

*Wetterprognosen
Erneuerbare Energien
Luft und Klima
Umweltinformatik*

*Genossenschaft METEOTEST
Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern
Tel. +41 (0)31 307 26 26
Fax +41 (0)31 307 26 10
office@meteotest.ch, www.meteotest.ch*



Bern, 07. November 2014

Karten der Sturmgefährdung in der Schweiz

Flächendeckende Darstellung der Böenspitzen in der Schweiz für verschiedene Wiederkehrperioden

Im Auftrag von:

Bundesamt für Umwelt BAFU
3003 Bern

und

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz
8058 Zürich-Flughafen

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Wald
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

Auftragnehmende

Meteotest
Geographisches Institut der Universität Bern

Projektleitung

Bruno Rössli (BAFU, Abteilung Wald), Arthur Sandri, (BAFU, Abteilung Wald und
Abteilung Gefahrenprävention)
Sophie Fukutome (MeteoSchweiz)

Projektleitungsunterstützung

Thomas Egli, Samuel Monhart (Egli Engineering AG)

Autorenschaft

Silke Dierer, Stefan Müller (Meteotest)

Peter Stucki, Stefan Brönnimann, Olivia Romppainen-Martius (Geographisches
Institut, Universität Bern)

Begleitgruppe

Dörte Aller (PLANAT/Aller Risk Management), Markus Imhof (Interkantonaler
Rückversicherungsverband), Thomas Noack (Schweizerischer Ingenieur- und Ar-
chitektenverein), Ueli Salvisberg (Bundesamt für Landwirtschaft), Martin Wuethrich
(Schweizerischer Versicherungsverband)

Für den Inhalt des vorliegenden Schlussberichtes im Sinne eines technischen
Fachberichtes sind die Auftragnehmenden verantwortlich.

Zusammenfassung

Ziel und Methodik

Das Ziel des vorliegenden Projekts ist es, flächendeckende Windstatistiken für die Schweiz zur Verfügung zu stellen, die für die Modellierung von Sturmrisiken und die Ökosystem-Modellierung genutzt werden können. Die Grundlage hierfür bildet der 20CR-Datensatz, der Wetterinformation seit 1871 mit dazugehöriger Unsicherheit zur Verfügung stellt. Der 20CR-Datensatz hat eine globale Abdeckung, ist jedoch mit 220 km Gitterweite und 6-stündlichen Zeitschritten räumlich und zeitlich relativ grob aufgelöst. Um die Wetter- und Windinformationen für weiterführende Anwendungen nutzbar zu machen, braucht es eine Verfeinerung auf regionale und lokale Stufe. Hierfür wurde das hochauflösende Wettermodell WRF verwendet. Die Windfelder aus dem 20CR-Datensatz konnten so in drei Schritten von einer Gitterauflösung von etwa 220 km auf etwa 3 km Gitterweite für die Schweiz verfeinert werden.

Da es zu aufwendig ist, den gesamten von 20CR abgedeckten Zeitraum von 140 Jahren auf 3 km Gitterweite zu verfeinern, wurden für die Verfeinerung nur die stärksten historischen Schweizer Sturmereignisse seit 1871 ausgewählt. Die Auswahl der Sturmereignisse beruht auf einem Sturmkatalog, der im Rahmen eines Projekts des Geographischen Instituts der Universität Bern auf der Grundlage von Schadendatenbanken verschiedener Rückversicherungsinstitute sowie von historischen Studien und Literaturrecherchen erstellt wurde.

Anhand von Schadendaten und Messreihen der Windgeschwindigkeit wurde geprüft, ob Gewitterstürme für die Berechnung der Böenspitzen berücksichtigt werden müssen. Gewitterstürme haben meist eine kurze Dauer und die mit ihnen verbundenen hohen Windgeschwindigkeiten führen zu lokal begrenzten Schäden, so dass sie insgesamt ein nicht vernachlässigbares, aber doch deutlich geringeres Schadensvolumen aufweisen als Winterstürme. Zudem erfordert die Berücksichtigung von Gewitterstürmen eine teilweise deutlich veränderte Methodik mit erheblichem Forschungsbedarf, was den Rahmen dieses Projekts überschritten hätte. Die vorliegende Sturmstatistik basiert daher nur auf Winterstürmen, das heisst auf Stürmen zwischen Oktober und März. Für die Verfeinerung wurden schliesslich insgesamt 83 Wintersturm-Perioden ausgewählt.

Diese Sturmperioden wurden mit dem Wettervorhersagemodell WRF verfeinert, so dass insgesamt 83 hochaufgelöste Sturmsimulationen zur Verfügung standen. Die mit dem Modell WRF berechneten Windfelder und Böen auf 10 m Höhe über Grund wurden anhand vorliegender SwissMetNet-Messungen evaluiert. Die Evaluation zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung von simulierten und gemessenen Windgeschwindigkeiten und Böenspitzen. Die Genauigkeit liegt im Bereich vergleichbarer Studien oder ist besser. Die Rechnungen mit dem Wettermodell WRF sind somit geeignet, um historische Sturmereignisse in der Schweiz zu untersuchen.

Die Evaluation zeigt aber auch die Einschränkung, die eine Gitterweite von 3 km insbesondere an topographisch sehr komplexen Standorten besitzt. Die Böenge-

schwindigkeiten zeigen sowohl in Tälern als auch an sehr exponierten Bergstandorten teilweise grössere Abweichungen zu gemessenen Werten. Insbesondere zeigt sich die Tendenz, dass die Böengeschwindigkeit in Tälern generell überschätzt und an exponierten Bergstandorten unterschätzt wird. Die Ursache hierfür ist, dass Simulationen mit 3 km Gitterweite kleinräumige Einflüsse auf die Böen (z.B. Orographie, Rauigkeit oder Hindernisse) nicht im Detail erfassen können.

Verbesserung der Ergebnisse: Fallstudie Wintersturm Lothar

Der Wintersturm Lothar am 26.12.1999 wurde für eine Fallstudie ausgewählt, da für diesen eine breite Datenbasis sowohl an Windmessungen als auch an Schadeninformationen zur Verfügung steht. Die Fallstudie zeigt, dass das Modell das räumliche Muster der Böen generell erfasst und dass die simulierten Böen auf 10 m Höhe über Grund gut mit dem Muster der Schäden korrelieren.

Anhand des Wintersturms Lothar wurden verschiedene Sensitivitätsstudien zur weiteren Verfeinerung der Modellergebnisse durchgeführt. In der ersten Studie wurde die Simulation mit dem Modell WRF mit 1 km Gitterweite wiederholt, in der die Details der Orographie weitaus genauer beschrieben werden. Die Evaluation zeigt, dass im Flachland erwartungsgemäss keine starke Verbesserung erreicht wird. Dagegen ist für die exponierten Bergstationen eine sehr starke Reduktion der systematischen Unterschätzung der Böenspitzen von 14 m/s auf etwa 6 m/s zu erkennen. Für Täler kommt es nicht zu einer Verbesserung der Ergebnisse. Die Ursache hierfür ist, dass viele der Talstationen, z.B. Piotta oder Disentis, in sehr schmalen Tälern liegen, in denen Gitterweiten von 400 - 500 m notwendig wären, um die Taltopographie adäquat zu beschreiben. Die Verfeinerung auf 1 km Gitterweite ist somit für diese Standorte noch nicht ausreichend.

In einer weiteren Sensitivitätsstudie wurde ein sehr einfaches statistisches Verfahren zur Korrektur des systematischen Fehlers angewandt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Korrektur des systematischen Fehlers zu einer leichten Verbesserung im Flachland und zu einer deutlichen Verbesserung für die Bergstationen führt. Für Talstationen zeigt sich keine Reduktion der Abweichungen. Bereits mit diesem einfachen Korrekturverfahren kann somit ein Teil der Fehler reduziert werden. Ein differenzierteres Verfahren, das Regionen und eventuell verschiedene Wetterlagen berücksichtigt, würde vermutlich noch bessere Ergebnisse erzielen. Auch Kriging-Verfahren zur Interpolation der Fehler an verschiedenen Messstationen wären ein vielversprechender Ansatz.

In der dritten Sensitivitätsstudie wurde die Verfeinerung auf Grundlage der Ergebnisse des CFD-Modells WindSim berechnet. Die Methode konnte aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit von WindSim-Rechnungen nur stichprobenartig geprüft werden. Es wurden Korrekturen für den Bergstandort Jungfrauoch und den Talstandort Ulrichen berechnet. Für das Jungfrauoch, wo die Böenspitzen im WRF-Modell unterschätzt werden, erhöht der Korrekturfaktor die Windgeschwindigkeit hin zu realistischen Werten und für den Talstandort Ulrichen wird die Überschätzung des WRF Modells reduziert. Für beide Standorte wird der Fehler durch die Korrektur etwa halbiert. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die Korrektur mit

dem CFD-Modell WindSim das Potenzial hat, Abweichungen, die durch nicht aufgelöste Orographie entstehen, deutlich zu reduzieren. Eine systematische Prüfung des Verbesserungspotenzials durch Einbezug von CFD-Modellierung ist notwendig, da bisher nur ein einfacher Korrekturfaktor angewendet wurde. Die zusätzliche Berücksichtigung von Windrichtung und Turbulenz kann die Qualität der Simulation vermutlich weiter verbessern. Zurzeit werden im Auftrag des BFE CFD-Simulationen mit dem Modell WindSim für die gesamte Schweiz durchgeführt. Dieser Datensatz wird eine gute Grundlage darstellen, um eine weitere Verfeinerung der Karte der Böenspitzen zu berechnen.

Anhand der Fallstudie wurde auch der Zusammenhang zwischen dem Streubereich von 56 Simulationen aus dem 20CR-Ensemble und der Simulation aufgrund des 20CR-Ensemble-Mittels untersucht. Die 56 Simulationen für den Sturm Lothar zeigen die grösste Auffächerung der einzelnen Zeitreihen für Tal- und Bergstationen. Das Mittel aller 56 Simulationen ist leicht besser im Vergleich zur Simulation aus dem 20CR-Ensemble-Mittel. An fast allen Stationen ist der systematische Fehler, der vermutlich durch nicht aufgelöste Orographie entsteht, aber grösser als die Unsicherheit durch die 20CR-Randbedingungen. Die grössere Auffächerung der Resultate für Tal und auch Bergstationen ist ein Hinweis darauf, dass besonders in komplexer Orographie leichte Variationen der 20CR-Anfangs- und Randbedingungen deutliche Auswirkungen auf die bodennahen Windverhältnisse haben. Detailliertere Untersuchungen und mehr Fallstudien sind notwendig, um das Potenzial der Ensemble-Information genauer zu bestimmen.

Böenspitzen für verschiedene Wiederkehrperioden und Unsicherheit der Schätzwerte

Auf der Grundlage der Simulationen der Sturmperioden für die Schweiz wurden für jede 3x3 km-Gitterbox mit Hilfe von Extremwertstatistik die Böenspitzen für die Wiederkehrperioden 30, 50, 100 und 300 Jahre berechnet. Für die Extremwertstatistik wurde die Peaks-over-Threshold-Methode angewendet. Die Robustheit des Ergebnisses gegen die Auswahl der Stürme wurde abgeschätzt indem das Set der Stürme zur Berechnung der Extremwertstatistik variiert und die Wirkung auf die berechneten Böenspitzen betrachtet wurde. Der Test zeigt, dass die Wirkung auf die berechnete Extremwertstatistik eher gering ist.

Durch die Auswahl besonders starker Sturmereignisse und die beschränkte Anzahl der ausgewählten Stürme werden niedrigere Geschwindigkeiten tendenziell unterschätzt. Die berechneten Böenspitzen für kürzere Wiederkehrperioden bis etwa 20 Jahre sind somit mit grossen Unsicherheiten behaftet und werden nicht ausgewertet. Um für diese Wiederkehrperioden Windstatistiken zu berechnen, können hochaufgelöste Reanalysen von kürzerer Dauer verwendet werden. Solche Reanalysen sind zurzeit an verschiedenen Instituten (Universität Bern, Meteotest) in Vorbereitung.

Ein Vergleich der Extremwertstatistiken von gemessenen Böenspitzen mit WRF-Ergebnissen zeigt, dass an 65% der Stationen Abweichungen kleiner als 5 m/s auftreten. An 90% der Stationen ist die Abweichung kleiner als 10 m/s. Die simulierten

Jährlichkeiten der Simulation unterschätzen die Jährlichkeiten aus SwissMetNet-Messungen überwiegend, aber lediglich an sechs sehr exponierten Bergstationen treten Abweichungen grösser als 10 m/s auf. Dies zeigt wiederum, dass die Gitterweite von 3 km in sehr komplexer Orographie nicht ausreicht, um sehr exponierte Positionen zu beschreiben. Die oben beschriebenen Methoden zur Verfeinerung können hier Verbesserungen bringen.

Für die Teilschritte Auswahl des Sturmkatalogs, Simulation der Sturmperioden und Extremwertstatistik wurden die Unsicherheiten berechnet. Daraus wurde die Gesamtunsicherheit der berechneten Karten der Böenspitzen bestimmt. Diese Gesamtunsicherheit ist insbesondere in den Bergregionen hoch. Da die Evaluation zeigt, dass das Modell die Böenspitzen für besonders exponierte Standorte teilweise deutlich unterschätzt, wurde die Unsicherheit für diese Standorte zusätzlich um 3 m/s erhöht. Die Information zur Unsicherheit erlaubt es Nutzern, die Genauigkeit der zugrundeliegenden Böenspitzen in ihren Berechnungen zu berücksichtigen.

Hinweise zur Verwendung der Karten der Sturmgefährdung

Die im vorliegenden Projekt erstellten Karten der Böenspitzen und des Staudrucks ergeben ein detaillierteres Bild der (Winter-)Sturmgefährdung in der Schweiz als bisher vorliegende Karten. In Gebieten, die für die Versicherungen und die Landwirtschaft von besonderem Interesse sind, z.B. Mittelland, Jura und in den Voralpen, ergibt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung von simulierten und gemessenen Böenspitzen mit 50-jährlicher Wiederkehrperiode. An sehr exponierten Lagen ist die Übereinstimmung weniger gut, da das sehr komplexe Gelände und seine Wirkung auf das Windfeld im Wettervorhersagemodell mit 3 km Gitterweite nicht beschrieben werden kann. Bei der Interpretation der Karte der Sturmgefährdung sind daher einige Punkte zu berücksichtigen:

- Die Karte der Sturmgefährdung ersetzt kein standortspezifisches Gutachten, z.B. für die Planung von Bauten oder Infrastruktur, da die Auflösung der Karte lokale Charakteristika nicht ausreichend berücksichtigt. Die Karte gibt eine Information zu den regional zu erwartenden Böenspitzen.
- Die Werte für die Böenspitzen sind nicht als punktgenaue, exakte Werte zu interpretieren. Nicht immer ist der Gitterpunkt, der einem Standort am nächsten liegt, der die Windbedingungen am Standort am besten repräsentiert.
- Für sehr exponierte, hochalpine Standorte (z.B. Jungfraujoche, Weissfluhjoch) unterschätzt die Karte der Sturmgefährdung die Böenspitzen. Für diese Standorte wird empfohlen, die Unsicherheit zu berücksichtigen und standortspezifische Gutachten hinzuzuziehen.
- Die Karte basiert nur auf Winterstürmen. Föhnstürme wurden miteinbezogen, Sommerstürme wurden hingegen nicht berücksichtigt. Diese Vernachlässigung stellt im Bereich hoher Windgeschwindigkeiten keine wesentliche Einschränkung dar. Allerdings sollte für praktische Anwendungen die

Wahrscheinlichkeit von starken Böenspitzen im Zusammenhang mit Gewittern gesondert betrachtet werden oder mit einem Sicherheitszuschlag im Bereich der niedrigen Geschwindigkeiten (z.B. bis 30 m/s) vorsorglich ergänzt werden.

Die Karten der Sturmgefährdung sind die erste flächendeckende Grundlage, um die regionale Sturmgefährdung für verschiedene Wiederkehrperioden einschätzen zu können, wie sie z.B. für die Anwendung des Risikokonzept für Naturgefahren, Prozess Sturm (2009, in Überarbeitung¹) oder für die risikobasierte Planung von Objekten benötigt werden. Die Karten ersetzen dabei nicht die Karte des Referenzstaudrucks für die Baunormen, die der SIA Norm 261, Anhang E ((sia, 2003); (sia, 2006)) entnommen werden kann. Lokale Einflüsse sind nicht berücksichtigt. Ist der Standort des betrachteten Objektes/Gebietes nicht repräsentativ zur Umgebung oder sind lokale Einflüsse ausschlaggebend, so sind bei der Planung von Projekten entsprechende zusätzliche Gutachten einzuholen bzw. Massnahmen zu ergreifen.

Die Karten wurden auf der Grundlage von Informationen über Sturmereignisse im Zeitraum 1871 bis 2011 erstellt. Der zugrunde liegende Sturmkatalog sollte jedoch nicht ohne weiteres für Trendanalysen verwendet werden. Die Informationen darüber, wie sich die Sturmhäufigkeit in einem sich ändernden Klima entwickelt, sind noch sehr unsicher. Abschätzungen der zukünftigen Entwicklung von Böenspitzen würden den Rahmen des vorliegenden Projekts überschreiten.

Die Karten der Böenspitzen, des daraus abgeleiteten Staudrucks und der dazugehörigen Unsicherheiten werden in Form von Karten und als Geodatensätze zur Verfügung gestellt. Ein geeigneter, einfacher Zugang zu den Informationen und Schnittstellen zu anderen georeferenzierten Daten wird am BAFU eingerichtet und ermöglicht so den Zugriff auf die Informationen für eine breite Palette von Anwendungen. Die Ergebnisse sind online verfügbar unter:

<http://www.bafu.admin.ch/stuerme>

¹ http://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/planat_pdf/alle_2012/2006-2010/PLANAT_2009_-_Prozess_Sturm.pdf

Résumé

Objectif et méthodologie

Le projet présenté ici a pour objectif de mettre à disposition de la Suisse des statistiques de vent couvrant la totalité de son territoire et pouvant être utilisées pour modéliser les risques de tempêtes et l'écosystème. Il repose sur la base de données 20CR, qui fournit depuis 1871 des informations météorologiques accompagnées de leur incertitude propre. La base de données 20CR a une couverture globale, mais une résolution relativement grossière puisque son maillage spatial est de 220 km de côté et son maillage temporel de 6 heures. Pour rendre les informations relatives à la météorologie et au vent utilisables pour d'autres applications, il importe de les affiner aux niveaux régional et local. C'est à cet effet que l'on a utilisé le modèle météorologique à haute résolution WRF. Les champs de vent de la base de données 20CR ont ainsi pu être optimisés en trois étapes, d'un maillage d'environ 220 km à des mailles d'environ 3 km de côté pour l'ensemble de la Suisse.

Comme il est coûteux d'affiner à un maillage de 3 km de côté pour toute la période de 140 ans couverte par la base de données 20CR, on a sélectionné à cet effet uniquement les épisodes tempétueux les plus violentes enregistrées en Suisse depuis 1871. Le choix de ces épisodes repose sur un catalogue des tempêtes élaboré dans le cadre d'un projet de l'Institut de géographie de l'Université de Berne réalisé à partir de banques de données de sinistres de divers établissements de réassurance ainsi que d'études historiques et de recherches bibliographiques.

À l'aide des données sur les sinistres et de séries de mesures des vitesses de vent, on a étudié la question de savoir s'il fallait prendre en considération des orages tempétueux dans le calcul des rafales maximales de vent. Ces orages sont généralement de courte durée, et les vitesses élevées des vents qui les accompagnent produisent des dommages limités à l'échelle locale, si bien que, dans l'ensemble, ils causent des dommages d'une ampleur certes non négligeable mais nettement moindre que les tempêtes hivernales. De plus, la prise en considération des orages tempétueux requiert une méthodologie parfois très différente qui demande des recherches beaucoup plus poussées, ce qui aurait dépassé le cadre du projet présenté ici. La statistique des tempêtes repose donc seulement sur les tempêtes hivernales, c'est-à-dire sur les épisodes tempétueux survenant entre octobre et mars. Enfin, l'optimisation s'est faite sur la base d'un éventail de 83 périodes de tempêtes hivernales.

Ces périodes ont été optimisées à l'aide du modèle météorologique prévisionnel WRF, si bien que l'on a disposé au total de 83 simulations de tempêtes à haute résolution. Les champs de vent et les rafales, calculés avec le modèle WRF à une hauteur de 10 m au-dessus du sol, ont été évalués à l'aide des mesures effectuées par le réseau SwissMetNet. L'évaluation montre globalement une bonne corrélation entre les vitesses des vents et les rafales maximales simulées et mesurées. La précision est du même ordre que celle des études comparables, voire meilleure.

Les calculs effectués avec le modèle météorologique WRF sont donc appropriés pour étudier les épisodes tempétueux historiques qui ont eu lieu en Suisse.

L'évaluation montre toutefois la limite inhérente à un maillage de 3 km, en particulier lorsqu'elle concerne des lieux topographiquement très complexes. Les vitesses des rafales présentent parfois des écarts considérables avec les valeurs mesurées, et ce, aussi bien dans les vallées que dans les régions de montagne très exposées. On relève en particulier une tendance à la surestimation de la vitesse des rafales dans les vallées et à la sous-estimation de celle-ci dans les lieux exposés en montagne. La cause en est que les simulations à partir d'un maillage de 3 km ne peuvent pas prendre en considération en détail les influences microspatiales sur les rafales (p.ex. orographie, rugosité ou obstacles).

Amélioration des résultats: étude modèle de la tempête hivernale Lothar

L'ouragan Lothar, qui a balayé la Suisse le 26 décembre 1999, a été choisi pour une étude de cas parce que l'on possède pour cet épisode une vaste base de données provenant tant des mesures du vent que des informations sur les dégâts causés. Cette étude montre que le modèle saisit bien le schéma spatial des rafales, et que les rafales simulées à 10 mètres au-dessus du sol sont bien corrélées avec la répartition des dommages.

Diverses études de sensibilité ont été effectuées à l'aide de Lothar en vue de poursuivre l'optimisation des résultats du modèle. La première de ces études a reproduit la simulation avec le modèle WRF en prenant un maillage de 1 km, qui permet de décrire beaucoup plus précisément les détails de l'orographie. Comme on s'y attendait, l'évaluation montre que l'on n'obtient pas d'amélioration notable dans les régions de plaine. En revanche, dans les stations de montagne exposées, on relève une très forte réduction de la sous-estimation systématique des rafales maximales de 14 m/s à environ 6 m/s. On ne note pas d'amélioration des résultats dans les vallées. Cela s'explique par le fait que nombre de stations de vallées, p. ex. Piotta ou Disentis, sont situées dans des vallées très étroites, dans lesquelles il faudrait un maillage de 400 à 500 m pour décrire de manière adéquate la topographie locale. Un maillage ramené à 1 km de côté n'est donc pas encore suffisant pour ces endroits.

Dans une autre étude de sensibilité, on a appliqué une méthode statistique très simple pour corriger l'erreur systématique. Les résultats montrent que cette correction entraîne une légère amélioration en plaine et une amélioration sensible dans les stations de montagne. En revanche, on ne note aucune réduction des écarts au niveau des stations de vallée. Cette méthode de correction simple permet donc déjà de réduire une partie des erreurs. Une méthode plus différenciée, tenant compte des régions et éventuellement de différentes conditions météorologiques, donnerait probablement des résultats encore meilleurs. Les méthodes Kriging d'interpolation des erreurs sur différentes stations de mesure seraient, elles aussi, une approche prometteuse.

La troisième étude de sensibilité a calculé l'amélioration sur la base des résultats du modèle CFD WindSim. Cette méthode n'a pu être testée que par échantillonnage étant donné la disponibilité limitée des calculs WindSim. On a calculé des corrections, en montagne pour le Jungfraujoch et dans une vallée pour le site d'Ulrichen. Pour le Jungfraujoch, où les rafales maximales sont sous-estimées dans le modèle WRF, le facteur de correction augmente la vitesse du vent jusqu'à des valeurs réalistes, et pour Ulrichen, il réduit la surestimation inhérente au modèle WRF. Dans les deux cas, Jungfraujoch et Ulrichen, la correction réduit l'erreur de moitié environ. Les résultats actuels montrent que la correction opérée avec le modèle CFD WindSim a le potentiel de réduire sensiblement les écarts générés par l'orographie non résolue. Un examen systématique du potentiel d'amélioration par le recours à la modélisation CFD est nécessaire, étant donné que, jusqu'à présent, seul a été appliqué un facteur de correction simple. Il est probable que la prise en compte additionnelle de la direction du vent et des turbulences permettra de continuer à améliorer la qualité de la simulation. Pour le moment, des simulations CFD sont effectuées sur mandat de l'OFEN pour l'ensemble de la Suisse avec le modèle WindSim. Cet ensemble de données constituera une bonne base pour continuer à optimiser la carte des rafales de vent.

À l'aide de l'étude de cas, on a également analysé le rapport entre le champ de dispersion de 56 simulations provenant de l'ensemble de la base de données 20CR et la simulation basée sur la moyenne de l'ensemble des données de la base 20CR. Ce sont les 56 simulations effectuées pour l'ouragan Lothar qui montrent la plus grande dispersion des diverses séries chronologiques établies pour les stations de montagne et de vallée. Leur moyenne est légèrement meilleure comparée à la simulation résultant de la moyenne de l'ensemble 20CR. Mais pour presque toutes les stations, l'erreur systématique, qui provient probablement de l'orographie non résolue, est supérieure à l'incertitude découlant des conditions aux limites de l'ensemble 20CR. Le fait que la dispersion des résultats soit plus grande pour les stations de vallée, mais également pour les stations de montagne, est un indice du fait que de légères variations des conditions initiales et aux limites de la base 20CR ont des répercussions sensibles sur les conditions de vent régnant à proximité du sol, en particulier dans une orographie complexe. Des études plus détaillées et un plus grand nombre d'études de cas sont nécessaires pour déterminer avec plus de précision le potentiel de l'information contenue dans l'ensemble.

Rafales maximales avec différentes périodes de récurrence et incertitude des estimations

Sur la base des simulations des périodes de tempêtes en Suisse, on a calculé pour chaque maille de 3x3 km, à l'aide d'une statistique des valeurs extrêmes, les rafales maximales pour des périodes de récurrence de 30, 50, 100 et 300 ans. Pour la statistique, on a appliqué la méthode Peaks-over-Threshold. On a estimé la pertinence du résultat compte tenu du choix des tempêtes en faisant varier la palette des tempêtes entrant dans le calcul de la statistique des valeurs extrêmes et en considérant l'effet sur les rafales maximales calculées. Le test montre que l'effet sur la statistique des valeurs extrêmes calculée est plutôt minime.

Du fait du choix de tempêtes particulièrement violentes et du nombre limité des tempêtes considérées, le modèle a tendance à sous-estimer les vitesses relativement faibles. Ainsi, les rafales maximales calculées pour des périodes de récurrence relativement courtes, jusqu'à 20 ans environ, sont entachées de grandes incertitudes et n'entrent donc pas dans l'évaluation. Pour calculer des statistiques de vent pour ces périodes de récurrence, on peut utiliser des réanalyses de courte durée à haute résolution. De telles réanalyses sont actuellement en préparation dans divers instituts (Université de Berne, Meteotest).

Une comparaison des statistiques des valeurs extrêmes de rafales maximales mesurées avec les résultats WRF révèle des écarts de moins de 5 m/s dans 65 % des stations et de moins de 10 m/s pour 90 % de celles-ci. Les périodes de récurrence considérées dans la simulation sous-estiment principalement les périodes de récurrence des mesures du SwissMetNet, mais on ne relève des écarts supérieurs à 10 m/s que dans six stations de montagne très exposées. Cela montre à nouveau que, dans une orographie très complexe, le maillage de 3 km n'est pas suffisant pour décrire des positions très exposées. Les méthodes d'optimisation décrites plus haut peuvent y apporter des améliorations.

Les incertitudes ont été calculées pour les sous-étapes « choix du catalogue des tempêtes », « simulation des périodes de tempêtes » et « statistique des valeurs extrêmes ». On en a déduit l'incertitude globale des cartes des rafales maximales telles que calculées. Cette incertitude est élevée, notamment dans les régions de montagne. Comme l'évaluation montre que le modèle sous-estime parfois sensiblement les rafales maximales pour les endroits particulièrement exposés, on a augmenté cette incertitude de 3 m/s supplémentaires pour ces endroits. Cette information sur l'incertitude permet aux utilisateurs de tenir compte, dans leurs calculs, de la précision des rafales maximales prises pour base.

Indications sur l'emploi des cartes des dangers dus aux de tempêtes

Les cartes des rafales maximales et de la pression dynamique réalisées dans le projet présenté ici livrent une image plus détaillée que les cartes actuelles des dangers dus aux tempêtes (hivernales) en Suisse. Dans les régions qui revêtent un intérêt particulier pour les assurances et l'économie forestière, p. ex. le Plateau, le Jura et les Préalpes, on observe que les rafales maximales simulées et mesurées coïncident globalement bien pour une période de récurrence de 50 ans. En revanche, la correspondance est moins bonne pour les situations très exposées car il n'est pas possible de décrire la grande complexité du terrain et son effet sur le champ de vent dans le modèle météorologique prévisionnel comportant un maillage de 3 km. Par conséquent, l'interprétation de la carte des dangers liés aux tempêtes requiert de considérer quelques éléments, à savoir :

- La carte des dangers liés aux tempêtes ne remplace pas une expertise spécifique sur site, p. ex. pour la planification d'édifices ou d'infrastructures, étant donné que la résolution de la carte ne tient pas suffisamment compte des caractéristiques locales. Elle donne une information sur les rafales maximales possibles dans les régions.

- Les valeurs des rafales maximales ne doivent pas être interprétées comme des valeurs ponctuelles très précises. Le point d'une maille le plus proche d'un endroit n'est pas toujours celui qui est le plus représentatif des conditions de vent régnant à cet endroit.
- La carte des dangers liés aux tempêtes sous-estime les rafales maximales des lieux très exposés situés en haute montagne (p. ex. Jungfraujoeh, Weissfluhjoeh). Pour ces endroits, il est recommandé de tenir compte de l'incertitude et de recourir à une expertise spécifique des lieux.
- La carte est basée uniquement sur les tempêtes hivernales. Les tempêtes de foehn y ont été intégrées, mais en revanche, les tempêtes estivales n'ont pas été prises en considération. Cette discrimination ne constitue pas une limitation notable dans le domaine des grandes vitesses de vents. Toutefois, dans les applications pratiques, il faudrait considérer à part la probabilité de fortes rafales maximales accompagnant des orages ou la compléter par un coefficient de sécurité supplémentaire dans le champ des faibles vitesses (p. ex. jusqu'à 30 m/s) à titre préventif.

Les cartes des dangers liés aux tempêtes sont la première base géographique générale permettant d'estimer le danger régional de tempête pour différentes périodes de récurrence, telle qu'elle est nécessaire, p. ex. dans l'application du « Concept de risque appliqué aux dangers naturels, Procès Tempête » (2009, en cours de révision²) ou dans la planification d'ouvrages fondée sur le risque. À noter que ces cartes ne remplacent pas la carte de la pression dynamique de référence de la SIA sur laquelle se fondent les normes appliquées à la construction ((sia, 2003); (sia, 2006)), puisqu'elles ne prennent pas en compte les influences locales. Si le site de l'objet/région considéré n'est pas représentatif des environs, ou si les influences locales sont déterminantes, il y a lieu de recourir à des expertises complémentaires lors de la planification de projets ou de mettre en œuvre les mesures qui s'imposent.

Les cartes ont été élaborées sur la base d'informations relatives aux tempêtes qui se sont produites entre 1871 et 2011. Le catalogue sur lequel elles reposent ne devrait toutefois pas être utilisé tel quel dans des analyses de tendances. Les informations sur la façon dont la fréquence des tempêtes évolue dans un climat en changement sont encore entachées de grandes incertitudes. L'estimation de l'évolution future des rafales maximales dépasserait toutefois le cadre du présent projet.

Les cartes des rafales maximales, de la pression dynamique qui en découle et des incertitudes qui y sont liées sont proposées sous forme de cartes et de bases de géodonnées. L'OFEV met en place un accès approprié et simple aux informations et des interfaces avec d'autres données géoréférencées, permettant ainsi à

² http://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/planat_pdf/alle_2012/2006-2010/PLANAT_2009_-_Prozess_Sturm.pdf

l'utilisateur d'accéder à des informations permettant un large éventail d'applications.
Les résultats sont disponibles en ligne sous le lien :

<http://www.bafu.admin.ch/tempetes>

Summary

Objectives and methods

The aim of this project is to provide wind statistics covering all of Switzerland that can be used for modelling of windstorm risks and ecosystems. The project is based on the 20CR dataset, which contains meteorological information from 1871 including the associated uncertainty. The 20CR dataset provides global coverage with a grid mesh of 220 km and six-hour time increments; i.e., the resolution is relatively coarse. Hence, it needs to be refined at regional and local levels to make the weather and wind information usable for more advanced applications. To this end, the high-resolution WRF weather model was used. In three iterations, the wind fields from the 20CR dataset were refined from a global grid mesh of around 220 km to around 3 km for Switzerland.

Because it is computationally too expensive to refine the entire period of 140 years covered by the 20CR to a grid mesh of 3 km, only the strongest historical windstorm events in Switzerland since 1871 were selected for refinement. The windstorm events were selected on the basis of a windstorm catalogue, which was compiled in the context of a project carried out by the Institute of Geography at the University of Bern and based on the damage databases from the insurance industry, historical studies and literature research.

