

Source:
Hurricane Harvey: Harris County Sheriff Office Texas Air Support Aerial
View on 30 August 2017 - <https://www.weather.gov/hgx/hurricaneharvey>

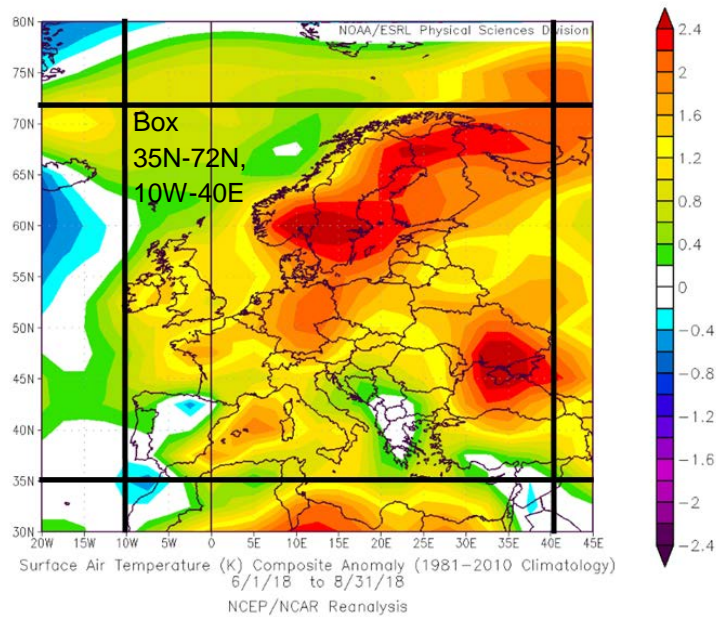
An aerial photograph showing extensive flooding in a suburban or industrial area. Several multi-lane highways are visible, with water rising to the level of the roadways. Large commercial buildings with flat roofs are partially submerged. The surrounding landscape is a mix of green trees and grey pavement, all under a heavy, overcast sky.

Hat der menschengemachte Klimawandel Anteil an einem Extremereignis?

Eberhard Faust
Forschungsleiter Klimarisiken und Naturgefahren, Munich Re
13. September 2018

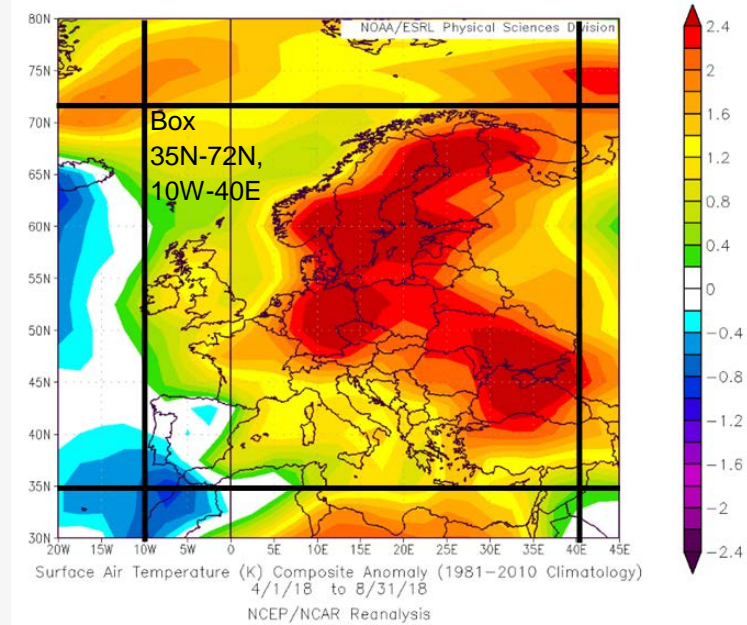
Extreme Sommerhitze im Norden Europas 2018

Abweichungen Tagesmitteltemperaturen **Sommer Juni-August 2018** von Referenzperiode 1981-2010



Abweichung von **+1,20 K** in Box ist zweitgrößter Wert nach 2010 (+1.375 K)

Abweichungen Tagesmitteltemperaturen **April - August 2018** von Referenzperiode 1981-2010



