



Verbundprojekt „Klimawandel und Gesundheit“

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

*Thunderstorm-Asthma in der Region Augsburg und Bayern
(TARA)*



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



und durch
Bayerisches Staatsministerium für
Gesundheit und Pflege



Schlussbericht

Projektname: Thunderstorm-Astma in der Region Augsburg und Bayern

Akronym: TARA

Aktenzeichen: K3-8503-PN 18-12-D10693/2018

Projektlaufzeit: 01.04.2018 – 31.12.2020

Projektleitung: PD Dr. Andreas Philipp
Universität Augsburg

Projektantragsteller: PD Dr. A. Philipp, Universität Augsburg
Dr. Athanasios Damialis, TU München / Universität Augsburg
Dr. Michael Gerstlauer, Universitätsklinikum Augsburg

Projektpartner: Kassenärztliche Vereinigung Bayern, H. Bachetsky, Dr. R. Gerlach
Wissenschaftszentrum Umwelt Universität Augsburg, Dr. J. Söntgen

AutorInnen: Philipp A., A. Straub, V. Fricke, A. Damialis, M. Gerstlauer, D. Bayr, P. Olschewski, S. Seubert

Datum: 06.10.2021

Version: 2

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Zielsetzung und Hintergrund.....	6
3	Klimatologische Daten	8
3.1	Blitzdaten (BLI)	8
3.2	Niederschlagsradar (RAD)	11
3.3	DWD-Stationsdaten (DWD).....	13
3.4	Analysedaten des Wettervorhersagesystems Global Forecast System (GFS)	13
4	Patientendaten.....	14
4.1	Notdienstdaten der Kassenärztlichen Vereinigung Bayern (NAD)	14
4.2	Behandlungsdaten der gesetzlichen Krankenversicherungen in Bayern (GKV)	19
4.3	Panelstudie Augsburg (PAN)	21
5	Pollen und Sporendaten.....	23
5.1	Pollen- und Pilzsporen-Messungen in Augsburg (PAU)	23
5.2	Pollen- und Pilzsporen-Messungen in Bayern (pre-ePIN).....	25
6	Zusammenhangsanalysen für das gehäufte Auftreten von Asthmafällen	26
6.1	Gewittertypisierung und Charakterisierung nach Relevanz für Thunderstorm-Asthma mittels optimierter Klassifikationen.....	26
6.1.1.	Detektion und Charakterisierung von Gewitterzellen	26
6.1.2.	Kompositenanalysen	27
6.1.3.	Optimierte Wetterlagenklassifikationen.....	31
6.2	Zusammenhangsmaße des gemeinsamen Auftretens von Gewitter- und Asthmatagen	37
6.2.1.	Notarztdienstfälle.....	38
6.2.2.	Behandlungsfälle der gesetzlichen Krankenversicherung	42
6.3	Neuronale Netze	43
6.4	Analyse von Häufungsepisoden der Notdienstfälle	45
6.5	Zusammenhang mit Pollen- und Pilzsporen-Konzentrationen und Umweltfaktoren	48
6.5.1.	Bayernweiter Zusammenhang zwischen Asthmafällen, Gewittern und Alternaria	53
6.5.2.	Bayernweiter Zusammenhang zwischen Asthmafällen, Gewittern, allergenen Pollenarten und Alternaria.....	56
7	Schlussfolgerungen	63
8	Darstellung des Nutzens im Rahmen der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie	65
	Glossar	66
	Literaturverzeichnis.....	68
	Anlagen.....	72

Übersicht der durchgeführten Analysen und dabei verwendeter Datensätze.....	72
Publikationen	73

1 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund einer durch den Klimawandel wahrscheinlichen, künftigen Zunahme der Gewittertätigkeit in Bayern, wurde im Projekt TARA (Thunderstorm-Asthma in der Region Augsburg und Bayern) das Phänomen von durch Gewitter begünstigten Asthmafällen untersucht. Derartige Zusammenhänge wurden insbesondere in Einzelfällen in Australien aber auch Großbritannien und Italien beobachtet. Für Zentraleuropa lag jedoch bisher noch keine Studie vor. Als Wirkungszusammenhang wird die Konzentrationserhöhung von Pollen durch die gewitterinduzierte Luftzirkulation sowie die Veränderung von Pollen, insbesondere durch Feuchte, in der vorliegenden Literatur diskutiert.

Ziel des TARA-Projektes war die Detektion und Beschreibung von Zusammenhängen zwischen dem Auftreten von Gewittern und allergischem Asthma, um eine Beurteilung der Relevanz dieses Phänomens für die Gesundheitsversorgung in Bayern zu ermöglichen.

Grundlage der Untersuchungen in TARA stellten Datensätze der Kassenärztlichen Vereinigung Bayern dar, die einerseits Notarzteinsätze, andererseits Behandlungsfälle der gesetzlichen Krankenkassen zu Atemwegserkrankungen umfassen. Weiterhin standen Daten einer Panelstudie zur Untersuchung von Pollenallergien in Augsburg zur Verfügung. Um die Gewittertätigkeit zu erfassen, wurden Blitzdaten und meteorologische Beobachtungsdatensätze für Bayern herangezogen und einem Verfahren zur Detektion und Charakterisierung von Gewittern zugeführt. Das Zentrum einer Gewitterzelle wurde hierbei als räumliches Maximum der Blitzdichte definiert, ihre Ausdehnung über benachbarte Flächen mit Überschreitung hoher Blitzdichtewerte. Weiterhin wurden für die Region Augsburg Daten der Pollen- und Sporenbelastung für drei Jahre hinzugezogen.

Unter Einbezug eines breiten Methodenspektrums wurden mögliche Zusammenhänge zwischen Asthmafällen, Gewittern und weiterer klimatologischer Randbedingungen sowie Pollenkonzentrationsveränderungen untersucht:

In einem ersten klassifikationsbasierten Ansatz wurden auf Grundlage von Kompositenanalysen auffällig erhöhte Werte von konvektionsassoziierten Variablen (CAPE, Convective Available Potential Energy oder HPBL, Height of Planetary Boundary Layer) bei höheren Anzahlen von Asthmafällen beobachtet. Prinzipiell bestätigte sich ein diesbezüglicher Zusammenhang bei verschiedenen Varianten von Wetterlagenklassifikationen, insbesondere im Sommer. Die Signale blieben jedoch sehr schwach ausgeprägt und es gelang nicht Wetterlagentypen zu extrahieren, die das Auftreten des Thunderstorm-Asthma-Phänomens hinsichtlich der atmosphärischen Randbedingungen klar von anderen Wetterlagen unterscheiden lassen.

In einem zweiten Methodenstrang wurden verschiedenste Zusammenhangsmetriken (Korrelationskoeffizienten nach Spearman, Kendall und Jaccard sowie Chi-Quadrat-Tests für Kontingenztafeln) in zahlreichen Stichprobenvarianten, insbesondere bei räumlicher Differenzierung zwischen Postleitzahlengebieten in Bayern, berechnet und auf statistische Signifikanz geprüft. Hierbei ergaben sich z.T. eindeutig signifikante Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von Asthma- und Gewittertagen in einzelnen Postleitzahlengebieten und Testvarianten, die ein insgesamt schwaches aber klar erkennbares Signal des Auftretens von Thunderstorm-Asthma in Bayern indizieren. Hierbei konnten für das Jahr 2015 in Hof, Berchtesgaden und Augsburg eine erhöhte Anzahl an Asthmanotfällen an Tagen mit Gewittern erkannt werden. In dieselbe Richtung deuten die Ergebnisse aus Analysen mit künstlichen

Neuronalen Netzen, in denen das Auftreten von Thunderstorm-Astmatagen auf Grundlage meteorologischer Parameter modelliert wurde, sowie Analysen von Häufungsperioden von Notrufeinsätzen. Analysen von Kontingenztabellen deuten darauf hin, dass in einzelnen Postleitzahlengebieten an bis zu einem Tag pro Jahr Notrufeinsätze aufgrund von Atemwegsbeschwerden im Zusammenhang mit Gewittern erfolgen. Die Einbeziehung von Pollen- und Pilzsporendaten weist auf eine kausale Rolle von Aeroallergenen hin, wenn auch der diesbezügliche Untersuchungszeitraum sehr kurz ausfiel. Weiterhin gibt es Hinweise auf eine Verstärkung des Effektes bei verminderter Luftqualität.

Die gezeigte Indikation von Thunderstorm-Asthma in Bayern stellt aufgrund der hier ermittelten schwachen Ausprägung kein akutes Gesundheitsrisiko dar, insbesondere da die Fallzahlen von Notrufen mit der Diagnose Asthma in den letzten Jahren, wohl durch die Fortschritte in der Gesundheitsversorgung, stark gesunken sind, wie sich aus der Analyse der KVB-Daten im TARA-Projekt ergab. Eine Veränderung dieser Situation durch eine klimawandelbedingte Zunahme der Gewittertätigkeit oder durch Modifikationen weiterer Randbedingungen, wie Veränderungen der Pollenlast durch eine verlängerte Vegetationsperiode oder die Ausbreitung invasiver Arten (Bsp. Beifuß-Ambrosie), ist jedoch nicht auszuschließen. Eine zukünftige Fortführung der im TARA-Projekt durchgeführten Forschungsarbeiten, insbesondere bei künftig verbesserter Datenlage, ist deshalb zu empfehlen.

2 Zielsetzung und Hintergrund

Thunderstorm-Asthma bezeichnet das Phänomen des gehäuftten Auftretens von Asthmafällen in zeitlicher und räumlicher Nähe zu Gewitterereignissen, das in der Vergangenheit in einigen Fällen schon zu medizinischen Versorgungsengpässen führte (Andrew et al. 2017).

Studien zu Thunderstorm-Asthma existieren bislang hauptsächlich in Form von Fallstudien zu einzelnen, extremen Thunderstorm-Asthma Ereignissen, beispielsweise aus Kanada (Wardmann et al. 2002), Italien (D'Amato et al. 2008, Losappio et al. 2011), Großbritannien (Packer & Ayres 1985, Alderman et al. 1986, Celenza et al. 1996, Pulimood et al. 2007, Elliot et al. 2014), Australien (Bellomo et al. 1992, Girgis et al. 2000, Thien et al. 2018), dem Iran (Forouzan et al. 2014) und Israel (Yair et al. 2019), nicht jedoch für Mitteleuropa. Der systematische Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Gewittern und erhöhten Asthma-Aufttrittshäufigkeiten wurde jedoch bisher in nur wenigen Studien untersucht (Anderson et al. 2001 für Cardiff/Newport, England, Dales et al. 2003 für Ottawa, Kanada, Grundstein et al. 2008 für Georgia, USA), wobei deren Ergebnisse die Relevanz von Thunderstorm-Asthma, d.h. den möglichen Zusammenhang zwischen Asthma und Gewittern sowie kurzfristige Beeinträchtigungen der Gesundheitsversorgung, bestätigen. Für Zentraleuropa lagen bis zum Beginn des Projektes TARA keine Studien vor. Während die meisten Studien nur einzelne Vorkommnisse von Thunderstorm-Asthma untersuchten, wurde im Projekt TARA der Ansatz einer zeitlich kontinuierlichen Untersuchung verfolgt, der auch schon geringere Häufungen von Asthmafällen adressiert.

Die zugrundeliegenden Mechanismen sind bislang weitgehend unverstanden (D'Amato et al. 2016). Es wird angenommen, dass Gewitterstürme die atmosphärische Aeroallergen-Hintergrundkonzentration, wie z.B. von Pollen und/oder Pilzsporen, lokal deutlich erhöhen. Verschiedene Prozesse werden als ursächlich diskutiert: Zunächst können starke Windböen im Einzugsgebiet des Gewitters, genauer zwischen dem Sektor warmer, aufsteigender und dem kalten, absteigender Luft, verstärkt Pollen, Pilzsporen und allergene Mikropartikel

aufwirbeln und/oder aus Pflanzen freisetzen (Taylor et al. 2002). Das erhöht die Aeroallergen-Konzentration in der bodennahen Luftschicht deutlich (Marks et al. 2001) und verschärft die Expositionssituation für Allergiker. Weiterhin werden im Aufwindsektor, so vermuten D' Amato et al. (2016), Aeroallergene bis in die Wolkenschicht der mittleren und hohen Troposphäre transportiert. Dort werden, im Kontakt mit Wolkenröpfchen, Allergene freigesetzt, die im anschließenden Kaltluftsektor zum Boden zurückgebracht und mit den ausströmenden Luftmassen in der unteren Atmosphäre verteilt werden. Das reichert die bodennahe Luft weiter mit allergenen Aerosolen an. Als gesichert in diesem Zusammenhang gilt, dass Pollen im Kontakt mit Feuchtigkeit osmotisch bedingt aufbrechen und mit dem Zytoplasma allergene Mikropartikel, z.B. in Form von Stärkekörnchen, freisetzen. (Sophioglu et al. 1992). Ein ähnlicher Effekt auf die Prozesse der Pollenruptur und Allergenfreisetzung wird ausgehend von starken, elektrischen Felder, die sich bei Gewittern an der Erdoberfläche bilden, vermutet (D' Amato et al. 2016). Generell weisen die allergenen Mikropartikel deutlich kleinere Durchmesser als die ursprünglichen Pollenkörner auf. Deshalb kann das allergene Aerosol in dieser Form bis in die unteren Atemwege vordringen und die charakteristische Thunderstorm-Asthmasymptomatik mit bronchialer Obstruktion und akuter Atemnot hervorrufen (Taylor et al. 2002). Unter den Pollen wurden bislang diejenigen aus Gräsern wie z.B. Roggen (Taylor et al. 2002), von Parietaria-Arten (D' Amato et al. 2008) sowie der Olive (Losappio et al 2011) als Auslöser für Thunderstorm-Asthma identifiziert, unter den Sporen vorrangig die von *Alternaria* und *Cladosporium* (Dales et al. 2003, Pulimood et al. 2007, Grinn-Gofrón & Strzelsak 2013). Auch werden Wechselwirkungen bezüglich der Immunreaktion auf Pollen- und Pilzsporen diskutiert. Beispielsweise fanden Kim et al. (2014) im Mausexperiment, dass von *Alternaria*-Sporen induzierte Immunantworten pollenspezifische Entzündungsprozesse in der Lunge verstärken.

Es ist zu erwarten, dass neben den bereits bekannten Pollen- und Pilzsporenarten noch eine Vielzahl an weiteren Thunderstorm-Asthma auslösen können. Allerdings verhindert die aktuell spärliche Datenlage, insbesondere im Bereich flächendeckender Pollen- und Pilzsporenkonzentrationsmessungen, aber auch in zeitlicher Hinsicht, bislang die Durchführung umfassender Screening-Analysen. Auch die Überprüfung der o. g. Hypothesen zur Entstehung von Asthma-Gewittern scheitert momentan (noch) an der mangelhaften räumlichen Auflösung der vorhandenen aerobiologischen wie auch klimatologischen-/meteorologischen Datensätze, z.B. aus den Messnetzen des Polleninformationsdienstes oder des Deutschen Wetterdienstes, in denen die Abstände zwischen Stationen zwischen mehreren 10 und mehreren 100 Kilometern betragen. Vor allem fehlen atmosphärische Messungen in und um Gewitterzellen (D' Amato et al. 2016).

Vor dem Hintergrund von Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert, die auf eine künftige Zunahme der Gewittertätigkeit im Alpenraum sowie im Alpenvorland hindeuten (Schefzyk, Heinemann 2017) ist von Bedeutung inwiefern auch die Gesundheitssituation in Bayern in Hinblick auf Häufungen von Asthmaanfällen hiervon betroffen sein wird. Weiterhin war bis zum Projektbeginn unklar, ob das Phänomen Thunderstorm-Asthma in Bayern auch unterhalb der Schwelle einer Notsituation beobachtet werden kann.

Das TARA-Projekt fokussierte sich deshalb auf die Untersuchung des gewitterbedingten Asthma-Risikos in der Region Augsburg bzw. in erweiterter Form für ganz Bayern. Es wurde hierbei überprüft, ob ein statistisch-signifikanter Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Gewittern und dem gehäuftem Auftreten von Asthmaanfällen in Bayern nachgewiesen werden kann.

Grundlage für die Erfassung der Gewitterbedingung waren klimatologische Datensätze (Meilenstein 1) des Deutschen und des US-Amerikanischen Wetterdienstes sowie Blitzdaten der Firma Siemens (Kapitel 3). Zur Beschreibung der Asthmahäufigkeit wurden von der Kassenärztlichen Vereinigung Bayern (KVB) Daten bereitgestellt, die zum einen Notdiensteinsätze, zum anderen Praxis-Behandlungen von Atemwegsbeschwerden der gesetzlichen Krankenkassen in Bayern umfassen (Meilenstein 3). Ergänzt wurden die Patientendaten durch eine Panelstudie aus Augsburg zur Untersuchung von Pollenallergien (Kapitel 4, Meilenstein 2). Weiterhin wurden Pollen und Pilzsporendaten durch die TU-München mittels automatischen Pollensammlern in Augsburg erhoben und akquiriert sowie Daten des Elektronischen Polleninformationsnetzwerkes (ePIN) für Bayern herangezogen (Kapitel 5, Meilenstein 4).

3 Klimatologische Daten

3.1 Blitzdaten (BLI)

Zur Kennzeichnung der Gewittertätigkeit wurden Einzelblitzdaten durch die Firma Siemens für den Großraum Bayern (47,1°N bis 50,7°N und 8,8°E bis 14°E) zunächst für den Zeitraum 1992 bis 2017 zur Verfügung gestellt, wie sie auch von Piper und Kunz (2017) für eine Blitzstudie in Europa verwendet wurden. Bis zum Projektende konnte der Datensatz, im Weiteren mit der Abkürzung BLI gekennzeichnet, bis Ende 2018 aktualisiert werden. Zwischen 1992 und 2018 wurden hierbei 29.513.456 einzelne Blitze mit metergenauen Positionsangaben und millisekundengenauen Zeitstempeln sowie Typ und Stärke der Blitze erfasst. Aufgrund technischer Verbesserungen wurden ab August 2011 und nochmals ab Oktober 2016 mehr Blitze erfasst, die von Wolke zu Wolke verlaufen. Um durch diese Inhomogenität keine Artefakte im zeitlichen Verlauf zu verursachen, wurden deshalb nur Blitze zwischen Wolken und Boden verwendet. Für deskriptive Analysen wurden die geographischen Koordinaten des Gitternetzausschnittes in das UTM-Koordinatensystem (Zone 32U) transformiert, räumlich auf ein regelmäßiges Gitter mit 2 km Auflösung (analog zu Finke & Hauf 1996) zwischen Rechtswert 495.000 m und 855.000 m und Hochwert 5.234.000 m und 5.608.000 m sowie zeitlich in verschiedenen Auflösungen (15-minütig, stündlich, täglich, monatlich, jährlich, gesamter Untersuchungszeitraum) aggregiert.

Auf Basis des aufbereiteten Blitzdatensatzes für Bayern wurden anschließend Gewittertage definiert. Während Blitze eindeutig nur mit Gewittern in Zusammenhang stehen, sind Zustände anderer Variablen nicht vollkommen eindeutig mit Gewittern assoziiert. Als Gewittertage für einen bestimmten Ort wurden demnach im Projekt Tage definiert mit mindestens einem Blitz im Umkreis von 20 km um den Ort. Diese Definition wurde abgeleitet aus der Definition eines Gewittertages nach Finke & Hauf (1996), als Tag, an dem ein Donner an einer Station gehört wurde. Der Radius von 20 km richtet sich hierbei nach der Hörweite des Donners nach Reap & Orville (1990). Gewittertage wurden sowohl für alle Gitterpunkte des aufbereiteten Blitzdatensatzes als auch für die KVB-Notarztstandorte berechnet.

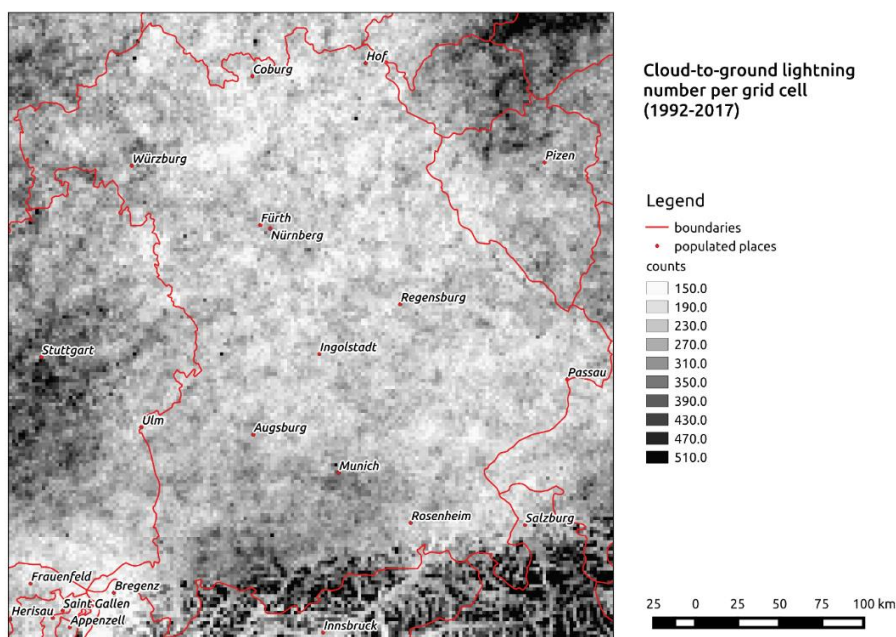


Abb. 1: Summe der Wolke-Boden-Blitze pro 2x2 km Gitterzelle im Zeitraum 1992-2018 (Datenquelle: BLI Siemens).

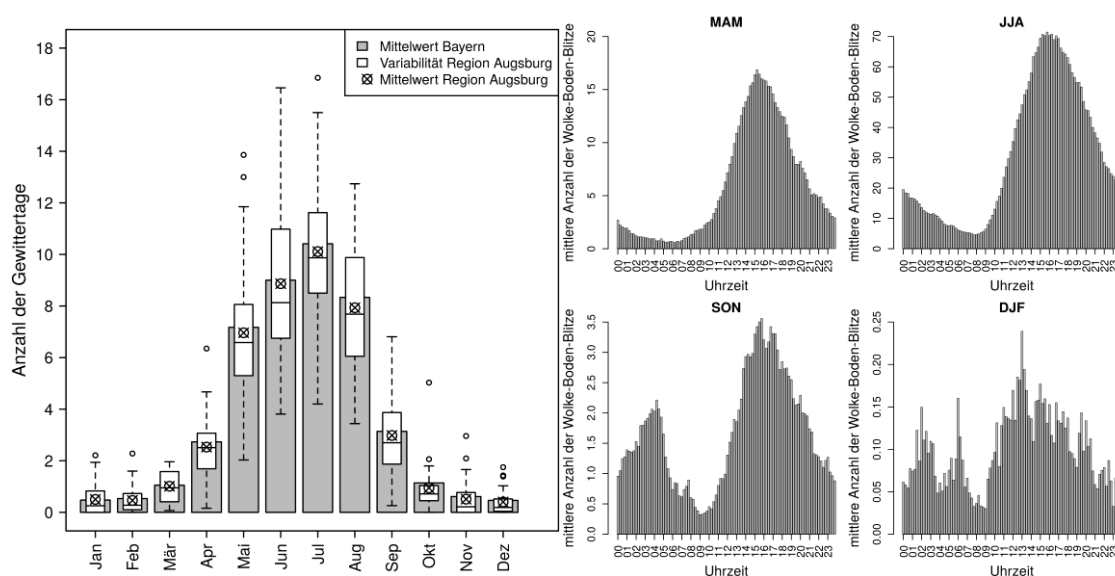


Abb. 2: Links: Jahrgang der Anzahl der Gewittertage: Monatsmittelwerte für Bayern und Variabilität sowie Mittelwert der Monatssummen für die Region Augsburg (10.24 bis 11.31°E und 48.08 bis 49.1°N). Box-Whisker-Plots kennzeichnen den Median sowie das 1. und 3. Quartil (untere bzw. obere Begrenzung der Box), Whisker umfassen den 1,5-fachen Interquartilsabstand ausgehend von der oberen bzw. unteren Begrenzung der Box. Rechts: Tagesgang der Anzahl der Wolke-Boden-Blitze in Bayern in viertelstündlicher Auflösung differenziert nach Jahreszeit, MAM=März-Mai, JJA=Juni-August, SON=September-November, DJF=Dezember-Februar (Datenquelle: BLI Siemens).

Die Gewitteraktivität folgt einem charakteristischen Jahrgang, wie Abb. 2 für Bayern und die Region Augsburg erkennen lässt. Sowohl die absoluten Blitzanzahlen als auch die Anzahl der Gewittertage pro Monat weisen ein Maximum im Juli auf (ca. 11 Gewittertage). Die Hauptgewittersaison umfasst hierbei die Monate von Mai bis August, innerhalb dieses Zeitraums treten ca. 93 % der Blitze eines Jahres auf. Das Minimum mit weniger als einem Gewittertag pro Monat befindet sich im Winter. Bei der Anzahl der Gewittertage fällt zudem auf, dass die Region Augsburg (definiert als rechteckiger Ausschnitt, der die Landkreise Augsburg, Aichach/Friedberg, Dillingen an der Donau und Donau-Ries beinhaltet) ganzjährig Werte unterhalb des bayerischen Durchschnitts aufweist (vgl. Abb. 2 links). Der Tagesgang

der Gewitteraktivität zeigt, dem Tagesgang der Lufttemperatur folgend, bei ganzjähriger Betrachtung ein Maximum am Nachmittag (15 Uhr UTC) und ein Minimum in den Morgenstunden (7 Uhr UTC, nicht dargestellt). Dies trifft aufgrund der starken konvektiven Gewittertätigkeit insbesondere im Frühjahr und Sommer zu, während im Herbst und Winter in Folge der relativ gesehen häufigeren Frontalgewitter deutliche Abweichungen von diesem typischen Verlauf zu beobachten sind (vgl. Abbildung 2 rechts). Diese saisonale Differenzierung des Tagesgangs der Gewitteraktivität stimmt gut mit den Ergebnissen von Wapler (2013) für Zentraleuropa überein.

Der Jahresgang der Gewitteraktivität wird auch räumlich anhand monatlicher Karten der Blitzdichte deutlich, wie Abb. 3 erkennen lässt. Zwischen Oktober und März treten die wenigsten Blitze auf, April und September können als Übergangsmonate betrachtet werden, die Hauptgewitteraktivität und eine ausgeprägte räumliche Differenzierung der Blitzdichte, beispielsweise anhand der Orographie, ist von Juni bis August zu erkennen.

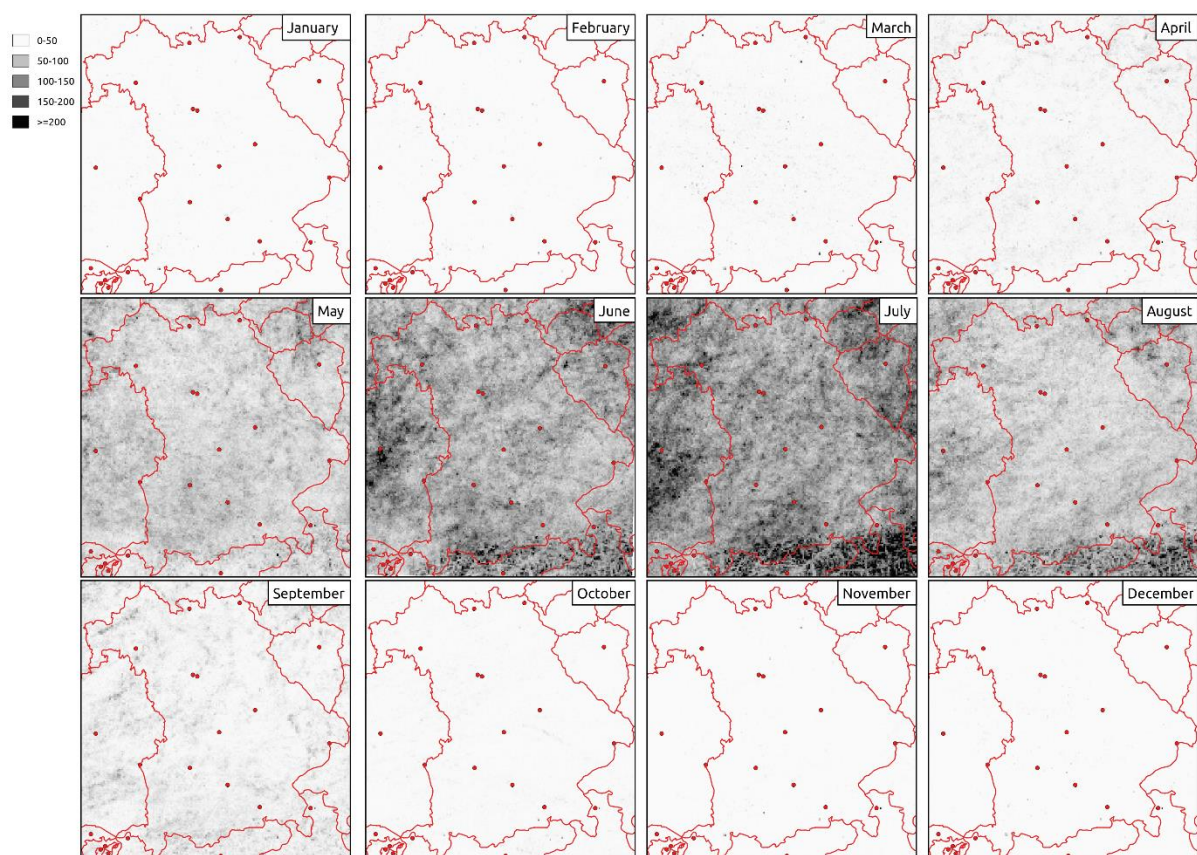


Abb. 3: Monatliche räumliche Verteilung der Blitzdichte (nur Wolke-Boden-Blitze) auf einem 2x2 km Raster in Bayern, Zeitraum: 1992-2017 (Datenquelle: BLI Siemens).

Neben saisonalen Schwankungen der Gewitteraktivität, lässt sich auch eine deutliche interannuelle Variabilität sowohl der Blitzdichten als auch der Anzahl der Gewittertage (Anzahl der Tage mit mind. einem Blitz, s.o.) in Bayern ausmachen. Durchschnittlich ca. 350.000 Wolke-Boden-Blitze werden pro Jahr in Bayern detektiert, das entspricht etwa 2.5 Blitzen auf einem km² im Jahr, wobei dieser Wert im Zeitraum von 1992 bis 2018 zwischen 0.77 pro km² und 4.5 pro km² schwankt. Im Zeitraum bis 2007 scheint bei den Blitzzahlen eine steigende Tendenz erkennbar zu sein, die sich danach allerdings wieder abschwächt. Wie die monatlichen Anzahlen der Gewittertage ist auch die Anzahl der Gewittertage pro Jahr in den meisten Jahren im Untersuchungszeitraum im bayerischen Durchschnitt höher als in der Region Augsburg und stimmt damit mit den Erkenntnissen aus Abb. 2 (links) überein. Sie

variiert zwischen 25 und 65 Tagen pro Jahr (vgl. Abb. 4). Dass die Maxima der Blitzdichte und Gewittertage nicht synchron, d.h. in den gleichen Jahren, auftreten, deutet darauf hin, dass auch die Gewitterintensität variiert (nicht dargestellt).

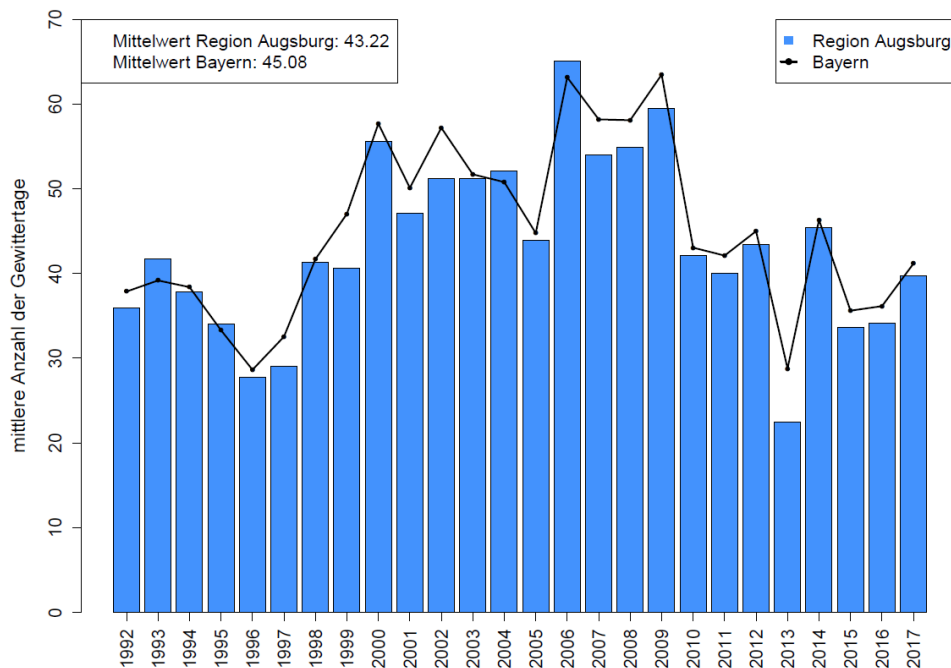


Abb 4: Interannuelle Variabilität der Anzahl der Gewittertage in Bayern und der Region Augsburg sowie mittlere jährliche Anzahl der Gewittertage der Jahre 1992-2017 (Datenquelle: Siemens).

Die beschriebenen Blitzdaten fanden sowohl als Einzelblitzdaten Eingang in die Analysen (Kap. 6) als auch in Form eines Gewitterzellenkatalogs, dessen Erstellung in Kap. 6.1. erläutert wird.

3.2 Niederschlagsradar (RAD)

Zur weiteren Kennzeichnung der Gewitteraktivität mithilfe der Niederschlagsintensivität wurden Daten des Niederschlagsradarnetzes des Deutschen Wetterdienstes (RADOLAN, Radar-Online-Aneichung) herangezogen (Weigl & Winterrath 2010). Diese Daten liegen seit 2001 flächendeckend in Stundenzeitschritten und einer räumlichen Auflösung von einem Quadratkilometer vor. Um eine Angleichung an das Gitter der Blitzdichteanalyse zu erreichen, wurden die Daten auf ein 2km x 2km Gitternetz umgerechnet.

Anhand des Flächenniederschlags lassen sich die mittels der Blitzaktivität abgeleiteten Schwankungen des regionalen Gewittergeschehens der Modellregion Augsburg nachvollziehen. Zunächst zeigen die mittleren jährlichen Niederschlagssummen für ganz Deutschland, dass Südbayern zu den Regionen mit dem meisten Niederschlag in der Bundesrepublik gehört (vgl. Abb. 5). In Bayern stellen die Alpen und das Alpenvorland die Regionen mit den höchsten Niederschlagsmengen dar, aber auch im Bayerischen Wald, Thüringer Wald und in der Rhön sind lokale Maxima zu erkennen. Die räumliche Differenzierung des mittleren Flächenniederschlags ist somit vor allem orographisch bedingt.

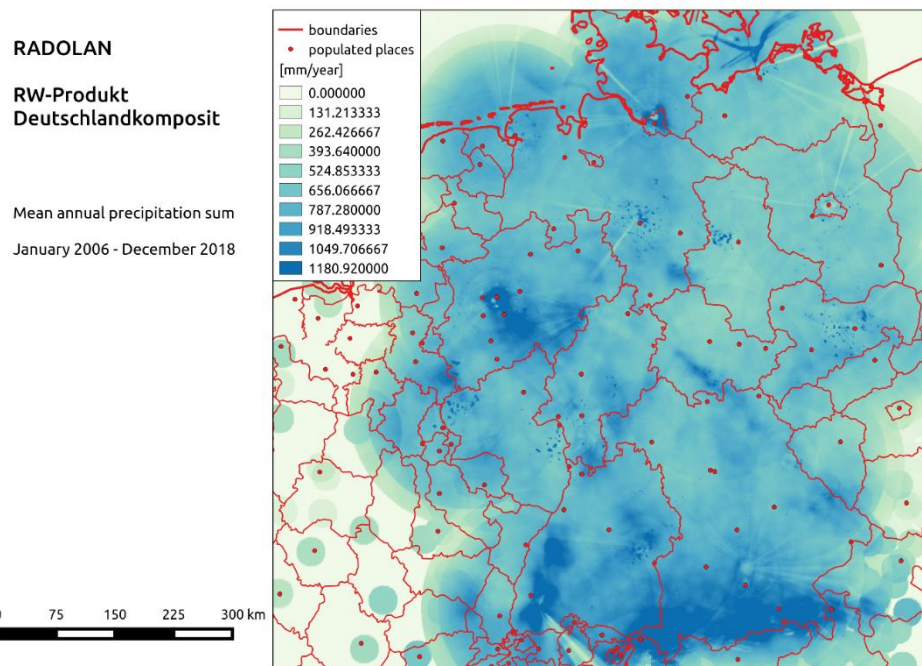


Abb. 5: Mittlere jährliche räumliche Niederschlagsverteilung basierend auf RADOLAN-Daten des DWD von 2006 bis 2018 (Datenquelle: DWD).

