

# Doch der Segen kommt von oben

## DIE ATMOSPHERE ALS WASSERSPENDER

Wasser, das sich in der Atmosphäre in Wolken sammelt, fällt als Regen zur Erde – als langanhaltender Regen oder in kurzen Schauern. Meteorologen sprechen von frontalem und konvektivem Niederschlag. Wie sich die konvektive Niederschlagsstruktur aufbaut und besser vorhersagen lässt, damit beschäftigt sich ein Forschungsprojekt am Institut für Meteorologie und Klimatologie.

### Woher kommt das Wasser?

Alles Wasser auf unserer Erde ist einem immer währenden Kreislauf unterworfen. Verdunstung von Meer- und Landflächen, räumliche Verteilung des Wasserdampfes, Kondensation in Wolken, Niederschlagsbildung, Ausregnen, Versickerung im Boden, Abfluss an der Oberfläche in Bächen und Flüssen, Aufnahme und Abgabe durch Pflanzen, Tiere und Menschen.

Wir Menschen stellen daher mit der unterschiedlichen Nutzung des Wassers nur ein kleines Glied in diesem Wasserkreislauf dar.

Insgesamt beträgt die Menge irdischen Wassers  $1358 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ . Der größte Teil davon ist mit  $1320 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  in Ozeanen und Meeren als Salzwasser gespeichert. Durch Verdunstung wird aus flüssigem Wasser gasförmiger Wasserdampf, der durch Turbulenz und Konvektion in die Höhe transportiert wird und mit den Wetter- und Strömungssystemen in den unteren zehn Kilometern der Atmosphäre, der Troposphäre, vermischt und über den gesamten Globus transportiert wird.

Atmosphärisches Wasser macht gerade mal 0.001 Prozent des gesamten Wasservorrates aus – die dreihundertfache Menge des Bodensees.

Wird der Wasserdampf abgekühlt, so kondensiert er und bildet Wassertröpfchen, die dann in ihrer Gesamtheit als Wolke erkennbar sind.

Auch bilden sich bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt in einer Wolke Eisteilchen, sei es durch Gefrieren von Tröpfchen oder durch Sublimation aus der Dampfphase.

Unter der Einwirkung von Schwerkraft und Turbulenz können flüssige und feste Wolkenteilchen zusammenstoßen und so weiter wachsen.

Haben die so entstehenden Graupel, Schneeflocken, Hagelkörner oder Nieseltröpfchen dann eine solche Größe, dass sie durch ihre eigene Fallgeschwindigkeit die Aufwinde in und unterhalb der Wolke überwinden können, so fallen sie aus der Wolke aus und erreichen den Boden als Niederschlagspartikel in fester Form oder geschmolzen als Regentropfen. In mittleren Breiten bildet sich Niederschlag fast ausschließlich über die Eisphase und jeder Regentropfen war zuvor in seinem Leben ein Eisteilchen.

Die Menge des jährlichen globalen Niederschlags beträgt  $0.512 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  und würde verteilt auf die Erdoberfläche von  $511 \cdot 10^6 \text{ km}$  eine Niederschlagshöhe von etwa 1000 mm ergeben. Dies ist etwa die dreißigfache Menge an atmosphärischem Wasser!

Daher muss das beteiligte Wasser den gesamten Wasserkreislauf im Jahr dreißig Mal im Rhythmus von ungefähr zehn Tage durchlaufen.



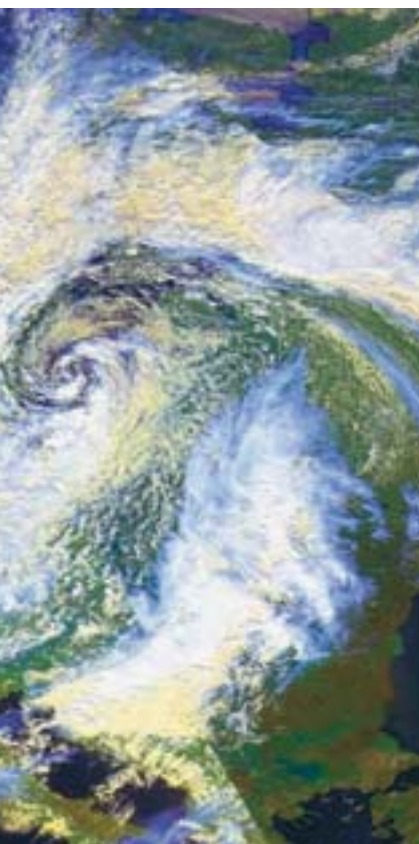
Für die Verdunstung von Wasser an der Erdoberfläche wird Energie benötigt, die von der Sonne zugestrahlt und als Wärme bei der Wolkenbildung wieder freigesetzt wird.