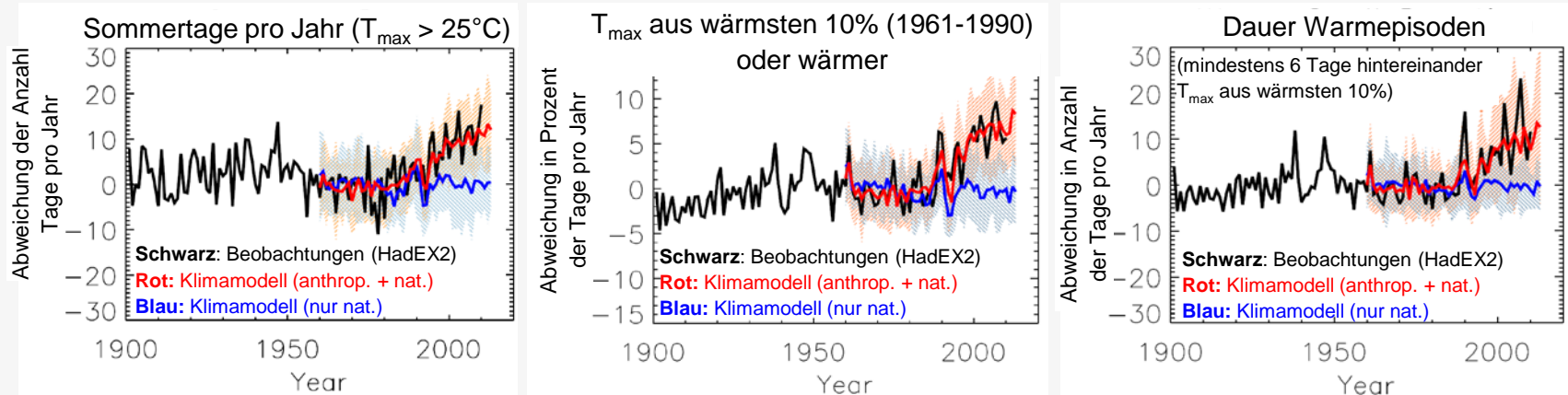
Abweichung von **+1,47 K** in Box ist bei weitem größter Wert, gefolgt von 2010 (+0.99 K)

Extreme Sommerhitze im Norden Europas 2018

- IPCC, Fünfter Sachstandbericht, 2013, Working Group I, Kapitel 10 Detection and Attribution...

“In summary, increasing numbers of studies are finding that the probability of occurrence of events associated with extremely high temperatures has increased substantially due to the large-scale warming since the mid-20th century. [...] **We conclude that it is *likely* that human influence has substantially increased the probability of occurrence of heat waves in some locations.**”

- Für Europa und Definitionen von Temperaturextremen: *Christidis und Stott, 2016*:



- Erste Untersuchung zur **kausalen Verbindung** von **anthropogenem Klimawandel** und **Wahrscheinlichkeit der Hitze im Norden 2018**: World Weather Attribution, July 2018

Einschränkung: **noch nicht begutachtet** (da sehr zeitnah erstellt, gleichwohl von Fachleuten erstellt).

Betrachtete Periode: ~Mai – Juli.

Ereignisdefinition: T_{\max} , gemittelt über drei Tage.

Regionaler Fokus: nördliches Europa, dort individuelle Orte mit langen Beobachtungszeitreihen (Dublin/Irland, De Bilt/Niederlande, Copenhagen/Dänemark, Oslo/Norwegen, Linköping/Schweden, Sodankyla/Finland, Jokioinen/Finland)

Ergebnisse:

Wiederkehrperioden der beobachteten Hitze ca. **10 Jahre** im südlichen Skandinavien und Irland

Einschätzung aus Klimamodellen und Beobachtungen: Wahrscheinlichkeit einer solchen Temperatursprägung ist durch den Klimawandel mindestens **verdoppelt** gegenüber einer Welt ohne Klimawandel.

- **Frage: Wie kommt man zu solchen Ergebnissen, also einer kausalen Verbindung mit Antrieben, die Wahrscheinlichkeiten für Extremereignisse ändern können?**

Es geht um Verteilungen von Wettervariablen.....

