



Vorstudie zur Erstellung hochaufgelöster Sturmgefährdungskarten

Technischer Bericht

Impressum

Auftraggeber und Kontaktpersonen	SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (Giuseppe Martino), Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen (Martin Jordi), Gebäudeversicherung Kanton Bern (Pierre Vanomsen)
Datum	02.07.2025
Aktuelle Version	Schlussbericht
Ältere Versionen	-
Projekt	wm_sturmkarte_vorstudie_24
Datei	Schlussbericht_Vorstudie_Sturmgefaehrdungskarte_MT_EcoEng
Erstellt durch	Meteotest (Kap 2-7; 13): Lukas Meyer, Jérôme Kopp, Brandon Van Schaik, Eric Matti, Sara Koller EcoEng (Kap 8-12): François Houriet, Iacopo Aiolfi, Federico Ferrario
Kontrolliert durch	03.07.2025 Sara Koller und Federico Ferrario
Genehmigt durch	03.07.2025 Beat Schaffner
Gewährleistung	Meteotest gewährleistet ihren Kunden eine sorgfältige und fachgerechte Auftragsbearbeitung. Jegliche Haftung, insbesondere auch für Folgeschäden, wird im Rahmen des gesetzlich Zulässigen wegbedungen.

Zusammenfassung

Die aktuell verfügbare Sturmkarte mit einer Auflösung von 3 km ist für eine präzise Einschätzung des Sturmrisikos auf Gebäudeebene unzureichend. Detailinformationen zu Böen, die stark von kleinräumiger Topografie, Bebauung und Vegetation beeinflusst werden, fehlen. Eine höhere Auflösung ist notwendig, um das Schadenspotenzial des Gebäudebestands systematisch abzuschätzen und gezielte Schutzmassnahmen sowie Beratungen für Kunden zu ermöglichen. Ziel dieser Vorstudie war es daher, die am besten geeigneten Methoden zur Modellierung von Sturmgefährdungskarten in Auflösungen von 100 m und 2 m zu identifizieren.

Wir haben in der Vorstudie verschiedene physikalische (WRF, PALM) und statistische (Wind-Topo, Windrefine) Downscaling-Modelle anhand des Sturms Lothar als Fallbeispiel evaluiert. Die Resultate zeigen klar, dass eine hochaufgelöste Modellierung von Böenspitzen mit guter Genauigkeit möglich ist.

Basierend auf der detaillierten Evaluation von Ergebnisqualität und Machbarkeit (insbesondere Rechenzeit und benötigte Ressourcen) konnten wir zwei vielversprechende Verfahren bzw. Modellketten für unterschiedliche Anwendungsbereiche identifizieren:

- **Grossflächige Sturmgefährdungskarten** (100 m Auflösung, einzelne Kantone oder ganze Schweiz): Hierfür eignet sich ein statistisches Downscaling mit dem Modell Windrefine. Dieses Machine-Learning basierte Modell, eine Weiterentwicklung von Wind-Topo, ist darauf ausgelegt, Böenspitzen effizient und mit guter Genauigkeit zu berechnen. Die Rechenzeiten sind im Vergleich zu physikalischen Modellen für grosse Gebiete sehr gering.
- **Gebäudeauflösende Sturmmodellierungen** (2 m Auflösung, lokale Gebiete): Für detaillierte Analysen einzelner Gebäude oder kleinerer Gebiete ist die physikalische Modellierung mit der Modellkette COSMO/ICON – WRF – PALM das geeignete Verfahren. PALM, als Large Eddy Simulation Modell, ermöglicht die realistische Abbildung kleinräumiger Turbulenzen und Strömungen im bebauten und topografisch komplexen Gelände. Diese Methode liefert hochdetaillierte und physikalisch konsistente Ergebnisse, ist aber aufgrund des hohen Rechenaufwands nur für lokale Anwendungen praktikabel.

Die Vorstudie hat erfolgreich gezeigt, dass hochwertige Resultate bei der hochaufgelösten Sturmmodellierung erzielt werden können und liefert eine klare Empfehlung für die jeweils besten Methoden für die grossflächige und die lokale Anwendung.

Wir sehen in den identifizierten Verfahren ein vielversprechendes weiteres Vorgehen und empfehlen auf dieser Grundlage die Umsetzung zur Erstellung von kantonalen oder einer schweizweiten Sturmgefährdungskarte.

L'analyse des dangers et l'évaluation des risques se sont structurées en deux volets, selon la source des données d'intensité du vent disponible : d'une part, la zone test de Pully, où les simulations haute résolution de la tempête Lothar ont permis de calculer précisément les pressions exercées sur les façades ; d'autre part, le canton de Vaud, étudié à partir de quatorze épisodes tempétueux (entre 2010 et 2014) et sur la base des données historiques des stations météorologiques.

À Pully, le croisement des pressions contre les façades avec les sinistres et les caractéristiques du bâtiment (surface des façades, valeur assurée) n'a pas mis en évidence de corrélation fiable, en raison du faible nombre de sinistres dans le secteur. Même si malheureusement la disponibilité limitée n'a pas permis de trouver des corrélations statistiques pertinentes. La méthodologie appliquée est considérée comme positive et il serait souhaitable de l'appliquer dans un ou deux secteurs supplémentaires, où des tempêtes ont causé plus dégâts, afin de pouvoir trouver des corrélations plus pertinentes.

En revanche, à l'échelle cantonale, l'analyse d'un volume plus important de sinistres a permis de mettre en évidence plusieurs tendances. Les dommages compris entre 1'000 et 5'000 CHF prédominent, tant en nombre qu'en valeur cumulée. Les bâtiments assurés entre 1'000'000 et 5'000'000 CHF concentrent la majorité des dommages totaux. La valeur moyenne des dédommagements n'augmente pas de manière linéaire avec la valeur assurée des immeubles. Effectivement, les bâtiments appartenant aux classes de valeur inférieure à 500'000 CHF présentent des dommages moyens relativement élevés. Les analyses montrent aussi que la présence d'un toit plat ou d'un avant-toit constitue un facteur de vulnérabilité significatif.

Concernant l'influence de la vitesse et de la direction du vent, une augmentation marquée de la fréquence des sinistres est observée pour des rafales au-delà de 15 m/s. En revanche, la gravité moyenne des dommages n'évolue pas de manière significative avec la vitesse du vent. Enfin, l'orientation moyenne du vent ne s'est pas révélée comme un facteur déterminant dans la survenue ou la sévérité des sinistres.