The question as to whether thunderstorms must be taken into account in the calculation of peak wind gusts was examined on the basis of damage data and wind speed measurement series. Thunderstorms are usually brief in duration and the associated high wind speeds cause locally limited damage. Hence, overall, they generate a considerably lower amount of damage than winter storms. Moreover, the consideration of thunderstorms would require a significantly modified methodology. Some of this would involve considerable need for research, a requirement that exceeds the framework of this project. Hence, the presented windstorm statistics are only based on winter storms that occur between October and March. Finally, a total of 83 winter storm periods were selected for the refinement process.

These windstorm periods were refined using the Weather Research and Forecasting Model (WRF) giving a total of 83 high-resolution windstorm simulations. The wind fields and gusts calculated at 10-m height above ground using the WRF model were evaluated using existing SwissMetNet measurements. Overall, the evaluation reveals a good correlation between simulated and measured wind speeds and peak wind gusts. The accuracy is in the range of comparable studies or better. Hence the calculations using the WRF weather model are suitable for the study of historical windstorm events in Switzerland.

However, the evaluation also revealed the limitation of a 3 km grid mesh, particularly in locations with very complex topography. In some cases, the wind gust speeds deviate substantially from the measured values in both valleys and very exposed mountain locations. In particular, gust speeds are generally overestimated

in valleys and underestimated at exposed mountain locations. This is because simulations with a 3 km grid mesh cannot resolve small-scale influences on the wind gusts (e.g. orography, roughness and obstacles) in detail.

Improvement of the results: case study winter storm Lothar

Winter storm Lothar on 26 December 1999 was selected for a case study as comprehensive data for both wind measurements and damage are available for this event. The case study shows that the model generally captures the spatial pattern of the gusts, and that the simulated gusts at a height of 10 m above ground correlate well with the pattern of the damage caused.

Various sensitivity studies were carried out on the basis of winter storm Lothar with a view to further refining the model results. In the first study, the simulation with the WRF model was repeated with a grid mesh of 1 km, in which the orographic details are described more accurately. The evaluation shows that, in line with expectation, no major improvement is achieved in the lowlands. In contrast, the systematic underestimation of the peak wind gusts at wind-exposed mountain stations can be considerably reduced from 14 m/s to around 6 m/s. There was no improvement in the results for valleys. This is due to the fact that many of the valley stations, e.g. Piotta and Disentis, are located in very narrow valleys, in which grid meshes between 400 and 500 m would be necessary to describe the valley topography adequately. Hence, refinement to a grid mesh of 1 km is not sufficient for these locations.

A very simple statistical correction of the systematic error was applied in a further sensitivity study. The correction of the systematic error results in a slight improvement for the lowland stations and a considerable improvement for the mountain stations. There is no reduction in the deviations for valley stations. Hence some of the errors can be reduced by this simple correction. A more differentiated process, which takes into account different regions and possibly different weather conditions, would probably yield even better results. Kriging procedures for the interpolation of the errors in different measurement stations would also constitute a promising approach.

In the third sensitivity study, the refinement was calculated on the basis of the results of the WindSim CFD model. Due to the limited availability of WindSim calculations, this method could only be tested on the basis of spot checks. Corrections were calculated for the Jungfrauoch mountain location and Ulrichen valley location. For the Jungfrauoch, where the peak wind gusts are underestimated in the WRF model, the correction factor increases the wind speed to realistic values; the overestimation by the WRF model is also reduced for the Ulrichen valley location. The correction approximately reduces the error by half for both locations. The previous results show that correction with the WindSim CFD model has the potential to reduce deviations arising from unresolved orography considerably. It is necessary to systematically test the potential for improvement offered by the integration of CFD modelling as a simple correction factor alone was applied up to now. The additional consideration of wind direction and turbulence

could probably further improve the quality of the simulation. CFD simulations with the WindSim model are currently being carried out for all of Switzerland on behalf of the Swiss Federal Office of Energy (SFOE). This dataset will provide a good basis for the calculation of further refinements to the map of peak wind gusts.

On the basis of the case study, the variability of 56 simulations from the 20CR ensemble was compared to the simulation based on the 20CR ensemble mean. The 56 simulations for winter storm Lothar show the greatest variability of the individual time series for valley and mountain stations. The mean for all 56 simulations is slightly better compared with the simulation from the 20CR ensemble mean. However, the systematic error, which probably arises from the unresolved orography, is larger than the uncertainty arising from the 20CR boundary conditions at almost all stations. The greater variability of the results for valley and also mountain stations indicates that slight variations in the 20CR initial and boundary conditions have clear impacts on the ground-level wind conditions, particularly in complex orography. Detailed tests and more case studies are required to estimate the potential of the ensemble information more accurately.

Gusts for different return periods and uncertainties of the estimates

Based on the simulations of the storm periods for Switzerland, peak wind gusts were calculated for each 3 x 3 km grid box at return periods of 30, 50, 100 and 300 years using extreme value statistics. The peak-over-threshold method was used for the extreme value statistics. The robustness of the result with regard to the selection of the windstorms was estimated by varying the set of storms used for the calculation of the extreme value statistics and by evaluating the impact on the calculated peak wind gusts. The test revealed a minor effect on the calculated extreme value statistics.

Lower wind speeds tend to be underestimated due to the selection of particularly strong windstorm events and the limited number of the selected storms. Hence, the peak wind gusts calculated for shorter return periods up to around 20 years are associated with major uncertainties and are not evaluated. High-resolution reanalyses datasets covering shorter time periods can be used to calculate wind statistics for these return periods. Such reanalyses data are currently being processed at various institutes (University of Bern, Meteotest).

A comparison of the extreme value statistics for measured peak wind gusts with WRF results shows that deviations are smaller than 5 m/s at 65% of the stations. The deviation is lower than 10 m/s at 90% of the stations. The simulated annual periods of the simulation predominantly underestimate the annual periods from the SwissMetNet measurements, however deviations in excess of 10 m/s only arise at six very exposed mountain stations. Again, this demonstrates that, in the case of very complex orography, the grid mesh of 3 km is not sufficient for the description of very exposed locations. The above-described refinement methods can lead to improvements here.

Uncertainties were calculated with regard to the following three scopes: selection of the storm catalogue, simulation of the storm periods and extreme value statistics. The overall uncertainty of the calculated maps of peak wind gusts was determined from these partial uncertainties. This overall uncertainty is particularly high in the mountain regions. The evaluation shows that the model considerably underestimates the peak wind gusts at some of the particularly exposed locations. Therefore, the uncertainty for these locations was increased by an additional 3 m/s. The information on uncertainty enables users to account for the accuracy of the peak wind gust estimations.

Comments regarding the application of the maps of storm risk

The maps of peak wind gusts and dynamic pressure compiled by this project provide a more detailed image of the (winter) windstorm risk in Switzerland than previously available maps. The correlation between the simulated and measured peak wind gusts at a 50-year return period is good in areas of particular interests for the insurance companies and forestry sector, e.g. the Central Plateau, Jura and Pre-Alps. The correlation is less good at very exposed locations as the very complex terrain and its impact on the simulated wind field cannot be described with a grid mesh of 3 km. Hence certain points should be considered when interpreting the windstorm risk map:

- The map of peak wind gusts is not intended to replace any location-specific reports, e.g. for the planning of buildings or infrastructure, as the map's resolution does not take local characteristics into account adequately. The map provides information on the peak wind gusts that may be expected at regional level.
- The values specified for the peak wind gusts should not be interpreted as pinpoint-accurate values. The grid point closest to a location is not always the one that best represents the wind conditions at the location in question.
- The map of peak wind gusts underestimates the peak wind gusts for very exposed Alpine locations (e.g. Jungfraujoche, Weissfluhjoch). It is recommended that the uncertainty be taken into account for these locations and that other location-specific reports be consulted.
- The map is only based on winter storms. Foehn storms were also taken into account but summer storms were not. This omission does not represent any major limitation in relation to higher wind speeds. However, for practical applications, the probability of strong peak wind gusts in association with wind storms should be considered separately or, by way of precaution, complemented with a safety margin at the level of low wind speeds (e.g. up to 30 m/s).

The maps of peak wind gusts provide the first nationwide basis for the estimation of the regional windstorm risk for different return periods as required for example, for the application of the Natural Hazard Risk Strategy, Process Storm (Risikokonzzept

für Naturgefahren, 2009, under revision³) and for the risk-based planning of building projects. The maps are not intended to replace the map of reference dynamic pressure of the Swiss Society of Engineers and Architects (SIA) for the building standards which is displayed in the SIA norm 261, Appendix E ((sia, 2003); (sia, 2006)). Local influences are not taken into account. Additional reports must be obtained or measures taken for the planning of projects if the location of the object or area under consideration is not representative of the surroundings or if local factors have a crucial impact.

The maps were compiled on the basis of information about windstorm events in the period 1871 to 2011. The underlying windstorm catalogue should not necessarily be used for trend analyses, however. It is still very uncertain how windstorm frequency develops in a changing climate. The estimation of the future development of peak wind gusts would exceed the framework of this project.

The maps of the peak wind gusts, the derived maps of the dynamic pressure as well as the associated uncertainties are available in the form of maps and as geodatasets. A suitable, simple way of accessing the information and interfaces with other georeferenced data is being set up at the Federal Office for the Environment (FOEN). It will provide access to these data for a wide range of applications. The results are available online at:

<http://www.bafu.admin.ch/stuerme>

³ http://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/planat_pdf/alle_2012/2006-2010/PLANAT_2009_-_Prozess_Sturm.pdf

Inhalt

1	Einleitung	20
2	Berechnung der Karten der Böenspitzen.....	23
2.1	Grundlagen.....	23
2.1.1	Berücksichtigung von Winterstürmen	23
2.1.2	Vorgehen.....	24
2.2	Selektion der Sturmereignisse	25
2.2.1	Motivation für einen Schweizer Sturmkatalog	25
2.2.2	Datenquellen	26
2.2.3	Auswahlkriterien und –verfahren	27
2.2.4	Schadenbasierter Sturmkatalog	28
2.2.5	Validierung	29
2.2.6	Windbasierter Sturmkatalog	29
2.2.7	Zusammenfassung der Sturmereignisse zu Sturmperioden.....	30
2.2.8	Zusammenfassung: Unsicherheiten in der Sturmauswahl	30
2.3	20CR Daten.....	31
2.4	Hochaufgelöste Simulation der Windfelder	31
2.4.1	Grundprinzip der Verfeinerung	31
2.4.2	Modellbeschreibung	32
2.4.3	Böenparametrisierungen	33
2.4.4	Evaluation von 10-m-Wind und -Böen	35
2.4.5	Fallstudie zur weiteren Verfeinerung	43
2.4.6	Fallstudie zu Ensemble-Rechnungen	53
2.5	Extremwertstatistik	55
2.5.1	Angewendete Methodik	56
2.5.2	Unsicherheit	58
2.5.3	Robustheit.....	58
3	Karten der Böenspitzen für die Schweiz	60
3.1	Karten der Böenspitzen und Staudrucke für verschiedene Wiederkehrperioden	60
3.2	Unsicherheit	65
3.3	Vergleich mit anderen Extremwindberechnungen.....	75
3.3.1	Böenspitzen auf Grundlage von SwissMetNet-Messungen.....	75
3.3.2	Staudruckkarte Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein..	77
3.4	Einsicht der Daten	78
4	Appendix	83
4.1	Ausgewählte Sturmperioden 1871 bis 2011.....	83
4.2	Liste der SwissMetNet-Stationen.....	85

1 Einleitung

Sturmereignisse haben eine grosse Bedeutung für Ökonomie, Ökologie und die Gesellschaft. Winterstürme in Europa gehören in Bezug auf die versicherten Schäden zu den teuersten Naturkatastrophen (Münchener Rückversicherungsgesellschaft, 2008). Zusätzlich haben Stürme starke Auswirkungen auf die Ökosysteme Wald und See, auf Land- und Waldwirtschaft (Usbeck, et al., 2010). Um potenzielle Schäden an Gebäuden, Infrastruktur, Wald oder See-Ökosystemen abzuschätzen, um Baunormen weiter zu entwickeln oder für die Ökosystemmodellierung sind Informationen zu Windextremen in der Vergangenheit wichtig.

Um Wetterextreme und ihre Bedeutung für die Gesellschaft untersuchen zu können, werden Datensätze benötigt, die möglichst flächendeckend Aussagen zur Häufigkeit und Intensität von ausserordentlichen Ereignissen (Extremereignissen) machen. Da Extremereignisse per Definition selten sind, bedeutet dies, dass die Datensätze so weit als möglich in die Vergangenheit zurückreichen sollten. Im Idealfall liegen dreidimensionale Datensätze in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung vor, so dass sie direkt als Eingangsdaten für weitere Modelle genutzt werden können (z.B. Ökosystemmodelle, Sturmflutmodelle, Schadensmodelle).

Neben Sturmereigenschaften wie mittlere Windstärke, Dauer oder Böigkeit sind es vor allem die maximalen Windgeschwindigkeiten während eines Sturmes (Böenspitzen), die zu Sturmschäden führen. Deshalb konzentriert sich dieses Projekt auf Böenspitzen. Für die Schweiz liegen Statistiken extremer Windgeschwindigkeiten bisher hauptsächlich auf der Grundlage der Messungen des Bundesamts für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz vor (Ceppi, Della-Marta, & Appenzeller, 2008); (Sia, 2003). Das schweizweite, automatisierte Messnetz SwissMetNet, das heute 210 Stationen umfasst (früher weniger), besteht seit etwa 1980 (Einführung des automatisierten Messnetzes ANETZ). Die Verfügbarkeit und die Qualität der Messungen sind aufgrund regelmässiger Wartungen sehr gut.

Messungen stellen die verlässlichste Information über die Geschwindigkeit von Wind und Böenspitzen an der Messposition dar. Böenspitzen sind kurzzeitige Windmaxima. Die meteorologische Definition spricht von einer Böe, wenn der gemessene 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit innerhalb weniger Sekunden (zwischen 1 und 20 Sekunden) um mindestens 5 m/s überschritten wird. Die Messungen liefern aber nur lokale Informationen über die Windverhältnisse, die je nach Komplexität der Umgebung nur schwer auf umliegende Standorte zu übertragen sind. Zusätzlich ist der Zeitraum von etwa 35 Jahren, der durch die Messungen abgedeckt wird, beschränkt und es treten nur wenige Extremereignisse auf, so dass die Ergebnisse der Extremwertstatistik mit grossen Unsicherheiten behaftet sind. Historische Windreihen, d.h. bis zur Einführung des automatisierten Messnetzes, sind meist nur als dreimal tägliche, manuelle Beobachtungen digital verfügbar, was die systematische Auswertung erschwert. In der Schweiz steht nur von der Station Zürich das maximale Stundenmittel pro Tag zur Verfügung. Weitere kontinuierliche Anemographenaufzeichnungen (Bern, Säntis) sind bisher nicht digitalisiert worden.

Deshalb waren bis vor kurzem historische Dokumente die wichtigste und in vielen Fällen die einzige Quelle, um Informationen über historische Wetterextreme wie Stürme zu erhalten. Historische Dokumente als Quelle können wertvolle Anhaltspunkte liefern zu Art des Sturmereignisses, Datierung, betroffenen Räumen, Dauer und Intensitätsklasse. Sie bieten aber kaum verwertbare quantitative Informationen zu maximalen Windgeschwindigkeiten während eines Ereignisses.

Eine weitere Quelle für Informationen zu Windgeschwindigkeiten sind sogenannte Reanalysedaten. Es handelt sich um Datensätze, die auf einer Verknüpfung von Messungen und Simulationen mit Wettervorhersagemodellen basieren. Durch diese Kombination erhält man einen dreidimensionalen Datensatz, der die zeitliche Entwicklung von atmosphärischen Variablen wie der Windgeschwindigkeit oder – richtung flächendeckend beschreibt. Durch die Integration der Messungen wird erreicht, dass die Beschreibung möglichst nahe an der Realität bleibt. Der grosse Vorteil von Reanalysen ist, dass es sich um langjährige, homogene und weltweit verfügbare Datenreihen handelt. Bekannte Beispiele sind die Reanalysen von NCEP/NCAR (Kalnay, et al., 1996), ERA-40 (Uppala, et al., 2005), MERRA (Rienecker, et al., 2011) und ERA-Interim (Dee, et al., 2011). Die Reanalysedatensätze liegen jedoch nur mit horizontalen Gitterweiten zwischen etwa 50 und 200 km vor, mit denen die Windverhältnisse in komplexem Gelände nicht ausreichend genau erfasst werden können. Zusätzlich reichen bisherige Reanalysedaten maximal bis 1948 zurück.

Der neu veröffentlichte Atmosphärendatensatz Twentieth Century Reanalysis (20CR, (Compo, et al., 2011)) deckt im Vergleich zu bisher existierenden Datensätzen die vergangenen 140 Jahre ab (Abschnitt 2.3). Der dreidimensionale, globale Datensatz enthält alle wichtigen meteorologischen Parameter und zusätzlich stellt die 20CR für jeden Zeitpunkt 56 Ensemble-Mitglieder zur Verfügung. Hierfür wurden 56 leicht veränderte aber gleich wahrscheinliche Simulationen durchgeführt. Mit Hilfe dieser leicht abweichenden Szenarien kann ein Unsicherheitsbereich für die simulierten Extremwinde abgeschätzt werden.

Es wurden umfangreiche Evaluationen des Datensatzes durchgeführt (Brönnimann, Compo, Spadin, Allan, & Adam, 2011), (Brönnimann & Compo, 2012). Unter anderem wurde gezeigt, dass Sturmereignisse in den nördlichen mittleren Breiten, vor allem in Europa und Nordamerika, insgesamt gut erfasst werden (Wang, et al., 2011), (Donat, et al., 2011), (Brönnimann, et al., 2012). Allerdings hat der neue 20CR-Datensatz mit etwa 200 km Gitterweite eine zu grobe Auflösung, um ihn direkt für praktische Anwendungen wie etwa zur Abschätzung von möglichen Schäden an Gebäuden oder Waldgebieten zu nutzen. Hierfür müssen die 20CR Daten mit Hilfe eines Wettermodells auf den lokalen Maßstab verfeinert, validiert und in einfach zugänglicher Form zur Verfügung gestellt werden.

Die Verfeinerung von Reanalysedaten mit Hilfe von Wettermodellen ist für klimatologische Fragestellungen eine gängige Methode. Sie wurde auch schon in verschiedenen Studien zur Simulation historischer Sturmereignisse angewendet (Hart, 2011); (Michaelis & Lackmann, 2013). Für die Schweiz haben (Etienne, Goyette, & Kuszli, 2012) Simulationen für verschiedene Sturmereignisse von 1990 bis 2010

durchgeführt. Im vorliegenden Projekt werden die Simulationen mit dem Wettermodell WRF durchgeführt, das bereits erfolgreich für hochauflösende Simulationen in der Schweiz angewendet wurde (Dierer, Müller, Nygaard, Calpini, & Steiner, 2009); (Dierer, Oechslin, & Cattin, 2011). Da der Zeitraum seit 1871 nicht durchgehend mit 3 km Gitterweite verfeinert werden kann, werden die stärksten Winterstürme seit 1871 aus historischen Quellen identifiziert (Abschnitt 2.2) und die 20CR für diese mit dem Wettermodell WRF verfeinert (Abschnitt 2.4). Es werden nur Winterstürme simuliert, da die Gitterweite von 3 km Gewitterzellen ungenügend erfasst und Sommerstürme vergleichsweise geringere Gesamtschäden verursachen (siehe Abschnitt 2.1.1). Auf Grundlage der Modellergebnisse werden mit Hilfe von Extremwertstatistik flächendeckende Karten der Böenspitzen mit verschiedenen Wiederkehrperioden berechnet (Abschnitt 2.5).

Die Ergebnisse des Projekts sind in Kapitel 3 beschrieben. Als Erweiterung zu vorliegenden flächendeckenden Informationen werden hier zusätzlich zu den Böenspitzen auch die entsprechenden Unsicherheiten angegeben. Die Ergebnisse werden mit anderen Extremwindberechnungen für die Schweiz verglichen (Abschnitt 3.3). Sie werden als Karten und als Geodatensätze zur Verfügung gestellt und können nach Bedarf mit anderen Datensätzen verknüpft werden. Die Karten und Datensätze stellen eine Grundlage für Risikoabschätzungen von Schäden insbesondere an Gebäuden oder Waldgebieten dar.

2 Berechnung der Karten der Böenspitzen

2.1 Grundlagen

2.1.1 Berücksichtigung von Winterstürmen

Bei der Berechnung der Karten der Böenspitzen werden nur Winterstürme berücksichtigt. Bei Sommerstürmen handelt es sich häufig um Gewitterstürme, also Stürme, die in Zusammenhang mit Fallböen konvektiver Ereignisse stehen.

Einer der Hauptgründe für die Vernachlässigung von Gewitterstürmen in dieser Studie ist, dass die Identifikation der wichtigen Gewitterstürme schwierig ist. Aufgrund ihrer kurzen Dauer und der räumlichen Beschränkung werden sie auch in hochauflösenden Messnetzen oft nur lückenhaft erfasst. Berichte über historische Gewitterereignisse (d.h. vor der Einführung automatisierter Messnetze um 1980) liegen insbesondere aus bewohnten Gebieten vor und vor allem für kürzer zurückliegende Ereignisse. Auch in Reanalysedaten ist die Identifikation aufgrund der groben Auflösung der Daten schwierig. Es werden nur die stärksten Ereignisse erfasst und die räumliche Zuordnung ist ungenau.

Zusätzlich ist die Simulation von Gewittersystemen in Wettermodellen mit hohen Unsicherheiten verbunden und erfordert eine Anpassung und weitreichende Tests der Einstellungen des Modells. Die Fallböen während Gewittern beruhen auf anderen physikalischen Prozessen als Böen während Winterstürmen, was eine Anpassung der Böenparametrisierung erfordert. Diese Anpassungen und Evaluationen für die Berücksichtigung von Gewitterstürmen sind sehr aufwendig und überschreiten den Rahmen des vorliegenden Projekts.

Durch die Vernachlässigung der Sommerstürme wird auch ein Teil der Tornados vernachlässigt. Für die Schweiz kann man zwei Entstehungsprozesse für Tornados unterscheiden. Einerseits können Tornados im Sommer durch starke Konvektion entstehen, wenn sich mehrere Gewitterzellen zu einer Superzelle vereinigen. Andererseits können sie bei starken Weststürmen entstehen, welche vor allem im Winter auftreten. Die dokumentierten Beobachtungen von Tornados ab 1890 liegen vor allem für den Jurabogen und vom Genfer- bis zum Bodensee vor. In der Schweiz ist gemäss (Dotzek, 2003) und der Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen (ENSI, 2009) mit einer Häufigkeit von 2-3 Tornados pro Jahr zu rechnen.

Ein Vergleich der durch Sommer- bzw. Winterstürme verursachten Waldschäden zeigt, dass das Schadenspotenzial von einzelnen Winterstürmen für die Landwirtschaft sehr viel höher liegt als das von einzelnen Sommerstürmen (Abbildung 1), auch wenn die lokalen Auswirkungen von Sturmböen bei Sommerstürmen beispielsweise für die Landwirtschaft beträchtlich sein können. Betroffen sein können beispielsweise Reben oder Obstbäume, weshalb ein Einbezug der Sommerereignisse u.a. aus dieser Sicht wünschbar wäre. Schäden von Gewitterstürmen, insbesondere an Gebäuden oder an landwirtschaftlicher Infrastruktur und Anbauflächen,

sind jedoch häufig nicht nur auf Wind, sondern vor allem auch auf Hagelschlag zurückzuführen, so dass vor allem für weiter zurück liegende Zeiträume schwer zwischen Sturm- und Hagelauwirkungen unterschieden werden kann.

Insgesamt scheint es möglich, für eine Sturmkarte Gewitterstürme und auch Tornados zunächst zu vernachlässigen ohne bei den extremsten Windgeschwindigkeiten zu grosse Fehler zu verursachen. Die Annahme wird durch die gute Übereinstimmung der Sturmkarte mit Messungen, die Sommer- und Winterstürme enthalten, bestätigt (Abschnitt 3.3.1). Allerdings führen die fehlenden Sommerstürme möglicherweise zu einer Unterschätzung der Jährlichkeit tieferer Windgeschwindigkeiten (kleiner als 30 m/s).

2.1.2 Vorgehen

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick gegeben, wie die Karten der Böenspitzen mit verschiedenen Wiederkehrperioden berechnet werden. Die Datengrundlage und das Vorgehen werden in den Abschnitten 2.2 bis 2.5 im Detail beschrieben.

Das grundsätzliche Vorgehen ist das Folgende:

- Auswahl der stärksten Stürme von 1871 bis 2011
- Verfeinerung der 20CR mit dem Wettermodell WRF
- Extremwertstatistik zur Bestimmung der Böenspitzen mit verschiedenen Wiederkehrperioden
- Bestimmung der Unsicherheiten der Teilschritte und der Gesamtunsicherheit
- Berechnung des Staudrucks und Darstellung als Karten

Die 20CR (Abschnitt 2.3) werden mit dem hochauflösenden Wettermodell WRF (Weather Research and Forecast) auf eine Gitterweite von 3 km verfeinert, um Datensätze für die praktische Anwendung zu erhalten (Abschnitt 2.4). Die Verfeinerung mit dem Modell WRF ist rechenzeitintensiv und erlaubt daher nicht, den gesamten Zeitraum seit 1871 zu rechnen. Aus diesem Grund werden die wichtigsten Sturmereignisse im Zeitraum 1871 bis 2011 selektiert und diese mit höherer Auflösung gerechnet. Das vorliegende Projekt profitiert dabei von Vorarbeiten, die im Rahmen eines Projekts des Geographischen Instituts der Universität Bern geleistet wurden. Im Rahmen eines Projekts waren bereits etwa 60 Sturmereignisse simuliert worden.

Böen werden im Modell WRF nicht prognostisch berechnet, sondern werden parametrisiert. Verschiedene Böenparametrisierungen werden getestet und das Modellergebnis evaluiert (Abschnitte 2.4.3 und 2.4.4). Da auch mit 3 km Gitterweite dynamische Vorgänge in komplexer Topographie nicht ausreichend gut aufgelöst werden können, wird anhand einer Fallstudie untersucht, mit welchen Methoden eine weitere Verbesserung des Resultats erreicht werden kann (Abschnitt 2.4.5).

Zusätzlich wird für diese Fallstudie auch das Verhalten des verfeinerten Ensembles betrachtet (Abschnitt 2.4.6).

Basierend auf den Modellsimulationen mit dem Wettermodell WRF für 83 Sturmperioden im Zeitraum 1871 bis 2011 werden für jeden Gitterpunkt mit Hilfe von Extremwertstatistik die Böenspitzen für verschiedene Wiederkehrperioden bestimmt (Abschnitt 2.5). Es wird die Peak-over-Threshold-Methode angewendet, die sich gemäss (Ceppi, Della-Marta, & Appenzeller, 2008) zur Bestimmung von Wiederkehrperioden von Extremwind eignet.

Es wird jeweils die Unsicherheit für die Auswahl des Sturmkatalogs, die Simulation der Sturmperioden mit dem Modell WRF und die Extremwertstatistik bestimmt. Daraus wird die Gesamtunsicherheit der Böenspitzen mit verschiedenen Wiederkehrperioden berechnet (Abschnitt 3.2).

Die Statistiken der Windböen und die dazugehörigen Unsicherheiten werden in Form von Karten und als Geodatenätze zur Verfügung gestellt. Die Karten bieten grundlegende Informationen für eine breite Palette von Anwendungen.

2.2 Selektion der Sturmereignisse

Der in diesem Projekt verwendete Sturmkatalog wurde im Rahmen einer Dissertation am Oeschger Centre for Climate Change Research und am Geographischen Institut der Universität Bern erstellt. Die entsprechende Publikation mit detaillierten Angaben zu Quellen, Verfahren, Resultaten und Validierung sowie der Original-Sturmkatalog sind elektronisch verfügbar (Stucki et al., 2014). Im Folgenden wird die Selektion der Sturmereignisse deshalb nur zusammenfassend dargestellt.

2.2.1 Motivation für einen Schweizer Sturmkatalog

Zeitlich und räumlich hochaufgelöste Winddaten sind in der Schweiz für die Zeit ab etwa 1980 erhältlich (Inbetriebnahme des automatisierten Messnetzes ANETZ mit 63 Wetterstationen 1976 bis 1984, siehe Arbeitsbericht 140 der MeteoSchweiz (Bantle, Piaget, & Quiby, 1987)). Ebenfalls für die letzten Jahrzehnte stehen elektronische Datenbanken über Sturmschäden zur Verfügung.

In diesen Zeitraum fallen die extremen Stürme Vivian 1990 und Lothar 1999, welche denn auch die Wind- und Schadenstatistiken dominieren (Imhof, 2011). Für eine langfristige Einordnung solcher Stürme sind deshalb Informationen von früheren Stürmen unabdingbar. Solche historischen Sturmereignisse werden traditionell in einer Kombination aus verfügbaren Wetter- und Schadeninformationen untersucht. Das können Windbeobachtungen und –messungen sein oder historische Beschreibungen der Windstärke oder der Sturmschäden, zum Beispiel in Waldschadenberichten der Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen.

Es existieren einzelne Listen und Sammlungen von historischen Stürmen (z.B. (Holenstein, 1994), (Pfister, 1999)), allerdings sind die Angaben meist nicht im er-

forderlichem Umfang oder in der nötigen räumlichen und zeitlichen Genauigkeit vorhanden. Viele Anwendungen sind auf eine möglichst grosse und langjährige Auswahl an Starkwindereignissen angewiesen, um sinnvolle Stichprobengrößen zu erreichen.

Basierend auf einem umfassenden Katalog der Windstürme während der letzten 150 Jahre könnten alle relevanten Sturmereignisse in der Schweiz herunterskaliert werden, so dass hoch aufgelöste Wetterdaten über eine genügend grosse Anzahl Stürme zur Verfügung stehen.

Die Aufgabe besteht also darin, eine möglichst umfassende Sammlung der stärksten Sturmereignisse in der Schweiz über mindestens den von 20CR abgedeckten Zeitraum (1871 – 2011) zu erstellen.

Die Ereignisauswahl für die Sturmkarte soll aufgrund einer nachvollziehbaren Klassierung der Sturmereignisse erfolgen. Für statistische Untersuchungen und um eine gute räumliche Abdeckung zu gewährleisten, sind zwischen 50 und 100 Sturmereignisse nötig. Vorerst sollten keine saisonalen (Winter-, Sommerstürme) oder meteorologischen Einschränkungen (Westwind, Föhn, Bise, Gewitter) gemacht werden.

2.2.2 Datenquellen

Zur Einschätzung der Sturmstärke wurden in einem ersten Schritt historische Sturmschadendaten verwendet. Sie stammen von der Versicherungswirtschaft oder aus dokumentarischen Quellen.

- Versicherungsdaten sind meist kontinuierlich oder systematisch, d.h. täglich oder ereignisbasiert aufgelöst. Die Datenbanken sind elektronisch vorhanden oder aus Jahresberichten digitalisiert worden. Sie enthalten quantitative Informationen (z.B. Schadensummen oder Anzahl betroffene Gebäude) und deskriptive Metadaten (Ortsangaben, Sturm- oder Schadenart, usw.). Beispielsweise verfügt der Interkantonale Rückversicherungsverband über tagessgenau erfasste Gebäudeschäden ab 1991; die Munich Re NatCatSERVICE Datenbank enthält Sturmereignisse ab 1980.
- Schadenberichte und andere historische Dokumente enthalten sowohl quantitative als auch deskriptive Angaben über sporadisch auftretende Ereignisse. Die Informationen wurden zusammengetragen aus Studien zu historischen Wald- und Gebäudeschäden, ausserdem wurden Zeitungsarchive und bestehende Sturmlisten konsultiert; die Informationen wurden in einer Sturmdatenbank abgelegt.

Die Daten beziehen sich zum Teil auf verschiedene Raumeinheiten. Sie wurden deshalb möglichst regional normalisiert (z.B. historische Waldschäden wurden nach Regionen auf heutige Waldausdehnungen und Bestockungsdichten angepasst, siehe unten) und für die ganze Schweiz zusammengezählt. Zu jeder verfügbaren

Grösse (z.B. Gebäudeschäden, Sturmholzvolumen) aus jeder Datenquelle wurde so eine partielle Zeitreihe zusammengestellt, die aus täglichen, ereignisbasierten oder monatlichen Schadendaten bestehen kann. Zum Beispiel ergab sich aus der Sturmdatenbank eine ereignisbasierte Zeitreihe zu Sturmholzvolumen im Zeitraum 1860 bis 1967 (Abbildung 1).

2.2.3 Auswahlkriterien und –verfahren

Die Klassierung der Stürme aufgrund der Schadendaten und –berichte musste auf die unterschiedlichen Datentypen Rücksicht nehmen. Deskriptive Informationen (z.B. Gebrauch von sprachlichen Attributen zu Intensität und Ausdehnung eines Sturms) wurden mit einer Indizierung behandelt; auf kontinuierliche, quantitative Zeitreihen (z.B. mit Angaben in Währung oder Sturmholzvolumen) wurde Extremwertstatistik angewendet.