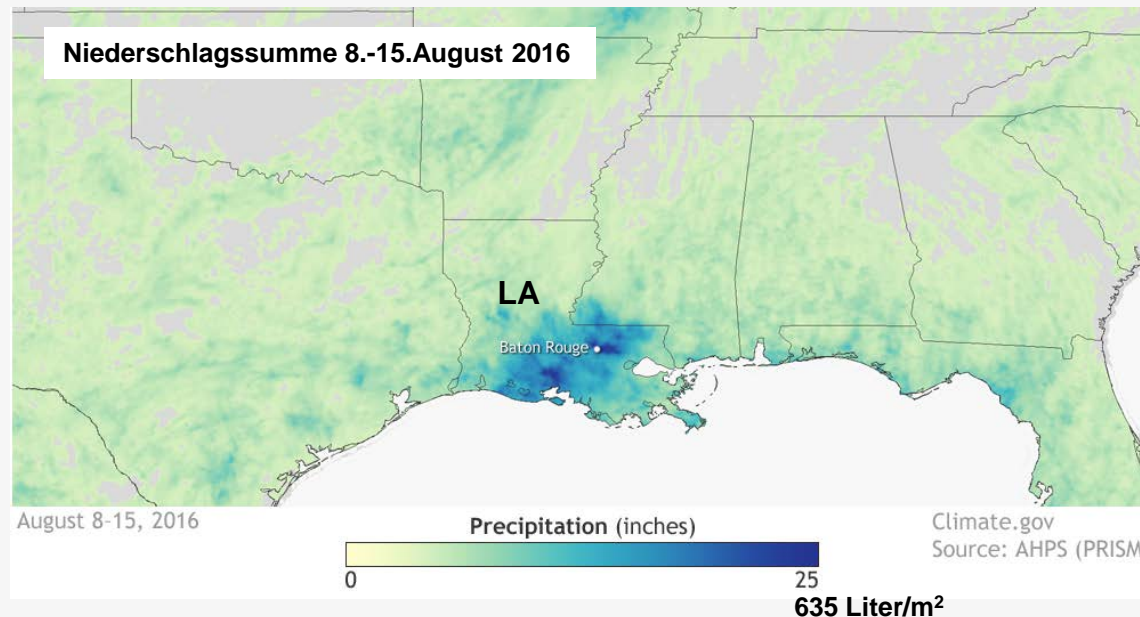
- Im Fokus: Meist extreme **Wetterwirkungen** i.S.v. **Naturkatastrophen**, nicht extreme Ausprägungen von Wettervariablen per se. Doch Naturkatastrophen oft von meteorologisch extremen Ereignisausprägungen ausgelöst.
- Stets zwei Schritte: (1) **Detektion** einer relevanten Änderung, (2) **Ursachenzuordnung**
 - **Detektion:** Nachweis, dass sich das Klima oder ein vom Klima betroffenes System in statistisch definierter Weise geändert hat. Der Einfluss interner Variabilität sollte unwahrscheinlich sein; keine Ursachenanalyse.
 - **Ursachenzuordnung:** Bestimmung der relativen Anteile von kausal antreibenden Faktoren der Änderung, z.B. natürliche Antreiber (von „extern“) vs. menschengemachte Antreiber (von „extern“) vs. interne Variabilität im Klimasystem (von „intern“), mit Zuordnung statistischer Konfidenz.
- Klimawandel-Einfluss **nie** für **einzelnes Extremereignis** nachweisbar! Vielmehr: Es liegt immer die **Veränderung von Eigenschaften der Verteilung** eines ereignisbestimmenden meteorologischen Parameters (z.B. Temperatur oder Niederschlag) in definierter Region und Saison zugrunde. Also: **Beobachtung vieler Ereignisse** über zwei zu vergleichende Perioden, oder bei der Trendanalyse, über eine ausreichend lange Periode.

Es geht um Verteilungen von Wettervariablen.....

- Häufig ein „**Mehrschritt-Verfahren**“ der Detektion/Ursachenzuordnung, d.h.:
Weil **extreme (=seltene)** Ereignisse von Interesse
→ Beobachtungen/Klimamodellergebnisse liefern nicht ausreichende Stichprobe extremer Ausprägungen
→ „zweiter Schritt“ durch Anpassung eines mathematischen Verteilungsmodells für extremen Bereich (“tail“) notwendig.
- Doppelschritt aus Detektion und Ursachenzuordnung
→ führt auf Erkenntnis, um wieviel sich die **Überschreitungswahrscheinlichkeit einer beobachteten extremen Ereignisausprägung** aufgrund des ursächlichen Änderungsantriebs über die Zeit geändert hat.
- Der Klimawandel kann also vor allem insofern Anteil an einem Extremereignis haben, als er die **Überschreitungswahrscheinlichkeit für extreme Ereignisausprägungen gegenüber einer Situation ohne diesen Einfluss verändert hat**, indem sich Verteilungseigenschaften von Ereignisklassen wie Temperatur oder Niederschlag über die Zeit geändert haben.