Inhalt

1	Einleitung	8
2	Downscaling mit WRF	11
2.1	Modellsetup und dynamische Inputdaten	11
2.1.1	1 km aufgelöste WRF-Simulation	11
2.1.2	100 m aufgelöste WRF-Simulation	13
2.1.3	Parametrisierung des WRF-Modells	15
2.2	Interpretation des Outputs der WRF-Modellierung	15
2.2.1	Parametrisierung der Böen des WRF-Outputs	16
2.3	Resultate	16
2.3.1	1 km aufgelöste WRF-Simulation	16
2.3.2	100 m aufgelöste WRF-Simulation	17
2.4	Diskussion der Resultate und Effizienz der Modellierung	20
3	Downscaling mit PALM	22
3.1	Modellsetup und dynamische Eingangsdaten	22
3.1.1	Statische Eingangsdaten	25
3.2	Resultate	26
3.2.1	Windrichtung in PALM bei maximaler Windgeschwindigkeit	29
3.3	Diskussion der Resultate und Effizienz der Modellierung	30
4	Statistisches Downscaling mit dem Modell Wind-Topo	32
4.1	Evaluationssetup und dynamische Inputdaten	32
4.1.1	Evaluation von Wind-Topo mit 50 m Auflösung unter Verwendung von ICON-1 als Input	33
4.1.2	Evaluation von Wind-Topo mit 100 m Auflösung unter Verwendung von WRF 1 km als Input während des Sturms Lothar	34
4.1.3	Statische Eingangsdaten	35
4.2	Resultate	35
4.2.1	Wind-Topo mit 50 m Auflösung unter Verwendung von ICON-1 als Input	35
4.2.2	Wind-Topo mit 100 m Auflösung unter Verwendung von WRF 1 km als Input während des Sturms Lothar	37
4.2.3	Diskussion der Resultate und Effizienz des Modells	40
5	Statistisches Downscaling mit Windrefine	42
5.1	Evaluationssetup und dynamische Eingangsdaten	42
5.1.1	Statische Eingangsdaten	43
5.2	Resultate	43
5.2.1	Diskussion der Resultate und Effizienz des Modells	45
6	Zusammenfassender Vergleich der Modelle WRF, PALM, Wind-Topo und Windrefine	46

7	Schlussfolgerung und Empfehlung für die Sturmmodellierungen.....	50
7.1	Hochdetaillierte Sturmberechnungen	51
7.2	Grossflächige Sturmgefährdungskarten	52
8	Méthodologie pour une carte de danger et analyse de risque.....	53
9	Données disponibles	54
9.1	Données des bâtiments	54
9.2	Données de vent.....	56
9.3	Données des sinistres.....	57
10	Détermination des intensités	58
10.1	Zone test de Pully	58
10.2	Canton de Vaud.....	63
11	Analyse de risque	64
11.1	Zone test de Pully	64
11.2	Canton de Vaud.....	65
11.2.1	Valeurs des dédommagements	67
11.2.2	Valeurs des bâtiments sinistrés	70
11.2.3	Vitesse des rafales	71
11.2.4	Direction moyenne du vent	76
11.2.5	Sensibilité en fonction des caractéristiques des bâtiments	77
12	Conclusion pour l'analyse des dangers et des risques	79
13	Anhang	80
13.1	Fehlermetriken.....	80
13.2	Extremwertanalyse	81

Abkürzungen

ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CORINE	Coordination of Information on the Environment
COSMO-1	Consortium for Small-scale Modeling
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA5	ECMWF Reanalyse 5
ICON-1	Icosahedral Nonhydrostatic - Modell 1
IMIS	Interkantonales Mess- und Informationssystem

MAE	Mean Absolute Error
MBE	Mean Bias Error
MM5	MM5 Monin-Obukhov Model
PALM	Parallelized Large-Eddy Simulation Model
POT	Peaks-Over-Threshold
RRTM	Rapid Radiative Transfer Model
SMN	SwissMetNet (Bodenstations-Messnetz der MeteoSchweiz)
USGS	United States Geological Survey
UTC	Coordinated Universal Time
WRF	Weather Research and Forecasting Model
YSU	Yonsei-University-Schema

1 Einleitung

Im Bereich des Naturgefahrenmanagements wird für die Beurteilung eines Risikos auf hochaufgelöste Gefährdungskarten zurückgegriffen. So gibt es beispielsweise für gravitative Gefahren oder Gefahr durch Oberflächenabfluss hochaufgelöste Risikokarten, welche rege genutzt werden. Bezüglich Sturmgefahren besteht eine Sturmkarte¹ mit einer Auflösung von 3 km. Dies ist zu wenig detailliert um die Exposition und damit das Schadenspotenzial des Gebäudebestands systematisch abzuschätzen.

Windströmungen und damit auch Starkwindereignisse hängen sehr stark von der kleinräumigen Topografie und der Oberflächenbeschaffenheit (Bebauung, Vegetation usw.) ab. Es können daher auf der Grundlage der existierenden Sturmkarte keine detaillierten Aussagen zur Gefährdung und damit keine spezifischen Schutzmassnahmen für Gebäude (Ausrichtung, Besonderheit des Objekts, Positionierung im Verhältnis zu anderen Gebäuden etc.) empfohlen werden. Mit Informationen über die lokale Gefährdung könnten Risiken besser beziffert und Fachpersonen der Prävention ihre Beratung und Leistungen für die Kundschaft gezielter gestalten.

Für die Planung einer neuen, besser geeigneten Sturmgefährdungskarte ist die Festlegung der räumlichen Auflösung entscheidend:

- Eine sehr hoch aufgelöste Karte, welche den Effekt der Strömung auf Einzelgebäude abbildet, ist sehr aufwändig, hat aber einen sehr hohen und spezifischen Informationsgehalt. Um selbst kleinere Gebäude und schmale Strassen korrekt abbilden zu können, bräuchte es eine räumliche Auflösung von 2 m.
- Um eine Übersicht über grössere Regionen zu erhalten, reicht eine Auflösung von 100 m. Einzelgebäude werden dabei aber nicht berechnet.

Als Beispiel zur Visualisierung des Detaillierungsgrades der Topografie ist in der Abbildung 1 ein kleines Gebiet (0.7x0.7 km) mit den beiden Auflösungen 2 m und 100 m und ein grösseres Gebiet (6x6 km) mit denselben Auflösungen dargestellt. Im 2 m aufgelösten Gebiet sind kleinste Details wie Hänge und Gräben klar ersichtlich, während im 100 m aufgelösten Gelände lediglich grobe Variationen in der Höhe erkennbar sind.

1

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/verkehrgrundlagen/verkehrgrundlagen/karten-der-sturmgefaehrdung.html>

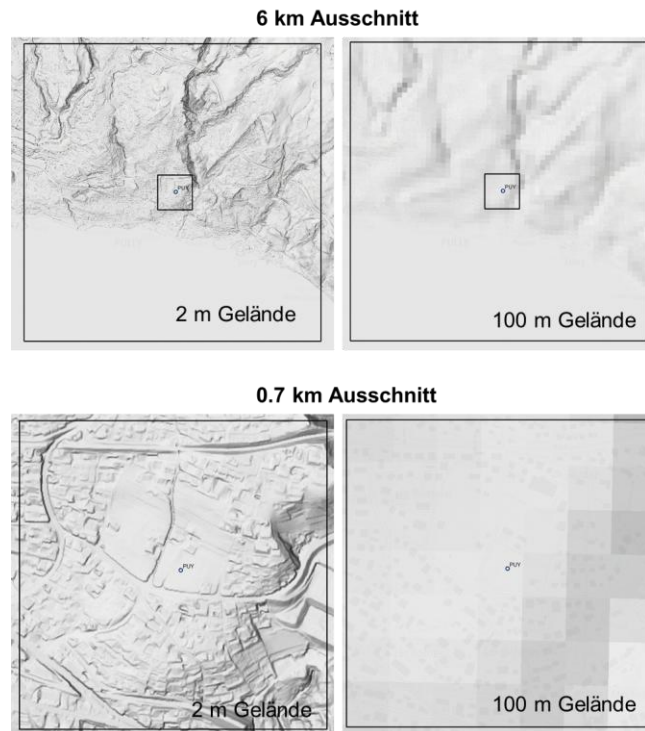


Abbildung 1: Ausschnitte einer Geländekarte (hillshade) ohne Gebäude auf die SwissMetNet -Station Pully zentriert. Oben ein grösserer Ausschnitt von 6x6 km und unten ein 0.7x0.7 km grosser Ausschnitt. Links ist das Gelände mit 2 m und rechts mit 100 m aufgelöst.