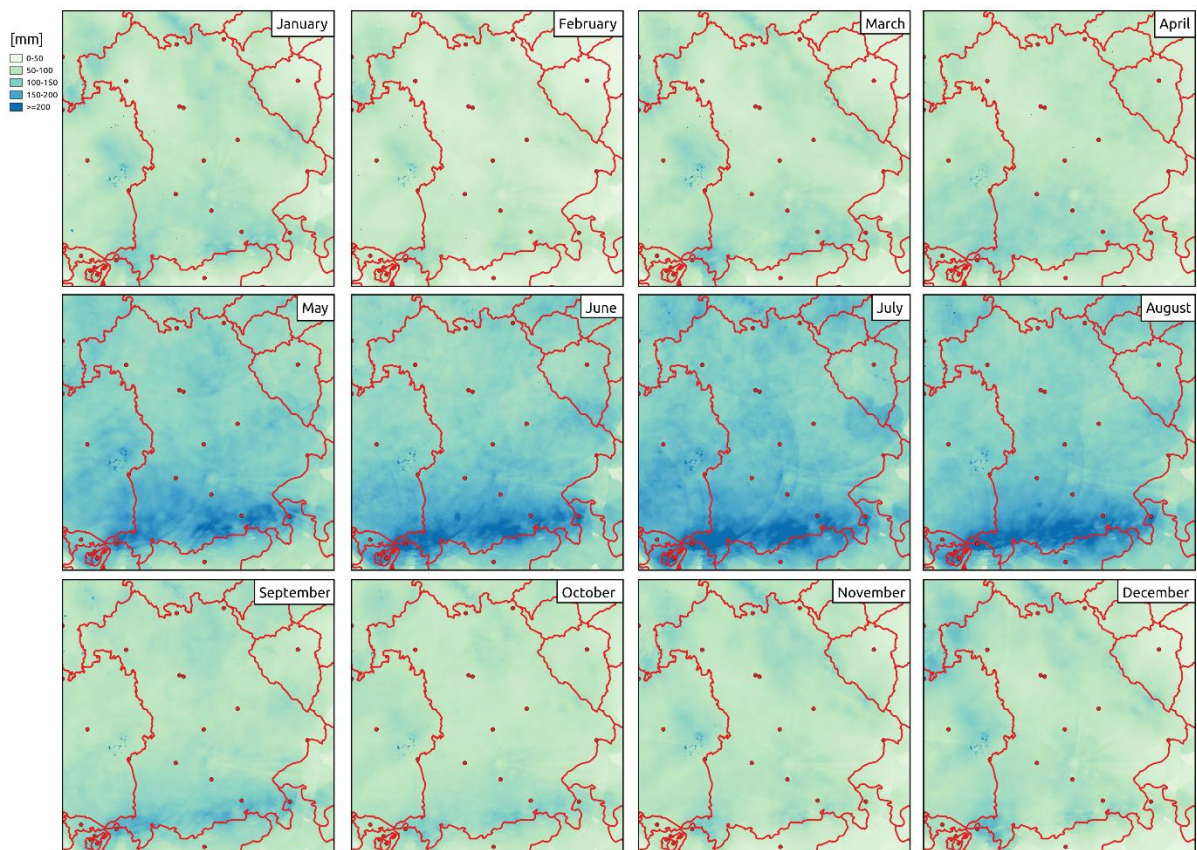


Abb. 6: Monatliche räumliche Verteilung der Niederschlagshöhen in Bayern basierend auf RADOLAN-Daten des DWD (Datenquelle: DWD).

Im Hinblick auf saisonale Niederschlagsschwankungen, weist die monatliche Niederschlagsverteilung in Bayern ein deutliches Maximum im Sommer auf (vgl. Abb. 6). Von Mai bis September manifestiert sich die deutliche orographische Differenzierung mit Maxima in den Alpen und dem Alpenvorland, in den anderen Monaten sind die räumlichen

Unterschiede weniger ausgeprägt. Dementsprechend ist die sommerliche Niederschlagsvariabilität vorwiegend konvektiv geprägt, während das Niederschlagsregime im Winter und während der Übergangsjahreszeiten stärker mit dem zyklonalen Frontengeschehen der außertropischen Westwinddrift gekoppelt ist. Diese räumlichen und zeitlichen Niederschlagsmaxima stimmen mit denen der Gewitteraktivität (vgl. Abb. 3) überein und verweisen auf die Repräsentativität von Niederschlagsspitzen für auftretende Gewitter, zumindest in den Sommermonaten.

3.3 DWD-Stationsdaten (DWD)

Im Zuge der Gewittertypisierung wurden weiterhin Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) herangezogen. Hierzu wurden insbesondere Wind-, Temperatur- und Luftfeuchtedaten der nächstgelegenen DWD-Station einer Gewitterzelle bzw. eines Standorts mit Asthmafällen in Bayern extrahiert und durch Kontrolle der Stichprobenverteilungen überprüft. Grundlage waren 120 DWD-Hauptbodenstationen, die an Variablen Temperatur, Luftfeuchte, Wind und Luftdruck vorhalten, in Bayern Thüringen, Hessen und Baden-Württemberg. Die räumliche Erweiterung stellt sicher, dass auch bei Gewitterzellen nahe der Grenze die jeweils nächstgelegene Station herangezogen wird. Ergänzt wurde das Stationskollektiv um 90 Stationen, die lediglich Luftdruck vorhalten und 238 Stationen, die lediglich Temperatur und Luftfeuchte messen. Herangezogen wurden stündliche Werte ab dem Jahr 2005.

3.4 Analysedaten des Wettersvorhersagesystems Global Forecast System (GFS)

Zur flächendeckenden Beschreibung der meteorologischen Randbedingungen wurden Analysedaten des US-Amerikanischen Wettersvorhersagemodells GFS (Global Forecast System) verwendet. Die Daten liegen in dreistündigen Abständen für alle relevanten meteorologischen Variablen mit einer räumlichen Auflösung von $0,5^\circ$ seit 2007 vor und werden fortlaufend aktualisiert. Die Variablen umfassen dabei: CAPE (Convective Available Potential Energy), CIN (Convective Inhibition), 4LFTX (Lifted Index), HPBL (Grenzschichthöhe), HGT (geopotentielle Höhe), TMP (Temperatur), WSPD (Windgeschwindigkeit) sowie RH (Relative Luftfeuchte). Die Variablen HGT, TMP, WSPD und RH wurden für die atmosphärischen Höhenniveaus 1000, 925, 850, 700, 500, 300 und 200 hPa extrahiert. Der CAPE-Index stellt ein Maß der in der Atmosphäre für Konvektion vorhandene Energie dar. Demnach sind hohe Werte dieses Index ein Hinweis auf starke konvektive Bewegung und damit verbundene starke Gewittertätigkeit. CI, die Convective Inhibition („Konvektionshemmung“), ist die Energie, die ein Luftpaket am Aufstieg hindert und somit ein limitierender Faktor für Konvektion. Niedrige Werte der CI sind für die Gewitterentstehung günstig. Der Lifted Index berechnet sich als weiteres Maß für die Stabilität der atmosphärischen Schichtung aus der Differenz der Temperatur eines Luftpakets, das adiabatisch auf das 500 hPa-Niveau angehoben wurde, und der Temperatur der dortigen Umgebung. Positive Werte deuten auf eine stabile, negative auf eine labile Schichtung hin. Nach Kontaktaufnahme mit der NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) konnten ursprüngliche Datenlücken beseitigt werden. Der Vorzug der GFS-Daten im Vergleich zu anderen Reanalysedaten liegt in der Verfügbarkeit von jeweils aktuellen Vorhersagedaten bis zu zwei Wochen in die Zukunft und damit in einer potentiellen Eignung für darauf aufbauende Vorhersagestatistiken.

4 Patientendaten

Insgesamt konnten drei verschiedene medizinische Datensätze verfügbar gemacht werden, aus denen sich die Stichprobenpopulation für die anschließenden Analysen ergab. Die Notarztdienstdaten (NAD) der Kassenärztlichen Vereinigung Bayern standen in einer ersten räumlich grob aufgelösten Variante (NAD1) schon ab Beginn des Projektes zur Verfügung und beschreiben Notdienstesinsätze in Zusammenhang mit Asthma und weiteren Atemwegserkrankungen in ganz Bayern. Gegen Ende des Projekts konnte eine zweite Version mit höherer Auflösung (NAD2) akquiriert werden. Ein zweiter Datensatz, der ebenfalls gegen Ende des Projekts verfügbar wurde, beinhaltet Behandlungsdaten der gesetzlichen Krankenversicherungen (GKV), ebenfalls in ganz Bayern. Im Unterschied zum NAD-Datensatz werden hier die Behandlungen in Praxen inklusive des Bereitschaftsdienstes. Aufgrund von Inhomogenitäten und störender praxisbedingter zeitlicher Dynamik konnten mit diesem Datensatz jedoch keine belastbaren Ergebnisse erzielt werden. Der dritte Datensatz beinhaltet Daten einer Panelstudie in Augsburg und München (PAN), in der detaillierte Daten zum Verlauf von Asthmasymptomen einzelner Patienten erfasst sind, wodurch die Symptomatik deutlich zuverlässiger abgebildet wird als in den beiden ersten Datensätzen. Hingegen ist die zeitliche und räumliche Abdeckung hier nur sehr eingeschränkt gegeben.

4.1 Notdienstdaten der Kassenärztlichen Vereinigung Bayern (NAD)

Der Großteil der Analysen baut auf Daten des Notarztendienstes (NAD) der Kassenärztlichen Vereinigung Bayern (KVB) auf, da dieser Datensatz in einer ersten Variante gleich zu Projektbeginn zur Verfügung stand. Entgegen ursprünglicher Planung konnten lediglich Daten ab 2010 und nicht ab 2005 durch die KVB zur Verfügung gestellt werden. Eine Ergänzung und Aktualisierung fand im Dezember 2019 statt, wodurch eine zeitliche Abdeckung von 1.1.2010 bis 30.6.2018 erreicht werden konnte. In der ersten Version des Datensatzes, im Weiteren als NAD1 bezeichnet, der den Zeitraum 1.1.2010 bis 8.3.2017 umfasst, war nur eine grobe Verörtlichung der Notfälle über Ortsnamen der Notdienststandorte möglich. Im Zuge der Qualitätskontrolle hinsichtlich Datenkonsistenz für die Kennzeichen der Notdienstfälle wurden uneinheitliche oder fehlende Bezeichnungen sowohl für die Ortsangabe als auch für die ICD-Angabe festgestellt, was eine manuelle Normierung der Angaben sowie den Ausschluss unvollständig beschriebener Fälle notwendig machte. In einer zweiten Version des Datensatzes, im Weiteren als NAD2 bezeichnet, konnte die Verörtlichung durch die Angabe von Postleitzahlengebieten ersetzt werden. Die ursprüngliche zeitliche Auflösung von einem Tag wurde weiterhin durch die Angabe der Uhrzeit verbessert. Der Zeitraum umfasst die o.g. Periode 1.1.2010 bis 30.6.2018. Darüber hinaus wurden Angaben zur Altersgruppe und dem Geschlecht der Patienten übermittelt, wobei die beiden letztgenannten Differenzierungsattribute keine erkennbar verschiedenen Zusammenhangscharakteristika erbrachten. Die Diagnose des Notfalls wird durch die Notdienstärzte vorgenommen und kann maximal drei Diagnosetypen, die durch die Angabe der ICD-Codes (International Classification of Diseases) differenziert werden, erfolgen. Der Datensatz beinhaltet diejenigen Diagnosefälle, die eine Erkrankung der Atemwege betreffen. Hintergrund dieser relativ umfangreichen Auswahl, ist die Annahme, dass ggf. unerkannte allergische Reaktionen auch eine akute Verschlechterung respiratorischer Vorerkrankungen mit sich bringen können. Dieses Vorgehen wurde von der KVB insbesondere durch die Information gestützt, dass die angegebenen Diagnosen lediglich auf einer schnellen Ersteinschätzung der Ärzte erfolgt und nicht aufgrund einer eingehenden Untersuchung. Die hierbei erfassten Diagnosen sind in

Tabelle 1 aufgeführt. Eine Gruppierung der Diagnosen in Gruppen mit ähnlichen Charakteristika (AA, AB, C, D und E) erlaubt hierbei eine weitere Aufschlüsselung der Notfälle.

Tab. 1: Gruppierung der erfassten Diagnosen nach ICD10 (International Classification of Diseases). Zur Differenzierung von COPD (Chronische obstruktive Lungenkrankheit) wird die sog. Einsekundenkapazität (FEV1: engl. Forced Expiratory Pressure in 1 Second) herangezogen, die beschreibt wieviel Liter Luft pro Sekunde maximal ausgeatmet werden kann als Prozent des von Geschlecht und Körpergröße abhängigen Sollwertes. Einige Diagnosen werden nach ICD nicht weiter differenziert und werden nur mit einem Buchstaben und einer Zahl beschrieben. Die Hinzunahme von Diagnosen, die nicht direkt auf Allergien zurückzuführen sind, erfolgt, um auch unerkannte Allergiefälle einzuschließen, da die Ersteinstufung der Notfälle vor Ort ohne eingehende Untersuchung zur Diagnostik erfolgt.

1) Gruppe AA: Allergisches Asthma	J45.0 Allergisches Asthma
	J46 Schweres Asthma
2) Gruppe AB: Nicht-allergisches Asthma	J45.1 Nichtallergisches Asthma
	J45.8 Mischformen des Asthma bronchiale
	J45.9 Asthma bronchiale nicht näher bezeichnet
	F54 Psychogenes Asthma
	J82 Eosinophiles Asthma
3) Gruppe C: COPD	J44.10 chronisch asthmatische Bronchitis mit akuter Exazerbation, nicht näher bezeichnet (FEV1 <35% des Sollwertes)
	J44.11 chronisch asthmatische Bronchitis mit akuter Exazerbation, nicht näher bezeichnet (FEV1 ≥35% und <50% des Sollwertes)
	J44.12 chronisch asthmatische Bronchitis mit akuter Exazerbation, nicht näher bezeichnet (FEV1 ≥50% und <70% des Sollwertes)
	J44.13 chronisch asthmatische Bronchitis mit akuter Exazerbation, nicht näher bezeichnet (FEV1 ≥70% des Sollwertes)
	J44.19 chronisch asthmatische Bronchitis mit akuter Exazerbation, nicht näher bezeichnet (FEV1 nicht näher bezeichnet)
	J44.00 chronisch asthmatische Bronchitis mit akuter Infektion der unteren Atemwege (FEV1 <35% des Sollwertes)
	J44.01 chronisch asthmatische Bronchitis mit akuter Infektion der unteren Atemwege (FEV1 ≥35% und < 50% des Sollwertes)
	J44.02 chronisch asthmatische Bronchitis mit akuter Infektion der unteren Atemwege (FEV1 ≥50% und < 70% des Sollwertes)
	J44.03 chronisch asthmatische Bronchitis mit akuter Infektion der unteren Atemwege (FEV1 ≥70% des Sollwertes)
	J44.09 chronisch asthmatische Bronchitis mit akuter Infektion der unteren Atemwege (FEV1 nicht näher bezeichnet)

4) Gruppe D: Dyspnoe	R06.0 akute Atemnot
	R06.1 Stridor
	R06.2 ziehende Atmung
	R06.4 Hyperventilation
	R06.88 Atemlosigkeit
	R09.2 Kardiorespiratorische Insuffizienz
	J80.09 Atemnotzustand
	J96.99 Respiratorische Dyspnoe
5) Gruppe E: Heuschnupfen	J30.1 Allergische Rhinopathie durch Pollen

Der Großteil der Notfälle (insgesamt 188672 Fälle) umfasst die Diagnosegruppen C und D. Wie aus Abb. 7 ersichtlich, nimmt die Gesamtzahl der erfassten Notfälle mit der Zeit leicht zu. Zudem ist ein Jahresgang mit Peak im Winter zu beobachten. Demgegenüber zeigt Abb. 8 oben einen abnehmenden Trend für explizite Asthmadagnosen. Als Ursache hierfür wird die zunehmend bessere medikamentöse Versorgung der Patienten angeführt. Weiterhin ist für Gruppe AA (allergisches Asthma) ein deutlich ausgeprägter Jahresgang mit Peak im Frühjahr bis Sommer festzustellen. Als problematisch einzustufen ist die naturgemäß niedrige Fallzahl der Notrufdienstfälle für Gruppe AA (allergisches Asthma) zwischen 19 und 99 pro Monat, bei Aufschlüsselung auf die 2062 Postleitzahlengebiete in Bayern.

Abb. 8 unten zeigt die monatlichen Fallzahlen für die Städte München, Nürnberg und Augsburg. Aufgrund der geringeren Fallzahlen ist der Trend hier weniger deutlich ausgeprägt, aber dennoch erkennbar. Abb. 9 zeigt die räumliche Verteilung der Notdiensteinsätze pro Einwohner der Postleitzahlengebiete. Hierbei sind durchaus räumliche Muster zu erkennen, die auf tendenziell höhere Zahlen in peripheren Räumen hindeuten, was mit höheren Distanzen zu Einrichtungen mit Notaufnahmen zusammenhängen kann. Da derartige Faktoren jedoch als zeitlich konstant angesehen werden können, ist nicht von einer negativen Auswirkung auf die Untersuchung auszugehen.

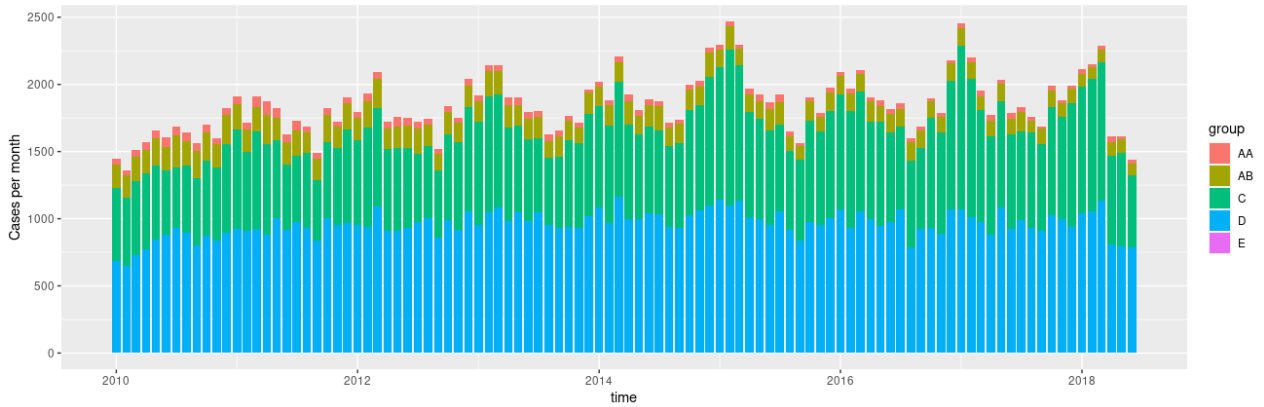


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der monatlichen Häufigkeit der Notdienstfälle in Bayern mit Diagnosen zur Atemwegserkrankung aufgeschlüsselt nach den Diagnosegruppen in Tab. 1. für den Datensatz NAD2.

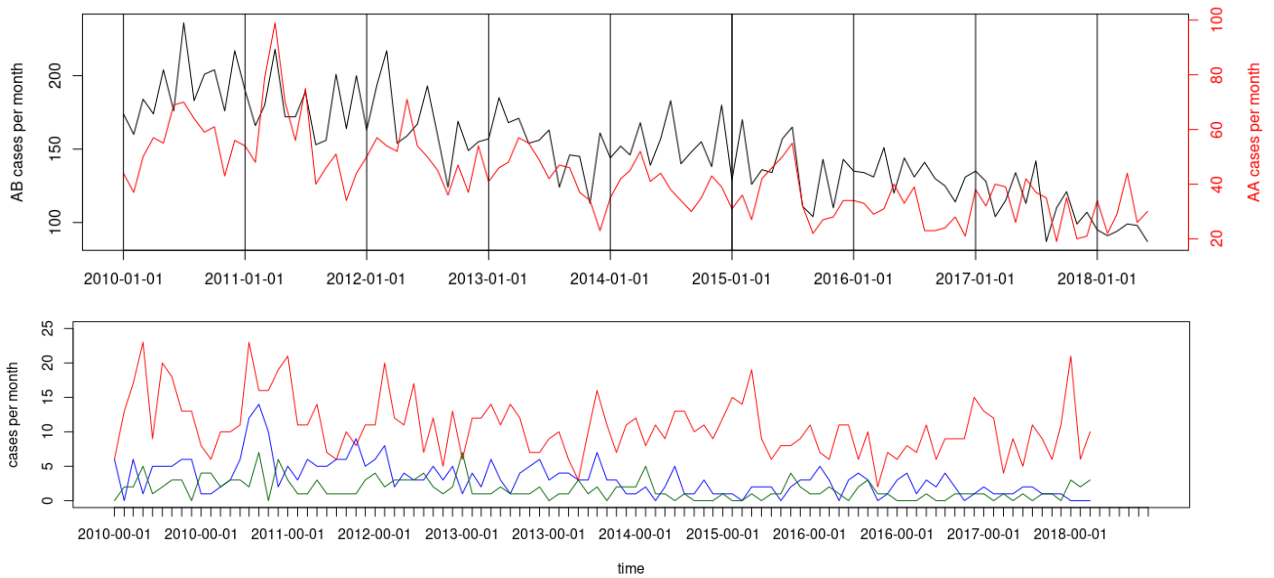


Abb. 8: Oben) Zeitlicher Verlauf der monatlichen Häufigkeit von Notfällen der Diagnosegruppe AA (Rot) und AB (Schwarz) aus Tab. 1. Unten) Asthma-Aufttrittshäufigkeiten der Diagnosegruppe AA der drei größten bayerischen Städte München (rot) Nürnberg (blau) und Augsburg (grün) für den Datensatz NAD2.

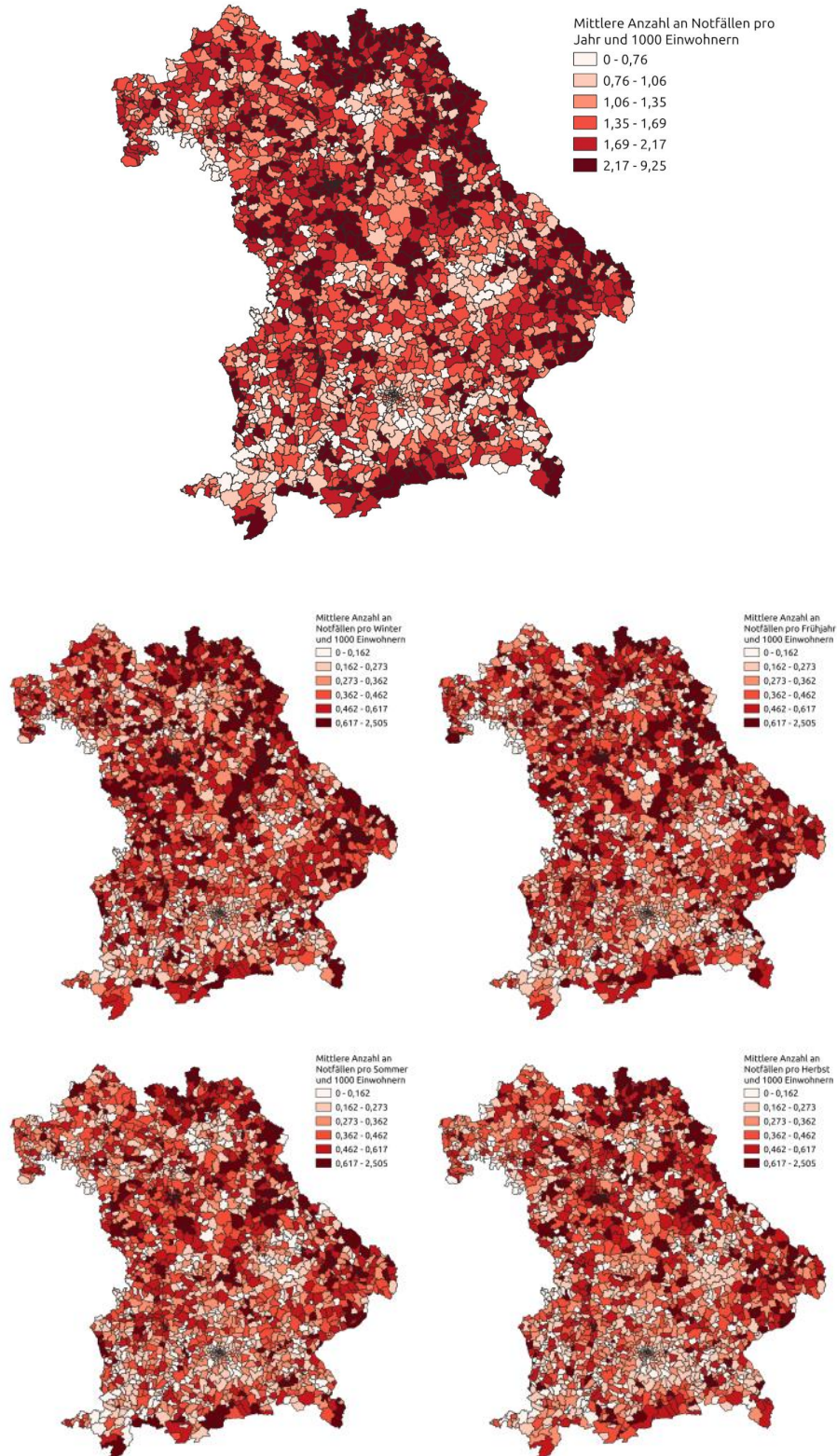


Abb. 9: Oben: Räumliche Verteilung der Notdiensteinsätze bei Atemwegserkrankungen der KVB in Bayern (alle Diagnosen aus Tab. 1) pro 1000 Einwohner und Jahr für Postleitzahlengebiete gemittelt über die Jahre 2010 bis 2017 (Datensatz NAD2). Um die Verteilung der sehr unterschiedlichen Anzahlen erkennbar zu machen, erfolgte die Klasseneinteilung nicht linear, sondern nach Quantilsintervallen, d.h. in jeder der sechs Klassen befinden sich gleich viele Postleitzahlengebiete. Unten: Saisonale Differenzierung der Notfalleinsätze pro 1000 Einwohner wie oben jedoch nach den Jahreszeiten: Winter (links oben): Januar, Februar und Dezember, Frühjah (rechts oben): März, April und Mai, Sommer (links unten): Juni, Juli und August und Herbst (rechts unten): September, Oktober und November.

4.2 Behandlungsdaten der gesetzlichen Krankenversicherungen in Bayern (GKV)

Ein weiterer umfangreicher Datensatz zu Behandlungsfällen von Atemwegserkrankungen der gesetzlichen Krankenversicherungen (GKV) in Bayern konnte nach aufwändigen Anonymisierungsverfahren durch die KVB zur Verfügung gestellt werden. Dieser Datensatz, der die Behandlungen der Arztpraxen und des Bereitschaftsdienstes jedoch keine Notdiensteinsätze enthält, war, ebenso wie die unten genannten Paneldaten, als Ersatz vorgesehen für eine ursprünglich geplante Datenerhebung am Universitätsklinikum Augsburg, die aufgrund des Aufwands bei der Datenerfassung und -verarbeitung nicht mehr rechtzeitig erfolgen konnte. Die Erfassung der Klinikpatienten mit Atemwegserkrankungen, konnte nicht wie ursprünglich geplant über Datenbankabfragen durchgeführt werden, da zum einen, anders als erwartet, für das Projekt unzureichende Angaben digital verfügbar waren und eine manuelle Erfassung den Rahmen weit überstiegen hätte. Zum anderen ergaben sich aufwändige rechtliche Hürden des Datenschutzes, für die noch keine Routinen bestanden. Auch an der KVB, die einen hochroutinierten Umgang mit den Daten pflegt, führten wechselnde Beurteilungen, insbesondere aufgrund von Änderungen der gesetzlichen Lage während der Projektlaufzeit, zu einer erheblichen Verzögerung der Datenabgabe für die Datensätze NAD2 und GKV von ca. 2,5 Jahren. Aufgrund der späten Datenübermittlung und aufwändiger Datenvorprozessierung konnten diese Daten somit erst gegen Ende des Projektes genutzt und nur initial ausgewertet werden. Um dennoch Detailanalysen durchzuführen, wurde zusätzlich der unten beschriebene Datensatz PAN herangezogen, womit die diesbezüglichen Projektziele erreicht werden konnten.

Der GKV-Datensatz umfasst die Behandlungsfälle aus ganz Bayern, und wurde entsprechend für das gesamte Gebiet ausgewertet. Zur Verfügung stehen die Gruppenkennungen der Diagnosegruppen aus Tabelle 1, Altersgruppe und Geschlecht, die räumliche Information in Form von Geomarkets, die die Anonymisierung gewährleisten, sowie das Datum der einzelnen Fälle.

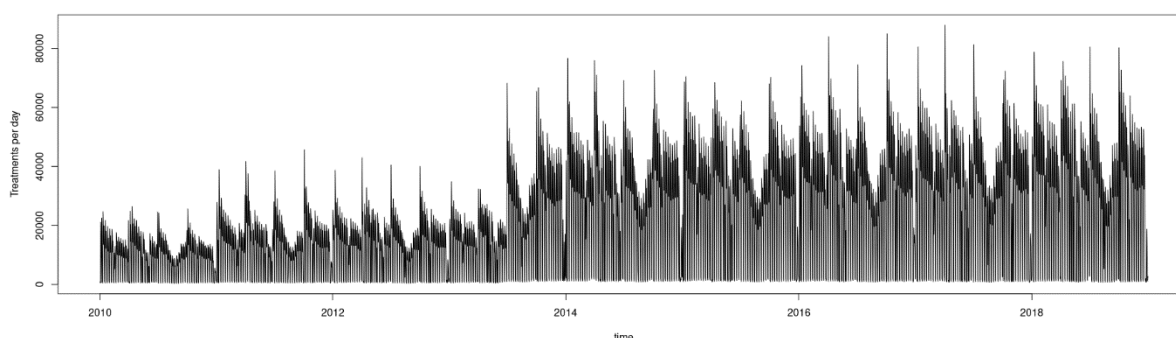


Abb. 10: Häufigkeitsdaten der Behandlungsfälle von Atemwegserkrankungen der gesetzlichen Krankenversicherungen pro Tag in ganz Bayern zwischen 1.1.2010 und 30.6.2018 (Datensatz GKV). Erfasst sind alle in Tab. 1 aufgeführten Diagnosen im Zusammenhang mit Atemwegserkrankungen.

Abb. 10 zeigt die Zeitreihe der Häufigkeiten aller Behandlungsfälle von Atemwegserkrankungen der gesetzlichen Krankenversicherungen. Auffällig sind zunächst zwei Inhomogenitäten Ende 2010 und Ende des zweiten Quartals 2013, die offensichtlich den Umfang der erfassten Fälle betreffen. Weiterhin ist ein markanter systematischer Trend innerhalb eines jeden Quartals zu erkennen, der wohl verwaltungstechnische Ursachen hat.

Zudem sind erhebliche Schwankungen im Wochenzyklus sowie mit Feiertagen und Schulferien verbunden, die auf Öffnungszeiten der Praxen und Reisetätigkeit potentieller Patienten zurückzuführen sind. Diese, im Folgenden als praxisbedingt bezeichneten, Schwankungen, die nicht auf Umwelteinflüsse, d.h. insbesondere Gewitter zurückzuführen sind, erschweren eine Zusammenhangsanalyse erheblich. Die in Abb. 10 gezeigten Spannweiten der Fallzahlschwankungen, die praxisbedingt verursacht sind, übersteigen die Restvariabilität um ein Vielfaches, weshalb die Daten in einem mehrstufigen Verfahren aufbereitet wurden.

In einem ersten Schritt werden die Fallzahlen auf das Niveau des letzten Abschnitts nach Juli 2013 skaliert. Als Skalierungsfaktor diente jeweils das Verhältnis des Medians der letzten Periode zum Median der Periode Januar 2010 bis Dezember 2011 und Januar 2011 bis Juli 2013. In einem zweiten Schritt wurden die Fallzahlen jeweils für die Wochentage Montag bis Samstag getrennt standardisiert. Alle Feier- und Ferientage wurden im Weiteren ausgeschlossen. Schließlich wurden die Fallzahlen eines jeden Quartals mithilfe einer Regression auf ein Polynom dritten Grades der Tageszahl im Quartal gefitted (Abb. 11). Eine einfache lineare Regression mit den Quartalstagzahlen erwies sich als unzulänglich die praxisbedingte Dynamik widerzuspiegeln.

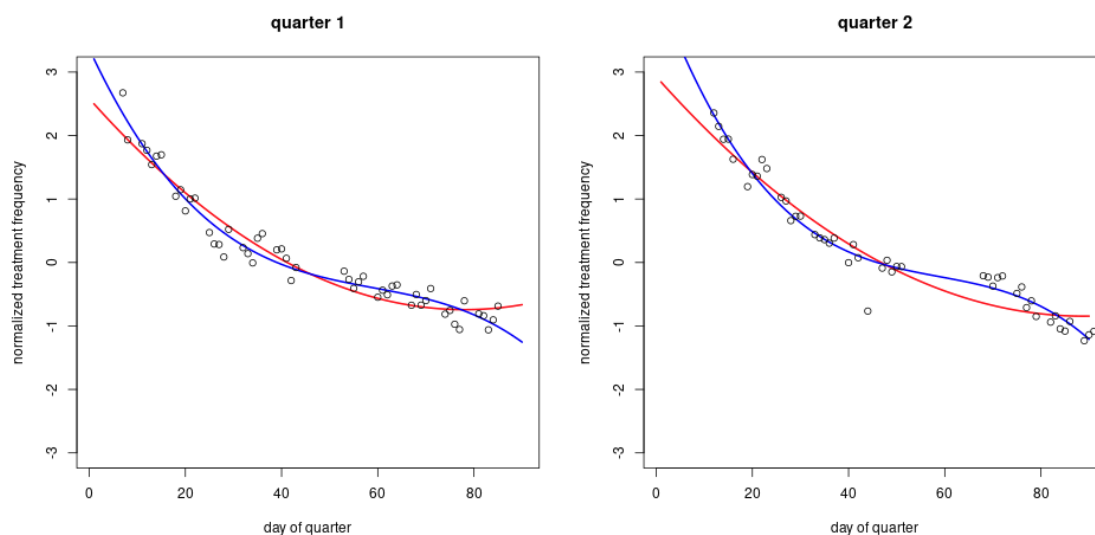


Abb. 11: Beispiel zur Filterung der praxisbedingten Quartalsdynamik der GKV-Fallzahlen (Datensatz GKV). Zu sehen sind die täglichen Fallzahlen des Quartals 1/2010 (links) und 2/2010 (rechts) als schwarze Kreise, ein an die Daten angepasstes Polynom zweiten Grades (rot) sowie dritten Grades (blau). Die Differenz zwischen den Rohdaten und den blauen Polynomkurven wird als von der Quartalsdynamik unbeeinflusst angenommen.

In einem letzten Schritt wurden Tage mit Differenzen zum Vortag von größer einer Standardabweichung sowie Tage mit Extremwerten von kleiner einer Standardabweichung und größer 4 Standardabweichungen gefiltert, um offensichtlich verbliebene Artefakte zu eliminieren (siehe Abb. 12).

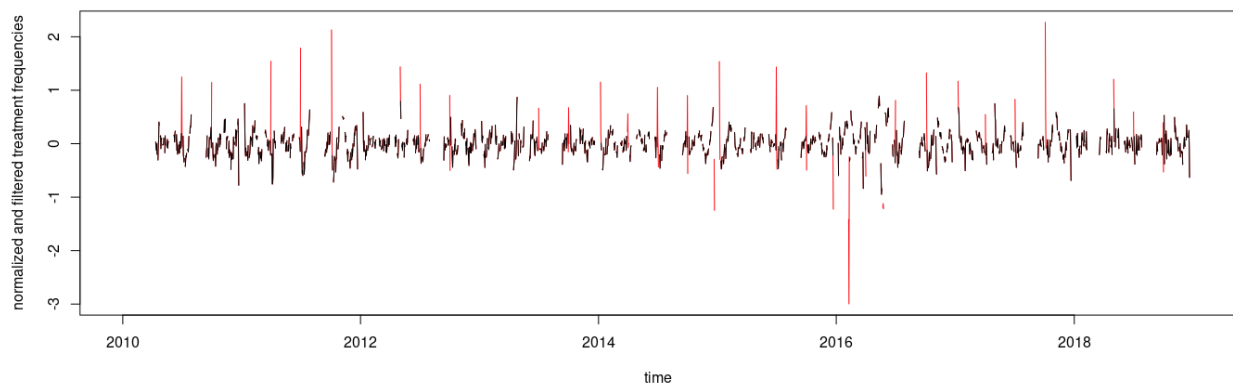


Abb. 12: Zeitreihe der in den nachfolgenden Analysen in Kapitel 6.2.2 behandelten GKV-Fälle (Datensatz GKV). Rot: nach Beseitigung der systematischen praxisbedingten Einflüsse. Schwarz: nach zusätzlicher Filterung von verbliebenen Extremwerten.

