Entwicklung und Auswirkungen von Extremwetterereignissen aufgrund des Klimawandels in Europa

Leo Basig, Angie Celis, Sarina Danioth, Michela Ferrari, Belinda Hotz, Yue Yu

Zusammenfassung

In Grossteilen Europas werden in Zukunft die Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen, wie Starkniederschläge, Hitzewellen und Stürme, klimawandelbedingt zunehmen[1–5].

Starkniederschläge werden im Sommer in Zentral- und Südeuropa abnehmen (bis -30%), in Nordeuropa und über ganz Europa während des Winters zunehmen (bis +30%)[1]. Diese Starkniederschlagsschwankungen werden unter anderem durch erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit der Luft bei höheren Temperaturen[1], sowie durch die räumliche und jahreszeitliche Wasser- bzw. Feuchtigkeitsverfügbarkeit beeinflusst[6]. Starkniederschläge können Hochwasserereignisse und Murgänge beeinflussen[7,8]. Hochwasserereignisse werden jedoch hauptsächlich durch den kombinierten Effekt von hoher Bodenfeuchte und Niederschlägen angetrieben[7], während die Grösse von Murgängen vorwiegend vom Permafrost abhängt[8]. Kinder, alte, arme und Personen mit besonderen Bedürfnissen sind oft besonders verwundbar bei Hochwasserereignisse und durch die zunehmende Stärke der Ereignisse können erhöhte Schäden an kommerziellen Wertgütern erwartet werden[9,10].

Warme Temperaturextreme entstehen häufig durch ein atmosphärisches Blocking, einer länger bestehenden Hochdruckwetterlage[11], wobei der dominierende physikalische Prozess von Hitzewellen und das Risiko für Trockenperioden stark regionsabhängig ist[12,13]. Hitzewellen und Trockenperioden können zu sozioökonomischen Schäden, wie zur Abnahme der Produktivität in Ökosystemen und zu Ernteausfällen führen[14–16]. Zudem steigt die körperliche Belastung von physisch anstrengend arbeitenden Menschen und die Morbidität und Mortalität von älteren Menschen an[17,18].

Stürme sind Tiefdrucksysteme mit einer Windstärke von über 24.5 ms^{-1}, welche ihren Ursprung häufig über dem Nordatlantik aufgrund von grossen Luftdruck- und Temperaturunterschieden haben[19]. In den letzten Jahrzehnten wurde eine Verschiebung der Zyklonen im Nordatlantik und Nordpazifik polwärts festgestellt, welche zukünftig das Klima in den mittleren Breiten erheblich beeinflussen könnte[20]. Ebenfalls wurde eine Abnahme der Gesamtzahl der Zyklonen in der gemässigten Zone des nordatlantischen Raumes erkannt[21], sowie eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität extremer Sturmereignisse aufgrund des Klimawandels[4,5]. Diese Veränderungen und deren Folgen, unter anderem Sturmfluten und Windböen, haben starke negative Auswirkungen auf die Wirtschaft[4,22], da die jährlichen wirtschaftlichen Schäden wegen mehr und stärkerer Windböen allein um 44% zunehmen können[4].

Teilrecherche 1: Entstehung - Starkniederschläge & ihre Folgen (Murgänge, Hochwasser, etc.)

Michela Ferrari

Kurzzusammenfassung

Der Klimawandel bewirkt in Zukunft eine Veränderung der Starkniederschläge. Für diese wird in Zentral- und Südeuropa im Winter eine Zunahme, im Sommer eine Abnahme sowie eine Zunahme in Nordeuropa vorhergesagt. Folgende Prozesse beeinflussen diese Veränderung: die erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit der Luft durch den klimabedingten Temperaturanstieg[1], die Wasser- bzw. Feuchtigkeitsverfügbarkeit[6] und weitere dynamischen Prozesse[1]. Bei Hochwasserereignissen stellen hohe Bodenfeuchte zusammen mit Niederschlägen ein viel verbreiteter Einflussfaktor als Starkniederschläge dar[7]. Ein Temperaturanstieg bewirkt vielerorts eine Niederschlagszunahme, aber allgemein eine Abnahme des Flussabflusses[23]. Eine Grössenzunahme von Murgängen durch vermehrte Starkniederschläge ist möglich, dies wird aber hauptsächlich durch Stabilität bzw. Bewegungsrate des Permafrosts bedingt[8].