Das Ziel dieser Vorstudie ist es, die für die Zielsetzung am besten geeignete Methode für die Modellierung von Sturmgefährdungskarten in den Auflösungen 2 m und 100 m zu identifizieren. Als Fallbeispiel wurde der Sturm Lothar vom 26.12.1999 und als Testgebiet das Gebiet um die SwissMetNet-Station Pully der MeteoSchweiz bestimmt. Als Resultat der Vorstudie werden eine 2 m und eine 100 m aufgelöste Karte der Böenspitzen des Sturms Lothar im Testgebiet Pully erstellt. So können sich die Gebäudeversicherungen ein Bild der Möglichkeiten von Sturmgefährdungskartenmodellierungen machen und erhalten eine Grundlage für eine Entscheidung zum weiteren Vorgehen bezüglich hochaufgelöste Sturmgefährdungskarte.

In den Kapiteln 2 (Wettermodell WRF), 3 (Large Eddy Simulation Modell PALM), 4 (statistisches Modell Wind-Topo) und 5 (statistisches Modell Windrefine) folgt die Präsentation der in der Vorstudie geprüften Modelle und deren Resultate. In Kapitel 6 werden die Resultate der verschiedenen Modelle miteinander verglichen. Kapitel 13.2 enthält die Extremwertanalyse zur Schätzung extremer Böen mit der jeweiligen Jährlichkeit ihres Auftretens. Schliesslich werden in Kapitel 7 die empfohlenen Verfahren für die Erstellung von 2 m und 100 m aufgelösten Sturmgefährdungskarten erläutert.

Introduction sur l'analyse des dangers et sur l'évaluation des risques

Le projet vise à combler un manque majeur en Suisse concernant la gestion des risques liés aux vents forts, en particulier les tempêtes, en développant une carte d'aléa précise à l'échelle du bâtiment. Actuellement, il n'existe pas de données détaillées permettant d'estimer l'exposition et le potentiel de dommage des bâtiments face aux rafales, ce qui limite la prévention et la conception adaptée des infrastructures.

Les tempêtes représentent une part importante des sinistres et des coûts assurantiels, mais l'absence de données précises empêche une gestion efficace des risques.

Une méthodologie d'interprétation de ces données sera développée pour permettre aux experts et acteurs de la construction d'évaluer les risques spécifiques aux bâtiments, améliorer la prévention, et mieux sensibiliser les propriétaires. Les résultats sont intégrés dans des systèmes géographiques (SIG) accessibles aux autorités cantonales et aux professionnels.

L'analyse des dangers et l'évaluation des risques se sont structurées en deux volets, selon la source des données d'intensité du vent disponible : d'une part, la zone test de Pully, où les simulations haute résolution de la tempête Lothar ont permis de calculer précisément les pressions exercées sur les façades ; d'autre part, le canton de Vaud, étudié à partir de quatorze épisodes tempétueux (entre 2010 et 2014) et sur la base des données historiques des stations météorologiques.

2 Downscaling mit WRF

Das Weather Research and Forecasting (WRF) Model ist ein numerisches Wettervorhersagemodell im mesoskaligen Bereich (1 km bis mehrere 100 km), das sowohl für die atmosphärische Forschung als auch für operationelle Wettervorhersagen entwickelt wurde. Dank seiner multiskaligen Modellierungsmöglichkeiten erlaubt WRF die präzise Verfeinerung von Wettervorhersagen durch die Nutzung von verschachtelten Domains (Nesting). Dieses Downscaling ist besonders nützlich für die Analyse von regionalen Wetterphänomenen und deren Wechselwirkungen mit grossräumigen atmosphärischen Prozessen.

In der Vorstudie werden als Initial- und Randbedingung für das Antreiben des Modells WRF die Reanalyse des globalen Wettermodells ECMWF ERA5 (rund 31 km Auflösung) verwendet². Mit WRF wird der Sturm Lothar der ERA5 Reanalyse auf die beiden Auflösungsstufen 1 km und 100 m verfeinert. Die 1 km aufgelöste Simulation umfasst die ganze Schweiz, die 100 m aufgelöste Modellierung ist auf die Region um Pully fokussiert und deckt die beiden SwissMetNet (SMN) Stationen Pully und Oron ab, welche später für die Validierung der Modellergebnisse verwendet werden.

Die 1 km aufgelöste WRF-Simulation wird zudem für den Antrieb der PALM-Simulation (Kapitel 3) und für das statistische Downscaling mit Wind-Topo (Kapitel 4) verwendet. Die 100 m aufgelöste WRF-Simulation wird einerseits ebenfalls für den Antrieb der PALM-Simulation verwendet, aber auch direkt als Zwischenresultat für die Sturmgefährdungskarte.

2.1 Modellsetup und dynamische Inputdaten

2.1.1 1 km aufgelöste WRF-Simulation

Die 1 km aufgelöste Simulation ist in einem Downscaling mit zwei verschachtelten Gebieten mit horizontaler Auflösung von 5 km (d01) und 1 km (d02) und jeweils 40 vertikalen Levels bis zu einer Höhe von 100 hPa aufgesetzt. Die Abbildung 2 zeigt die Ausdehnungen der zwei Modellgebiete. Um der Strömung zu erlauben, sich zu entwickeln, wurden die zwei Domänen mit einer Vorlaufzeit von 27 respektive 9 Stunden gestartet. Der gesamte simulierte Zeitraum am 26.12.1999 für das Gebiet d02 ist von 03:00 bis 15:00 UTC. Für die Topografie und die Landnutzung werden das Höhen- und Landnutzungsmodell USGS 30s³ verwendet.

² Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 2024-12-11, <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets>

³ Numerisches Geländemodell des US Geological Survey (USGS) mit einer Auflösung von 30 Bogensekunden (etwa 1 km am Äquator)

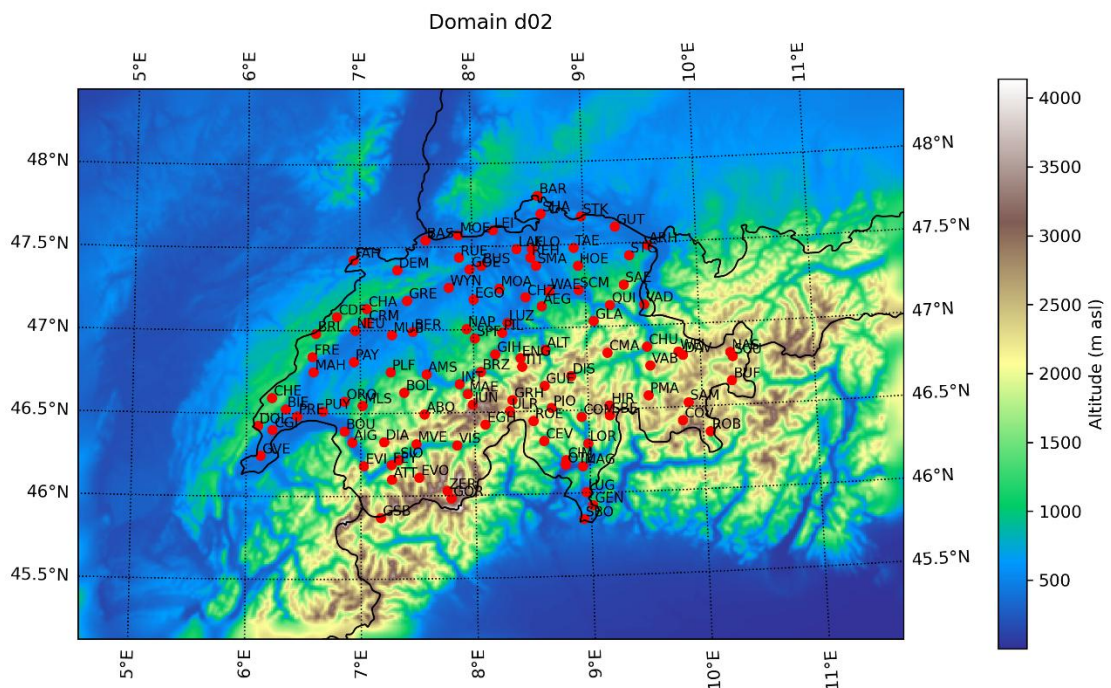
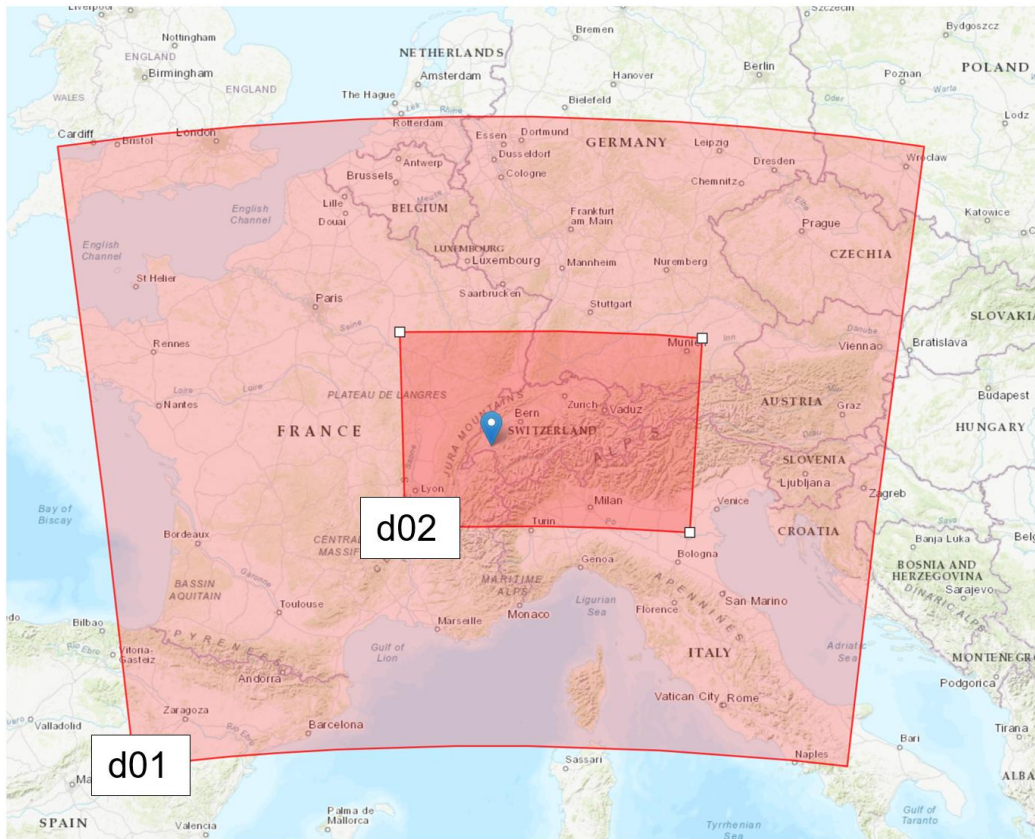


Abbildung 2: Oben: Ausschnitte des WRF-Downscalings (Gebiet d01 und d02). Die SMN-Station Pully ist blau markiert. Unten: alle SMN-Stationen, die während des Sturms Lothar über Daten verfügen und im Gebiet d02 liegen.

2.1.2 100 m aufgelöste WRF-Simulation

Die 100 m aufgelöste Simulation ist in einem Downscaling mit vier verschachtelten Gebieten mit den horizontalen Auflösungen 4.5 km (d01), 1.5 km (d02), 500 m (d03) und 100 m (d04) aufgesetzt. Die Gebiete d01 bis d03 haben 40 vertikale Levels, das Gebiet d04 60. In beiden Fällen decken sie eine Höhe von 100 hPa ab. Der Mittelpunkt aller Gebiete liegt in Pully bei 46.51° N / 6.67° E. Die Abbildung 3 zeigt die Ausdehnungen der vier WRF-Modellgebiete.

Für die Topografie und die Landnutzung werden das Höhenmodell ASTER⁴ und das Landnutzungsmodell CORINE⁵ verwendet. Die ASTER und CORINE Daten für die Schweiz wurden für WRF speziell aufbereitet⁶. Die Auflösung der Bodendaten beträgt etwa 30 m. Auf die Topografie wurde eine leichte Glättung angewendet.

Um der Strömung zu erlauben, sich zu entwickeln, wurden die drei Gebiete mit einer Vorlaufzeit von 27, 9, 3 bzw. 1 Stunden vor dem Beginn der intensivsten Phase des Sturms Lothar in der Schweiz (7 UTC) gestartet. Der simulierte Zeitraum für das Gebiet d04 ist von 7 bis 14 UTC.