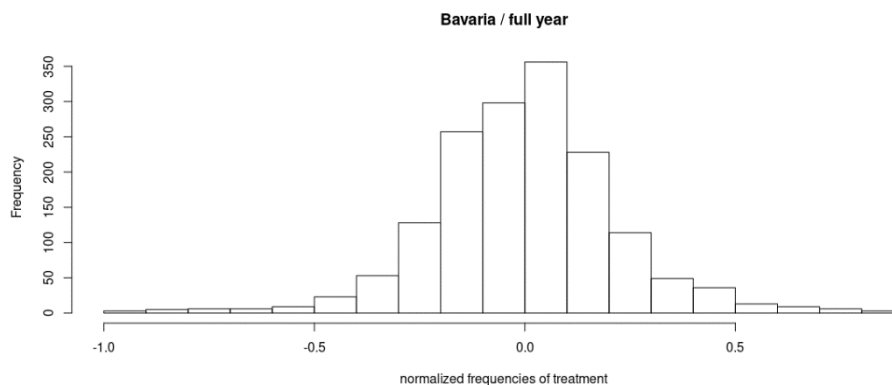


Abb. 13: Histogramm der normalisierten und gefilterten täglichen GKV-Behandlungsdaten ganzjährig für ganz Bayern (Datensatz GKV).

Die Verteilung der resultierenden Daten ist in Abb. 13 dargestellt. Ein Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung ergibt mit einem p-value von $2.2e-16$, d.h. faktisch null, eine signifikante Verschiedenheit von der Normalverteilung, die auf die Linksschiefe der Verteilung zurückzuführen ist. Insgesamt deutet die stetige und unimodale Verteilung jedoch nicht auf gravierende verbleibende praxisbedingte Anteile der Varianz. Mit den in Abb. 12 dargestellten GKV-Daten wurden ergänzend zu den Analysen der NAD-Daten, Zusammenhangsanalysen mit der Auftrittshäufigkeit von Gewittern durchgeführt (siehe Kap. 6.2.2).

4.3 Panelstudie Augsburg (PAN)

Eine vertiefte Betrachtung von Pollenallergien im Zusammenhang mit Thunderstorm-Asthma war ursprünglich durch die Erhebung von Patientendaten am Universitätsklinikum Augsburg geplant, die aufgrund des organisatorischen rechtlichen und technischen Aufwandes nicht in der Projektlaufzeit durchgeführt werden konnte. Stellvertretend wurden hierzu jedoch Daten der Langzeitstudie des Instituts für Umweltmedizin Augsburg (sog. Panelstudie, PAN) herangezogen (Gökkaya et al. 2020).

Studiendesign

Erwachsene Freiwillige mit selbst angegebener saisonaler allergischer Rhinitis ("Heuschnupfen") und Pollenallergie, positiven Haut-Pricktest auf Pollenextrakt sowie einem

positiven IgE-Test wurden in die Studie eingeschlossen. Die Teilnehmer füllten von März 2015 bis Oktober 2016 täglich ein Smartphone-basiertes Symptomtagebuch („Pollen“ app, Stiftung Deutscher Polleninformationsdienst) aus. Das Tagebuch enthielt Fragen zum allgemeinen Befinden, zur Einnahme von Medikamenten sowie zu allergie-spezifischen Symptomen der Nase, der Augen und der Lunge. Jeder Symptomkomplex wurde dabei auf einer Skala von 0 (keine Beschwerden) bis 3 (sehr starke Beschwerden) abgefragt. Ein Gesamtscore (total symptom score, TSS) wurde mit Hilfe eines publizierten Algorithmus errechnet (Bousquet et al., 2017).

Studienteilnehmer

Gesunde, nichtallergische und pollenallergische Freiwillige wurden in München (2015) und Augsburg (2016) rekrutiert. Hierbei wurde die Rekrutierung wie folgt durchgeführt: insgesamt wurden ca. 100 Kandidaten einem initialen Screening unterzogen, um über Ein- oder Ausschluss zu entscheiden. Die Screening-Visite umfasste eine ausführliche Anamnese allergischer Erkrankungen, einen Haut-Pricktest mit Pollenextrakten sowie einen Serum IgE Test (ImmunoCAP, ThermoFisher Scientific). Um nichtallergische Rhinitis, perennielle allergische Rhinitis, Nasenpolypen oder chronische Rhinosinusitis auszuschließen. Um die Möglichkeit des Bestehens einer idiotypischen oder lokalen allergischen Rhinitis zu minimieren, wurde eine detaillierte klinische Anamnese sowie eine anteriore und posterior Rhinoskopie von einem HNO-Arzt durchgeführt. Keiner der Teilnehmer, die in die Studie eingeschlossen wurden, wiesen irgendwelche pathologischen Anomalitäten oder Zeichen von chronischer Entzündung des Nasenraums auf. 17 Patienten mit saisonaler allergischer Rhinitis und Pollenallergie wurden basierend auf den Ergebnissen des Screenings in die Studie aufgenommen. Ein Patient wurde mangels Compliance (zu wenig Tagebucheinträge) rückwirkend aus der Datenanalyse ausgeschlossen. 15/17 Patienten waren sensibilisiert gegenüber Graspollen, 8/17 gegenüber Birkenpollen. Von den 8 Patienten mit Birkenpollen-Sensibilisierung waren alle ebenfalls gegenüber Haselpollen und 7 ebenfalls gegenüber Erlenpollen sensibilisiert. Das Sensibilisierungsprofil jedes Teilnehmers wurde zusätzlich mittels komponentenaufgelöster molekularer IgE-Diagnostik (ISAC, ThermoFisher) verifiziert. Eine Übersicht der Sensibilisierungsprofile der Studienteilnehmer findet sich in Tab. 2.

Tab. 2: Übersicht über Sensibilisierungsprofile der Studienteilnehmer. IgE Spiegel im Serum wurden mittels ImmunoCAP und ISAC-112 (ThermoFisher) bestimmt. Patient G7 wurde aufgrund mangelnder Tagebucheinträge von der Datenanalyse ausgeschlossen.

Year	Patient-ID	Alder	Hazel	Birch	Grasses	Ann. Mercury	Oleaceae	Plane	Cypress	Cedar	MUXF3	Alternaria	total IgE
2015	G3	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	19,0
2015	G4	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	86,2
2015	G5	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	297,0
2015	G6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	19,7
2015	G7*	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	109,0
2015	G8	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	53,4
2015	G9	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	506,0
2015	G10	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	40,7
2015	G11	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	88,9
2016	B1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	63,7
2016	B2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	24,8
2016	B3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	49,9
2016	B4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	29,0
2016	B5	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	71,2
2016	B6	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	52,4
2016	B7	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	37,2
2016	B8	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	159,0

Die Teilnehmer hatten einen positiven Haut-Pricktest auf Pollen, erhöhte gesamt-IgE-Spiegel (MW \pm SEM) von $100,4 \pm 30,2$ IU/ml und erhöhte pollenspezifische IgE-Spiegel (CAP Klasse ≥ 2), jedoch keine Sensibilisierung gegenüber perenniiellen luftgetragenen Allergenen (z. B. Hausstaubmilbe). Die Studie wurde von der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der

Technischen Universität München genehmigt (Zeichen: 19/15) und entspricht den Richtlinien von Helsinki. Alle Studienteilnehmer wurden vor Beginn über die Studie, insbesondere über datenschutzrechtliche Aspekte, aufgeklärt und hatten ihre schriftliche Einverständniserklärung zur Teilnahme erteilt.

5 Pollen und Sporendaten

Die kontinuierliche Überwachung von Pollen- und Pilzsporen erfolgt in Augsburg seit 2015 nach dem konventionellen Hirst-Prinzip in einer 2-stündlichen Auflösung. Alle Luftproben werden im Labor gesammelt, chemisch aufbereitet und auf mikroskopischen Objektträger gelagert und archiviert. Mittels interner Personalressourcen wurden Pollen und Pilzsporen für die Jahre 2015, 2016 und 2017 manuell klassifiziert. Die klassifizierten Pollen- und Sporendaten wurden auf Lücken sowie Inkonsistenzen geprüft, um bereinigte Datensätze zu erstellen.

Zusätzlich zu den detaillierten Analysen für Augsburg und als 'Proof of Concept' wurden im Rahmen des Projekts Daten vom vorläufigen ePIN-Projekt (Elektronisches Polleninformationsnetzwerk) akquiriert. Dieser Datensatz beinhaltet Messdaten für den Pilzsporentyp *Alternaria* von 20 Standorten in Bayern in einer zeitlichen Auflösung von 2 Stunden. Mit diesem Datensatz wurde somit eine Untersuchung von Pilzsporen und Gewitter auf Asthmaerkrankungen an mehreren Standorten ermöglicht.

5.1 Pollen- und Pilzsporen-Messungen in Augsburg (PAU)


Seit 2015 betreibt das UNIKA-T in Augsburg ein Netzwerk aus automatischen und konventionellen Pollen- und Sporen-Messstationen. Neben den Messungen in diesem Netzwerk werden im Projekt TARA noch zusätzlich Daten der Messstation am Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU; 48°19`33.6N, 10°54`10.8`E) im Südosten von Augsburg und 1,5m über dem Bodenniveau (agl für engl. above ground level) verwendet.

Luftgetragene Pollen und Schimmelpilzsporen wurden mittels volumetrischer Hirst-Pollenfalle (Hirst, 1952) von März 2015 bis Oktober 2017 in Augsburg gemessen. Um potentielle Unterschiede zwischen Messungen auf Dach-Höhe (15m agl) – der typischerweise verwendeten Messhöhe – und nahem Bodenniveau (1,5m agl) – dem Niveau, in dem Menschen sich normalerweise aufhalten – zu untersuchen, wurden die Messwerte von zwei Messstationen verglichen, die horizontal weniger als 50m voneinander entfernt, aber auf unterschiedlichen Höhen am LfU installiert sind.

Das Auswertungsverfahren wird von Damialis et al. (2007) näher beschrieben. Die Hirst-Pollenfalle ist mit einer Vakuumpumpe ausgestattet, die 10 Liter Luft pro Minute durch eine Öffnung ansaugt. Mit der Luft eingesaugte Partikel werden auf einem kleberbeschichteten, transparenten Plastikband fixiert, das auf einer von einem Uhrwerk bewegten Trommel aufgebracht ist. Dieses bewegt sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von 2 mm pro Stunde und braucht für eine komplette Umdrehung genau eine Woche. Das Klebeband wird jede Woche entfernt, chemisch prozessiert (gefärbt) und auf Mikroskop-Slides aufgebracht, wobei jedes Slide einen Zeitraum von 24 Stunden repräsentiert. Alle Pollenkörner werden manuell unter dem Lichtmikroskop (400-fache Vergrößerung) von Experten klassifiziert und quantifiziert. Hierbei werden 12 Traversen ausgezählt. Die Pollenzahlen (2-stündlich oder tägliche Werte) werden als mittlere Pollenkonzentration pro m³ Luft exprimiert. Diese Technik

entspricht dem weltweit akzeptierten Standard und wird gemäß den Anforderungen nach Konsensus der European Aerobiology Society (Galán et al. 2014) durchgeführt. Sporen von *Alternaria*, einem allergenen Schimmelpilz, wurden in derselben Weise quantifiziert.

Die Verteilung der Pollendiversität für Augsburg Stadt wurde mit Hilfe eines von D'Amato and Spieksma (1991) entwickelten und von Gutiérrez et al. (2006) modifizierten Modells bestimmt. Tägliche mittlere Konzentrationen (Pollenkörner/m³) wurden verwendet, um arithmetische Mittelwerte für 10 Tage zu errechnen (Julianischer Kalender), was einem Drittel eines Monats entspricht. Diese Werte wurden dann nach Datum gruppiert, um den 10-Tages-Mittelwert für den gesamten Studienzeitraum (2015-2017) zu berechnen.

Die resultierende Aeroallergenklassifizierung wurde  nach Stix and Ferretti (1974) als Graph ausgedrückt in welchem jeder 10-Tages-Mittelwert einer exponentiell kodierten Häufigkeitsklasse entspricht. Die verschiedenen Pollen-Taxa werden chronologisch geordnet nach dem zeitlichen Auftreten ihres Peaks dargestellt. Nur diejenigen Taxa, deren 10-Tages-Mittelwert ein Minimum > 1 Pollenkorn/m³ aufweist, wurden eingeschlossen. Ein Maximum an 15 Taxa wurde im Graphen dargestellt.

Um die Saisonalität der Pollen sowie den Start, den Peak und das Ende der Saison zu bestimmen, wird die Methode von Andersen (1991) verwendet. Diese Methode definiert die Haupt-Pollensaison (MPS), welche 95% der gesamten Pollen einschließt, die im Messzeitraum gezählt wurden. Die MPS beginnt mit dem Tag, an dem 2,5% aller gemessenen Pollen registriert wurden und endet an dem Tag, an dem 97,5% aller gemessenen Pollen registriert wurden. Alle Berechnungen wurden mit Rstudio (Core Team, 2018) und R, Version 3.6.1 durchgeführt.

Zusätzlich zu den oben erwähnten, manuell klassifizierten, konventionellen Daten wurden auch Daten von einem automatischen, nahezu in Echtzeit messenden Pollen Monitor (BAA500, Hund GmbH, Wetzlar) am LfU verwendet. Pollendaten von diesem Messgerät umfassten das gesamte Pollenspektrum, entsprechend den konventionellen Messungen mittels Hirst-Pollenfalle, die direkt neben dem automatischen Pollenmonitor auf dem Gelände des LfU installiert ist. Die Pollendaten wurden in 3-stündigen Intervallen zwischen 2015 und 2019 erfasst. Pollenkonzentrationen werden auch hier in Pollen/m³ exprimiert, mit einem Zeitschritt von 3 Stunden. Um die Vergleichbarkeit unserer Messdaten zu gewährleisten, konzentrierten wir uns auf die Jahre von 2015-2017 (in denen beide Typen von Messgeräten zur Verfügung standen). Da 2015 das erste Jahr war, in dem der BAA500 in Augsburg in Betrieb war, enthielten die Messungen viele Lücken, manche davon länger als 7 Tage. Aus diesem Grund wurden die automatischen Messdaten des Jahres 2015 aus den Analysen ausgeschlossen. Insgesamt machte, für den eingeschlossenen Zeitraum, der Anteil an fehlenden Messwerten weniger als 10% aus. Fehlten mehrere Messwerte hintereinander, so wurden diese basierend auf einer Regressionsanalyse aus jeweils 5 vorhandenen Datenpunkten vor und nach der Messwertlücke intrapoliert. Einzelne fehlende Datenpunkte wurden intrapoliert, indem die nächsten vorhandenen Messwerte vor und nach der Datenlücke gemittelt wurden (Muzalyova et al., 2021).

Der automatische Pollenmonitor BAA500 sammelt kontinuierlich Luft mit einer Flussrate von 60 m³/h mit Hilfe eines 3-stufigen virtuellen Impaktors. Pollen werden auf Mikroskop-Slides mit einer klebrigen Oberfläche aufgefangen und automatisch unter einem Mikroskop mit einer CCD-Kamera aufgenommen. Der Computer konstruiert Bilder von den einzelnen Pollen, welche mit einer Bilder-Datenbank aus bekannten Proben verglichen werden. Mit Hilfe eines Bilderkennungs-Algorithmus kann der BAA500 über 30 verschiedene Pollenarten erkennen.

Alle Proben wurden zwischen November 2015 und Dezember 2016 akquiriert und manuell nachklassifiziert, basierend auf typischen morphologischen Merkmalen. Insgesamt wurden über 1 Million Objekte innerhalb dieses Zeitraums klassifiziert. Es ist bekannt, dass der Algorithmus, mit dem die Software arbeitet, nicht immer optimale Ergebnisse liefert. So wurden viele Fälle beobachtet, in denen das Bild-Cropping nicht richtig erfolgte, z. B. Objekte nicht identifiziert wurden oder ein Objekt in mehrere Bilder zerschnitten wurde. Auch stellten wir fest, dass einige der ab Werk eingebauten Filter und Schwellenwerte dazu führten, dass das Ergebnis verfälscht wurde. Insbesondere führte dies zur Nicht-Erkennung von Pollen außerhalb der jeweiligen Hauptsaison, obwohl diese eigentlich auf den Bildern erfasst worden waren (Schiele et al., 2019).

5.2 Pollen- und Pilzsporen-Messungen in Bayern (pre-ePIN)

Das Bayerische Netzwerk aus Hirst-Typ Pollenfallen wurde in den Jahren 2014-2015 mit dem Ziel etabliert, die Konzentrationen und Diversität von Pollen in ganz Bayern zu bestimmen. Hierzu wurde zunächst ein dichtes Netzwerk aus 27 Hirst-Pollenfallen im ganzen Bundesland etabliert. Die Anzahl an Messstationen wurde absichtlich mit einer gewissen Redundanz gewählt, so dass es nach einer anschließenden Analyse auf die nötigen Standorte reduziert werden konnte. Um sich der Redundanz zu versichern, wurde das weltweit dichteste Netzwerk aus Pollenmessstationen (27 Stationen auf einer gesamten Fläche von 70.550,19 km²) (Buters et al., 2018) etabliert. Die Auswahl der Standorte wurde so getroffen, dass regionalen bioklimatischen Begebenheiten Rechnung getragen wird, um eine Repräsentativität der Messungen zu garantieren. Die folgenden Faktoren wurden dabei in Betracht gezogen: Demografie, Verfügbarkeit von historischen Messwerten, klimatische Bedingungen, Landnutzungsparameter, Topografie und Nähe zu lokalen Vegetationsquellen. Die Vorauswahl der Standorte für neue Messstationen wurde im Rahmen des ePIN-Projets für Zonen eines Durchmessers von 25 km getroffen. Die Endauswahl der Standorte wurde dann auf der Basis von homogenen Monitoring-Bedingungen innerhalb der vorausgewählten Zone des Netzwerks getroffen. Um eine ausreichende Abdeckung aller Pollenquellen in Bayern zu garantieren, wurde eine Analyse mit dem System for Integrated modeLing of Atmospheric coMposition (SILAM, <http://silam.fmi.fi>) durchgeführt. Hiermit wurde sichergestellt, dass lokale Quellen großflächig abgedeckt waren (Sofiev et al., 2013; Sofiev et al., 2015).

Der Betrieb der Pollenfallen, die wöchentliche Verarbeitung der Proben und die mikroskopische Klassifikation der Pollen entspricht weltweiten Standards, wie im Detail in der Arbeit von Oteros et al. (2019) beschrieben. Insgesamt wurden 13 Pollenarten gemessen: *Alnus*, *Ambrosia*, *Artemisia*, *Betula*, *Carpinus*, *Cupressaceae*, *Fraxinus*, *Picea*, *Pinus*, *Plantago*, *Poaceae*, *Populus* und *Urticaceae*. Pollen, die in keine der 13 Arten einzuordnen sind, werden als „unklassifizierte Pollen“ aufgenommen. Da während der Messperiode von 2015 an manchen Standorten gelegentlich Hardware- und andere Probleme aufgetreten sind, wurden Intervalle ohne Messwert, wenn diese kürzer als 7 Tage waren, linear interpoliert. Im Fall von Kitzingen in Nordwest-Bayern waren die Lücken zum Teil länger, weshalb Daten dieser Messstation komplett aus der Analyse herausgenommen wurden.

Indem dasselbe Probenmaterial verwendet wurde, wurden alle Mikroskopie-Präparate (Slides) des gesamten pre-ePIN Netzwerks aus dem Jahr 2015 manuell re-analysiert und darin die am stärksten allergenen Pilzsporen, nämlich *Alternaria*, für alle Standorte in Bayern bestimmt.

Insgesamt umfasst der hier verwendete pre-ePIN-Datensatz folglich 13 Pollenarten sowie *Alternaria* für 27 Standorte in Bayern. Stationen mit langen Datenlücken wurden jedoch ausgeschlossen, so dass dieser Datensatz insgesamt 23 Standorte in Bayern umfasst (siehe Abb. 40). Die Klassifizierung erfolgte hier manuell und liegt vollständig für das Jahr 2015 vor. Alle Analysen, die sich auf diesen pre-ePIN-Datensatz beziehen (vgl. Kapitel 6.5.2 und 6.5.3) umfassen ausschließlich das vollständige Jahr 2015.

6 Zusammenhangsanalysen für das gehäufte Auftreten von Asthmafällen

6.1 Gewittertypisierung und Charakterisierung nach Relevanz für Thunderstorm-Asthma mittels optimierter Klassifikationen

Um eine Charakterisierung der für Asthma relevanten Gewittertypen/-wetterlagen zu erhalten, wurden sowohl Gewitterzellen detektiert und mittels verschiedener Variablen charakterisiert als auch Wetterlagenklassifikationen auf Basis der großskaligen GFS-Analysedaten durchgeführt (Meilenstein 5).

6.1.1. Detektion und Charakterisierung von Gewitterzellen

Für die Detektion von Gewitterzellen wurden zunächst stündliche Blitzsummen (Datensatz BLI) auf einem 2km x 2km Gitter berechnet und mit einem Tiefpassfilter geglättet. Die Filterung wurde dreimal durchgeführt, um den Grad der Glättung zu erhöhen. Danach wurden Zentren maximaler Gewitteraktivität als diejenigen Pixel definiert, die ein lokales Maximum der geglätteten Blitzverteilung darstellen und einen Schwellenwert von 0,3 Blitzen pro Pixel überschreiten. Diesen Zentren wurden umliegende Pixel, die ebenfalls einen Schwellenwert von 0,3 Blitzen überschreiten, über die euklidische Distanz zugeordnet (vgl. Abb. 13). Pixel unterhalb des Schwellenwerts gehören zu keiner Gewitterzelle. Die Anwendung dieser Schwellenwerte soll sicherstellen, dass vereinzelt Blitze nicht als Gewitterzelle definiert werden. Es resultieren 42.434 Gewitterzellen in ganz Bayern für den Zeitraum von Juni 2005 bis Ende 2018. Die auf diese Weise definierten Gewitterzellen wurden mit folgenden Variablen charakterisiert: Datum und Uhrzeit, Koordinaten des Zentrums, Größe der Zelle [km²], Anzahl der Blitze, Niederschlagsintensität (Mittelwert und Maximum) [mm/h], Windgeschwindigkeit [m/s] und -richtung [°] der nächstgelegenen DWD-Station, Änderung der Lufttemperatur [°C], der relativen Feuchte [%] und des Luftdrucks [hPa] der nächstgelegenen DWD-Station innerhalb der Stunde vor dem Gewitterereignis, Änderung der Lufttemperatur innerhalb der zwei und sechs Stunden nach dem Ereignis, Eigenschaften des letzten vorhergehenden Niederschlagsereignisses (Fläche [km²], Intensität [mm/h], Dauer der Trockenperiode seit dem letzten Ereignis [h]). Mittelwerte der Variablen aus den GFS-Analysen, die die Schichtungsstabilität der Atmosphäre beschreiben, wurden für die Zeitpunkte und Orte der Gewitterzellen ebenfalls berechnet, wobei ein räumlicher Ausschnitt von 1°x1° um das Zentrum der Zellen berücksichtigt wurde.

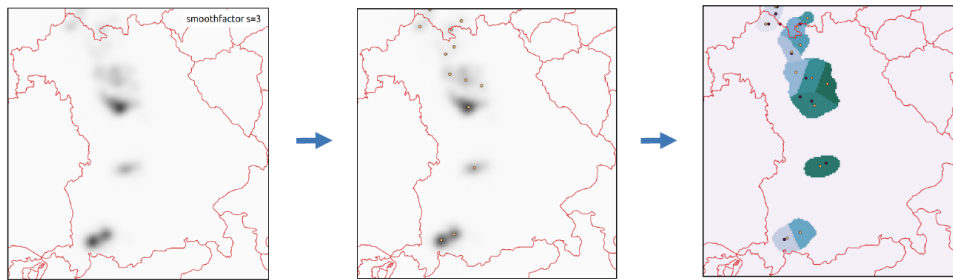


Abb. 13: Vorgehen bei der Detektion von Gewitterzellen, Beispiel 2007-07-20 14:00:00. Links: mit Tiefpassfilter geglättete Karte der Blitzdichte (Datensatz BLI), Mitte: Lage der lokalen Maxima der Blitzdichte (gelbe Punkte), rechts: die in diesem Beispiel resultierenden 13 Gewitterzellen, dargestellt in zufälligen Blau- und Grüntönen zur Differenzierung einzelner Zellen. Violette Punkte zeigen zudem die Lage der Niederschlagsmaxima (Datensatz RAD) an.

Für eine Vergleichsstudie der drei größten Ballungszentren in Bayern wurden den Städten Augsburg, München und Nürnberg die Gewitterzellen im jeweiligen Umkreis von 20 km zugeordnet und das Gesamtkollektiv der Tage anhand der Tagessummen der Asthmafälle in zwei Klassen eingeteilt (Tage mit und ohne Asthmafälle). Die Gewittereigenschaften beider Klassen wurden sowohl saisonal als auch ganzjährig mittels des u-Tests nach Wilcoxon, Mann und Whitney auf signifikante Unterschiede der zentralen Tendenz ($\alpha=0,1$) geprüft. Allerdings werden die Klassengrößen bei der saisonalen Betrachtung in den meisten Fällen zu klein, sodass bei einem Teil der Analysen nur jährliche Untersuchungen möglich waren.

6.1.2. Kompositenanalysen

Zur Klassifikation von Wetterlagen wurden mit den Datensätzen BLI, RAD, DWD und GFS zunächst Kompositen gebildet, also mittlere Felder der verschiedenen großräumigen meteorologischen Variablen, jeweils für zwei verschiedene Ausprägungen der lokalen Zielvariablen „Asthmafälle“ (Datensatz NAD1) und „Blitzdichte“ (Datensatz BLI). Für die Zielgröße „Asthmafälle“ enthalten die beiden Klassen Tage mit bzw. ohne Asthmafälle, für die Zielvariable „Anzahl der Blitze“ werden Tage mit über- bzw. unterdurchschnittlicher Blitzaktivität gegenübergestellt. Hierbei wurde jeweils ein räumlicher Ausschnitt betrachtet, der ganz Bayern enthält (9-14°O, 47-51°N), und alle in den GFS Daten enthaltenen Zeitpunkte einbezogen (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 und 21 Uhr). Neben den Zentroiden/Klassenmittelwerten der beiden Klassen wurden jeweils auch deren Anomalien im Vergleich zum Gesamtmittel der meteorologischen Felder betrachtet. Als Maß dafür, wie deutlich sich die beiden Klassen unterscheiden, wurde der Pseudo F-Wert berechnet, zur Signifikanzprüfung der Unterschiede der u-Test nach Wilcoxon, Mann und Whitney durchgeführt. Variablen, bei denen ein deutlicher Unterschied zwischen beiden Klassen bzw. zwischen den Anomalien und dem Gesamtmittel auftritt, werden als potentiell geeignete Klassifikationsvariablen betrachtet.

Der Vergleich der beiden Klassen der Gewitterzellen (Zellen an Tagen mit im Vergleich zu Tagen ohne Asthmafälle) ist in Abb. 14 beispielhaft für München (ganzjährige Analyse) dargestellt. Die Box-Whisker-Plots zeigen, dass bei einigen Variablen innerhalb der Klassen eine starke Variabilität vorliegt (z.B. der mittlere Niederschlag PREC_MEAN). Das Kriterium „Asthma-Auftretthäufigkeit“ trennt diese Gewittereigenschaften demnach nicht in deutlich voneinander unterscheidende Gruppen. Bei einigen zentralen Parametern sind die Unterschiede zwischen den Klassen jedoch signifikant. So sind Gewitterzellen an Asthmatagen in München größer (SIZE) und produzieren mehr Blitze (NCG), das letzte vorausgehende Niederschlagsereignis ist großflächiger (L_PREC_AREA). Allerdings sind im Jahresverlauf auch gegensätzliche Effekte zu beobachten. Weiterhin sind für die Ballungszentren Nürnberg und Augsburg abweichende Erscheinungen zu verzeichnen, was

auf wenig robuste Zusammenhänge schließen lässt. So ist in Nürnberg die mittlere Niederschlagsintensität einer Gewitterzelle an Asthmatagen signifikant niedriger, an Asthmatagen herrscht im Mittel Südwestwind, während der mittlere Wind an Gewittertagen ohne Asthma aus Süden kommt. In Augsburg sind signifikante Unterschiede lediglich bei der Temperaturänderung im zeitlichen Vorfeld des Gewitters an der nächstgelegenen DWD-Station festzustellen, die an Gewittertagen mit Asthmafällen betragsmäßig geringer ist.

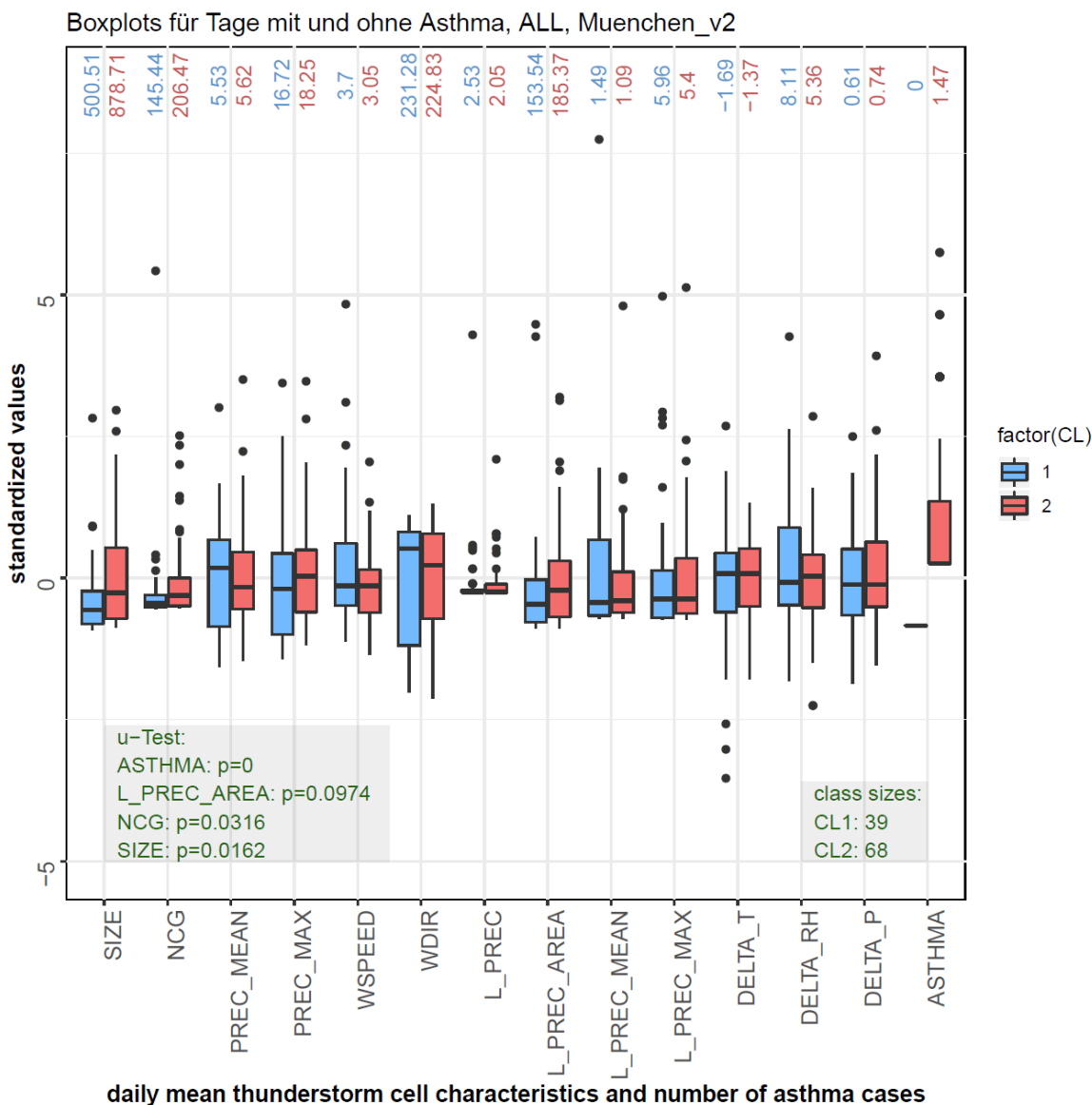
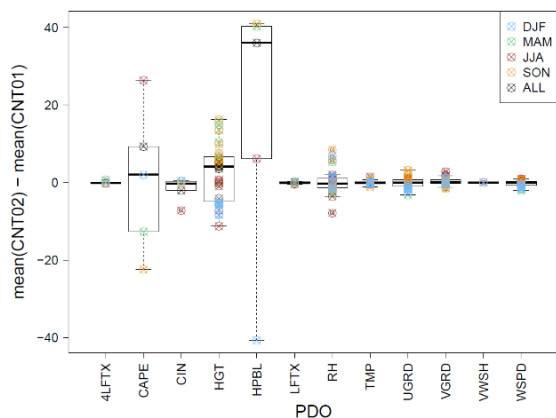


Abb. 14: Box-Whisker-Plots der Eigenschaften der Gewitterzellen (gemäß der Datensätze BLI, RAD, DWD) für Tage ohne (blau, CL1) bzw. mit (rot, CL2) Asthmanotfälle in München (Datensatz NAD1), ganzjährig, dargestellt sind standardisierte Werte, p-Werte der Variablen mit signifikantem Ergebnis des u-Tests ($\alpha=0.1$) auf Unterschiede der Klassenmittelwerte (Textbox unten links), Klassengrößen (Textbox unten rechts), Zahlen über den Box-Whisker-Plots sind die absoluten Klassenmittelwerte der Variablen. Die einbezogenen Variablen sind: SIZE=Fläche der Gewitterzelle [km²], NCG=Anzahl der Wolke-Boden-Blitze, PREC_MEAN=Mittlere Niederschlagsintensität [mm/h], PREC_MAX=Maximale Niederschlagsintensität [mm/h], WSPEED=Windgeschwindigkeit an der nächstgelegenen DWD-Station [m/s], WDIR=Windrichtung an der nächstgelegenen DWD-Station [°], L_PREC=Dauer seit dem letzten Niederschlagsereignis [h], L_PREC_AREA=Fläche des letzten Niederschlagsereignisses [km²], L_PREC_MEAN=Mittlere Intensität des letzten Niederschlagsereignisses [mm/h], L_PREC_MAX=Maximale Intensität des letzten Niederschlagsereignisses [mm/h], DELTA_T=Änderung der Lufttemperatur an der nächstgelegenen DWD-Station in der Stunde vor dem Gewitterereignis, DELTA_RH=Änderung der relativen Feuchte an der nächstgelegenen DWD-Station in der Stunde vor dem Gewitterereignis, DELTA_P=Änderung des Luftdrucks an der nächstgelegenen DWD-Station in der Stunde vor dem Gewitterereignis, ASTHMA=tägliche Asthma-Auftretshäufigkeit.