Thermodynamic causes for future trends in heavy precipitation over Europe based on an ensemble of regional climate model simulations[1]

Niederschlagsänderungsprozesse / Extremwertanalyse simulierten Daten / Starkniederschläge: Winter Zunahme, Sommer: Zentral-, Südeuropa Rückgang, Nordeuropa Zunahme. Prozesse: Temperaturzunahme mehr Wasser in der Luft, Feuchtigkeitskonvergenz, Änderung statischen Stabilität, barokline Sturmaktivität

Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability[6]

Beziehung Starkniederschläge/Hochwasser mit Wasservorkommen / Analysiert Daten aus Klimamodellen / Das Vorhandensein von Wasser und wie viel Wasser die Atmosphäre aufnehmen kann sind wichtige Einflussfaktoren auf Hochwasser und Starkniederschläge

The Relative Importance of Different Flood-Generating Mechanisms Across Europe[7]

Relative Bedeutung Ursachen Hochwasserereignisse / Statistische Auswertung Hochwassermesswerte 1960-2010 / Hohe Bodenfeuchte zusammen mit Niederschlag sind verbreiteter Einflussfaktor auf Hochwasserveränderungen als nur Starkniederschläge

Global assessment of flood and storm extremes with increased temperatures[23]

Empfindlichkeit Extremniederschläge bzw. Abfluss auf Temperaturänderung / Analyse Daten aus Messstationen / Bei Temperaturerhöhung Niederschlagszunahme aber Abflussabnahme (Ausnahme: seltene Extremniederschläge oder Einzugsgebiet klein, steil oder wasserundurchlässig)

Climate change impacts on mass movements - Case studies from the European Alps[8]

Einfluss von Klimawandel auf Massenbewegungen (mit Fallbeispiele) / Analysiert verschiedene Studien / Grössenzunahme von Murgängen durch Zunahme von Starkniederschläge ist möglich, sie hängt aber hauptsächlich von Stabilität und/oder Bewegungsrate des Permafrosts ab

Teilrecherche 2: Auswirkung - Starkniederschläge & ihre Folgen (Murgänge, Hochwasser, etc.)

Leo Basig

Kurzzusammenfassung

Die Stärke der Auswirkung von Hochwasser hängt von verschiedenen Faktoren ab. So ist z.B., wer Betroffen ist, ein Faktor, da die verwundbarsten Gruppen Kinder, Alte, Personen mit besonderen Bedürfnissen und Arme sind[10]. In Deutschland gelten auch Personen in Städten als verwundbarer als solche auf dem Land[24]. Der wichtigste Faktor, der die Schadenshöhe an kommerziellen Wertgütern bestimmt, ist die Höhe des Wasserstands bei der Überschwemmung[9]. Um Überschwemmungen in Städten durch extreme Niederschläge in Zukunft zu vermeiden, wird erwartet, dass die Speicherkapazität von Entwässerungsanlagen um 11-51% erhöht werden muss[25]. In wasserreichen Ökosystemen haben extremen Niederschlagsereignisse einen negativen Einfluss auf die Biomassenproduktion von Pflanzen[26].

Revision of urban drainage design rules after assessment of climate change impacts on precipitation extremes at Uccle, Belgium[25]

Anpassung Entwässerung wegen extremen Regenereignissen / Klimaszenarien verwendet, um neue Kapazitäten auszurechen / 50% erhöhte Regenintensitäten, Anlagenkapazität in Städten um 11-51% erhöhen.

Impacts of extreme precipitation and seasonal changes in precipitation on plants[26]

Auswirkung extremer Niederschlag und saisonale Änderungen auf Pflanzen / Review von mehreren Studien / wasserlimitierte Ökosysteme -> positiv Wachstum, wasserreich -> negativ Wachstum, weniger Niederschlag Sommer -> Negativ, mehr Niederschlag Winter -> keinen Effekt.

Exposure and vulnerability estimation for modelling flood losses to commercial assets in Europe[9]

Kosten an kommerziellen Wertgütern bei Überschwemmungen / Modell anhand statistischer Daten / Wasserhöhe -> + Schäden Gebäude, Maschinen und Ausrüstung, Dauer -> + Schäden Gebäude, Schutzmassnahmen -> - Schäden Maschinen und Ausrüstung, arme Regionen -> + Schäden

Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement[10]

Faktoren der sozialen Verwundbarkeit bei Überschwemmungen / 67 Fallstudien untersucht. / demographische Charakteristiken (Kinder, Alte und Menschen mit besonderen Bedürfnissen sind besonders verwundbar), sozioökonomischer Status (Arme sind besonders anfällig), Phase (vor, während und nach der Flut) hat einen grossen Einfluss darauf, welche Gruppen die Verwundbarsten sind.

Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in Germany[24]

Überprüfung von sozialen Verwundbarkeitsfaktoren / statistische Analyse einer Befragung / besonders anfällige Gruppen sind Alte, Personen in Städten, Personen mit tiefem Bildungsstand und Arbeitslose.

Teilrecherche 3: Entstehung - Hitzewellen & ihre Folgen

Belinda Hotz

Kurzzusammenfassung

Die Häufigkeit von Hitzewellen und Dürren nimmt durch den von erhöhten Treibhausgaskonzentrationen verursachten Temperaturanstieg zu[3]. Hitzewellen entstehen durch ein atmosphärisches Blocking, einer länger bestehenden Hochdruckwetterlage[11]. Dabei ist Warmluftadvektion weniger wichtig als In-Situ-Erwärmung, wobei die Erwärmung durch Kompression beim Absinken von Luftmassen und durch sensible Wärmeflüsse angetrieben wird. Welcher Prozess davon dominierend ist, hängt von der Region ab[13]. Das Risiko für eine Trockenperiode ist ebenfalls regionsabhängig[12]. Während einer Hitzewelle zeigen die sensiblen Wärmeflüsse eine positive Anomalie, da die Evapotranspiration bei trockenen Böden gemindert ist, was zu einer Verstärkung der Temperaturanomalie führt[16].

The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves[3]

Zeitl. Temperaturentwicklung Erwärmung in letzten 150 Jahren / Anstieg von Hitzewellen durch Erwärmung / Erhöhte Jahr/Jahr Variabilität durch Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen + Erwärmung / mehr Hitzewellen und Dürren in Zukunft

Quantifying the relevance of atmospheric blocking for co-located temperature extremes in the Northern Hemisphere on (sub-)daily time scales[11]

Atmosphärische Blockings beeinflussen Bodentemperatur durch Zirkulation & Strahlung / Warmtemperaturextreme mit Blocking am selben Ort / Wettercharakteristik: Antizyklonen, klarer Himmel, schwache Warmluftadvektion, amplifizierter Tagesgang, Anomalien der solaren Strahlung, verstärkte Evapotranspiration

Processes determining heat waves across different European climates[13]

kontinentalem Klima mehr Hitzewellen als maritimem / Änderung Temperatur, pot. Temperatur & Druck (physik. Prozess) / Absinkende Luftmassen erwärmen durch adiab. Kompression / klarer Himmel Anstieg sensiblen Wärmefluss / In-Situ-Erwärmung / regionale Unterschiede zwischen Anteilen physik. Prozesse

Anthropogenic climate change affects meteorological drought risk in Europe[12]

vermehrter (verminderter) Niederschlag in Nordeuropa (Zentral- & Südeuropa) / anthropogene Emissionen erhöhen (verringern) W'keit für Dürren in Mittelmeerregion (Nordeuropa) / Mittelmeerregion heute Wasserknappheit (Zukunft grösseres Problem) / Zentraleuropa W'keit für Dürre konstant

Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation[16]

Temperaturextreme durch Land-atmosphäre Feedback + anhaltende atmosphärische Zirkulation / starker Tagesgang / Akkumulation von Hitze über mehrere Tage mit zunehmender Bodenaustrocknung / keine Kühlung durch Evotranspiration wegen Bodentrockenheit (sensibler Wärmefluss wird grösser)

Teilrecherche 4: Auswirkungen - Hitzewellen & ihre Folgen (Dürren, Bodentrockenheit, etc.)

Sarina Danioth

Kurzzusammenfassung

Die Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen und Dürren wird in Zukunft in Grossteilen Europas zunehmen und die mittlere Temperatur wird ansteigen[2]. Die Produktivität von Ökosystemen nimmt während solchen extremen Events ab[15]. Ebenfalls steigen die Mortalität und Morbidität, vor allem von älteren Menschen, während solchen Ereignissen an[17]. Die Hitzebelastung ist auch für physisch anstrengend Arbeitende eine Herausforderung[18]. Zudem können Hitzewellen und Dürren zu grossen Ernteausfällen führen, wodurch beispielsweise die europäische Weinproduktion sinken wird[14].