⁴ NASA/METI/AIST/JAPAN Spacesystems and U.S./Japan ASTER Science Team. (2019). *ASTER Global Digital Elevation Model V003*. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. doi:10.5067/ASTER/ASTGTM.003

⁵ European Environmental Agency. (2006). *CORINE Land Cover (CLC) 2006 raster data, Version 13*. Von <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/clc-2006-raster> (downloaded: 2016-06-15) abgerufen

⁶ Gerber, F., & Lehning, M. (2021). *High resolution static data for WRF over Switzerland*. Davos: EnviDat. doi:10.16904/envidat.233

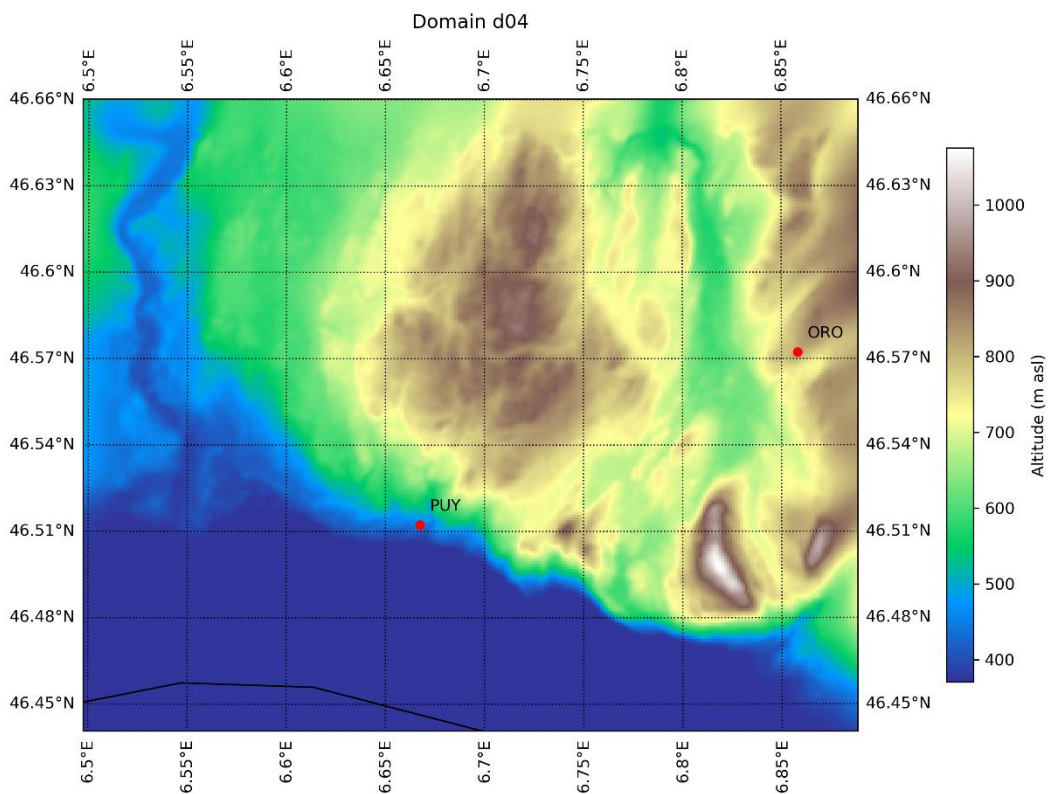
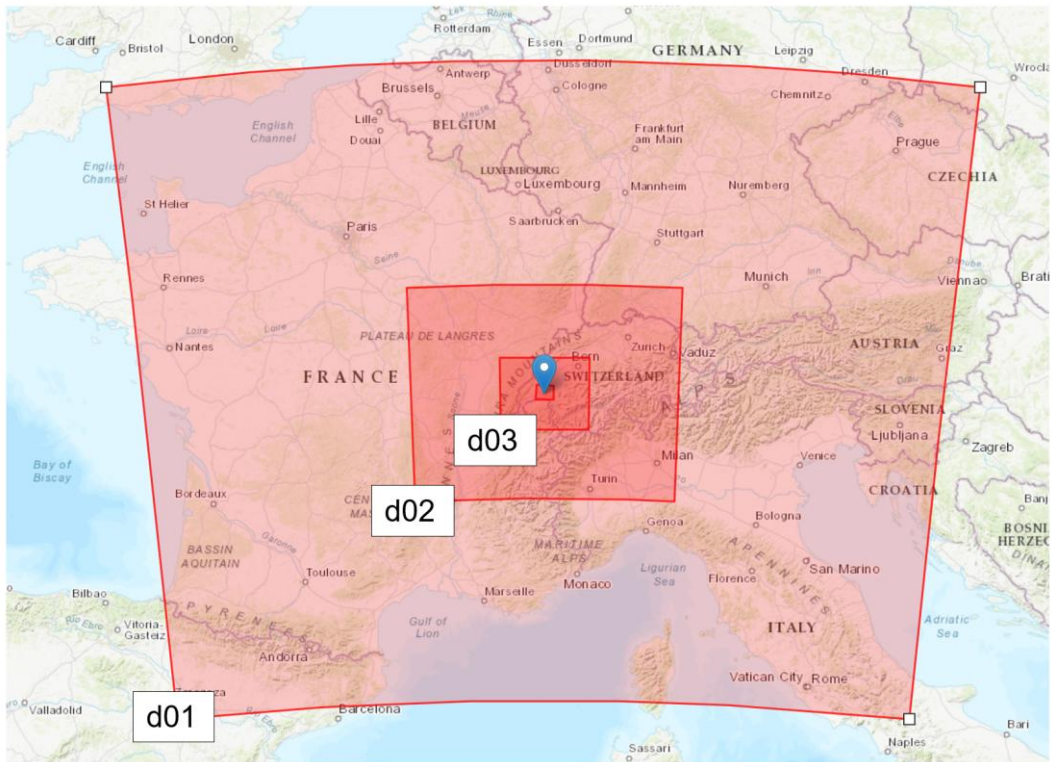


Abbildung 3: Oben: Ausschnitte des WRF-Downscalings (Gebiet d01 bis d04). Die SMN-Station Pully ist blau markiert. Unten: Ausschnitt des Gebiets d04 mit den Validierungsstationen (PUY: Pully, ORO: Oron)

2.1.3 Parametrisierung des WRF-Modells

Nicht berechnete Prozesse werden in WRF parametrisiert. Für Turbulenzen innerhalb der Gitterzellen wird das horizontale Smagorinsky Turbulenzschließungsschema erster Ordnung verwendet. Für die kurz- und langwellige Strahlung wurden das Dudhia Shortwave Schema⁷ bzw. das RRTM Longwave Schema⁸ benutzt. Die Verbindung zwischen der Erdoberfläche und der Atmosphäre wird durch das Noah Landoberflächenmodell parametrisiert⁹ während für die oberflächennahe Grenzschicht der Atmosphäre das MM5 Monin-Obukhov Modell¹⁰ verwendet wird. Niederschlag ist mit dem WRF single-moment 6-class Mikrophysikschema parametrisiert¹¹.

Die planetare Grenzschicht ist mit dem Yonsei-University-Schema (YSU)¹² parametrisiert. Das YSU-Schema wird als eines der Verfahren angesehen, welches die besten Leistungen über komplexem Gelände zeigen¹³. Für das Gebiet mit einer Auflösung von 100 m ersetzt eine explizite Berechnung der größten Wirbel (Large Eddy Simulation) das YSU-Schema, um repräsentativere Windfelder zu erhalten. Aufgrund der hohen Auflösung der Simulationen wurde keine Parametrisierung für Cumuluswolken aktiviert.