Überschwemmungen Louisiana/USA, August 2016 - Beispiel für das Verfahren

- **Ereignis:** stationäres Tiefdruckgebiet im August 2016 über US-Küste des Golf von Mexiko (GoM), produziert ab 10.August erhebliche Niederschlagsmengen in Louisiana.
Extreme 3-Tage-Niederschlagssumme bei Baton Rouge 12.-14.August 2016 : **648 mm/3-Tage**.
Folge: Sturzfluten, Flussüberschwemmungen, **Gesamtschaden: 10 Mrd. USD**.



Quelle:
<https://www.climate.gov/news-features/event-tracker/august-2016-extreme-rain-and-floods-along-gulf-coast>

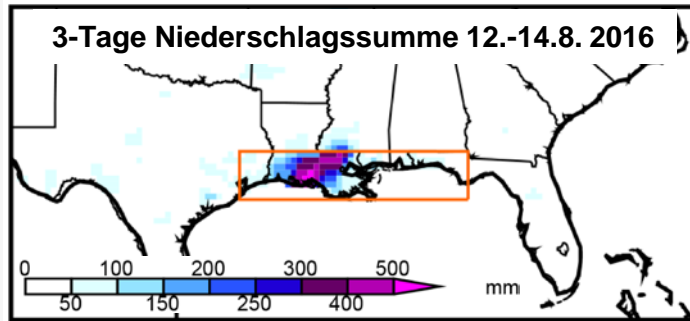
Überschwemmungen Louisiana/USA, August 2016 - Beispiel für das Verfahren

- **Motivation:** Falls anthropogener Klimawandel Niederschläge am GoM verstärkt hat:
 - zukünftig **mehr Ereignisse dieser Amplitude** zu erwarten (sofern keine Erkenntnis über eine dem entgegen gerichtete Nicht-Linearität des Prozesses) .
 - **Anforderungen an behördliches Risikomanagement** anders als bei außergewöhnlichem Einzelereignis ohne kontinuierliche Änderungsdynamik.
 - Wenn Einfluss des anthrop. Klimawandels **möglichst bald** nach Ereignis aufweisbar, dann größter **Impuls für adäquate Anpassungsmaßnahmen** auf Seiten kommunaler Verwaltungen.
- **Individuelles Extremereignis (EE):** räumlich und zeitlich punktuelle und individuelle Ausprägung (im Unterschied zu Größen wie globale Mitteltemperatur)
 - EE können hinsichtlich meteorologischer Einzelursachen und ihres Ablaufs als **Unikate** gelten
 - Aufschluss über **Häufigkeiten** und deren *Änderung im strengen Sinne* nicht möglich.
- Ausweg: **Abstraktion**, d.h. Subsumierung aller Ereignisse mit Niederschlag in der Region GoM unter Absehung vom individuellen Mechanismus in Klasse „Niederschlagsereignisse“.
[statistisch zu überprüfen, ob sich daran eine (Extremwert-)Verteilung sinnvoll anpassen lässt.
Argument pro: sehr homogene Verteilung jährlicher 3-Tage-Niederschlagsmaxima aus 1948-2015 in der Region GoM]

Überschwemmungen Louisiana/USA, August 2016 - Beispiel: Studie van der Wiel et al., 2017

➤ Ereignisdefinition:

Jährlicher maximaler 3-Tage-Stations-Niederschlag (gemittelt als Niederschlagsmenge/Tag) innerhalb des zentralen GoM-Abschnittes [29° - 31° N, 85° - 95° W]



➤ Änderungsdetektion aus der Beobachtung:

Wetterstationsdaten [Minimum 80 Jahre zurückreichend] 1930-2016:

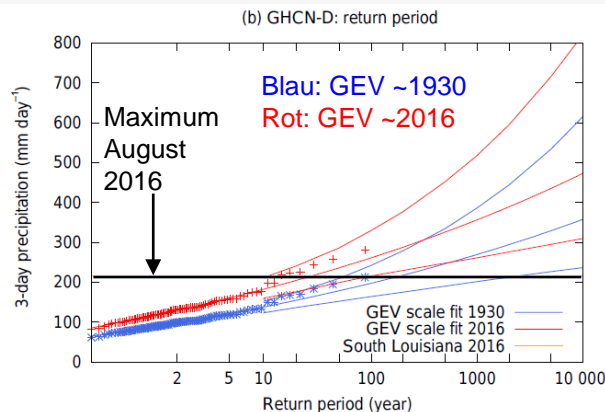
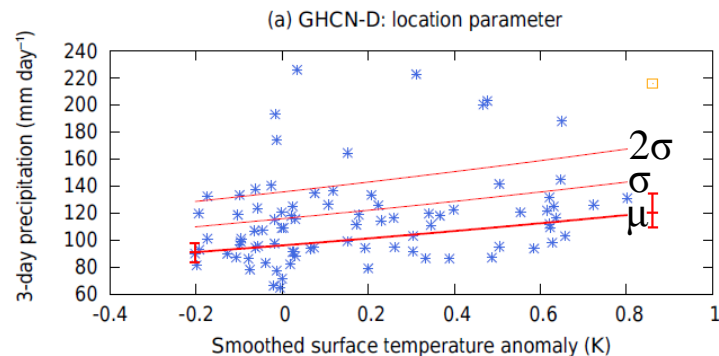
Maximaler 3-Tage-Stationsniederschlag je Jahr und Region