Future heat waves in different european capitals based on climate change indicators[2]

Vergleich London, Luxemburg, Rom: erwartete Häufigkeit, Dauer & Intensität von Hitzewellen/ Auswertung: erwartete Lufttemperatur steigt/ Häufigkeit & Intensität von Hitzewellen & Potential negativer Auswirkungen nehmen zu/ würden anthropogene Emissionen gestoppt, trotzdem kontinuierliche Erwärmung über nächste Jahrzehnte

Impacts of extreme summers on European ecosystems: A comparative analysis of 2003, 2010 and 2018: European extreme summers and the C-cycle[15]

Vergleich: 3 europäische Hitzewellen von 2003, 2008 & 2018/ komparative Analyse: Effekte der Events/ CO2-Flüsse über Europa/ 11 dynamische globale Vegetationsmodelle & ein Observationsmodell/ herausgefunden, dass Hitzewellen netto zu Abnahme der Produktivität des Ökosystems führten

Drought effects on specific-cause mortality in Lisbon from 1983 to 2016: Risks assessment by gender and age groups[17]

tägl. kreislaufbedingte & respiratorische Mortalität & Morbidität in Lissabon im Zusammenhang mit Hitzewellen & Dürren von 1983-2016/ signif. Zusammenhang zwischen Dürren & Mortalität/ Menschen >75 Jahre grösstes Risiko/ Männer stärker betroffen/ u.a. Effekte von Hitzewellen auf Luftverschmutzung

Escalating environmental summer heat exposure—a future threat for the European workforce[18]

Hitzebelastungen: Auswirkungen auf Gesundheit, Produktivität von Arbeitern (bei physisch anstrengender Arbeit)/ analysiert Hitzestresswerte & Auswirkungen/ Resultate: in Grossteilen Europas nimmt Belastung durch hohe Temperaturen zu/ v.a. in Südeuropa könnte Arbeitsproduktivität stark sinken

What is the impact of heatwaves on European viticulture? A modelling assessment[14]

Hitzewellen: schlimme Auswirkungen auf Weintrauben/ analysiert pot. Auswirkungen auf renommierte Weinregionen Europas/ Hitzewellen (insbesondere lange) sehr grossen negativen Effekt auf Ernte/ in stärksten betroffenen Regionen (Zentraleuropa; kühlere Regionen) kann Ernte bis zu 35% sinken

Teilrecherche 5: Entstehung - Stürme (& ihre Folgen)

Angie Celis

Kurzzusammenfassung

Stürme sind Tiefdrucksysteme mit einer Windstärke von über 24.5 ms^{-1}. Diese haben ihren Ursprung häufig über dem Nordatlantik primär im Herbst und im Winter aufgrund von grossen Luftdruck- und Temperaturunterschieden, welche aus einer geringen Sonneneinstrahlung resultieren[19]. In den letzten Jahrzehnten wurde eine Verschiebung der Zyklonen im Nordatlantik und Nordpazifik polwärts festgestellt. Diese Neigung wird voraussichtlich weiter zunehmen[20]. Ebenfalls wurde eine Zunahme der Tiefdruckaktivität im Winter in den Polargebieten und eine Abnahme in der gemässigten Zone des nordatlantischen Raumes erkannt[21]. In den nächsten Jahrzehnten wird eine zunehmende Häufigkeit von extremen Stürmen in Europa erwartet[27], während die Gesamtzahl der Tiefdruckgebiete abnehmen wird[28].

Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe-A review[19]

Veränderungen im Sturmklima, sowohl für vergangene Jahrzehnte oder Jahrhunderte als auch für zukünftige Szenarien / Eulerian approach, Lagrangian approach / die meisten Studien zeigen steigende Trends, grosse dekadische Schwankungen, Zunahme der Sturmzahlen von den 1970er bis Mitte 1990er.

The poleward shift of storm tracks under global warming: A Lagrangian perspective[20]

Neue Perspektive auf die Polverschiebung präsentieren / Lagrangian approach (Regionen als Aggregate), GCM, Algorithmen / Neigung der mittleren Bahnen von Wirbelstürmen wird voraussichtlich zunehmen, Polwärtsverschiebung und stärkere Ablenkung der Sturmbahnen als Ganzes.

Trends and variability of storminess in the Northeast Atlantic region, 1874-2007[21]

Saisonale und regionale Unterschiede der Sturmstärke genauer untersuchen / pressure triangles / Grösste Unterschiede zwischen Winter/Sommer & Nordseegebiet/anderen Teilen der Region. Winterstürme zeigen stetigen Aufwärtstrend über nordöstlichem Dreieck JTB, während sie im westlichen Gebiet abnehmen.