2.2 Interpretation des Outputs der WRF-Modellierung

Die mit WRF berechneten Windgeschwindigkeiten und -richtungen sind Werte, die mit einem bestimmten Intervall extrahiert werden und der Windgeschwindigkeit respektive -richtung zu diesem Zeitpunkt (Zeitschritt) entsprechen¹³. Bei einer Simulation mit einer Auflösung von 100 m beträgt der Zeitschritt 0.1 Sekunden. Diese Instantanwerte können aufgrund der nicht expliziten Berechnung der

⁷ Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of Atmospheric Sciences*, S. 3077-3107. doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2

⁸ Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research*, S. 16663-16682. doi:10.1029/97JD00237

⁹ Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M. A., Mitchell, K., . . . Cuenca, R. (2004). Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, S. 11-15.

¹⁰ Jimenez, P., Dudhia, J., Gonzalez-Ruoco, J. F., Navarro, J., Montavez, J. P., & Garcia-Bustamante, E. (2012). A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Monthly Weather Review*, S. 898-918. doi:10.1175/MWR-D-11-00056.1

¹¹ Hong, S.-Y., & Lim, J.-O. J. (2006). The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, S. 129-151.

¹² Hong, S.-Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, S. 2318-2341. doi:10.1175/MWR3199.1

¹³ Gómez-Navarro, J. J., Raible, C. C., and Dierer, S.: Sensitivity of the WRF model to PBL parametrisations and nesting techniques: evaluation of wind storms over complex terrain, *Geosci. Model Dev.*, 8, 3349–3363, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3349-2015>, 2015.

Turbulenz (Parametrisierung) bei WRF nicht direkt mit den 10-Minuten-Mittelwerten und 1-Sekunden-Böen verglichen werden, die an den SMN-Stationen gemessen werden. Sie müssen deshalb auf die gewünschte Zeitaufösung korrigiert werden.

2.2.1 Parametrisierung der Böen des WRF-Outputs

Eine Böe ist eine kurzzeitige Windgeschwindigkeit. Böen sind mit turbulenten Wirbeln in der Atmosphäre verbunden, die durch thermische oder mechanische Prozesse ausgelöst werden können. Da diese turbulenten Wirbel im WRF-Modell nicht explizit simuliert werden können, werden sie parametrisiert. Es existieren mehrere Methoden für Parametrisierungen. Wir verwenden in der Vorstudie diejenige, welche ebenfalls in der bestehenden Version der Karten der Sturmgefährdung¹⁴ eingesetzt wurde:

$$WR F_{10min} Böe = WR F_{10min} inst + (3 * 2.4 * u_*)$$

Die $WR F_{10min} Böe$ (die stärkste Böe auf 10 m über Grund während des Zeitraums 10 Minuten) wird als Kombination aus dem instantanen Wert auf 10 m über Grund $WR F_{10min} inst$ und der Turbulenz im bodennahen Bereich, die durch die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* repräsentiert wird, berechnet. Die Schubspannungsgeschwindigkeit ist ein Mass für den turbulenten Transport. Die Stärke der Böe wird hier durch die bodennahen Prozesse bestimmt und weniger durch den Wind in grösseren Höhen.

2.3 Resultate

Die Validierung erfolgt durch einen Vergleich der modellierten Windgeschwindigkeiten, Böen und Windrichtungen auf 10 m Höhe über Grund mit den ebenfalls auf 10 m über Grund gemessenen Winddaten der SMN-Stationen. Für die Validierung werden die Werte des nächstgelegenen WRF-Gitterpunkts zu jeder Station verwendet.

2.3.1 1 km aufgelöste WRF-Simulation

Für die Validierung der Modellresultate wurden der Mean Bias Error (MBE), der Mean Absolute Error (MAE)¹⁵ und die zeitliche Korrelation an jeder der 101 SMN-Stationen berechnet. Die Verteilung der Werte wird in Abbildung 4 dargestellt.

¹⁴ https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/fachinfo-daten/karten_der_sturmgefaehrunginderschweiz.pdf.download.pdf/karten_der_sturmgefaehrunginderschweiz.pdf

¹⁵ Siehe Anhang Fehlermetriken für Details zu Mean Bias Error (MBE) und Mean Absolute Error (MAE).

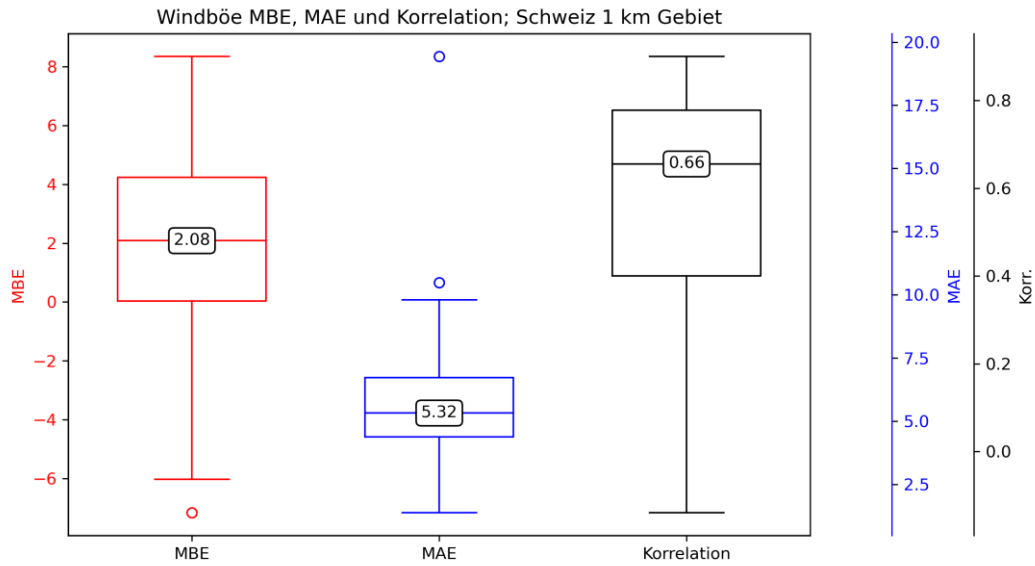


Abbildung 4: Verteilung der MBE- und MAE-Werte sowie der zeitlichen Korrelationen (Korr) der Windböen in 10 m Höhe über Grund an den 101 SMN-Stationen für die 1 km aufgelöste WRF-Simulation.

2.3.2 100 m aufgelöste WRF-Simulation

Im Gebiet der 100 m aufgelösten Simulation waren während des Sturms Lothar die SMN-Stationen Pully (PUY) und Oron (ORO) in Betrieb. Ein Vergleich der Zeitreihen der Windgeschwindigkeit, Böe und Windrichtung für beide Stationen ist in den Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellt.