Deskriptive Angaben: In den historischen Quellen stehen sie oft neben quantitativen Angaben. Je weiter zurück die Sturmereignisse liegen, desto häufiger sind sie aber die einzige Aussage über die Sturmstärke. Typische Attribute sind etwa „hie und da kleinerer Schaden“, „beachtliche Sturmschäden“, oder „verheerender Sturm“. Solchen Informationen werden in der historischen Klimatologie Indizes zugeteilt, welche die Abweichung von einem normalen Zustand angeben. Hier wurde eine dreistufige Indizierung gewählt mit zwei Dimensionen, nämlich räumliche Ausdehnung und Intensität. Die Einteilung erfolgte mittels eines textlichen und visuellen Klassifikationsschemas, das auf bestehenden Arbeiten beruht. Schwache Stürme mit isolierten und kleinen Schäden wurden nicht berücksichtigt. Die drei verbleibenden Sturmklassen heissen „moderat“ (grössere räumliche Ausdehnung oder stärkere lokale Intensität), „schwer“ (grosses Schadengebiet oder lokal sehr intensiv) und „extrem“ (supra-nationale Ausdehnung mit katastrophalen Auswirkungen). Obige typische Attribute wären demzufolge Hinweise auf einen schwachen, einen moderaten und einen schweren Sturm. Dieses Verfahren wurde auf alle erhältlichen Angaben angewendet.

Quantitative Datenreihen über längere Zeit sind durch sozio-ökonomische Effekte wie Teuerung, Baukosten- oder Waldflächenzu(ab)nahme beeinflusst und müssen deshalb bestmöglich normalisiert werden, wobei vor allem auf heutige Exposition, weniger auf heutige Vulnerabilität umgerechnet werden kann. Für den Sturmkatalog wurden eher konservative Normalisierungsmethoden gewählt und höchstens zwei serielle Manipulationen auf die Datenreihen angewendet, um grobe Fehleinschätzungen zu vermeiden. Dadurch werden allerdings die Schäden, die ein vergangener Sturm heute anrichten würde, wohl systematisch unterschätzt. Weitere Unsicherheiten stammen aus der Umrechnung von alten Massen oder aus unterschiedlichen Schadensschätzungen unmittelbar nach einem Sturmereignis im Vergleich zu späteren Analysen.

Es ist verschiedentlich gezeigt worden, dass die General Pareto Distribution (GPD) auf verschiedene Variablen mit Windbezug angewendet werden kann, beispielsweise auf Windgeschwindigkeit, aber auch auf Schadendaten wie Sturmholzvolumen.

men (siehe Referenzen in (Stucki, et al., 2014) und Kapitel 2.5). Hier wurde die Methode Peak-Over-Threshold (POT) auf die normalisierten Zeitreihen angewendet, u.a. weil mehr Datenpunkte analysiert werden können als bei der Block-Maxima-Methode. Um Clustering zu vermeiden, wurde definiert, dass zwischen zwei Stürmen mindestens ein sturmfreier Tag liegen muss. So werden beispielsweise Vivian und Wiebke am 26. respektive 28. Februar 1990 als zwei Stürme betrachtet. Die berechneten Wiederkehrperioden wurden in drei Klassen unterteilt (Abbildung 1). Schwache Stürme mit einer Wiederkehrperiode unter einem Jahr wurden nicht berücksichtigt. „Moderate“ Stürme haben eine Wiederkehrperiode von 1 – 3 Jahren, „schwere“ 3 – 30 Jahre und „extreme“ Stürme mehr als 30 Jahre. Diese grobe Klassierung erlaubt einerseits den Vergleich mit deskriptiven Informationen, andererseits ist sie sehr fehlertolerant, da eine Sturmklasse jeweils ungefähr eine Größenordnung Schaden umfasst: Ein Sturm mit 20'000m³ Sturmholz ist moderat, mit 200'000m³ schwer und mit 2 Mio. m³ extrem.

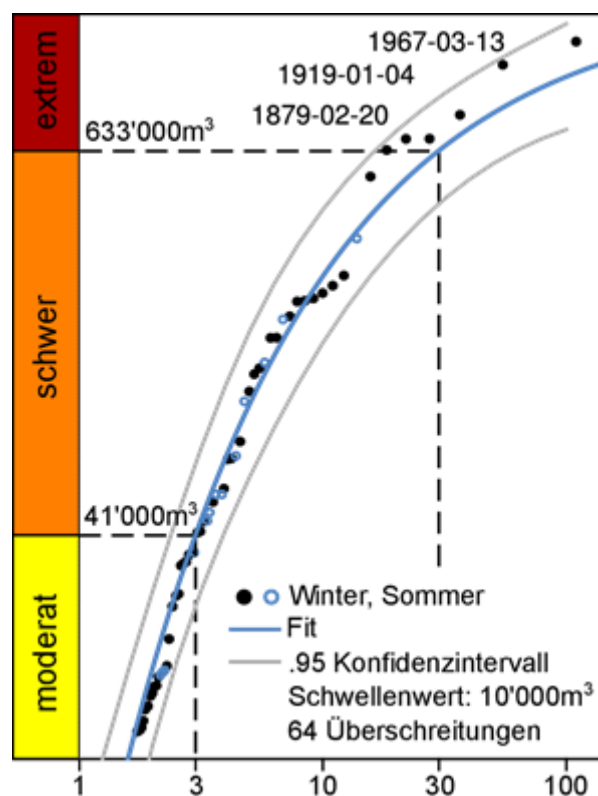


Abbildung 1: Wiederkehrperiode (x-Achse) und Wiederkehrwerte respektive Grenzen der Sturmklassen (y-Achse) für normalisierte Sturmholzdaten 1860 bis 1967. Die drei extremsten Sturmereignisse für diese partielle Reihe sind angegeben.

2.2.4 Schadenbasierter Sturmkatalog

Das Verfahren lieferte 12 Zeitreihen von klassierten Stürmen, die den Zeitraum 1859 bis 2012 überlappend abdecken. Eine Zeitreihe basiert auf deskriptiven Informationen, und 11 Reihen basieren auf quantitativen Daten.

Die 12 partiellen Reihen wurden schliesslich zu einer kombinierten Reihe zusammengefügt, indem gerundete, gewichtete Klassenmittel für jedes Sturmereignis berechnet wurden. Diese kombinierte Reihe heisst schadenbasierter Sturmkatalog. Er enthält 6 (2) extreme Winterstürme (Sommerstürme), 43 (16) schwere Winterstürme (Sommerstürme) und 70 (65) moderate Winterstürme (Sommerstürme). Der schadenbasierte Sturmkatalog ist publiziert als elektronische Beilage in (Stucki, et al., 2014).

2.2.5 Validierung

Für die Validierung des schadenbasierten Sturmkataloges wurden unabhängige Quellen verwendet. Beispielsweise lässt ein Vergleich mit Waldschadendaten ab 1960 auf eine robuste Klassifikation schliessen. Andere Vergleiche zeigen, dass bei manchen Sommerstürmen ein meist unbekannter Schadenanteil von Hagelschlag und anderen direkten oder indirekten Wettereinflüssen stammt. Deshalb beschränken sich die weiteren Untersuchungen auf die Monate Oktober bis März.

Für das Winterhalbjahr sind Vergleiche mit langjährigen Winddaten möglich. Zum einen sind dies maximale tägliche Stundenmittel der Windgeschwindigkeit von der Klimastation Zürich ab 1891 (Usbeck, Wohlgemuth, Pfister, Volz, & Dobbertin, 2010). Es ist die einzige verfügbare langjährige digitalisierte Reihe mit Windmaxima in der Schweiz. Zum anderen sind es zwei Datenreihen aus 20CR: je eine täglich aufgelöste Reihe aus dem mittlerem Maximalwind von 6 Gitterpunkten über der Schweiz und eine Reihe vom Gitterpunkt, der Zürich am nächsten liegt. Vergleiche zeigten eine gute Übereinstimmung bei den stärksten Winterstürmen (z.B. neun der zehn windstärksten Tage an der Klimastation Zürich und in den zwei 20CR-Datenreihen sind auch im schadenbasierten Katalog vorhanden, (Stucki, et al., 2014)) mit Ausnahme der Föhnstürme, die weder an der Klimastation Zürich noch in der globalen Reanalyse extrem starke Winde verursachen.

Der schadenbasierte Sturmkatalog enthält wohl alle schweren bis extremen Stürme im Winterhalbjahr, während einige moderate Stürme vielleicht verpasst worden sind. Es gibt Zeitabschnitte mit möglicherweise zu wenig gesammelten Stürmen (va. 1970er- und 1940er-Jahre), andere enthalten möglicherweise zu viele Stürme (ab etwa 1990 und um 1930) und die Unsicherheiten in der Sturmerfassung und -klassierung nehmen vor 1900 generell zu.

2.2.6 Windbasierter Sturmkatalog

Als Ergänzung zum schadenbasierten Sturmkatalog wurde ein windbasierter Sturmkatalog für das Winterhalbjahr erzeugt. Dies geschah im Hinblick auf Anwendungen wie dieses Sturmartenprojekt, die das Verpassen von stärkeren Sturmergebnissen möglichst vermeiden wollen. Der windbasierte Sturmkatalog beinhaltet die 30 Tage mit den höchsten Stundenmittelwerten der Windgeschwindigkeit der Klimastation Zürich sowie die 30 Tage mit den höchsten täglichen Windgeschwindigkeiten über der Schweiz im 20CR-Datensatz. Insgesamt wurden dem schaden-

basierten Katalog so 31 zusätzliche Wintersturmtage beigefügt. Der windbasierte Sturmkatalog ist ebenfalls Teil der elektronischen Beilage in Stucki et al. (2014).

2.2.7 Zusammenfassung der Sturmereignisse zu Sturmperioden

Der Gesamtkatalog aus schaden- und windbasierten Daten enthält ungefähr 150 Winterstürme. Für dieses Projekt wurden alle Ereignisse aus dem schadenbasierten Sturmkatalog ausgewählt, die in die von 20CR abgedeckte Zeitperiode fallen (1871 bis 2011) und deren ungerundetes Klassenmittel >1 ist. Ausserdem wurden alle Ereignisse aus dem windbasierten Sturmkatalog ausgewählt. Einige Sturmergebnisse liegen nur wenige Tage auseinander, so dass sie für die hochaufgelöste Simulation der Windfelder (Kapitel 2.4) in einer Sturmperiode zusammengefasst werden konnten. Ausserdem waren vereinzelt Sturmereignisse schon in einer Vorstudie aus einer Liste von Schiesser et al. (1997) analysiert worden; sie wurden ebenfalls berücksichtigt. Insgesamt wurden schliesslich 83 Sturmperioden (über durchschnittlich 82 Stunden) für die hochaufgelöste Simulation der Windfelder ausgewählt, d.h. es wurden für insgesamt 6968 Stunden Windfelder simuliert (Appendix 4.1).

2.2.8 Zusammenfassung: Unsicherheiten in der Sturmauswahl

Der Prozess bis zur definitiven Auswahl der Stürme enthielt mannigfaltige Entschiede. So wurden zum Beispiel Windböen-Messungen seit 1980 nicht in die Produktion des Sturmkataloges einbezogen, sondern sie dienten zur Validierung der simulierten Windgeschwindigkeiten (siehe Kapitel 2.4.4).

Eine quantitative Unsicherheitsangabe enthalten die Extremwertstatistiken in Form eines Konfidenzintervalls für die Regressionskurve (siehe auch Kapitel 2.5). Abbildung 1 zeigt, dass auch bei einer entsprechend unwahrscheinlicheren Kurve die gleichen relevanten Ereignisse ausgewählt worden wären.

Qualitativ und subjektiv einschätzbare Unsicherheiten betreffen sowohl Quellen als auch angewandte Methoden und die finale Zusammenstellung des Sturmkataloges. Wir können nicht ausschliessen, dass es bisher unentdeckte Informationsquellen gibt oder dass einzelne historische Sturmbeschreibungen inadäquat oder redundant sind. Allerdings behauptet z.B. (Bütikofer, 1987) alle grösseren Waldschäden der Schweiz seit 1860 erfasst zu haben. Methodische Unsicherheiten betreffen v.a. die Indexierung, die Normalisierung und die Zusammenstellung des schadenbasierten Sturmkatalogs (siehe oben sowie (Stucki, et al., 2014) für Details).

Zusammenfassend glauben wir, wohl alle schweren und extremen Winterstürme seit 1871 erfasst zu haben. Die Aussage beruht auf der Vielfalt an ausgewerteten Quellen, der fehlertoleranten Klasseneinteilung, der eingehenden Validierung und der Katalogergänzung aus windbasierten Daten. Es kann sein, dass wir einzelne moderate Stürme nicht erfasst haben.

Der Sturmkatalog basiert sowohl auf Schaden- als auch auf Winddaten, die fallweise verschiedene natürliche Prozesse indizieren könnten. Der Katalog ist deshalb für qualitative Analysen geeignet; bei weiterführenden quantitativen Analysen jedoch muss die potenziell nicht-identische Verteilung der Daten berücksichtigt werden.

2.3 20CR Daten

Die Twentieth Century Reanalysis (20CR) ist ein neuer Reanalyse-Datensatz, dessen atmosphärische Eingabedaten lediglich aus Luftdruckmessungen am Erdboden bestehen. Das bietet gegenüber bereits existierenden Reanalysedaten den Vorteil, dass Messdaten global weiter in die Vergangenheit zurück verfügbar sind. Die Version 2 von 20CR reicht zurück bis 1871 und deckt damit einen sehr viel längeren Zeitraum ab als die anderen Reanalysen, welche meist nur bis 1979 zurückreichen (die bisher längste Reanalyse, diejenige von NCEP/NCAR, reicht bis 1948 zurück). Zusätzlich liefert 20CR neben den Wetterdaten auch Informationen zur Unsicherheit.

Die 20CR enthält 4-dimensionale Wetterdaten und die dazugehörige Unsicherheit seit dem späten 19. Jahrhundert bis zum 21. Jahrhundert. Die Daten liegen global in 6-stündiger Auflösung von 1871 bis 2011, als Tages- und Monatsmittel mit einer horizontalen Gitterweite von 2° (etwa 220 km) auf 24 Druck-Levels zwischen 1000 hPa und 10 hPa vor.

20CR basiert auf dem Wettervorhersagemodell NCEP/CFS, welches monatliche Meeresoberflächentemperaturen und Meereisverteilungen als Randbedingungen verwendet. Rechnungen mit einem globalen Wettervorhersagemodell liefern den Grundzustand, aus dem mit einer Ensemble Kalman Filter Assimilationsmethode alle 6 Stunden der wahrscheinlichste Zustand der Atmosphäre und die Unsicherheit der Analyse geschätzt wird. Eine detaillierte Beschreibung der 20CR Daten und ihrer Berechnung findet sich in (Compo, et al., 2011).

2.4 Hochaufgelöste Simulation der Windfelder

2.4.1 Grundprinzip der Verfeinerung

Sturmschäden an Gebäuden und Ökosystemen werden durch bodennahe Winde und Böen verursacht. Der bodennahe Wind ist stark durch Topographie und Landnutzung beeinflusst und es können daher auf kurzen räumlichen Distanzen grosse Unterschiede entstehen. Um das bodennahe Windfeld in komplexer Orographie realitätsnah zu modellieren, wären Gitterweiten im Bereich von wenigen Dekametern notwendig.

Die Gitterweite der 20CR-Daten beträgt 2° , was über Mitteleuropa etwa 220 km entspricht. Mit dieser Gitterweite können Windfeldvariationen auf einer Skala von mehreren hundert Kilometern und somit die grossräumigen Windverhältnisse beschrieben werden. Somit besteht zwischen der Gitterweite der 20CR und der für

Schadensrechnungen benötigten Gitterweite eine grosse Diskrepanz. Diese Lücke kann durch dynamisches Downscaling überbrückt werden.

Die Verfeinerung mit einem Wettermodell bedeutet, dass ein hochauflösendes Wettermodell genutzt wird, um aus den grossskaligen Wetterbedingungen in den 20CR-Daten die lokalen Windbedingungen in Bodennähe zu berechnen. Das Wettermodell benutzt dreidimensionale Wetterinformationen aus der 20CR an den seitlichen und oberen Rändern und verknüpft sie mit detaillierten Informationen über Orographie und Landnutzung. Das Ergebnis sind Windfelder in Bodennähe, die mit einer Auflösung von 3 km beschrieben werden. Diese Auflösung ist zwar noch weit von der hohen Auflösung von wenigen Dekametern entfernt, die für viele Anwendungen gewünscht wäre, sehr komplexes Gelände und sehr lokale Einflüsse können daher nicht beschrieben werden. Aber die wichtigsten orographischen Effekte werden erfasst.

2.4.2 Modellbeschreibung

Die 20CR-Daten werden mit dem Wettervorhersagemodell Weather Research and Forecasting (WRF) verfeinert. WRF ist ein nicht-hydrostatisches, numerisches Modell für hochauflösende Wettervorhersagen (Skamarock, et al., 2008). Das Modell wird an verschiedenen amerikanischen Institutionen sowohl für Forschungszwecke als auch für operationelle Wettervorhersagen entwickelt.

Das Modell WRF wurde bereits in zahlreichen Studien für die Simulation von Windfeldern und Sturmereignissen angewendet (Hart, 2011); (Cheng, Liu, & Warner, 2009). Auch die Anwendung in der Schweiz und in Studien mit hoher Auflösung in komplexem Gelände ist erfolgreich gezeigt worden (Dierer, Müller, Nygaard, Calpini, & Steiner, 2009); (Dierer, Oechslin, & Cattin, 2011).

Im vorliegenden Projekt wurden die Rechnungen mit dem WRF ARW Modell, Version 3.3.1 durchgeführt. Für die Rechnungen wurden drei ineinander geschachtelte Modellgebiete mit Gitterweiten von 45 km, 9 km und 3 km verwendet. Die Modellgebiete haben jeweils eine Grösse von 4500 km x 4500 km, 909 km x 1134 km und 417 km x 270 km (Abbildung 2). Die vertikale Struktur der Atmosphäre wird durch 31 vertikale Schichten beschrieben.

Als Rand- und Anfangsbedingungen der Simulationen wurden 20CR-Daten auf das Gitter des jeweiligen WRF-Modellgebiets interpoliert. Die Modellrechnungen werden jeweils etwa 12 Stunden vor Beginn der Sturmperiode gestartet.

Die Turbulenzparametrisierung erfolgt mit dem Mellor Yamada Schema (Mellor & T. Yamada, 1982) und die bodennahe Grenzschicht wird entsprechend dem Monin-Obukov Schema (Monin & Obukhov, 1954) parametrisiert. Die Landoberfläche wird mit dem vereinheitlichten Noah Landoberflächenschema (Chen & J. Dudhia, 2001) berechnet. Konvektion wird in allen drei Modellgebieten mit dem Kain-Fritsch-Konvektionsschema parametrisiert (Kain, 2004). Die Mikrophysik wird mit dem Schema von (Lin, Farley, & Orville, 1983) und Strahlung mit dem RRTM Schema

(Mlawer, Taubman, Brown, Iacono, & Clough, 1997) für langwellige und dem Dudhia Schema (Dudhia, 1989) für kurzwellige Strahlung berechnet.

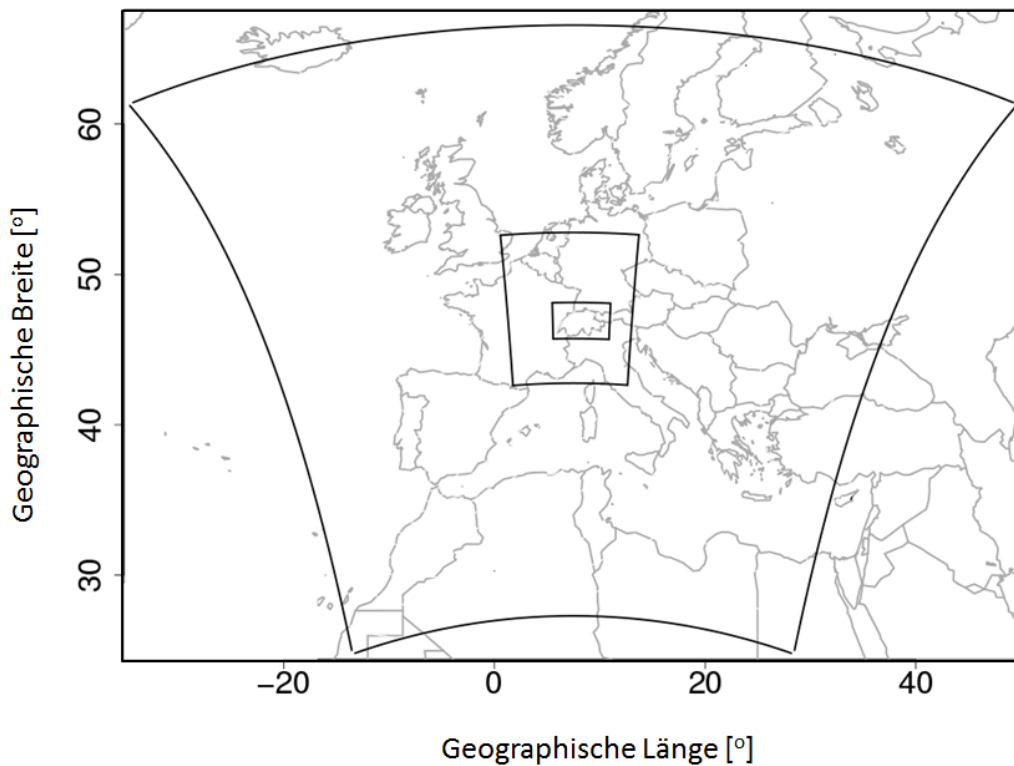


Abbildung 2: Die Ausdehnungen der drei ineinander geschachtelten Modellgebiete mit 45 km (äusserstes), 9 km (mittleres) und 3 km (innerster) Gitterweite sind als schwarze Rahmen gekennzeichnet.

2.4.3 Böenparametrisierungen

Als Böe wird eine kurz andauernde, hohe Windgeschwindigkeit bezeichnet. Die meteorologische Definition spricht von einer Böe, wenn der gemessene 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit innerhalb weniger Sekunden (zwischen 1 und 20 Sekunden) um mindestens 5 m/s überschritten wird. Böen sind mit turbulenten Wirbeln in der Atmosphäre verknüpft, die entweder durch thermische oder mechanische Prozesse angeregt sein können.

Da die Böen mit turbulenten Wirbeln verknüpft sind, die in numerischen Modellen nicht explizit simuliert werden können, werden Böen in numerischen Modellen parametrisiert. Es gibt hierfür verschiedene Formulierungen, von denen sich bisher keine als in allen Bereichen überlegen gezeigt hat. Vielmehr scheint die am besten geeignete Parametrisierung von der Einsatzregion abhängig zu sein (Born, Ludwig, & Pinto, 2012). Aus diesem Grund wurden im Vorfeld der Berechnung der Karte der Böenspitzen für die Schweiz verschiedene Formulierungen für Böenparametrisie-

rungen getestet, um die für die Schweiz geeignetste zu bestimmen (Abschnitt 2.4.4).

Die erste Böenparametrisierung (im Folgenden: WRF Parametrisierung) ist im Programm Unified Post Processor (UPP) des WRF Modells enthalten. Die Parametrisierung ist kaum dokumentiert (Sheridan, 2011) und die verwendete Formulierung wurde der Routine calgust im UPP Programm, Version 2.1 entnommen. Die Böe auf 10 m über Grund $ff_{x_{10}}$ wird berechnet als:

$$ff_{x_{10}} = ff_{10} + (ff_{PBL} - ff_{10}) * \frac{h_{PBL}}{2000}$$

ff_{10} ist der mittlere Wind auf 10 m Höhe über Grund, ff_{PBL} ist der Wind am Oberrand der planetaren Grenzschicht h_{PBL} . Dieser Ansatz beschreibt die Böengeschwindigkeit als Kombination aus bodennahem Wind und höheren Geschwindigkeiten, die durch turbulente Wirbel vom Oberrand der planetaren Grenzschicht in Bodennähe gemischt werden.

Die zweite Böenparametrisierung (im Folgenden: COSMO Parametrisierung) wird in (Schulz J. P., 2008) beschrieben. Mit dieser Parametrisierung wird die Böe auf 10 m $ff_{x_{10}}$ über Grund berechnet als:

$$ff_{x_{10}} = ff_{10} + (3 * 2.4 * u_*)$$

$ff_{x_{10}}$ wird berechnet als Kombination aus dem mittleren Wind auf 10 m über Grund ff_{10} und der Turbulenz im bodennahen Bereich, die durch den Parameter Schubspannungsgeschwindigkeit u_* repräsentiert wird. Die Schubspannungsgeschwindigkeit ist ein Mass für den turbulenten Transport. Im Gegensatz zur WRF Parametrisierung wird die Stärke der Böe hier durch die bodennahen Prozesse bestimmt und weniger durch den Wind in grösseren Höhen.

Die dritte Böenparametrisierung (im Folgenden: Brasseur Parametrisierung) berechnet $ff_{x_{10}}$ als maximale Windgeschwindigkeit in der Höhe, in der die Turbulenz hoch genug ist, um den Auftrieb zu überwinden und ein Luftpaket mit potenziell höherer Geschwindigkeit in den bodennahen Bereich zu transportieren. Die Formulierung wurde von (Brasseur, 2001) vorgeschlagen:

$$ff_{x_{10}} = \max \left[\sqrt{u_{z_p}^2 + v_{z_p}^2} \right]$$

Für die Höhen z_p des Luftpakets soll dabei gelten:

$$\frac{1}{z_p - z_{10m}} \int_{z_{10m}}^{z_p} TKE(z) dz \geq g \int_{z_{10m}}^{z_p} \frac{\Delta\theta_v}{\theta_v}(z) dz$$

Dabei ist z_p die Höhe des Luftpakets und z_{10m} die Höhe 10 m über Grund, TKE bezeichnet die turbulent-kinetische Energie und Θ_v ist die virtuelle, potentielle Temperatur und $\Delta\Theta_v$ ihre Abweichung, wenn das Luftpaket von der Oberfläche ausgelenkt wird.

Die Parametrisierung von (Brasseur, 2001) beschreibt, dass starke Böen am Boden dadurch entstehen könnten, dass ein turbulenter Wirbel ein Luftpaket aus der Höhe zur Oberfläche transportiert. Da der Wind mit der Höhe generell zunimmt, führt dieser Transport in der Regel zu einer höheren Windgeschwindigkeit am Boden. Für diesen Prozess spielt die turbulent-kinetische Energie eine entscheidende Rolle. Bei stabiler atmosphärischer Schichtung wirkt der Auftrieb dem Transport von Luftpaketen aus höheren Schichten entgegen, die turbulent-kinetische Energie muss gross genug sein um den Auftrieb zu überwinden. Bei instabiler Schichtung verstärkt der Auftrieb den Vertikaltransport und führt so zu erhöhter Turbulenz.

2.4.4 Evaluation von 10-m-Wind und -Böen

Datengrundlage

Die Evaluation von 10-m-Wind und -Böen wird anhand der SwissMetNet-Wind- und Böenmessungen des Bundesamts für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz durchgeführt.

Die Standardhöhe für die Messung bodennaher Windgeschwindigkeiten beträgt 10 m über Grund. Auf dieser Höhe über Grund werden auch die Böenkarten berechnet. Eine Prüfung der SwissMetNet-Stationen ergab, dass an zahlreichen Stationen die Windmessung nicht auf 10 m über Grund durchgeführt wird. Da sich die Windgeschwindigkeit, insbesondere im bodennahen Bereich, mit der Höhe über Grund stark ändert, wurden die SwissMetNet-Stationen, die nicht auf 10 m über Grund messen, von der Evaluation ausgeschlossen. Es wurde dabei ein Toleranzbereich zwischen 6m und 14 m über Grund zugelassen.

Nach der Auswahl der Stationen bleiben 63 SMN-Stationen, die für die Evaluation geeignet sind. Diese Stationen umfassen Berg-, Tal- und Flachlandstationen und sind in der gesamten Schweiz verteilt, so dass die Evaluationsergebnisse sowohl für verschiedene Regionen als auch für verschiedene Lagen von Stationen repräsentativ sind.

Daten für die Evaluation des 10-m-Winds liegen seit 1999 vor. Die SwissMetNet-Messungen der stündlichen Böenspitze auf 10 m über Grund wurden vom Geographischen Institut der Universität Bern zusätzlich für den Zeitraum 1980-1999 zur Verfügung gestellt. Zu Beginn der Messperiode existierten noch nicht alle der heutigen Stationen, so dass sich die räumliche Verteilung der SMN-Stationen im Laufe der Jahre ändert.

Evaluation 10-m-Wind

Der 10-m-Wind in den Modellsimulationen wird evaluiert, indem die stündlichen Werte des an den SMN-Stationen gemessenen mittleren 10-m-Winds mit dem simulierten 10-m-Wind am nächstgelegenen Gitterpunkt verglichen werden.

Die Evaluation basiert auf dem normierten root mean square error (RMSE) für die neun Sturmperioden auf der Liste, die zwischen 1999 und 2011 stattfanden. Dieser

wird berechnet, indem für jede Station der RMSE der stündlichen Werte für die Dauer einer Sturmperiode berechnet und dieser über alle Stationen gemittelt wird. Das Ergebnis wird geteilt durch die über alle Stationen gemittelte Geschwindigkeit des 10-m-Winds und ergibt einen relativen Fehler bezogen auf die mittlere Windgeschwindigkeit. Der normierte RMSE wird dann über alle Sturmperioden gemittelt.

Das Ergebnis der Evaluation wird qualitativ mit einer Evaluation der Windsimulation in den COSMO-2 Analysen vom 1. Juni 2007 bis 31. August 2009 verglichen (Dierer, et al., 2010). COSMO-2 ist das operationelle Vorhersagemodell des Bundesamts für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. Es handelt sich nicht um einen quantitativen Vergleich, da die Vergleichswerte nicht denselben Zeitraum abdecken und nicht für exakt dieselben SMN-Stationen berechnet wurden.

Tabelle 1: Mittlerer RMSE, mittlerer Wind und normierter RMSE der WRF-Ergebnisse für neun Sturmperioden im Zeitraum 1999 bis 2011 gemittelt über 63 SMN-Stationen und der COSMO-2-Ergebnisse für den Zeitraum 1. Juni 2007 bis 31. August 2009 gemittelt über alle SMN-Stationen.

	WRF-Simulation	COSMO-2 Analyse
Mittlerer RMSE	3.3 m/s	2.1 m/s
Mittlerer 10 m-Wind	4.4 m/s	2.8 m/s
Normierter RMSE	75%	76%

Der absolute RMSE des 10-m-Winds ist für die WRF-Simulationen deutlich höher als für die COSMO-2 Analysen. Dies liegt daran, dass die Evaluation für Sturmperioden durchgeführt wurde, während denen die Windgeschwindigkeit gegenüber einer durchschnittlichen Vergleichsperiode höher ist. Dies ist auch gut an der mittleren 10-m-Windgeschwindigkeit zu erkennen. Für den normierten RMSE ergeben sich mit 75% bzw. 76% sehr ähnliche Werte für das WRF- bzw. das COSMO-2-Ergebnis.

Der Vergleich zeigt, dass die mit WRF simulierte Windgeschwindigkeit auf 10 m über Grund die Qualität anderer qualitativ hochstehender Windsimulationen für die Schweiz hat. Damit stellt sie eine gute Grundlage für die Böenkarten dar.

Evaluation der drei Böenparametrisierungen

Drei verschiedene Parametrisierungen wurden für die Berechnung der Böen getestet (Abschnitt 2.4.3). Der Vergleich der Zeitreihen der Böengeschwindigkeit zeigt, dass der zeitliche Verlauf meist sehr ähnlich ist und eher ein Offset zwischen den Zeitreihen zu beobachten ist (nicht gezeigt). Anhand einer Evaluation mit SMN-Daten wird geprüft, welche der Parametrisierungen in der Schweiz die geringsten systematischen Abweichungen zeigt. Die Evaluation wird anhand der maximalen 10 m-Böen pro Sturmperiode durchgeführt, da diese Werte für die Berechnung der Böenspitzenkarten verwendet werden (Abbildung 3).

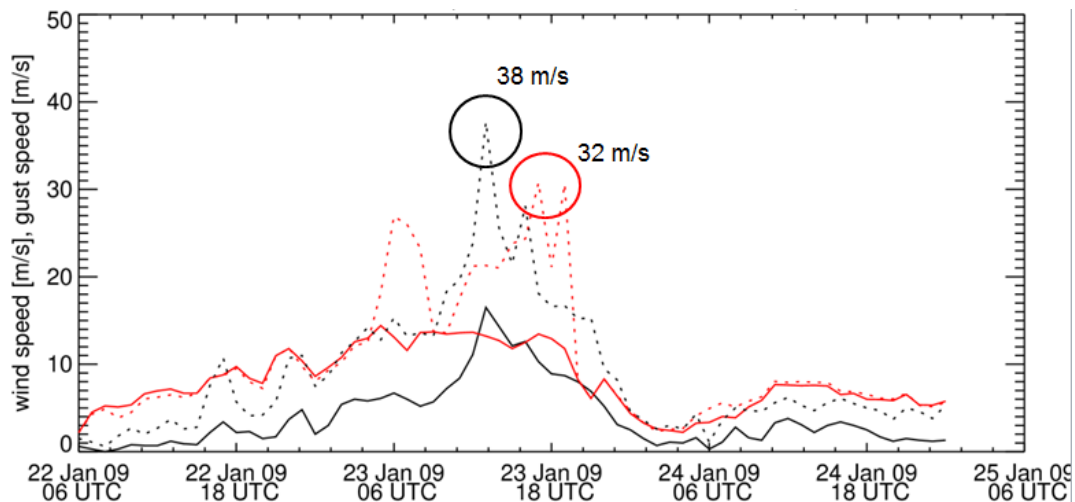


Abbildung 3: Zeitreihe der gemessenen (schwarz) und simulierten (rot) Wind- (durchgezogene Linie) und der Böengeschwindigkeit (gestrichelte Linie) während einer Sturmperiode im Januar 2009 an der Station La Brévine. In dem schwarzen bzw. roten Kreis ist jeweils die maximale gemessene bzw. simulierte Böenspitze während der Sturmperiode gekennzeichnet.