Significantly increased extreme precipitation expected in Europe and North America from extratropical cyclones[27]

Trotz Unsicherheiten klare Informationen zur Häufigkeit der Wirbelstürme herausfinden / Identifizierung aussertropischer Tiefdruck-Sturmsysteme / Zukunft: Gesamtzahl der Zyklonen ↓, mittlere Niederschlagsintensität ↑, Niederschlagssummen extremer aussertropischer Wirbelstürme ↑

Extra-tropical cyclones in the present and future climate: A review[28]

Überblick über aktuellen Wissensstand der Wirbelstürme / Zyklonenidentifikation, - verfolgung, -intensität und -aktivität / Es gibt zwei unterschiedliche Regionen mit hoher Zyklonen-Aktivität (Nordpazifik, Nordatlantik), Zukunft: Anzahl aller Wirbelstürme ↓, Anzahl intensiver Wirbelstürme ↑

Teilrecherche 6: Auswirkung - Stürme & ihre Folgen

Yue Yu

Kurzzusammenfassung

Die Häufigkeit und Intensität der extremen extra-tropischen Sturmereignisse können aufgrund des Klimawandels in Europa zunehmen[4,5,29,30]. Dadurch können Oberflächenwindmaxima erhöht und Fluten erzeugt werden[5,22]. Diese veränderten Oberflächenmaxima und Fluten können starke Socio-Ökonomische und wirtschaftliche Schäden verursachen, die mühsam wieder aufgebaut werden müssen[22]. Die Zunahme der jährlichen Schäden wegen mehr und stärkerer Fluten und Windböen wird neulich anhand Klimamodelle auf 37%-44% geschätzt[4,30].

Vulnerability of the Netherlands and Northeast Europe to storm damage under climate change[29]

- Fragestellung: Empfindlichkeiten der Sturmschäden, Schwankungen der Sturmintensität
- Methode: Modelle mit verschiedenen Szenarien
- Relevante Resultate: Wachstum von Sturmintensität: 1-9%. 2%: Anstieg der Schäden um 50-80%. 6%: 300%-500%

Modelling European winter wind storm losses in current and future climate[4]

- Fragestellung: Auswirkungen des Klimawandels auf Sturmschaden
- Methode: beste regionalen Klimamodelle und ein Versicherungsschadenmodell verbinden
- Relevante Resultate: Grössere Intensität extremer Stürme. Jährlicher Verlust: 44%.

Changing European storm loss potentials under modified climate conditions according to ensemble simulations of the ECHAM5/MPI-OM1 GCM[5]

- Fragestellung: Veränderungen der versicherten Schadenpotentiale
- Methode: Sturmschadenmodell mit Ensemble von Simulationen der Klimamodelle
- Relevante Resultate: Wachstum der versicherten Schadenpotenziale. Grund: Grössere Oberflächenwindmaxima

Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: a case study on Copenhagen[22]

- Fragestellung: Wirtschaftliche Auswirkungen vom Klimawandel
- Methode: Katastrophenrisikobewertung und Input-Output Modell
- Relevante Resultate: Verluste einer extremen Sturmflut: 3 Mrd. EUR. Verluste von Arbeitsplätzen. Lange Rekonstruktion.

Property loss potentials for European midlatitude storms in a changing climate[30]

- Fragestellung: Verlustpotentiale unter Klimawandel
- Methode: Ensemble von Klimamodellen, Sturmschadenmodell
- Relevante Resultate: Wachstum der Verluste: 37%. Höhere Wahrscheinlichkeit extremer Ereignisse

Literaturliste

1. Radermacher, C. & Tomassini, L. Thermodynamic causes for future trends in heavy precipitation over Europe based on an ensemble of regional climate model simulations. *Journal of Climate* **25**, 7669–7689 (2012).

2. Junk, J., Goergen, K. & Krein, A. Future heat waves in different european capitals based on climate change indicators. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **16**, (2019).

3. Schär, C. *et al.* The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* **427**, (2004).

4. Schwierz, C. *et al.* Modelling European winter wind storm losses in current and future climate. *Climatic Change* **101**, 485–514 (2010).

5. Pinto, J. G., Fröhlich, E. L., Leckebusch, G. C. & Ulbrich, U. Changing European storm loss potentials under modified climate conditions according to ensemble simulations of the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. *Natural Hazards and Earth System Science* **7**, 165–175 (2007).