Annahme: „pattern scaling“, d.h. maximaler Niederschlag in der Region skaliert (letztlich) gemäß Clausius-Clapeyron mit der Umgebungstemperatur und diese mit der globalen Mitteltemperatur.

→ Wahl einer Generalized Extreme Value (GEV) Verteilung mit glob. Mitteltemperatur als Kovariate

Überschwemmungen Louisiana/USA, August 2016 - Beispiel: Studie van der Wiel et al., 2017

➤ Änderungsdetektion aus der Beobachtung (Variable: Regionales Jahresmaximum):



$$F(x) = \exp \left[- \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{\frac{1}{\xi}} \right], \quad T': \text{geglättete globale Mitteltemperatur}$$

$$\mu = \mu_0 \exp \left(\frac{\alpha T'}{\mu_0} \right),$$

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left(\frac{\alpha T'}{\mu_0} \right),$$

μ : Lokationsparameter

σ : Skalenparameter

ξ : Gestaltparameter

$\sigma / \mu = \sigma_0 / \mu_0 = \text{const.}$

Fit durch Maximum-Likelihood-Methode, wobei α , μ_0 , σ_0 , und ξ variiert werden.

Verfahren:
GEV Verteilung aller regionalen Jahresmaxima kann skaliert werden auf Niveau der glob. Mitteltemperatur:
(a) im Jahr 1930
(b) im Jahr 2016

Ergebnis:
Wiederkehrperiode (WKP)
August 2016:
~ 30 Jahre (11-110)
Änderung gegenüber WKP 1930:
Faktor ~6 (2.1-50)

Überschwemmungen Louisiana/USA, August 2016 - Beispiel: Studie van der Wiel et al., 2017

➤ **Ursachenzuordnung („attribution“) für die Wahrscheinlichkeitsänderung:**

Verwendung von 2 Klimamodellen **FLOR-FA** und **HiFLOR** ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$ und $0,25^\circ \times 0,25^\circ$) der NOAA (GFDL). Statistische Überprüfung der Reproduktion extremer Niederschläge, Bias-Korrekturen wegen unterschätztem Niederschlag (WKP 1a: 25%, WKP 1000a: 35%).

- **Einfluss natürlicher („interner“) Variabilität?:**

El Niño/La Niña: Einfluss nicht eindeutig.

Empirie: Bei Anpassung GEV mit Kovariate Meeresoberflächentemperatur (Klimawandelsignal abgezogen) **kein Einfluss** von ENSO auf **regionales 3-Tage-Maximum** aufweisbar.

Klimamodelle: Klimamodel FLOR-FA zeigt keinen Einfluss, Modell HiFLOR zeigt höhere Wahrscheinlichkeit nach starkem El Niño.

Dekadische Atlantische Variabilität: signifikante Punktkorrelation mit Extremniederschlag in zentraler Golfregion besteht zu Meeresoberflächentemperaturen in Hauptregion der Atlantischen Multidekadischen Oszillation (AMO) südlich von Grönland. War 2016 außergewöhnlich kalt, würde Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Niederschlags 2016 vermindern.

Überschwemmungen Louisiana/USA, August 2016 - Beispiel: Studie van der Wiel et al., 2017

- **Ursachenzuordnung („attribution“) für die Wahrscheinlichkeitsänderung (Fortsetzung):**
Über Antriebe für die detektierten Änderungen können nur Klimamodell-Experimente Auskunft geben.

Verfahren:

U.a. „transiente“ Klimamodellläufe, an Ergebnisse (jährliche 3-Tages-Niederschlagsmaxima aus Golfregion) wird GEV-Verteilung mit Kovariate globale Mitteltemperatur angepasst.

GEV-Verteilung aus allen Modelljahren skaliert auf:

- Anfangsjahr (1900 oder 1860)
- Endjahr 2016.

