

Fallstudie zu Hurrikan SANDY (2012)

Gliederung:

- **1. Einleitung**
- **2. Chronologie von Hurrikan SANDY**
 - 2.1 Kaltluftzufuhr von Kanada
 - 2.2 Extratropische Umwandlung
 - 2.3 Positive SST-Anomalien vor der Küste
 - 2.4 Maximierte Hebung
 - 2.4.1 Gewitter und Tornadogefahr
 - 2.5 Satellitenbilder
 - 2.5.1 War ein sting jet beteiligt?
- **3. Phasendiagramme**
- **4. Zusammenfassung und Bilanz**
- **5. Ist SANDY ein Bote des Klimawandels?**
- **6. Quellen**

1. Einleitung:

Die tropische Welle entstand am **22. Oktober 2012** in der Karibik und verstärkte sich am Abend des gleichen Tages zum tropischen Sturm SANDY. Aufgrund der warmen Karibik und günstiger Scherungsbedingungen intensivierte sich SANDY zum Hurrikan und überquerte die Karibischen Inseln kurzzeitig als Kategorie-2-Hurrikan. Über 65 Menschen kamen durch die heftigen Orkanwinde und sintflutartigen Regenfälle ums Leben.

EZMWF zeigte am **24. Oktober 2012** im 12z-Lauf die gefährliche Rechnung mit einem Hurrikan, der auf die US-Ostküste prallt. GFS 12z zog am **25. Oktober 2012** nach, in weiterer Folge war das, was sich zwischen dem **29. und 30. Oktober 2012** ereignen würde, bereits sehr gut vorhersagbar. Unsicherheiten bestanden aber nach wie vor in der Intensität von SANDY und inwiefern tropische oder bereits außertropische Eigenschaften überwiegen würden. Wohl auch dank dieser guten Vorhersagbarkeit blieben die Opferzahlen mit rund 50 Todesopfern an der dichtbesiedelten Ostküste vergleichsweise gering.

Die Menschen in der Karibik hatten weniger Glück, dort betrug die Vorlaufzeit zum Teil nur wenige Stunden, die Sicherheitsvorkehrungen aufgrund der ärmlichen Lebensverhältnisse mangelhaft. Nicht der Wind verursacht dort die tödlichsten Zerstörungen, sondern der heftige und andauernde Regen mit der Folge von Erdbeben und Überschwemmungen. Wellblechhütten und ähnlich marode Bausubstanz können diesen nicht standhalten.

Als klar wurde, dass SANDY auch für die US-Ostküste, u.a. New York, eine Gefahr darstellen wird, verlagerte sich die Berichterstattung fast ausschließlich auf die USA. Das ist jedoch kein Einzelfall, es sei dadurch relativiert, dass die meisten Menschen aus den Industrieländern zu den USA einen stärkeren (persönlicheren) Bezug haben als zu Menschen aus den Entwicklungsländern. Es mag beschämend sein, dass die Armut oft ungehört bleibt, und sich lediglich in Opferzahlen bemerkbar

macht. Das ist die dunkle Seite von SANDY.

Was aber in weiterer Folge aus der Berichterstattung über SANDY wurde, ist ein Armutszeugnis für viele Journalisten. So wie es einen hippokratischen Eid für Ärzte gibt, sollte es auch einen **Ehrenkodex für Journalisten** geben, der in Zeiten des schnelllebigen Online-Journalismus, in denen das Verfallsdatum der online eingestellten Artikel zum Teil nur wenige Stunden beträgt, dringend notwendig wäre.

Hierzu exemplarisch drei Zitate aus den Online-Medien vom ORF, "Spiegel" und der "Süddeutschen Zeitung".

Denn Meteorologen warnen, dass „Sandy“ in Kombination mit einer Kaltfront, die sich vom Westen her nähert, zu einem „Jahrhundertsturm“ werden könnte. [...] Befürchtet wird vor allem, dass der Hurrikan im Nordosten der USA auf einen Wintersturm stößt, der vom Westen her über das Land zieht.(**ORF, 28.10.12**)

Wegen des gewaltigen Ausmaßes des Sturms und weil das Aufeinandertreffen von gleich drei Stürmen so selten vorkommt, "können wir uns nicht festlegen, wer das Schlimmste abbekommt", sagt Rick Knabb vom Nationalen Hurrikanzentrum in Miami, Florida.(**Süddeutsche Zeitung, 28.10.12**)

Am Dienstagmorgen trifft "Sandy" nach den jetzigen Berechnungen im Umland von New York oder New Jersey auf das Tief "Frankensturm", zudem wird aus dem Süden Kanadas eine Kaltfront erwartet.(**DerSpiegel", 28.10.12**)

An der Theorie des "Wintersturms" hielt der ORF selbst am 30.Oktober 2012, abends, noch fest, als aufgrund der Bodenwetterkarten für jeden ersichtlich war, dass hier kein zweites Tief beteiligt sein würde. Die Kombination aus gleich drei Stürmen erinnert natürlich an Roland-Emmerich-Katastrophenfilme. Nein, es ist völlig undenkbar, dass es hier ein ganz normaler Prozess ist - es muss gleich übertrieben werden.

Zur Ehrenrettung der Journalisten sei hier "DerStandard" zitiert:

Als eine Mischung aus Tropen- und Wintersturm könnte "Sandy" Experten zufolge dem östlichen Drittel der USA Starkregen und Schnee bringen. [...] "Sandy" kommt für die Tropensturm-Saison spät und weist gleichzeitig typische Eigenschaften eines Wintersturms auf. Aus dieser Kombination, so fürchteten Experten, könnte ein besonders schwerer Sturm mit katastrophalen Folgen entstehen. Wegen dieses Ausmaßes und der zeitlichen Nähe zu Halloween am Mittwoch wird "Sandy" in den USA auch "Monstersturm" genannt. ("**DerStandard",27.10.12**)

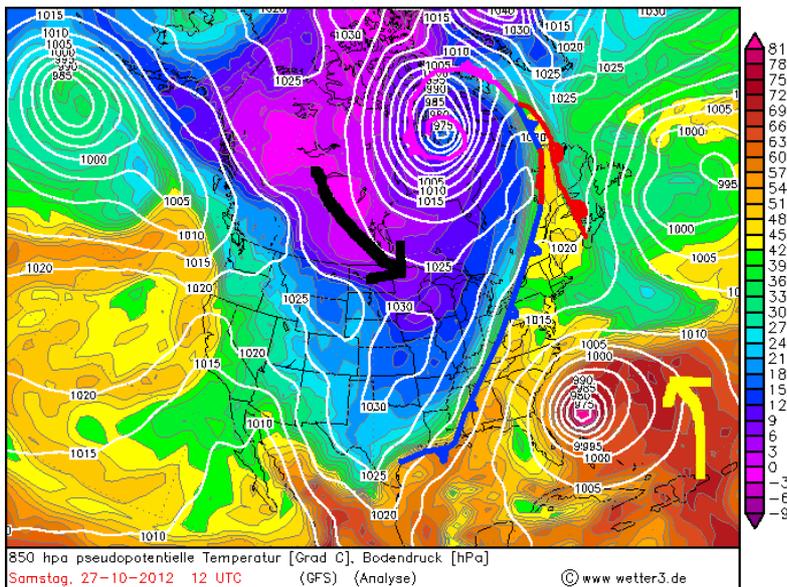
Diese Erklärung ist meteorologisch und chronologisch völlig korrekt! Besser hätte man es - für Laien verständlich - nicht erklären können. Tatsächlich handelte es sich bis zum Auftreffen auf die US-Ostküste um einen Tropensturm (in Hurrikanstärke). Nachfolgend wandelt sich dieser in ein außertropisches Sturmtief um, in Fachkreisen auch **ET ("extratropical transition")** genannt. Dieser Vorgang tritt in den gemäßigten Breiten mehrfach im Jahr auf und ist absolut nichts Ungewöhnliches.

2. Chronologie von Hurrikan SANDY

Folgende Faktoren trugen jedoch dazu bei, dass die Ostküste und auch die Bundesstaaten weiter im Westen extremen Wetterbedingungen ausgesetzt waren:

2.1 Kaltluftzufuhr von Kanada

Im Oktober herrschte schon davor generell wechselhaftes Wetter mit häufigen Kaltluftvorstößen ("Westwetterlage"). Zwischen 25 und 27. Oktober 2012 hatte gerade ein weiteres kräftiges Tief der Frontalzone mit seiner Kaltfront den Kontinent von West nach Ost überquert. Als SANDY das Festland erreichte, war die Kaltfront bereits unter Hochdruckeinfluss inaktiv geworden, es stand jedoch - der **fortgeschrittenen Jahreszeit** sei Dank - ein relativ großes **Kaltluftreservoir** zur Verfügung. Ein paar Wochen oder Monate früher, vgl. Katrina im August 2005, hätte dieses Kaltluftpotential nicht bestanden. So aber glitt die extrem warme Tropensturmflucht auf der bodennah eingeflossenen Kaltluft auf und führte an der Westflanke des Sturms zu heftigen Schneefällen in Verbindung mit Sturmböen (**Blizzard**).