6. Tabari, H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports* **10**, (2020).

7. Berghuijs, W. R., Harrigan, S., Molnar, P., Slater, L. J. & Kirchner, J. W. The Relative Importance of Different Flood-Generating Mechanisms Across Europe. *Water Resources Research* **55**, 4582–4593 (2019).

8. Stoffel, M., Tiranti, D. & Huggel, C. Climate change impacts on mass movements - Case studies from the European Alps. *Science of the Total Environment* **493**, 1255–1266 (2014).

9. Paprotny, D. *et al.* Exposure and vulnerability estimation for modelling flood losses to commercial assets in Europe. *Science of the Total Environment* **737**, (2020).

10. Rufat, S., Tate, E., Burton, C. G. & Maroof, A. S. Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement. *International Journal of Disaster Risk Reduction* **14**, 470–486 (2015).

11. Pfahl, S. & Wernli, H. Quantifying the relevance of atmospheric blocking for co-located temperature extremes in the Northern Hemisphere on (sub-)daily time scales. *Geophysical Research Letters* **39**, (2012).

12. Gudmundsson, L. & Seneviratne, S. I. Anthropogenic climate change affects meteorological drought risk in Europe. *Environmental Research Letters* **11**, (2016).

13. Zschenderlein, P., Fink, A. H., Pfahl, S. & Wernli, H. Processes determining heat waves across different European climates. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **145**, (2019).

14. Fraga, H., Molitor, D., Leolini, L. & Santos, J. A. What is the impact of heatwaves on European viticulture? A modelling assessment. *Applied Sciences (Switzerland)* **10**, (2020).

15. Bastos, A. *et al.* Impacts of extreme summers on European ecosystems: A comparative analysis of 2003, 2010 and 2018: European extreme summers and the C-cycle. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **375**, (2020).

16. Miralles, D. G., Teuling, A. J., Van Heerwaarden, C. C. & De Arellano, J. V. G. Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation. *Nature Geoscience* **7**, (2014).

17. Salvador, C. *et al.* Drought effects on specific-cause mortality in Lisbon from 1983 to 2016: Risks assessment by gender and age groups. *Science of the Total Environment* **751**, (2021).

18. Casanueva, A. *et al.* Escalating environmental summer heat exposure—a future threat for the European workforce. *Regional Environmental Change* **20**, (2020).

19. Feser, F. *et al.* Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe-A review. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **141**, 350–382 (2015).

20. Tamarin, T. & Kaspi, Y. The poleward shift of storm tracks under global warming: A Lagrangian perspective. *Geophysical Research Letters* **44**, 10,666-10,674 (2017).

21. Wang, X. L., Zwiers, F. W., Swail, V. R. & Feng, Y. Trends and variability of storminess in the Northeast Atlantic region, 1874-2007. *Climate Dynamics* **33**, 1179–1195 (2009).

22. Hallegatte, S. *et al.* Assessing climate change impacts, sea level rise and storm surge risk in port cities: A case study on Copenhagen. *Climatic Change* **104**, 113–137 (2011).

23. Wasko, C. & Sharma, A. Global assessment of flood and storm extremes with increased temperatures. *Scientific Reports* **7**, (2017).

24. Fekete, A. Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in Germany. *Natural Hazards and Earth System Science* **9**, 393–403 (2009).

25. Willems, P. Revision of urban drainage design rules after assessment of climate change impacts on precipitation extremes at Uccle, Belgium. *Journal of Hydrology* **496**, 166–177 (2013).

26. Zeppel, M. J. B., Wilks, J. V. & Lewis, J. D. Impacts of extreme precipitation and seasonal changes in precipitation on plants. *Biogeosciences* **11**, 3083–3093 (2014).

27. Hawcroft, M., Walsh, E., Hodges, K. & Zappa, G. Significantly increased extreme precipitation expected in Europe and North America from extratropical cyclones. *Environmental Research Letters* **13**, (2018).

28. Ulbrich, U., Leckebusch, G. C. & Pinto, J. G. Extra-tropical cyclones in the present and future climate: A review. *Theoretical and Applied Climatology* **96**, 117–131 (2009).

29. Dorland, C., Tol, R. S. J. & Palutikof, J. P. Vulnerability of the Netherlands and Northwest Europe to storm damage under climate change: A model approach based on storm damage in the Netherlands. *Climatic Change* **43**, 513–535 (1999).

30. Leckebusch, G. C., Ulbrich, U., Fröhlich, L. & Pinto, J. G. Property loss potentials for European midlatitude storms in a changing climate. *Geophysical Research Letters* **34**, 3–6 (2007).