In dieser Arbeit verwenden wir RegenradarDaten mit einer vollständigen Abdeckung der Niederlande und isolieren einzelne konvektive Er-

eignisse mit einem Tracking-Algorithmus. Anschließend untersuchen wir die Statistik der Größe und Intensität von Regenereignissen zum Zeitpunkt ihrer höchsten Niederschlagsintensität. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass die räumliche Ausdehnung und die Intensität extremer Niederschlagsereignisse eng aneinandergelockt sind. Beide Eigenschaften nehmen gemeinsam zu, sodass stärkere Regenereignisse in der Regel größer sind. Unter wärmeren und feuchteren Bedingungen nimmt die Größe der Ereignisse bei Taupunkttemperaturen über ungefähr 15 °C verstärkt zu. Super CC-scaling kann festgestellt werden, wenn alle Ereignisse in die Analyse einbezogen werden. Die größten Ereignisse sind jedoch entscheidend, um Super CC-scaling bei höheren Temperaturen aufrechtzuerhalten. Erhöhte Niederschlagsraten finden sich über die gesamte Fläche der Ereignisse.

Um die Dynamik konvektiver Niederschlagsextreme in einer kontrollierten Umgebung weiter zu untersuchen, verwenden wir ein sogenanntes «Large Eddy Simulation»-Modell (LES-Modell). Ein LES-Modell kann mit einer ausreichend hohen Auflösung betrieben werden, um Prozesse darzustellen, die für die Bildung von kleinräumigen Gewittern notwendig sind. Weiterhin ist es möglich, zeitabhängige externe Einflüsse auf den Simulationsbereich zu berücksichtigen, wie beispielsweise ein großräumiges Windprofil und Konvergenz. Hier verwenden wir einen idealisierten, aber realistischen Fallaufbau, der für starke Sommerniederschläge in den Niederlanden repräsentativ ist. Unter der Annahme einer konstanten relativen Luftfeuchtigkeit simulieren wir den Basisfall sowie eine Reihe von Experimenten mit veränderter Temperatur und Feuchtigkeit. Um die Eigenschaften von Regenereignissen zu untersuchen, gruppieren wir kontinuierliche Bereiche mit Niederschlag zu Regenzellen (Clustering). Auf dieser Grundlage können wir den Zusammenhang zwischen Größe und Intensität von Regenzellen nachweisen und bestätigen. In wärmeren und feuchteren Simulationen werden Regenzellen größer und über ihre gesamte Fläche intensiver. Die Zahl großer Ereignisse steigt auf Kosten der kleineren. Diese Ergebnisse zeichnen zusammen mit der bereits erwähnten beobachtungsbasierten Studie ein konsistentes Bild.

Bisher haben wir Niederschlagsereignisse als isolierte Einheiten betrachtet. Ein weiterer Faktor, der das Ausmaß von Regenereignissen beeinflussen kann, ist jedoch der Prozess der konvektiven Organisation. Diesen Prozess kann man nachvollziehen, wenn man etwa eine isolierte Konvektionszelle mit einem mesoskaligen Konvektionssystem vergleicht, das als Ansammlung mehrerer Gewitter betrachtet werden kann. Letzteres kann als eine stärker organisierte Form eines konvektiven Niederschlagsereignisses angesehen werden. Dabei unterscheidet sich die horizontale Ausdehnung der beiden Typen um etwa den Faktor zehn. Lokale Dynamiken, die durch sogenannte «Cold Pools» verursacht werden, spielen dabei eine Schlüsselrolle, insbesondere bei der Bildung stärker organisierter Ereignisse. Cold Pools entstehen durch die Verdunstung von Regentropfen in der Atmosphäre. Dies bewirkt eine Abkühlung von Luftmassen, die dann aufgrund ihrer relativ höheren Dichte wiederum die Abwindgeschwindigkeit verstärken. An der Oberfläche breiten sich die Abwinde dann horizontal über eine Entfernung von mehreren zehn Kilometern aus. Dieser Effekt ist zum Beispiel bei der Beobachtung eines nahen Gewitters spürbar. Die relativ dichte Luftmasse, die sich dabei ausbreitet, verlagert die umgebende Luft vertikal und kann die Bildung neuer Konvektionszellen auslösen. Der Effekt ist noch stärker, wenn zwei oder mehrere Cold Pools kollidieren. Außerdem

transportieren Cold Pools Feuchtigkeit, was zur Akkumulation an anderen Orten führt, die wiederum bevorzugte Stellen für neue konvektive Ereignisse sind.