Quelle: www.wetter3.de

Abb.1 zeigt Bodendruck und pseudopotentielle Temperatur (Luftmassen) am Samstag, 27.10.12, 12 UTC. Hurrikan SANDY hat gerade die Karibik hinter sich gelassen und zieht Richtung US-Ostküste, wo der Wind bodennah bereits auf Nordost dreht. Über Kanada befindet sich ein Sturmtief, das arktische Kaltluft nach Südosten transportiert. Da die Kaltfront zunehmend unter Hochdruckeinfluss gerät, verliert sie an Aktivität - zudem ist sie nicht kalt genug, um bis in tiefe Lagen Schnee zu produzieren.

74455 DVN Davenport

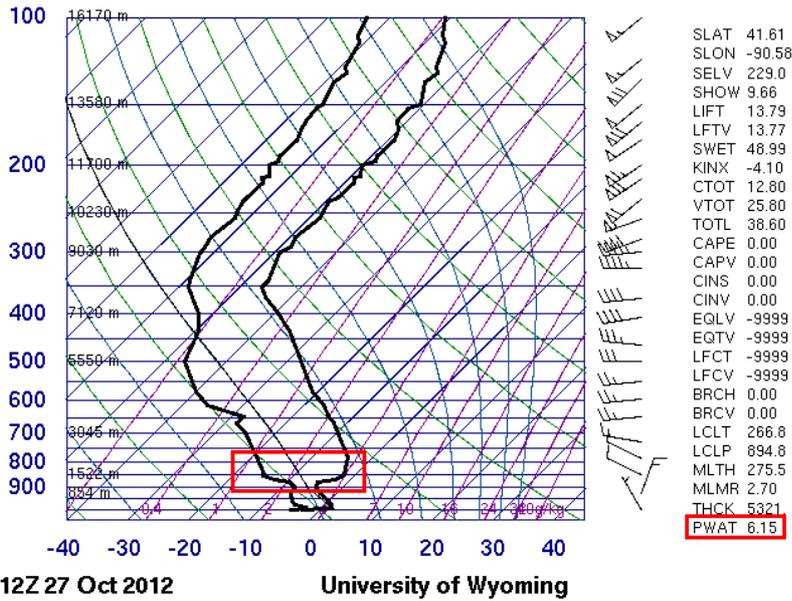


Abb.2: Der Sondenaufstieg stammt aus der Kaltluft mit nächtlicher Bodeninversion und durchwegs negativen Temperaturen in der Höhe. Der Oberrand der gut durchmischten "residual boundary layer" wird durch eine Absinkinversion markiert, dessen trockene Luft auch die Grenzschichtwolken schon aufgetrocknet hat. Der Gehalt niederschlagbaren Wassers (PWAT) ist auf 6 l/m² abgesunken. Ohne massive Hebungsprozesse wird aus *diesem Profil* kein Schneesturm mehr!

74494 CHH Chatham

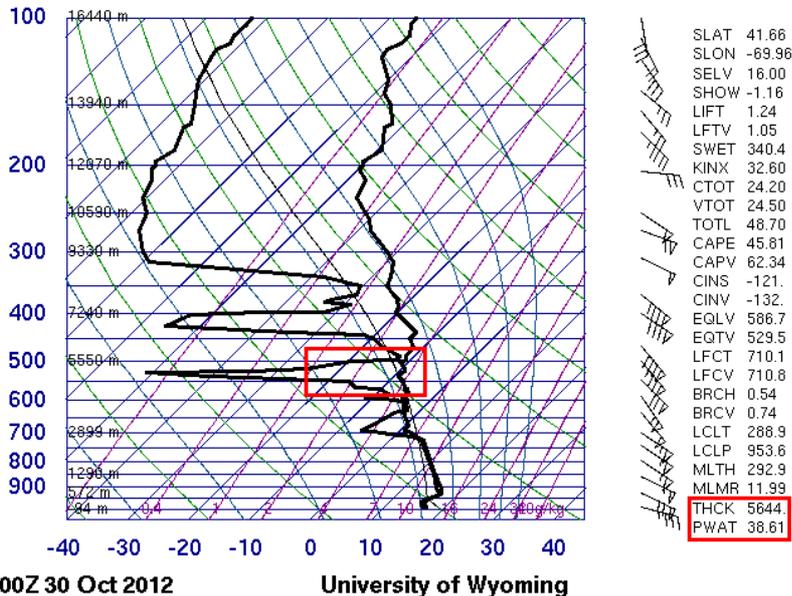
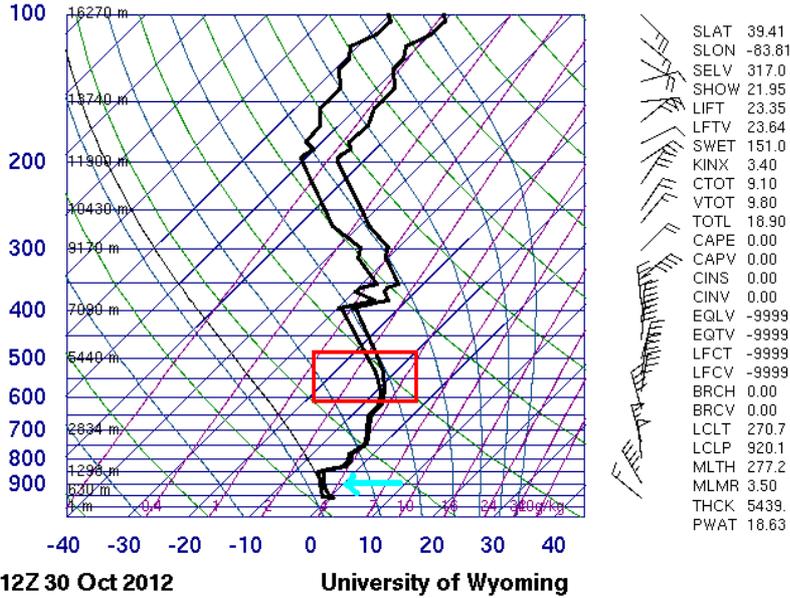


Abb.3 zeigt eine zwischen Boden und 700 hPa durch massive Hebung durchwegs gesättigte Atmosphäre, der überadiabatische Temperaturknick danach kommt durch den nassen Sensor der Sonde zustande und ist ein Messfehler (der auch die geringen CAPE-Mengen ab dieser Höhe verursacht). Erwähnenswert sind der hohe PWAT (38 l/m²), die hohe Schichtdicke (> 5600 gpdm) und die warmen -10°C in 550 hPa.

72426 ILN Wilmington



12Z 30 Oct 2012 University of Wyoming

Abb.4 zeigt das Ergebnis der Warmluftadvektion und bodennaher Kaltluftadvektion. In 550 hPa herrschen weiterhin -10°C , darunter folgt das Temperaturprofil aber nicht mehr dem feuchtadiabatischen Verlauf, sondern ist annähernd isotherm bis stabil geschichtet (-5°C in 850 hPa). Bodennah geht die Temperatur deutlich zurück - die Temperaturkurve liegt durchwegs im negativen Bereich, was starke Schneefälle zur Folge hat. Verstärkt wird der Temperaturrückgang und der Übergang von Regen in Schneefall durch die Schmelzkälte infolge der starken Niederschlagsraten (vgl. Lumb-Kurven).

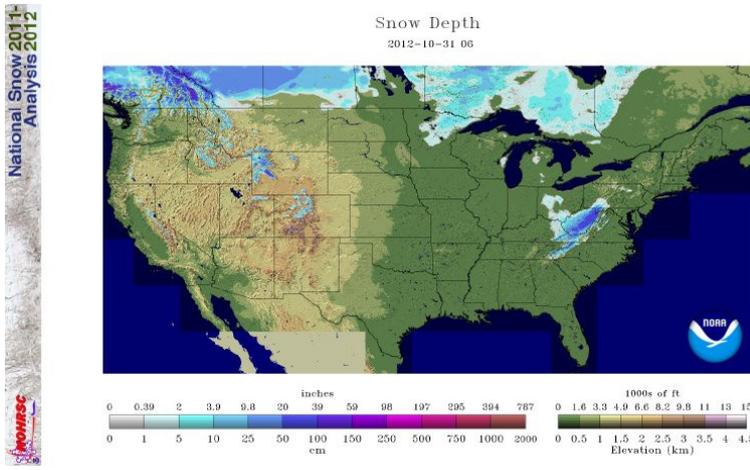


Abbildung 5: Schneehöhen USA (Zoom durch Anklicken) Quelle: <http://www.nohrsc.noaa.gov/nsa/>

Abb.5 zeigt die Schneehöhe am 31.10.12, 06 UTC. Am meisten Neuschnee fiel in den Appalachen mit verbreitet 50-100 cm, aber auch in den Niederungen West Virginias fielen bis zu 25 cm Neuschnee.