Analysen des GFS-Datensatzes ergeben insbesondere für den Raum Augsburg Unterschiede zwischen Tagen mit und ohne Asthmanotfälle bzw. mit und ohne Blitze. Box-Whisker-Plots der Differenzen zwischen den Zentroid-Mittelwerten verschiedener großskaliger GFS-Variablen zeigen in einigen Jahreszeiten hohe und signifikante Differenzen beim CAPE-Index, bei der geopotentiellen Höhe und der Höhe der planetaren Grenzschicht an Tagen mit Asthmafällen verglichen mit Tagen ohne Asthma in Augsburg (vgl. Abb. 15a). Im Sommer kommen erhöhte Werte des CAPE-Index an Tagen mit Asthma vor, was auf stärkere Gewitteraktivität hinweist als an Tagen ohne Asthma. Die Höhe der planetaren Grenzschicht ist im Winter an Tagen mit Asthma niedriger als an Tagen ohne Asthma, in den anderen Jahreszeiten verhält es sich umgekehrt. Erhöhte Werte des CAPE-Index an Tagen mit Asthmafällen zeigen sich in München und Nürnberg ebenfalls. Bei der Höhe der planetaren Grenzschicht ist das Bild gemischerter, hier sind in München die Werte im Herbst und bei ganzjähriger Betrachtung an Asthmatagen erhöht, im Sommer sind sie an Asthmatagen deutlich niedriger als an Tagen ohne Asthma. Die Differenzen der Zentroid-Mittelwerte für Tage mit über- und unterdurchschnittlicher Blitzdichte in Augsburg sind ebenfalls beim CAPE-Index, bei der geopotentiellen Höhe und der Höhe der planetaren Grenzschicht deutlich erkennbar (vgl. Abb. 15b). Der Betrag der Differenzen ist dabei jedoch deutlich größer als bei den Kompositen der Asthmafälle. Der CAPE-Index ist in allen Jahreszeiten an Tagen mit überdurchschnittlicher Blitzdichte höher als an Tagen mit unterdurchschnittlicher, insbesondere im Frühjahr und Sommer. Die planetare Grenzschicht ist im Sommer bei überdurchschnittlichen Blitzdichten niedriger, in allen anderen Jahreszeiten höher. Sehr ähnliche Ergebnisse zeigen sich für den Vergleich der Tage mit über- und unterdurchschnittlichen Blitzdichten in München und Nürnberg.

a) Bedingungen für Tage mit Asthmafällen in Augsburg



b) Für Tage mit Blitzen in Augsburg

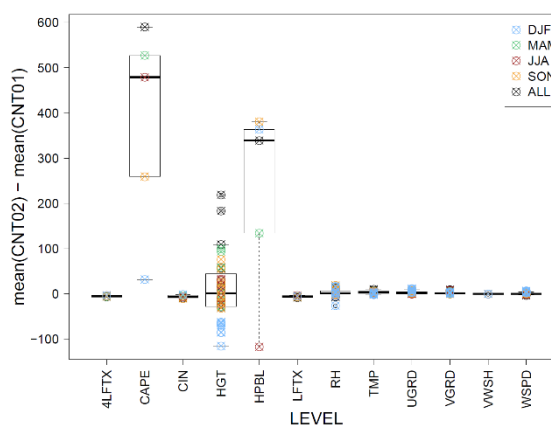


Abb. 15: Differenzen der Zentroid-Mittelwerte verschiedener potentieller Prädiktorvariablen in einem Ausschnitt um Augsburg (10,5°O bis 11,5°O und 48°N bis 49°N) für die Prädiktanden (PDA) a) Asthmafälle (NAD2) und b) Blitzdichte (BLI). Eine Box enthält die Werte verschiedener Jahreszeiten, gekennzeichnet durch verschieden farbige Punkte, und – falls vorhanden – verschiedene Vertikallevels. Die Boxen kennzeichnen den Median sowie das 1. und 3. Quartil (untere bzw. obere Begrenzung der Box), Whisker umfassen den 1,5-fachen Interquartilsabstand ausgehend von der oberen bzw. unteren Begrenzung der Box. Die dargestellten Variablen des GFS-Datensatzes sind: 4LFTX=4-Layer Lifted Index, CAPE=convective available potential energy, CIN=convective inhibition, HGT=geopotentielle Höhe, HPBL=Höhe der planetaren Grenzschicht, LFTX=Lifted Index, RH=relative Feuchte, TMP=Lufttemperatur, UGRD=u-Windkomponente, VGRD=v-Windkomponente, VWSH=vertical speed shear, WSPD=Windgeschwindigkeit. Die Variablen HGT, TMP, RH, UGRD, VGRD und WSPD werden jeweils auf dem 200-, 300-, 500-, 700-, 850- 925- und 1000 hPa Niveau einbezogen.

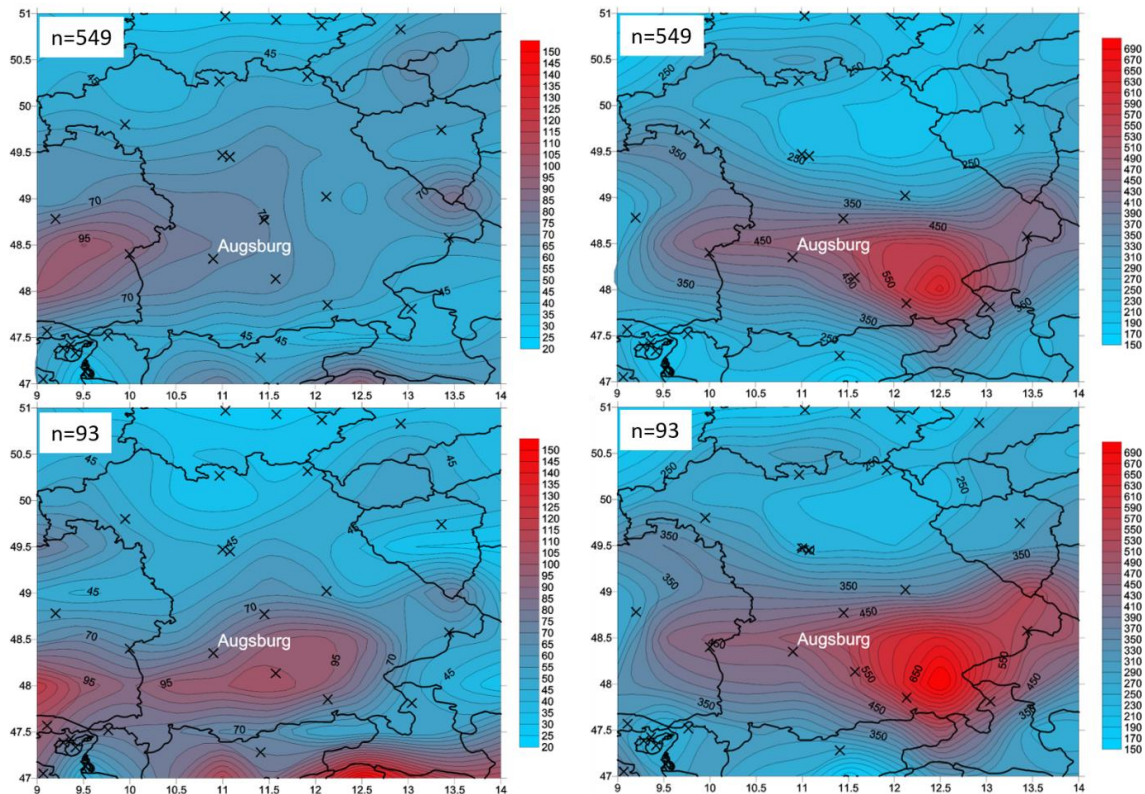


Abb. 16: Kompositen der 0-Uhr (links) und 12-Uhr Werte (rechts) des CAPE-Index [J/kg] (Datensatz GFS) für 549 Tage ohne (oben, CL01) und 93 Tage mit (unten, CL02) asthmabedingten Notfällen in Augsburg (Datensatz NAD1) für die Sommermonate (Juni, Juli, August). Kreuze zeigen die Lage ausgewählter Städte an.

Der Vergleich der Kompositen der 0-Uhr und 12-Uhr Werte des CAPE-Index, um auch die tagesgangabhängige Konvektionsdynamik zu beleuchten, für Tage mit und ohne asthmabedingte Notarzt-Einsätze der Sommermonate in Augsburg ist in Abb. 16 dargestellt. Die Werte sind zu beiden Tageszeiten an Tagen mit Asthma-Notfällen in Augsburg (durchschnittlich 1,12 Fälle pro Tag) insbesondere im Süden Bayerns im Vergleich zu Tagen ohne Asthma erhöht, was auf stärkere Gewitterneigung an „Asthmatagen“ hindeutet. Die absoluten 0-Uhr-Werte sind dabei deutlich geringer als die Werte zur Mittagszeit, was mit dem Tagesgang der Einstrahlung verbunden ist. Obwohl sich die räumliche Verteilung der CAPE mittags zwischen den beiden Klassen kaum unterscheidet, sind die Differenzen der Absolutwerte der Klassen größer als nachts. Für München und Nürnberg zeigen die Kompositen des CAPE-Index im Frühling und Sommer ebenfalls zu verschiedenen Tageszeiten, insbesondere am Mittag und Nachmittag, an Asthmatagen höhere absolute Werte als an Tagen ohne Asthma-Notfälle (nicht gezeigt). Dies kann als Hinweis auf die Relevanz von Thunderstorm-Asthma in dieser Region gewertet werden.

Anomalien der 18-Uhr-Kompositen der Grenzschichthöhe, also die Differenzen der beiden Klassen zum Gesamtmittel, ist für die Zielgröße „Asthmafälle in Augsburg“ für die Sommermonate in Abb. 17 dargestellt. Hierbei sind deutlich positive Anomalien um Augsburg bis ins Voralpenland sowie im Nordwesten Bayerns an Tagen mit Asthmanotfällen zu erkennen. Leicht positive Anomalien der Höhe der Grenzschicht sind an Sommertagen mit Asthma-Notfällen auch in Nürnberg zu beobachten, dort jedoch vermehrt nachts, während sich in München kein Unterschied der Grenzschichthöhe zwischen den beiden Klassen zeigt. Eine höhere planetare Grenzschicht deutet auf verstärkte Turbulenz und somit erhöhte Gewitterneigung hin und ist somit ebenfalls ein Hinweis auf die Relevanz von Thunderstorm-Asthma in Bayern.

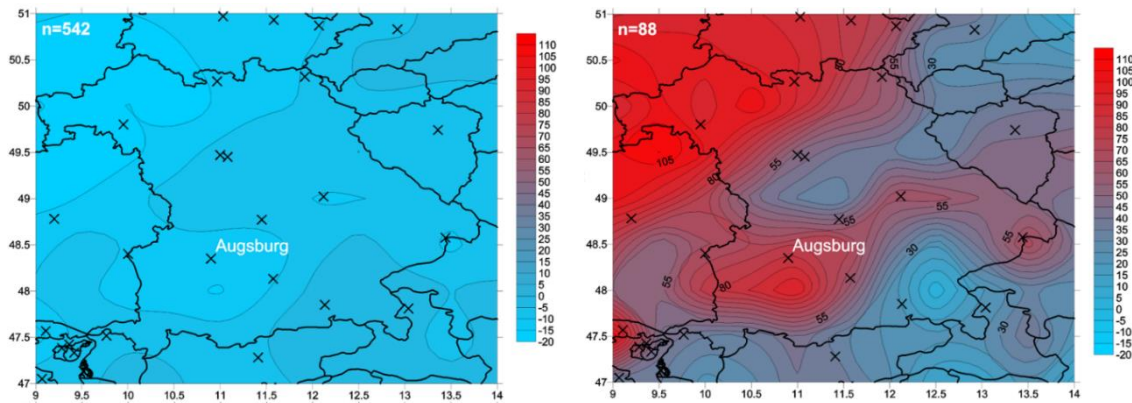


Abb. 17: Anomalien der Kompositen der 18-Uhr Werte der Höhe der planetaren Grenzschicht [m] (Datensatz GFS) für 542 Tage ohne (links, CL01) und 88 Tage mit (rechts, CL02) asthmabedingten Notfällen in Augsburg (Datensatz NAD1) für die Sommermonate (Juni, Juli, August). Kreuze zeigen die Lage ausgewählter Städte an.

6.1.3. Optimierte Wetterlagenklassifikationen

Dieser Untersuchungsabschnitt wurde konzipiert, um mögliche Zusammenhänge zwischen Asthma (Datensatz NAD1) und Gewittern zu erfassen, die evtl. lediglich in bestimmten klimatologischen Situationen auftreten und nicht in der Gesamtheit aller Fälle. Weiterhin erlauben die klassifikationsbasierten Untersuchungen eine alternative Überprüfung der Abhängigkeiten von Asthmafällen von atmosphärischen Variablen.

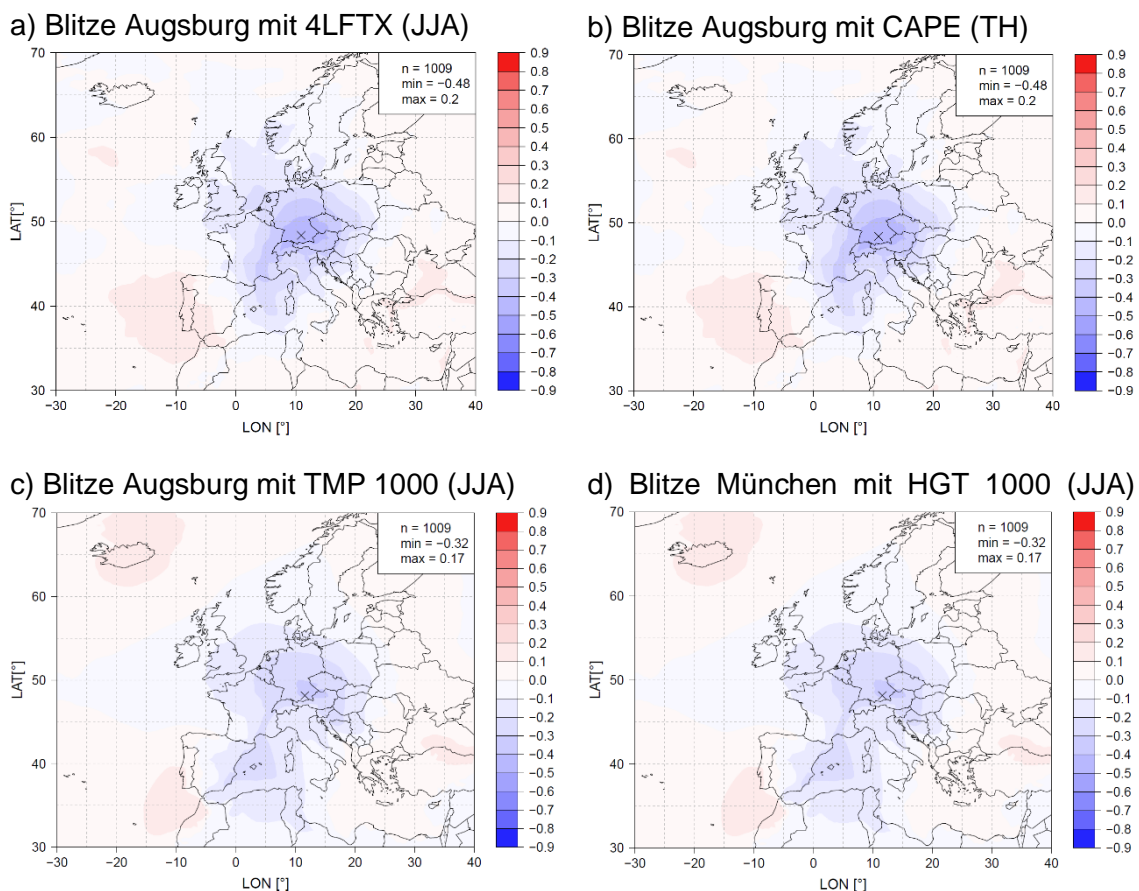


Abb. 18: Saisonale Spearman-Korrelationskarten für exemplarisch ausgewählte Prädiktoren (PDO, Datensatz GFS) und die lokale Zielgröße Blitzdichte in Augsburg bzw. München (Datensatz BLI), basierend auf Tageswerten (MAM=Frühjahr, JJA=Sommer, TH=Gewittersaison Mai-Sept.).

Für die optimale Klassifikation der großskaligen GFS-Variablen im Hinblick auf eine lokale Zielgröße ist auch die räumliche Domain von Bedeutung. Der ideale Ausschnitt entspricht dabei nicht unbedingt dem subjektiv ausgewählten Untersuchungsgebiet (rechteckiger Ausschnitt, der Bayern enthält). Um eine für die Wetterlagenklassifikation geeignete räumliche Domain zu selektieren, wurden saisonal differenzierte Telekonnektions-/Korrelationskarten für alle GFS-Variablen erstellt. Diese zeigen den Korrelationskoeffizienten (je zwei Varianten: Pearson und Spearman) jeden Gitterpunktes in einem Ausschnitt Nordatlantik/Europa mit verschiedenen lokalen Zielvariablen für Augsburg, München und Nürnberg (Blitzdichte, tägliche Asthma-Auftrittshäufigkeit, Pollenkonzentrationen), aus denen für jede Prädiktor-Variable eine individuelle Domain abgeleitet werden kann.

Ausgewählte Korrelationskarten des Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten mit der täglichen Blitzdichte um Augsburg im Sommer bzw. in der Gewittersaison (Mai-September) zeigen moderate Zusammenhänge einzelner Variablen mit der Zielgröße. Für zwei Maße der Schichtungsstabilität der Atmosphäre, den CAPE-Index und den 4-Layer Lifted Index (vgl. Abb. 18 a und b), liegen die Regionen maximaler Korrelation mit Beträgen von ca. -0,5 über Süddeutschland. Die Richtung des Zusammenhangs ist dabei wie zu erwarten für den Lifted Index negativ, da dieser bei stärkerer Labilität Werte unter null annimmt und für CAPE positiv, da höhere CAPE-Werte auf instabilere Schichtung hinweisen. Der Zusammenhang der Temperatur auf dem 1000hPa-Niveau mit der Blitzdichte in Augsburg im Sommer ist mit maximal 0,36 etwas schwächer (vgl. Abbildung 18 c). Die Region mit maximalem Zusammenhang liegt östlich von Augsburg über Tschechien und Südpolen. Die geopotentielle Höhe des 1000hPa-Niveaus im Sommer über Bayern ist mit der Blitzdichte in München negativ korreliert (vgl. Abbildung 18 d). Der positive Zusammenhang mit der Höhe des 500hPa-Niveaus sowie mit der Temperatur auf dem 1000hPa-Niveau (hier nicht gezeigt) deutet darauf hin, dass hier der Einfluss sommerlicher Hitzetiefs auf die Gewitteraktivität eine Rolle spielt. Auf Grundlage der Ausdehnung korrelierter Bereiche wurde der Gitternetzausschnitt auf die Ausdehnung 44°N-53°N und 7°E bis 15°E festgelegt (Abb. 19).

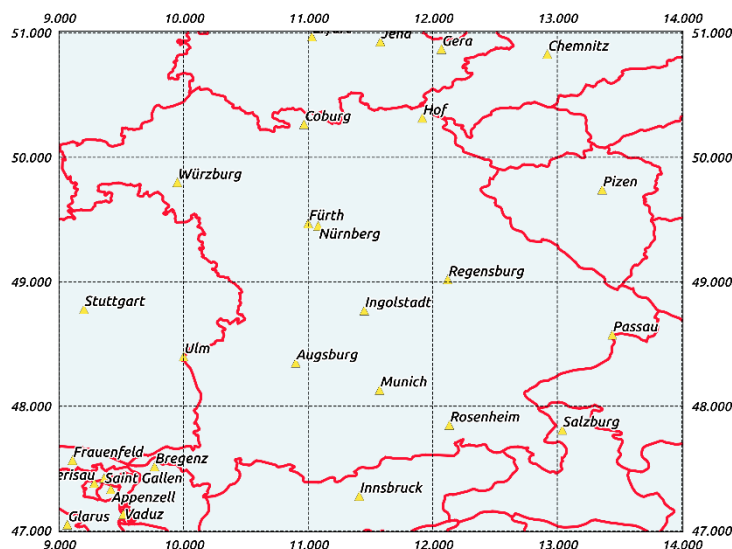


Abb. 19: Gitternetzausschnitt für großskalige Prädiktorvariablen des Datensatzes des Global Forecast Systems (GFS) in der klassifikationsbasierten Analyse. Die Gitternetzauflösung des Datensatzes beträgt 0,5°.

Neben Kompositen und deren Anomalien vom saisonalen Mittelwert wurden Methoden der optimierten Wetterlagenklassifikation eingesetzt, um Wetterlagen mit Relevanz für

Thunderstorm-Asthma zu identifizieren und charakterisieren. Mithilfe von Verfahren der nicht-hierarchischen Clusteranalyse werden dabei auf Grundlage der ausgewählten Prädiktoren Wetterlagentypen automatisch erzeugt, die anschließend auf ihre Trennschärfe hinsichtlich des Auftretens von Asthmatagen und meteorologischen Zuständen hin untersucht werden können. Hierbei werden zwei Varianten der nicht-hierarchischen Clusteranalyse eingesetzt: i) Reference Class Forecast (RCF): sowohl Prädiktorenfelder als auch der Prädiktand werden zusammen klassifiziert. Die Güte der resultierenden Klassifikation ergibt sich dann aus der möglichst geringen Streuung des Prädiktanden in den einzelnen Klassen. Im Idealfall kann der Prädiktandenmittelwert einer jeden Klasse (Zentroidwert) als Vorhersage für Situationen verwendet werden, in denen die Prädiktorvariablen der Konfiguration dieser Klasse entsprechen. Die Methode wird deshalb auch als Reference Class Forecast bezeichnet. ii) In einer zweiten Variante werden der klassischen Vorgehensweise folgend lediglich die Prädiktoren klassifiziert und anschließend die Streuung des Prädiktanden analysiert. Hierzu wird ein Algorithmus der K-Means Clusteranalyse verwendet, dessen Startpartition aus den maximal differierenden Stichprobenelementen erzeugt wird (DKM für Difference K-Means).

Zur RCF-Klassifikation wurden Tageswerte der Variablen "Asthmatag" (basierend auf Notrufdaten für Augsburg, München und Nürnberg) und GFS-Variablen (HGT, TMP, RH, UGRD, VGRD, WSPD, CAPE, CIN, LFTX, 4LFTX, HPBL, VWSH, teils auf verschiedenen Vertikalniveaus für den Bereich Bayern) herangezogen. Bei der DKM-Clusteranalyse wurden zudem Tagessummen des Niederschlags (aus Radolandaten abgeleitet) und für Augsburg auch Aeroallergene (PAU Daten) einbezogen. Die Klassifikationen wurden für Augsburg, München und Nürnberg saisonal differenziert sowie ganzjährig durchgeführt. Teilweise wurde auch die Gewichtung einzelner Variablen sowie die Klassenanzahl variiert.

Bei der RCF-Analyse wurden jeweils in 10 Durchläufen je 90% der Daten als Kalibrierungsdaten verwendet und die Ergebnisse gemittelt, sodass eine Kreuzvalidierung erfolgt und die Ergebnisse nicht von der Reihenfolge der Eingangsdaten abhängen. Prädiktand war die Variable "Asthmatag". Zunächst wurde je eine GFS-Variable zusammen mit dem Prädiktanden "Asthmatag" klassifiziert, um eine Auswahl geeigneter Prädiktoren (saison- und ortsspezifisch) zu erhalten. Als Auswahlkriterium wurde der Median der erklärten Varianzen der verschiedenen Varianten verwendet. Dieser muss über dem 3. Quartil aller Mediane liegen, um eine Auswahl zu rechtfertigen. Für jeden Ort und jede Jahreszeit wurden alle möglichen Kombinationen dieser ausgewählten Prädiktorvariablen gemeinsam klassifiziert. Ein weiterer Versuch, geeignete Prädiktoren zu finden, war die gemeinsame Klassifikation aller Variablen und anschließender Wiederholung, wobei jeweils eine Variable einzeln weggelassen wurde (leave-one-out classification). In einer weiteren Variante wurden die absoluten Blitzsummen als Prädiktand verwendet.

Bei der DKM-Clusteranalyse wurden zunächst die Variablen "Blitze pro Tag" und "Asthmafälle pro Tag" sowie eine weitere Variable (GFS, Niederschlag, für Augsburg auch Pollen/Pilzsporen) gemeinsam klassifiziert. Zudem wurden verschiedene Kombinationen der Prädiktorvariablen getestet. In weiteren Varianten wurden nur Gewittertage bzw. nur Asthmatage einbezogen. Variiert wurden außerdem die Klassenanzahlen (3, 5, 7, 9, 18, 27), die Gewichtung der Variable "Asthmafälle pro Tag", die Saison und Kombinationen von Prädiktoren. Außerdem wurden in einer Variante die Asthmafälle nicht mitklassifiziert mit dem Ziel, die meteorologischen Bedingungen möglichst gut zu klassifizieren. Innerhalb der Klassen wurde dann mit 4-Feldertafeln und dem Chi-Quadrat-Test auf einen signifikanten Zusammenhang zwischen Asthmafällen und der Blitzdichte hin untersucht. Für die

Evaluierung der Klassifikationen wurden verschiedene Maße berechnet und Signifikanztests durchgeführt:

- Gesamte erklärte Varianz, erklärte Varianz für einzelne Variablen (v.a. wichtig für Asthmazahlen und Blitzdichte),
- Kruskal-Wallis-Test auf Unterschiede zwischen den Klassen,
- paarweiser u-Test für die Identifizierung signifikant unterschiedlicher Klassen,
- pseudo F statistic (Calinski and Harabsz 1974),
- within-type standard deviation gesamt und bezogen auf Asthmafälle bzw. Blitzdichte (Kalkstein et al. 1987),
- confidence interval of the mean gesamt und bezogen auf Asthmafälle bzw. Blitzdichte,
- faster Silhouette Index gesamt und bezogen auf Asthmafälle bzw. Blitzdichte (Rousseuw 1987, Beck & Philipp 2010).

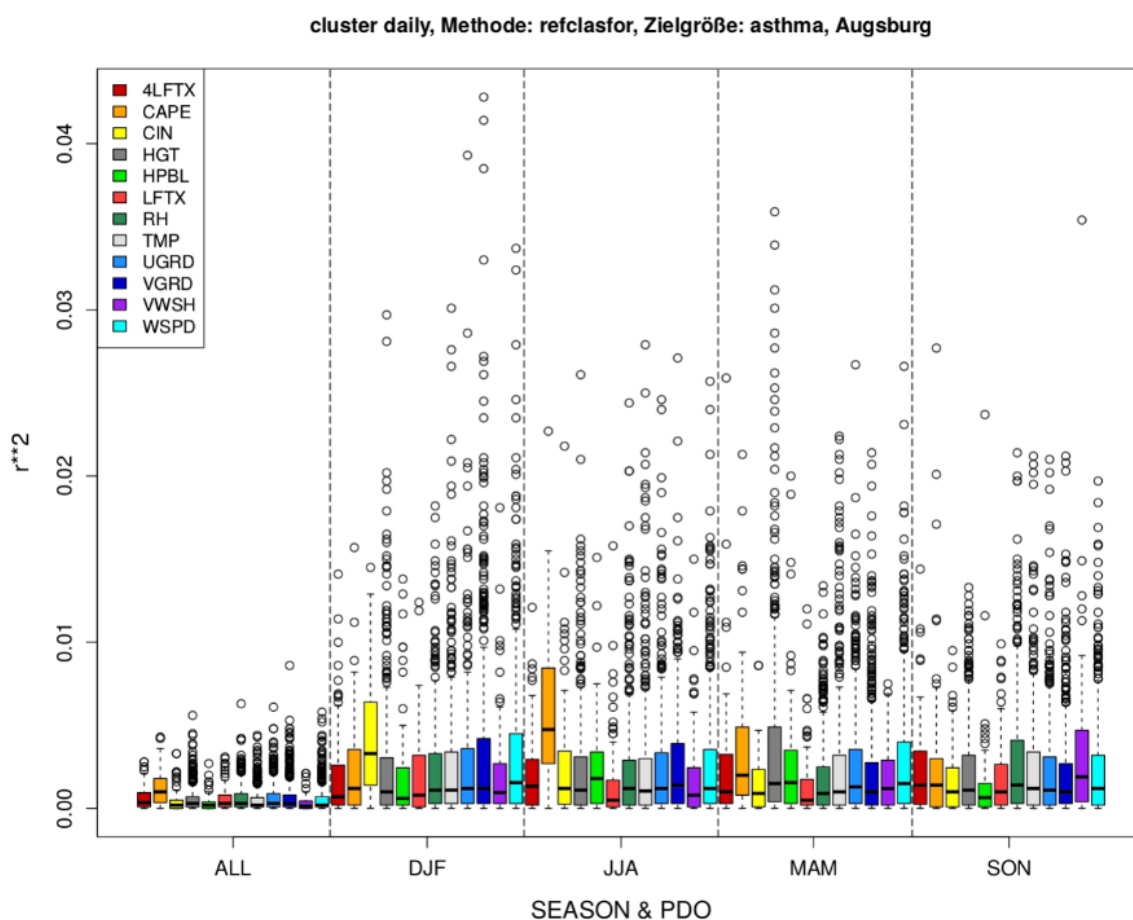


Abb. 19: Varianzerklärungsanteil (R^2) verschiedener Klassifikationsvarianten mit der RCF-Methode für Asthmaauftritte in Augsburg mit jeweils einer Prädiktorvariable (PDO), saisonal (Spalten) und nach Prädiktor (Farben) differenziert. Eine Box enthält die Ergebnisse der Varianten mit verschiedenen Gewichtungen, Klassengrößen und teilweise Vertikallevel der GFS-Variablen. 4LFTX=four-layer lifted index, CAPE=convective available potential energy, CIN=convective inhibition, HGT=geopotentielle Höhe, HPBL=Höhe der planetaren Grenzschicht, LFTX=lifted index, RH=relative Feuchte, TMP=Lufttemperatur, UGRD=u-Windkomponente, VGRD=v-Windkomponente, VWSH=vertical speed shear, WSPD=Windgeschwindigkeit.

Zur Darstellung wurden für verschiedene Variablen Boxplots der Werte in den einzelnen Klassen erstellt. Die Güte der Klassifikation in Hinblick auf die Varianzerklärung des Prädiktanden Asthmaauftritt ist in Form des quadrierten Korrelationskoeffizienten (R^2) als Bestimmtheitsmaß für die verschiedenen Varianten exemplarisch für Augsburg in Abb. 19

dargestellt. Der Korrelationskoeffizient wird hierbei zwischen den tatsächlich aufgetretenen Asthmafällen und den durch die mit den Klassen assoziierten mittleren Asthmahäufigkeiten ermittelt.

Für die RCF-Analyse für den Prädiktand "Asthma" (hier alle ICD-Gruppen aus Tab. 1) ergeben sich insgesamt sehr geringe erklärte Varianzen, sowohl bei der Verwendung einzelner Prädiktoren als auch bei Kombination mehrerer Variablen. Die Werte des R^2 liegen für Augsburg in den meisten Fällen bei unter 0.02 (s. Abb. 19), für München unter 0.03 und Nürnberg unter 0.01. Bei der Leave-one-out Variante sind die Differenzen zwischen allen Variablen mit Beträgen von meistens unter 0.005 für Augsburg und unter 0.02 für München ebenfalls sehr gering. Mit der Methode können daher keine geeigneten Vorhersagen für Asthmatage erstellt werden. Dies liegt zum Teil an der Datenstruktur der Asthmafälle mit nur wenigen Fällen insgesamt bezogen auf den Stichprobenumfang. Allerdings ist eine leichte Erhöhung der insgesamt niedrigen Varianzerklärung für die Prädiktoren CIN (Convective Inhibition, Abb. 19 gelb) im Winter und für CAPE (Convective Available Potential Energy, Abb. 19 Orange) für den Sommer und die ganzjährige Analyse festzustellen. Dies ist ein Hinweis auf einen – wenn auch hier nur äußerst schwach abgebildeten – Zusammenhang zwischen Asthma und Konvektionstätigkeit, d.h. Aufstiegsbewegungen von Luftmassen, die insbesondere mit Gewittern assoziiert sind.

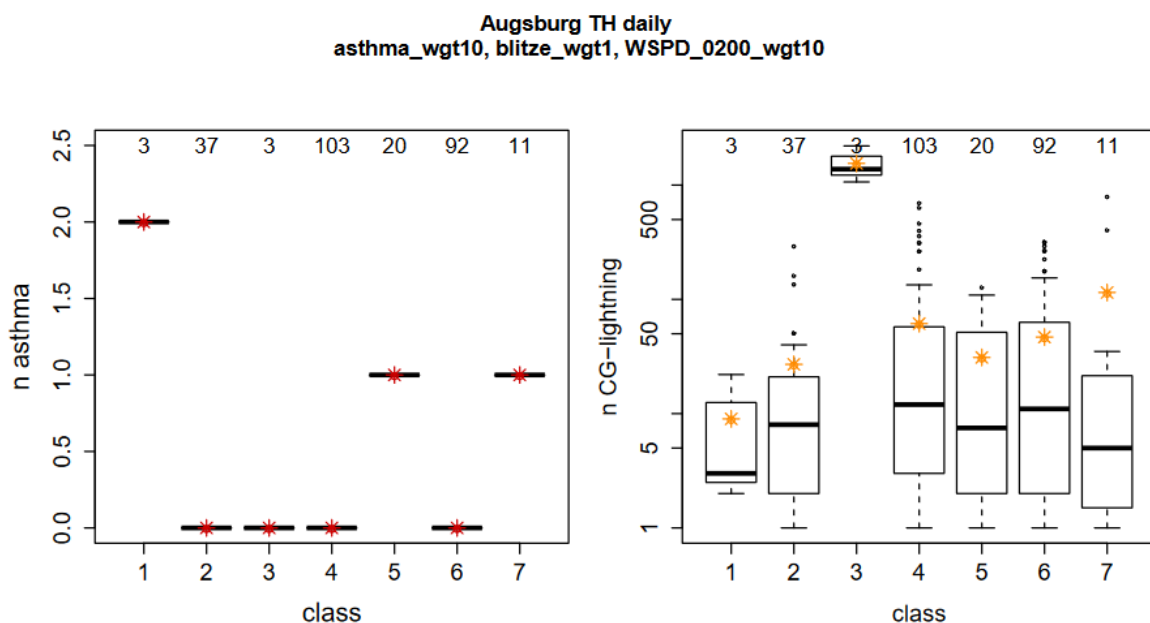


Abb. 20: Charakterisierung einer Klassifikation mit 7 Wetterlagentypen hinsichtlich der Anzahlen der Asthmafälle pro Tag in jeder Klasse (links, Datensatz NAD1) sowie der Blitzhäufigkeit (Wolken-Boden-Blitze, Cloud-Ground-Lightings, Datensatz BLI) für einen Umkreis von 20 km um Augsburg (rechts). Die Sterne symbolisieren die Mittelwerte, die BOX-Whisker-Plots geben Median und Quartile wieder. Die Klassengröße ist am oberen Rand notiert. Die Klassifikation umfasste die Variablen "Asthma" (alle ICD-Codes aus Tab. 1), "Blitzdichte" und "Wind auf 200 hPa-Niveau" (siehe auch Abb. 21 und Abb. 22).

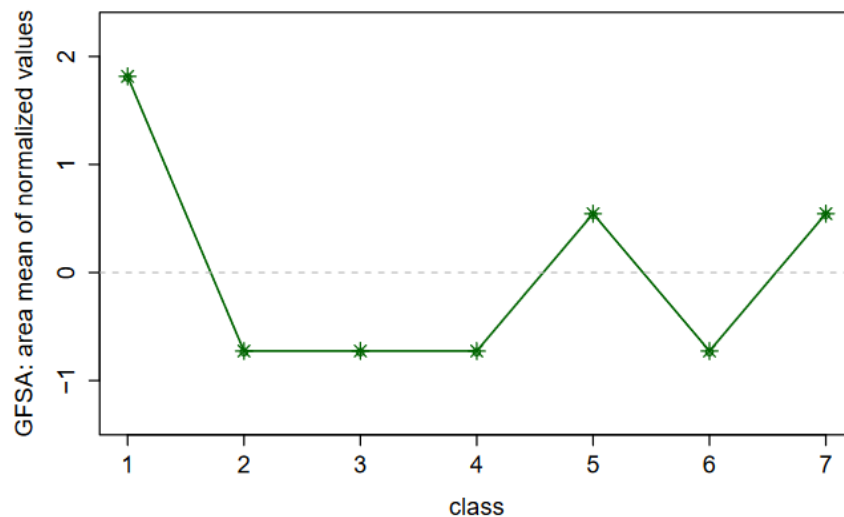


Abb. 21: Charakterisierung der in Abb. 20 gezeigten Klassifikation durch normalisierte mittlere Windgeschwindigkeiten im 200 hPa-Niveau.

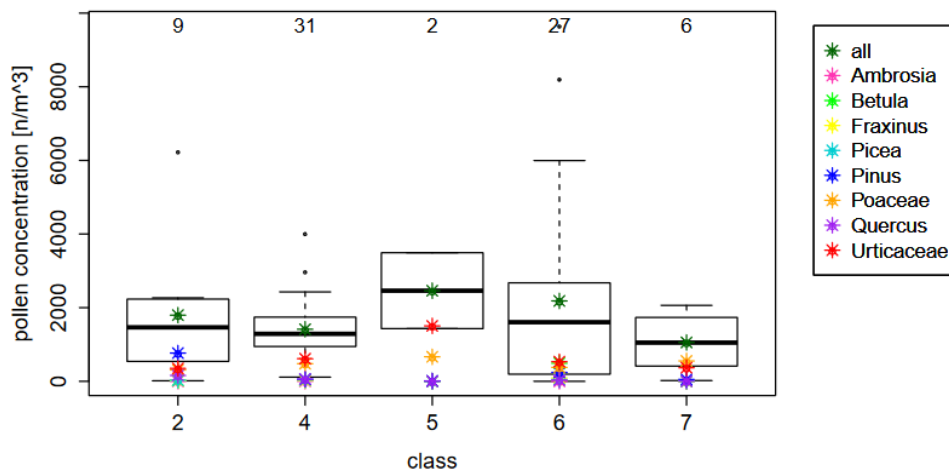


Abb. 22: Charakterisierung der in Abb. 20 gezeigten Klassifikation durch die Verteilung der täglichen Pollenkonzentration in Augsburg (Datensatz PAU) im Zeitraum 2015 bis 2017. Die Klassen 1 und 3 traten im genannten Zeitraum nicht auf und fehlen deshalb in der Darstellung. Die Box-Whisker-Plots beziehen sich auf die Gesamtpollenlast, während die Sterne den jeweils nach Spezies aufgeschlüsselten Mittelwert symbolisieren.