Daraus: Änderungsfaktor für Überschreitungswahrscheinlichkeit einer Ereignisausprägung wie August 2016 zwischen Regime ohne Klimawandel und Gegenwart abgeleitet.

Implizite Annahme I: Einfluss interner Klimavariabilität klein gegenüber der Kombination aus anthropogenen und natürlichen („externen“) Antrieben . Letztere werden nicht explizit separiert.

Implizite Annahme II: Anthropogene Antriebe überwiegen bei Annahme einer Skalierbarkeit mit globaler Mitteltemperatur gemäß „pattern scaling“ .

Überschwemmungen Louisiana/USA, August 2016 - Beispiel für das Verfahren: Studie van der Wiel et al., 2017

- **Ursachenzuordnung („attribution“)** für die **Wahrscheinlichkeitsänderung (Fortsetzung)**:
Ergebnis aus der Analyse der empirischen Daten und den Klimamodellen:
Wiederkehrperiode eines 3-Tage-Niederschlags wie August 2016 in Golfregion (Jahresmaximum):
“best estimate“: **30 Jahre (Konfidenz-Intervall:11-110 Jahre)**

Überschreitungswahrscheinlichkeit eines Ereignisses wie August 2016 hat sich in Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Klimamodell-Ergebnissen über den Zeitraum 1900 bis 2016 erhöht.
Klimamodelle: **Zunahmefaktor** der Überschreitungswahrscheinlichkeit über den Zeitraum 1900 bis 2016 von **mindestens 1,4** (unterer Rand des 95%-Konfidenzinterfalls aus den Modellexperimenten).
- **Hurrikan Harvey, 2017**: noch größere Überschwemmungskatastrophe in Golf-Gegend um Houston:
3-Tage-Niederschläge überschritten 1000-Jährlichkeit in weiter Region (~750 mm/3-Tage).
Fortsetzungsstudie zur Golfküste (van Oldenborgh et al., 2017):
Antriebe hinter dem Anstieg der globalen Mitteltemperatur haben maximalen 3-Tage-Niederschlag aus Harvey in der Golfregion um mindestens Faktor **1,5** wahrscheinlicher gemacht.
→ Anpassung der Überflutungsschutz-Infrastruktur an der US-Golfküste zu empfehlen!

- Vorgestelltes **Beispiel** entspricht **Risikomanagement-Perspektive** eines Rückversicherers: **Potenzial hoher (versicherter) Sachschäden** aus Überschwemmung, weniger aus Hitze
Ist **nicht repräsentativ**: Mehrzahl der Ereignis-bezogenen Studien (Ursachenzuordnung) analysieren Temperaturereignisse. Niederschlag ist „schwieriger“ als Temperatur (Physik nicht explizit modelliert, vielmehr Parametrisierung, keine korrekte Auflösung Relief-gebundener Niederschlagsprozesse oder von Konvektion, etc.).
- Ist die **globale Mitteltemperatur** eine **angemessene Kovariate** für den erwarteten Zusammenhang zwischen Temperatur und Niederschlags-Extremen am GoM bei der GEV-Statistik („pattern scaling“)? Falls vor allem Änderungen in der atmosphärischen Dynamik zu den Änderungen der Niederschlags-Extreme über die Zeit beigetragen hätten, wäre diese Kovariate zu hinterfragen (van der Wiel et al., 2017).
- Ist die Bedeutung der **internen Variabilität**, z.B. auf multi-dekadischer Zeitskala (AMO), für die regionalen Niederschlags-Extreme in der Golfregion angemessen berücksichtigt?
- Generell gibt es **Methodenvielfalt** bei solchen Studien. Ein Beispiel: Bei *weather@home*-Initiative erzeugen Klimamodelle auf privaten Computern innerhalb eines großen Netzwerkes durch mehrere tausend Läufe auch den extremen Bereich der Verteilungen.

Seit 2011:
Jährliche Spezialausgabe des *Bulletin of the American Meteorological Society* publiziert Ursachenanalysen von Verteilungsänderungen selektiver Wetterextreme.

Bisher analysiert: **131 Ereignisse**

Bei **68%** Einfluss des anthrop. Klimawandels auf Überschreitungswahrscheinlichkeit aufgezeigt (bei 32% nicht nachweisbar).