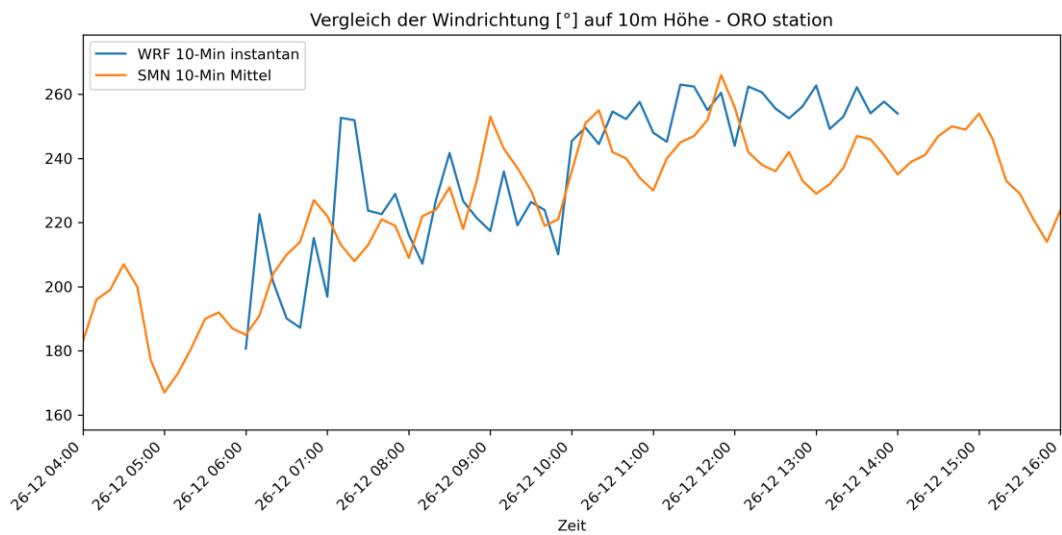
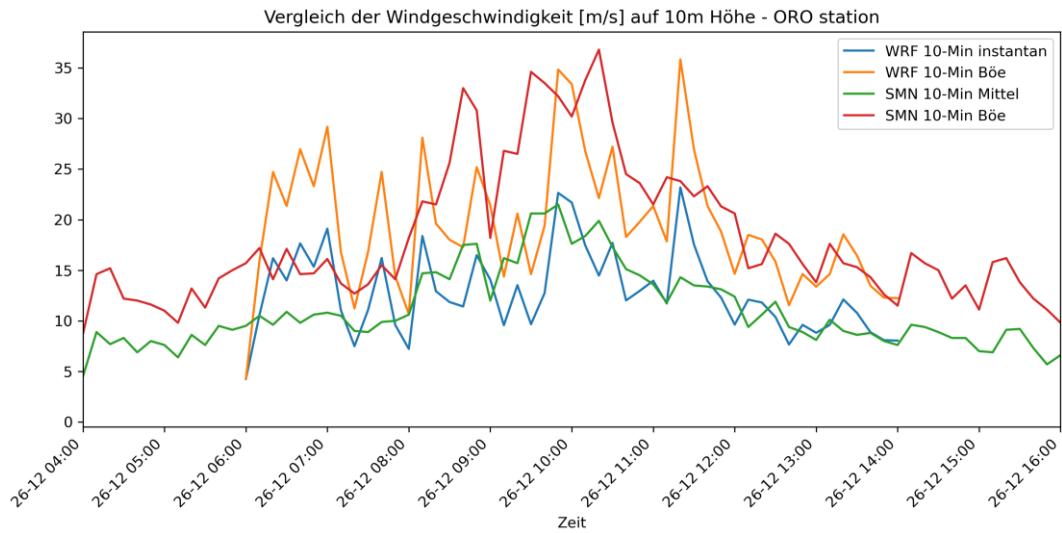


Abbildung 5: Vergleich der Windgeschwindigkeit, Böe und Windrichtung in 10 m Höhe über Grund.

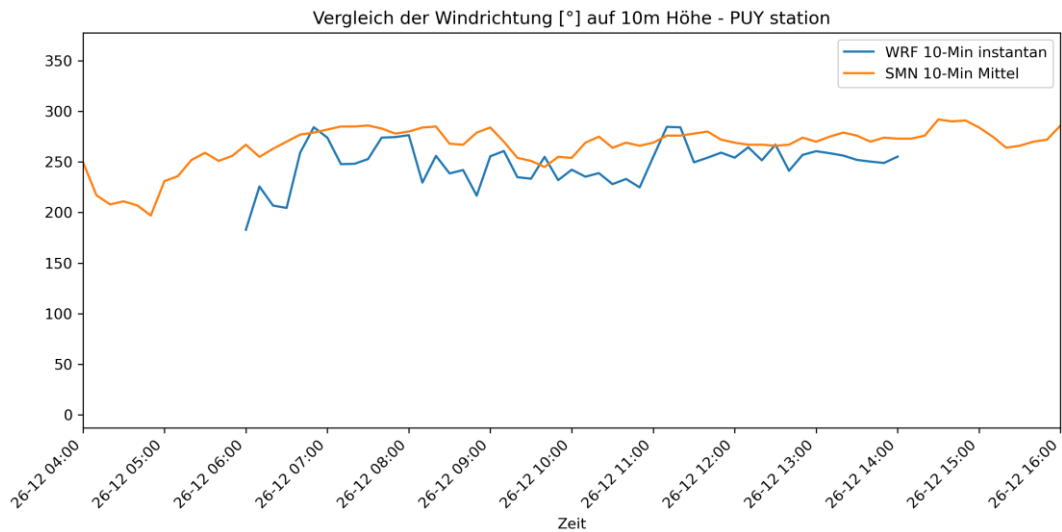
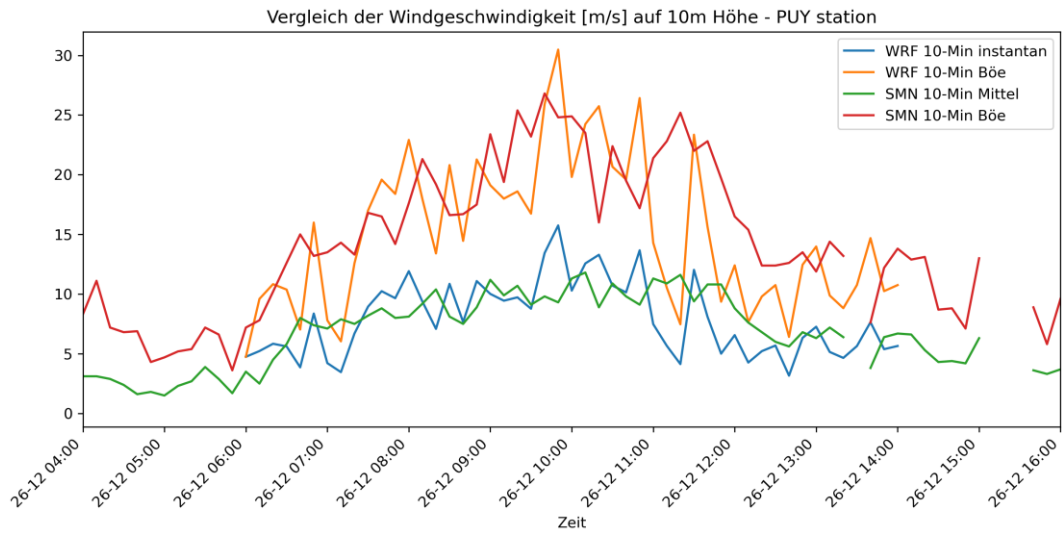


Abbildung 6: Vergleich der Windgeschwindigkeit, Böe und Windrichtung in 10 m Höhe über Grund.