Die Ergebnisse einer DKM-Analyse für die Gewittersaison April bis September (TH) mit den Variablen "Asthmafälle pro Tag" (alle ICD-Code-Gruppen aus Tab. 1), die 10fach gewichtet in die Clusteranalyse eingehen, "Blitzdichte" (einfach gewichtet) und Windgeschwindigkeit auf dem 200 hPa-Niveau (10fach gewichtet) sind exemplarisch für die Vielzahl an durchgeführten Varianten in Abb. 20, 21 und 22 dargestellt. Hier ergeben sich teilweise plausible Übereinstimmungen zwischen den Variablen einer Klasse. So sind in Klassen (Wetteragententypen) mit erhöhter Anzahl an Notrufen, die Windgeschwindigkeiten ebenfalls erhöht (Klassen 1, 5 und 7 in Abb. 20 links und 21). Allerdings sind in den Klassen mit den meisten Blitzen (Klasse 3 in Abb. 20 rechts) nicht die meisten Asthmafälle pro Tag enthalten (Klasse 3 in Abb. 20 links). Klassen mit vielen Asthmafällen weisen eher mittlere Blitzzahlen auf. Klassen, die Asthma und Blitze enthalten, sind häufig klein. Sehr oft kommen auch Tage mit und ohne Asthma sowie mit und ohne Gewitter in der gleichen Klasse vor (Abb. 20). Reine Asthmaklassen sind also nicht automatisch auch Gewitterklassen, zudem sind in ihnen – soweit Daten vorhanden sind – die Aeroallergenkonzentrationen weder deutlich erhöht noch

deutlich geringer als in den anderen Klassen (Abb. 22). Bei größeren Klassenzahlen ergeben sich häufig einige Klassen mit wenigen oder z.T. sogar nur einem Element (nicht gezeigt). Hierbei ist die gesamte erklärte Varianz und die der einzelnen Variablen natürlich hoch, aber eine sinnvolle Klassifizierung in Hinblick auf Erklärung der Asthmaauftrittshäufigkeit kann hieraus nicht abgeleitet werden. Höhere Gewichtungen der Asthmafälle ergeben ebenfalls höhere erklärte Varianzen, führen jedoch teilweise dazu, dass der Einfluss der anderen Klassifikationsvariablen zu gering wird und diese sich nicht mehr auf das Ergebnis auswirken. Die Ergebnisse für Augsburg, München und Nürnberg variieren ebenfalls.

Bei einer Klassifikationsvariante, in der nur die Meteorologie klassifiziert wird, traten einzelne Fälle auf, in denen in einzelnen Klassen, ein Chi-Quadrat-Test einen positiven Zusammenhang zwischen Asthmafällen und Gewittern zeigt. Allerdings werden hier die Asthmafälle nicht mehr gut klassifiziert. Zum Teil besteht der Zusammenhang in Klassen mit erhöhten Pollenkonzentrationen, z.B. von Birkenpollen. Andererseits kommen in diesen Klassen ebenfalls überwiegend Tage ohne Asthmafälle vor und der Zusammenhang hat bei Variationen, beispielsweise der Klassenanzahlen, nicht in jedem Fall Bestand (nicht dargestellt).

Ein generelles Problem bei der Integration der Pollen- und Pilzsporendaten ist der kurze Zeitraum, in dem diese Daten verfügbar sind. Das führt dazu, dass oft nicht für alle Klassen Aeroallergendaten vorliegen und über diese Klassen keine Aussage bezüglich der Allergenbelastung getroffen werden kann.

Es können demnach für die zur Verfügung stehenden Daten keine eindeutigen Thunderstorm-Asthma-Klassen detektiert werden, die sich sowohl in Bezug auf die Asthmafälle pro Tag als auch auf Blitzzahlen deutlich von den anderen unterscheiden und z.B. gleichzeitig auch deutlich höhere Pollenkonzentrationen als in den anderen Klassen aufweisen, um den Thunderstorm-Asthma-Mechanismus abzubilden. Allerdings ergeben sich teilweise plausible Zusammenhänge. So ergibt sich z.B. im oben genannten Fall (Abb. 20, 21 und 22) eine Klasse 5 mit erhöhten Asthmafallzahlen, stärkeren Windgeschwindigkeiten und erhöhter Pollenkonzentration. Allerdings zeichnet sich diese Klasse nicht durch erhöhte Blizttätigkeit aus.

Demnach kann für den Methodenstrang der klassifikationsbasierten Analysen festgehalten werden, dass in einzelnen Fällen plausible Zusammenhänge zwischen meteorologischen Randbedingungen, die auf Gewittertätigkeit hinweisen, und Asthmaauftrittshäufigkeiten abgebildet werden. Die Ausprägungen bleiben jedoch schwach und sind nicht robust, sondern streuen stark für verschiedene Varianten und Bezugsräume. Lediglich für Maße der Konvektion (CAPE und CIN, vgl. Abb 15 und 19 oder auch Abb. 16) ergeben sich z.T. auffällige Signale sowohl bei der separaten Prädiktorenuntersuchung als auch bei den Klassifikationsergebnissen.

6.2 Zusammenhangsmaße des gemeinsamen Auftretens von Gewitter- und Asthmatagen

Im Rahmen der Arbeiten zu Meilenstein 6 wurden zunächst Zusammenhangsanalysen für die verschiedenen Patientendatensätze und die meteorologischen Bedingungen durchgeführt, die mit Pollen- und Sporendaten erweitert wurden.

6.2.1. Notarzt dienstfälle

Datensatz NAD1

Für die Zusammenhangsanalysen des ersten Datensatzes zu Notfalleinsätzen mit den Ortsangaben über die Notdienststandorte (NAD1, s. Kap. 4.1) wurden 4-Feldertafeln (Kontingenztabelle) erstellt und Chi-Quadrat-Tests auf Unabhängigkeit ($\alpha=0,1$) für die beiden Variablen „Asthmatag“ und „Gewittertag“ in verschiedenen Varianten für die Städte Augsburg, München und Nürnberg durchgeführt.

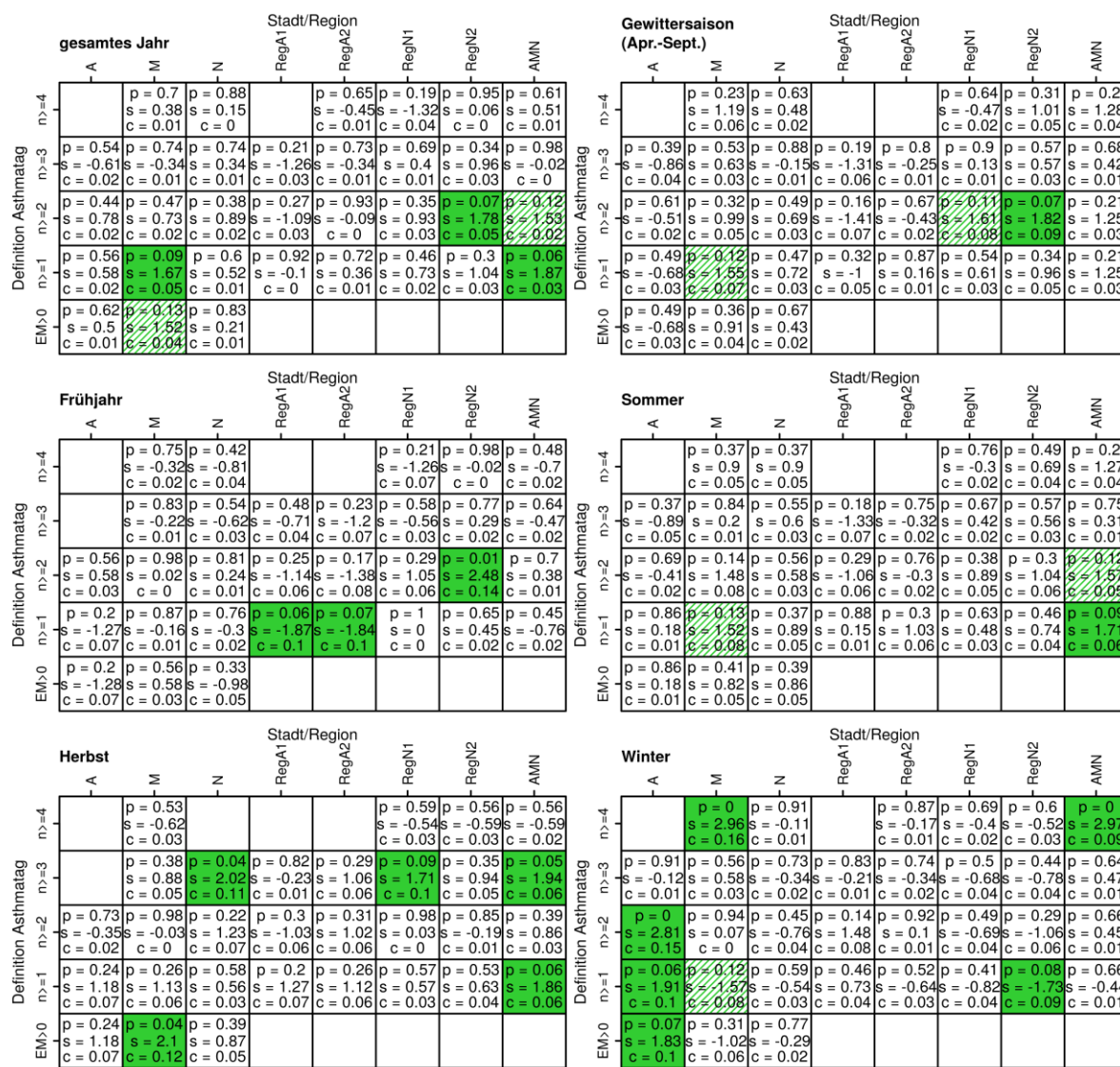


Abbildung 23: Übersicht der Ergebnisse aller Vierfelder-Tests, saisonal differenziert, für verschiedene Orte und Definitionen eines „Asthmatages“ (Datensatz NAD1): grün hinterlegte Felder zeigen Signifikanz ($\alpha=0,1$) des Chi-Quadrat-Tests auf Unabhängigkeit, grün schraffierte Felder weisen auf p-Werte < 0,14 und somit nahe der Signifikanz hin, die obersten Zahlen in jedem Kästchen sind die p-Values des Chi-Quadrat-Tests („p“), die mittleren die standardisierten Residuen („s“), die unteren die korrigierten Kontingenzkoeffizienten („c“), weiße Felder zeigen an, dass der Test für diese Kombination entweder nicht durchgeführt wurde oder zu wenig Beobachtungen vorhanden waren. ALL=gesamtes Jahr, TH=Gewittersaison (April-September), MAM=Frühjahr, JJA=Sommer, SON=Herbst, DJF=Winter, A=Augsburg, M=München, N=Nürnberg, RegA1=Region Augsburg bestehend aus Augsburg + Gersthofen + Friedberg, RegA2=Region Augsburg bestehend aus Augsburg + Gersthofen + Friedberg + Donauwörth + Dillingen + Günzburg + Schwabmünchen, RegN1=Region Nürnberg bestehend aus Nürnberg + Fürth + Erlangen, RegN2=Region Nürnberg bestehend aus Nürnberg + Fürth + Erlangen + Langenzenn + Herzogenaurach + Roth, AMN=Augsburg + München + Nürnberg zu einer Stichprobe zusammengefasst, EM>0=Asthmatag definiert als Tag mit relativ erhöhter Morbidität, n_{>=x}: Asthmatag definiert als Tag mit $\geq x$ Asthmanotfällen am jeweiligen Ort/in der jeweiligen Region.

Zudem wurden standardisierte Residuen für das Zusammentreffen der Ereignisse „Asthmatag“ und „Gewittertag“ sowie der korrigierte Kontingenzkoeffizient berechnet, um den Zusammenhang zwischen den beiden Variablen genauer zu beschreiben. In einer ersten Variante wurde ein Gewittertag als ein Tag mit mindestens einem Blitz im Umkreis von 20 km um eine Stadt, ein Asthmatag als ein Tag mit mindestens einem Asthmanotfall an einem bestimmten Ort definiert und der gesamte Untersuchungszeitraum einbezogen. In weiteren Schritten wurde zudem eine saisonale Differenzierung vorgenommen, verschiedene Definitionen eines „Asthmatages“ (Tage mit mindestens zwei, drei oder vier Asthmafällen, Tage mit erhöhter Morbidität) und verschiedene räumliche Auflösungen (die Städte Augsburg, München und Nürnberg einzeln, die Regionen Augsburg und Nürnberg, die Städte Augsburg, Nürnberg und München zusammengefasst zu einer Stichprobe) getestet.

Abb. 23 zeigt die Ergebnisse verschiedener Varianten der 4-Felder-Tests. Signifikante Zusammenhänge zwischen den Variablen „Asthmatag“ und „Gewittertag“ bestehen für einige Jahreszeiten bei verschiedenen Definitionen eines „Asthmatages“ und Varianten der räumlichen Betrachtung. Für Augsburg trifft dies nur im Winter zu, für München ganzjährig sowie im Herbst und Winter, für Nürnberg nur ganzjährig und im Herbst. In der Gewittersaison April bis September und im Sommer sind nur die kombinierte Stichprobe aller drei Städte sowie eine erweiterte Region um Nürnberg signifikant. Letztere ist auch im Frühjahr signifikant neben zwei erweiterten Varianten um Augsburg. Die Werte des korrigierten Kontingenzkoeffizienten sind in allen Fällen gering (maximal 0,16 für München im Winter), der Zusammenhang somit schwach. Weiterhin ist zu beachten, dass die standardisierten Residuen in den Fällen mit signifikantem Zusammenhang nicht immer positiv sind (zum Beispiel im Frühjahr für die Region Augsburg). Die beobachteten Häufigkeiten sind dann also geringer als die erwarteten. Das heißt, das Auftreten von Asthmanotfällen ist bei Gewittertätigkeit sogar reduziert. Ein entsprechender kausaler Effekt ist denkbar durch die Niederschlagswirkung, die die Pollen- und Sporenbelastung durch Auswaschen auch reduzieren kann. Eine klare Systematik des Auftretens der signifikanten Zusammenhänge ist nicht ersichtlich, abgesehen etwa von einer Häufung im Herbst und Winter. Insgesamt jedoch überwiegt ein positiver Zusammenhang, sowohl unter den signifikanten als auch unter den nicht-signifikanten Ergebnissen. Dementsprechend kann festgehalten werden, dass es eine Tendenz zu positiven Zusammenhängen gibt, die vereinzelt und relativ unsystematisch auch signifikant sind.

Datensatz NAD2

Für den Datensatz mit Verortung der Notfälle über Postleitzahlen (NAD2, s. Kap. 4.1) wurden weitere statistische Tests durchgeführt, um einen signifikanten Zusammenhang zwischen Asthmanotfällen (NAD2-Datensatz) und Gewitterzellen zu untersuchen. Dazu wurden Chi-Quadrat-Tests wie für den NAD1-Datensatz sowie darüber hinaus Chi-Quadrat-Tests mit simulierten p-Werten, G-Tests, exakte Tests nach Fisher, Jaccard-Tests sowie Rangkorrelationsanalysen nach Spearman und Kendall durchgeführt. Die vier erstgenannten Verfahren überprüfen in verschiedenen Varianten ob in einer Kontingenztabelle die Kombination von Gewittertag und Asthmafalltag überzufällig auftritt. Ähnlich prüft der Jaccard-Test die Übereinstimmung der Partitionierungen aller Tage hinsichtlich von Gewitter und Asthma, während die Rangkorrelationsanalysen hingegen auch die Stärke der Ausprägung der Phänomene berücksichtigen, also die Anzahl der Asthmafälle und die Anzahl der Gewitterzellen im Bereich. Die Tests wurden für jedes Postleitzahlengebiet in Bayern einzeln vorgenommen. Es wurden jeweils nur diejenigen Asthmanotfälle untersucht, die sich innerhalb

des zu untersuchenden Postleitzahlengebietes befinden sowie Gewitterzellen, die innerhalb von 10 km oder 20 km um das Zentrum des jeweiligen Postleitzahlgebietes liegen. Die Tests fanden auf der Basis von Tageswerten statt, bei welchen ein Asthma- bzw. Gewittertag mindestens einen Fall von Asthmanotfall oder Gewitterzelle beinhalten muss. Des Weiteren wurden die Analysen jeweils für das ganze Jahr, die Gewittersaison (April bis September) sowie für den Sommer (Juni, Juli und August) durchgeführt. Auf der zeitlichen Ebene wurde zusätzlich zum einen unterschieden, ob Asthmanotfälle und Gewitterzellen am gleichen Tag stattfanden oder die Notfälle mit einem Zeitversatz von einem Tag zu den Gewitterzellen auftraten. Zum anderen wurden auch zeitliche Unschärfen jeweils von Notfällen und Gewitterzellen von zwei, drei und fünf Tagen betrachtet und darüber hinaus mit den Zeitversätzen von einem, zwei und vier Tagen kombiniert. Innerhalb der Asthmanotfälle fand eine Differenzierung nach den ICD10-Codes statt (vgl. Tab. 1). So wurden einerseits alle Notfälle mit Atemwegserkrankungen analysiert, während auf der anderen Seite nur die Notfälle untersucht wurden, welche Allergisches Asthma (ICD10-Codes J45.0 und J46, entspricht der Gruppe AA) und Nicht-allergisches Asthma (ICD10-Codes J45.1, J45.8, J45.9, F54 und J82, entspricht der Gruppe AB) beinhalten.

Die Ergebnisse der verschiedenen statistischen Tests zeigen hierbei kein einheitliches Bild und nur wenige Postleitzahlengebiete, insbesondere aufgrund geringer Fallzahlen in vielen Gebieten, ein signifikantes Ergebnis. Einige Postleitzahlengebiete konnten für bestimmte Jahreszeiten oder Diagnosegruppen nicht untersucht werden, da diese Postleitzahlengebiete im gesamten Zeitraum keinerlei Asthmanotfälle aufweisen. Es ergeben sich aber auch hohe Matchexcess-Werte z.B. von 10,06 Tagen für das Postleitzahlgebiet 83471 Berchtesgaden bei einem P-Wert von $p=0.001$, was bedeutet, dass in den Jahren 2010 bis 2017 an 10 Tagen mehr, als es ohne Zusammenhang zwischen Asthma und Gewittern zu erwarten wäre, ein Asthmanotfall auftritt. Pro Jahr ergibt dies 1,25 Tage, an denen ein zusätzlicher Notruf im Zusammenhang mit Gewittern zu verzeichnen war.

Tab. 3: Anteil der Postleitzahlengebiete mit positivem Matchexcess an allen signifikant getesteten Gebieten für die ICD10-Gruppierung AA und AB (Datensatz NAD2) für den Chi-Quadrat-Test; Gewitterdefinition: Gewitterzellen, die innerhalb von 10 km bzw. 20 km um das Zentrum der zu untersuchenden Postleitzahl liegen; Normal: Ohne Zeitversatz und Unschärfe; Uns x: Unschärfe mit x Tagen; Lag x: Zeitversatz mit x Tagen; Sommer: Juni, Juli, August, Gewittersaison: April bis September

	Gewitterdefinition 10km			Gewitterdefinition 20km		
	Jahr	Sommer	Gewitter saison	Jahr	Sommer	Gewitter saison
Uns 5 Lag 4	0,80	0,78	0,78	0,66	0,65	0,64
Uns 5	0,81	0,80	0,80	0,71	0,67	0,68
Uns 3 Lag 2	0,95	0,95	0,93	0,87	0,82	0,82
Uns 3	0,96	0,94	0,95	0,89	0,85	0,88
Uns 2 Lag 1	0,99	0,99	0,99	0,95	0,95	0,94
Uns 2	1,00	1,00	1,00	0,95	0,98	0,96
Lag 1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Normal	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Weiterhin weisen die Gebiete mit signifikantem Zusammenhang bei keiner und geringer Unschärfe und geringem Zeitversatz einen sehr hohen Anteil (80 bis 100%) an positivem Matchexcess auf, wie exemplarisch in Abb. 24 dargestellt und systematisch in Tab. 3 aufgeführt ist. Ein positiver Matchexcess bedeutet, dass in diesen Postleitzahlengebieten signifikant mehr Tage mit Asthmanotfällen und Gewitterzellen auftreten als erwartet. Er ergibt sich aus der Differenz zwischen der Anzahl an Tagen mit Asthma und Gewitter und der Anzahl

der Tage mit Asthma, wenn kein Zusammenhang mit Gewittern angenommen wird (Erwartungswert). Der Wert 1,00 in Tab. 3 bedeutet, dass alle Postleitzahlengebiete, die einen signifikanten Zusammenhang zeigen auch einen positiven Zusammenhang aufweisen (Gewitter und Asthma treten überzufällig oft zusammen auf). Ein Wert von 0,8 besagt, dass dies für 80% aller Postleitzahlengebiete der Fall ist, während in 20% der Gebiete ein umgekehrter Zusammenhang beobachtet wird, d.h. an Gewittertagen treten weniger Asthmafälle als erwartet auf.

Somit ist in den Postleitzahlengebieten mit einem signifikanten Ergebnis mit geringer Unschärfe und Zeitversatz ein überwiegend positiver Zusammenhang zwischen Asthmanotfällen und Gewitterzellen erkennbar. Dieser Anteil nimmt mit zunehmender Unschärfe und Zeitversatz deutlich ab, was plausibel erscheint und gegen ein statistisches Artefakt spricht. Ebenso tritt bei geringerer Distanz (10km) zwischen Gewitterzellen und Postleitzahlengebiet das Phänomen eines positiven Zusammenhangs zwischen Gewitter und Asthma öfter auf als bei größerem Abstand. Der Vergleich zwischen ganzjähriger und saisonaler Betrachtung liefert bei den Chi-Quadrat-Tests und den G-Tests keine räumlich konsistenten Ergebnisse. D.h. Signifikanz, Stärke und Vorzeichen des Zusammenhangs wechseln zwischen den einzelnen Postleitzahlengebieten. Zusätzlich fallen bei der ICD-Gruppierung AA und AB für den Sommer und die Gewittersaison viele Postleitzahlengebiete weg, weil diese keine oder zu wenige Notfälle beinhalten. Dadurch ist der Vergleich zwischen den verschiedenen Zeiträumen bei diesen Tests nicht sicher durchführbar. Allerdings weisen bei beiden ICD-Gruppen AA und AB aller signifikanten Koeffizienten (Jaccard, Kendall und Spearman) für den Sommer, also der Phase mit stärkster Gewittertätigkeit, höhere Werte auf als für die gesamte Gewittersaison und die ganzjährige Betrachtung. Dies bestätigt, dass eine Aufteilung nach Jahreszeiten relevant ist, auch wenn die signifikanten Koeffizienten generell keine hohen Werte aufweisen.

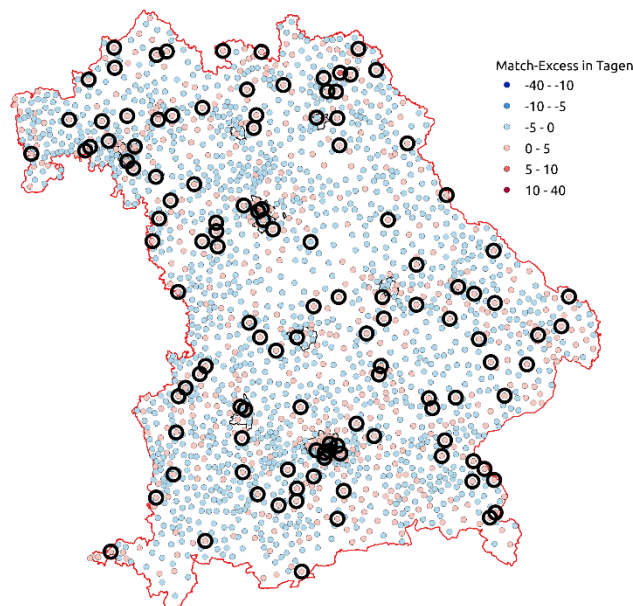


Abb. 24: Räumliche Verteilung der Abweichung der Tage mit Asthma (Datensatz NAD2) und Gewitter vom statistisch erwarteten Wert für Sommer bei einer Entfernung des Gewitters von 10 km vom Zentrum des Postleitzahlengebietes (Match-Excess der Chi-Quadrat-Analyse). Postleitzahlengebiete mit erhöhtem Auftreten von Thunderstorm-Asthma-Tagen sind in Rot dargestellt. Schwarze Kreise symbolisieren signifikante Überzufälligkeit bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 90%.

Ein weiterer Vergleich zwischen der unterschiedlichen Definition eines Gewittertages zeigt, dass zwar bei Gewittertagen mit einem Radius von 20 km um das Zentrum des jeweiligen Postleitzahlgebietes mehr Postleitzahlen ein signifikantes Ergebnis aufweisen als Gewittertage mit einem Radius von 10 km. Allerdings ist der Anteil an signifikanten Postleitzahlen mit einem positivem Matchexcess geringer als bei Gewittertagen mit einem Radius von 10 km, was einen Kausalzusammenhang zwischen Gewittertätigkeit und Asthmafällen zusätzlich stützt.

Die signifikanten Werte der Koeffizienten (Jaccard, Kendall und Spearman) besitzen wie bereits erwähnt stets geringe Werte (maximal 0,38). Werden alle Notfälle untersucht, so weisen die signifikanten Jaccard-Koeffizienten höhere Werte und die signifikanten Spearman- und Kendall-Koeffizienten geringere Werte auf als bei den Analysen der ICD10-Gruppierung AA und AB. Dies ist auf die unterschiedlichen Test-Statistiken zurückzuführen, die bei dem hier erhöhten Anteil an zufälligem Rauschen an der Varianz der untersuchten Variablen mit unterschiedlichen Anteilen an sog. Fehlern erster Art (Alphafehler) reagieren, die fälschlicherweise auf einen signifikanten Zusammenhang hinweisen. Allerdings ist der Anteil an positiven signifikanten Spearman- und Kendall-Koeffizienten bei der Betrachtung aller ICD10-Codes geringer. Ein weiterer Unterschied zwischen den verschiedenen ICD10-Gruppierungsvarianten bei allen Tests ist ein höherer Anteil an Postleitzahlen, die ein signifikantes Ergebnis zeigen, aber einen geringeren Anteil an Postleitzahlen mit signifikantem positivem Matchexcess bei der Untersuchung aller ICD10-Codes im Vergleich zur ICD10-Gruppierung AA und AB. Auch die jeweiligen Postleitzahlengebiete mit einem signifikanten Ergebnis variieren zwischen den ICD10-Varianten.

Insgesamt weisen demnach in verschiedenen Analysevarianten jeweils einige Postleitzahlengebiete signifikante Ergebnisse auf, die auf einen Thunderstorm-Asthma-Effekt hindeuten. Allerdings variieren die Regionen mit signifikanten Ergebnissen von Variante zu Variante ohne klar erkennbares Muster. Das eindeutige und starke Überwiegen der positiven Matchexcess-Werte bei den signifikanten Testergebnissen spricht jedoch deutlich für eine Überzufälligkeit und gegen statistisches Rauschen als Ursache für die signifikanten Fälle.

6.2.2. Behandlungsfälle der gesetzlichen Krankenversicherung

In einer Gesamtanalyse der täglichen Fallzahlen der gesetzlichen Versicherungen (Datensatz GKV, gefiltert wie in 4.3 beschrieben) ergeben sich Korrelationskoeffizienten von $r=-0.05$ (Pearson) und $r=0.02$ (Spearman) für den Zusammenhang mit der Anzahl der Blitze in Gesamtbayern. Der aufgrund der nicht gegebenen Normalverteilung nur für den Spearmankoeffizienten durchgeführte Signifikanztest ergibt mit einem p-value 0.460 keine Verschiedenheit von Null in der Grundgesamtheit. Demnach ist in dieser Gesamtanalyse kein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Behandlungsfälle mit Atemwegsbeschwerden und Gewittertätigkeit feststellbar. Da dieser äußerst umfangreiche Datensatz erst gegen Ende des Projekts verfügbar wurde, konnten keine weiteren Datenfilter- bzw. Subsamplingmethoden angewandt werden, um potentiell vorhandene Signale eines Thunderstorm-Asthma-Zusammenhangs zu extrahieren. Um die in Kapitel 4.3 beschriebenen praxisbedingten Variabilitätsanteile effektiv und ohne die Gefahr einer Artefaktbildung zu eliminieren, wären jedoch alle Behandlungsdaten unabhängig der Diagnose notwendig, um den relativen Anteil der asthmabedingten Behandlungsfälle an der Gesamtheit aller Behandlungsfälle eines jeden Tages erfassen zu können. Diese Strategie, die mit einem erheblichen Mehraufwand auch an Datenschutzmaßnahmen einhergeht, bleibt demnach künftigen Untersuchungen vorbehalten.

6.3 Neuronale Netze

In einer weiteren Analysevariante wurde der Zusammenhang zwischen Asthmafällen (NAD2-Datensatz) und atmosphärischen Variablen (GFS-Datensatz) mittels künstlicher neuronaler Netze (Artificial Neural Networks, ANN) untersucht. Ziel war hierbei das Auftreten von Asthma anhand von meteorologischen Prädiktoren vorherzusagen und über die Güte des Modells die Stärke des Zusammenhangs zu messen. Künstliche neuronale Netze verknüpfen Eingangsinformationen von Prädiktorvariablen mit einer Zielvariablen über ein Netzwerk an Knoten (in Analogie zu Neuronen), die über mathematische Funktionen (in Analogie zu Axonen) verbunden sind. Die Netzwerkarchitektur dieser Verbindungen besteht aus einer Eingabeschicht (input layer) in der jede Prädiktorvariable ein Neuron darstellt, einer sog. verborgenen Schicht (hidden layer) mit einer frei definierbaren Anzahl an verborgenen Neuronen sowie einer Ausgabeschicht (output layer) mit der PrädiktandenvARIABLEN als Ausgabeneuron. Ein jedes verborgenes Neuron ist hierbei über Gewichtungskoeffizienten mit allen Eingangsneuronen verknüpft und das Ausgabeneuron mit allen verborgenen Neuronen. Um eine Schätzung der Zielvariablen aus den Eingangsvariablen durchzuführen, werden die Werte der atmosphärischen Prädiktorvariablen als gewichtete Summe den einzelnen verborgenen Neuronen zugeführt und mittels einer Aktivierungsfunktion der verborgenen Neuronen (hier die Logsig-Funktion) in einen Ausgabewert der verborgenen Neuronen umgerechnet. Die Ausgaben der verborgenen Neuronen ergeben dann als abermals gewichtete Summe den Wert des Ausgabeneurons (hier Anzahl der Asthmanotruffälle). Initiiert wurden die Gewichte rein zufällig, um in iterativen Trainingszyklen anhand des Fehlers zwischen vorhergesagtem Zielwert und tatsächlich beobachtetem Zielwert die Gewichte zu optimieren.

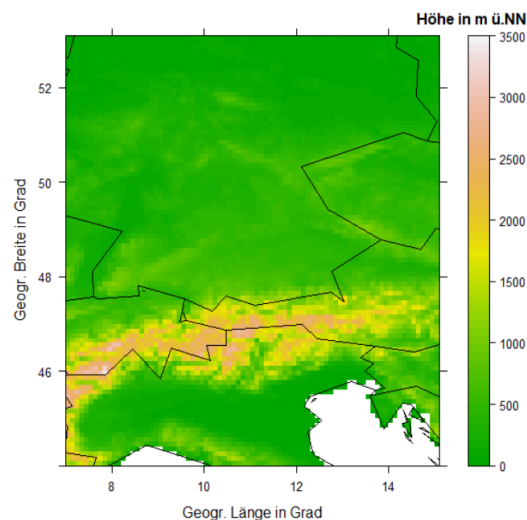


Abb. 25: Gitternetzausschnitt der atmosphärischen Variablenfelder der GFS-Analyse die als Prädiktoren der neuronalen Netze verwendet wurden (Ausschnitt 44°N-53°N und 7°E bis 15°E, Auflösung 0,5°).

Hierbei wurden die neuronalen Netze mit Reihen der Diagnosehäufigkeiten für Notrufeinsätze aus Tab. 1 als Output und jeweils verschiedenen atmosphärischen Variablen als Inputlayer trainiert. Hierbei wurden in Voruntersuchungen folgende geeignete Prädiktoren bzw. Prädiktorkombinationen ermittelt: CAPE, CAPE+CIN, CIN, HGT bei 1000 hPa, WSPD bei 500 hPa + RH bei 100 hPa und eine Kombination aus allen genannten Prädiktoren (all). Der Gitternetzausschnitt für die atmosphärischen Variablen wurde mit einer Ausdehnung 44°N-53°N und 7°E bis 15°E als geeignet ermittelt (s. Abb. 25). Da neuronale Netze über die

mögliche geringere Gewichtung der Input-Neuronen weniger anfällig für redundante oder unabhängige Prädiktorensignale sind, wurde hier ein größerer Ausschnitt als bei der Klassifikation gewählt (vgl. Abb. 19).

Zur Definition der Prädiktandenreihe wurden alle Notruffälle einer Diagnoseart (Datensatz NAD2) in Gesamtbayern zusammengefasst und nicht räumlich getrennt behandelt. Nach einer systematischen Screeningprozedur erwies sich die Netzwerkarchitektur mit einem einzigen Hidden-Layer als optimal. Das Training der Koeffizienten wurde durch das sog. Early-Stopping-Kriterium beendet, das durch die Überprüfung der Übertragbarkeit des Netzes auf unabhängige Daten eine Überanpassung an die Datensätze (Overfitting) verhindert.

Die Qualität der resultierenden Modelle wurden anhand verschiedener Metriken ermittelt, die exemplarisch für die Analyse der Diagnosegruppe AA aus Tab. 1 in Abb. 26 für verschiedene Jahreszeiten dargestellt sind.

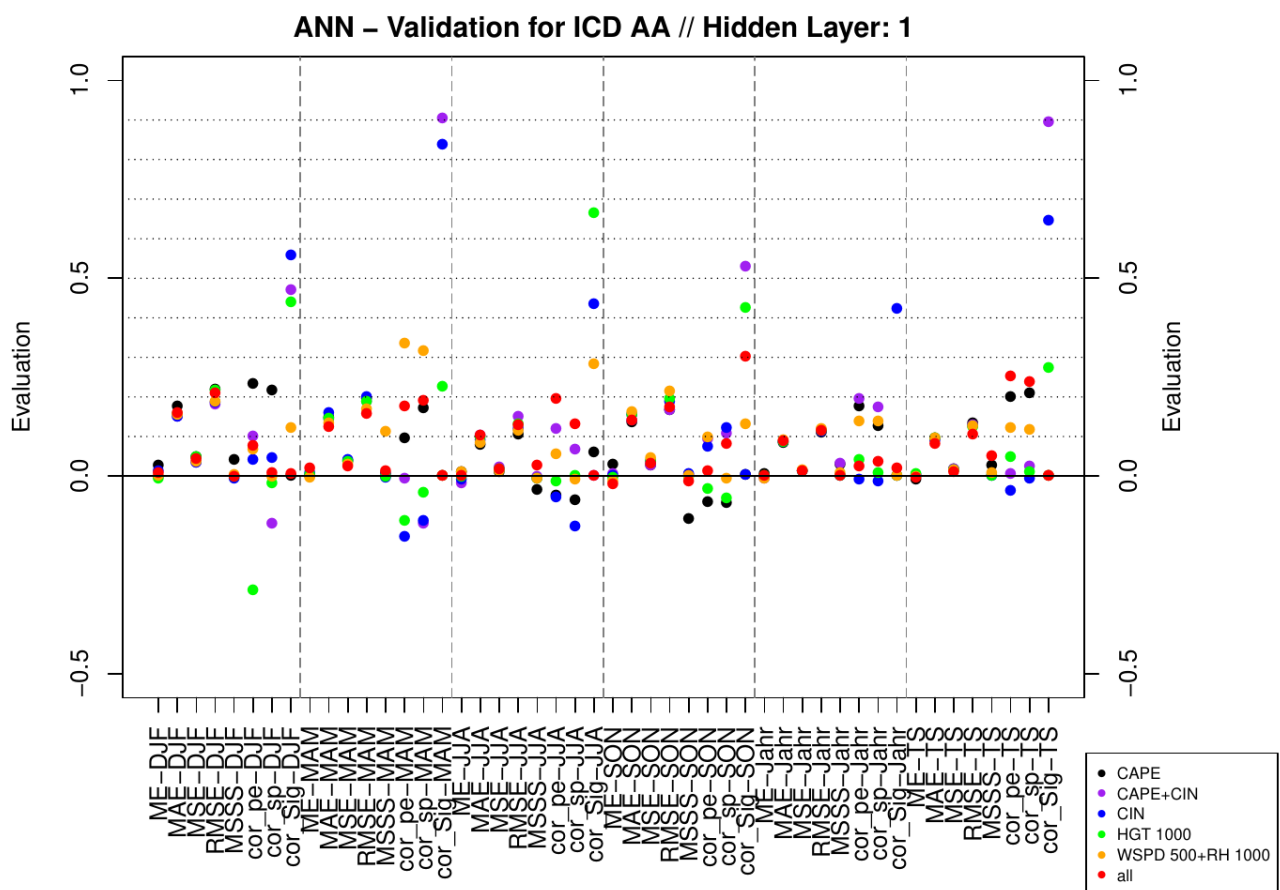


Abb. 26: Evaluierungsmetriken für Neuronale Netzwerk-Modelle zur Simulation der Auftrittshäufigkeiten von Asthmafällen der ICD-Gruppe AA aus Tab. 1 (Datensatz NAD2) für verschiedene jahreszeitliche Varianten: DJF: Winter, MAM: Frühjahr, JJA: Sommer, SON: Herbst, Jahr: ganzjährig und TS: Gewittersaison April bis September. Als atmosphärische Prädiktoren dienen Gitterpunktwerte des GFS-Datensatzes (siehe Farblegende). Die Metriken umfassen: ME (Mittlerer Fehler), MAE (Mittlerer absoluter Fehler), MSE (Mittlerer quadratischer Fehler), RMSE (Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers), MSSS (Skill Score der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers), cor_pe (Korrelationskoeffizient nach Pearson), cor_sp (Korrelationskoeffizient nach Spearman) und cor_Sig (P-Wert des Signifikanztests des Pearsonkoeffizienten).