Quelle: Bulletin of the American Meteorological Society:
<https://www.ametsoc.org/index.cfm/ams/publications/bulletin-of-the-american-meteorological-society-bams/explaining-extreme-events-from-a-climate-perspective/>

Nach einem in Nature publizierten Überblick über insgesamt **170** Studien zu **190** wetterbezogenen Extremereignissen ergibt sich folgende „Rangfolge“ an behandelten Ereignissen:

Hitze (Warmextreme): ca. 61

Trockenheit: ca. 41

Niederschlag/Überschwemmung: ca. 39

Ozeane: ca. 20

Kälte/Eis/Schnee: ca. 20

Stürme: ca. 8

Der größte Teil dieser Ereignisse, insbesondere bei Warmextremen, wies einen deutlichen Änderungseinfluss auf Überschreitungswahrscheinlichkeiten durch den Klimawandel auf.

Quelle: Schiermeier, Q., 2018: Climate as culprit. Nature, 560, 20-22.

➤ **Risikomanagement-Perspektive**

Studien mit Klimawandel-Ursachenzuordnung können Risikomanagement über Art und Umfang einer veränderten Gefährdungslage informieren, langfristig wirksamen Schadentreiber erkennen lassen, verbesserte Anpassung motivieren.

- **Langfristig wirksamer klimatischer Schadentreiber** aus Zeitreihe von Schäden, die auf heute vorhandenen Bestand zerstörbarer Werte normalisiert wurde, oft nicht ableitbar (viel längere Beobachtungszeit erforderlich – „emerging time scale“)

Normalisierte Schadenhöhen in regionalen Zeitreihen, die vor allem durch extreme Einzelereignisse geprägt sind, können etwas aussagen über:

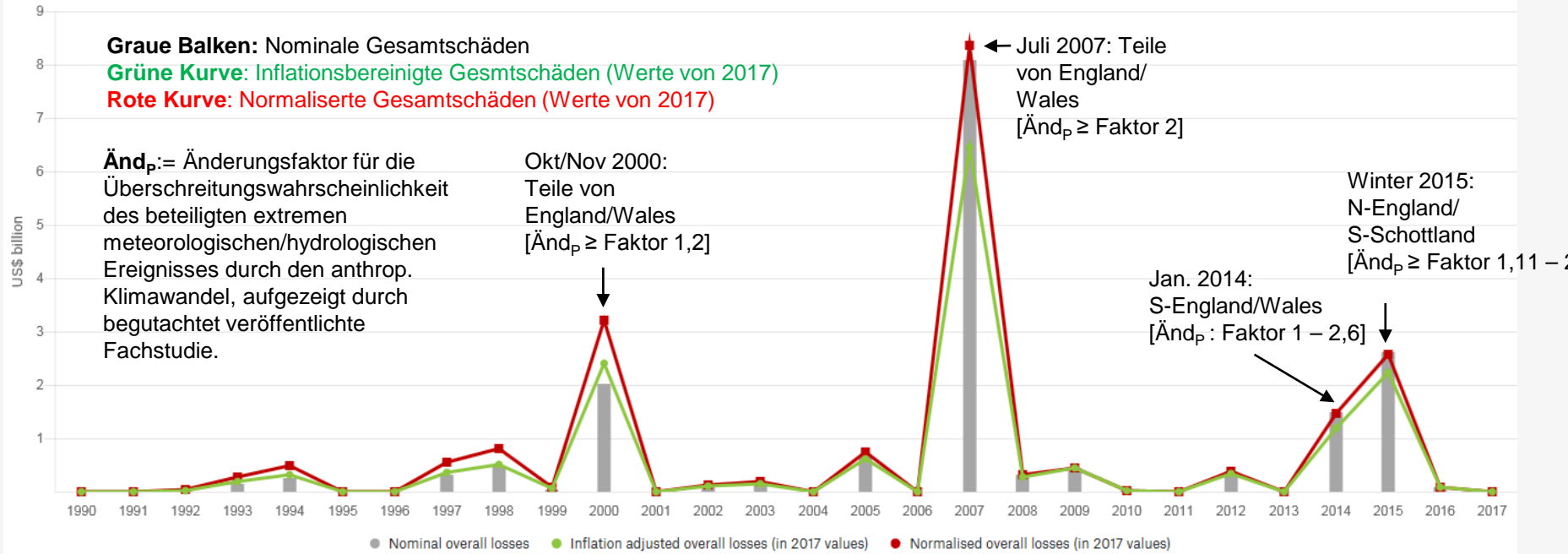
- unterschiedlichen Wertgehalt regional getroffener Ensembles von zerstörbaren Werten
- unterschiedlich ausgeprägtes Präventionsniveau, z.B. Hochwasserschutzbauten/Deiche
- unterschiedliche Schadenempfindlichkeiten...