Es wurde für 24 Sturmperioden im Zeitraum zwischen 1980 und 2011 der Bias der maximalen Böenspitze für jede Station berechnet. Das Ergebnis wurde für alle Sturmperioden und Stationen gemittelt und zusätzlich für die Kategorien Flachland, Berg und Tal separat dargestellt (Tabelle 2). Zusätzlich wurden die gemessenen und simulierten maximalen Böenspitzen in Scatterplots dargestellt, um einen visuellen Eindruck von der Ergebnisqualität zu erhalten (Abbildung 4).

Der systematische Fehler zeigt, dass alle Böenparametrisierungen die Tendenz haben, die Böenspitzen zu unterschätzen. Insbesondere fällt der hohe negative systematische Fehler an den Bergstationen auf. Hier können die tatsächlich auftretenden sehr hohen Böen im Modell nicht reproduziert werden. Eine Ursache hierfür ist, dass sehr exponierte Standorte in der Modellorographie mit Gitterweiten von 3 km nicht dargestellt werden können. Im stärker bebauten und deshalb auf Sturmeinwirkungen sensibleren Flachland ist der systematische Fehler geringer.

Der systematische Fehler zeigt auch, dass die Abweichungen mit der WRF-Parametrisierung am geringsten und mit der Bresseur-Parametrisierung am grössten sind. Allerdings ist im Scatterplot zu erkennen, dass niedrige Böen mit der WRF-Parametrisierung deutlich über- und hohe Böen deutlich unterschätzt werden. Zusätzlich werden wenige hohen Böen simuliert. Die systematischen Fehler der COSMO-Parametrisierung liegen in einer ähnlichen Grössenordnung, aber es werden vermehrt auch hohe Böen simuliert. Die Bresseur-Parametrisierung zeigt eine generelle Unterschätzung, die zu einem im Vergleich hohen systematischen Fehler

führen. Aufgrund der Auswertung wurde beschlossen, die Berechnung der Böen-
karte mit der COSMO-Parametrisierung durchzuführen.

Tabelle 2: Systematischer Fehler (Bias) zwischen gemessener und simulierter
maximaler Böe je Sturmperiode gemittelt über 24 Sturmperioden im
Zeitraum 1980 bis 2011 und über alle SMN-Stationen, die Stationen im
Flachland, in den Bergen bzw. im Tal für die drei Böenparametrisierun-
gen WRF, COSMO und Brasseur.

	WRF Parametrisierung Bias [m/s]	COSMO Parametrisierung Bias [m/s]	Brasseur Parametrisierung Bias [m/s]
Alle Stationen	-0.8	-1.9	-3.5
Flachland	-0.7	-1.9	-2.4
Berg	-7.5	-7.7	-9.5
Tal	2.8	1.3	-1.6

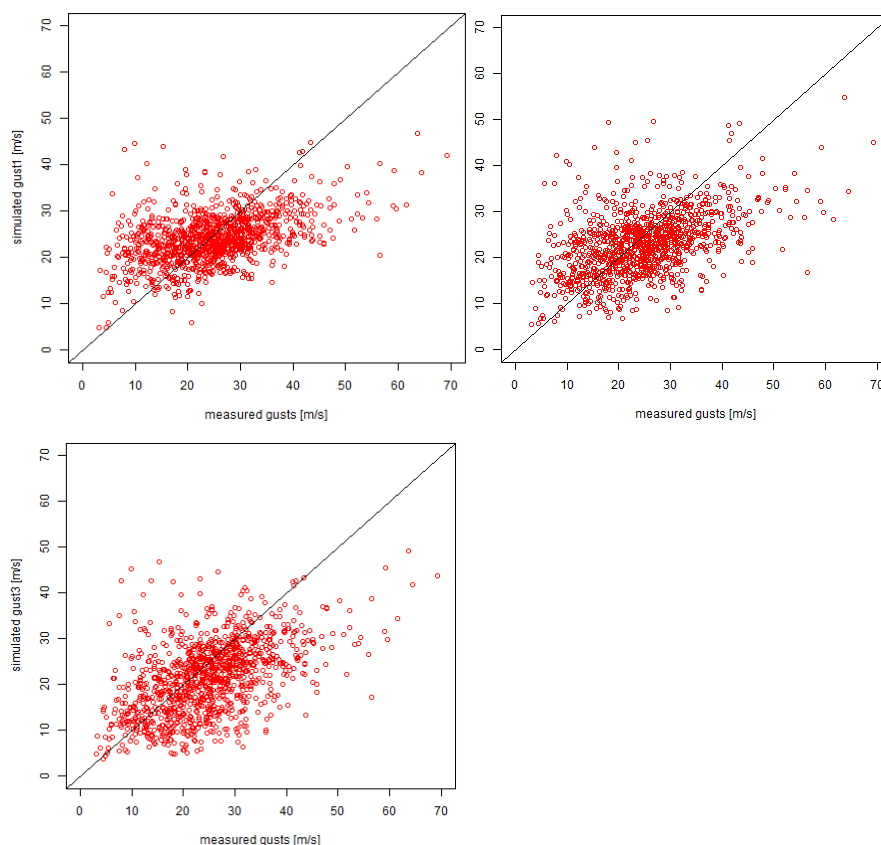


Abbildung 4: Scatterplots der gemessenen und simulierten maximalen Böen an
allen SMN-Stationen während 24 Sturmperioden im Zeitraum 1980
bis 2011. Die Böen wurden berechnet mit der WRF-Parametrisierung
(oben, links), der COSMO-Parametrisierung (oben, rechts) und der
Brasseur-Parametrisierung (unten, links).

Evaluation der 10 m-Böen

Die 10 m-Böen werden wie beim Vergleich der drei Böenparametrisierungen gezeigt auf der Grundlage der maximalen 10 m-Böe während einer Sturmperiode ausgewertet. Dieser Parameter wird gewählt, da dies der Wert ist, der in der Berechnung der Extremwertstatistik verwendet wird.

Die Evaluation der 10 m-Böe findet anhand von Scatterplots und den statistischen Kennzahlen systematischer Fehler (Bias), mittlerer absoluter Fehler (MAE) und RMSE statt. Die statistischen Grössen erlauben einen qualitativen Vergleich mit anderen Untersuchungen. Zusätzlich wurde aus den simulierten Böengeschwindigkeiten ein sogenannter Footprint der Stürme berechnet. Dieser zeigt die räumliche Verteilung der maximalen Böe während einer Sturmperiode. Die Messungen an den SMN-Stationen wurden äquivalent dargestellt, so dass ein Vergleich zwischen Simulation und Messung möglich ist (Abbildung 5).

Abbildung 5 zeigt beispielhaft den Vergleich des räumlichen Musters von simulierten und gemessenen maximalen Böen während des Orkans Joachim, der am 15. und 16. Dezember 2011 über die Schweiz zog. Der Jurabogen war vom Orkan besonders betroffen. Zwischen Tavannes und Tramelan entgleiste ein Zug durch einen auf die Gleise fallenden Baum. Die Karte der simulierten maximalen Böengeschwindigkeiten zeigt in diesem Gebiet hohe Werte im Bereich von 35 bis 40 m/s. Parallel dazu wehte im Berner Oberland ein starker Föhn, so dass auf dem Jungfrauoch Böenspitzen von etwa 50 m/s gemessen wurden. Der Footprint des Modells zeigt 40-45 m/s und erfasst die hohen Windgeschwindigkeiten somit recht gut. Der Vergleich von simulierten und gemessenen Böenspitzen zeigt, dass das Modell die räumliche Struktur der hohen Windgeschwindigkeiten gut erfasst, mit hohen Windgeschwindigkeiten auf dem Jurabogen und in den Alpen und deutlich geringeren Geschwindigkeiten im Mittelland.

Scatterplots für alle SMN-Stationen, aber auch jeweils getrennt für die Stationen im Flachland, in den Bergen und in den Tälern zeigen das grundsätzliche Verhalten des Modells für verschiedene Standorte mit verschiedenen Charakteristika (Abbildung 6). Im Scatterplot für alle SMN-Stationen ist zu erkennen, dass niedrige Böen über- und hohe Böen unterschätzt werden. Die Unterschätzung der hohen Böen tritt für alle Stationstypen, besonders ausgeprägt aber für die Bergstationen auf (unten links). Für die Bergstationen ist eine generelle Tendenz zur Unterschätzung der Böen zu beobachten. Die Ursache hierfür ist, dass die häufig sehr exponierte Messposition in der Orographie auf einem 3 km Gitter nicht erfasst werden kann. Am besten werden die Böen für die Stationsstandorte im Flachland simuliert (oben rechts), während für die Talstationen die stärkste Streuung auftritt (unten rechts). Diese starke Streuung ist wiederum teilweise dadurch beeinflusst, dass ein Tal in der Orographie mit Gitterweite 3 km nur ungenau dargestellt werden kann, zusätzlich ist die simulierte Böe stark von der Windrichtung abhängig. Daher können kleine Fehler in der Windrichtung bereits starke Auswirkungen auf die simulierte Böenspitze haben.

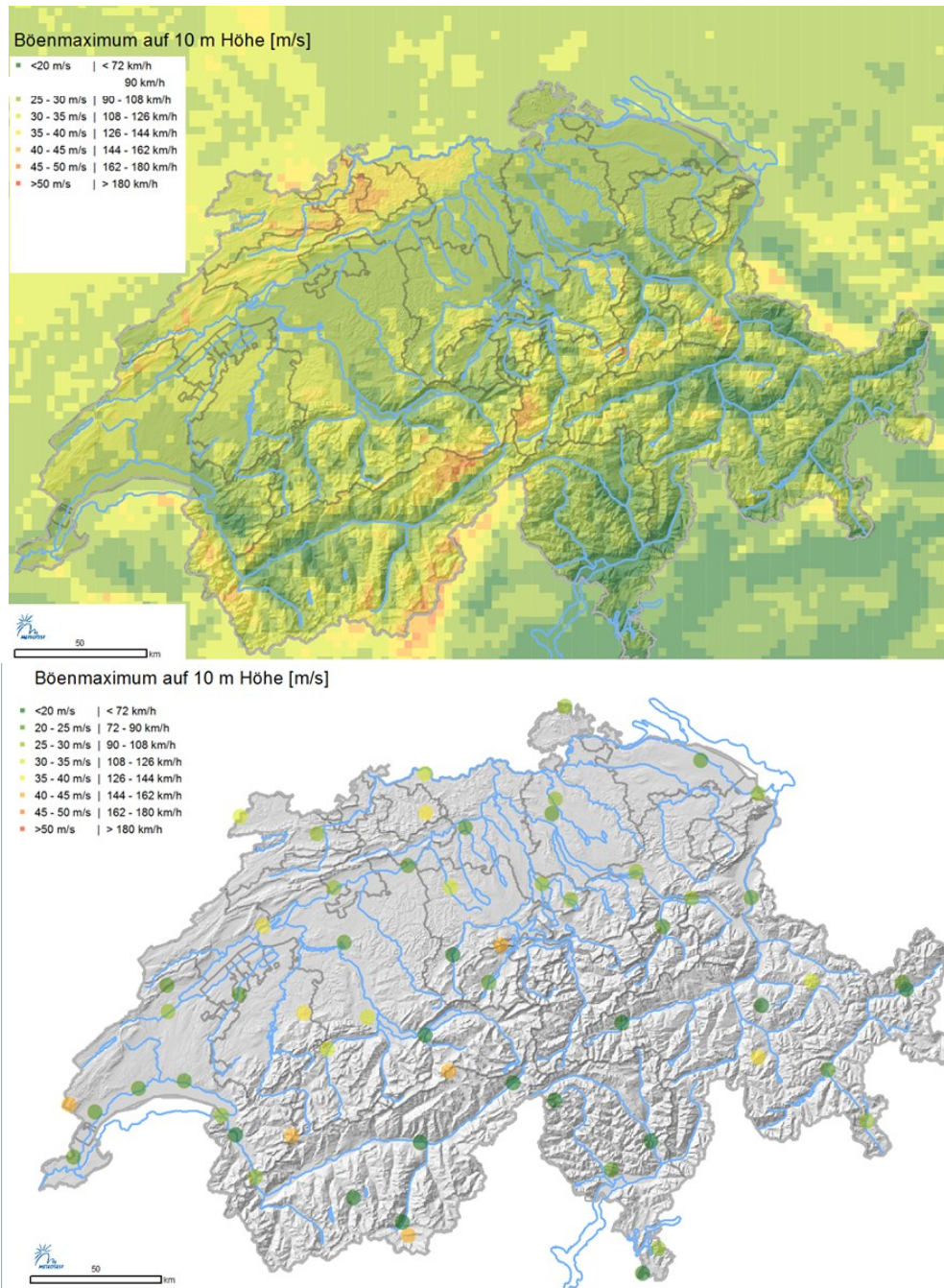


Abbildung 5: Simulierte (oben) und gemessene (unten) maximale Böengeschwindigkeiten während des Orkans Joachim am 15./16. Dezember 2011 in der Schweiz.

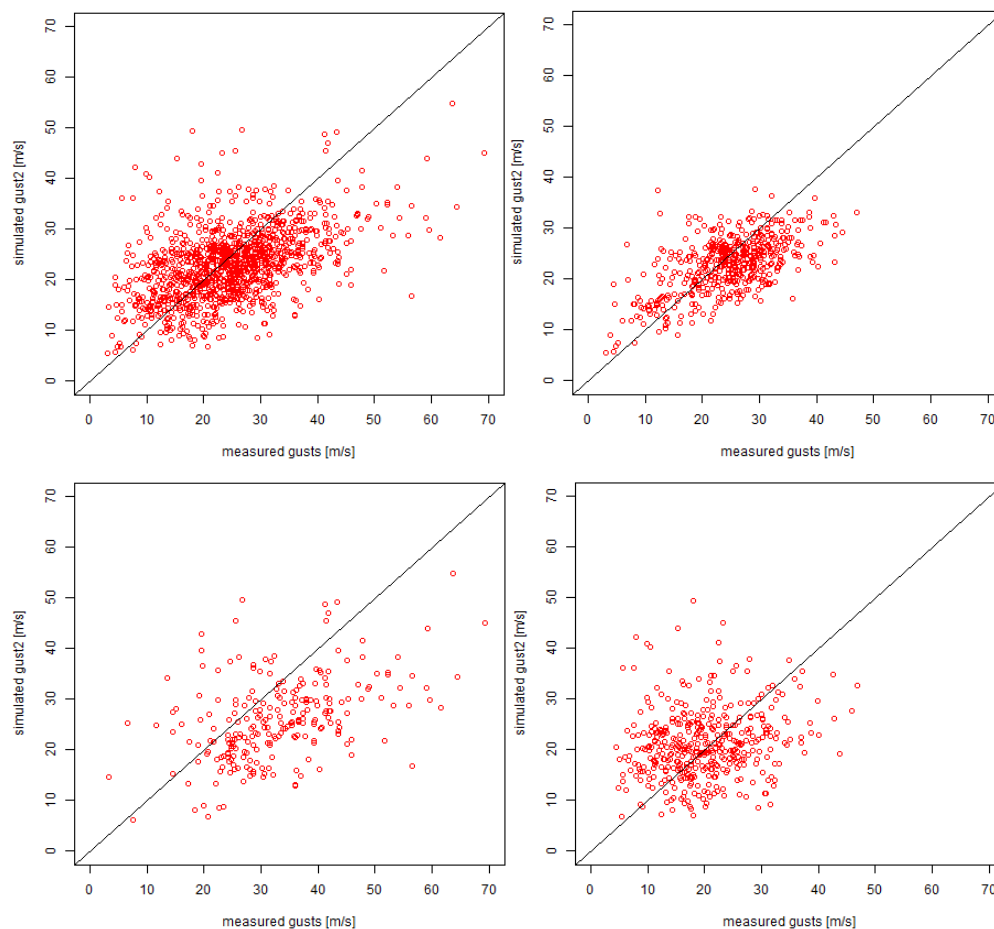


Abbildung 6: Scatterplots der gemessenen und simulierten maximalen Böen während 24 Sturmperioden im Zeitraum 1980 bis 2011 an allen SMN-Stationen (oben links), an den Stationen im Flachland (oben rechts), in den Bergen (unten links) und Tälern (unten rechts).

Für die 24 Sturmperioden zwischen 1980 und 2011 wurden der systematische Fehler (Bias), der mittlere absolute Fehler (MAE) und der RMSE berechnet. Es liegen wenige Studien vor, die einen direkten Vergleich mit den Ergebnissen dieser Studie erlauben. Häufig sind die Studien für Regionen mit deutlich weniger komplexem Gelände, mit einer völlig anderen Gitterweite durchgeführt worden oder die Ergebnisse sind in einer Form dargestellt, die sie schwer vergleichbar machen. Eine Studie für Spanien erlaubt einen qualitativen Vergleich (Calvo & Morales, 2009). Für den Zeitraum Januar bis April 2009 wurde an 340 Meteostationen die maximale stündliche Böe mit Ergebnissen des HIRLAM Modells mit 5 km Gitterweite und vier verschiedenen Böen-Parametrisierungen verglichen. Das Ergebnis ist in Abbildung 7 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bei Böengeschwindigkeiten bis zu 15 m/s der RMSE für die vier Böenparametrisierungen im Bereich von 4 m/s liegt und bei Böengeschwindigkeiten von 20 m/s im Bereich etwa 8 m/s, also bei einem relativen RMSE von etwa 40%.

Im vorliegenden Projekt liegen die Böengeschwindigkeiten für die Maximalwerte während einer Sturmperiode im Bereich von 25 m/s, der RMSE bei 8.7 m/s und der relative RMSE bei etwa 35%. Somit liegen die Abweichungen im Bereich derer in der Studie von (Calvo & Morales, 2009), was angesichts der sehr komplexen Orographie in der Schweiz ein gutes Ergebnis ist. (Haas & Pinto, 2012) zeigen Evaluationsergebnisse, für die im Bereich der Schweiz relative RMSE-Werte zwischen 10% und 50% zu erkennen sind. Dabei treten insbesondere im Bereich der Alpen hohe Werte bis zu 50% auf, aber auch im Mittelland beträgt der relative RMSE zwischen 10% und 30%.

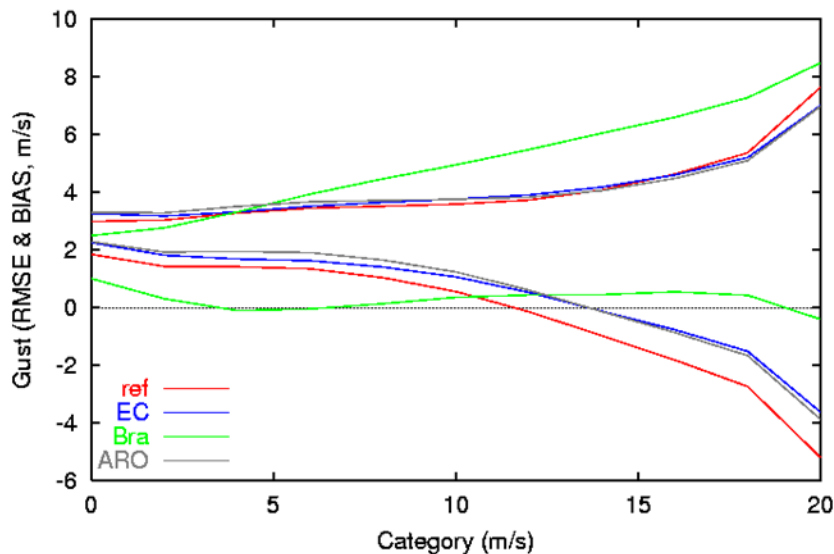


Abbildung 7: Systematischer Fehler (Bias, untere Linien) und RMSE (obere Linien) als Funktion der Böengeschwindigkeit für Böen-Simulationen mit vier verschiedenen Böenparametrisierungen (ref, EC, Bra und ARO). Quelle: (Calvo & Morales, 2009).

Tabelle 3: Systematischer Fehler (Bias), MAE und RMSE zwischen gemessener und simulierter Böe für die gesamte Zeitreihe und für die maximalen Böen je Sturmperiode gemittelt über 24 Sturmperioden im Zeitraum 1980 bis 2011 und alle SMN-Stationen.

	Gesamte Zeitreihe	Maximale Böen
Bias	-1.0 m/s	-1.9 m/s
MAE	5.0 m/s	7.0 m/s
RMSE	6.1 m/s	8.7 m/s

Fehlermass für die Unsicherheit der Verfeinerung

Die Karten der Böenspitzen mit verschiedenen Wiederkehrperioden werden berechnet, indem für jede Gitterzelle eine Extremwertstatistik mit den maximalen Böenspitzen aller Sturmperioden berechnet wird. Bei dieser Berechnung spielt die

Verteilung der Böenspitzen nicht aber ihre Zuordnung zum richtigen Event eine Rolle. Aus diesem Grund wurden für die Berechnung des Fehlers der hochauflösenden Simulation der Windfelder die gemessenen und simulierten maximalen Böenspitzen während der Sturmperioden der Grösse nach geordnet und von den sortierten Reihen der RMSE berechnet.

Die Berechnung wird wie im vorigen Abschnitt anhand von maximalen Böenspitzen während 24 Stürmen im Zeitraum 1980 bis 2011 durchgeführt. Messungen des SMN-Messnetzes liegen für 63 Stationen vor. Da die Ergebnisqualität des Wettermodells WRF von der Komplexität des Geländes mitbestimmt wird, wird der mittlere RMSE für vier verschiedene Kategorien berechnet:

- Flachland: relativ einfaches Gelände, z.B. Mittelland
- Hochalpen: sehr exponierte Lage, Orographiehöhe grösser 2000 m, Alpen
- Berge: exponierte Lage, Orographiehöhe bis 2000 m, z.B. Jura
- Täler: abgeschattete Lage

Der mittlere RMSE der nach Grösse sortierten maximalen Böen für die verschiedenen Kategorien ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: RMSE zwischen gemessener und simulierter nach Grösse sortierter maximaler Böe für 24 Sturmperioden im Zeitraum 1980 bis 2011 für SMN-Stationen im Flachland, auf Bergen höher als 2000 m (überwiegend Alpen), auf Bergen kleiner 2000 m (überwiegend Jura und Voralpen) und in Tälern.

Kategorie	RMSE der maximalen Böen [m/s]
Flachland	4.4
Hochalpen (h > 2000 m)	9.8
Berge (h < 2000 m)	7.5
Täler	5.9

2.4.5 Fallstudie zur weiteren Verfeinerung

Fallstudie: Orkan Lothar

Am 26. Dezember 1999 wurden weite Teile der Schweiz von einem der stärksten, je registrierten Stürme heimgesucht. Lothar ist der Name eines Orkantiefs, das sich über der Biskaya entwickelt hatte und am 26. Dezember 1999 in nordöstlicher Richtung über West- und Mitteleuropa hinweg zog (Abbildung 8). Der Orkan richtete vor allem in Nordfrankreich, der Schweiz, Süddeutschland und Österreich die höchsten Sturmschäden der jüngeren europäischen Geschichte an. Noch nie hatte in der Schweiz ein Naturereignis Schäden im Umfang von fast 1.8 Milliarden Franken ver-

ursacht. Am stärksten betroffen waren der Wald und die Gebäude. 14 Menschen fielen dem Sturm zum Opfer, mindestens 15 starben bei den nachträglichen Räumungsarbeiten.

In La Brévine erreichte die Böenspitze 157 km/h, in Delémont gar 170 km/h. Selbst auf dem 1600 m ü.M. liegenden Chasseral wurden mit 177 km/h nur unwesentlich höhere Windspitzen gemessen. In Brienz wurde die Windspitze mit einem ausserordentlich hohen Wert von 181 km/h erreicht. Das Muster der Windspitzen am 26.12.1999, etwa um 11 UTC ist in Abbildung 9 dargestellt.

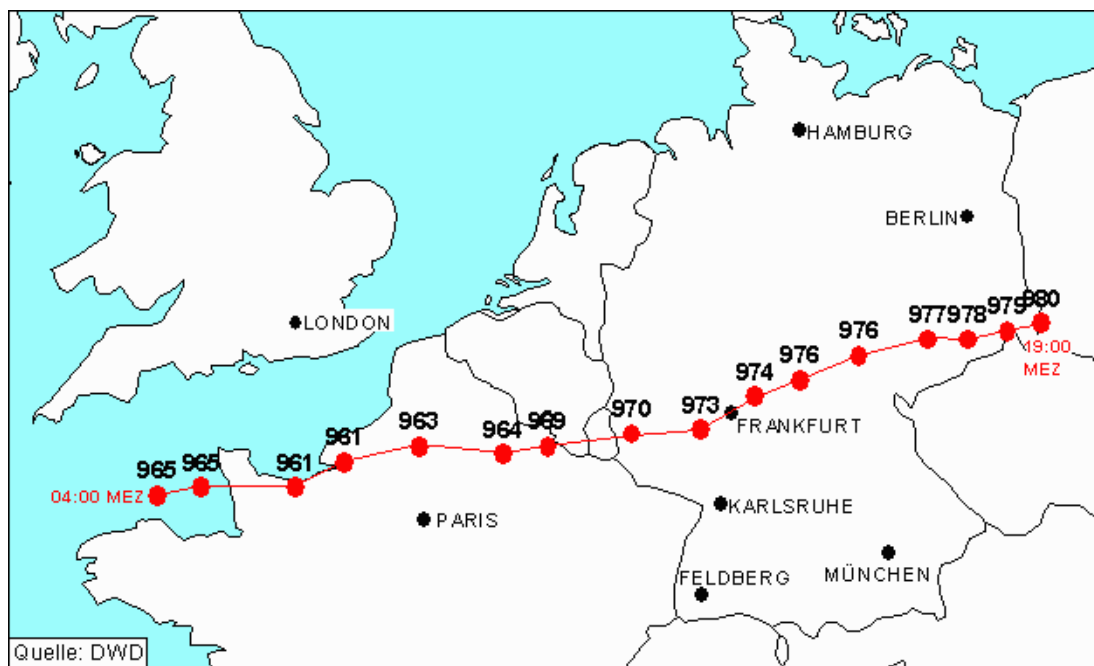


Abbildung 8: Zugbahn des Orkans Lothar am 26.12.1999 zwischen 4 und 19 MEZ. Die roten Punkte bezeichnen die Positionen des Tiefdruckzentrums, in schwarz ist der jeweilige Kerndruck angeschrieben. Quelle: DWD.

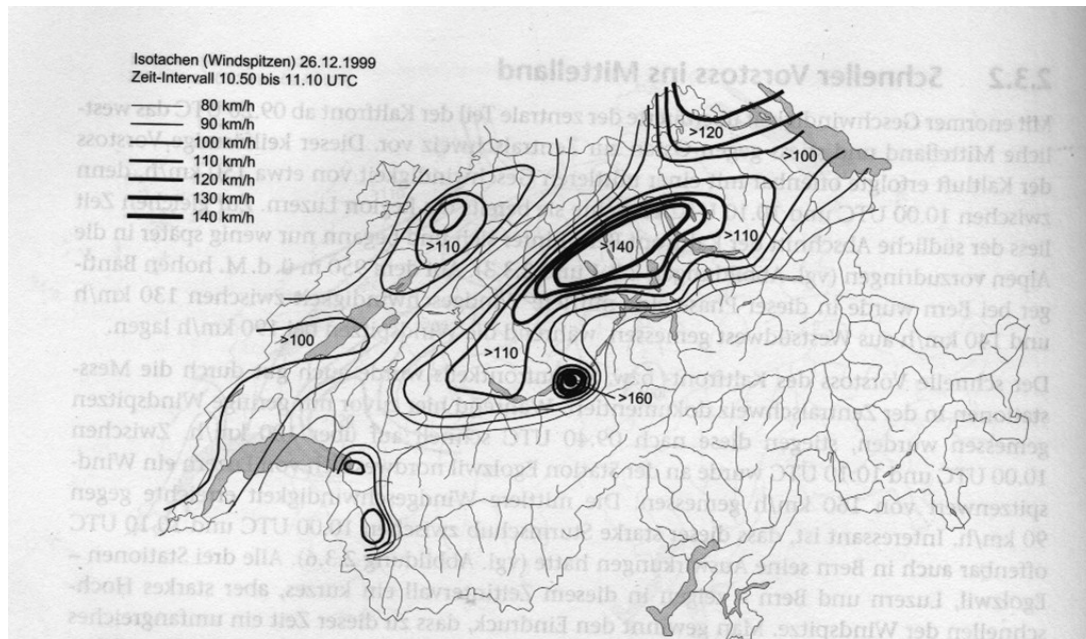


Abbildung 9: Isotachenkarte des Orkans Lothar in der Schweiz. Dargestellt ist das Muster der Böenspitzen am 26.12.1999 zwischen 10:50 und 11:10 UTC (Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, 2001).

Der Orkan Lothar wurde als Fallstudie ausgewählt, da das Ereignis noch nicht lange zurückliegt und gut untersucht wurde. Daher stehen ausreichend Informationen und Messungen zur Verfügung. Insbesondere sind auch die Schäden während des Orkans gut dokumentiert.

Räumliche Struktur des Sturms in der WRF-Simulation

Im Rahmen des vorliegenden Projekts war der Sturm Lothar als eines der schadenreichsten Sturmereignisse natürlich Teil der Sturmliste und wurde mit dem Wettermodell WRF für die Schweiz in hoher Auflösung (3 km Gitterweite) simuliert. Das räumliche Muster der simulierten maximalen Böenspitzen wird mit den gemessenen maximalen Böenspitzen verglichen.

Das Modell zeigt generell die Tendenz, die gemessenen Böenspitzen zu unterschätzen. Die simulierten maximalen Böenspitzen sind im Mittel etwa 20% tiefer als die gemessenen. Dennoch reproduziert das Modell die räumliche Verteilung der gemessenen maximalen Böenspitzen recht gut. Das Gebiet mit höheren Windgeschwindigkeiten im Bereich des Mittellands ist gut zu erkennen. In der Isotachenkarte sind hier Windgeschwindigkeiten im Bereich von etwa 39 m/s vermerkt. Das Modell simuliert etwa 30-35 m/s. Auch die Region mit höheren Windgeschwindigkeiten nordöstlich des Bieler Sees ist im Modell gut zu erkennen. Die in der Region gemessenen 40-45 m/s werden in der Region auch im Modell simuliert. In der Region von Brienz, wo Böenspitzen im Bereich von 45 m/s gemessenen wurden, werden vom Modell Geschwindigkeiten von 35-40 m/s simuliert. Insgesamt zeigt der

Vergleich, dass das Modell die regionale Verteilung der Windgeschwindigkeit gut erfasst hat.

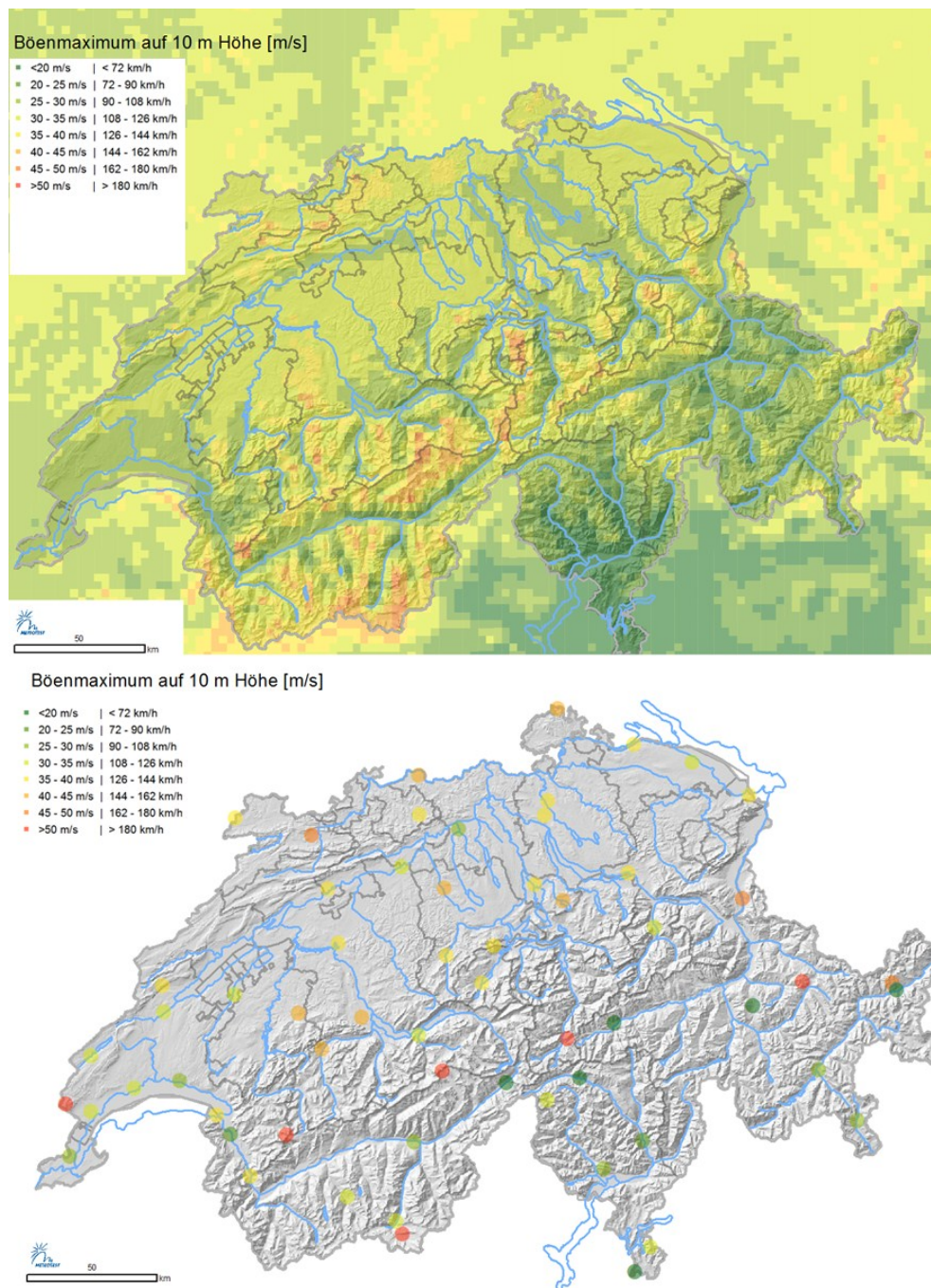


Abbildung 10: Simulierte (oben) und gemessene (unten) maximale Böengeschwindigkeiten während des Orkans Lothar am 26. Dezember 1999 in der Schweiz.