Hierbei gibt die jeweils letzte Spalte in jeder Saison (cor_Sig) den P-Wert für die Korrelationsanalyse an und signalisiert mit hohen Werten eine schlechte Abbildungsleistung. In Fällen hoher Signifikanz, liegen die Punkte auf der Null-Linie übereinander, so dass sie

mitunter nicht einzeln zu erkennen sind, was als Zeichen für hohe Modellqualität zu werten ist. Auch die Metriken ME, MAE, MSE und RMSE drücken bei niedrigen Werten hohe Modellqualität aus, während die Korrelationskoeffizienten (Abb. 26 cor_pe für Pearson und cor_sp für Spearman) mit hohen Werten bessere Modelle kennzeichnen.

Insgesamt ergeben sich hierbei relativ niedrige Korrelationskoeffizienten von maximal ca. 0,3 und Fehlerbereiche von ca. 10 bis 20%, was jedoch angesichts der Datenlage immer noch unerwartet performant ausfällt. In Abb. 26 ergeben sich relativ gute Modellergebnisse hinsichtlich der Korrelationskoeffizienten (cor_pe und cor_sp) für das Gesamtkollektiv der Prädiktoren (rot) in der Gewittersaison (ST) mit den zweitbesten Werten überhaupt ($cor_pe=0.37$, $cor_sp=0.31$) sowie im Frühjahr (MAM) und Sommer (JJA). Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte (Orange) schneiden insbesondere im Frühjahr mit den besten und signifikanten Korrelationskoeffizienten von $cor_pe=0.43$ und $cor_sp=0.38$ gut ab. Die Kombination aus CAPE und CIN (Violett) ist im Sommer und ganzjährig bedeutsam, CIN allein (Blau) nur im Herbst. CAPE allein (Schwarz) ist im Winter die beste Prädiktorenkombination, aber eines dieser beiden Konvektionsmaße CAPE oder CIN oder deren Kombination ist in allen Jahreszeitenvarianten der Varianzerklärung für Asthmafälle dienlich.

Hieraus folgt, dass ein, wenn auch insgesamt geringer, Teil der Varianz der Asthmaauftrittshäufigkeiten bei signifikant überzufälliger Validierung mit meteorologischen Variablen modelliert werden kann. Dies ist als weiteres, deutliches Indiz für das Vorhandensein eines schwachen, jedoch in den Daten beobachtbaren, Zusammenhangs zwischen Asthma und meteorologischen, insbesondere gewitterassoziierten, Einflüssen zu bewerten.

6.4 Analyse von Häufungsepisoden der Notdienstfälle

Da Thunderstorm-Asthma-Events mit einer ungewöhnlich hohen Auftrittshäufigkeit von Asthmaanfällen in einem kurzen Zeitraum verbunden sind, wurden raumzeitliche Häufungen der Notrufe detektiert und deren Auftreten auf einen Zusammenhang mit meteorologischen Variablen, Gewitterzellen und Aeroallergenkonzentrationen untersucht.

Hierzu wurden 24-Stunden-Summen der Notrufe für jedes Postleitzahlengebiet und jede ICD-Code-Gruppe berechnet (Datensatz NAD2), wobei jeweils alle Fälle eines Postleitzahlengebietes in einem Radius von 5 km um das Zentrum herum einbezogen wurden. Jeder Zeitraum mit 24-h Summe über dem 99. Quantil der 24h-Summen des jeweiligen Postleitzahlengebietes wurde zunächst als Häufungsperiode markiert, sodass eine Definition spezifisch für jedes Postleitzahlengebiet erfolgt. Allerdings treten in einigen Postleitzahlengebieten so wenig asthmabezogene Notfälle auf, dass der genannte Schwellenwert 1 beträgt und eine sinnvolle Definition von Astmahäufungen nicht möglich ist. Daher wurden in einem zweiten Schritt Häufungen mit zu geringen Notrufzahlen verworfen. Es wurden diejenigen Gebiete beibehalten, deren Maximum der 24h-Summen über dem 95. Quantil der Maxima aller Postleitzahlgebiete liegt. Somit erhält man eine Definition von Häufungsevents spezifisch für jedes Gebiet und ICD-Gruppe.

Die auf diese Weise detektierten Astmahäufungen wurden auf die Gleichzeitigkeit mit Gewittern untersucht und ggf. die zeitliche Entwicklung meteorologischer Variablen an der jeweils nächstgelegenen DWD-Station betrachtet. Wo vorhanden wurden Pollen- und Pilzsporendaten ebenfalls einbezogen. Des Weiteren wurden die großräumigen GFS-Variablen für Situationen mit und ohne Häufungsevents mittels saisonaler Kompositen und deren Anomalien vom saisonalen Mittelwert gegenübergestellt und auf signifikante Unterschiede untersucht. Schließlich wurden Vierfeldertafeln und der Chi-Quadratstest

ganzjährig sowie saisonal differenziert berechnet bzw. durchgeführt, um gebietsspezifisch auf signifikante Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von Asthmahäufungen und Gewitterzellen bzw. über- vs. unterdurchschnittliche Werte der großräumigen meteorologischen Variablen hin zu untersuchen, wobei eine Bonferroni-Korrektur für multiple Tests angewendet wurde.

In den meisten Fällen einer Häufung asthmabedingter Notrufe konnte keine Gleichzeitigkeit mit einem Gewitter festgestellt werden. In einigen Fällen treten jedoch kurz nach einem Gewitter oder mit leichtem Zeitversatz gehäuft Notrufe auf. Ein Beispiel ist ein Ereignis am 22.08.2012 in Oberstdorf, bei dem in der Stunde nach einem Gewitter mit mäßigem Niederschlag und einem leichten Maximum der Windgeschwindigkeiten sechs asthmabedingte Notrufe zu verzeichnen sind. Auf einen kausalen Zusammenhang kann daraus jedoch noch nicht geschlossen werden.

Die Auswertung der Kompositen und Anomalien der großskaligen Variablen ergibt in vielen Fällen keinen klaren Hinweis auf positive Zusammenhänge zwischen Asthmahäufungen und Gewittern. Die Ergebnisse deuten eher noch einen umgekehrten, negativen Zusammenhang an. Einige Ausnahmen in verschiedenen Postleitzahlgebieten und zu verschiedenen Jahreszeiten zeigen jedoch auch erhöhte Werte des CAPE-Index, negative Anomalien der convective inhibition oder des Lifted Index oder eine niedrigere Höhe der planetaren Grenzschicht in Zeiträumen mit Asthmahäufungen, was jeweils Hinweise auf einen möglichen Zusammenhang mit Gewittertätigkeit bzw. erhöhten Konzentrationen von Aeroallergenen gibt.

Bei den Chi-Quadrattests kommen bei allen Variablen PLZ-Gebiete mit positiven sowie negativen Zusammenhängen mit Asthmahäufungen vor. Bei saisonaler Differenzierung sowie den Variablen „Simultaneität mit Gewittern“ (gleichzeitiges Auftreten einer Häufung asthmabedingter Notrufe mit Gewitterzellen, Variable „th_cell“ in Abbildung 27) und Aeroallergenkonzentrationen konnten die Tests oft nicht in sinnvoller Weise durchgeführt werden, da keine vier Felder zustande kommen. Bei ganzjähriger Betrachtung der Ergebnisse nach der Bonferroni-Korrektur ergeben sich jedoch einige Hinweise auf mögliche Zusammenhänge (Abb. 27).

Beim CAPE-Index zeigen sich überwiegend positive Zusammenhänge, bei der convective inhibition überwiegend negative, was für eine Überzufälligkeit des gemeinsamen Auftretens von Asthmahäufungen und (starken) Gewittern und damit für die Relevanz von Thunderstorm-Asthma spricht. Der Lifted Index, bei dem negative Werte auf eine labile Schichtung hindeuten, zeigt hingegen überwiegend einen gegenteiligen Zusammenhang. Allerdings hat von allen Stabilitätsindizes der CAPE-Index die höchste Korrelation mit Blitzsummen, weshalb dieser ggf. für die Untersuchung von Thunderstorm-Asthma zu bevorzugen ist. Bei der Höhe der planetaren Grenzschicht ergeben sich in einigen ICD-Gruppen eher positive Zusammenhänge, was ggf. auch für verstärkte Konvektion und möglicherweise Gewittertätigkeit in Zeiträumen mit Asthmahäufung sprechen könnte.

sig. after Bonferroni

	CAPE	CIN	4LFTX	HPBL	HGT	TMP	WSPD	RH	th_cell
J45	s = -2,71 p = 0 or = 0 n = 3	s = 1,61 p = 0 or = Inf n = 1	s = 2,17 p = 0 or = 4,01 n = 10	s = -0,19 p = 0 or = 2,3 n = 2	s = 2,52 p = 0 or = 5,22 n = 32	s = -2,19 p = 0 or = 0,3 n = 23	s = 2,83 p = 0 or = 5,94 n = 17	s = 2,47 p = 0 or = 2,51 n = 15	
AAerw	s = 3,93 p = 0 or = 3,89 n = 12	s = -1,88 p = 0 or = 0,27 n = 8	s = 2,69 p = 0 or = 2,83 n = 22	s = 3,03 p = 0 or = 7,91 n = 9	s = 2,52 p = 0 or = 3,83 n = 165	s = 2,35 p = 0 or = 2,65 n = 132	s = 2,69 p = 0 or = 2,66 n = 79	s = 2,57 p = 0 or = 2,67 n = 91	s = -3,14 p = 0 or = 0 n = 2
AABD	s = 3,82 p = 0 or = 3,91 n = 20	s = -1,91 p = 0 or = 0,23 n = 15	s = 2,81 p = 0 or = 2,24 n = 64	s = 3,45 p = 0 or = 5,44 n = 3	s = -2,61 p = 0 or = 0,49 n = 288	s = -2,45 p = 0 or = 0,64 n = 240	s = 2,79 p = 0 or = 1,82 n = 150	s = -2,32 p = 0 or = 0,72 n = 130	s = -3,32 p = 0 or = 0 n = 1
AAD	s = 3,68 p = 0 or = 3,26 n = 30	s = -2,02 p = 0 or = 0,23 n = 18	s = -2,78 p = 0 or = 0,48 n = 72	s = 3,05 p = 0 or = 4,17 n = 11	s = -2,64 p = 0 or = 0,45 n = 350	s = -2,49 p = 0 or = 0,57 n = 258	s = 2,63 p = 0 or = 1,41 n = 163	s = -2,42 p = 0 or = 0,59 n = 135	s = -3,31 p = 0 or = 0 n = 1
AAB	s = 4,03 p = 0 or = 4,64 n = 13	s = -2,03 p = 0 or = 0,27 n = 7	s = 2,71 p = 0 or = 3,08 n = 25	s = 3,39 p = 0 or = 8 n = 8	s = 2,55 p = 0 or = 3,74 n = 174	s = 2,37 p = 0 or = 2,83 n = 134	s = 2,75 p = 0 or = 2,77 n = 84	s = 2,58 p = 0 or = 2,82 n = 89	s = -3,37 p = 0 or = 0 n = 1
AB	s = 3,92 p = 0 or = 3,72 n = 20	s = -1,72 p = 0 or = 0,2 n = 13	s = 2,93 p = 0 or = 3,49 n = 36	s = 3,09 p = 0 or = 3,36 n = 4	s = -2,52 p = 0 or = 0,5 n = 178	s = 2,45 p = 0 or = 2,28 n = 138	s = 2,68 p = 0 or = 2,22 n = 95	s = 2,84 p = 0 or = 2,6 n = 70	
AA	s = 3,15 p = 0 or = 3,25 n = 7	s = -1,71 p = 0 or = 0,26 n = 4	s = 0,01 p = 0 or = 1,4 n = 14	s = -2,57 p = 0 or = 0,53 n = 5	s = 2,46 p = 0 or = 3,47 n = 57	s = -2,15 p = 0 or = 0,44 n = 51	s = 2,38 p = 0 or = 3,28 n = 36	s = 2,66 p = 0 or = 3,03 n = 28	s = -2,39 p = 0,01 or = 0 n = 1

Abb. 27: Ergebnisse der ganzjährigen Chi-Quadrat-Tests, die nach der Bonferroni-Korrektur signifikant sind, für den Zusammenhang zwischen Asthmahäufungen (Datensatz NAD2) und GFS-Variablen sowie dem Auftreten von Gewitterzellen, differenziert nach ICD-Gruppierungen und deren Kombinationen (AAerw inkludiert die Diagnosen J45.8 und J45.9). Dargestellt sind die Mediane der standardisierten Residuen („s“), p-Werte („p“), Odds Ratio („or“) und die Anzahl der in der Grafik inkludierten Tests bzw. Postleitzahlengebiete und - wo vorhanden - Vertikallevel der Variablen („n“). Grüne Felder zeigen einen positiven, rote Felder einen negativen Zusammenhang in mindestens der Hälfte der einbezogenen PLZ-Gebiete an. Die atmosphärischen Variablen umfassen: CAPE (Convective Available Potential Energy), CIN (Convective Inhibition), 4LFTX (Lifted Index), HPBL (Grenzschichthöhe), HGT (geopotentielle Höhe), TMP (Temperatur), WSPD (Windgeschwindigkeit), RH (Relative Luftfeuchte) und th_cell (Koinzidenz mit Gewitterzelle).

Bei der Windgeschwindigkeit treten vermehrt positive Zusammenhänge mit Asthmahäufungen auf, was für eine verstärkte Aufwirbelung von Aeroallergenen bei hohen Windgeschwindigkeiten und damit verbunden für höhere Konzentrationen von Allergenen in der Umgebungsluft sprechen könnte. In einigen ICD-Gruppen kommen vermehrt positive Zusammenhänge mit der relativen Feuchte vor, was ein Hinweis auf die osmotisch bedingte Ruptur von Pollenkörnern bei Kontakt mit Feuchtigkeit sein könnte. Bei der Temperatur und der geopotenziellen Höhe sind die Ergebnisse relativ uneinheitlich. Der Zusammenhang mit dem Auftreten von Gewitterzellen sowie die ICD-Gruppe J45 können mit den Chi-Quadrattests kaum untersucht werden, da in zu wenigen PLZ-Gebieten ein Test möglich war.

Die Odds-Ratio beträgt oft um die 3,0 in einzelnen Fällen über 5,0, d.h. die Wahrscheinlichkeit an einem Tag mit spezifisch ausgeprägten meteorologischen Bedingungen eine Häufung von Asthmanotrufen zu verzeichnen ist in einzelnen Fällen ca. drei- bzw. fünfmal höher als an anderen Tagen. Dies trifft jedoch nur für einzelne Fälle zu.

Insgesamt sind demnach jedoch auch für diese Untersuchung Hinweise auf einen Zusammenhang von Asthmahäufungen mit meteorologischen Größen, die Gewittertätigkeit begünstigen, vorhanden. Die Zusammenhänge sind jedoch nicht überall in Bayern einheitlich ausgeprägt und können deshalb nicht als robust bewertet werden.

6.5 Zusammenhang mit Pollen- und Pilzsporen-Konzentrationen und Umweltfaktoren

Die Zusammenhangsanalysen mit verstärktem Fokus auf Pollen- und Pilzsporen wurden auf Grundlage der verschiedenen Pollenmessstationen (siehe Kapitel 5) entsprechend für verschiedene Standorte und Regionen durchgeführt. Bezüglich der Pollen- und Sporendaten wurden hier nur die konventionellen Pollendaten aus dem Hirst-Typ-Sampler am LfU verwendet (siehe Kapitel 5.1). Die Symptomdaten der Augsburger Panelstudie sowie der KVB-Daten wurden ebenfalls in Tageswerten ausgedrückt, wobei ein Lag-Effekt von minus einem Tag ebenfalls getestet wurde. Hier wurde die Summe aus der aktuellen Pollen- und Sporenkonzentration plus der Konzentration des vorherigen Tages verwendet. Meteorologische Faktoren, insbesondere Niederschlag, wurden ermittelt, um Fälle, d.h. Tage mit Niederschlag herauszufiltern. Speziell für Augsburg wurden die Daten des DWD genutzt und systematisch alle Intervalle mit Niederschlag von allen Analysen ausgeschlossen, da insbesondere starke Niederschläge Aerosolpartikel abreichern können. Die Blitzdaten wurden sowohl als absolute Zahlen als auch als binäre Daten (ja/nein) sowie gruppiert in einer logarithmischen Skala genutzt. Für die Pollenkonzentrationen, insbesondere für Gräserpollen, wurde untersucht, ob bestimmte Schwellenwerte ein klareres Muster erkennen lassen, wobei Basiswerte von 5 und 30 Pollen pro Kubikmeter untersucht wurden. Zudem wurden für Augsburg Immissionsmessungen (NO₂, O₃, PM_{2.5}, PM₁₀) vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) verwendet (jeweils als Tagesmittelwerte) und auf Wechselwirkung analysiert.

Für die statistische Analyse wurden verschiedene Datenverteilungsmuster (normal, log-normal, Poisson) geprüft und entsprechend lineare Modelle, verallgemeinerte additive Modelle und nicht-lineare Modelle getestet. Bei der Verwendung mehrerer Kofaktoren wurden faktorielle Regressionen, Ridge-Multiple-Regressionen sowie Mixed-Response-Regressionsmodelle getestet. Jeweils unter Verwendung der schrittweisen Rückwärtselimination der unabhängigen Variablen.

In Abb. 28 und 29 ist die Artenvielfalt für Pollen in Augsburg im Zeitraum 2015-2017 zu sehen. Um zu prüfen, ob es Unterschiede zwischen niedrigeren und höheren Messstationen gibt, wird die Vielfalt des gesamten Pollenspektrums für beide Messstationen und damit die Biodiversität der Pollenarten in Augsburg aufgezeigt. Insgesamt wurden hier über 40 Pollenarten in der Atmosphäre nachgewiesen. Davon machten die häufigsten 13 Arten 94 % der Gesamtmenge aus (>0,5 % relative Häufigkeit). Während des Messzeitraums von 2015 bis 2017 wurden die höchsten jährlichen Pollenkonzentrationen im Jahr 2016 und die niedrigsten im Jahr 2017 aufgezeichnet. Die häufigste Pollenart in Augsburg waren durchweg Urticaceae mit einem Anteil von bis zu 22 %. Weitere stark vertretene Pollenarten sind *Betula*, *Poaceae*, *Picea*, *Pinus* und *Fraxinus* (Abb. 28 und 29). Wie in Abb. 31 zu sehen ist, sind in Augsburg die Monate mit dem höchsten gemeinsamen Auftreten von Blitzen, Pollen in der Luft und Asthmasymptomen die Monate Mai bis August. Jede andere Kombination von Daten in anderen Intervallen würde entweder nicht genügend Datenpunkte aufweisen, um Analysen durchführen zu können, oder wäre für Gewitterasthma nicht relevant: entweder wären es pollenassoziierte allergische Symptome oder nicht pollen-, sondern gewitterassoziiertes Asthma, wie z.B. im Winter, wenn vor allem Hausstaubmilben und Viruserkrankungen stärker an der Manifestation asthmatischer und anderer Atemwegssymptome beteiligt sind.

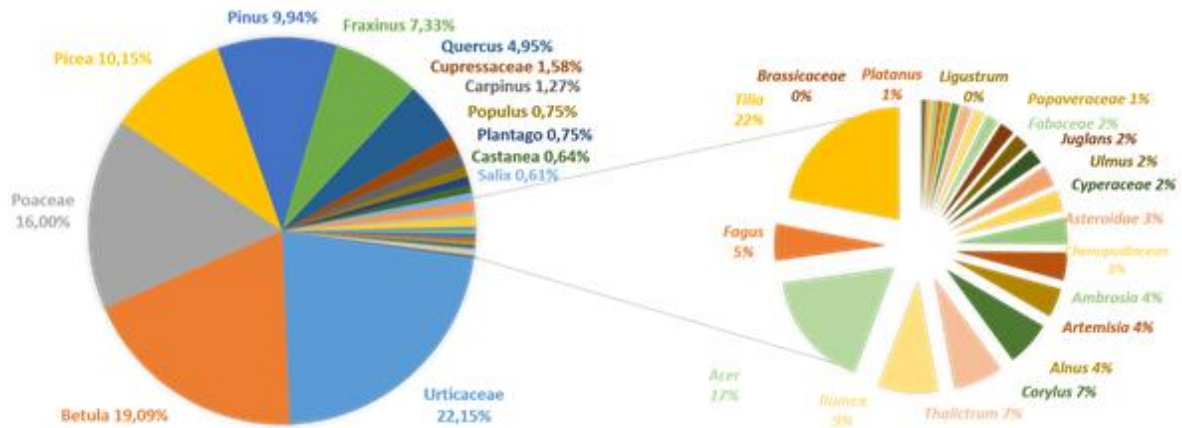


Abb. 28: Diversität der luftgetragenen Pollen in Augsburg (PAU), gemessen in 15 Metern Höhe. Angegeben ist das gesamte Biodiversitätsspektrum der Messungen auf dem Dach, die relativen Häufigkeiten (%) der 13 häufigsten Pollenarten mit >0,5% Beitrag zur gesamten Jahrespollenkonzentration.

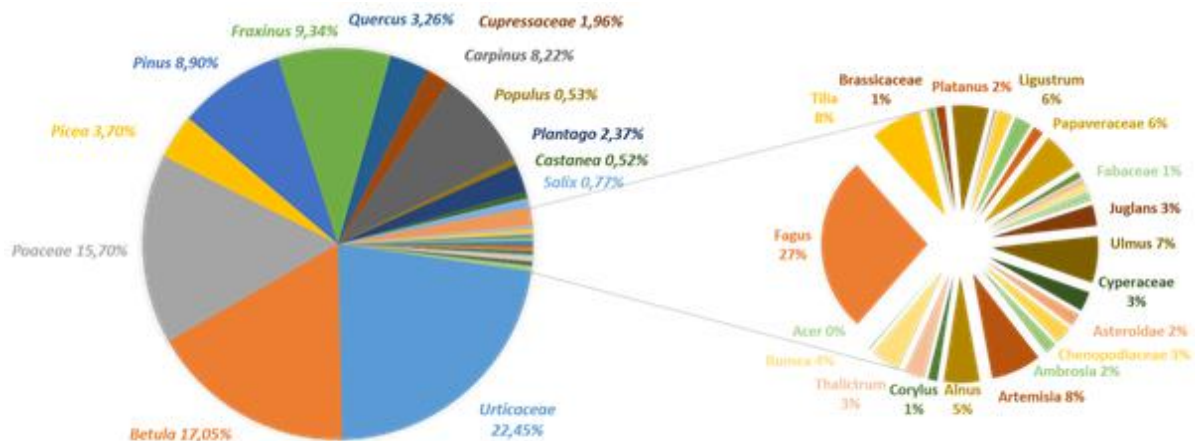


Abb. 29: Diversität der luftgetragenen Pollen in Augsburg (PAU), gemessen in 1,5 m Höhe. Angegeben ist das gesamte Biodiversitätsspektrum der Messungen auf Bodenniveau, die relativen Häufigkeiten (%) der 13 häufigsten Pollentypen mit >0,5% Beitrag zur gesamten Jahrespollenkonzentration.

Beide Messstationen sind sowohl bezüglich der Artenvielfalt als auch der Abundanz sehr ähnlich. Aus diesem Grund wurden für die weiteren Analysen die Daten der Messstation auf dem Dach verwendet. Gemäß Meilenstein 4 erfolgte die Aufbereitung der Aeroallergene sowie eine retrospektive Analyse dieser Daten: die höchsten Konzentrationen wurden in den Monaten April und Mai gemessen. Diese beiden Monate machen jährlich mehr als 30 % des Gesamtdurchschnitts aus (siehe Abb. 31 und 32). Die niedrigste Pollenkonzentration ist in den Wintermonaten zu verzeichnen. In diesen Monaten sind auch häufig Tage mit keinen Pollen in der Außenluft vorhanden. *Alternaria*-Sporen wurden während des Untersuchungszeitraums in großer Menge insbesondere in den Monaten Juli und August (2015) nachgewiesen mit 40-50 % der gesamten Sporenkonzentration im ganzen Jahr (Abb. 32).

Obwohl Urticaceae-Pollen fast das ganze Jahr über vorhanden sind und daher durchweg am häufigsten vorkommen, tragen Baumpollen (*Betula*, *Carpinus*, *Fraxinus*, *Pinus*) mehr zum Pollenspektrum bei als Kräuterpollen.

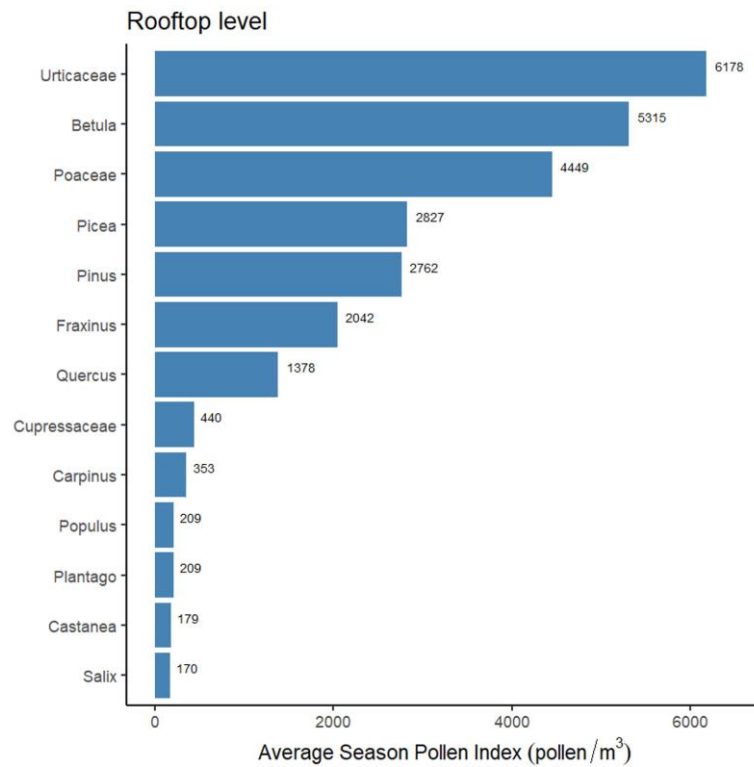


Abb. 30: Saisonaler Pollenindex der 13 häufigsten luftgetragenen Pollenarten in Augsburg (PAU), gemessen in Bodenhöhe.

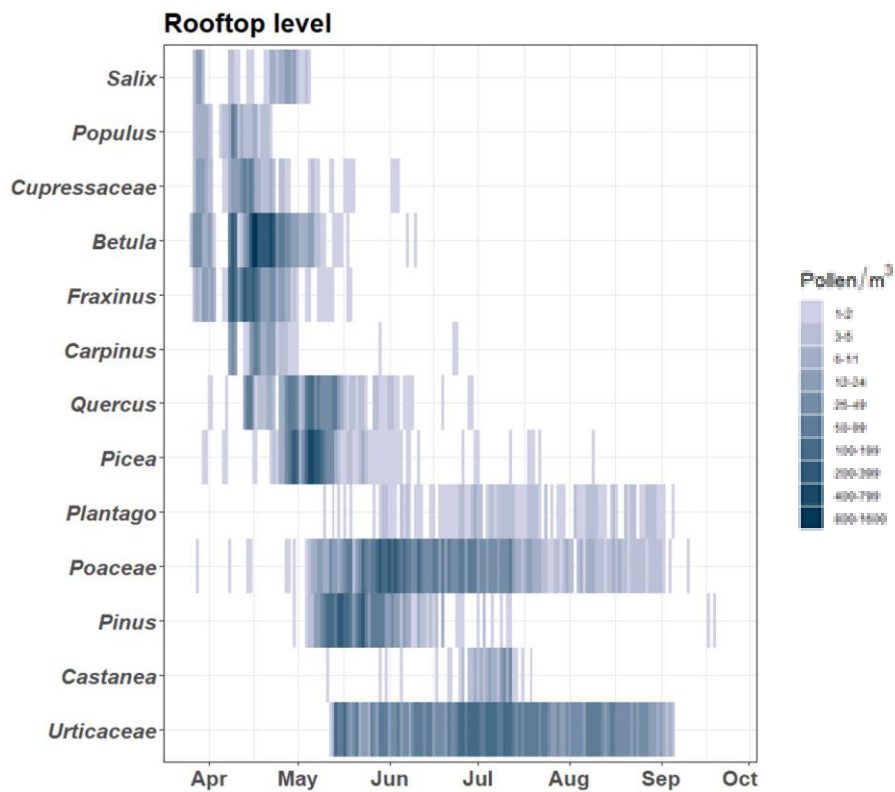


Abb. 31: Pollenkalender von Augsburg. Angegeben ist die durchschnittliche saisonale Verteilung der 13 häufigsten Pollentaxa während der Jahre 2015-2017 (PAU).

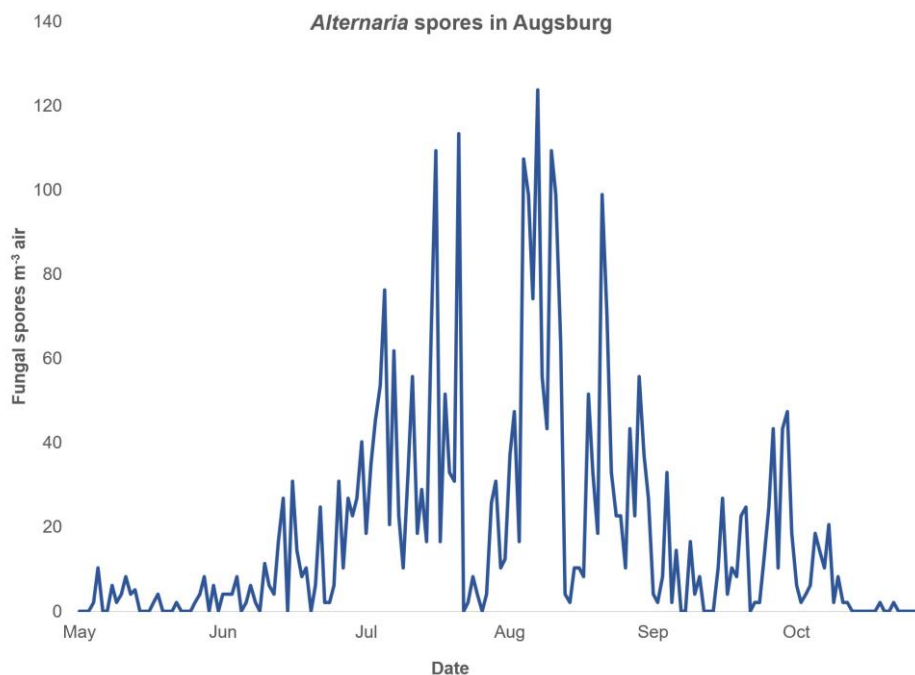


Abb. 32: Zeitliches Auftreten von *Alternaria*-Pilzsporen über das Kalenderjahr (PAU). Gezeigt ist die tägliche Konzentration von *Alternaria* Sporen pro m³ Luft im Messzeitraum vom 1. Mai bis 31. Oktober 2015.

Um zu gewährleisten, dass die Analysen aussagekräftig sind und alle Signale ermittelt werden, wurden die bereits beschriebenen Schwellenwerte und Filter berücksichtigt.

Im nächsten Schritt wurde eine Regression der allergischen Symptome der Studienteilnehmer (total Symptom score, PAN) gegen die *Poaceae*-Pollenkonzentration (PAU) und die Anzahl der Blitze durchgeführt (BLI). Der Symptomscore, wie er von Gökkaya et al. (2020) in JACI veröffentlicht wurde, bezieht sich auf ein weltweit etabliertes und anerkanntes medizinisches Score-System. Dieser Score berücksichtigt nicht nur die selbstberichteten Symptome (okulare, nasale und pulmonale), sondern auch die Gesamtsymptome, gewichtet mit zusätzlichen Faktoren wie der Medikation.

Hier konnte ein schwacher, aber signifikanter Zusammenhang festgestellt werden, wobei mehr Blitze und *Poaceae*-Pollen zu mehr respiratorischen (nasalen) Symptomen führten. Abb. 33 zeigt die Beziehung zwischen dem Total Symptom Score, der Pollenkonzentration von *Poaceae* und der Anzahl der Blitze. Sie basiert auf einem GLM, einer vollfaktoriellen Regression mit Spline-Anpassung. Die unterschiedliche Einfärbung zeigt, wie das Modell diese Beziehung vorhersagt, wobei Rot einen parallelen Anstieg aller Faktoren und des Symptomscores anzeigt. Des Weiteren wurde jeder allergische Patient einzeln untersucht, wobei die Mehrheit das gleiche Muster zeigte. Es gab einige wenige (34) Ausnahmen von allergischen Patienten, deren Symptome nicht mit Blitzen, sondern ausschließlich mit Pollenkonzentrationen korrelierten. Hierbei handelt es sich um den Anteil der Kohorte mit starken Symptomen und höherem Gesamt- und spezifischem IgE (Immunglobulin E) Antikörper, der bei allergischer Immunreaktion von zentraler Bedeutung ist. Außerdem hatten einige wenige (35) Patienten eine signifikante Korrelation mit der Anzahl der Blitze und nicht mehr mit der *Poaceae*-Pollenkonzentration, und zwar diejenigen mit niedrigem Gesamt-IgE. Im letzteren Fall wurden das gleiche Modell inklusive Luftschadstoffen (NO₂, PM_x, O₃ etc.) durchgeführt.

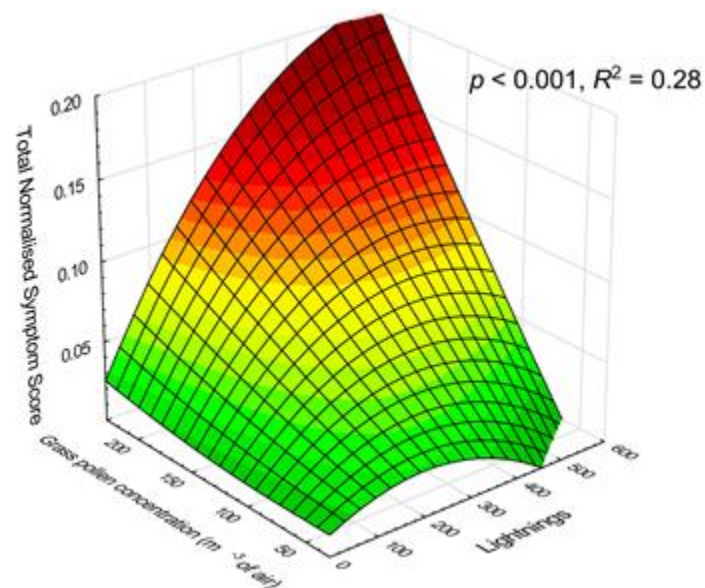


Abb. 33: Zusammenhang von allergischen Symptomen (PAN), Poaceae-Pollen (PAU) und Gewittern (BLI) in einer Augsburger Allergikerkohorte in den Jahren 2015 und 2016. Gezeigt ist ein Surface-Plot (nach Spline-Fitting) des Symptom-Scores (total symptom score) von 17 Pollenallergikern (z-Achse), aufgetragen gegen die Anzahl der Blitze (x-Achse) und die Gräserpollen-Konzentrationen (y-Achse). Nur Tage ohne Niederschlag und mit >0 Blitzen sind in die Analyse eingeschlossen.