Fazit: Hier prallen keine Stürme aufeinander, da sich das Sturmtief über Kanada zum Zeitpunkt des Landfalls von SANDY bereits über der Arktis aufgelöst hat. Tatsächlich hat das Sturmtief (inaktive) Kaltluft bereitgestellt, die in die Zirkulation von SANDY eingebunden wird. Die intensive Advektion von Tropikluft über die einströmende Kaltluft sorgte für kräftige, konvektiv durchsetzte und orographisch verstärkte Aufgleitschneefälle, die sich durch den starken Druckgradienten als **Blizzards** bemerkbar machen.

2.2 Extratropische Umwandlung (ET)

Eine idealer Nährboden für hochbarokline Prozesse (Frontalzone): Kontinentale Kaltluft, die aufgrund ihrer Trockenheit stark auskühlt sowie maritime Warmluft, die wegen der höheren Wärmekapazität des Meeres wärmer und absolut feuchter bleibt. Die Grenze verlief genau an der US-Ostküste, wo der Hurrikan auf die Trogvorderseite geriet

Abb.6: Am 29.Oktober 2012, 00 UTC, stößt ein Höhentrog über die Großen Seen nach Südosten vor. Hurrikan SANDY befindet sich noch auf dem Atlantik.

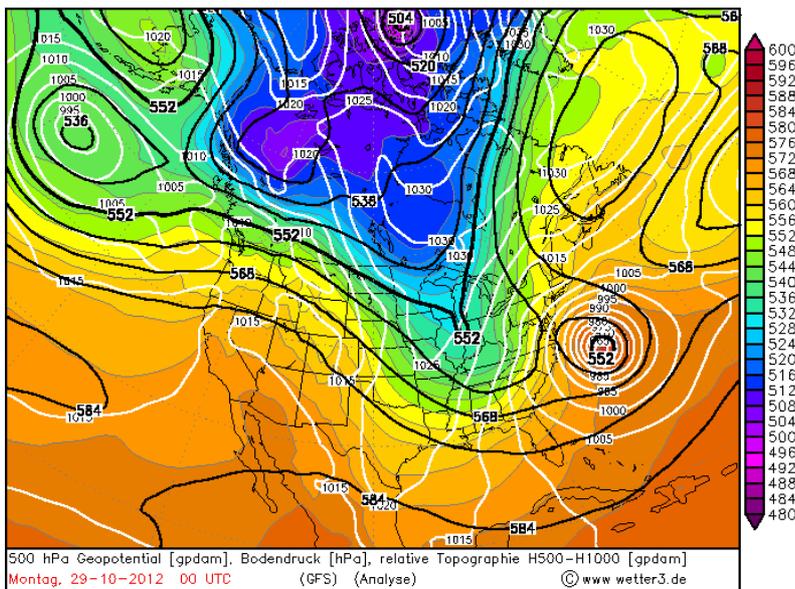


Abb.7: Am 29. Oktober 2012, 12 UTC, beginnt die Wechselwirkung von Höhentrog und Bodentief (hier: der Hurrikan):

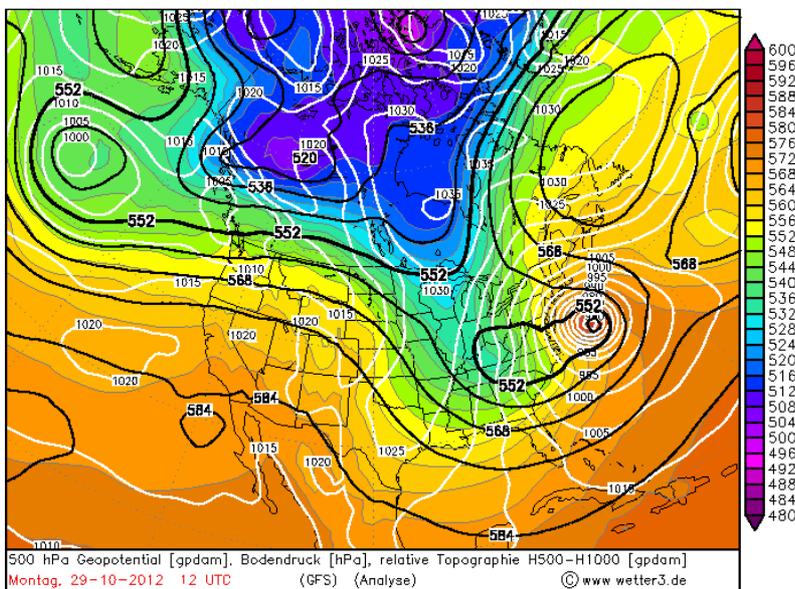
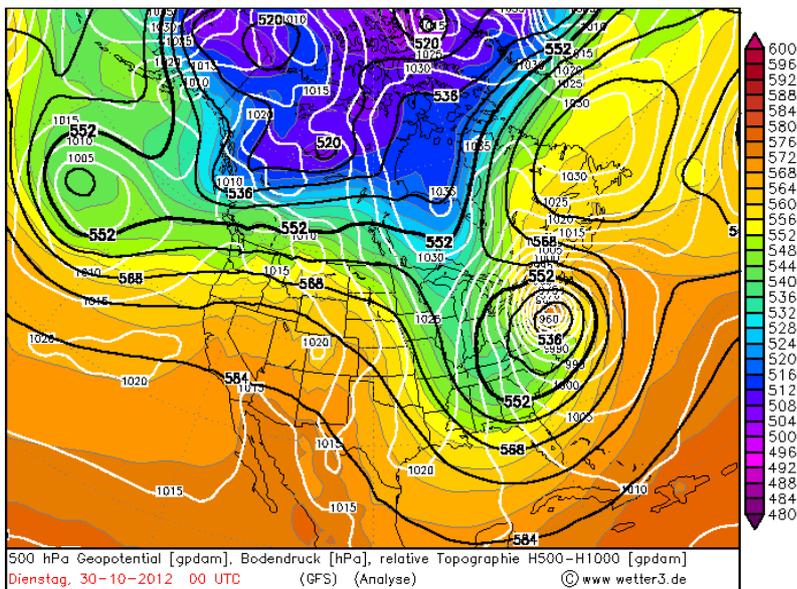


Abb.8: Am 30.Oktober 2012, 00 UTC, kurz vor dem Höhepunkt des außertropischen (!) Sturmtiefs. Höhentiefkern und Bodentiefkern liegen fast achsensenkrecht übereinander, damit ist das Reifestadium des Bodentiefs (= niedrigster Kerndruck mit 937,0 hPa) erreicht.



Wie aus den Karten ersichtlich wird, handelt es sich um eine ganz gewöhnliche Zyklonogenese, wie sie täglich überall in den gemäßigten Breiten an einer Frontalzone auftritt. Der einzige, dadurch bedeutende Unterschied: Hier handelt es sich bei dem 'zu vertiefenden Bodentief' um einen Hurrikan. Dessen Kerndruck war mit rund 960 hPa schon vor der Umwandlung niedrig. Bei einer gewöhnlichen Zyklonogenese (ohne Beteiligung eines Tropensturms) liegt er um 30 bis 40 hPa höher!

Fazit: Die Umwandlung an sich war nicht ungewöhnlich, sondern dass ein ausgewachsener Hurrikan unter differentielle zyklonale Vorticityadvektion (DCVA) geriet. Was unter normalen Umständen ein Orkantief zur Folge hat, geschah hier **mit** einem Orkantief.

Die stärksten Windspitzen traten - für Hurrikane üblich - im rechten vorderen Quadranten auf, wie auch die Messdaten (Abb.19, Seite 34) [in diesem "Draft Paper" von Richard Grimm](#) belegen. Danke an [Bob Maddox](#) für diesen Hinweis. Entsprechend waren die heftigsten Winde unmittelbar an der Küste zu verzeichnen, wo sich Translation und Rotation des Sturms addieren. Selbst in New York traten noch Windspitzen über 120 km/h auf.

Die auflandige Strömung (Nordost bis Ost!) erzeugte gleichzeitig eine **Sturmflut** mit einem Rekordwasserstand von 4,30 m in Manhattan. Wie diese Sturmflut zustande kommt, wird [hier](#) sehr gut erklärt.

Entscheidend für die Westwärtsverlagerung war die Blockade von SANDYs "recurvature" durch das Neufundlandhoch, dazu später mehr.