Weitere Verfeinerung des Modellergebnisses

Im Vergleich mit SwissMetNet-Messungen und im qualitativen Vergleich mit Versicherungsschäden während des Sturms zeigt sich, dass das Modell die räumliche Verteilung der hohen Windgeschwindigkeiten gut erfasst hat. Dennoch treten an manchen Positionen starke Abweichungen auf. Die Ursachen hierfür können vielfältig sein. Neben ungenauen Anfangs- und/oder Randbedingungen aus der 20CR-Reanalyse kann auch die im Modell nicht exakt dargestellte Orographie die Ursache für Abweichungen sein.

Bodennahe Windgeschwindigkeiten werden stark durch die umliegende Orographie bestimmt. Exponierte Positionen, z.B. auf einem Bergrücken, führen in der Regel zu höheren Windgeschwindigkeiten, während abgeschattete Positionen, z.B. in Tälern, in der Regel zu geringeren Windgeschwindigkeiten führen. Je genauer die Orographie im Modell erfasst ist, desto besser kann die Windgeschwindigkeit simuliert werden.

Abbildung 11 zeigt die Orographie eines alpinen Standorts in hoher Auflösung (Gitterweite 25 m) im Vergleich zur Auflösung, wie sie in heutigen Wettervorhersagemodell üblich ist (2 km). Die Strukturen der grösseren Berge und Täler sind im Wettervorhersagemodell erkennbar. Es ist aber deutlich zu sehen, dass die maximalen und minimalen Höhen nicht dargestellt werden und dass viele Details der Orographie nicht erfasst werden. Insbesondere Taleinschnitte werden vom Modell nicht erfasst und können daher bei der Modellsimulation nicht berücksichtigt werden. Die Auswirkung auf die Modellergebnisse hängt stark von der Komplexität der Orographie und der Lage des betrachteten Orts ab.

Es werden verschiedene Verfahren angewendet, um die Wirkung des nicht in der Simulation berücksichtigten Anteils der Orographie zu berücksichtigen. Die Methoden lassen sich grundsätzlich in Methoden der dynamischen und der statistischen Verfeinerung einteilen. Bei dynamischer Verfeinerung werden die Ergebnisse des gröber aufgelösten Modells als Anfangs- und Randwerte für ein feiner auflösendes Strömungsmodell verwendet. Bei der statistischen Verfeinerung wird ein statistischer Zusammenhang zwischen dem Ergebnis des Wettervorhersagemodells und einer Messung am Ort hergestellt und das Ergebnis des Wettervorhersagemodells entsprechend korrigiert. In der Regel können für Orte, an denen Messungen vorhanden sind, mit statistischen Verfahren bessere Ergebnisse erzielt werden. Dagegen kann die dynamische Verfeinerung auch für Regionen berechnet werden, für die noch keine Messungen vorliegen.

Für die Fallstudie des Orkans Lothar werden exemplarisch drei Verfeinerungsmethoden berechnet und getestet, um das Potenzial verbesserter Ergebnis durch Verfeinerung zu untersuchen:

- Dynamische Verfeinerung mit einer WRF-Simulation mit einer Gitterweite von 1 km
- Statistische Verfeinerung mit statistisch bestimmten Korrekturfaktoren

- Dynamische Verfeinerung unter Nutzung von computational fluid dynamics (CFD) Simulationen mit dem Modell WindSim

Die Ergebnisse der einzelnen Verfahren werden im Folgenden vorgestellt.

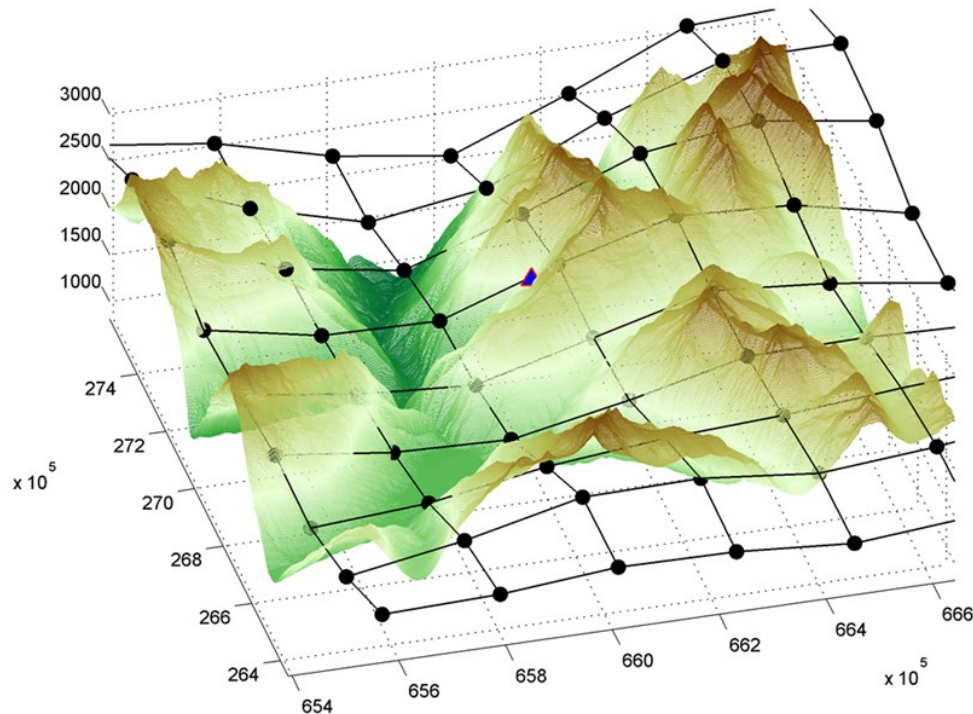


Abbildung 11: Orographie mit einer Gitterweite von 25 m (farbige Fläche) und Gitterzellen eines numerischen Wettervorhersagemodells mit einer Gitterweite von etwa 2 km (schwarze Punkte und Linien). Die vertikale Achse zeigt die Orographiehöhe. Quelle: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz⁴.

Dynamische Verfeinerung mit WRF

Dieses Verfahren zur Verfeinerung nutzt ebenfalls das WRF-Modell. Die Simulation wird äquivalent zur bisherigen Rechnung mit einer Gitterweite von 1 km berechnet. Aufgrund der deutlich erhöhten Rechenzeit bei kleineren Gitterweiten wird die Simulation für ein kleineres Modellgebiet durchgeführt. Neben der erhöhten Rechenzeit, ist es durch die höhere Auflösung auch schwieriger, numerische Stabilität zu erreichen. Daher sind oft kürzere Rechenzeitschritte notwendig.

In Abbildung 12 ist die Orographie mit 3 km und mit 1 km Gitterweite gezeigt. Es ist zu erkennen, dass mit 1 km Gitterweite die Details der Orographie weitaus genauer

⁴ Dierer, S.; Hug, Ch.; Remund, J.; Schaffner, B. und Stauch, V.: For- and Nowcasting der Stromproduktion von Windenergieanlagen in komplexem Gelände. Schlussbericht, Forschungsprojekt im Auftrag des BFE, 3. September 2009.

beschrieben werden. Es werden mehr Täler und Bergrücken dargestellt, so dass der Einfluss der Orographie auf die Strömung besser beschrieben werden kann.

In Tabelle 5 sind die Evaluationsergebnisse für die Stationen dargestellt, die sich innerhalb des kleineren Modellgebiets mit 1 km Gitterweite befinden. Der Vergleich des systematischen Fehlers der simulierten maximalen Böenspitze zeigt, dass für die Stationen im Flachland durch höhere Auflösung erwartungsgemäss keine starke Verbesserung erreicht wird. Dagegen ist für die exponierten Bergstationen eine sehr starke Reduktion der systematischen Unterschätzung von 14 m/s auf etwa 6 m/s zu erkennen. In der Simulation mit 3 km Gitterweite werden die maximalen Böen im Tal im Mittel um etwa 2.6 m/s unterschätzt. In der Simulation mit 1 km Gitterweite werden sie im Mittel um 2.7 m/s überschätzt. Damit kommt es zwar zu einer starken Änderung, nicht aber zu einer Verbesserung der simulierten Böen für die Talstationen. Die Ursache hierfür ist, dass viele der Talstationen z.B. Piotta oder Disentis in schmalen Tälern liegen, in denen Gitterweiten von 400-500 m notwendig wären, um sie in der Modellorographie als Tal zu beschreiben. Die Verfeinerung auf 1 km Gitterweite ist somit für diese Standorte noch nicht ausreichend.

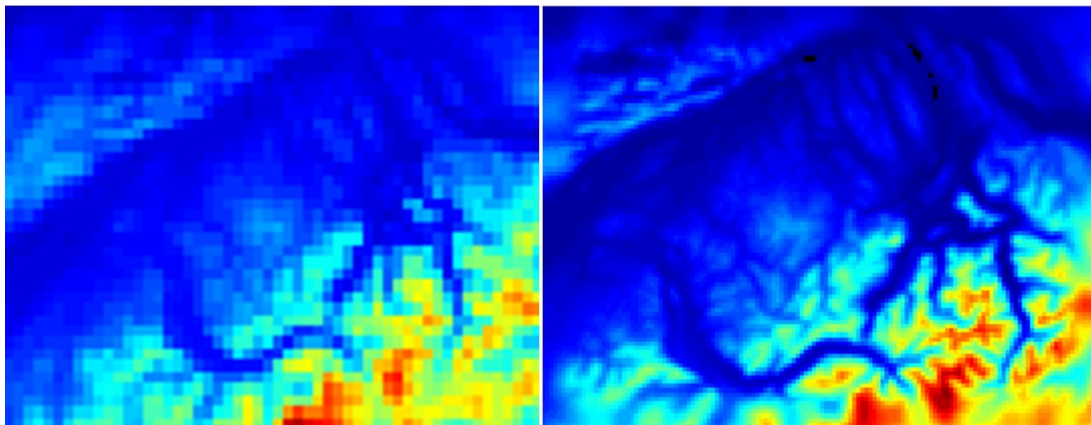


Abbildung 12: Orographie in der WRF Simulation mit einer Gitterweite von 3 km (links) und mit einer Gitterweite von 1 km (rechts) für das Modellgebiet der Simulation mit 1 km Gitterweite. Die Pixelgrösse entspricht der Grösse einer Gitterzelle. Das Modellgebiet erstreckt sich in West-Ost-Richtung etwa von Freiburg bis Zürich und in Nord-Süd-Richtung vom Jura bis zur Jungfrau Region.

Tabelle 5: Systematischer Fehler der simulierten maximalen Böenspitze während des Orkans Lothar für die WRF Simulation mit 3 km und 1 km Gitterweite für alle Stationen und für die Stationen im Flachland, Berg- und Talstationen. Es liegen 26 SMN-Stationen im Modellgebiet mit 1 km Gitterweite.

Gitterweite	Bias max. Böe alle Stationen [m/s]	Bias max. Böe Flachland [m/s]	Bias max. Böe Berg [m/s]	Bias max. Böe Tal [m/s]
3 km	-6.7	-6.6	-14.0	-2.6
1 km	-2.3	-5.2	-5.7	2.7

Statistische Verfeinerung: Korrektur des systematischen Fehlers

Das statistische Verfahren zur Verfeinerung der Ergebnisse ist sehr einfach. Es beruht auf dem systematischen Fehler bei der Evaluation der simulierten maximalen Böe während 24 Stürmen im Zeitraum von 1980 bis 2011. Aus den Abweichungen wurde der relative Bias für Stationen im Flachland, auf Bergen und in Tälern berechnet und daraus ein Korrekturfaktor bestimmt. Dieser wird auf die simulierten Werte für den Orkan Lothar angewendet.

Das Ergebnis der Evaluation der Ergebnisse für die maximale Böe während des Orkans Lothar ist in Tabelle 6 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Korrektur des systematischen Fehlers zu einer leichten Korrektur des mittleren absoluten Fehlers der maximalen Böe im Flachland und zu einer deutlichen Reduktion für die Bergstationen führt. Für die Talstationen dagegen ergibt sich keine Verbesserung.

Die Korrektur des systematischen Fehlers ist ein sehr einfaches statistisches Korrekturverfahren, mit dem bereits eine beträchtliche Fehlerreduktion erreicht wird. Ein differenzierteres Verfahren, das Regionen und verschiedene Wetterlagen berücksichtigt, würde vermutlich bessere Ergebnisse erzielen. Auch Kriging-Verfahren zur Interpolation der Fehler an verschiedenen Messstationen könnten ein vielversprechender Ansatz sein. Ein praktischer Test überschreitet allerdings den Rahmen dieses Projekts und würde zudem für eine bessere Datengrundlage für die Statistik erfordern.

Tabelle 6: Mittlerer absoluter Fehler der simulierten maximalen Böenspitze während des Orkans Lothar für die WRF Simulation mit und ohne statistische Korrektur für die Stationen im Flachland, Berg- und Talstationen.

	MAE max. Böe Flachland [m/s]	MAE max. Böe Berg [m/s]	MAE max. Böe Tal [m/s]
Ohne Korrektur	5.9	10.8	8.0
Mit Korrektur	4.3	6.4	8.0

Dynamische Verfeinerung mit WindSim

In diesem Verfahren zur Verfeinerung werden die Ergebnisse des Wettervorhersagemodells WRF durch Simulationen mit dem Computational Fluid Dynamics (CFD) Modell WindSim⁵ verfeinert. WindSim ist eine komplexe Software, die für die Bestimmung von Windressourcen und die Planung von Windparks entwickelt wurde. Das Modell wurde entwickelt, um mit sehr kleinen Gitterweiten (in der Regel 25 m) zu rechnen. Dadurch werden kleinskalige Effekte der Orographie und der Rauigkeit gut erfasst und können berücksichtigt werden. Allerdings berücksichtigt das Modell keine thermodynamischen Effekte und die Lösung ist stationär, also zeitlich unabhängig. Insofern eignet sich das Ergebnis einer WindSim-Simulation nicht für die unabhängige Simulation von Windböen, ist aber geeignet um nicht aufgelöste Orographie-Effekte zu korrigieren.

In einem ersten Schritt werden mit WindSim Windfelder berechnet. Hierfür wird das Modellgebiet aus 12 Richtungen (jeweils 30 Grad-Sektoren) angeströmt. Als Anfangs- und Randwerte werden horizontal homogene, logarithmische Windprofile vorgegeben. Diese logarithmischen Windprofile werden mit Standardwerten von 500 m Grenzschichthöhe und 10 m/s Windgeschwindigkeit oberhalb der Grenzschicht berechnet. Für die Simulationen wird eine neutrale Schichtung angenommen. Das Ergebnis der Strömungssimulation mit WindSim ist ein stationäres, dreidimensionales Windfeld. Aufgrund der idealisierten Anfangs- und Randbedingungen stellt das Ergebnis keine absolute Lösung dar. Für Windressourcenberechnungen wird eine gemessene Klimatologie zur Bestimmung der absoluten Windgeschwindigkeiten eingefügt. Das Ergebnis ist ein dreidimensionales Windfeld mit horizontalen Gitterweiten zwischen 25 m und 100 m. Zusätzliche Informationen sind die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit und Turbulenzwerte.

In Abbildung 13 ist die mit WindSim mit einer Gitterweite von 100 m simulierte mittlere Windgeschwindigkeit in der Region zwischen Bern und Jungfrauoch dargestellt. Der schwarze Kasten kennzeichnet die ungefähre Grösse einer 3 km-Gitterbox wie sie in der Simulation mit dem Wettervorhersagemodell WRF verwendet wurde. Es ist zu erkennen, dass die mittlere Geschwindigkeit innerhalb des Gebiets einer 3 km-Gitterbox zwischen etwa 2.5 m/s und über 6.5 m/s variiert. In der WRF-Simulation wird für diese Gitterbox nur ein Wert berechnet, die kleinräumigen Unterschiede werden nicht erfasst.

Die zusätzlichen Informationen über kleinräumige Variationen im Windgeschwindigkeitsfeld werden genutzt, um das Ergebnis der WRF-Simulation für eine lokale Position zu verfeinern. Hierfür wird das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit am gewünschten Standort und der mittleren Windgeschwindigkeit innerhalb einer 3 km x 3 km grossen Region um den Standort berechnet und der mit dem WRF Modell simulierte Wert mit diesem Faktor korrigiert. Die Windrichtungsabhängigkeit des Korrekturfaktors wurde für diesen Test nicht berücksichtigt.

⁵ <http://windsim.com/>

Die Ergebnisse dieser Korrektur sind für den Bergstandort Jungfrauoch und den Talstandort Ulrichen in Tabelle 7 dargestellt. Das Ergebnis zeigt, dass für dieses Beispiel die mit WindSim berechneten Korrekturfaktoren eine Verbesserung des Ergebnisses erzielen. Für das Jungfrauoch, dessen Ergebnis als Bergstandort im WRF Modell unterschätzt wird, erhöht der Faktor die Windgeschwindigkeit und reduziert den Fehler von 35% auf 20% Unterschätzung. Für den Talstandort Ulrichen wird die Überschätzung des WRF Modells von 46% auf 20% reduziert.

Die Methode wurde aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit von WindSim-Rechnungen nur stichprobenartig geprüft. Die bisherigen Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Methode das Potenzial hat, Abweichungen, die durch nicht aufgelöste Orographie entstehen, deutlich zu reduzieren. Eine systematische Prüfung ist notwendig. Es wurde bisher eine sehr einfache Methode angewendet. Die zusätzliche Berücksichtigung von Windrichtung und Turbulenz können die Qualität der Simulation vermutlich weiter verbessern.

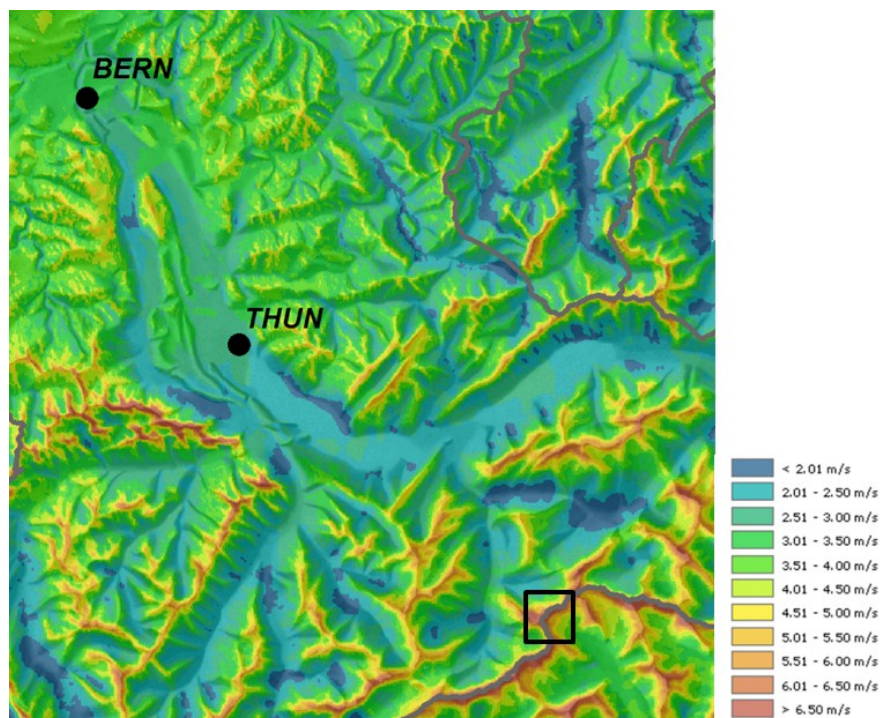


Abbildung 13: Mittlere Windgeschwindigkeit auf 50 m Höhe über Grund in der Region zwischen Bern und Jungfrauoch in einer Simulation mit dem Modell WindSim mit 100 m Gitterweite⁶. Die Lage von Bern und Thun ist gekennzeichnet. Der schwarze Kasten markiert, die ungefähre Grösse einer 3 km-Gitterbox wie in der WRF-Modellierung.

⁶ http://www.map.apps.be.ch/pub/synserver?project=a42pub_wind&userprofile=geo&language=de

Tabelle 7: Gemessenes und mit dem WRF Modell simuliertes Böenmaximum während Orkan Lothar an den Stationen Jungfrauoch und Ulrichen. Zusätzlich sind der aus WindSim berechnete Korrekturfaktor und das mit diesem Faktor korrigierte Böenmaximum angegeben.

Standort	Gemessenes Böenmaximum [m/s]	Simuliertes Böenmaximum [m/s]	Korrekturfaktor	Korrigiertes Böenmaximum [m/s]
Jungfrauoch	65	42	1.23	52
Ulrichen	15	22	0.82	18

2.4.6 Fallstudie zu Ensemble-Rechnungen

Die 20CR Daten liefern nicht nur Informationen zum wahrscheinlichsten Zustand der Atmosphäre, sondern auch Ergebnisse von 56 Mitgliedern einer Ensemble-Rechnung. Ensemblerechnungen dienen dazu, die Wahrscheinlichkeit einer Lösung abzuschätzen. Es handelt sich um Modellsimulationen, für die die Datenassimilation und damit die Anfangsbedingungen verändert werden und die Modellrechnung mit dieser Änderung wiederholt wird. Die Modellsimulation entwickelt sich somit jedes Mal etwas anders als die ursprüngliche Rechnung. Es werden 56 der leicht veränderten Simulationen wiederholt und die Grösse der Unterschiede zwischen den Ergebnissen gibt Aufschluss darüber, wie verlässlich die Modelllösung ist.

Für den Fall des Orkans Lothars wurden die 56 Mitglieder des 20CR-Ensembles mit dem Modell WRF auf 3 km Gitterweite über der Schweiz verfeinert und für alle Simulationen die Böen berechnet. Anhand dieser Simulationen wird untersucht, ob die Nutzung der Simulation aller Ensemble-Mitglieder zu einer Verbesserung des Ergebnisses oder einer besseren Einschätzung der Genauigkeit der Simulation beiträgt.

In Abbildung 14 sind gemessene und mit dem Modell WRF simulierte Böen für das Ensemble-Mittel und die einzelnen Ensemble-Mitglieder für drei SwissMetNet-Stationen dargestellt. Die drei Stationen Nyon, Pilatus und Disentis wurden jeweils exemplarisch für eine Station im Flachland, an exponierter Stelle in den Bergen und im Tal ausgewählt.

Für die Station Nyon ist zu erkennen, dass sich die Ergebnisse der Ensemble-Mitglieder nur wenig auffächern, sondern nahe beieinander und beim verfeinerten Ergebnis des Ensemble-Mittels bleiben. Der Unterschied zwischen Messung und simulierter Böe ist grösser als der Bereich, der durch die einzelnen Ensemble-Mitglieder aufgespannt wird. Für die Station Pilatus ist zu erkennen, dass sich Ergebnisse der einzelnen Ensemble-Mitglieder etwas stärker auffächern. Aber auch hier ist zu erkennen, dass die Differenz zwischen gemessener und simulierter Böe grösser ist, als es der Ergebnisbereich der Ensemble-Mitglieder beschreibt. Die stärksten Unterschiede für die mit den einzelnen Ensemble-Mitgliedern simulierten

Böen ergeben sich an der im Tal gelegenen Station Disentis. Dennoch würde die Berücksichtigung aller Ensemble-Mitglieder nicht zu einer signifikanten Verbesserung des Ergebnisses in Hinblick auf die maximale, simulierte Böe führen.

Die hier beschriebene Auffächerung der simulierten Böen wird in ähnlicher Weise für den mittleren Wind beobachtet. Es handelt sich somit um einen Effekt, der primär durch den simulierten mittleren Wind und nicht durch die Böenparametrisierung verursacht wird. Die geringste Auffächerung ist im Flachland zu beobachten, grössere Differenzen treten für Bergstationen auf und sehr deutliche Unterschiede sind für Talstationen zu erkennen. Das Verhalten ist vermutlich dadurch erklärbar, dass die Unterschiede zwischen den 20CR-Ensemble-Mitgliedern nicht sehr gross sind. Die Unterschiede gewinnen mit zunehmender Komplexität des Geländes an Bedeutung. So haben kleine Verschiebungen des Tiefdrucksystems im flachen Gelände weniger starke Auswirkungen, während für das Windfeld in Tälern häufig von entscheidender Bedeutung ist, aus welcher Windrichtung das Tal angeströmt wird. Somit können hier bereits kleine Änderung in der Anströmrichtung zu signifikanten Änderung im bodennahen Wind führen. Ob es zu einer Verstärkung oder Abschwächung des Winds kommt, muss zudem nicht mit der Windgeschwindigkeit in den antreibenden Daten korreliert sein, da z.B. die Windrichtung oft eine grosse Rolle spielt.

Für fast alle Standorte ist die Auffächerung der Ensemble-Mitglieder nicht so gross, dass sie eventuelle Unterschiede zwischen gemessener Böe und mit dem verfeinerten Ensemble-Mittel simulierten Böe abdeckt. Würde man statt des verfeinerten 20CR-Ensemble-Mittels das Ensemble-Mittel der verfeinerten Ensemble-Mitglieder-Simulationen benutzen würde sich der Unterschied zwischen gemessener und simulierter Böe im Schnitt leicht verbessern, es tritt aber in der Regel keine signifikante Verbesserung auf.

Die Simulation für die Station Disentis ist dafür ein gutes Beispiel. Würde man das Ensemble-Mittel der verfeinerten Simulationen nutzen, wäre man näher an der gemessenen Böe von etwa 10 m/s und die maximale simulierte Böe läge bei etwa 20 m/s statt bei knapp 30 m/s. Dennoch überschätzt die Simulation die gemessene maximale Böe von 10 m/s immer noch signifikant. Dies ist vermutlich dadurch zu erklären, dass mit 3 km Gitterweite weiter systematische Abweichungen existieren, die durch ungenügend aufgelöste Orographie zustande kommen. Diese Abweichungen sind grösser als die Unsicherheit, die z.B. durch die genaue Position des Tiefdruckgebiets zustande kommt.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die verfeinerten Simulationen für die einzelnen Ensemble-Mitglieder die grösste Auffächerung für Talstationen und auch für Bergstationen zeigen. Die Verwendung des Mittels der verfeinerten Simulationen würde gegenüber des verfeinerten 20CR-Ensemble-Mittels zu einer leichten Verbesserung der Ergebnisse führen. An fast allen Stationen ist der systematische Fehler, der vermutlich durch nicht aufgelöste Orographie entsteht, grösser als die Unsicherheit durch die 20CR-Randbedingungen. Die grössere Auffächerung der Resultate für Tal und auch Bergstationen ist ein Hinweis darauf, dass besonders in

komplexer Orographie leichte Variationen der 20CR-Anfangs- und Randbedingungen deutliche Auswirkungen auf die bodennahen Windverhältnisse haben.

Es ist schwierig zu beurteilen, inwiefern die Ergebnisse der Fallstudie Lothar auf andere Sturmereignisse übertragbar sind. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um zu bestimmen, welchen zusätzlichen Nutzen die Verwendung der einzelnen Ensemble-Mitglieder bringen kann.

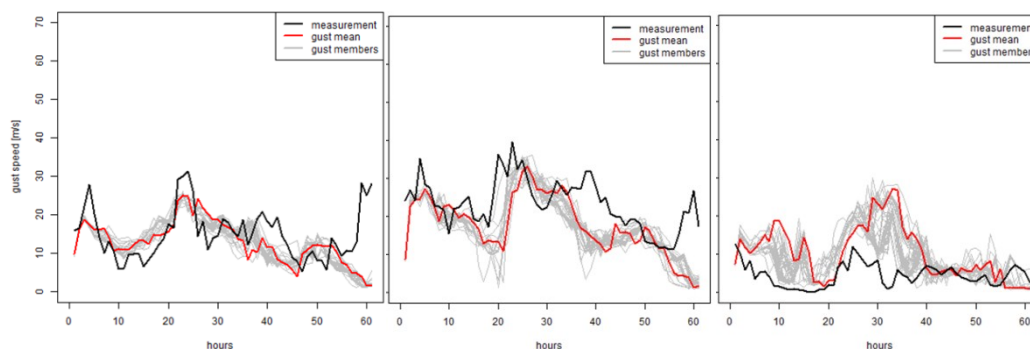


Abbildung 14: Zeitreihe der gemessenen Böe (schwarz) und der Böe im mit WRF verfeinerten Ensemble-Mittel (rot) sowie in den Simulationen der einzelnen Ensemble-Mitglieder (grau) an den SwissMetNet-Stationen Nyon (links, Flachland), Pilatus (Mitte, Berg) und Disentis (rechts, Tal) für den Zeitraum 25. Dezember 1999, 12 UTC bis 28. Dezember 1999, 00 UTC.

2.5 Extremwertstatistik

Für die Anwendung der Extremwertstatistik standen zwei gängige Methoden zur Auswahl. Die Blockmax Methode und die Peak-over-Threshold-Methode (POT).

- **Blockmax:** Hier wird eine Zeitreihe in zeitlich gleich lange Blöcke aufgeteilt. Durch die Maxima der jeweiligen Blöcke wird eine Generalisierte Extremwertverteilung (GEV) angepasst, womit die Wiederkehrperioden berechnet werden können.
- **POT:** Hier werden die Werte, die einen bestimmten Schwellwert überschreiten durch eine Generalized Pareto Verteilung (GPD) beschrieben, womit die Wiederkehrperioden berechnet werden können. Die einflussenden Werte müssen dabei unabhängig voneinander sein.

Da aus dem betrachteten Zeitraum von 20CR einzelne Sturmperioden ausgewählt wurden (Kapitel 2.2), was einer Selektion von Ereignissen über einem Schwellwert entspricht, wurde die POT Methode gewählt. Ein Beispiel einer Generalized Pareto Verteilung (GPD) ist in Abbildung 15 gegeben. Sie ist unterhalb des Schwellwertes 0 und oberhalb beschreibt sie einen exponentiellen Abfall. Die Exponentialfunktion ist ein Spezialfall der GPD mit Threshold und Formparameter gleich 0.

Die extremwertstatistischen Berechnungen wurden mit der Software R⁷ und dem "gevXgpd" Paket⁸ durchgeführt.

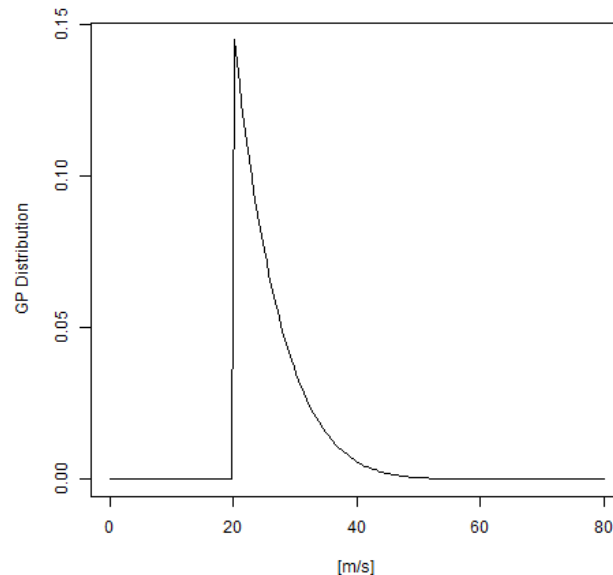


Abbildung 15: Beispiel einer Generalized Pareto Distribution mit Threshold 20 m/s.

2.5.1 Angewendete Methodik

Je Sturmperiode (Kapitel 2.2 und 2.4) wurde jeweils die höchste Böenspitze pro Gitterpunkt gewählt, um unabhängige Ereignisse zu erhalten. Dies ergibt pro Gitterpunkt und Sturmepisode einen Böenspitzenwert. Anschliessend wird für jeden Gitterpunkt einzeln eine Extremwertstatistik gerechnet, um die Böenspitzen für die vorgegebenen Wiederkehrperioden zu berechnen.