Die Untersuchung von potentiellen Zusammenhängen zwischen Symptomwerten, Poaceae-Pollenkonzentrationen, Blitzen und Luftschadstoffen in einem multifaktoriellen Analysemodell mit Rückwärtselimination der unabhängigen Variablen und einem Signifikanzniveau von 5% ergab, dass in allen Fällen die Symptomwerte (PAN) positiv mit den Poaceae-Pollenkonzentrationen (PAU) und den Luftschadstoffen, insbesondere $PM_{2.5}$ und NO_2 korrelierten. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass die Größenordnung des Effekts mit dem Interaktionseffekt höher ist und mit der Häufigkeit der beobachteten Blitze (BLI) korreliert: geringere Symptome, wenn weniger Blitze vorhanden waren (≤ 10) und deutlich höhere Symptome bei der höchsten Anzahl von Blitzen, die auch mit mehr Luftverschmutzung und Pollen einherging. Von den weiteren untersuchten Luftschadstoffen wurde keiner bei der Rückwärtselimination beibehalten: Stickstoffdioxid und (in einigen Modellen) $PM_{2.5}$ waren die führenden Parameter, zusammen mit Poaceae-Pollen und Blitzen (siehe Abbildung 34 für $PM_{2.5}$ und Abb. 35 für NO_2).

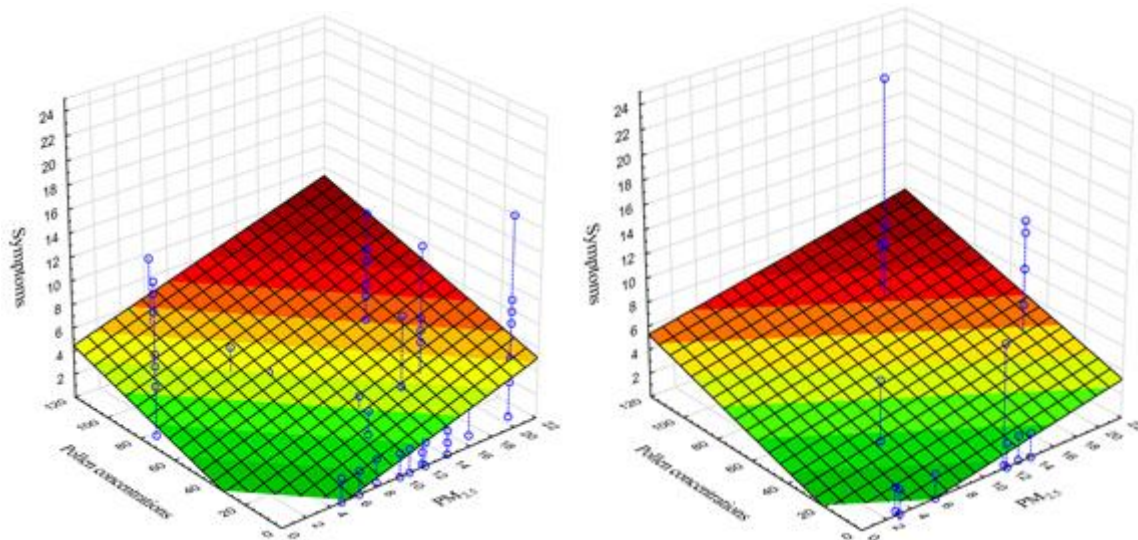


Abb. 34: Korrelation von allergischen Symptomen (PAN), Poaceae-Pollen (PAU) und PM_{2.5} Konzentration in den Jahren 2015 und 2016 in Augsburg. Gezeigt sind Surface plots (nach linearem fitting). Der Total Symptom Score (z-Achse) ist aufgetragen gegen die PM_{2.5}-Konzentration (x-Achse) und die Pollenkonzentration (y-Achse). $p < 0,001$. Der linke Plot zeigt alle Ereignisse mit maximal 10 Blitzen pro Tag, der rechte Plot alle Ereignisse mit mehr als 10 Blitzen pro Tag. Nur Tage ohne Niederschlag und mit >0 Blitzen sind in die Analyse eingeschlossen.

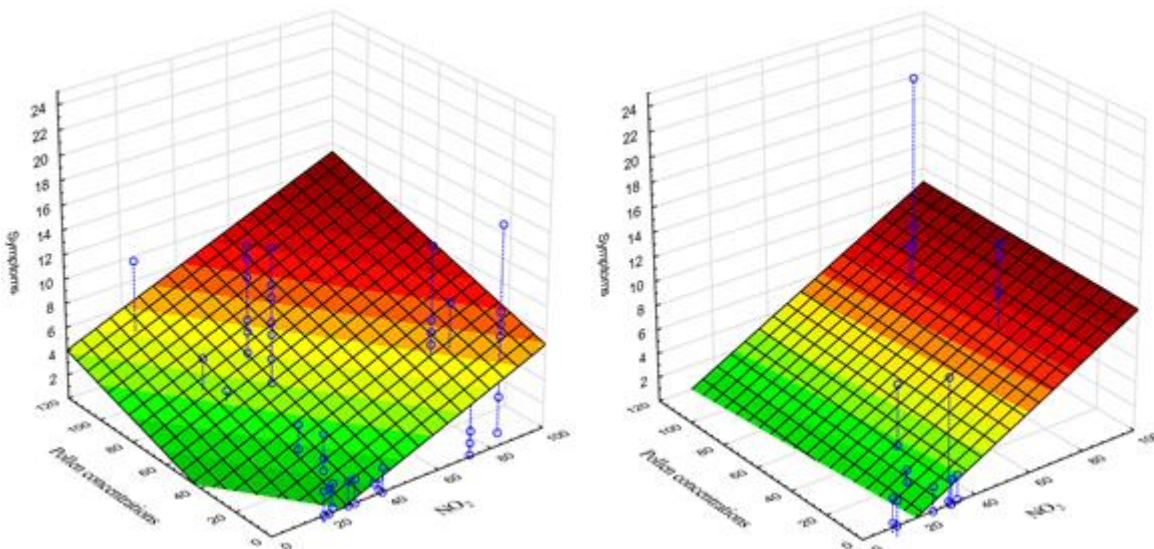


Abb. 35: Korrelation von allergischen Symptomen (PAN), Poaceae-Pollen (PAU) und NO₂ Konzentration in den Jahren 2015 und 2016 in Augsburg. Surface plots (lineares fitting) des Symptom scores (z-Achse), aufgetragen gegen die NO₂-Konzentration (x-Achse) und die Pollenkonzentration in der Luft (y-Achse). Der linke Plot zeigt Ereignisse mit maximal 10 Blitzen pro Tag, der rechte Plot mit mehr als 10 Blitzen pro Tag. $p < 0,001$.

6.5.1. Bayernweiter Zusammenhang zwischen Asthmafällen, Gewittern und Alternaria

Für die Pilzsporenhäufigkeit (*Alternaria*) an 23 Standorten in Bayern (pre-EPIN) wurde für das Jahr 2015 eine hierarchische Clusteranalyse nach Ward's durchgeführt. Die Cluster sind in Abb. 36 dargestellt. Basierend auf diesen Clustern zeigen die dunklen Farbkreise in Abb. 37 eine höhere Sporenhäufigkeit an, die roten Rahmen kennzeichnen die verschiedenen Cluster. Die Hintergrundfarbe bedeutet unterschiedliche Werte von T_{min}, wobei blau (z. B. in den Alpen) kälter und rot (z. B. im Nordwesten) wärmer bedeutet.

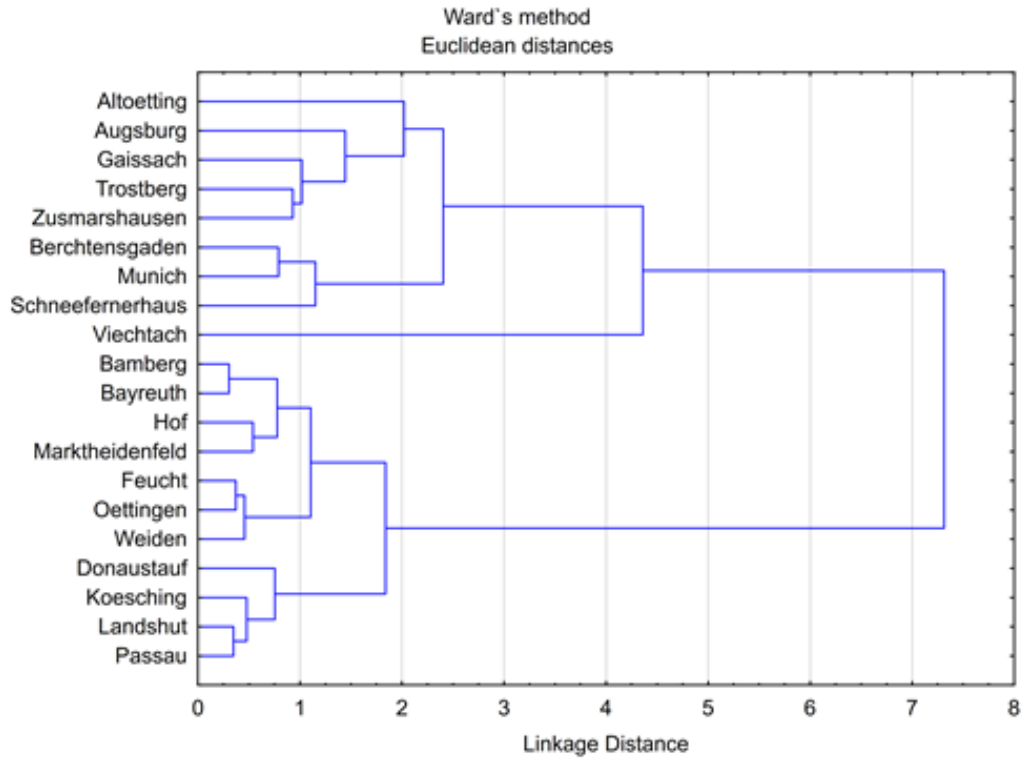


Abb. 36: Hierarchische Clusteranalyse nach der Ward's Methode für die Pilzsporenhäufigkeiten (*Alternaria*) an 23 Standorte in Bayern für das Jahr 2015 (pre-ePIN).

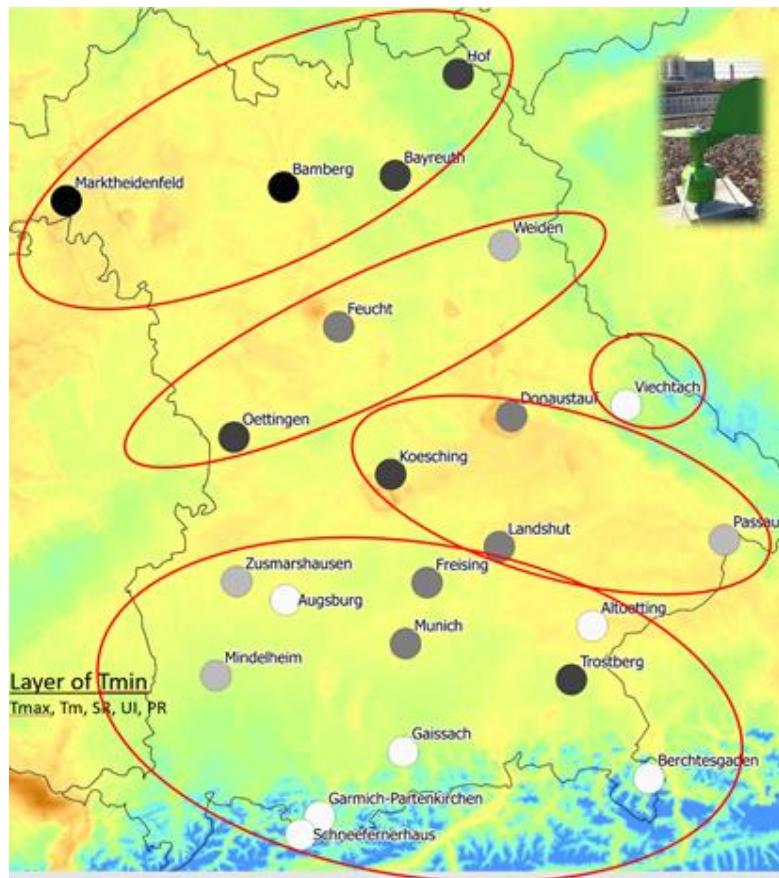


Abb. 37: Häufigkeits-Cluster von *Alternaria* Pilzsporen an 23 Standorte in Bayern für das Jahr 2015 (pre-ePIN).

Um mit der Analyse aller Daten (Gewitter (BLI), Aeroallergene (pre-ePIN, PAU) und Gesundheitsdaten (NAD1)) fortfahren zu können, wurden die relevanten Jahreszeiten aller Parameter identifiziert. Da gewitterassoziierte Symptome von der Co-Exposition und dem gemeinsamen Auftreten verschiedener Umwelt- und biologischer Faktoren abhängen können, ist es wichtig, dieses spezifische Intervall zu betrachten, das alle potenziell verantwortlichen Parameter umfasst. Aus diesem Grund wurde die Biodiversität und Abundanz von Aeroallergenen (Pollen und *Alternaria*-Sporen) in Augsburg und in Bayern untersucht. Wie in Abb. 38 zu sehen ist, reichte die Hauptsaison für Pollen in Augsburg (2015-2016) von März bis August und die Haupt-Gewittersaison von April bis August. Für die Asthma-Notfälle laut ICD-Code ergab sich eine Verteilung mit mehreren Peaks im Jahresverlauf. Der erste Peak war im Februar, der zweite von Juni bis August und der dritte im Dezember. April und September waren die Monate mit den wenigsten Asthma-Notfällen.

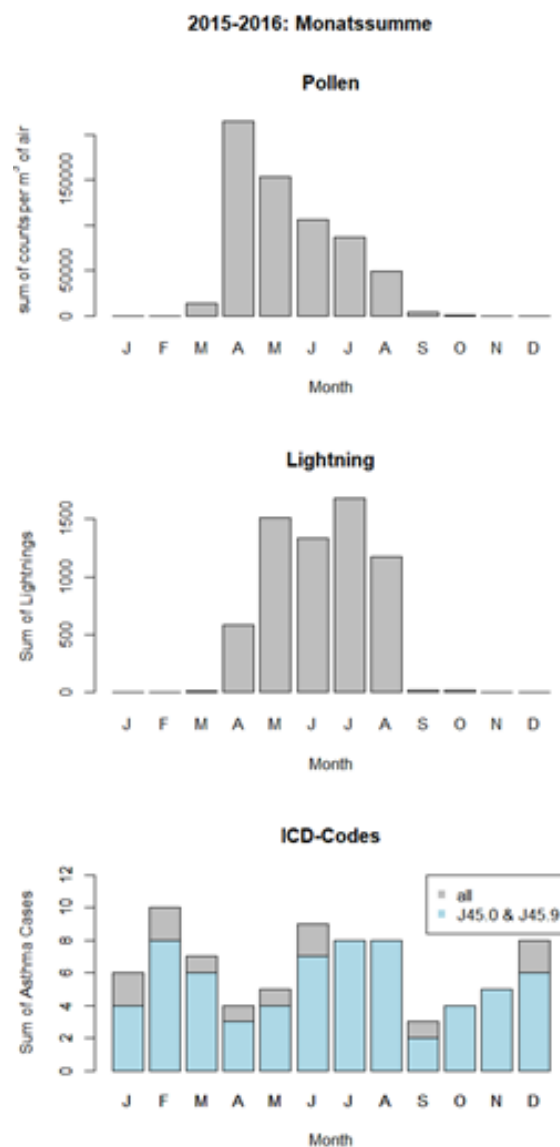


Abb. 38: Monatssummen von Pollen (PAU), Blitzen (BLI) und Asthma-Notfällen (NAD1) (grau: alle Asthmafälle; blau: allergisches Asthma) im Raum Augsburg in den Jahren 2015-2016.

Als nächstes wurde dieselbe Analyse wie in Kapitel 6.5.1 für Daten aus dem Jahr 2015 zu Asthma-Notfällen (NAD1), Blitzen (BLI) und Pollen (pre-ePIN Netzwerk) an 23 Standorten aus ganz Bayern durchgeführt. Obgleich für diese Analyse nur eine präliminärer Datensatz von Asthma-Fällen ohne Angabe von Tageshäufigkeiten zur Verfügung stand (ja/nein Daten), wurde auch hier eine schwache, aber statistisch signifikant positive Korrelation zwischen Asthma-Notfällen, Pollen und Blitzen gefunden (Abb. 39). Die Analyse beschränkte sich auf die Sommermonate sowie auf die Gräserpollen, welche in dieser Saison am häufigsten in der Luft vorkamen.

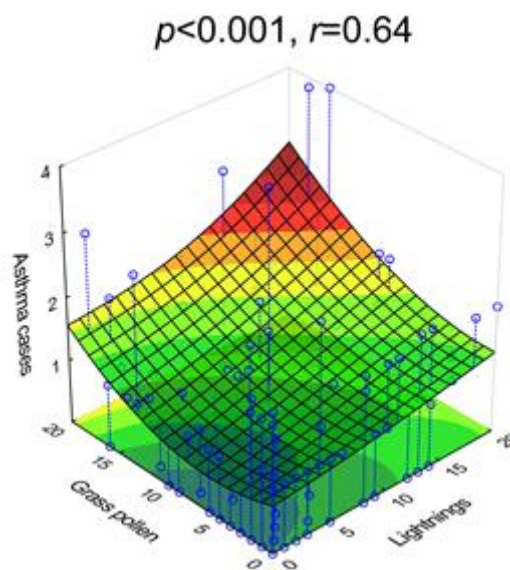


Abb. 39: Zusammenhang zwischen Asthma-Notfällen (NAD1), Gräserpollen (pre-ePIN) und Gewittern (BLI). Gezeigt ist ein Surface-Plot (spline fitting), in dem die Summe der Asthma-Notfälle aus 23 Bayerischen Standorten (z-Achse) gegen die Anzahl der Blitze (x-Achse) und gegen die Gräserpollen-Konzentration (y-Achse) aufgetragen ist. Asthma-Notfälle lagen für jeden der 23 Standorte in Bayern jeweils nur als Ja/Nein Daten vor, nicht als absolute Anzahl von Notfällen pro Standort. $p < 0.001$.

6.5.2. Bayernweiter Zusammenhang zwischen Asthmafällen, Gewittern, allergenen Pollenarten und Alternaria

Der Schwerpunkt dieser Analyse besteht darin, die Relevanz einzelner Aeroallergene für das Phänomen Thunderstorm-Asthma in Bayern zu ermitteln. Hierfür wurden folgende Datensätze verwendet:

Datensatz	Beschreibung
NAD2	Notarztdienst der KVB
BLI	Blitzdaten von Siemens
pre-ePIN, Augsburg (LfU- Bodenniveau)	Bayernweite Aeroallergene (Pollen und Pilzsporen)

Die bayernweiten *Alternaria*- und Pollendaten (pre-ePIN) sind bisher nur für das Jahr 2015 verfügbar. Aus diesem Grund konnte ausschließlich dieses Jahr analysiert werden. Dem pre-ePIN-Datensatz wurden zudem die LfU-Bodenniveaumessstation aus Augsburg zugefügt. Des Weiteren beziehen sich alle Analysen auf den erweiterten KVB-Datensatz NAD2.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen räumlichen Ausdehnung von Gewitterzellen wurden um jede Pollenmessstation vier Untersuchungsgebiete gebildet. Die Wahl einer kleinen radialen Entfernung (5km) von der Pollenmessstation gewährleistet eine hohe Repräsentativität der Aeroallergenkonzentration sowie die Detektion kleiner Gewitterzellen. Größere Gewitterzellen werden hingegen besser mit einer größeren radialen Entfernung (20km) berücksichtigt (siehe auch Kapitel 6.1.1). Mit zunehmender Entfernung sinkt jedoch die Repräsentativität der Aeroallergene. Aus diesem Grund wurden um jede Pollenmessstation vier Untersuchungsregionen gebildet mit einem radialen Abstand von 5, 10, 15 und 20 Kilometern (siehe Abb. 40).

Für diese Regionen wurde die Häufigkeit von Asthma-Notfällen und Blitzen auf täglicher Basis ermittelt. Die Notfalldaten wurden zudem mit der Anzahl der Einwohner für jedes Postleitzahlengebiet normiert, so dass ein Vergleich der Asthma-Notfälle von bevölkerungsreichen und bevölkerungsarmen Regionen möglich ist.

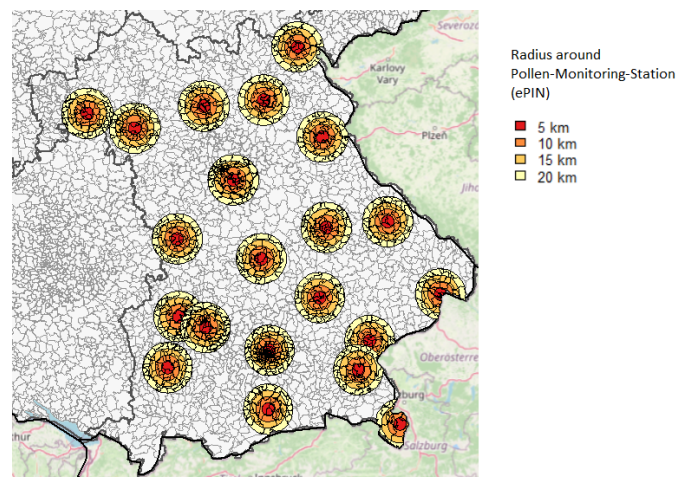


Abb. 40: Pollenmessstationen in Bayern (pre-ePIN) und Augsburg (LfU-Bodenniveau) mit radialen Untersuchungsgebieten (Radius: 5, 10, 15, 20 km)

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, tritt allergisches Asthma, das durch Aeroallergene in der Luft ausgelöst werden kann, insbesondere während der Pollensaison auf. Aus diesem Grund wurden die Sommermonate (Juni, Juli, August) mit hohem Pollenaufkommen sowie hoher Blitzaktivität betrachtet. Für die Aeroallergenexposition wurde zudem angenommen, dass eine Pollenexposition am Vortag das Immunsystem aktiviert und allergische Reaktionen am darauffolgenden Tag mit Verzögerung auftreten können. Daher wurde jeweils die Abundanz des Vortags zu der des aktuellen Tags addiert. Des Weiteren wurden ausschließlich allergene Arten (*Alnus*, *Artemisia*, *Ambrosia*, *Betula*, *Fraxinus*, *Poaceae*, *Populus*, *Taxus*, *Carpinus*, *Alternaria*) berücksichtigt.

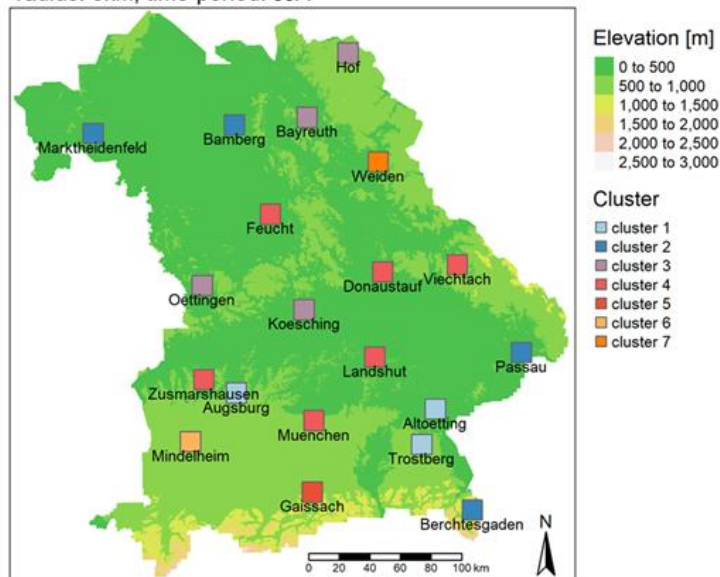
Um Ähnlichkeiten verschiedener Standorte bezüglich der Asthma-Notfälle und Blitzaktivität zu erkennen und um diese Standorte zusammenfassend zu analysieren, wurde eine hierarchische Clusteranalyse nach der Ward's Methode durchgeführt. Für die Clusteranalyse

wurde jeweils die Clusteranzahl mit dem höchsten Wert des Gradienten der „clustering height“ verwenden, also das Cluster, das sich zu Cluster k+1 bezüglich der „clustering height“ am stärksten verschlechtert. Zudem wurde festgelegt, dass die Clustergröße mindestens drei und maximal acht betragen darf. Diese Clusteranalyse wurde für alle Untersuchungsgebiete mit einem Radius von 5, 10, 15 und 20 km sowie für die Sommermonate Juni, Juli und August (JJA) durchgeführt. Sie ergab bei einem Radius von 5 km für die die Blitzdaten (BLI) sieben Cluster und sechs Cluster für die Asthma-Notfälle (NAD2). Die Cluster sind in Abbildung 41 und Abbildung 42 für r=5km farblich dargestellt und in nachfolgender Tabelle aufgelistet:

Cluster	Locations
Cluster_BLI_1	Altötting, Trostberg, Augsburg
Cluster_BLI_2	Bamberg, Berchtesgaden, Marktheidenfeld, Passau
Cluster_BLI_3	Bayreuth, Hof, Kösching, Oettingen
Cluster_BLI_4	München, Donaustauf, Feucht, Landshut, Viechtach, Zusmarshausen
Cluster_BLI_5	Gaissach
Cluster_BLI_6	Mindelheim
Cluster_BLI_7	Weiden
Cluster_NAD_all_1	Altötting, Bamberg, Bayreuth, München, Donaustauf, Feucht, Kösching, Landshut, Mindelheim, Oettingen, Passau, Weiden, Augsburg
Cluster_NAD_all_2	Berchtesgaden, Hof
Cluster_NAD_all_3	Gaissach
Cluster_NAD_all_4	Marktheidenfeld
Cluster_NAD_all_5	Trostberg, Zusmarshausen
Cluster_NAD_all_6	Viechtach

Cluster Analysis: Thunderstorm (BLI)

radius: 5km, time-period: JJA

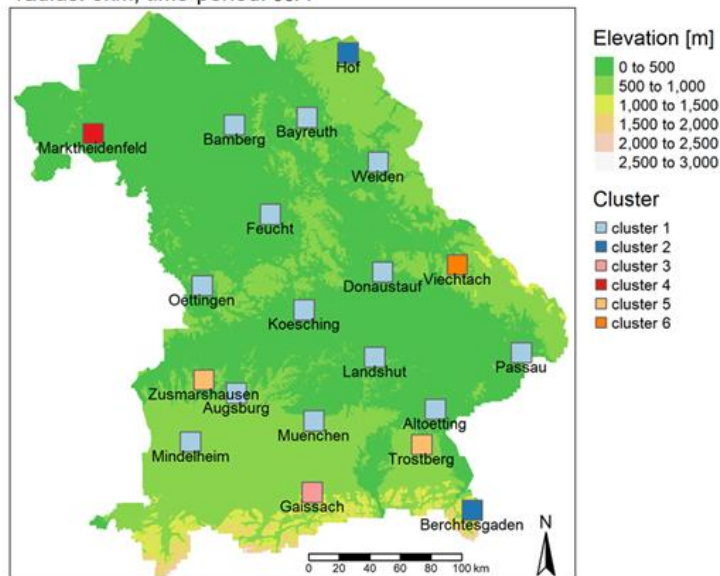


(c) Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung

Abb. 41: Hierarchische Clusteranalyse nach Anzahl der Blitze für $r=5\text{km}$

Cluster Analysis: Asthma Cases (NAD2_all)

radius: 5km, time-period: JJA



(c) Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung

Abb. 42: Hierarchische Clusteranalyse aller Asthma-Notfälle für $r=5\text{km}$

Die Cluster der Blitze zeigen eine deutliche Regionalität und beinhalten, abgesehen von Mindelheim und Gaissach jeweils mindestens drei Regionen. Die Asthma-Notfälle sind bayernweit hingegen sehr gleichmäßig verteilt. Abgesehen von vier Orten (Berchtesgaden, Hof, Oettingen, Viechtach) ist keine Regionalität vorhanden.

Für die Ermittlung der Interaktionen von Asthma und Gewitter sowie Asthma und Aeroallergenen wurde ein Log-lineares Modell verwendet mit bisher noch keiner Klassifizierung der Asthmafälle. Alle Variablen werden folglich binär betrachtet. Da einige hoch allergene Pollenarten, wie beispielsweise *Ambrosia* und *Artemisia*, eine hohe Saisonalität besitzen, kann hier aufgrund des zeitlich geringen Aufkommens nur schwer eine Interaktion gefunden werden. Wird hingegen die Summe aller Pollenarten ermittelt, gehen Peaks von Pollenarten mit geringer Abundanz verloren. Zudem lassen sich keine Rückschlüsse auf die relevantesten Arten ziehen. Aus diesem Grund wurde das Modell auf alle möglichen Kombinationen an Pollenarten angewendet, die mittels Binomialkoeffizienten gebildet wurden. Bei insgesamt neun Pollenarten plus *Alternaria* ergeben sich damit 1023 Kombinationen. Für jeden Standort und jedes Cluster wurden anschließend alle signifikanten ($p < 0.1$) Modelle betrachtet und ausgewertet, welche Aeroallergen-Kombination hier vorhanden war.

Zunächst soll mittels des Log-linearen Modells die Frage beantwortet werden, wie häufig signifikante Interaktionen auftreten. Mit den drei Variablen ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Interaktionsmodelle (siehe Sachs & Hedderich 2006), mit TS: Thunderstorm/BLI, AC: Asthma-Cases/NAD2, PF: Pollen and fungal spores/pre-ePIN.

Modell- bezeichnung	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D
Interaktion	AC:PF	TS:PF	AC:TS	AC:TS, AC:PF	AC:PF, TS:PF	AC:TS, TS:PF	AC:TS, AC:PF, TS:PF

Das einfaktorielle Modell B3 beschreibt das erhöhte Aufkommen von Asthma-Fällen an Tagen mit Gewittern. Die Konzentration von Pollen- und Pilzsporen wird hierbei nicht berücksichtigt. Das zweifaktorielle Interaktionsmodell C1 betrachtet hingegen beide Interaktionen: erhöhtes Aufkommen von Asthma-Fällen bedingt durch Gewitter sowie Aeroallergenen. Diese beiden Modelle sind folglich zur Beantwortung der Fragestellung relevant. Das Interaktionsmodell D ist als drei-faktorielles Interaktionsmodell definiert, das alle möglichen paarweisen Interaktionen betrachtet. Diese Interaktionsmodelle wurden mittels ANOVA mit dem saturierten Modell auf einem Signifikanzniveau von 0.1 evaluiert. Zudem wurden ausschließlich Modelle als signifikant bewertet, wenn alle Modellkoeffizienten Signifikanz ($p < 0.1$) aufwiesen.

Abb. 43 zeigt die Häufigkeit der signifikanten Interaktionsmodell B3, C1 und D für alle ICD-codes (NAD_all) in Abhängigkeit der vier Radien. Hierbei wird ersichtlich, dass die Modelle B3, C2 und D bei einem Radius von 5km am häufigsten auftreten.

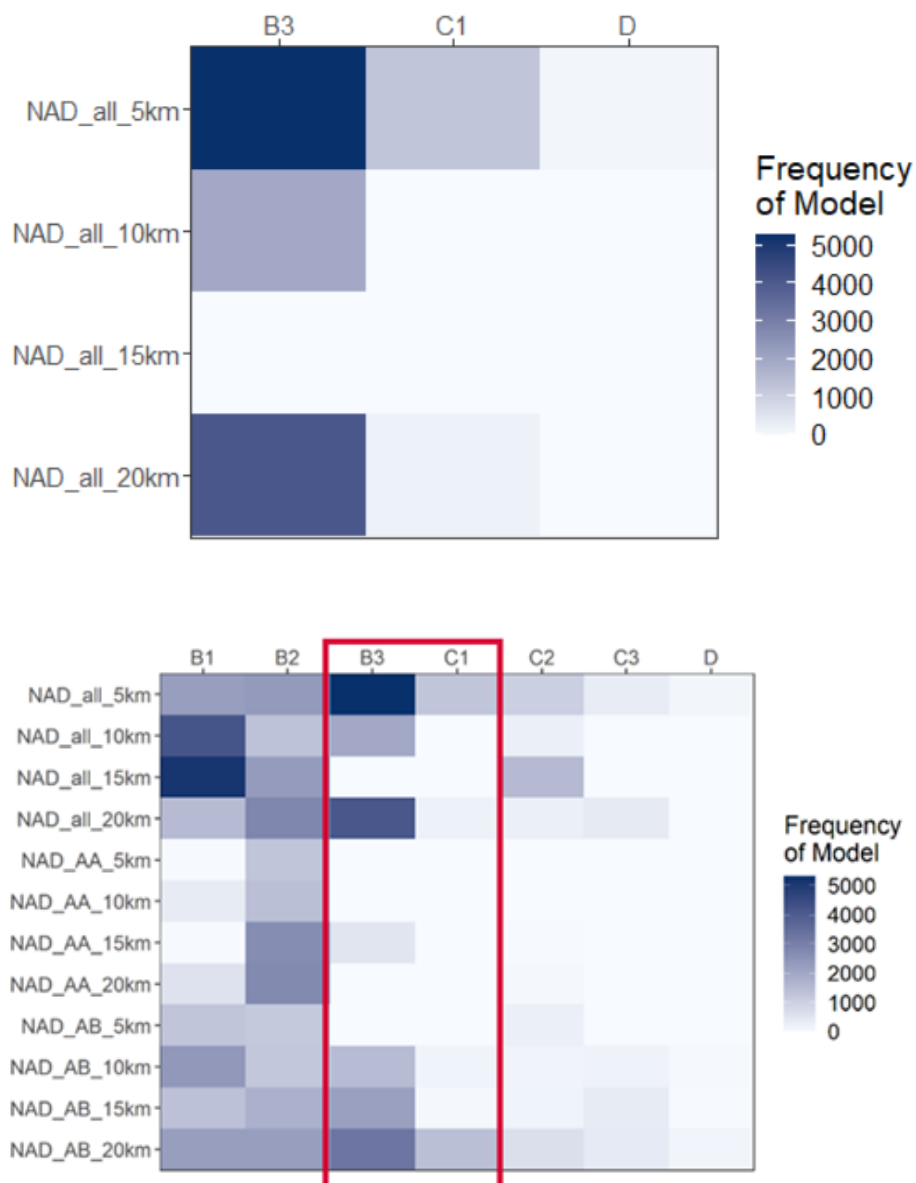


Abb. 43: Häufigkeit der signifikanten Interaktionsmodelle B3, C1 und D für alle ICD-Codes und vier Radien.

Diese Interaktion verliert sich jedoch bei einem Radius von 15km sowohl im Modell B3 als auch im Modell C1. Die hohe Häufigkeit im Modell B3 bei einem Radius von 20km zeigt deutlich, dass hier eine Interaktion festgestellt wird, die jedoch vermutlich auf eine zu groß gewählte Region zurückzuführen ist und daher ein Artefakt darstellen könnte. Mit einem Durchmesser von 40km ist diese Region zur Ermittlung von kleinräumigen Wetterereignissen wie Gewitter zu großräumig definiert und für dieses Analyseverfahren nicht geeignet. Im nächsten Analyseschritt werden die sogenannten Odds betrachtet. Hierbei handelt es sich um das Chancenverhältnis, welches die Stärke der Interaktion beschreibt. Werte größer 1 weisen auf eine positive Interaktion hin (z.B. mehr Gewitter mehr Asthma um den Faktor des Odd-Wertes). Werte kleiner als eins zeigen hingegen einen negativen Zusammenhang auf. Abb. 44 und 45 zeigen die Häufigkeiten der Odds im Interaktionsmodell B3 und C1 mit einem Radius von 5km und der Betrachtung aller ICD-Codes (NAD2_all).

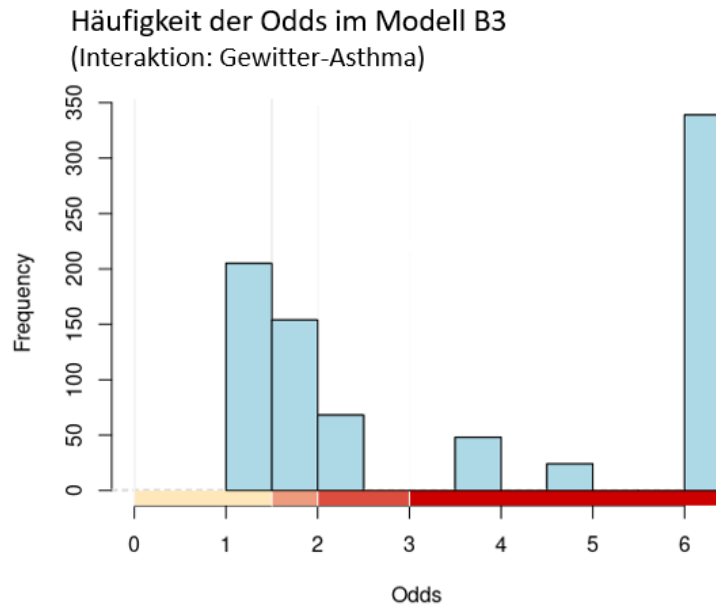


Abb. 44: Häufigkeit der Odds im Interaktionsmodell B3 mit der Interaktion Gewitter-Asthma; für $r=5\text{km}$ und NAD2_all.