Abgesehen von der deutlichen Wirkung von Cold Pools auf die Entstehung und Organisation konvektiver Niederschlagsereignisse ist wenig darüber bekannt, wie sich diese Prozesse in einem wärmeren Klima verändern. Unklar bleibt auch, wie sich die Dynamik von Cold Pools unter diesen Bedingungen verhält und wie dies mit der Größe und Intensität von Niederschlagsereignissen zusammenhängt. Um dies zu untersuchen, verwenden wir eine ähnliche Konfiguration des LES-Modells wie im bereits genannten Fall. Wir wiederholen zunächst auch denselben Versuchsaufbau wie zuvor, nämlich mit einer wärmeren und feuchteren Einstellung. Ähnlich wie bei der zuvor erwähnten Methode des Regenzellen-Clusterings wenden wir die gleiche Technik auf Temperatur- und Feuchtigkeitsfelder an, um Cold Pools und relativ feuchte Bereiche, sogenannte "Moist Patches", zu identifizieren.

Es ergibt sich, dass eine erhöhte Größe und Intensität von Regenzellen unter wärmeren und feuchteren Bedingungen eine starke Korrelation mit der Größe und Ausbreitungsgeschwindigkeit von Cold Pools hat. Dies wiederum hängt stark mit der Größe und Menge jener Feuchtigkeit zusammen, die in Moist Patches enthalten ist. Diese Korrelationen legen eine Rückkopplungsschleife nahe, in der Cold Pools, die von anfänglich eher zufällig verteilten und schwachen Regenereignissen stammen, eine höhere Variabilität im bodennahen Feuchtigkeitsfeld verursachen und stärker organisierte Ereignisse mit höherer Intensität auslösen. Somit kann die Dynamik von Cold Pools die lokale Feuchtigkeitsverfügbarkeit für neu entstehende Regenereignisse ohne zusätzliche großräumige Konvergenz erhöhen. Aus einer separaten Gruppe von Experimenten können wir außerdem schlussfolgern, dass verstärkte großräumige Konvergenz allein die Ausdehnung von Regenzellen, nicht aber deren Intensität beeinflusst.

Aber halten die bisherigen Ergebnisse in einem realistischeren Szenario der Klimaerwärmung Stand? Es ist beispielsweise bekannt, dass in vielen Regionen über Land die relative Luftfeuchtigkeit mit der Erwärmung abnimmt. Außerdem wird erwartet, dass sich die verschiedenen Schichten der Atmosphäre nicht in gleichem Maße erwärmen. Aufgrund von Konvektion folgt das Temperaturprofil eher einer Änderung nach dem feuchtadiabatischen Gradienten, was zu einer stabileren Atmosphäre führt. Unser Versuchsdesign wendet diese Prinzipien an und für beide Situationen werden separate Simulationsgruppen erstellt. Wir stellen fest, dass eine Erwärmung, einhergehend mit einer reduzierten relativen Luftfeuchtigkeit, im Allgemeinen Niederschlagsereignisse, Cold-Pool-Dynamiken und Moist Patches weiter verstärkt. Dies hebt die relative Luftfeuchtigkeit, neben der Niederschlagsintensität, als weiteren Faktor hervor, der die Verdunstungsrate von Regentropfen und letztendlich die Stärke von Cold Pools steuert. Selbst wenn sich die Atmosphäre bei Erwärmung stabilisiert, führt dies, trotz dämpfender Wirkung, immer noch zu intensiveren und größeren Niederschlagsereignissen, die mit einer stärkeren Cold-Pool-Dynamik und Moist Patches verbunden sind.

Schließlich zeigen die in dieser Dissertation präsentierten Ergebnisse, dass extreme konvektive Niederschlagsereignisse stark auf eine Klimaerwärmung reagieren und unterstreichen in diesem Zusammenhang die Bedeutung kleinräumiger Dynamiken. Dies muss für bessere Vorhersagen zukünftiger Extreme berücksichtigt werden.