Fegt ein Sturm über die Schweiz, so gibt es immer auch Regionen, wo der Sturm nicht aktiv ist und nur tiefe Windgeschwindigkeiten auftreten. Das hat zur Folge, dass im Datenvektor der Böenmaximas für einen spezifischen Gitterpunkt, der aus den simulierten Stürmen entnommen wurde, auch tiefe Werte vorkommen, welche nicht in die Extremwertstatistik einfließen sollten. Zusätzlich fehlen aber kleinere und mittlere Stürme, sowie die Sommerstürme, welche nicht im Katalog erfasst wurden. Somit ergibt sich oft nicht einer Verteilung, wie man sie aus Zeitreihen gewohnt ist. Dies ist schematisch in Abbildung 16 anhand der Stationen Fahy und Bern/Zollikofen dargestellt. Die Histogramme der beobachteten Zeitreihen in dieser Abbildung haben ihr Maximum im Bereich von ungefähr 15 m/s, dasjenige der simulierten Böenspitzen bei 22 bis 25 m/s. Die offensichtlich nicht repräsentativ verteilten tieferen Werte dürfen deshalb nicht in die Extremwertstatistik einfließen. Die

⁷ The R Project for Statistical Computing (<http://www.r-project.org/>)

⁸ Aus Vorlesung "Analysis of Climate and Weather Data", IAC ETH Zürich (<http://www.iac.ethz.ch/>)

Verteilung der grössten simulierten Windgeschwindigkeiten ist hingegen besser vergleichbar mit der Verteilung der beobachteten Werte, so dass ein Schwellenwert für die POT Methode am Maximum der simulierten Verteilung als sinnvoll erachtet wurde. Dieses Verfahren erlaubt zudem, die Schwellenwerte für alle Gitterpunkte in gleicher objektiver Art zu setzen.

Das Fehlen von Sommerstürmen und einigen mittelstarken Stürmen, die nicht im Katalog erfasst wurden, weil sie relativ geringe Schäden verursacht haben, hat zur Folge, dass die Böenspitzenwerte der kleinen Wiederkehrperioden unterschätzt werden. Weil die stärksten Stürme der letzten 150 Jahre im Katalog enthalten sind, werden die höheren Wiederkehrperioden gut geschätzt. Auf die Güte und Unsicherheit der angewendeten Methodik wird detaillierter in Kapitel 3.2 eingegangen.

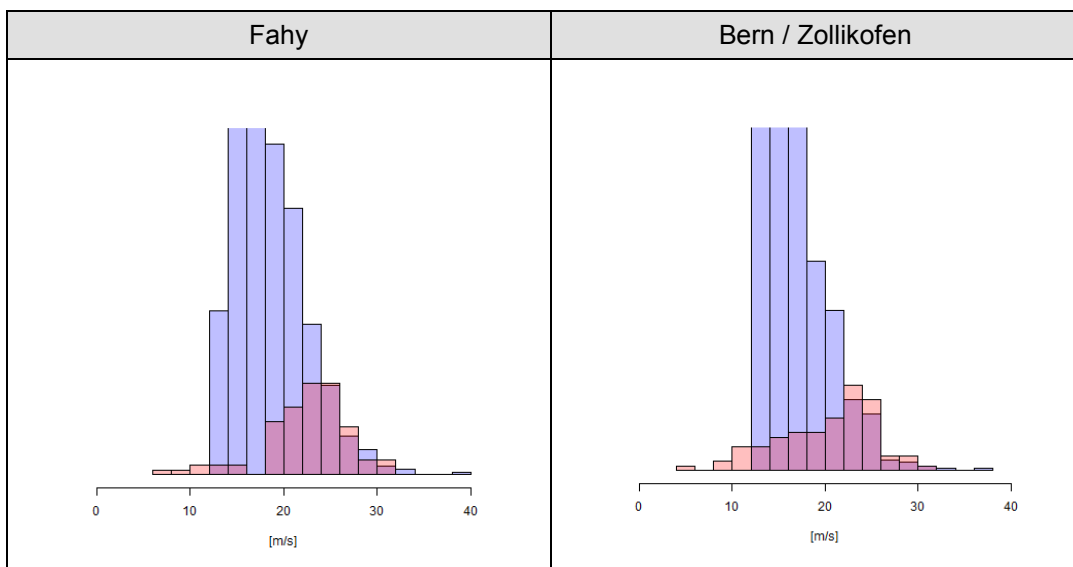


Abbildung 16: Schematisches Beispiel eines Histogramms der Böenspitzen einer Zeitreihe (1981-2014) der Messstationen Fahy und Bern/Zollikofen, wobei nur die Daten oberhalb des 97% Quantils dargestellt sind (blau) und der Böenmaxima für die entsprechenden Koordinaten aus den simulierten Sturmereignissen aus dem Sturmkatalog (orange-rot). Ersichtlich ist, dass bei den tiefen und mittleren Geschwindigkeiten Daten fehlen, die Form der Verteilungen im oberen Bereich aber einigermassen gut übereinstimmen.

2.5.2 Unsicherheit

Die Unsicherheiten werden in der Extremwertstatistik mit Konfidenzintervallen angegeben. Es gibt verschiedene Methoden diese zu bestimmen. Das verwendete Paket bietet dazu drei Optionen an. Die „asymptotic maximum likelihood“ (mle) oder Delta Methode, „likelihood profile“ (lprof) und „parametric resampling“ (sim), wobei letztere nicht weiter untersucht wurde. Die Schätzung der Konfidenzintervalle mit mle führt zu symmetrischen, mit lprof zu asymmetrischen Intervallen. Die obere Konfidenzgrenze für die Wiederkehrperioden ist dabei weiter von der besten Schätzung entfernt als die untere. Es hat sich gezeigt, dass sich die Konfidenzgrenzen für beide Methoden bis zu einer Wiederkehrperiode von etwa 50 Jahren sehr ähnlich verhalten (siehe Abbildung 17), danach ist die Tendenz bei der lprof Methode vorhanden, dass sich die obere Grenze mehr öffnet und meistens zu sehr grossen oberen Grenzen ansteigt. Auf der anderen Seite besteht die Gefahr bei der mle Methode, dass die untere Konfidenzgrenze bei grösseren Wiederkehrperioden absinkt, was aber nicht auftrat. Auch aus Gründen der Zuverlässigkeit der notwendigen automatisierten Berechnung für alle Gitterpunkte (90 x 138 Punkte) wurde die mle Methode gewählt.

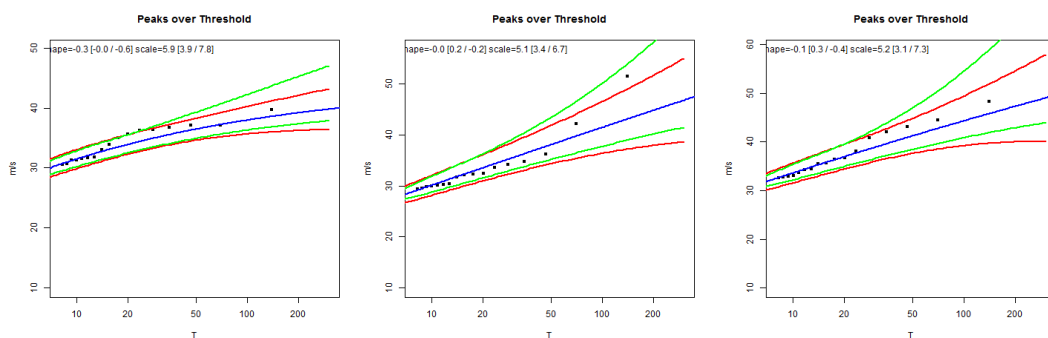


Abbildung 17: Beispiel der Konfidenzintervalle mit der mle (rot) und der lprof (grün) Methode für drei verschiedene Gitterpunkte in der Schweiz. In blau ist der best fit dargestellt. Die Abszisse zeigt die Wiederkehrperioden der Sturmereignisse.

2.5.3 Robustheit

Die Robustheit der Extremwertstatistik bezüglich des der Auswahl der Sturmepisoden wurde untersucht, indem jeweils der Wert einer Sturmepisode herausgenommen wurde und die Extremwertstatistik neu gerechnet wurde. Abbildung 18 zeigt dazu drei Beispiele. Die blaue Kurve ist dabei die Kurve auf der Basis aller Punkte. Die grünen Kurven sind diejenigen mit Ausschluss einer Sturmperiode. Alle liegen dabei eng beieinander und somit robust.

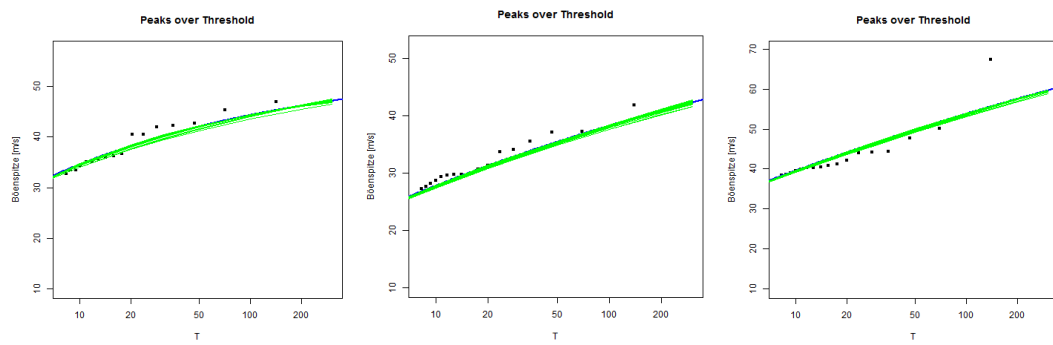


Abbildung 18: Beispiel des Robustheitstests. Es wurde jeweils die Extremwertstatistik mit allen Werten (blaue Kurve) und mit Eliminierung eines Wertes (grüne Kurven) durchgeführt, was zu einem ähnlichen Resultat führte.

3 Karten der Böenspitzen für die Schweiz

3.1 Karten der Böenspitzen und Staudrucke für verschiedene Wiederkehrperioden

Die Karten der Böenspitzen für die Wiederkehrperioden 30, 50, 100 und 300 Jahre sind in Abbildung 19 bis Abbildung 22 dargestellt.

Die räumliche Verteilung der Böen in der Schweiz ist für die verschiedenen Wiederkehrperioden ähnlich und wird stark durch die Orographie bestimmt. Im Jura und in den Alpen treten höhere Böenspitzen auf. Diese ergeben sich durch höhere Windgeschwindigkeiten in exponierten Lagen und durch höhere Böenfaktoren - das bedeutet das Verhältnis zwischen mittlerer Windgeschwindigkeit und gemessener Böe - in exponierten Lagen (Augustsson, 2004).

Im Mittelland und in den Alpentälern sind die Böenspitzen dagegen geringer. In den Föhntälern nördlich der Alpen (z.B. Aaretal, Reusstal oder Linthtal) sind deutlich erhöhte Böenspitzen mit 50-jährlicher Wiederkehrperiode von 35 m/s bis 45 m/s zu erkennen. Dies zeigt, dass das Phänomen Föhn grundsätzlich erfasst wird und in den erwarteten Regionen zu erhöhten Böenspitzen führt.

Auf der Grundlage der Böenspitze wird unter Berücksichtigung der klimatologisch mittleren Luftdichte ρ und der Böenspitze v der Staudruck p berechnet:

$$p = \frac{\rho}{2} * v^2$$

Die klimatologisch mittlere Luftdichte wird für die Schweiz aufgrund einer empirischen Formel bestimmt (Bundesamt für Energie, 1999). Der Staudruck ist der dynamische Druck, der von der Strömung, wie z.B. von der Atmosphäre erzeugt wird. Er ist im Bauwesen von Wichtigkeit, da sich daraus die zusätzliche Windlast berechnet, die auf eine Struktur wirkt.

Die Karten des Staudrucks für die Wiederkehrperioden 30, 50, 100 und 300 Jahre sind in Abbildung 23 bis Abbildung 26 dargestellt. Da die Geschwindigkeit der Böenspitzen in die Berechnung des Staudrucks im Quadrat eingeht, verstärken sich die regionalen Unterschiede gegenüber der Karte der Böenspitzen. Für die 50-jährliche Wiederkehrperiode treten Staudruckwerte etwa zwischen 0.2 kN/m² im Mittelland und 2 kN/m² auf den Alpengipfeln auf.

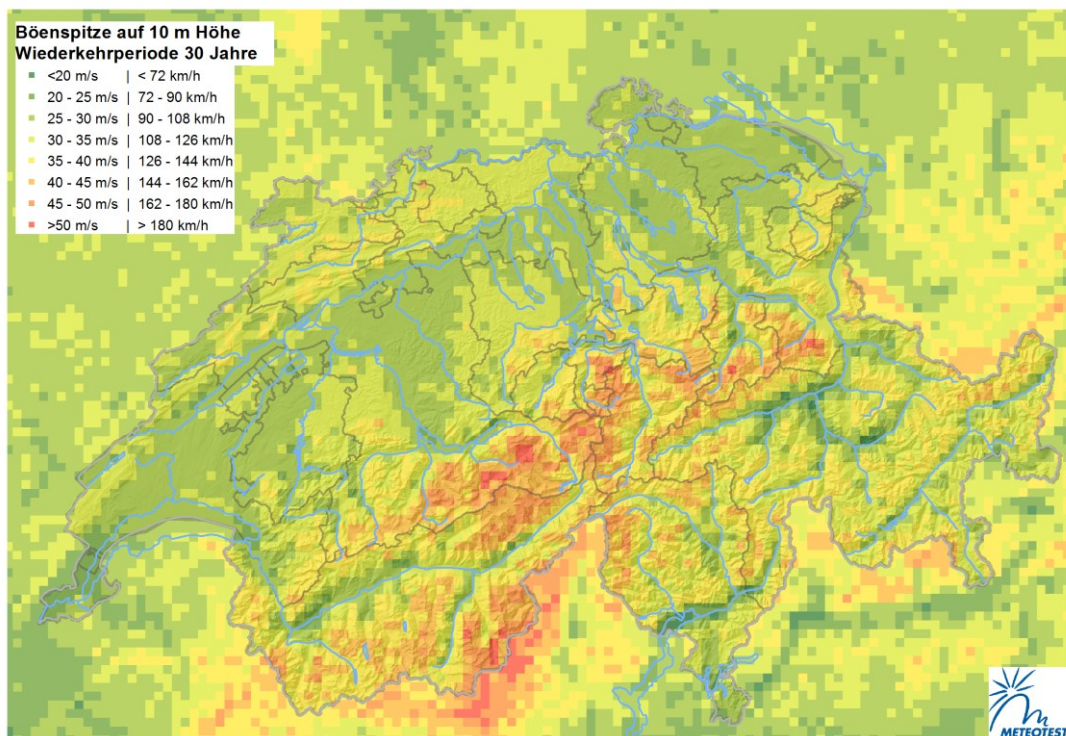


Abbildung 19: Böenspitzen auf 10 m Höhe über Grund für eine Wiederkehrperiode von 30 Jahren.

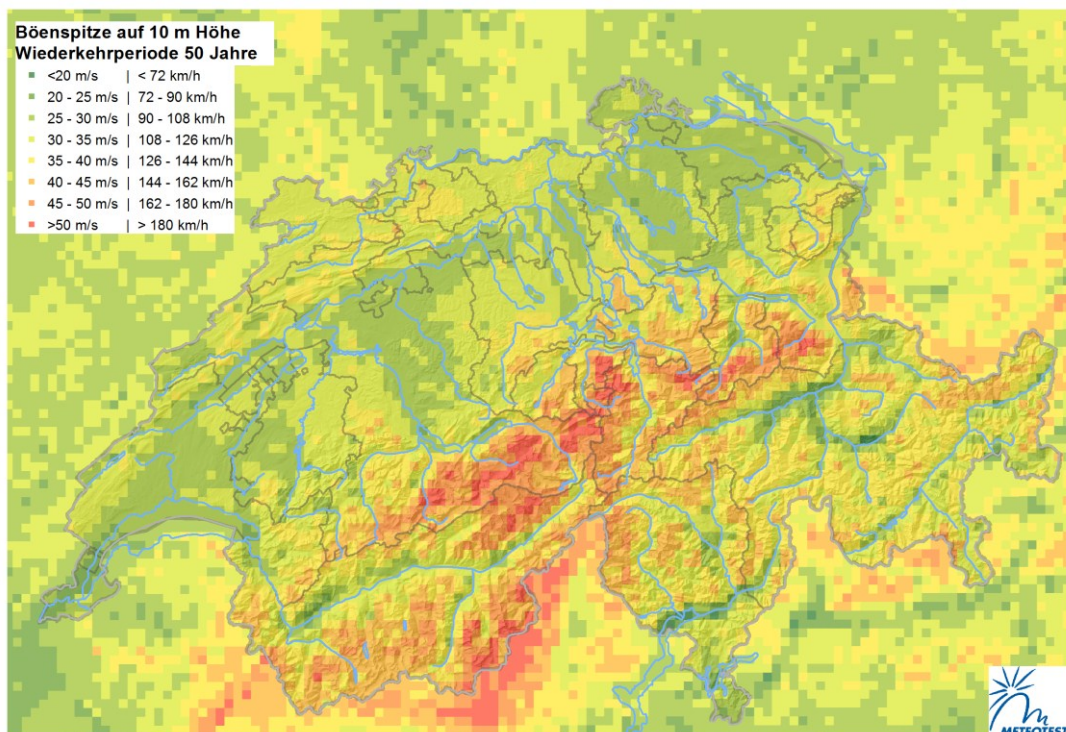


Abbildung 20: Böenspitzen auf 10 m Höhe über Grund für eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren.

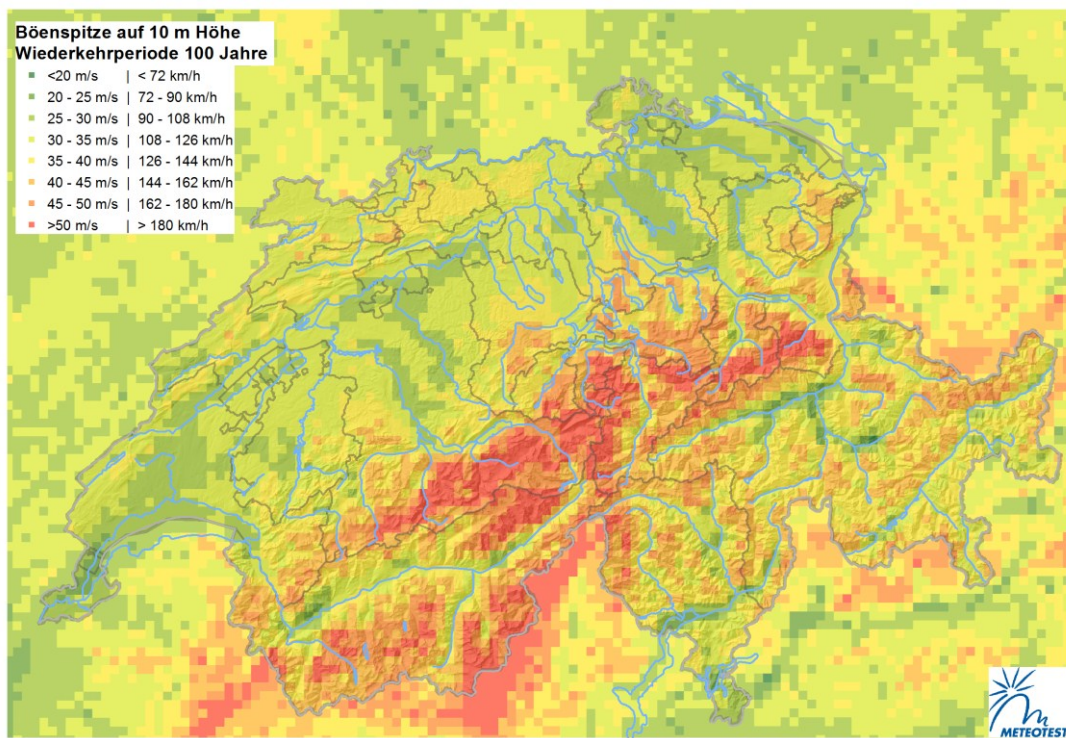


Abbildung 21: Böenspitzen auf 10 m Höhe über Grund für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren.

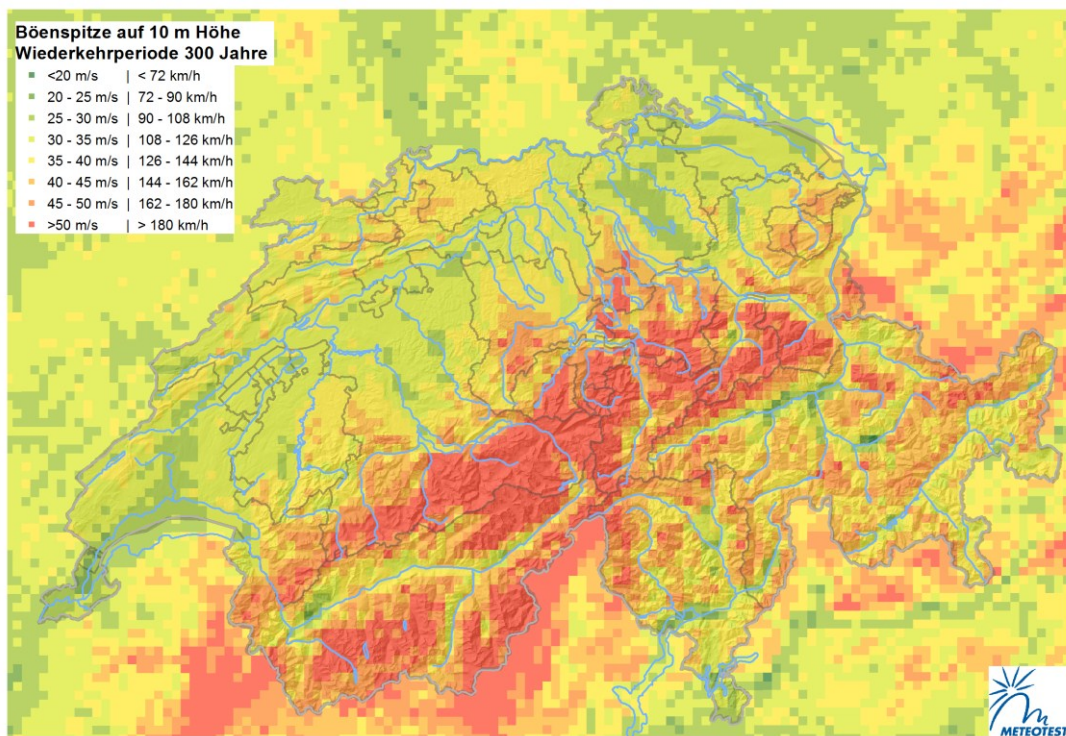


Abbildung 22: Böenspitzen auf 10 m Höhe über Grund für eine Wiederkehrperiode von 300 Jahren.

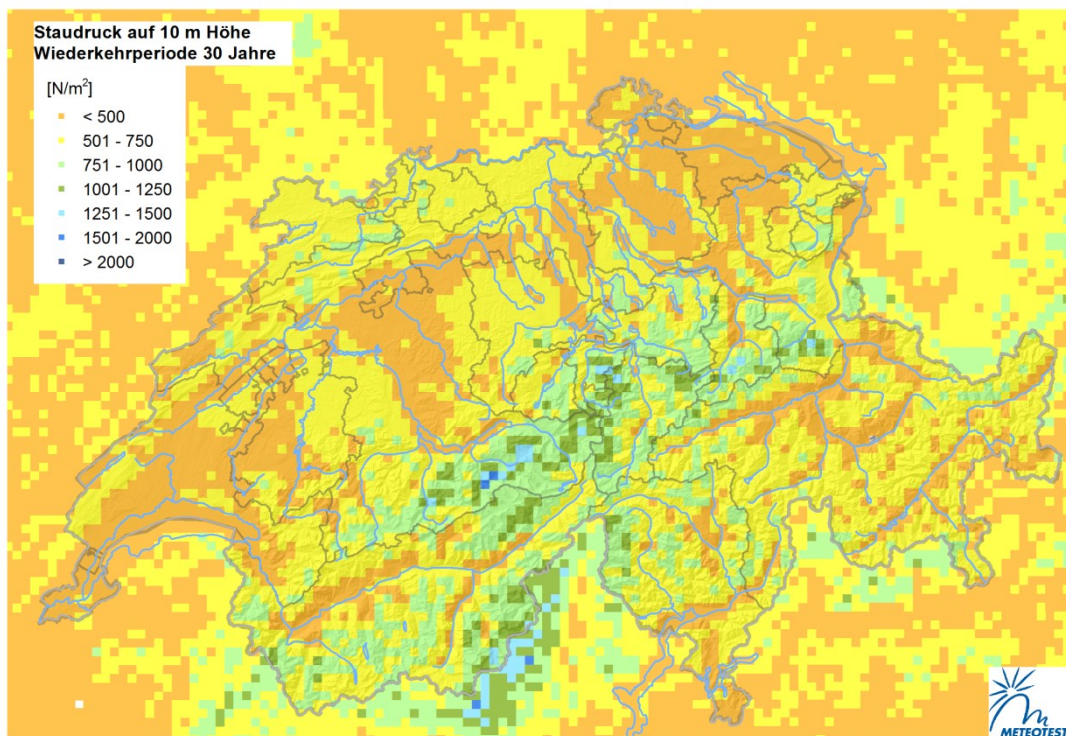


Abbildung 23: Staudruck auf 10 m Höhe über Grund für eine Wiederkehrperiode von 30 Jahren.

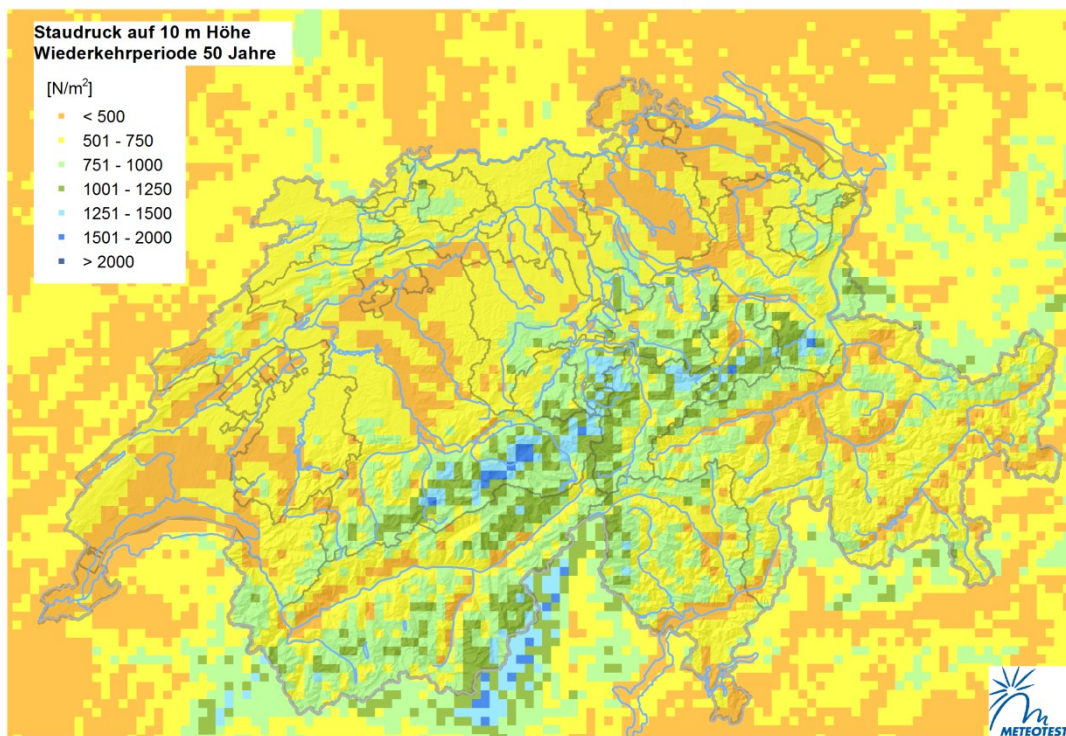


Abbildung 24: Staudruck auf 10 m Höhe über Grund für eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren.

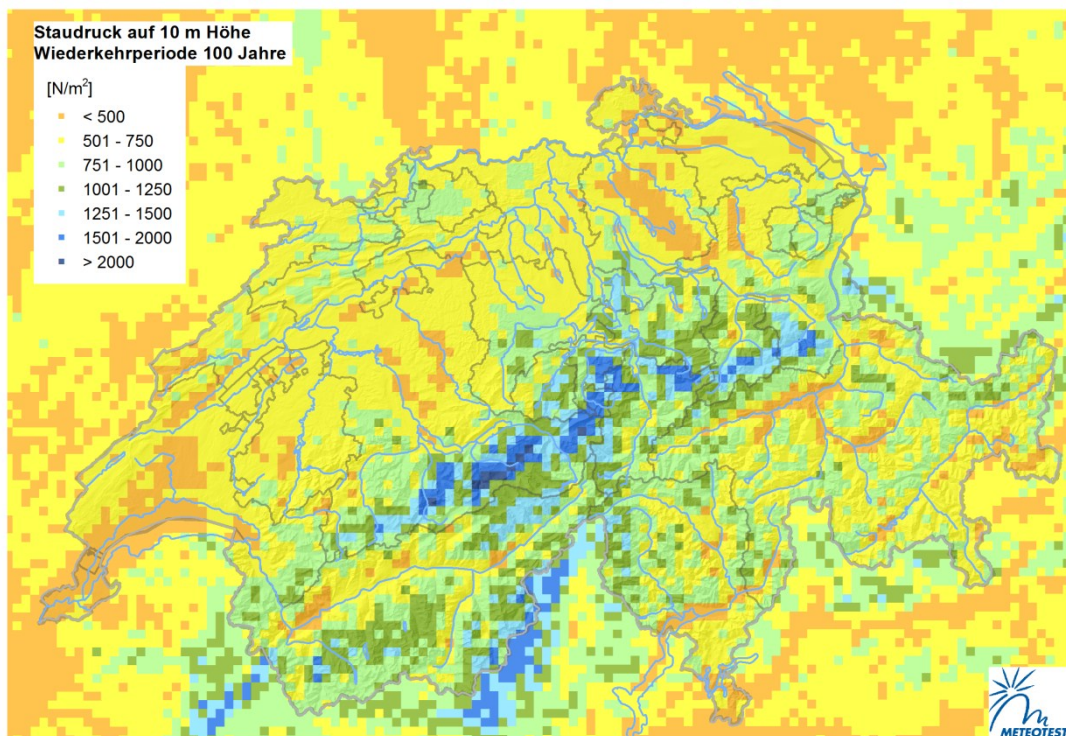


Abbildung 25: Staudruck auf 10 m Höhe über Grund für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren.

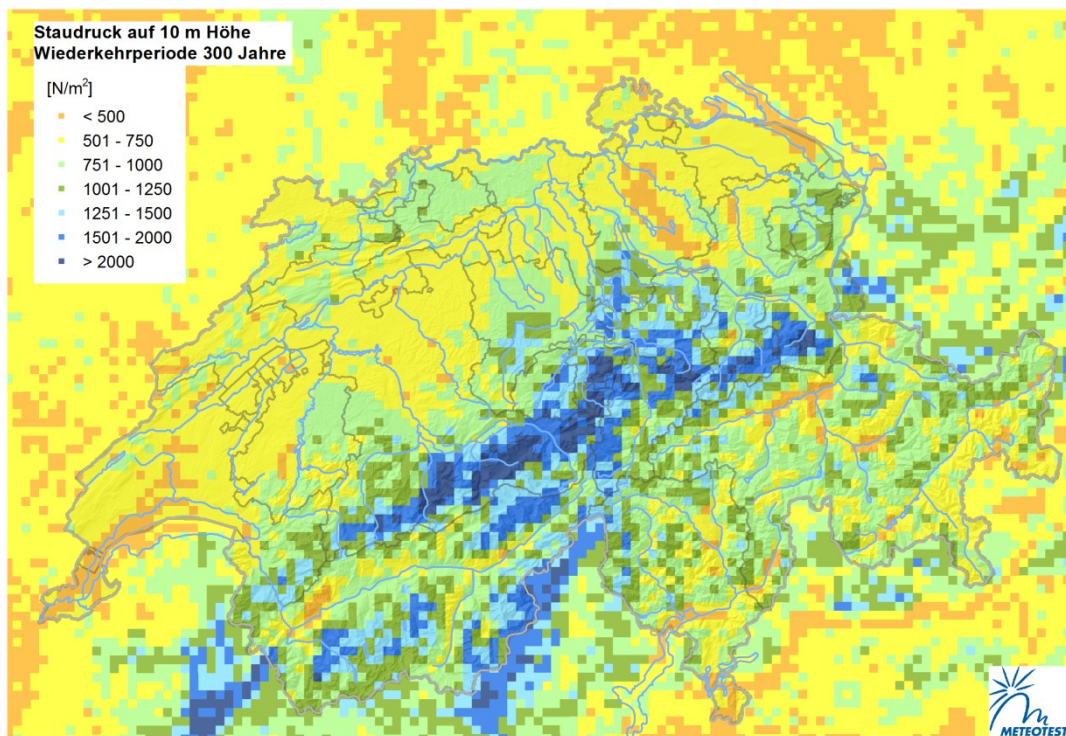


Abbildung 26: Staudruck auf 10 m Höhe über Grund für eine Wiederkehrperiode von 300 Jahren.