Dieser Wärmetransport ist global gesehen viermal so groß wie der Transport an »fühlbarer« Wärme: Der Wasserkreislauf spielt daher für die Energetik der Atmosphäre eine wichtige Rolle.

*Die Atmosphäre ist der immerfortwährende Spender des kostbaren Guts Süßwasser.*

**Wie verteilt sich der Niederschlag?**

Niederschlag ist für das Leben auf der Erde entscheidend. Nur dort, wo er fällt, können Pflanzen, Tiere und Menschen auf Dauer leben. Dort, wo er ausbleibt, wie in Wüsten, bedroht die Trockenheit jegliches Leben. Im Allgemeinen sind die ozeannahen Landstriche vom Niederschlag begünstigt, während im Landesinneren weniger Niederschlag fällt.



spiralen. Daneben sind auch weitere, weniger oder nicht zusammenhängende Einzelwolken zu erkennen. Die Wolkenbänder markieren Luftmassengrenzen, die Kalt- oder Warmfronten. Den Niederschlag, der aus ihnen fällt, bezeichnet man daher auch als frontalen Niederschlag. Aus den Einzelwolken fällt der Niederschlag zumeist in Form von Schauern – man nennt ihn auch konvektiven Niederschlag. In Deutschland tragen beide Niederschlagsarten ungefähr zur Hälfte des mittleren jährlichen Niederschlages von 800 mm bei. Während der frontale Niederschlag in der Regel mäßig aber lang andauernd ist oder sein kann, bringen Schauer bekanntermaßen viel Niederschlag in kurzer Zeit. Oftmals sind aber auch Schauer und Gewitter in frontale Regengebiete eingelagert. Unwetter, wie sie diesen Som-

merologie und Klimatologie, 16 km südsüdöstlich von Hannover, innerhalb einer halben Stunde 16,9 mm Niederschlag oder 16,9 Liter pro Quadratmeter.

Die Niederschlagsraten erreichten dabei Spitzenwerte von mehr als einem Liter pro Quadratmeter pro Minute (Abbildung 2).

Solche Niederschlagsraten sind bei uns zwar selten, doch in diesem Sommer gerade in Norddeutschland sehr häufig. Sie riefen unter anderem beträchtliche Schäden hervor, weil Regenrinnen, Abflussrohre und Kanalisation für solche Wassermassen teilweise nicht ausgelegt sind und diese daher auch nicht fassen konnten.

Die Andauer eines Niederschlagsereignisses und die lokal gefallene Menge des Niederschlages hängen nicht nur von der Niederschlagsstärke

Abbildung 1  
NOAA Satellitenbild vom 9. September 2001, 12 UTC, mit Tiefdruckgebiet über der Ostsee.

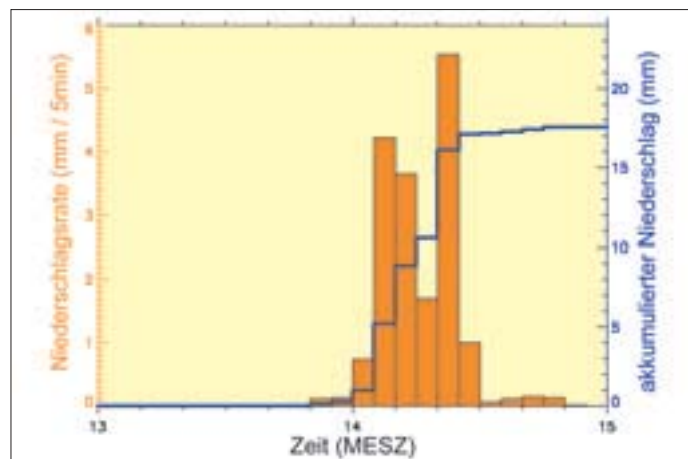


Abbildung 2  
Niederschlagsrate (orange) und akkumulierter Niederschlag (blau) registriert vom Niederschlagssensor des Institutes für Meteorologie und Klimatologie in Ruthe am 1. August 2002.

Die regionale und lokale Niederschlagsverteilung ist daher für die Volkswirtschaft eines Landes oder einer Region von grundlegender Bedeutung.