Häufigkeit der Odds im Modell C1

a) Interaktion: Gewitter-Asthma

b) Interaktion: Aeroallergene-Asthma

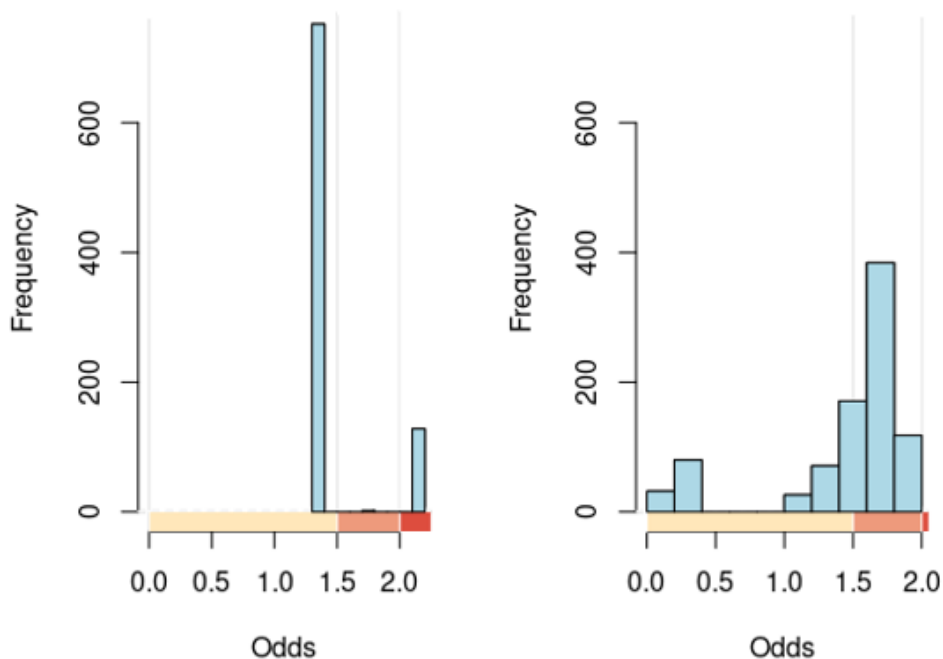


Abb. 45: Häufigkeit der Odds im Interaktionsmodell C1 für $r=5\text{km}$ und NAD2_all: a) Interaktion: Gewitter-Asthma (AC:TS), b) Interaktion: Aeroallergene-Asthma (AC:PF).

Der Interaktionsterm Gewitter-Asthma (AC:TS) zeigt in beiden Modellen einen sehr ähnlichen Verlauf. Sowohl niedrige als hohe Odds sind in beiden Modellen sehr häufig. Diese klare Abgrenzung von niedrigen und hohen Odds zeigt, dass hier ein deutliches Signal vorhanden ist. Im Modell B3, das ausschließlich die Interaktion Gewitter-Asthma betrachtet, treten im Vergleich zu den anderen Standorten und Clustern höhere Odds im Intervall 3.0 bis 6.2 in Augsburg, Berchtesgaden und Hof auf. Dies bedeutet, dass an Tagen mit Gewitter das Auftreten von Asthma-Fällen um das drei bis sechsfache erhöht ist.

Im Modell C1 sind die Odds für den Interaktionsterm Gewitter-Asthma (Abb. 45a) mit einem Maximum von 2.2 deutlich geringer als im Modell B3. Hohe Odds treten hier im Intervall 1.9 bis 2.2 im Cluster NAD_all_2 (Hof, Berchtesgaden) auf. Der in Modell C1 zudem vorhandene Interaktions-Term Aeroallergene-Asthma (Abb. 45b) zeigt vergleichbare Odds, die durch die vorhandenen Aeroallergene verursacht werden. Hier zeigen alle Locations und insbesondere Cluster _BLI_4 (München, Donaustauf, Feucht, Landshut, Viechtach, Zusmarshausen / Abb. 41), dass zudem: Alternaria, Betula, Artemisia, Ambrosia, und Taxus einen entscheidenden Einfluss haben.

Dies verdeutlicht, dass die kombinatorische Analyse aller Aeroallergene von zentraler Bedeutung ist. Aufgrund der begrenzten regionalen Datenverfügbarkeit von Pollen und Pilzsporen sind jedoch Aussagen über einen längeren Zeitraum derzeit nicht möglich. Zudem werden in zukünftigen Analysen weitere wichtige Faktoren wie Luftverschmutzung dem Modell hinzugefügt, die ebenfalls eine zentrale Einflussgröße darstellen.

7 Schlussfolgerungen

Die Datensätze zur Erfassung von Atemwegserkrankungen und Asthma einerseits sowie zur Beschreibung klimatologischer und aeroallergener Randbedingungen wurden mit einer Reihe unterschiedlicher Ansätze auf einen Zusammenhang hin untersucht, der das Auftreten des Phänomens Thunderstorm-Asthma, also von gewitterbedingten Häufungen von Asthmafällen indiziert. Im untersuchten Zeitraum 1.1.2010 bis 30.6.2018 wurden im Zusammenhang mit Gewittertätigkeit in Bayern keine akuten, jedoch bemerkenswerte Fallhäufungen beobachtet, wie z.B. eine Häufung von sechs Notrufen in Oberstdorf (Datensatz NAD2) am 22.8.2012 innerhalb einer Stunde nach einer Gewittertätigkeit. Derartige Einzelfälle gestatten jedoch noch keinen Schluss auf kausale Zusammenhänge.

Um die Daten auf eine ggf. schwächere Tendenz zu Häufungen von Asthmafällen nach Gewittern systematisch zu untersuchen, wurden deshalb die Datensätze nach Diagnosegruppen, jahreszeitlich sowie räumlich nach Postleitzahlengebieten stratifiziert und auf Grundlage statistischer Zusammenhangsmaße analysiert. Hierzu wurden Kompositenanalysen, optimierte Wetterlagenklassifikationen, Vierfeldertafeln, Korrelationsmetriken und Machine-Learning-Ansätze erarbeitet.

In allen Analysen zeigte sich, dass die Koinzidenz von Gewittern und erhöhten Pollen- bzw. Sporenkonzentrationen (letztere konnte jedoch nur für drei Jahre untersucht werden) mit Notrufeinsätzen bzw. Behandlungsfällen bei Atemwegsbeschwerden keinen dominierenden Anteil an der Variabilität der Asthmafälle aufweist. Allerdings zeigen sich in vielen Einzelfällen schwache, aber signifikante Übereinstimmungen zwischen klimatischen Indikatoren, die auf erhöhte Gewittertätigkeit schließen lassen, und Notrufzahlen bei Atemwegserkrankungen, insbesondere Asthmaanfällen. Dies trifft zu für einfache Stichprobenvergleiche im Rahmen der

Kompositenanalysen (Kap. 6.1.2), für Charakteristiken von optimierten Wetterlagenklassifikationen (Kap. 6.1.3), für die Analysen von Vierfeldertafeln und weiteren Korrelationsmaßen (Kap. 6.2), für die Modellergebnisse der Neuronalen Netze (Kap. 6.3) sowie für die Häufungsanalysen (Kap. 6.4). Das Verteilungsmuster der signifikanten Fälle im Raum aber auch über die Jahreszeiten hinweg ist jedoch nicht konsistent, d.h. es streut stark und es treten mitunter auch unerwartete Zusammenhänge auf, die eine reduzierte Notrufanzahl nach Gewittertätigkeit anzeigen. Hier ist nicht auszuschließen, dass es einen konkurrierenden Effekt von Gewittertätigkeit auf die Asthmahäufigkeit gibt, der z.B. in einer Verminderung der Pollenlast durch Niederschlag oder Abkühlung bestehen kann. Dies wäre in weiterführenden Untersuchungen zu vertiefen. Die überwiegende Mehrheit der Ergebnisse lässt jedoch klar eine erhöhte Fallzahl nach Gewittern erkennen, die mit zunehmender zeitlicher Entfernung und Unschärfe schwächer wird. Dies wurde insbesondere anhand der Analysen der Kontingenztafeln (z.B. Tab. 3) herausgearbeitet. Viele dieser Zusammenhangsmetriken sind auch bei Anwendung von Korrekturverfahren signifikant, die eine Summierung von Schätzfehlern bei multiplen Analysen berücksichtigen. Bei einem maximalem Matchexcess von 10,06 Tagen in acht Jahren z.B. für die Ganzjahresanalyse der Kontingenztafeln aller Postleitzahlengebiete und einem Gewitterabstand von 20 km (Kap. 6.2.2) ergibt sich aus den vorliegenden Analysen, dass in einzelnen Postleitzahlengebieten pro Jahr an bis zu ca. einem Tag Notrufeinsätze bei Atemwegsbeschwerden aufgrund des räumlichen und zeitlichen Zusammenhangs mit Gewittern stattfinden. Weiterhin bestätigen Daten einer Panelstudie in Augsburg (Datensatz PAN) ebenfalls eine schwache, aber signifikante Korrelation auf vergleichbarem Niveau bei Einbezug von Aeroallergenen. Zudem gibt es Hinweise auf Einflüsse der Luftqualität, insbesondere in Hinblick auf NO_2 und Feinstaub ($\text{PM}_{2.5}$), die den Zusammenhang von Asthma und klimatologischen Einflussfaktoren verstärken. Aus der bayernweiten Analyse aller Aeroallergene, Asthmanotfälle und Blitzdaten (6.5.3) ist zudem ein starker Zusammenhang in Augsburg, Hof und Berchtesgaden hervorzuheben. Dieser Zusammenhang kann jedoch aufgrund der begrenzten Datenlage bisher ausschließlich für das Jahr 2015 aufgezeigt werden. Poaceae ist hierbei ein zentrales Aeroallergen. Durch die kombinatorische Analyse konnte jedoch aufgezeigt werden, dass auch Aeroallergene mit geringerer Abundanz aber mit hoher Allergenität in allen Lokationen und insbesondere in Cluster_BLI_4 entscheidend sind, wie: Alternaria, Betula, Artemisia, Ambrosia, und Taxus.

Es kann daraus insgesamt geschlussfolgert werden, dass insgesamt ein schwacher, aber überzufälliger Zusammenhang zwischen erhöhten Anzahlen von Asthmanotfällen und Gewittertätigkeit in Bayern besteht. Die nur für einen kurzen Zeitraum mögliche Einbeziehung von Aeroallergenen legt einen Wirkmechanismus über Pollen und Pilzsporen im Zusammenhang mit Thunderstorm-Asthma nahe, ohne dass ein solcher robust nachgewiesen werden konnte. Eine mögliche deutlichere Signalextraktion scheint nur auf Grundlage weiterer Datensätze erreichbar. So sind die Zusammenhangsanalysen generell durch die geringen Fallzahlen der Asthmanotrufe stark limitiert. Dieses Problem ließe sich sicherlich nur über längere Beobachtungszeiträume beheben. Andererseits standen mit dem Datensatz der Behandlungsfälle der gesetzlichen Krankenkassen erheblich größere Stichprobenumfänge zur Verfügung. Die Varianz dieser Daten jedoch ist erheblich von äußeren praxisbedingten Einflüssen wie Wochenzyklus und Quartalsablauf dominiert. Offensichtlich reichen die im Projekt durchgeführten umfangreichen Datenfilterprozeduren nicht aus um die klima- bzw. umweltbedingte Veränderlichkeit der Fallzahlen ausreichend ungestört zu extrahieren. Ein im Projekt diskutierter Ansatz bestünde darin, nicht die Absolutzahlen der erfassten Asthmafälle bzw. Atemwegserkrankungen zu analysieren, sondern den Anteil dieser Fälle an der Gesamtzahl aller Behandlungen bzw. Notfälle pro Zeit- und Raumeinheit. Damit würden Einflüsse eliminiert, die übergreifend die Gesamtheit der medizinischen Behandlungen

beeinflussen und klima- bzw. umweltbedingte Faktoren extrahiert. Ein derartiger Ansatz ist jedoch mit weiter erhöhtem Aufwand für den Datenschutz verbunden. Angesichts des damit assoziierten zeitlichen Vorlaufes für die Datenakquise war eine Durchführung dieses Ansatzes im Projektzeitraum nicht mehr möglich und bleibt künftigen Anstrengungen vorbehalten. Weiterhin sind umfangreichere Pollen- und Sporendatensätze bei künftigen Untersuchungen zu inkludieren.

Ein robustes Vorhersagemodell zur Vorwarnung vor erhöhtem Risiko durch gewitterbedingtes Asthma ist dementsprechend bei gegebener Datenlage momentan nicht darstellbar. Die festgestellten leichten Zusammenhänge können jedoch in Einzelfällen die Aufmerksamkeit zusätzlich schärfen, um bei gewitterbegünstigenden Wetterlagen präventiv Maßnahmen zur Linderung der Asthmasymptomatik vorzuhalten.

Vor dem Hintergrund einer erwarteten Zunahme der Gewittertätigkeit im nördlichen Alpenvorland und Bayern, bei stärkerer Sommertrockenheit und einer ggf. veränderten Vegetation (Bsp. Beifuß-Ambrosie) mit evtl. längerer Pollensaison ist demnach das in den Daten erkennbare Phänomen Thunderstorm-Asthma als potentieller Faktor für ein erhöhtes Gesundheitsrisiko im Blick zu behalten. Ein aktuell alarmierendes Risiko geht aus der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht hervor.

8 Darstellung des Nutzens im Rahmen der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie

Die bayerische Klima-Anpassungsstrategie (StMUV, 2017) sieht auf dem Gebiet der Maßnahmen im Bereich Wetterereignisse und nichtinfektiöser Krankheiten (WK) neben der pollenallergierelevanten Unterstützung des Ambrosiabekämpfungsprogrammes (WK_09) bereits das Monitoring der atmosphärischen Pollenkonzentration, der Allergenität von Pflanzen sowie die Prognose der erwartenden Pollenbelastung (WK_08) vor.

Die hier vorgelegten Ergebnisse lassen auf einen nachweisbaren, jedoch geringen Effekt durch das Thunderstorm-Asthma-Phänomen schließen. Deshalb ist akuter Handlungsbedarf momentan nicht angezeigt, z.B. um Pollenflugwarnprogramme zu ergänzen.

Allerdings ist zu empfehlen bei verbesserter Datenlage etwa in einigen Jahren die vorgelegten Ergebnisse zu aktualisieren und zu vertiefen. Hierbei können die in dieser Studie entwickelten Forschungsansätze als Grundlage erweiterter statistischer, aber auch experimenteller Forschung dienen. Hierzu wurden Anforderungen an die Datengrundlage formuliert, die sich vor allem auf die Qualität und den Umfang der Patientendaten beziehen als auch deutlich umfangreichere Pollendaten umfassen. Künftige Studien sollten insbesondere auch die Rolle der Luftqualität mit fokussieren.

Durch die Indikation eines schwachen, aber sichtbaren Effektes von Thunderstorm-Asthma besteht ein allgemeiner Nutzen der vorgelegten Studie in der Förderung des Bewusstseins einer potentiellen künftigen Erhöhung des Gesundheitsrisikos durch Thunderstorm-Asthma, aber auch in der Einordnung des aktuellen Risikos als gering bedeutsam, was eine sachgerechte Einordnung der Dringlichkeit im Vergleich zu anderen Problemfeldern erlaubt.

Glossar

4LFTX	Auftriebsindex aus 4 Niveaus errechnet (4 layer Lifted Index)
ANN	Artificial Neural Network (künstliche neuronale Netze)
BLI	Blitzdatensatz (Siemens BLIDS, s. Kap. 3.1)
CAPE	Convective Available Potential Energy
CIN	Konvektive Unterdrückung (Convective inhibition)
COR	Korrelationskoeffizient
DJF	Dezember, Januar, Februar (meteorologischer Winter)
DWD	Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (Kap. 3.3)
EPIN	Elektronisches Polleninformationsnetzwerk: Pollen- und Pilzsporendaten für Bayern (Kap. 5.2)
GFS	Global Forecast System (Kap. 3.4)
GFSA	Global Forecast System Analysis
GKV 4.2)	Daten zu Behandlungsfällen der gesetzlichen Krankenversicherungen (Kap. 4.2)
HGT	Geopotentialhöhe
HPBL	Höhe der planetaren Grenzschicht (Height Planetary Boundary Layer)
ICD	International Classification of Diseases
JJA	Juni, Juli, August (meteorologischer Sommer)
KVB	Kassenärztliche Vereinigung Bayern
LFTX	Auftriebsindex (Lifted Index)
MAE	Mean Absolute Error
MAM	März, April, Mai (meteorologisches Frühjahr)
ME	Mean Error
MSE	Mean Square Error
MSSS	Mean Square Skill Score
NAD	Daten zu Einsatzfällen des Notarztdienstes (Kap. 4.1)
NAD1	Erste Version des NAD-Datensatzes 1.1.2010 bis 8.3.2017 (Kap. 4.1)
NAD2	Zweite Version des NAD-Datensatzes 1.1.2010 bis 30.6.2018 (Kap. 4.1)
PAN	Daten der Panelstudie Augsburg (Kap. 4.3)

PAU	Daten zu Pollen und Pilzsporen Augsburg (Kap. 5.1)
PDA	Prädiktand, abhängige Variable
PDO	Prädiktor, unabhängige Variable
P-Value	Fehlerwahrscheinlichkeit bei Annahme der Alternativhypothese
PLZ	Postleitzahl
RAD	Niederschlagsradardaten des Deutschen Wetterdienstes (Kap. 3.3)
RCF	Reference Class Forecast (Klassifikation von Prädiktoren und Prädiktanden)
RH	Relative Luftfeuchte
RMSE	Root Mean Square Error
SIG	Signifikanz / P-Value
SON	September, Oktober, November (meteorologischer Herbst)
StMUV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
StMGP	Bayerisches Staatsministerium für Gesundheit und Pflege
TH	Thunderstorm-Saison (Gewittersaison April bis September)
TMP	Lufttemperatur
UGRD	Zonal(West-Ost)-Komponente des Windes für gegitterte Datensätze
LGL	Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
VGRD	Meridional(Süd-Nord)-Komponente des Windes für gegitterte Datensätze
VWSH	Vertikale Windscherung (Vertical Windshear)
WSPD	Windgeschwindigkeit

Literaturverzeichnis

- Alderman, P. M., Sloan, J. P., Basran, G. S. (1986): Asthma and thunderstorms. *Archives of Emergency Medicine*, 3 (4), S. 260–262.
- Andersen, T.B. (1991): A Model to Predict the Beginning of the Pollen Season. *Grana*, 30, 269-275.
- Anderson, W., Prescott, G. J., Packham, S., Mullins, J., Brookes, M., Seaton, A. (2001): Asthma admissions and thunderstorms: a study of pollen, fungal spores, rainfall, and ozone. *Quarterly Journal of Medicine*, 94, S. 429-433.
- Andrew, E., Nehme, Z., Bernard, S., Abramson, M.J., Newbigin, E., Piper, B., Dunlop, D., Holman, P., Smith, K. (2017): Stormy weather: a retrospective analysis of demand for emergency medical services during epidemic thunderstorm asthma. *British Medical Journal*, 359, doi:10.1136/bmj.j5636.
- Bellomo, R., Holmes, P., Gigliotti, P., Treloar, A., Suphioglu, C., Singh, M. B., Knox, B. (1992): Two consecutive thunderstorm associated epidemics of asthma in the city of Melbourne: the possible role of rye grass pollen. *Medical Journal of Australia*, 156, S. 834–837.
- Bousquet, J., Caimmi, D.P., Bedbrook, A., et al. (2017): Pilot study of mobile phone technology in allergic rhinitis in European countries: the MASK-rhinitis study. *Allergy*, 72, 857-865.
- Buters, J.T.M., Antunes, C., Galveias, A., Bergmann, K.C., Thibaudon, M., Galan, C., et al. (2018): Pollen and spore monitoring in the world. *Clinical and Translational Allergy*, 8, 9.
- Cecchi, L., D'Amato, G., Annesi-Maesano, I. (2013): Climate, Urban Air Pollution, and Respiratory Allergy. *Climate Vulnerability*, 1, S. 105-113.
- Celenza, A., Fothergill, J., Kupek, E., Shaw, R. J. (1996): Thunderstorm associated asthma: a detailed analysis of environmental factors. *BMJ*, 312, S. 604-607.
- Colby, F. P. (1984): Convective Inhibition as a Predictor of Convection during AVE-SESAME II. *Monthly Weather Review*, 112, S. 2239-2252.
- D'Amato, G., Cecchi, L., Liccardi, G. (2008): Thunderstorm-related asthma: Not only grass pollen and spores. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 121 (2), S. 537-538.
- D'Amato, G., Pawankar, R., Vitale, C., Lanza, M., Molino, A., Stanziola, A., Sanduzzi, A., Vatrella, A., D'Amato, M. (2016): Climate Change and Air Pollution: Effects on Respiratory Allergy. *Allergy, Asthma & Immunology Research*, 8 (5), S. 391-395.
- D'Amato, G., Spieksma, F.Th.M. (1991): Allergenic Pollen in Europe. *Grana*, 30, 67-70.
- Dales, R. E., Cakmak, S., Judek, S., Dann, T., Coates, F., Brook, J. R., Burnett, R. T. (2003): The Role of Fungal Spores in Thunderstorm Asthma. *CHEST*, 123, S. 745-750.
- Damialis, A., Haering, F., Hammel, G., Glaser, M., Brunner, J.O., Gilles, S., Traidl-Hoffmann, C. (2019): Evaluating the real exposure of allergics to airborne pollen: Too high, too early, too long or too complex? *Allergy*, 74 (S106), 42.
- Damialis, A., Halley, J.M., Gioulekas, D., Vokou, D. (2007): Long-Term Trends in Atmospheric Pollen Levels in the City of Thessaloniki, Greece. *Atmospheric Environment*, 41, 7011-7021.
- Dirks, K. N., Hay, J. E., Stow, C. D., Harris, D. (1998): High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island Part II: Interpolation of rainfall data. *Journal of Hydrology*, 208, S. 187-193.

- Elliot, A. J., Hughes, H. E., Hughes, T. C., Locker, T. E., Brown, R., Sarran, C., Clewlow, Y., Murray, V., Bone, A., Catchpole, M., McCloskey, B., Smith, G. E. (2014): The impact of thunderstorm asthma on emergency department attendances across London during July 2013. *Emergency Medicine Journal*, 31, S. 675–678.
- Finke, U., Hauf, T. (1996): The Characteristics of Lightning Occurrence in Southern Germany. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, 69 (3), S. 361-374.
- Forouzan, A., Masoumi, K., Shoushtari, M. H., Idani, E., Tirandaz, F., Feli, M., Assarehzadegan, M. A., Darian, A. A. (2014): An Overview of Thunderstorm-Associated Asthma Outbreak in Southwest of Iran. *Journal of Environmental and Public Health*, 2014, Article ID 504017.
- Galán, C., Smith, M., Thibaudon, M., Frenguelli, G., Oteros, J., Gehrig, R., et al. (2014): Pollen Monitoring: Minimum Requirements and Reproducibility of Analysis. *Aerobiologia*, 30, 385-395.
- Galway, J. G. (1956): The Lifted Index as a Predictor of Latent Instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 37 (10), S. 528-529.
- Girgis, S. T., Marks, G. B., Downs, S. H., Kolbe, A., Car, G. N., Paton, R. (2000): Thunderstorm-associated asthma in an inland town in south-eastern Australia. Who is at risk? *European Respiratory Journal*, 16, S. 3-8.
- Gökkaya, M., Damialis, A., Nussbaumer, T., Beck, I., Bounas-Pyrros, N., Bezold, S., Amisi, M.M., Kolek, F., Todorova, A., Chaker, A., Aglas, L., Ferreira, F., Redegeld, F.A., Brunner, J.O., Neumann, A.U., Traidl-Hoffmann, C., Gilles, S. (2020): Defining biomarkers to predict symptoms in subjects with and without allergy under natural pollen exposure. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 146, P583-594.E6.
- Grundstein, A., Sarnat, S. E., Klein, M., Shepherd, M., Naeher, L., Mote, T., Tolbert, P. (2008): Thunderstorm-associated asthma in Atlanta, Georgia. *Thorax*, 63 (7), S. 659-660.
- Gutiérrez, M., Sabariego, S., Cervigón, P. (2006): Calendario polínico de Madrid (Ciudad Universitaria). Periodo 1994-2004. *Lazaroa*, 27, 21-27.
- Hirst, J.M. (1952): An Automatic Volumetric Spore Trap. *Annals of Applied Biology*, 39, 257-265.
- Klose, B. (2008): *Meteorologie. Eine interdisziplinäre Einführung in die Physik der Atmosphäre*. Berlin: Springer.
- Losappio, L., Heffler, E., Contento, F., Cannito, C., Rolla, G. (2011): Thunderstorm-related asthma epidemic owing to *Olea Europaea* pollen sensitization. *Allergy*, 66, S. 1510-1511.
- Moncrieff, M. W., Miller, M. J. (1976): The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102, S. 373-394.
- Muzalyova A., Brunner J.O., Traidl-Hoffmann C., Damialis A. (2021): Forecasting *Betula* and *Poaceae* airborne pollen concentrations on a 3-hourly resolution in Augsburg, Germany: towards automatically generated, real-time predictions. *Aerobiologia*. In press.
- Oteros, J., Sofiev, M., Smith, M., Clot, B., Damialis, A., Prank, M., Werchan, M., Wachter, R., Weber, A., Kutzora, S., Heinze, S., Herr, C.E.W., Menzel, A., Bergmann, K.-C., Traidl-Hoffmann, C., Schmidt-Weber, C.B., Buters, B.T.M. (2019): Building an automatic pollen monitoring network (ePIN): Selection of optimal sites by clustering pollen stations. *Science of the Total Environment*, 688, 1263-1274.

- Packe, G. E., Ayres, J. G. (1985): Asthma outbreak during a thunderstorm, *The Lancet*, 326 (8448), S. 199-203.
- Piper, D. & M. Kunz (2017): Spatiotemporal variability of lightning activity in Europe and the relation to the North Atlantic Oscillation teleconnection pattern, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 1319-1336.
- Pulimood, T. B., Corden, J. M., Bryden, C., Sharples, L., Nasser, S. M. (2007): Epidemic asthma and the role of the fungal mold *Alternaria alternate*. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 120 (3), S. 610-617.
- Reap, R. M., Orville, R. E. (1990): The Relationships between Network Lightning Locations and Surface Hourly Observations of Thunderstorms. *Monthly Weather Review*, 118, S. 94-108.
- Sachs, L., Hedderich, J., (2006): *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R - Log-lineare Modelle*. Springer, S. 598-609.
- Schefczyk, L., Heinemann, G. (2017): Climate change impact on thunderstorms: Analysis of thunderstorm indices using high-resolution regional climate simulations. *Meteorologische Zeitschrift*, 26 (4), S. 409-419.
- Schiele, J., Damialis, A., Rabe, F., Schmitt, M., Glaser, M., Häring, F., et al. (2019): Automated Classification of Airborne Pollen using Neural Networks. 2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Berlin, Germany, pp. 4474-4478.
- Sofiev, M., Siljamo, P., Ranta, H., Linkosalo, T., Jaeger, S., Rasmussen, A., et al. (2013): A numerical model of birch pollen emission and dispersion in the atmosphere. Description of the emission module. *International Journal of Biometeorology*, 57, 45–58.
- Sofiev, M., Vira, J., Kouznetsov, R., Prank, M., Soares, J., Genikhovich, E. (2015): Construction of the SILAM Eulerian atmospheric dispersion model based on the advection algorithm of Michael Galperin. *Geoscience Model Development*, 8, 3497–3522.
- Stix, E., Ferretti, M. (1974): Pollen Calendars of Three Locations in Western Germany. *Atlas European Des Pollens Allergisants*.
- StMUV (2017): *Bayerische Klima-Anpassungsstrategie*. - Ausgabe 2016. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, München.
- Suphioglu, C., Singh, M. B., Taylor, P., Bellomo, R., Holmes, P., Puy, R., Knox, R. B. (1992): Mechanism of grass-pollen-induced asthma. *Lancet*, 339, S. 569-572.
- Taylor, P. E., Jonsson, H. (2004): Thunderstorm Asthma. *Current Allergy and Asthma Reports*, 4, S. 409–413.
- Thien, F., Beggs, P. J., Csutoros, D., Darvall, J., Hew, M., Davies, J. M., Bardin, P. G., Bannister, T., Barnes, S., Bellomo, R., Byrne, T., Casamento, A., Conron, M., Cross, A., Crosswell, A., Douglass, J. A., Durie, M., Dyett, J., Ebert, E., Erbas, B., French, C., Gelbart B., Gillman, A., Harun, N.-S., Huete, A., Irving, L., Karalapillai, D., Ku, D., Lachapelle, P., Langton, D., Lee, J., Looker, C., MacIsaac, C., McCaffrey, J., McDonald, C. F., McGain, F., Newbigin, E., O'Hehir, R., Pilcher, D., Prasad, S., Rangamuwa, K., Ruane, L., Sarode, V., Silver, J. D., Southcott, A. M., Subramaniam, A., Suphioglu, C., Susanto, N. H., Sutherland, M. F., Taori, G., Taylor, P., Torre, P., Vetro, J., Wigmore, G., Young, A. C., Guest, C. (2018): The Melbourne

epidemic thunderstorm asthma event 2016: an investigation of environmental triggers, effect on health services, and patient risk factors. *Lancet Planet Health*, 2, S. 255-263.

Urban, A., Kyselý, J. (2018): Application of spatial synoptic classification in evaluating links between heat stress and cardiovascular mortality and morbidity in Prague, Czech Republic. *International Journal of Biometeorology*, 62(1), S. 85-96.

Venables, K. M., Allitt, U., Collier, C. G., Emberlin, J., Greig, J. B., Hardaker, P. J., Highham J. H., Laing-Morton, T., Maynard, R. L., Murray, V., Strachan, D., Tee, R. D. (1997): Thunderstorm-related asthma - the epidemic of 24/25 June 1994. *Clinical and Experimental allergy*, 27, S. 725-736.

Wardmann, A. E. D., Stefani, D., MacDonald, J. C. (2002): Thunderstorm-associated asthma or shortness of breath epidemic: A Canadian case report. *Canadian Respiratory Journal*, 9 (4), S. 267-270.

Wapler, K. (2013): High-resolution climatology of lightning characteristics within Central Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 122, S. 175-184.

Weigl, E. und T. Winterrath (2010): Radargestützte Niederschlagsanalyse und –vorhersage (RADOLAN, RADVOR-OP). *Promet*, 35/1-3, 78-86.

Yair, Y., Yair, Y., Rubin, B., Confino-Cohen, R., Rosman, Y., Rottem, M., Shachar, E. (2019): First case of Thunderstorm Asthma in Israel. *Geophysical Research Abstracts*, 21, EGU2019-1786.

Anlagen

Übersicht der durchgeführten Analysen und dabei verwendeter Datensätze

Übersicht der durchgeführten Analysen (mit Kapitelnummer) und dabei verwendeter Datensätze. Die Kürzel für die Datensätze bedeuten (inklusive Kapitel der Datensatzbeschreibungen): NAD1: Notarztdienstdaten Version 1 (Kap. 4.1), NAD2: Notarztdienstdaten Version 3 (Kap. 4.1), BLI: Blitzdaten (Kap. 3.1), RAD: Niederschlagsradararbeiten (Kap. 3.2), DWD: Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (Kap. 3.3), GFS: Daten des Global Forecast Systems (Kap. 3.4), GKV: Behandlungsdaten der gesetzlichen Krankenversicherung (Kap. 4.2), PAN: Panlestudie Augsburg (Kap. 4.3), PAU: Pollen- und Pilzsporendaten Augsburg (Kap. 5.1), EPIN: Pollen- und Pilzsporendaten Bayern (Kap. 5.2). Gewittertage wurden im Projekt selbst bestimmt (Kap. 6.1.1). Die für die Analysen verantwortlichen Projektpartner (UNIKA-T oder Institut für Geographie) sind in Klammern genannt.

Analyse	Datensätze
6.1 Gewittertypisierung und Charakterisierung nach Relevanz für Thunderstorm-Asthma mittels optimierter Klassifikationen (Institut für Geographie)	NAD1, BLI, RAD, DWD, GFS
6.2.1 Zusammenhangsmaße des gemeinsamen Auftretens von Gewitter- und Asthmatagen nach Notarztdienstfällen Variante 1 (Institut für Geographie)	NAD1, Gewittertage
6.2.1 Zusammenhangsmaße des gemeinsamen Auftretens von Gewitter- und Asthmatagen nach Notarztdienstfällen Variante 2 (Institut für Geographie)	NAD2, Gewittertage
6.2.2 Zusammenhangsmaße des gemeinsamen Auftretens von Gewitter- und Asthmatagen nach Behandlungsfällen der gesetzlichen Krankenversicherung (Institut für Geographie)	GKV, Gewittertage
6.3 Neuronale Netze (Institut für Geographie)	NAD2, GFS
6.4 Analyse von Häufungsepisoden der Notarztdienstfälle (Institut für Geographie)	NAD2, Gewittertage, GFS, DWD
6.5.1 Zusammenhang mit Pollen- und Pilzsporen-Konzentrationen und Umweltfaktoren in Augsburg (UNIKA-T)	NAD1, PAN, PAU, BLI, DWD, Gewittertage
6.5.2 Zusammenhang mit Pollen- und Pilzsporen-Konzentrationen und Umweltfaktoren in Bayern (UNIKA-T)	NAD1, PAN, pre-ePIN, PAU, BLI, Gewittertage
6.5.3 Bayernweiter Zusammenhang zwischen Asthmafällen, Gewittern, allergenen Pollenarten und Alternaria (UNIKA-T)	NAD2, BLI, pre-ePIN

Publikationen

Bayr D., Kolek F., Straub A., Plaza M., Leier-Wirtz V., Gökkaya M., Hammel G., Oteros J., Buters J., Toelken K., Hilgers S., Schwierzeck V., Knoch S., Bezold S., Beck I., Bounas-Pyrros N., Todorova A., Kaschuba S., Seubert S., Gerstlauer M., Beck C., Traidl-Hoffmann C., Gilles S., Philipp A., Damialis A. (2019): Thunderstorm Asthma: An underestimated public health threat? Implicated aeroallergens and impact on allergic symptoms. Proceedings of the 2nd International REKLIM Conference, pp. 61-62. Oral presentation.

Damialis A., Bayr D., Leier-Wirtz V., Kolek F., Plaza M., Kaschuba S., Gilles S., Oteros J., Buters J., Menzel A., Straub A., Seubert S., Traidl-Hoffmann C., Gerstlauer M., Beck C., Philipp A. (2020): Thunderstorm Asthma: In Search For Relationships With Airborne Pollen And Fungal Spores From 23 Sites In Bavaria, Germany. A Rare Incident Or A Common Threat? Journal of Allergy and Clinical Immunology 145; S2: AB336. DOI:10.1016/j.jaci.2019.12.061

Gilles S., Kolek F., Bayr D., Plaza M.P., Leier-Wirtz V., Straub A., Seubert S., Gerstlauer M., Beck C., Philipp A., Traidl-Hoffmann C., Damialis A. (2020): Thunderstorm-related respiratory symptoms in pollen allergics: a personalised biomonitoring approach. Proceedings of the Virtual European Symposium on Aerobiology, p. 118. Oral presentation.

Philipp A., A. Straub, S. Seubert, C. Beck (2018): Thunderstorm Asthma in der Region Augsburg (TARA). WZU-Jahresbericht 2018, S. 18-24.

Philipp A., A. Straub, V. Fricke, M. Gerstlauer, A. Damialis, D Bayr (2020): Gewitterbedingtes Asthma in Bayern, Exkurs Forschung. Klimareport Bayern.

Straub A., S. Seubert, A. Damialis, M. Gerstlauer, C. Beck, A. Philipp (2018): Thunderstorm Asthma in der Region Augsburg (TARA). Tagungsband der 37. Jahrestagung des AK Klima der DGfG auf Schloss Schney 2018. Poster.

Straub A., S. Seubert, A. Damialis, M. Gerstlauer, C. Beck, A. Philipp (2019): Estimation of the thunderstorm asthma risk in Bavaria, southern Germany, using weather type classifications. EGU General Assembly 2019. Poster

Straub A., S. Seubert, P. Olschewski, D. Bayr, A. Damialis, F. Kolek, M. Gerstlauer, C. Beck, A. Philipp (2019): Abschätzung des Thunderstorm Asthma Risikos in der Region Augsburg mit Hilfe von Wetterlagenklassifikationen. Tagungsband der 38. Jahrestagung des AK Klima der DGfG in Jesteburg 2019. Poster

Straub A., S. Seubert, A. Damialis, F. Kolek, D. Bayr, M. Gerstlauer, C. Beck, A. Philipp (2020): Thunderstorm Asthma in der Region Augsburg in: Soentgen J., U. M. Gassner, J. von Hayek, A. Manzei (Hrsg.): Umwelt und Gesundheit, Seite 345 – 366.

Straub A. V. Fricke, P. Olschewsky, S. Seubert, C. Beck, D. Bayr, F. Kolek, M. P. Plaza, V. Leier-Wirtz, S. Kaschuba, C. Traidl-Hoffmann, W. Buermann, M. Gerstlauer, A. Damialis, A. Philipp (2021): The phenomenon of thunderstorm asthma in Bavaria, Southern Germany: a statistical approach. International Journal of environmental health research. DOI 10.1080/09603123.2021.1985971