3.2 Unsicherheit

Die Karten der Böenspitzen für verschiedene Wiederkehrperioden werden ergänzt durch eine Unsicherheitsinformation. Die Angabe der Unsicherheit des Ergebnisses soll es dem Nutzer der Karten erlauben, zu beurteilen, in welchem Bereich die Ergebnisse schwanken können und dem eigentlichen Wert noch einen Sicherheitszuschlag zu geben, wenn besonders hohe Sicherheitsansprüche bestehen.

Die Unsicherheit der Karten der Böenspitzen für die verschiedenen Wiederkehrperioden setzt sich zusammen aus den Unsicherheiten aufgrund:

- der Auswahl des Sturmkatalogs
- der Verfeinerung der 20CR Daten mit dem Modell WRF
- der Extremwertstatistik

Es wird bei der Berechnung davon ausgegangen, dass die Unsicherheiten aus den drei Teilschritten unabhängig voneinander sind. Dies ist nicht ganz gegeben, da durch die Berechnung der Extremwertstatistik mit einer Auswahl von Stürmen statt einer vollständigen Windzeitreihe die Konfidenzintervalle der Extremwertstatistik etwas vergrößert werden. Das bedeutet, dass das Ergebnis der Extremwertstatistik durch reduzierte Datengrundlage bei der Berechnung etwas unsicherer wird. Die Vernachlässigung dieses Zusammenhangs führt zu einer leichten Überschätzung der Unsicherheit. Hingegen werden die Unsicherheiten mit der gewählten Schätzmethode für grosse Wiederkehrperioden unterschätzt. Die Unsicherheit aufgrund der vernachlässigten Sommerstürme wird nicht berücksichtigt. Sie ist vermutlich bei höheren Windgeschwindigkeiten (etwa über 30 m/s) eher vernachlässigbar als bei tieferen.

Wenn man die Unsicherheiten als unabhängig voneinander betrachtet, dann kann die Gesamtunsicherheit σ_{total} vereinfacht beschrieben werden als:

$$\sigma_{total} = \sqrt{\sigma_{katalog}^2 + \sigma_{WRF}^2 + \sigma_{statistik}^2}$$

Dabei bezeichnet $\sigma_{katalog}$ die Unsicherheit, die durch die Auswahl des Sturmkatalogs entsteht, σ_{WRF} die Unsicherheit, die durch die Simulation der Böen mit dem Modell WRF entsteht und $\sigma_{statistik}$ bezeichnet die Unsicherheit aufgrund der Extremwertstatistik. Die Berechnung der einzelnen Komponenten der Unsicherheit wird im Folgenden beschrieben.

Unsicherheit aufgrund der Auswahl der Stürme

Die Unsicherheit aufgrund der Auswahl der Stürme wird anhand eines Vergleichs der Extremwertstatistik mit einer vollständigen Reihe von SwissMetNet-Messungen und den einzelnen Werten für die ausgesuchten 26 Stürme im Zeitraum 1980 bis 2011 abgeschätzt. Diese Unsicherheit ist nicht identisch mit der Unsicherheit für die gesamte Zeitperiode, da durch die kurze Messreihe nur relativ wenige Werte zur

Verfügung stehen. Andererseits ist diese Periode durch den Sturmkatalog sehr gut abgedeckt; alle grösseren Schadenstürme sind höchstwahrscheinlich erfasst. Diese Sicherheit ist jedoch nicht für alle historischen Zeitperioden gegeben (siehe Kapitel 2.3). Insgesamt dürfte die Unsicherheit aus der Sturmauswahl mit unserem Ansatz eher zu gross geschätzt sein.

Die Extremwertstatistik wird für jede Station einmal mit der vollständigen Swiss-MetNet-Zeitreihe (stündliche 1 Sekunden-Böenspitzen von 57 Stationen) mit der gängigen Methodik der Auswahl der unabhängigen Böenspitzen aus der Zeitreihe oberhalb des Thresholds – hier das 97% Quantil – durchgeführt, wobei ein Declustering die Unabhängigkeit der eingeflossenen Werte garantiert. Im Vergleich dazu wird die Extremwertstatistik mit der Projektmethodik (Kapitel 2.5.1) für den entsprechenden Gitterpunkt mit der Auswahl der Stürme, die im Sturmkatalog zwischen 1980 und 2011 vorliegen, berechnet. Es werden die Böenspitzen für Wiederkehrperioden zwischen 5 und 300 Jahren berechnet und die Ergebnisse der beiden Methoden miteinander verglichen.

Abbildung 27 zeigt die über alle Stationen gemittelten Bias und Standardabweichung des Vergleichs der beiden Methoden. Es ist zu erkennen, dass sich für kurze Wiederkehrperioden ein grösserer Bias von etwa -5 m/s ergibt. Dieser reduziert sich mit zunehmender Wiederkehrperiode auf quasi 0 m/s bei 300 Jahren Wiederkehrperiode. Gleichzeitig wächst die Standardabweichung von etwa 3 m/s auf 6 m/s an. Abbildung 28 zeigt dieselbe Analyse separat für die Tal-, Flachland- und Bergstationen. Bei den Bergstationen ergibt sich ein Bias zwischen -8 und -3 m/s, wobei sich zu den grösseren Wiederkehrperioden die Differenz verringert. Im Flachland ist der Bias bei -3 bis 0 m/s.

Für die Unsicherheitsrechnung der Gesamtunsicherheit wird der RMSE für jede Wiederkehrperiode verwendet, dieser liegt für die verschiedenen Wiederkehrperioden zwischen 4 m/s und 6 m/s (Abbildung 27). Die Unsicherheit wird unabhängig vom Ort und abhängig von der Wiederkehrperiode angegeben.

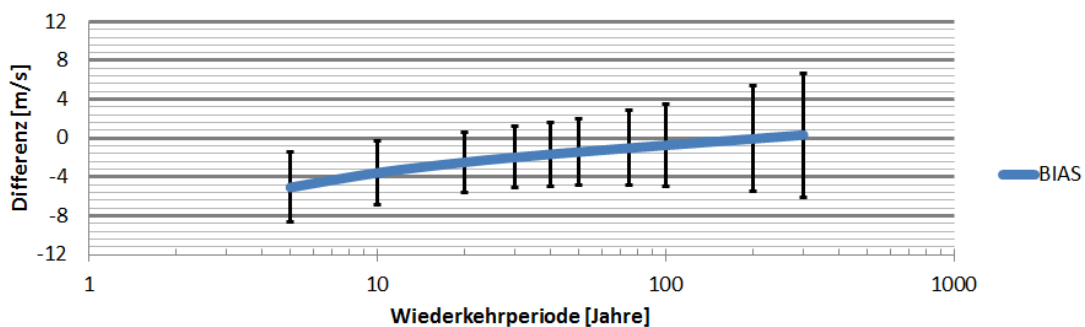


Abbildung 27: Systematischer Fehler (Bias) und Standardabweichung des Vergleichs der Böen mit verschiedenen Wiederkehrperioden berechnet mit der vollständigen SwissMetNet-Zeitreihe und ausgewählten Werten entsprechend des Sturmkatalogs.

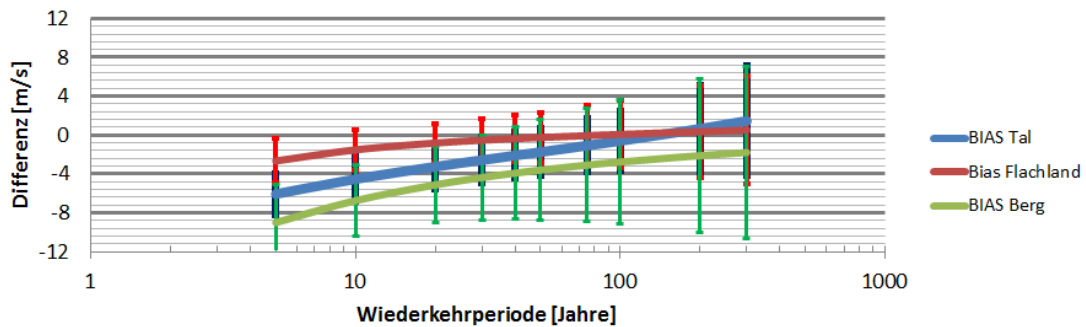


Abbildung 28: Analoge Darstellung wie Abbildung 27, aber separat für Tal-, Flachland- und Bergstationen.

Unsicherheit aufgrund der Simulation der Böenspitzen

Die Unsicherheit, die aus der Simulation der Böenspitzen resultiert, wird aufgrund der Evaluation der simulierten Böenspitzen für 24 Sturmperioden im Zeitraum von 1980 bis 2011 bestimmt. Die Unsicherheit beschreibt die Gesamtunsicherheit der simulierten Böen, die sich aus der Unsicherheit der 20CR Anfangs- und Randbedingungen, der WRF Simulation und der Böenparametrisierung zusammensetzt.

Die Ergebnisse der Evaluation sind im Abschnitt 2.4.4 dargestellt. Der für die Unsicherheit verwendete Fehler ist in Tabelle 4 angegeben. Er wird für vier Regionen Flachland, Berge unter 2000 m Höhe, Berge über 2000 m Höhe und Täler angegeben und ist unabhängig von der Wiederkehrperiode.

Für Berge über 2000 m Höhe werden zusätzlich besonders exponierte Regionen (z.B. Berggipfel) bestimmt. Diese Regionen werden über einen Vergleich von geglätteter und nicht geglätteter Orographie definiert. Für die besonders exponierten Gebiete wird die Unsicherheit zusätzlich von 9.8 m/s auf 12.8 m/s erhöht, da die simulierten Böen dort teilweise sehr deutlich von den gemessenen Böen abweichen (Abschnitt 2.4.5).

Unsicherheit aufgrund der Extremwertstatistik

Die Unsicherheit aufgrund der Extremwertstatistik wird durch das Konfidenzintervall gegeben, das bei der Berechnung der Extremwertstatistik abgeschätzt wird (Abbildung 29). Normalerweise werden 90 oder 95% Konfidenzintervalle angegeben. Für die vorliegende Berechnung wurde das 66%-Konfidenzintervall gewählt (was einer Standardabweichung bei Normalverteilung entspricht), da in die anderen beiden Fehleranteile über den RMSE mit der Standardabweichung auch eine 66% Unsicherheit einfließt. Der Wert wird für jeden Gitterpunkt einzeln bestimmt. Somit ist die Unsicherheit der Extremwertstatistik sowohl vom Ort als auch von der Wiederkehrperiode abhängig.

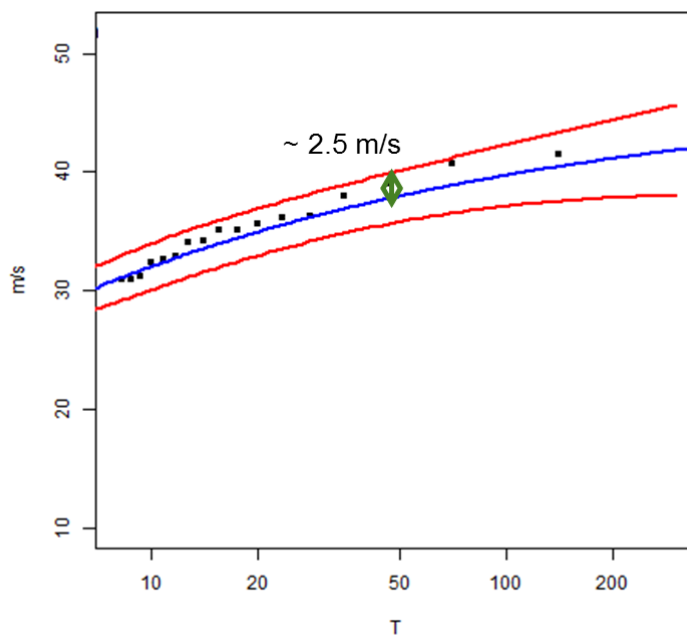
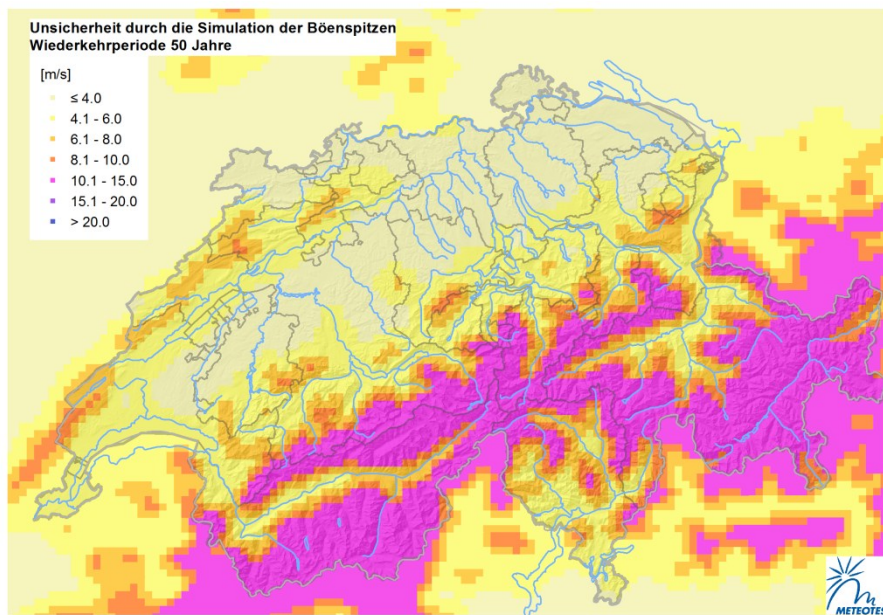
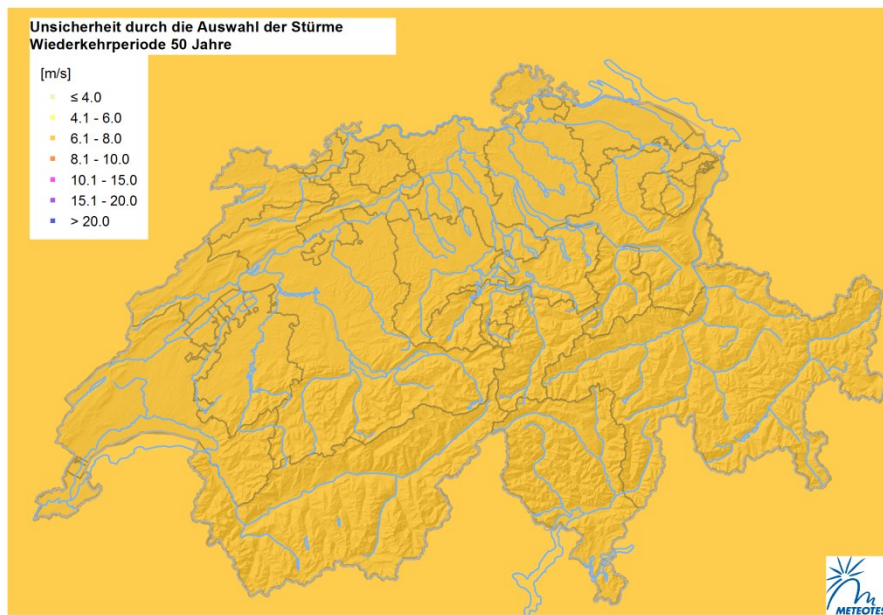


Abbildung 29: Beispiel für die mit Extremwertstatistik berechneten Böen (blau) und die dazugehörigen Konfidenzintervalle (rot). In schwarz sind die Eingangsdaten für die Extremwertstatistik angegeben.

Teil- und Gesamtunsicherheit

In Abbildung 30 sind die Unsicherheiten aufgrund der Auswahl des Sturmkatalogs, der Simulation der Böenspitzen und der Extremwertstatistik sowie die Gesamtunsicherheit exemplarisch für die Wiederkehrperiode von 50 Jahren dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Gesamtunsicherheit eine räumliche Struktur aufweist, die insbesondere in Bergregionen erhöhte Unsicherheiten zeigt. Hier treten in extremen Lagen (alpine Gipfel) Werte im Bereich von 20 m/s auf. Dies sind auch die Regionen, in denen die sehr hohen Böenspitzen erwartet werden, so dass die relative Unsicherheit im Bereich von 30 – 40%, in wenigen Regionen zwischen 40% – 50% liegt. In moderateren Bergregionen treten Unsicherheiten im Bereich von 6 – 8 m/s auf, im Mittelland liegt die Unsicherheit im Bereich von 4 – 6 m/s. Die relative Unsicherheit ist hier mit 10 – 20% deutlich geringer als in Bergregionen. Der stärkste Beitrag zur Unsicherheit kommt dabei aus der Simulation der Böen. Es ist aber auch zu erkennen, dass die Unsicherheit aufgrund der Extremwertstatistik in den Bergen einen signifikanten Beitrag leistet. Abbildung 31 zeigt die absolute und die relative Gesamtunsicherheit für die 30-, 50-, 100- und 300-jährige Wiederkehrperiode. Die absolute Unsicherheit ist von der Höhenlage abhängig. Da auch die Böenspitzen in den Bergen deutlich höher sind, ist hingegen die relative Unsicherheit flächenmässig homogener verteilt.



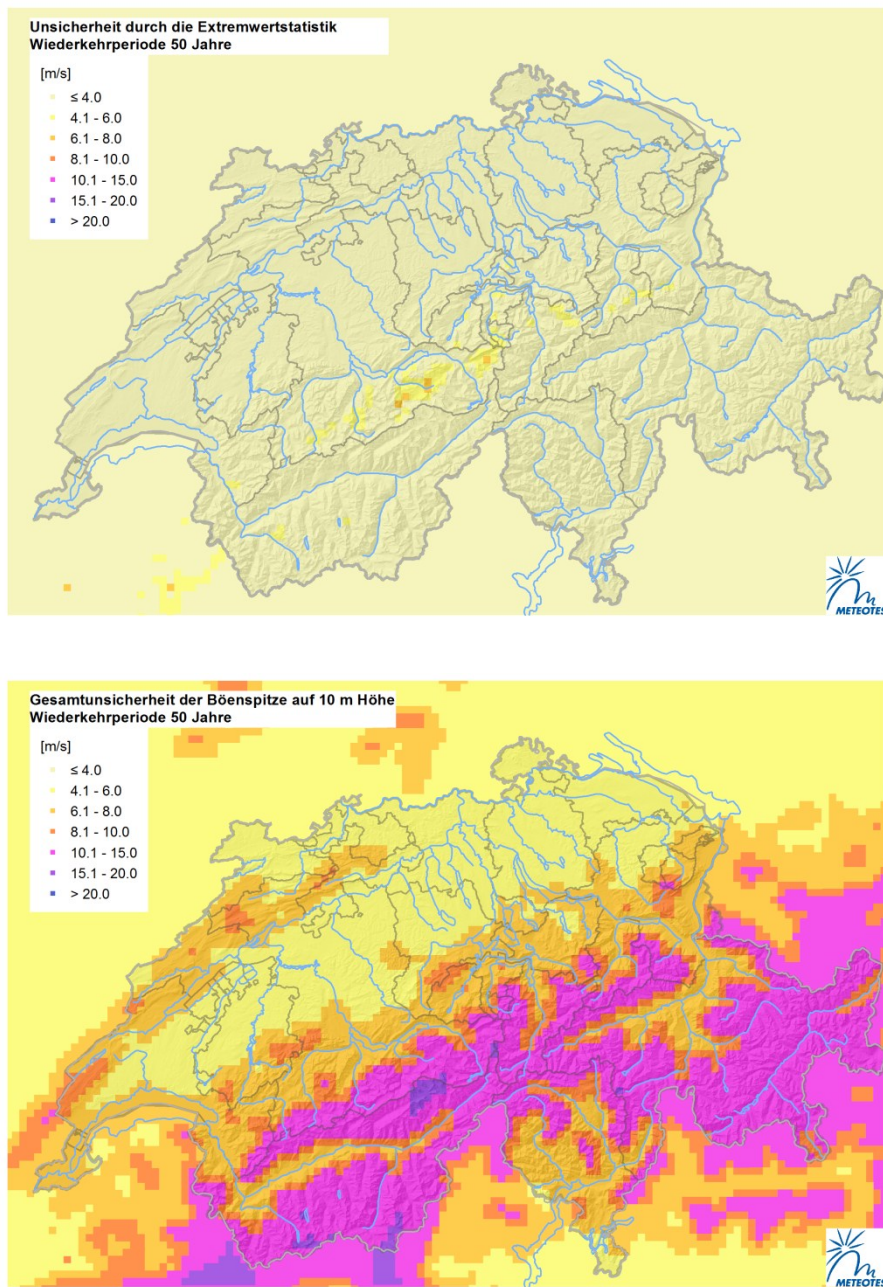
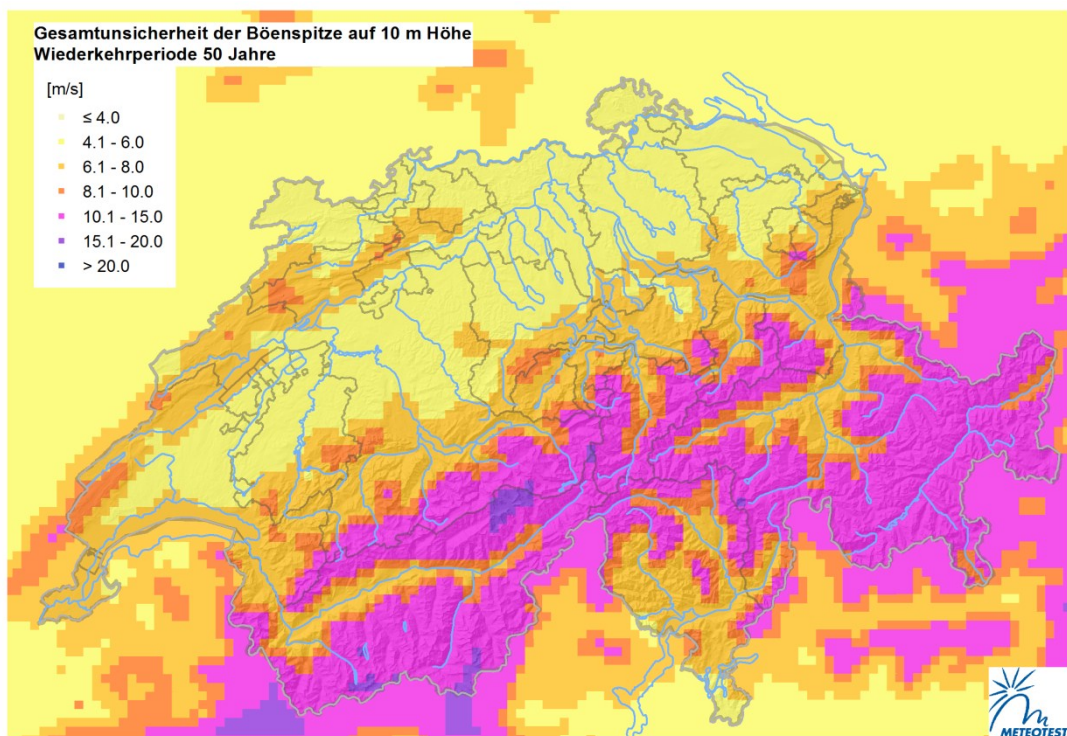
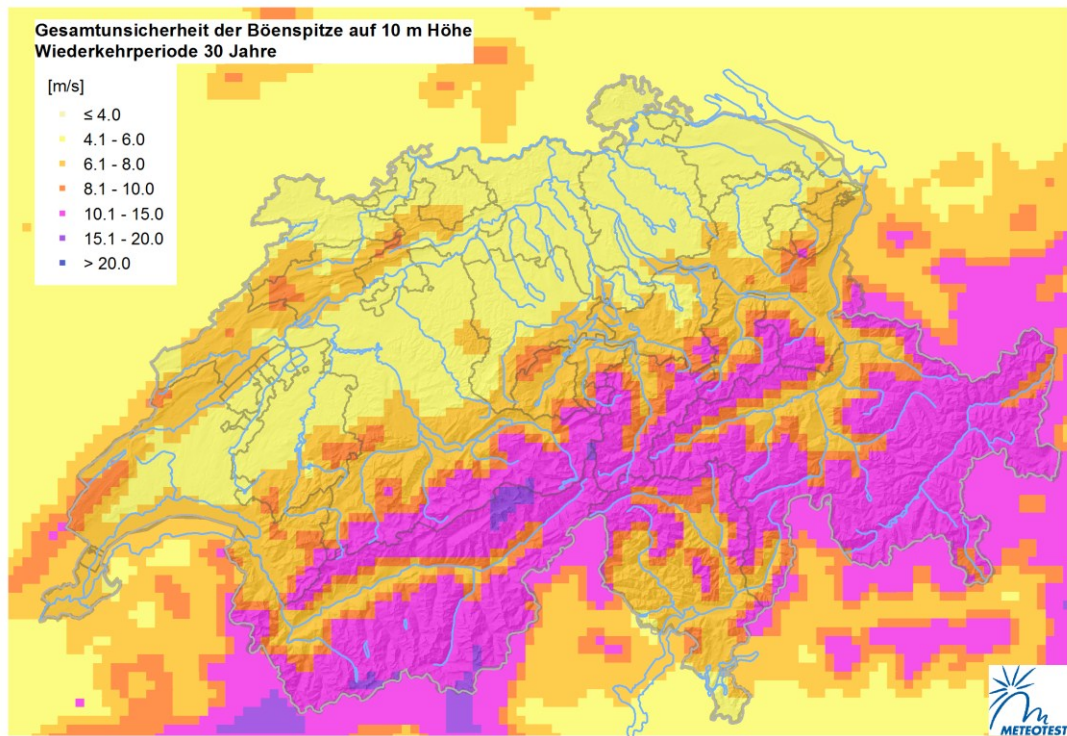


Abbildung 30: Unsicherheiten aufgrund der Auswahl des Sturmkatalogs (oben links), der Simulation der Böenspitzen (oben rechts) und der Extremwertstatistik (unten links) sowie die Gesamtunsicherheit (unten rechts) für die Wiederkehrperiode von 50 Jahren.



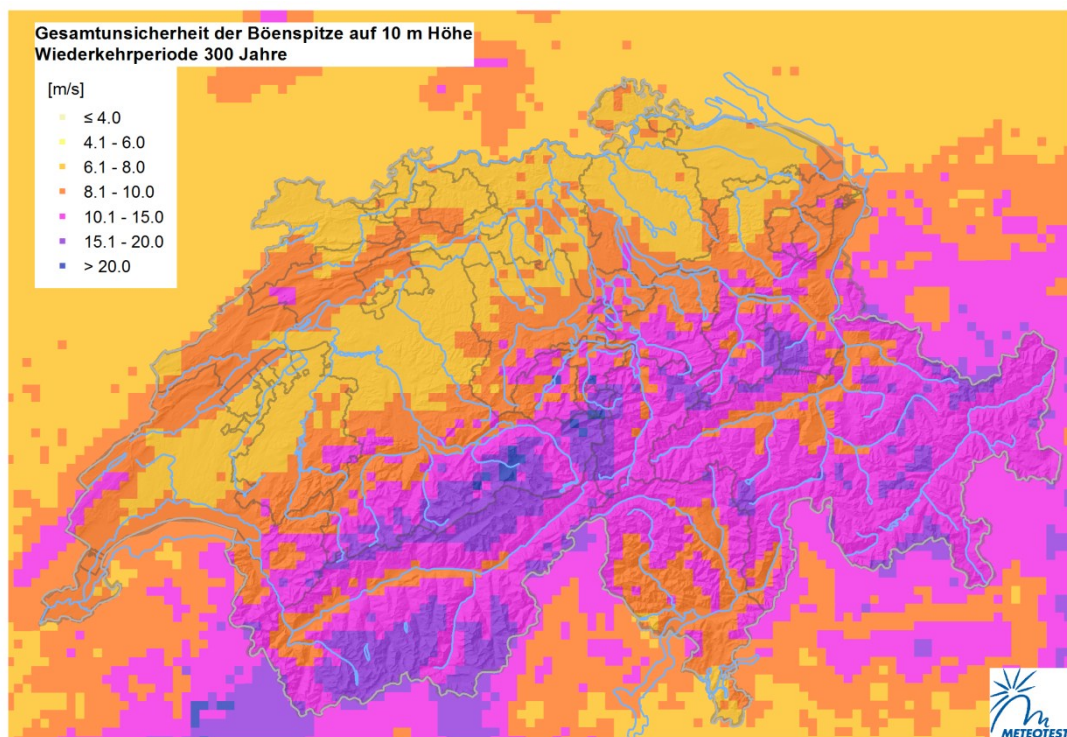
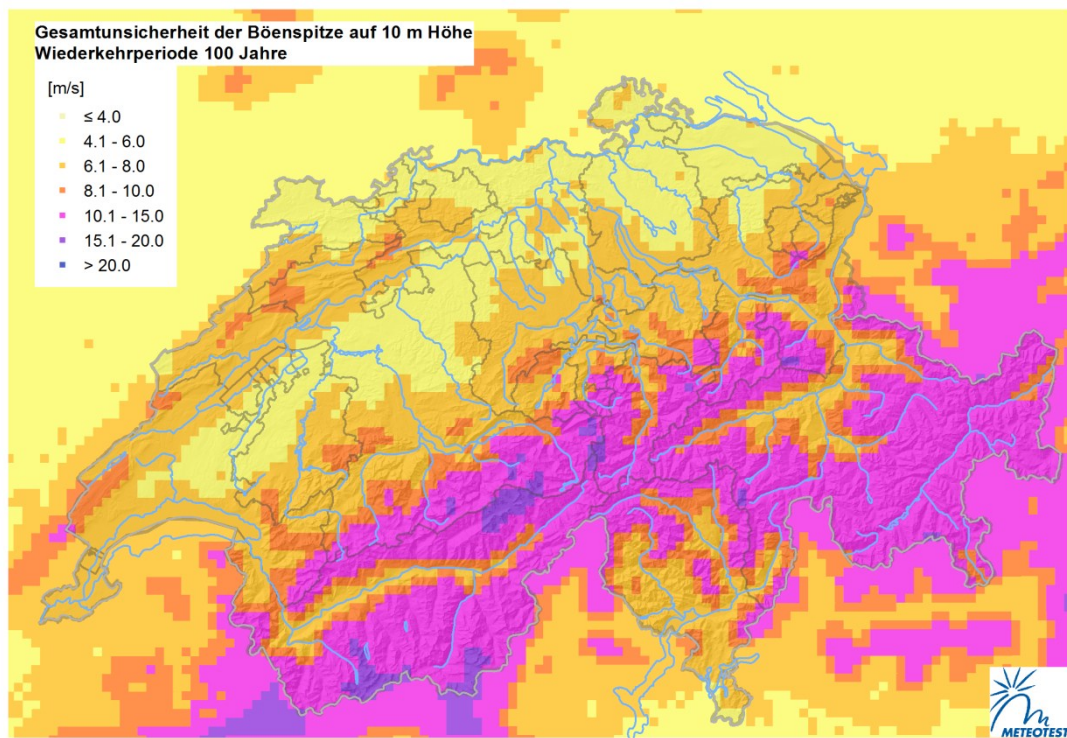
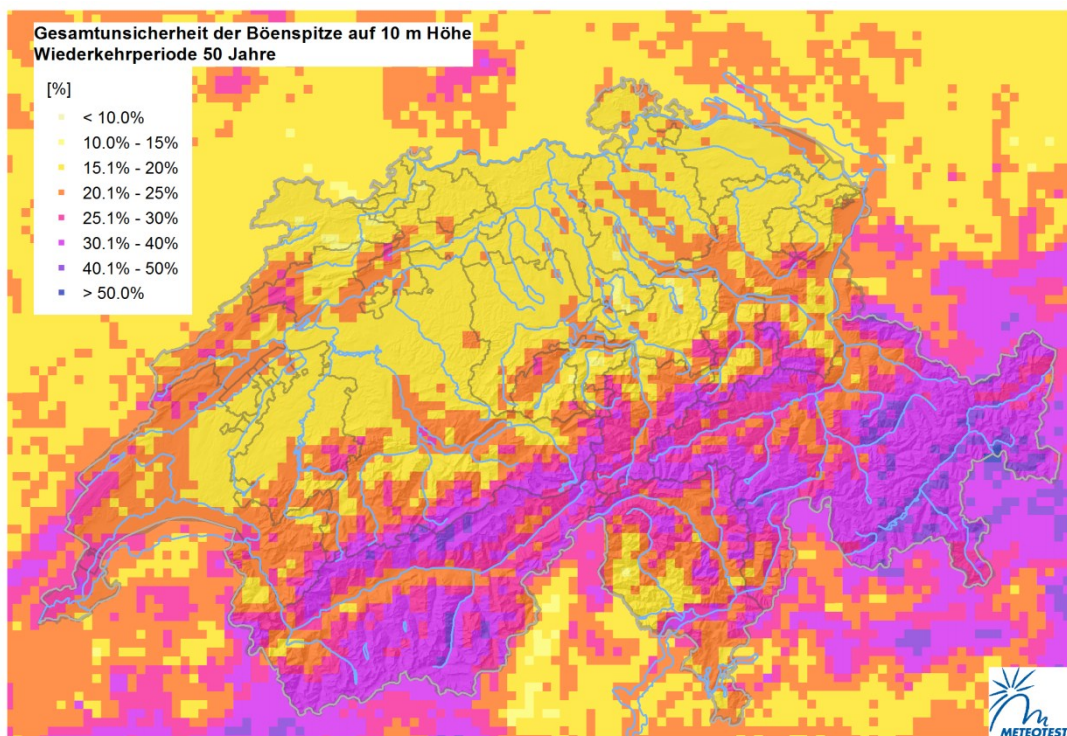
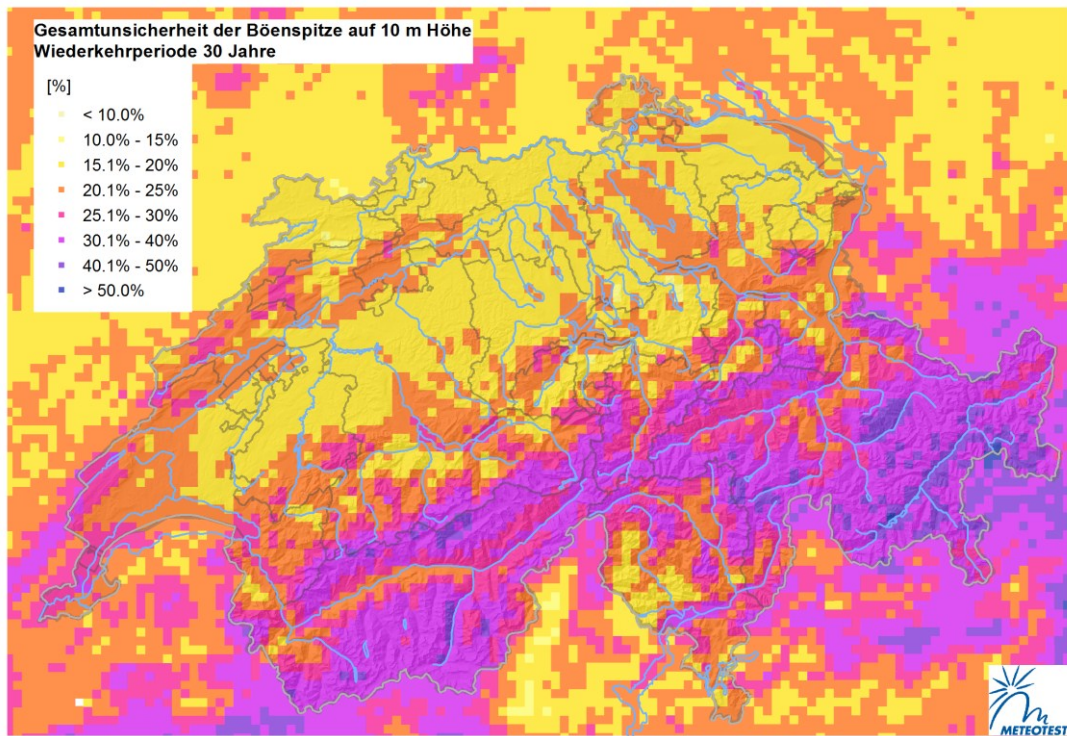


Abbildung 31: Absolute Gesamtunsicherheiten für verschiedene Wiederkehrperioden. Von oben nach unten für die 50-, 100- und 300-jährige Wiederkehrperiode.