**Welche Wettervorgänge bringen Regen und Niederschlag?**

Das Satellitenphoto (Abbildung 1) zeigt einen typischen Regenspender mittlerer Breiten, eine Zyklone, mit ihren ausgeprägten mehrere hundert Kilometer langen Wolken-

mer in Deutschland und insbesondere in Norddeutschland häufig zu beobachten waren, sind großenteils konvektiver Natur.

**Beispiel:  
1. August 2002,  
Hannover im Regen**

Kräftige Gewitter zogen an diesem Tag mit ihren konvektiven Zellen über Hannover und Norddeutschland hinweg. So fielen an der Messstation Ruthe des Institutes für Me-

innerhalb der Wolke, sondern auch von deren räumlicher Größe, der Zuggeschwindigkeit und Orientierung ab. Auch bestimmt die Abfolge eventueller weiterer benachbarter konvektiver Zellen die Gesamtmenge des gefallenen Niederschlages.

Um Aussagen über zu erwartende kurzzeitige Niederschlagsmaxima treffen zu können, ist es daher wichtig, die räumliche Struktur von konvektiven Niederschlagszellen zu verstehen.

**Die kleinräumige Struktur von Niederschlagsgebieten**

Diese räumliche Struktur lässt sich sehr gut mit einem Netz von Wetterradars untersuchen. Diese erfassen alle 15 Minuten mit Hilfe ausgestrahlter Mikrowellen die räumliche Verteilung von Niederschlagspartikeln ab ~ 0.5 mm Größe. Abbildung 3 zeigt eine Karte Deutschlands mit konvektiven Niederschlagsfeldern.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Deutschen Klimaforschungsprogramms wird am Institut für Meteorologie und Klimatologie basierend auf solchen Radardaten die kleinräumige konvektive Niederschlagsstruktur untersucht.

Abbildung 3  
Deutschland-Radarbild-Komposit des Deutschen Wetterdienstes (DWD) vom 8. September 2001 um 13 UTC.

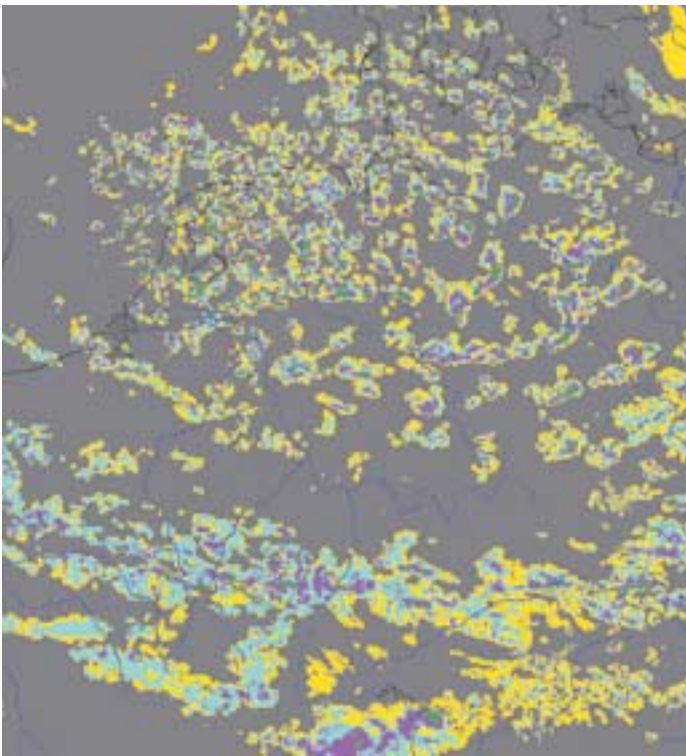


Abbildung 4 (rechts)  
Mittlere Zellenzahl (schwarz) und zugehörige mittlere beregnete Fläche (rot) über Deutschland. Mittel aus 39 Tagen mit konvektiven Niederschlägen.

In einer ersten Studie wurden an 39 Tagen die konvektiven Niederschlagsgebiete, wie sie typischerweise hinter Kaltfronten auftreten, identifiziert und insgesamt 140.000 einzelne zusammenhängende Niederschlagszellen analysiert.

Interessiert hat zunächst die Anzahl der Zellen, ihre Längserstreckung  $d$ , Fläche  $f$  und Umfang  $u$  sowie die regionale Verteilung dieser abgeleiteten

Größen. Hier nun eine Auswahl aufschlussreicher bisher erzielter Ergebnisse.