2.3 Positive SST-Anomalien vor der Küste

Unbestritten hat das **überdurchschnittlich warme Oberflächenwasser** zur Aufrechterhaltung der Hurrikan-Stärke Sandys beigetragen:

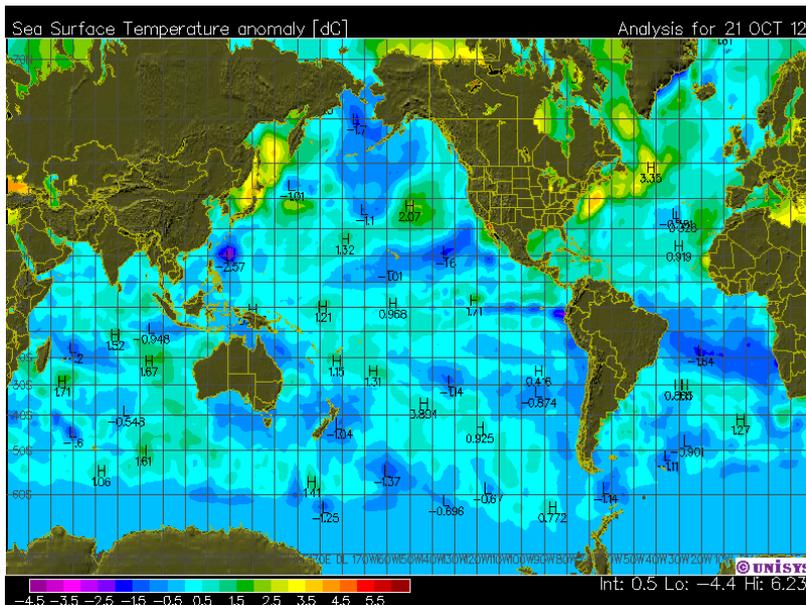


Abb.9: SST-Anomalien am 21.Oktober, Quelle: <http://weather.unisys.com/archive/sst/>

Abbildung 9 zeigt deutliche Abweichungen vor der Ostküste der USA im Ausmaß von 2-3 K Temperaturüberschuss, die auch bis zum 30. Oktober nicht abgebaut wurden, stellenweise betragen sie sogar 4 K über dem Klimamittel. Überdurchschnittlich warmes Oberflächenwasser erhöht die sensiblen Wärmeflüsse und erniedrigt die statische Stabilität, die sich als Kehrwert in der Omega-Gleichung wiederfindet (vgl. 2.4). Tropenstürme werden dadurch intensiver und langlebiger, vorausgesetzt die Umgebungsscherung ist nicht zu stark.

2.4 Maximierte Hebung

Die Ursache für die enormen Regenmengen ist in einem Satz erklärt und bereits aus Abb.1 ersichtlich: Warme und damit absolut sehr feuchte Luft tropischen Ursprungs wird durch starke Vertikalbewegung gehoben und ausgepresst.

Drei der vier Terme der **Omega-Gleichung** kommen zum Tragen:

Differentielle Vorticityadvektion (vorderseitig des Höhentrogs) + **Differentielle Temperaturadvektion** (vorderseitig des Höhentrogs) + **differentielle Reibung** (starkes Abbremsen der Strömung auf dem Festland). Da die statische Stabilität im Bereich des Ex-Tropensturms herabgesetzt ist (kräftige Feuchtkonvektion!) und sich diese als Kehrwert in jedem Term wiederfindet, wird jeder Term noch potenziert.

Das heißt mit anderen Worten: Maximale Hebung im Bereich von Hurrikan SANDY.

Gemäß der qualitativen Formel

$$R = E * w * q$$

wobei R die Regenrate, E die Effizienz, w die Vertikalbewegung und q der Wasserdampfgehalt darstellen,

war der Wasserdampfgehalt enorm hoch (tropische Luftmassen), die Vertikalbewegung maximal und die Effizienz durch die hochreichend feuchten Luftschichten ebenso groß. Daraus resultiert eine

große Niederschlagsrate, in den Appalachen durch die bodennahe Nordwestanströmung noch orographisch verstärkt.

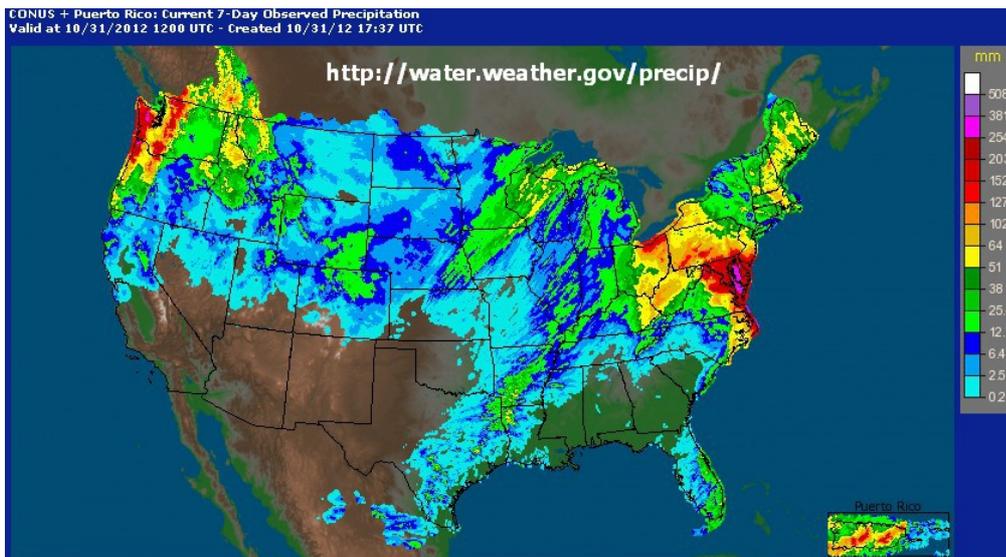


Abb. 10 - 7-Tage-Regenmengen bis 31.10.12; Quelle: <http://water.weather.gov/precip/>

Abbildung 10 zeigt die **zwischen 24. und 31. Oktober 2012** gefallenen Regenmengen, davon stammt der Großteil von SANDY. Besonders betroffen ist der Großraum Maryland, wobei ein sekundäres Maximum am Südrand des Lake Erie auftritt, wo einzelne Flüsse ein "Major Flooding" meldeten. Je nach Bodenwindrichtung kann hier der Lake-Effect die Niederschlagsrate verstärkt haben.

Fazit: Alle Zutaten für große Regenmengen waren gegeben. Dies erklärt die Überschwemmungen im Binnenland, die u.a. 4 Atomkraftwerke in Notlagen brachten (Abschaltung notwendig, Rückgriff auf Notstromaggregate, usw.). Die östlichen US-Bundesstaaten schrammten an einer **Fukushima-ähnlichen Katastrophe** vorbei!

Aus einem Bericht über das Atomkraftwerk Oyster Creek (New Jersey):

"This event caused a valid [reactor protection system] actuation with automatic containment isolations that resulted in a **temporary loss of shut-down cooling** to the reactor. Shutdown cooling was subsequently restored with power provided by the emergency diesel generators."

Quelle: <http://nuclearstreet.com> (31.10.12)

2.4.1 Gewitter und Tornadogefahr

Wenn die Regenbänder eines Hurrikans das Festland erreichen, besteht durch die hohe vertikale Windscherung häufig die [Gefahr von kurzlebigen, meist schwachen Tornados](#).

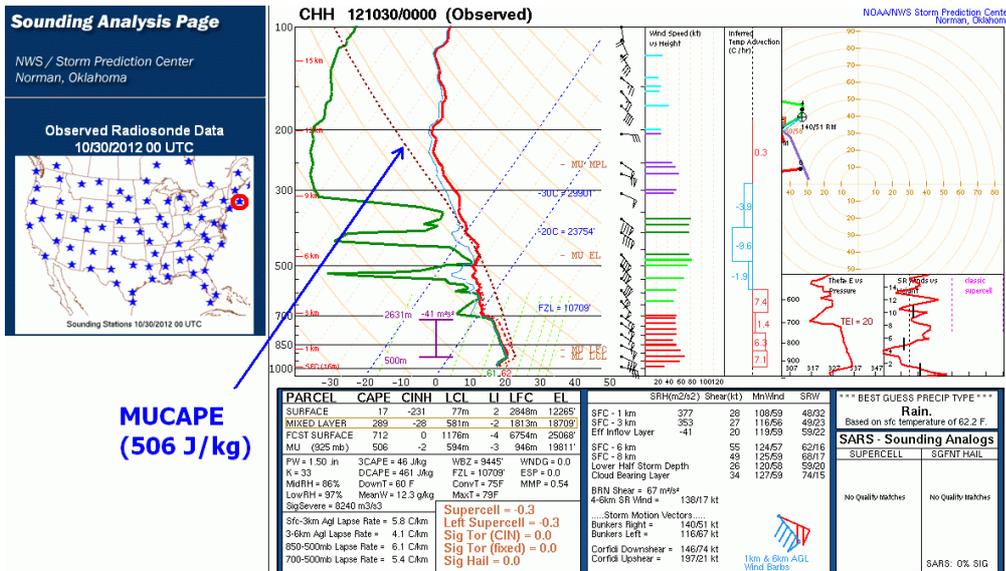


Abb.11: Sondenaufstiegsanalyse von Chatham. Quelle: <http://www.spc.noaa.gov/exper/soundings/>

Tatsächlich wurden vom SPC (Storm Prediction Center) nur am **30. Oktober 2012, zwischen 23.55 und 00.30 UTC**, konvektiv-verursachte Unwetter registriert, und zwar ausschließlich im Bundesstaat Massachusetts mit einem Report über **Hagel von 2,5 cm Größe** und mehreren **geradlinigen** Windereignissen (keine Angabe der Stärke). Tornados wurden bisher noch keine registriert.