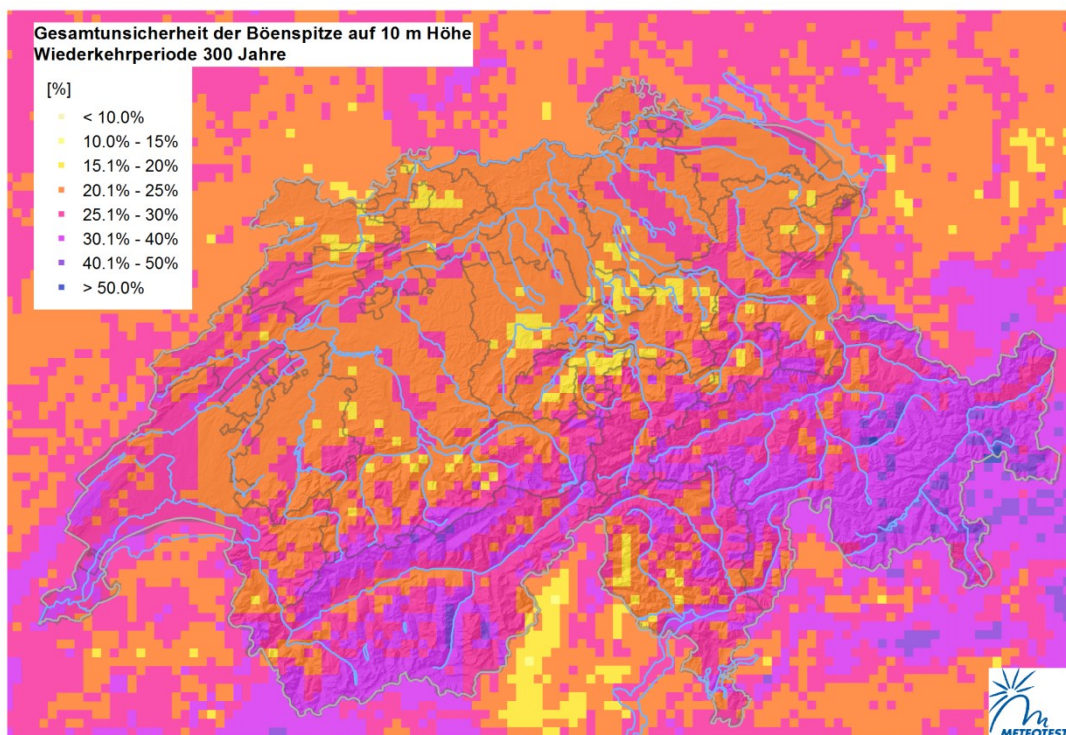
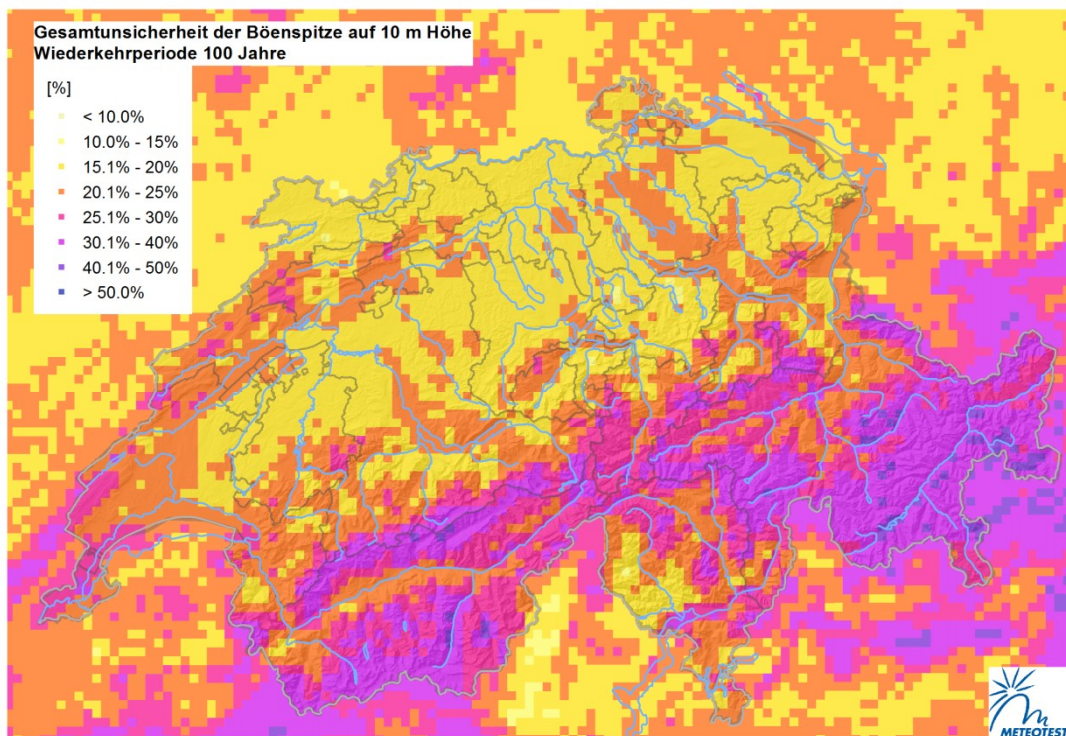


Abbildung 32: Relative Gesamtunsicherheiten für verschiedene Wiederkehrperioden. Von oben nach unten für die 50-, 100- und 300-jährige Wiederkehrperiode.

3.3 Vergleich mit anderen Extremwindberechnungen

3.3.1 Böenspitzen auf Grundlage von SwissMetNet-Messungen

Die Karte der Böenspitzen mit 50-jährlicher Wiederkehrperiode wird mit den entsprechenden auf Grundlage der SwissMetNet-Messungen berechneten Böenspitzen verglichen. Die 50-jährliche Wiederkehrperiode wurde gewählt, da sie auch aus der etwa 30-jährlichen SwissMetNet-Messreihe gut ableitbar ist und es sich um eine in der praktischen Anwendung häufig verwendete Wiederkehrperiode handelt.

Bei der Beurteilung des Vergleichs sollten folgende Tatsachen berücksichtigt werden:

- Der Vergleich wird durchgeführt für eine Punktmessung und ein Modellergebnis, das für ein Volumen von 3 km x 3 km x etwa 20 m repräsentativ ist. Die Werte sind somit für unterschiedliche Bedingungen repräsentativ.
- Durch die unvollständige Wiedergabe der realen Orographie im Modell WRF ist der nächstgelegene Gitterpunkt nicht unbedingt der repräsentativste für die Messposition. Daher werden beim Vergleich die umliegenden Gitterpunkte berücksichtigt.
- Die Extremwertstatistik mit SwissMetNet-Daten, die einen Zeitraum von etwa 35 Jahren abdecken, wird verglichen mit einer Extremwertstatistik auf Grundlage von Stürmen seit 1875. Die Häufigkeit der Sturmstärken über diese zwei Zeiträume kann unterschiedliche sein.
- Die SMN-Daten enthalten Sommer- und Winterstürme, während in der Sturmkarte nur Winterstürme berücksichtigt sind.
- Messunsicherheiten werden als vernachlässigbar eingeordnet und beim Vergleich nicht berücksichtigt.
- Es werden nur horizontale Windgeschwindigkeitskomponenten berücksichtigt. Starke Vertikalwinde werden weder in den Messungen noch im Modell erfasst.

Abbildung 33 zeigt die Böenspitzen auf 10 m Höhe über Grund für eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren bestimmt auf Grundlage von SwissMetNet-Messungen und WRF-Ergebnissen. Der Vergleich zeigt, dass an vielen Positionen die Böenspitze mit 50-jährlicher Wiederkehrperiode in derselben Geschwindigkeitsklasse oder einer benachbarten Geschwindigkeitsklasse zu finden ist. Berechnet man die Unterschiede an den Positionen der SwissMetNet-Messungen, so ergibt sich, dass 65% der Stationen Abweichung kleiner 5 m/s zeigen. An 90% der Stationen ist die Abweichung kleiner als 10 m/s. Im Mittelland werden die Böenspitzen tendenziell eher unterschätzt, was durch die fehlenden Sommerstürme verursacht sein könnte.

Die auf Grundlage der WRF-Simulationen berechneten Böenspitzen mit Wiederkehrperiode 50 Jahren liegen zwischen 18 m/s und 62 m/s. Wenn man die höchste gemessene Böenspitze vernachlässigt, entspricht dies gut dem Bereich von 24 m/s bis 62 m/s, in dem die auf Grundlage der SwissMetNet-Messungen berechneten Böenspitzen mit Wiederkehrperiode 50 Jahren liegen (siehe auch Abbildung 33). Der höchste gemessene Wert auf Grundlage der SwissMetNet-Messungen von 71 m/s tritt an der Position des Jungfraujochs auf. Dieser wird in der Sturmkarte mit 62 m/s berechnet. Der Unterschied von 9 m/s zeigt, dass die sehr ausgesetzten Positionen im Modell nicht reproduziert werden können (siehe auch Abschnitt 2.4.4).

Für längere Wiederkehrperioden werden immer höhere Böenspitzen wahrscheinlich, so dass die Böenspitzen für eine 100-jährliche Wiederkehrperiode im Bereich von 19 m/s bis 70 m/s liegen. Diese stehen in gutem Einklang mit den auf Grundlage der SwissMetNet-Messung berechneten Böenspitzen von 24 m/s bis 74 m/s.

An sechs Stationen ist die Abweichung grösser als 10 m/s. Es handelt sich ausschliesslich um stark exponierte Bergstationen wie z.B. Jungfraujoch, Weissfluhjoch oder Les Diablerets. Hier zeigt sich wieder die Einschränkung, die sich durch die Gitterweite von 3 km ergibt. Die Details der Orographie, die notwendig sind, um die Dynamik an sehr exponierten Positionen zu beschreiben, werden in diesen Rechnungen nicht erfasst. In der in Abschnitt 2.4.5 beschriebenen Fallstudie konnte gezeigt werden, dass weitere Verfeinerung z.B. durch kleinere Gitterweiten besonders für Bergstationen zu deutlich besseren Ergebnissen führen. Die höheren Abweichungen in der Böenspitzenkarte werden durch eine zusätzliche Unsicherheit für stark exponierte Stationen berücksichtigt. Für die Verwendung der Karte muss auf die Ungenauigkeit im Bereich sehr exponierter Bergpositionen und den fehlenden Einbezug der Sommerstürme verwiesen werden.

Die Abweichungen zwischen den Böenspitzen auf Grundlage der SwissMetNet-Stationen und den WRF-Modellergebnissen wird für fast alle Stationen durch die in Abschnitt 3.2 beschriebenen und in Abbildung 31 dargestellten Unsicherheiten abgedeckt. Lediglich für die oben beschriebenen sehr exponierten Bergstationen beschreibt die Unsicherheit die Unterschiede nicht überall vollständig.

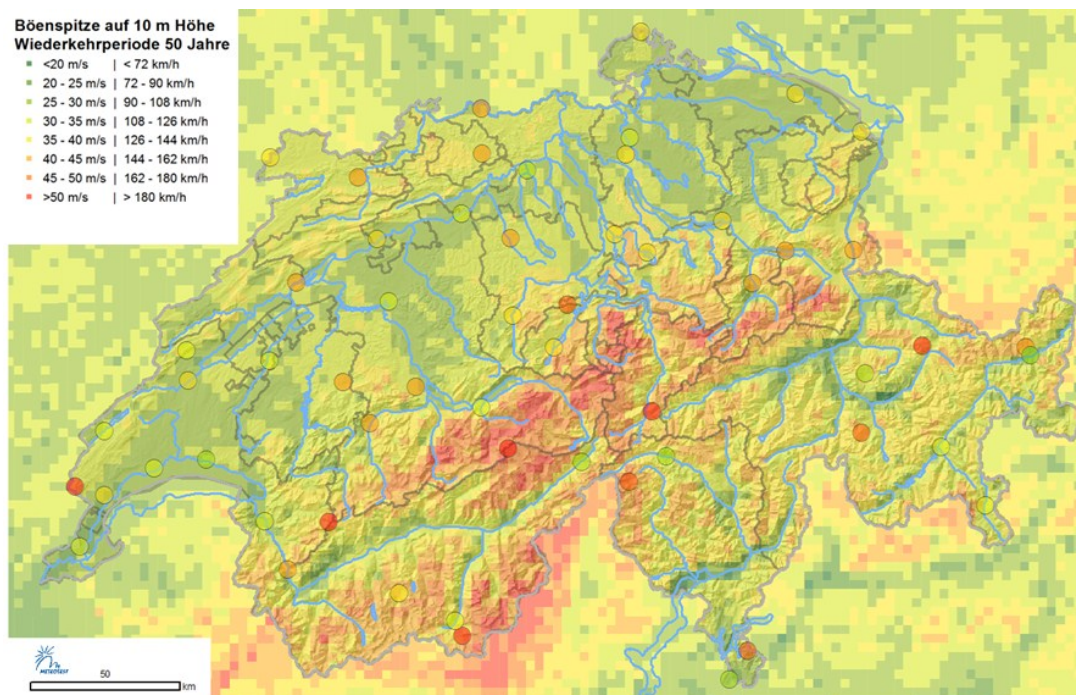


Abbildung 33: Böenspitzen auf 10 m Höhe über Grund für eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren bestimmt auf Grundlage von WRF-Ergebnissen (flächige Darstellung) und von SwissMetNet-Messungen (Kreise).

3.3.2 Staudruckkarte Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

Der Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein SIA hat im Jahr 2003 eine Windlast-Norm (sia, 2003), (sia, 2006) mit einer Datengrundlagenkarte für die Schweiz herausgegeben. In dieser Karte ist der Staudruck für eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren dargestellt. Die Karte wurde auf Basis von Extremwertstatistik an Messstationen, numerischen Simulationen von drei Winterstürmen und einem Föhnwindmodell erstellt. Es werden im Mittelland und in den Alpen je drei Kategorien sowie die Jurakreten speziell ausgewiesen. Die Staudrücke entsprechen auf den Alpengipfeln 3.3 kN/m^2 (81 m/s), auf den Jurakreten 2.4 kN/m^2 , in den Föhntälern 1.3 kN/m^2 und im Mittelland 0.9 bis 1.1 kN/m^2 .

Ein Vergleich zur Staudruck Karte, welche in diesem Projekt erstellt wurde, zeigt grundsätzlich ähnliche Strukturen. Die absoluten Werte in der im vorliegenden Projekt erstellten Karte liegen aber etwas tiefer. So werden auf den Alpengipfeln Staudrücke von 2.0 kN/m^2 erreicht. Das Mittelland liegt unterhalb 1.0 kN/m^2 , was in etwa der SIA Karte entspricht. Durch mehr Detaillierungsgrad und eventuell auch durch die fehlenden Sommerstürme kommen auch tiefere Staudrücke vor. In der SIA Karte ist die tiefste Kategorie im Mittelland mit 0.9 kN/m^2 angegeben und nicht mehr feiner aufgelöst. Die Gründe für Unterschiede auf den Berggipfeln lassen sich jedoch nicht eruieren. Da auch in (Ceppi, Della-Marta, & Appenzeller, 2008) so hohe Werte für eine 50-jährliche Wiederkehrperiode bei weitem nicht erreicht werden, unterliegen die ausgewiesenen 3.3 kN/m^2 (81 m/s) möglicherweise einem Sicher-

heitszuschlag oder resultieren aus der Gumbelverteilung, die für die Extremwertstatistik verwendet wurde.

Die grösste gemessene Windgeschwindigkeit seit Beginn der automatischen Messungen Anfang der 1980er Jahre liegt bei 74 m/s (Grosser St. Bernhard, 1990).

Für die Bemessung von Tragwerken ist weiterhin die SIA261 Karte massgebend.

3.4 Einsicht der Daten

Die Daten sind auf dem Web GIS Portal des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) (<http://map.bafu.admin.ch/>) verfügbar.

Bibliographie

- Augustsson, H. O. (2004). Mean gust factors in complex terrain. *Meteorologische Zeitschrift*, pp. 149-155.
- Bantle, H., Piaget, A., & Quiby, J. (1987, Februar). Die graphische Darstellung der 10-Minuten Datei der automatischen Stationen des ANETZ. *Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorol. Zentralanstalt*.
- Born, K., Ludwig, P., & Pinto, J. G. (2012). Wind Gust Estimation for Mid-European Winter Storms: Towards a Probabilistic View. *Tellus*.
- Brasseur, O. (2001). Development and application of a physical approach to estimating wind gusts. *Monthly Weather Reviews*, pp. 5-25.
- Brönnimann, S., & Compo, G. (2012). Ozone highs and associated flow features in the first half of the twentieth century in different data sets. *Meteorologische Zeitschrift*, pp. 49-59.
- Brönnimann, S., Compo, G., Spadin, R., Allan, R., & Adam, W. (2011). Early ship-based upper-air data and comparison with the Twentieth Century Reanalysis. *Climate of the Past*, pp. 265-276.
- Brönnimann, S., Martius, O., Waldow, H. v., Welker, C., Luterbacher, J., Compo, G., . . . Usbeck, T. (2012). Extreme winds at northern mid-latitudes since 1871. *Meteorologische Zeitschrift*, pp. 13-27.
- Bundesamt für Energie. (1999). *Planung von Windenergieanlagen - Leitfaden für die Schweiz*. Bern.
- Bütikofer, N. (1987). *Historische Waldschäden in der Schweiz (1800–1960)*. 2 Teil. Universität Bern.
- Calvo, J., & Morales, G. (2009). Verification of wind gust forecasts. *10th Aladin/HIRLAM All-Staff-Meeting*.
- Ceppi, P., Della-Marta, P., & Appenzeller, C. (2008). *Extreme Value Analysis of Wind Speed Observations over Switzerland*. Zürich: Arbeitsbericht der MeteoSchweiz.
- Chen, F., & J. Dudhia. (2001). Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Mon. Wea. Rev.*, pp. 569–585.
- Cheng, W. Y., Liu, Y., & Warner, T. (2009). Sensitivity of a simulated winter storm to WRF model physics over complex terrain. *10th WRF Users' Workshop*. Boulder.
- Compo, G. P., Whitaker, J. ..., Sardeshmukh, P. ..., Matsui, N. ..., Allan, R. J., Yin, X. ..., . . . Worley, S. (2011). The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.*, pp. 1-28.

- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., . . . Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, pp. 553-597.
- Della-Marta, P. M., Mathis, H., Frei, C., Liniger, M. A., Kleinn, J., & Appenzeller, C. (2008). The return period of wind storms over Europe. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY*.
- Dierer, S., Cattin, R., Steiner, P., Grünewald, T., Steinkogler, W., & Lehning, M. (2010). *Vereisungskarte der Schweiz*. Bern.
- Dierer, S., Müller, S., Nygaard, B. E., Calpini, B., & Steiner, P. (2009). Modeling the risk of icing in Switzerland. *Extended abstract, IWAIIS 2009*, (p. 7). Andermatt.
- Dierer, S., Oechslin, R., & Cattin, R. (2011). Wind turbines in icing conditions: performance and prediction. *Adv. Sci. Res.*, pp. 245 - 250.
- Donat, M. G., Renggli, D., Wild, S., Alexander, L. V., Leckebusch, G. C., & Ulbrich, U. (2011). Reanalysis suggests long-term upward trends in European storminess since 1871. *Geophysical Research Letters*.
- Dotzek. (2003). An updated estimate of tornado occurrence in Europe., *Proc. 2nd European Conf. On Severe Storms*.
- Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, pp. 3077–3107.
- Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL. (2001). *Lothar, Der Orkan 1999: Ereignisanalyse*. Bern.
- ENSI. (2009). *ENSI-A05 Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang, Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen*.
- Etienne, C., Goyette, S., & Kuszli, C.-A. (2012). Numerical investigations of extreme winds over Switzerland during 1990–2010 winter storms with the Canadian Regional Climate Model. *Theoretical Applied Climatology*, pp. 229-547.
- Haas, R., & Pinto, J. G. (2012, 12). A combined statistical and dynamical approach for downscaling large-scale footprints of European windstorms. *Geophysical Research Letters*.
- Hart, R. E. (2011). Ensemble WRF simulations of the 1938 New England Hurricane Using 20th Century Reanalysis. *24th Conference on Weather and Forecasting/20th Conference on Numerical Weather Prediction*. Seattle, WA.
- Holenstein, B. (1994). *Sturmschäden 1990 im Schweizer Wald*. Bern: BAFU.
- Imhof, M. (2011). *Analyse langfristiger Gebäudeschadendaten*. Interkantonaler Rückversicherungsverband IRV.
- Kain, J. (2004). The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, pp. 170–181.

- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., . . . Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, pp. 437-471.
- Lanz-Stauffer, H., & Rommel, C. (1936). *Elementarschäden und Versicherung: Studie des Rückversicherungsverbandes kantonal-schweizerischer Feuerversicherungsanstalten zur Förderung der Elementarschadenversicherung*. Bern: Im Selbstverlag des Rückversicherungsverbandes.
- Lin, Y.-L., Farley, R. D., & Orville, H. D. (1983). Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, pp. 1065–1092.
- Mellor, G. L., & T. Yamada. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical. *Rev. Geophys. Space Phys.*, pp. 851–875.
- Michaelis, A., & Lackmann, G. (2013). Numerical modeling of a historic storm: Simulating the Blizzard of 1888. *Geophys. Res. Lett.*, pp. 4092-4097.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, pp. 16663–16682.
- Monin, A. S., & Obukhov, A. (1954). Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci.*, pp. 163–187.
- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft. (2008). *Zwischen Hoch und Tief. Wetterrisiken in Mitteleuropa. Deutschland, Österreich, Schweiz, Tschechien, Slowakei, Slowenien, Norditalien. Edition Wissen*.
- Pfister, C. (1999). *Wetternachhersage: 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496-1995)*. Bern: Verlag Paul Haupt.
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., . . . Woollen, J. (2011). MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J. Clim.*, pp. 3624-3648.
- Saha, S. (2006). The NCEP Climate Forecast System. *Journal Climate*, pp. 3483-3517.
- Schiesser, H. H., Waldvogel, A., Schmid, W., & Willemse, S. (1997). *Klimatologie der Stürme und Sturmsysteme anhand von Radar- und Schadendaten, Schlussbericht*. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- Schulz. (2008). COSMO Newsletter No. 8.
- Schulz, J. P. (2008). Revision of the turbulent gust diagnostics in the cosmo model. *COSMO Newsletter Nr. 8*, pp. 17–22.
- Sheridan, P. (2011). *Review of techniques and research for gust forecasting and parameterisation*. Forecasting Research Technical Report 570, Met Office.
- sia. (2003). *SIA 261:2003 Einwirkungen auf Tragwerke*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.

- sia. (2006). *Wind - Kommentar zum Kapitel 6 der Normen SIA 261 und 261/1 (2003) Einwirkungen auf Tragwerke*. Zürich: sia.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M., . . . Powers, J. G. (2008). *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. NCAR Technical Note.
- Stucki, P., Brönnimann, S., Martius, O., Welker, C., Imhof, M., von Wattenwyl, N., & Philipp, N. (2014). A catalog of high-impact windstorms in Switzerland since 1859. *Nat. Hazards Earth System Sciences*.
- Uppala, S. M., KÅllberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Bechtold, V. D., Fiorino, M., . . . Woollen, J. (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, pp. 2961-3012.
- Usbeck, T., Wohlgemut, T., Dobbertin, M., Pfister, C., Bürg, A., & Rebetez, M. (2010). Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. *Agricultural and Forest Meteorology*, pp. 47-55.
- Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Pfister, C., Volz, R. B., & Dobbertin, M. (2010). Wind speed measurements and forest damage in Canton Zurich (Central Europe) from 1891 to winter 2007. *Int. J. Climatol.*, pp. 347–358.
- Wang, X. L., Wan, H., Zwiers, F. W., Swail, V. R., Compo, G. P., Allan, R. J., . . . Yin, X. (2011). Trends and low variability of storminess over western Europe, 1878-2007. *Clim. Dyn.*

4 Appendix

4.1 Ausgewählte Sturmperioden 1871 bis 2011

Start	Ende	Anzahl Stunden	Sturmtyp*
1875-11-07_06	1875-11-13_00	138	
1876-03-11_06	1876-03-14_00	66	
1879-02-19_06	1879-02-21_18	60	WS
1879-12-04_06	1879-12-06_18	60	WS
1882-10-26_06	1882-10-28_18	60	FS, WS
1885-11-25_06	1885-11-29_18	108	
1886-10-09_06	1886-10-12_00	66	FS, WS
1890-11-21_06	1890-11-25_00	90	
1895-12-05_06	1895-12-08_00	66	WS
1896-03-23_06	1896-03-26_00	66	
1896-10-27_06	1896-10-30_00	66	FS
1899-01-01_06	1899-01-04_00	66	WS
1899-01-10_06	1899-01-17_00	162	WS, FS
1900-02-12_06	1900-02-18_00	138	WS
1900-03-20_06	1900-03-23_00	66	FS
1900-12-05_06	1900-12-08_00	66	
1901-01-25_06	1901-01-31_00	138	WS
1901-10-05_06	1901-10-08_00	66	WS
1901-10-08_06	1901-10-11_00	66	
1902-01-30_06	1902-02-02_00	65	ES
1902-12-15_06	1902-12-21_00	138	SS
1907-02-19_06	1907-02-22_00	66	
1909-12-21_06	1909-12-24_18	84	WS
1910-01-17_06	1910-01-21_18	108	WS
1911-12-20_06	1911-12-23_18	84	WS
1912-01-04_06	1912-01-10_00	138	WS
1914-02-21_06	1914-02-24_00	66	FS
1914-10-28_06	1914-10-31_18	84	FS
1916-02-13_06	1916-02-19_00	138	WS
1919-01-03_06	1919-01-06_17	83	FS
1920-01-08_06	1920-01-16_00	144	WS
1921-01-17_06	1921-01-20_00	66	
1925-02-13_06	1925-02-16_08	74	WS, FS
1926-11-19_06	1926-11-22_00	66	FS
1928-11-23_06	1928-11-27_18	108	WS
1929-12-11_06	1929-12-14_00	66	WS
1930-11-01_06	1930-11-04_00	66	

1930-11-21_06	1930-11-24_18	84	WS
1934-01-14_06	1934-01-17_00	66	
1935-02-21_06	1935-02-25_00	84	WS
1935-11-30_06	1935-12-02_18	60	WS
1940-03-13_06	1940-03-16_00	66	
1952-11-06_06	1952-11-09_00	66	
1954-12-08_06	1954-12-10_18	60	FS
1954-12-20_06	1954-12-24_18	161	WS
1955-01-15_06	1955-01-19_00	90	SS
1955-12-29_06	1956-01-01_00	66	
1958-01-05_06	1958-01-09_00	90	WS
1962-11-06_06	1962-11-09_18	84	FS
1965-12-04_06	1965-12-07_00	66	
1966-03-26_06	1966-03-29_00	66	
1967-02-19_06	1967-02-26_00	162	WS
1967-02-26_06	1967-03-03_00	114	WS
1967-03-11_06	1967-03-17_00	138	
1971-12-19_06	1971-12-22_00	66	
1977-11-14_06	1977-11-17_00	66	
1978-12-30_06	1979-01-02_00	66	
1982-11-06_06	1982-11-09_19	85	FS
1982-12-09_06	1982-12-12_00	66	
1983-11-26_06	1983-11-29_00	66	WS
1984-01-14_06	1984-01-17_00	66	
1984-11-21_06	1984-11-27_00	138	
1987-10-09_06	1987-10-12_00	66	FS
1990-01-24_06	1990-01-27_00	66	
1990-02-12_06	1990-02-17_00	114	WS
1990-02-24_06	1990-02-28_18	108	WS
1992-10-23_06	1992-10-29_10	138	WS
1993-01-11_06	1993-01-14_00	66	
1993-12-20_06	1993-12-23_00	66	
1994-01-25_06	1994-01-29_13	103	WS
1995-01-24_06	1995-01-28_18	108	GS, SS, WS
1997-02-12_06	1997-02-14_15	57	GS
1999-12-11_06	1999-12-13_22	64	WS
1999-12-24_06	1999-12-28_18	108	WS
2002-01-26_06	2002-01-29_00	66	WS
2002-11-14_06	2002-11-17_00	66	FS
2003-01-01_06	2003-01-04_00	66	GS
2006-10-02_06	2006-10-05_00	66	
2007-01-17_06	2007-01-21_00	90	WS
2008-02-28_06	2008-03-03_00	84	WS

2009-01-22_06	2009-01-25_00	66	
2009-02-09_06	2009-02-12_00	66	WS
2011-12-14_06	2011-12-19_00	114	WS

* übernommen aus den historischen Quellen

4.2 Liste der SwissMetNet-Stationen

Stationsname	Einordnung nach Standortcharakteristika
Aigle	Tal
Altenrhein	Flachland
Amsoldingen	Tal
Bargen	Flachland
Bern / Zollikofen	Flachland
Boltigen	Tal
Bouveret	Tal
Buchs / Aarau	Flachland
Bullet / La Frêtaz	Berg
Cham	Flachland
Cimetta	Berg
Cressier	Flachland
Delémont	Flachland
Disentis / Sedrun	Tal
Egolzwil	Flachland
Evionnaz	Tal
Evolène / Villa	Tal
Fahy	Flachland
Gütsch ob Andermatt	Berg
Güttingen	Flachland
Genève-Cointrin	Flachland
Giswil	Tal
Glarus	Tal
Gornergrat	Berg
Grenchen	Flachland
Interlaken	Tal
Jungfraujoch	Berg

La Dôle	Berg
Le Chenit	Flachland
Les Diablerets	Berg
Lodrino	Tal
Möhlín	Flachland
Method	Flachland
Monte Generoso	Berg
Naluns / Schlivera	Berg
Nyon / Changins	Flachland
Oberägeri	Flachland
Payerne	Flachland
Pilatus	Berg
Piotta	Tal
Piz Martegnas	Berg
Plaffeien	Flachland
Poschiavo / Robbia	Tal
Pully	Flachland
Quinten	Tal
RünenBerg	Flachland
Robiei	Berg
Samedan	Tal
Schüpfheim	Tal
Schmerikon	Flachland
Scuol	Tal
Stabio	Flachland
Steckborn	Flachland
St-Prex	Flachland
Ulrichen	Tal
Vaduz	Tal
Valbella	Tal
Visp	Tal
Weissfluhjoch	Berg
Wynau	Flachland
Zürich / Affoltern	Flachland
Zürich / Kloten	Flachland
Zermatt	Tal