**Der Tagesgang der Anzahl konvektiver Zellen und ihrer Fläche**

Trägt man für jede Viertelstunde des Tages die mittlere Zahl der in den 39 Tagen gefundenen konvektiven Zellen auf (Abbildung 4), so sieht man, dass sich innerhalb des Untersuchungsgebietes Deutschland gegen 8 Uhr morgens mit Erwärmung des Bodens durch die einsetzende Sonnenstrahlung vermehrt Wolken und Niederschlagszellen bilden. Ihre Anzahl erreicht gegen Mittag ein breites Maximum, das, bis auf eine kurze Absenkung, bis 17 Uhr anhält. Danach zerfallen die Zellen wieder auf eine Zahl von etwa 20 in der Nacht.

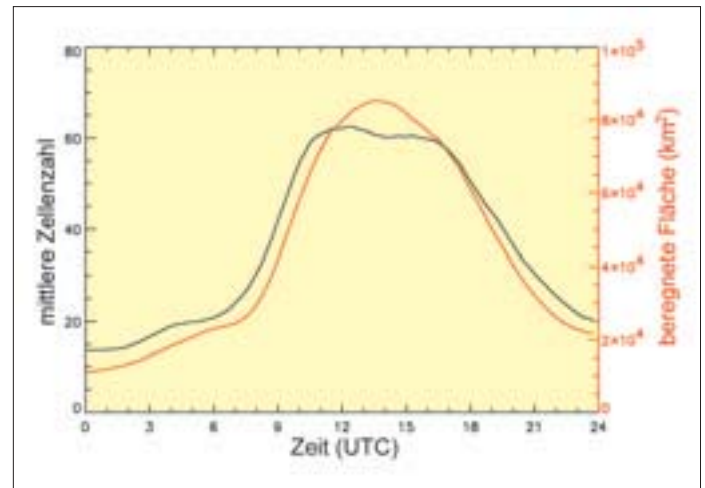
Der Tagesgang der von den Zellen pro Zeitpunkt beregnete

aber die vorhandenen wachsen weiter, fließen teilweise zusammen und bilden größere Wolkenkomplexe (*Cluster*). Gegen Abend schrumpfen die Zellen und werden weniger.

Die mittlere Zellengröße variiert im Laufe des Tages zwischen 1.000 und 1.500 km<sup>2</sup>. Die regionale Verteilung der lokal vorgefunden mittleren Zellengröße innerhalb Norddeutschlands ist in Abbildung 5 ausschnittsweise dargestellt. In dieser Darstellung dominieren naturgemäß die großen Zellen mit einem ausgeprägten Maximum in der Nähe der Nordseeküste von mehr als 25.000 km<sup>2</sup>. Ursache hierfür ist die dort verstärkt beobachtbare Tendenz einzelner Zellen, sich zu Wolkenclustern zusammenzuschließen.

**Sind sich Wolken und Niederschlagsgebiete ähnlich?**

Während die bisher gefundenen Ergebnisse mehr von re-



ten Fläche zeigt einen ähnlichen Verlauf mit allerdings einem deutlich ausgeprägten Maximum um 15 UTC (Universal Time Coordinated = Weltzeit = MESZ – 2 Stunden). Zu diesem Zeitpunkt regnet es im Mittel auf über 80.000 km<sup>2</sup>.

Es fällt auf, dass die Zellenzahl stärker am Morgen ansteigt als ihre gesamte Fläche. Gegen Mittag kommen keine weiteren Zellen mehr hinzu,

gionaler Bedeutung sind, so richten sich die weiteren Untersuchungen auch auf darüber hinausgehende, verallgemeinerbare Aussagen.

Berechnet man beispielsweise das Verhältnis  $d^2/f$  aus Längserstreckung  $d$  und Fläche  $f$  und trägt dessen mittleren Tagesgang auf, so sieht man, dass das Verhältnis nahezu konstant ist und nur gering um einen Wert von ~1,5



schwankt. Aus einem Scatterplot (Abbildung 6) lässt sich ein funktionaler Zusammenhang  $d^2/f \approx f^{1/5}$  aufstellen.

Bemerkenswert ist dabei, dass sowohl die Längserstreckung  $d$  als auch die Fläche  $f$  mehr als vier Größenordnungen überstreichen.

Kleine als auch große Zellen sind sich hinsichtlich des funktionalen Zusammenhanges zwischen Durchmesser und Fläche ähnlich. Während die Anzahl der Zellen und ihre Fläche den Tagesrhythmus widerspiegeln, deutet dieser Strukturparameter auf einen allgemeineren, aber physikalisch bisher noch nicht hinreichend verstandenen Zusammenhang hin. Auch für andere Strukturparameter finden wir

Unsere Untersuchungen zeigen daher sowohl die regionalen Besonderheiten der konvektiven Niederschlagsgebiete auf, weisen aber auch auf allgemeinere universelle Zusammenhänge hin.