Betrachten wir uns den Aufstieg von Chatham (Massachusetts) in Abb. 11 genauer: Im instabilsten Aufstieg (blauer Pfeil) beträgt der CAPE immerhin rund 500 J/kg, dessen Kurve reicht dann bis 500 hPa hinauf. Der kräftige Auftrieb wird durch die Scherung dynamisch verstärkt, der große Hagel also durchaus plausibel.

Für kräftige Windböen spricht neben dem DCAPE > 400 J/kg ohne Zweifel die hohe Umgebungsscherung - bereits am Boden herrschen zum Zeitpunkt des Aufstiegs 35 Knoten Wind vor.

Gegen Tornados spricht die **stabile bodennahe Schichtung**, die starken Auftrieb in Bodennähe verhindert. Damit kann ein Aufwind auch nicht von der starken bodennahen Scherung (Generierung horizontaler Vorticity durch Reibung) profitieren, da er im instabilsten Fall oberhalb der stabilen Schicht beginnt.

Gewitter gab es allerdings nicht nur in Massachusetts, sondern von Connecticut über New York bis in die südlichen Provinzen Kanadas:

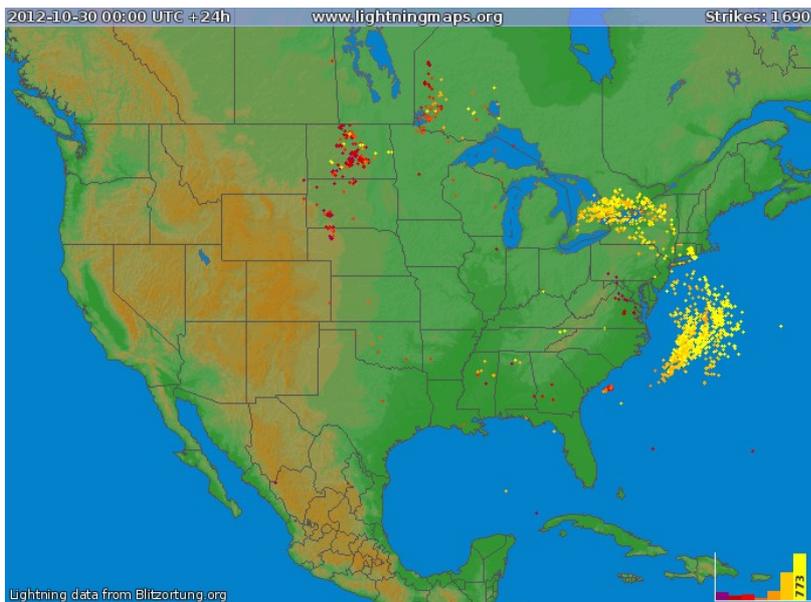


Abb.12: Blitzeinschläge zwischen 30. und 31.10.12 über Nordamerika.

Quelle: <http://www.lightningmaps.org/>

Die meisten Gewitter im Binnenland gab es zwischen 30.10.,18 UTC und 31.10, 00 UTC.

Aufklärung darüber bringt ein repräsentatives Wasserdampfbild:

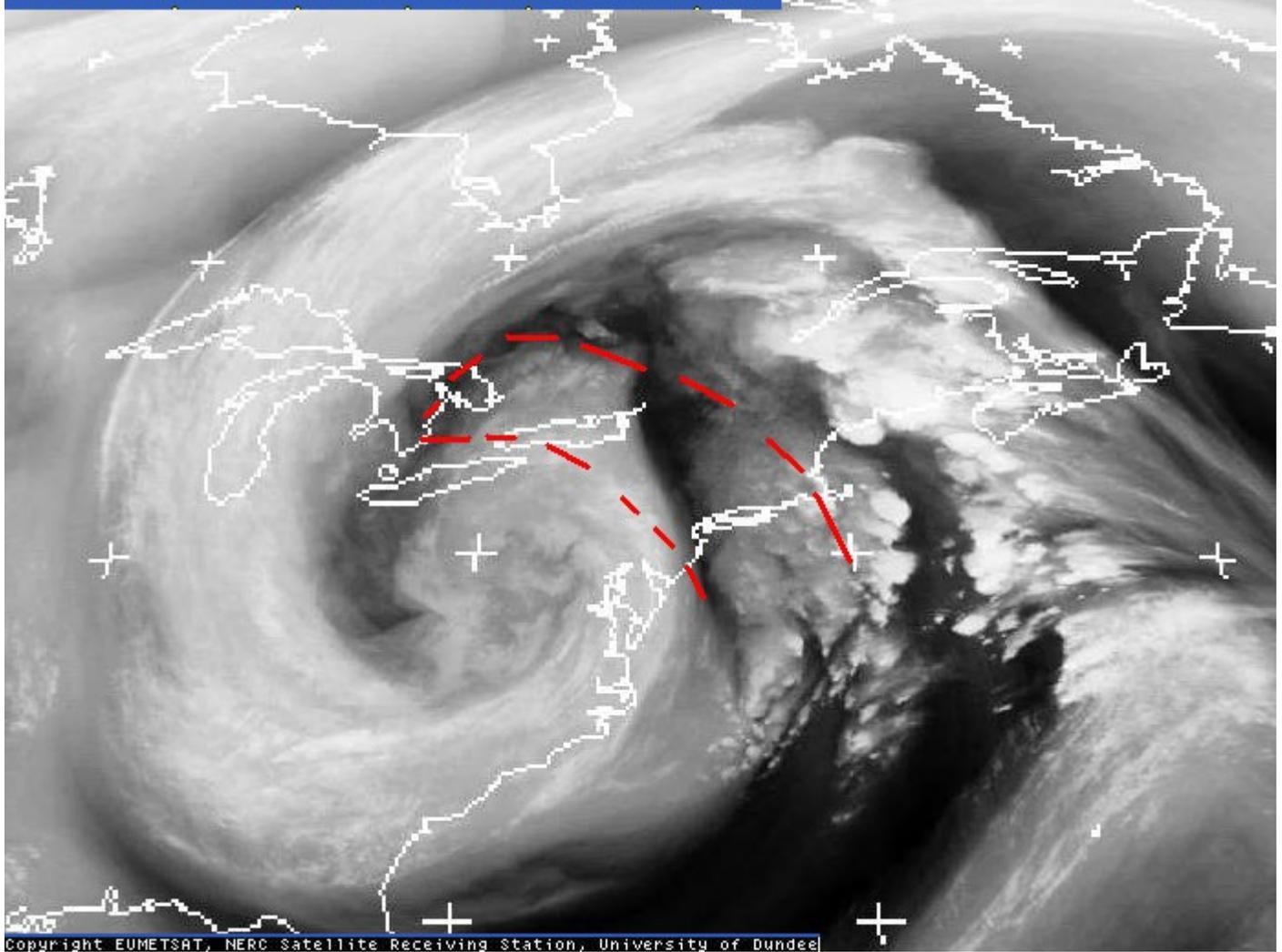


Abb.13: Wasserdampfbild der University of Dundee am 30.10.12, 21 UTC

Quelle: <http://www.sat.dundee.ac.uk/>

Zum Zeitpunkt von Abbildung 12 ist SANDY bereits im fortgeschrittenen Stadium der außertropischen Umwandlung mit eingerollter Okklusionsfront. Entscheidend für die Gewitter im Binnenland ist eine **Dry Intrusion**, also das Herabströmen trockener Luft aus der oberen Troposphäre bzw. unteren Stratosphäre, die sich über die feuchtwarme Bodenluft schiebt und potentielle Instabilität hervorruft (vgl. Chatham). Weiter westlich und südlich war die Dry Intrusion zu schwach bzw. die Stabilität zu groß, um Gewitter zu ermöglichen.

Fazit: Für Gewitter waren die Bedingungen dank einer Dry Intrusion auch im Festland ausreichend, für Tornados reichte es aufgrund der bodennah stabilen Luftschichtung jedoch nicht.

2.5 Satellitenbilder

Ich beschränke mich hier auf die Wasserdampfbilder, da sie den Umwandlungsprozess in ein außertropisches Sturmtief am besten zeigen. Serie 1 zeigt das Anfangsstadium mit der Verlagerung über die Karibik hinweg, Serie 2 das Zwischenstadium mit Tendenzen zu einem Subtropensturm (asymmetrisches Wolkenbild) und Serie 3 den Übergang zu einem Sturmtief bei gleichzeitigem

Landfall. Die Quelle ist in allen Fällen wie bei Abbildung 10.