...und müssen nicht bereits Änderungen detektierbar machen, die auf dem Klimawandel beruhen und in den dahinterliegenden Naturereignissen bereits nachweisbar sind.

Beispiel Schäden aus Überschwemmungsereignissen in Großbritannien 1990 – 2017 (s. nächste Folie)

Klimawandeleinfluss ohne Schadensignal?!

Gesamtschäden für Überschwemmungsereignisse in Großbritannien, 1990-2017



Quelle Schadendaten: Munich Re, 2018.

Quelle Änderungsfaktoren: begutachtete Fachpublikationen, siehe Artikel E.Faust in Publikation

- Die Methoden der Zuordnung von Änderungsursachen für Wahrscheinlichkeiten extremer Ereignisse und die Fähigkeit der Klimamodelle, die physikalischen Prozesse beim Auftreten von Extremereignissen angemessen abzubilden, lassen noch viel Spielraum zur Weiterentwicklung. Bereits umfangreiche Fachliteratur vorhanden.
- Wird die Ursache anthrop. Klimawandel als Antrieb für veränderte Extremereignis-Häufigkeiten in einer Region möglichst zeitnah nach einem solchen Ereignis erkannt, so ist der Impuls am größten, angemessene Konsequenzen der Anpassung zu avisieren.
- Bedeutung aus Risikomanagement-Sicht somit:
 - frühzeitige Identifikation von Gefährdungstrends
 - Motivation/Notwendigkeit für verbesserte Prävention / Vulnerabilitätsreduktion.

Herring, S.C., N. Christidis, A. Hoell, J.P. Kossin, C.J. Schreck III, and P.A. Stott, 2018: 1. Introduction to explaining extreme events of 2016 from a climate perspective. [Herring, S.C., N. Christidis, A. Hoell, J.P. Kossin, C.J. Schreck III, and P.A. Stott (eds.), 2018: Explaining extreme events of 2016 from a climate perspective. Special Supplement to the BAMS, 99(1)], S1 – S6.

Otto, F.E.L., S.M. Rosier, M.R. Allen, N.R. Massey, C.J. Rye, J.I. Quitana, 2015: Attribution analysis of high precipitation events in summer in England and Wales over the last decade. *Climatic Change*, 132, 77–91. DOI 10.1007/s10584-014-1095-2.

Otto, F.E.L., K. van der Wiel, G.J. van Oldenborgh, S. Philip, S.F. Kew, P. Uhe, and H. Cullen, 2018: Climate change increases the probability of heavy rains in Northern England / Southern Scotland like those of storm Desmond - a real-time event attribution revisited. *Environ. Res. Lett.* 13, 024006, DOI: 10.1088/1748-9326/aa9663.

Pal, P., T. Alna, D.A. Stone, P.A. Stott, T. Nozawa, A.G.J. Hilberts, D. Lohmann, M.R. Allen, 2010: Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, doi:10.1038/nature09762.

Schaller, N., A.L. Kay, R. Lamb, N.R. Massey, J.J. van Oldenborgh, F.E.L. Otto, S.N. Sparrow, R. Vautard, P. Yiou, I. Ashpole, A. Bowery, S.M. Crooks, K. Haustein, C. Huntingford, W.J. Ingram, R.G. Jones, T. Legg, J. Miller, J. Skeggs, D. Wallom, A. Weisheimer, S. Wilson, P.A. Stott, M.R. Allen, 2016: Human influence on climate in the 2014 southern England winter floods and their impacts. *Nature Climate Change*, doi:10.1038/NCLIMATE2927.

Stott, P.A., S.A. Stone, und M.R. Allen, 2004: Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature*, 432, 610-614.

Van der Wiel, K., S.B. Kapnick, G.J. van Oldenborgh, K. Whan, S. Philip, G.A. Vecchi, R.K. Singh, J. Arrighi, und H. Cullen, 2017: Rapid attribution of the August 2016 flood-inducing extreme precipitation in south Louisiana to climate change. *HESS*, 21, 897-921. DOI 10.5194/hess-21-897-2017.

Van Oldenborgh, G.J., K. van der Wiel, A. Sebastian, R. Singh, J. Arrighi, F. Otto, K. Haustein, S. Li, G. Vecchi, und H. Cullen, 2017: Attribution of extreme rainfall from Hurricane Harvey, August 2017. *Environmental Research Letters*, 12 124009. DOI 10.1088/1748-9326/aa93f2.



Danke!

efaust@munichre.com