Dies ist Gegenstand der weiteren und aktuellen Forschung.

**Welchen Nutzen hat man von diesem Wissen?**

Mit den bisher gewonnenen Erkenntnissen lässt sich beispielsweise ein einfaches, stochastisches Niederschlagsmodell entwickeln, welches sowohl die in Deutschland beobachteten statistischen Eigenschaften besitzt, aber auch die universellen Merkmale auf-



**Prof. Dr. Thomas Hauf**  
Jahrgang 1949, ist Professor am Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover.



**Dipl.-Met. Michael Theusner**  
Jahrgang 1974, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover.

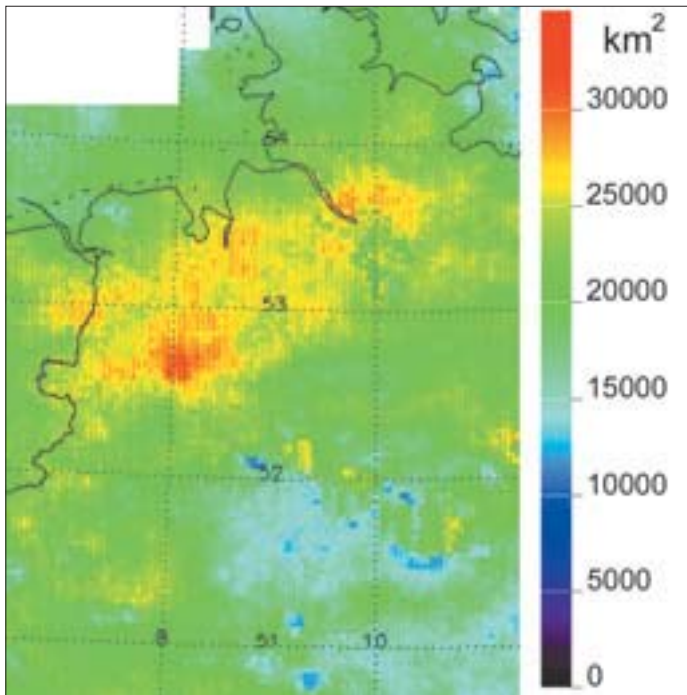


Abbildung 5  
Räumliche Verteilung der mittleren Zellengröße über Norddeutschland. Mittel aus 39 Tagen mit konvektivem Niederschlag.

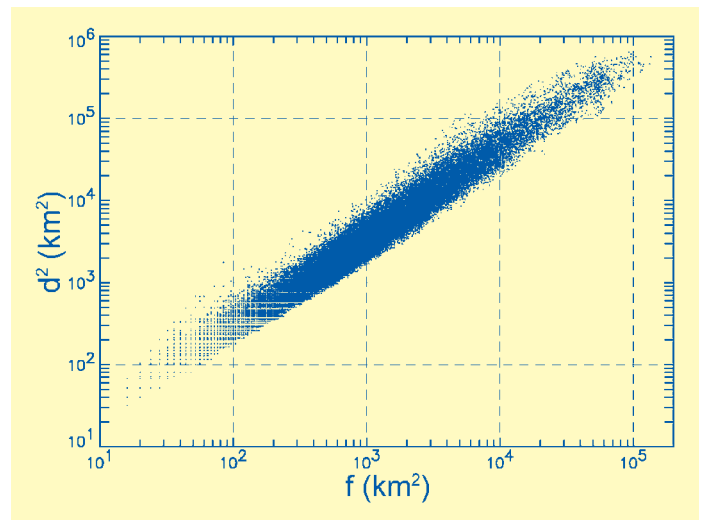


Abbildung 6  
Scatterplot des Zelldurchmessers  $d$  und der Zellenfläche  $f$ , aufgetragen ist  $d^2$  gegen  $f$ . Werte von etwa 140.000 Zellen von 39 Tagen.

interessante Ergebnisse: So bilden Umfang  $u$  und Fläche  $f$  ebenfalls ein konstantes Verhältnis von  $u^2/f^{Dim}$ , wobei  $Dim \sim 4/3$  ist und die fraktale Dimension der Niederschlagsgebiete angibt.

weist. Ein solches Modell wäre für die Hydrologie von großer Bedeutung und könnte zur Konzeption, Dimensionierung und Verbesserung von Hochwasserschutzbauten, Rückhaltebecken und anderen siedlungswasserwirtschaftlichen Maßnahmen genutzt werden.