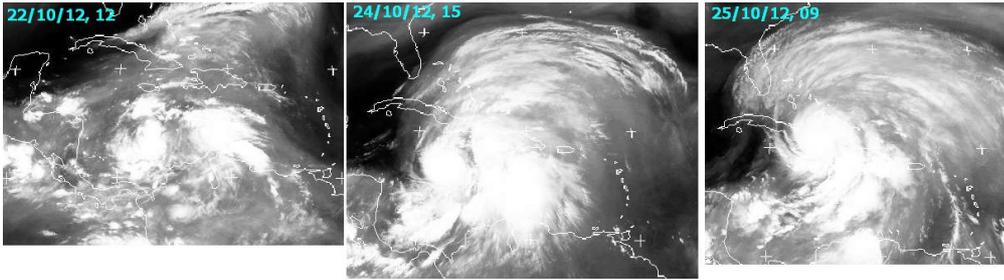


Abb. 14: Von der ersten Benennung zum Tropensturm (22.10.12, 12 UTC) bis zum ausgewachsenen Hurrikan (25.10.12, 09 UTC). Auffallend ist die Ausdehnung des Tropensturms, wobei vor allem die Outflowbänder (in der Höhe) weit nach Norden ausgeweitet sind.

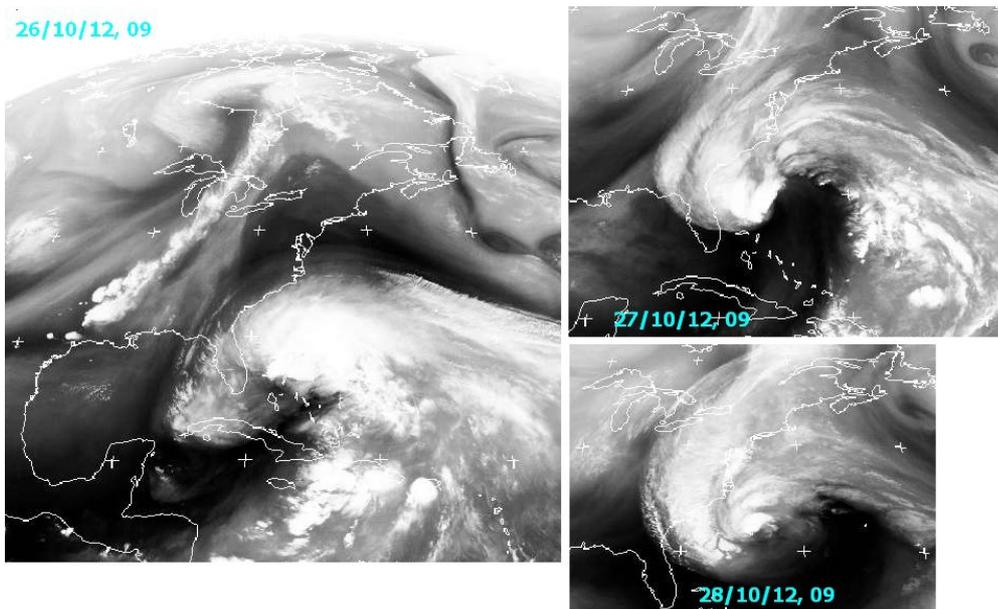


Abb.15: Am 26.10., 09 UTC, erreicht SANDY seine größte Ausdehnung und beeinflusst bereits die Küstenregionen Floridas und Carolinas. Über Kanada sieht man gleichzeitig das Sturmtief, dessen Kaltfront über die Großen Seen fast bis zum Golf von Mexiko reicht. Dahinter strömt trocken-kalte Kontinentalluft ein. Bei der weiteren Verlagerung von SANDY ist von dieser Kaltfront nichts mehr zu erkennen, dafür nimmt SANDY erstmals ein asymmetrisches Aussehen an. Um das Zentrum angeordnete Konvektion fehlt, ausgeprägt ist nur der Outflow in den westlichen Quadranten des Sturms. Das feuchte Band an tropischer Warmluft, das bis hierhin SANDY genährt hat, wird immer schmaler.

But he was asking how its possible for the pressure **to fall in the absence of t-storm activity**? Surface pressure falls occur from upper divergence...a tropical cyclone does this by latent heat release driven upper anticyclone...a non-tropical system does this by tapping into split flow or accelerational divergence east of an upper trough or along a jet stream..Sandy is doing more of the non-tropical method which is why she's down to 969 mb

Quelle: <http://www.wunderground.com/blog/JeffMasters/>

Hier wird sehr schön erklärt, weshalb sich SANDY trotz fehlender Gewitteraktivität weiter vertiefen konnte, nämlich durch den Höhentrog und Höhendivergenz, und nicht mehr durch ein

Höhenhoch (was auch die 500 hPa-Karten belegen). Die überdurchschnittlichen SST haben diesen Prozess unterstützt.

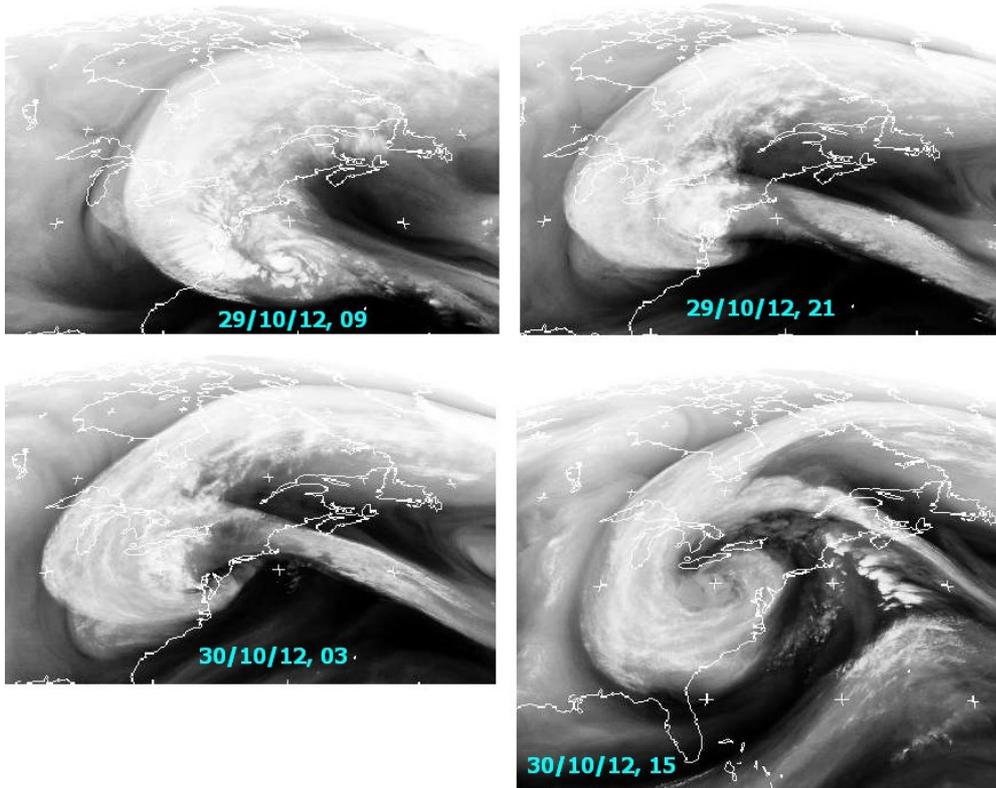


Abb.16: Die letzten 4 Wasserdampfbilder haben mit dem, was man sich unter einem Tropensturm vorstellt, nichts mehr gemeinsam. Besonders am 29. Oktober verlagert sich SANDY rasch westwärts, was exakt mit der Vertiefung durch den Höhentrog zusammenfällt. Auch wenn das System insgesamt riesig aussieht, ist der Hurrikanwirbel synoptisch-skaliert kleiner als der Trog in der Höhe.

Der größere Wirbel steuert immer den kleineren.

So lautet eine synoptische Regel. SANDY gerät folglich in die östliche Höhenströmung an der Trogvorderseite und wird westwärts getrieben. Die "Nabelschnur" SANDYs, das schmale feuchte Band im Wasserdampfbild, verliert den Kontakt zum Tiefdruckkern, dafür wird nördlich und südlich davon sehr trockene Luft in das System einbezogen. Am 30. Oktober 2012, 03 UTC (links unten) ähnelt SANDY mehr einer Qualle als einem kreisrunden Sturm. Zwölf Stunden später entsteht dort, wo zuvor sehr feuchte Luft vorhanden war, hochreichende Quellbewölkung mit Schauern und Gewittern.

SANDY dreht sich immer mehr ein - was zumindest auf dem Festland zunächst fehlt, sind Warm- und Kaltfronten. Hier dominiert der **Okklusionscharakter**, der auch für die kräftigen Regen- und Schneefälle sorgt. Erst in weiterer Folge bilden sich durch die zunehmende Baroklinität des Systems mit Warmluftadvektion nach Kanada und Kaltluftadvektion auf den Atlantik hinaus Fronten aus.

2.5.1 War ein sting jet beteiligt?

In einem amerikanischen Blog wurde die Vermutung aufgestellt, dass ein sting jet für die kräftigen

Windböen nördlich des eigentlichen Tiefdruckkerns verantwortlich war:

GFS simulating a type of "hybrid" sting jet on the northern edge, devastating given its forward speed to the west. Sting jets are incredible wind machines in warm seclusion type events, incredibly rare if not unheard of on east coast. In this case a non-direct hit for those locations north of the cyclone center would be hit hardest. Bloomberg would eat his words.

Quelle: <http://www.wunderground.com/blog/JeffMasters/>

Die [Wasserdampf- und Infrarotsatellitenfilme](#) legen die Vermutung nahe, dass beim Landfall ein sting jet existiert hat - bereits nach dem Überqueren der Karibischen Inseln wurde massiv trockene Luft ins System gepumpt. Beim Landfall dehnte sich der Dryslot bis zur Spitze der Okklusion aus, allerdings waren die Spitzenböen durch den sting jet deutlich schwächer als direkt an der Küste.

Unabhängig von der Präsenz eines sting jets dürfte die Entwicklung der markanten Dry Intrusion eine wichtige Rolle beim Fortbestand der Zyklone gespielt haben.

3. Phasendiagramme

Phasendiagramme werden eingesetzt, um die Entwicklung eines Tropensturms oder außertropischen Tiefs vorherzusagen - und zwar im Hinblick auf die Symmetrie und vertikale Ausdehnung des Sturms. Je symmetrischer und wärmer ein Tiefdruckgebiet, desto mehr tropische Eigenschaften besitzt es und desto größer sind die Unsicherheiten bei der Vorhersage.

Detaillierte Erklärungen finden sich auf der [Hilfeseite der Phasendiagramme](#).

Hier handelt es sich um AMSU-Daten (Advanced Microwave Sound Unit), ein Strahlungsmessgerät, das von einem Wettersatelliten Temperatur und Feuchte misst.

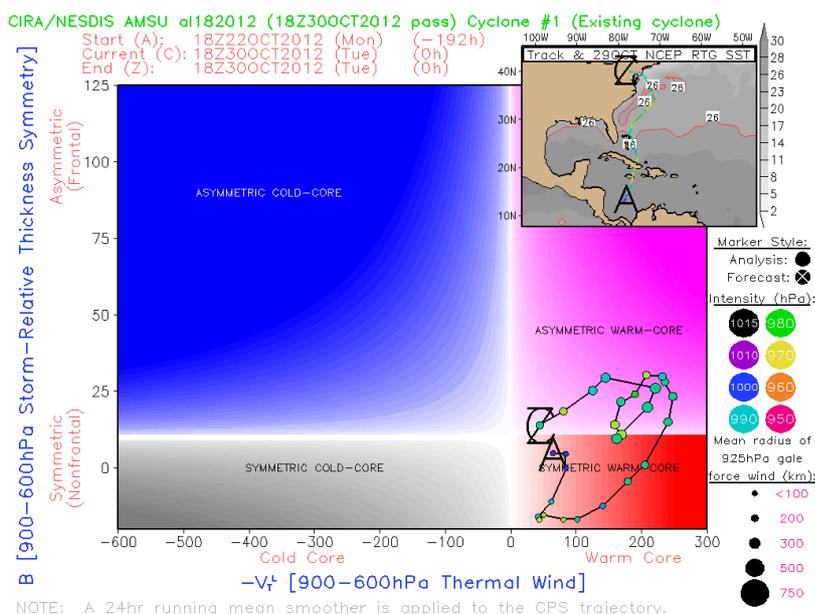


Abb.17: Symmetrie von SANDY

Abbildung 17 zeigt die Entwicklung der Symmetrie von Sandy. Zu Beginn (A) sowie über der Karibik handelte es sich um einen reinrassigen Tropensturm mit einem symmetrischen warmen

Kern. Etwa nördlich der Bahamas wandelte sich der Tropensturm in einen asymmetrischen Sturm um, auch erkennbar anhand der Satellitenbilder (Abb 15 und 16). Dabei blieb es auch bis zum Landfall, wobei der Sturm sich einem "cold-core low" näherte, dass Umwandlungstendenzen begannen.

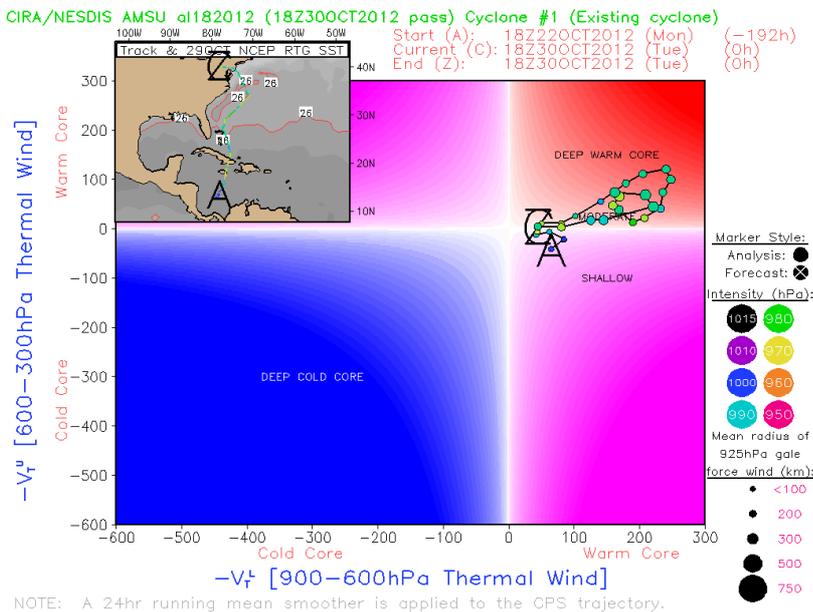


Abb.18: Vertikale Ausdehnung von SANDY

Betrachtet man die vertikale Ausdehnung des Sturms (Abb.18), so zeigt SANDY keine außergewöhnliche Entwicklung. Es handelt sich durchwegs um einen warmen, in der Lebenszeit als Hurrikan um einen hochreichend warmen Kern.

Fazit: Dass SANDY ein Hurrikan war, ist aufgrund der Phasendiagramme belegt. Die Asymmetrie vor dem Landfall erklärt zumindest die unterschiedlichen Ansichten der Meteorologen, SANDY als Tropen- bzw. Subtropensturm einzustufen. Die nichtlinearen Eigenschaften in diesem Stadium zeigen die schwierige Vorhersagbarkeit der Intensität SANDYs, dessen Kerndruck phasenweise bis zu 20 hPa überschätzt wurde.

4. Zusammenfassung und (vorläufige) Bilanz (Stand, 2.11.2012)

In der Karibik hat Hurrikan SANDY über 65 Todesopfer verursacht, mehr als 200 000 Menschen sind direkt betroffen, wobei Haiti nach wie vor unter den Folgen des Erdbebens im Jahr 2010 leidet, weshalb mehrere Hunderttausend in Notunterkünften leben müssen. Durch die tagelangen Überschwemmungen droht der Ausbruch von Seuchen und Ernteaussfällen.

In den USA und Kanada sind bisher über 90 Tote zu beklagen, die New Yorker U-Bahn erlebte die schlimmste Katastrophe ihrer 108-jährigen Geschichte. In Manhattan wurde mit einem Wasserstand von 4,30 m über dem mittleren Hochwasser der alte Rekord aus dem Jahr 1823 (4,23 m) übertroffen. Spitzenreiter bei den Regenfällen war Wildwood Crest im Bundesstaat New Jersey mit 300 l/m². An der Küste betrug die Spitzenböen 160-180 km/h, selbst in New York wurden 150 km/h registriert. Auch der Kerndruck von 937 hPa (offiziell: 940 hPa) stellt einen neuen Rekord für

die Region dar.

Immerhin haben Hochwasser und Stromausfälle in 4 Atomkraftwerken zu Notabschaltungen geführt - Erinnerungen an Fukushima wurden wach.

Bemerkenswert war darüber hinaus ...

- Ausdehnung des Tropensturms bei Landfall (schwache Intensität, aber große Fläche betroffen)
- Einbezug kontinentaler Kaltluft mit Blizzard-Bedingungen
- Späte Jahreszeit für einen Hurrikan
- Umwandlung über der US-Ostküste
- 3-4 K überdurchschnittliche Meeresoberflächentemperaturen
- Fehlendes "recurvature" (Abdrehen nach Nordosten) durch blockierendes Neufundlandhoch

Erst die Summe **aller** Faktoren hat daraus so einen schadensträchtigen Hurrikan für die USA gemacht.

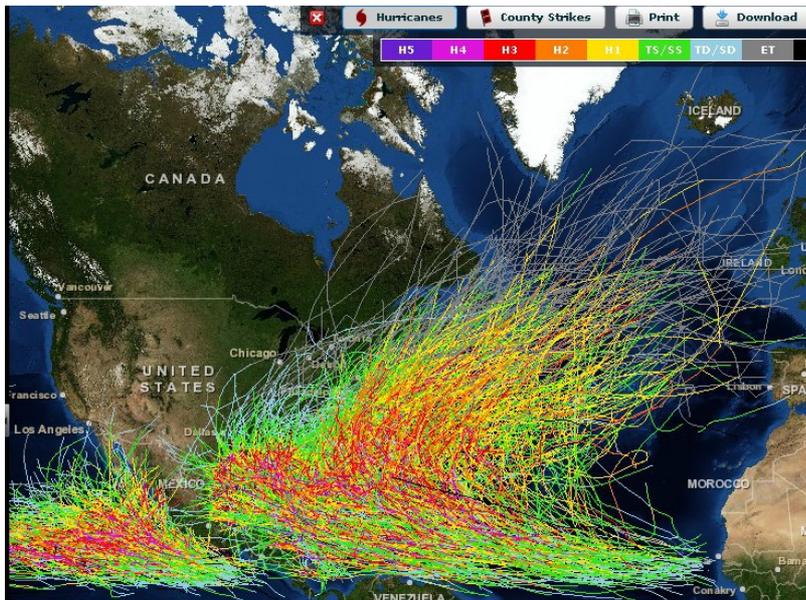
Ohne zu übertreiben kann man behaupten, dass die Begleitumstände dieser ET außergewöhnlich waren, womit ich auch die Amerikaner etwas in Schutz nehmen möchte - von wegen, diese Katastrophe hätte verhindert werden können. Natürlich lässt sich an den Präventivmaßnahmen etwas optimieren, was z.B. Hochwasser- und Sturmflutschutz betrifft, aber auch die Sicherheitsstandards in den maroden Atomkraftwerken und das ebenso marode Stromnetz.

Verbesserungsbedarf ist immer vorhanden, das wissen wir Europäer spätestens seit der Sturmflut in Hamburg 1962 oder seit der Augustflut 2002 - aber eben erst **seitdem**.

5. Ist Sandy ein Bote des Klimawandels?

Viele werden sich fragen, ob Hurrikan SANDY der erste Sturm dieser Intensität war, der auf die US-Ostküste traf.

Dies kann man definitiv verneinen - indem man dieses tolle Werkzeug der NOAA über historische Hurrikan-Zugbahnen zu Rate zieht:



<http://maps.csc.noaa.gov/hurricanes/#app=f64a&3722-selectedIndex=1>

Abb.19: Historische Zugbahnen von Tropenstürmen seit Beginn der Aufzeichnungen (1842)

Quelle: <http://maps.csc.noaa.gov/hurricanes/>

Seit Beginn der Aufzeichnungen haben 38 tropische Systeme (extratropische Stürme, Tropenstürme, Hurrikane) den Großraum New York getroffen, jedoch erreichte nur 1 Sturm (Hurrikan GLORIA 1985) dabei Kategorie 2. Die Fälle verteilen sich über das ganze Jahrhundert, wobei vor 1960 keine Satellitenaufzeichnungen vorhanden sind, und daher auch nicht abschätzbar ist, welche Kategorie dicht vorbeiziehende Stürme auf dem Meer hatten.

Allerdings lässt sich SANDY zum Zeitpunkt des Landfalls nicht mehr klar als Kategorie-1-Hurrikan einordnen, da zu diesem Zeitpunkt bereits die Umwandlung in ein extratropisches Tief eingesetzt hat. Die Statistik der Hurrikane wird also dem Wesen dieses Sturms nicht gerecht.

Der WFF konstruiert außerdem einen Zusammenhang zwischen Meereisreduktion in der Arktis und dem (ungewöhnlichen) Westkurs des Tropensturms.

Zusätzlich wurde der Westkurs des Supersturms durch eine Hochdruckwetterlage beeinflusst, die auf das stark verringerte Meereseis in der Arktis zurückzuführen ist.

Quelle: <http://kurier.at/nachrichten/4517695-wwf-sandy-durch-klimawandel-gedopt.php>

Abb. 20 - Zugbahnen der Tropenstürme 2012 - Quelle:

<http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/2012/index.php>

Abbildung 20 zeigt die bis 31.10.2012 registrierten Tropenstürme auf dem Atlantik, wo Hurrikan SANDY durch den Kurs nach Norden aus der Reihe tanzt. Insbesondere die scharfe Kurve nach Nordwesten ist in der Tat ungewöhnlich und entspricht weder der üblichen Zugbahn im Jahr 2012 noch seit Beginn der Aufzeichnungen (Abbildung 19).

Zweifelloos wurde der Westkurs des Tropensturms durch die Hochdrucklage über Neufundland erzwungen (vgl. Abbildung 6-8). Die "Geschichte" dieses Hochdruckgebiets zeigt jedoch, dass das über Kanada ziehende Sturmtief für die Hochdruckentwicklung verantwortlich war. An seiner

Trogvorderseite wird Warmluft advehiert, Geopotential aufgebaut, eine **Rossby-Welle** induziert. Das höhen**warme** Hoch blockiert den Tropensturm, während das boden**kalte** Hoch über dem nordamerikanischen Kontinent dem Tropensturm nicht im Weg steht.

Was hat das aber mit dem verringerten Meereis in der Arktis zu tun?

||| Spekulation: |||

Es wird vermutet, dass sich die Meereisreduktion in der Arktis auf die Verteilung der Rossby-Wellen auswirkt, indem ein **negativer NAO-Index** (North Atlantic Oscillation) gefördert wird (Verringerung horizontaler Temperaturkontraste, Meridionalisierung der Strömung). So ist durchaus möglich, dass durch die Meereisreduktion ein so "unwahrscheinlicher" Fall einer Blockade bei gleichzeitigem Nordkurs eines Hurrikans *wahrscheinlicher* geworden ist.

Wir kennen jedoch die **externen Faktoren** nicht, und werden erst in einigen Jahren sagen können, ob tatsächlich über längere Zeit ein negativer NAO-Index eintreten wird. Ein statistisch signifikanter Zeitraum sind wenigstens 30 Jahre, womit sich die Diskussion zunächst erübrigt.

Das bedeutet im Umkehrschluss nicht, dass wir in dieser Zeit *business as usual* nachgehen sollen!

1. Es ist sehr wohl erforderlich, aus solchen Extremereignissen zu lernen und für Wiederholungsfälle besser gewappnet zu sein. Damit lassen sich Menschenleben retten und Schäden minimieren (humanes und wirtschaftliches Interesse)
2. Selbst wenn SANDY kein Produkt des Klimawandels ist, ist das kein Beweis des Nichtvorhandenseins des Klimawandels.
3. Meeresspiegelanstieg und steigende Wassertemperaturen sind ein Produkt des Klimawandels, und da hat der Mensch einen Anteil daran.

Erschwerend kommt hinzu, dass Tropensturm SANDY nur durch die ET so einen niedrigen Kerndruck erreichen konnte. Die ET ist jedoch nicht eine Sache des Klimawandels, sondern von synoptisch-skaligen Prozessen abhängig. Die markante Asymmetrie des Sturms vor dem Landfall zeigt, dass der Einfluss der Scherung durch die Hebung aus der Trogvorderseite überkompensiert wurde. Tropische Prozesse (Konvektion) schwächelten, dafür verstärkte sich der Druckfall durch QG-Prozesse.

Fazit:

Gegenwärtig komme ich zu dem Schluss, dass die überdurchschnittlichen SST ein Resultat des Klimawandels sind, und diese die Intensität des Sturmtiefs - ob tropisch oder außertropisch - beeinflusst haben. Ob das Neufundlandhoch ebenfalls eine Folge des Klimawandels war oder bloß ein dummer Zufall, lässt sich meines Erachtens jetzt noch nicht sagen.

6. Quellen

- Abb.1, 6-8: www.wetter3.de
- Abb.2-4: <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>
- Abb.5: <http://www.noahs.noaa.gov/nsa/>

- Abb.9: <http://weather.unisys.com/archive/sst/>
- Abb.10: <http://water.weather.gov/precip/>
- Abb.11: <http://www.spc.noaa.gov/exper/soundings/>
- Abb.12: <http://www.lightningmaps.org/>
- Abb.13-16: <http://www.sat.dundee.ac.uk/>
- Abb.17-18: <http://moe.met.fsu.edu/cyclonephase/>
- Abb.19: <http://maps.csc.noaa.gov/hurricanes/>
- Abb.20: <http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/2012/index.php>

Weitere Informationen wurden folgenden Webseiten entnommen:

- **National Hurricane Center:** <http://www.nhc.noaa.gov/>
- **Atlantic Hurricane Tracking:** <http://www.hurricanezone.net/atlantic/satellite.html>
- **CIMSS Tropical Cyclones:** <http://tropic.ssec.wisc.edu/>
- **CIRA's AMSU Website:** <http://amsu.cira.colostate.edu/>
- **Wikipedia zu AMSU:** http://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Microwave_Sounding_Unit