Die Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der maximalen Böen, welche während des Sturms Lothar an den Stationen Pully und Oron gemessen wurden, und den modellierten und korrigierten Böen der 100 m aufgelösten Simulation mit WRF.

Tabelle 1: Vergleich der maximalen Böen an den Stationen Pully und Oron mit den modellierten und korrigierten Böen der 100 m aufgelösten WRF-Simulation im Zeitraum von 04:00 UTC bis 16:00 UTC.

Station	SMN 10-Min Böe [m/s]	WRF 10-Min Böe [m/s]	Unterschied WRF – SMN [m/s]
Pully	26.8 (9:40 UTC)	30.5 (9:50 UTC)	3.7
Oron	36.8 (10:20 UTC)	35.8 (11:20 UTC)	-1.0

2.4 Diskussion der Resultate und Effizienz der Modellierung

Die Analyse der 1 km aufgelösten Simulation zeigt, dass das WRF-Modell die Windböe in 10 m Höhe tendenziell überschätzt (positiver medianer MBE von 2.08 m/s). Der mediane MAE beträgt etwa 5.3 m/s. Ein MAE von 5 m/s für die Windböe entspricht einem relativen Fehler von 33 %, wenn die Windgeschwindigkeit 15 m/s beträgt, und von 25 %, wenn sie 20 m/s beträgt. Dies stellt eine relativ hohe Unsicherheit dar. Diese Ergebnisse stimmen mit mehreren Studien überein, die gezeigt haben, dass WRF die Windgeschwindigkeit in Bodennähe überschätzt^{13,16,17,18}.

Diese Überschätzung ist zu einem grossen Teil auf die Auflösung der verwendeten Topografie zurückzuführen, welche Berge und Täler glättet, wodurch natürliche Hindernisse und damit Bremseffekte für den Wind abgeschwächt werden.

Dieser Zusammenhang wird durch die 100 m aufgelöste Modellierung bestätigt, welche geringere Windgeschwindigkeiten als die 1 km aufgelöste Simulation zeigt und damit viel näher an den Messwerten der SMN-Stationen liegt. Die Geländeauflösung beträgt bei der 1 km aufgelösten Modellierung etwa 1 km, während sie bei der 100 m aufgelösten Modellierung etwa 30 m aufweist.

Es ist möglich, diesen positiven Bias zu korrigieren, beispielsweise durch „Nudging“, eine Technik, bei der während der Simulationszeit neue Anfangsbedingungen eingespeist werden¹³. Diese Methode wurde in dieser Studie aus Zeitgründen nicht getestet, könnte jedoch die Modellierung des

¹⁶ Cheng, W. Y. Y. and Steenburgh, W. J.: Evaluation of SurfaceSensible Weather Forecasts by the WRF and the Eta Models over the Western United States, *Weather Forecast.*, 20, 812–821, doi:10.1175/WAF885.1, 2005.

¹⁷ Mass, C. and Ovens, D.: Fixing WRF's high speed wind bias: A new subgrid scale drag parameterization and the role of detailed verification, in: 24th Conf. on Weather and Forecasting/ 20th Conf. on Numerical Weather Prediction, Vol. 9B.6, Amer. Meteor. Soc., 2011.

¹⁸ Jiménez, P. A. and Dudhia, J.: Improving the Representation of Resolved and Unresolved Topographic Effects on Surface Wind in the WRF Model, *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 51, 300–316, doi:10.1175/JAMC-D-11-084.1, 2012.

bodennahen Windes durch das WRF-Modell bei einer 1 km-Auflösung verbessern.

Für die 100 m aufgelöste Simulation liegt der geschätzte Spitzenwert der Böen am nächstgelegenen Gitterpunkt nur geringfügig unter dem an der Station Oron gemessenen Wert (-1 m/s) und deutlich über dem an der Station Pully gemessenen Wert (+3,7 m/s) (Tabelle 1). Diese Abweichungen liegen unterhalb des MAE der Simulation mit 1 km Auflösung. Auch der Zeitpunkt des Böenmaximums während des Sturms ist mit einer Abweichung von 10 Minuten für Pully und einer Stunde für Oron gut wiedergegeben.

Die 100 m aufgelöste WRF-Simulation wurde auf einem Intel Xeon E5-2687W v2 mit 8 CPU-Kernen und 128 GB RAM durchgeführt. Unter den für Meteotest zugänglichen Ressourcen entspricht dies einem optimierten Setup, das eine maximale Leistung zu vertretbaren Kosten bietet. Generell ist der Rechenaufwand abhängig von der Anzahl modellierter Gitterpunkte. Mit unserem Setup benötigte die Simulation etwa 8 Tage Rechenzeit für 8 Stunden Simulationszeit (7 UTC bis 14 UTC mit 1 Stunde Spin-up), die 1 km aufgelöste WRF-Simulation hingegen nur etwa 3 Tage Rechenzeit.

Die Erstellung einer Sturmgefährdungskarte mit einer Auflösung von 100 m für die gesamte Schweiz mit einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren oder mehr, basierend auf dem WRF-Modell, ist mit den für Meteotest derzeit verfügbaren Hardware-Ressourcen nicht zu vertretbaren Kosten realisierbar. Dafür wären mehrere hundert CPUs erforderlich, die auf verschiedenen Servern parallel laufen müssten, um alle Simulationen in einem angemessenen Zeitraum (1 bis 2 Monate) durchzuführen.

Das WRF-Modell ermöglicht punktuelle Simulationen von Wetterereignissen (z.B. einige Tage für eine 1 km-Auflösung oder einige Stunden für eine 100 m-Auflösung) in einer vertretbaren Rechenzeit. Solche Simulationen erlauben eine detaillierte Analyse der Winde (Geschwindigkeit, Richtung und Böen) sowie aller üblichen meteorologischen Parameter (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Strahlung usw.).

3 Downscaling mit PALM

PALM¹⁹ ist ein Large Eddy Simulation Modell zur Simulation realistischer dreidimensionaler turbulenter atmosphärischer Strömungen im komplexen Gelände. Mit dem Ziel die turbulente Strömung in einer realen Umgebung möglichst genau abzubilden, werden Geländeinformationen, Gebäude, Vegetation, sowie unterschiedliche Oberflächen- und Bodeneigenschaften miteinbezogen. PALM kann an gängige Wettervorhersagemodelle wie WRF, COSMO etc. gekoppelt werden und ist somit in der Lage, eine turbulente Strömung für beliebige Wettersituationen zu simulieren. Durch ein mehrstufiges, räumliches Downscaling werden die Informationen des Modells immer höher aufgelöst.

Das Modell eignet sich besonders für Auflösungen von 1 m bis 50 m. In der Vorstudie wird es benutzt, um die 2 m aufgelöste Simulation des Sturmes Lothar durchzuführen.

3.1 Modellsetup und dynamische Eingangsdaten

Die PALM-Simulation umfasst 30 Minuten des Sturmes Lothar (09:10 bis 09:40 UTC). Der Zeitraum wurde anhand des gemessenen Böenmaximums an der MeteoSchweiz Station in Pully ausgewählt (Abbildung 7). Die zeitliche Auflösung der PALM-Resultate ist 1 Sekunde. Um der Strömung zu erlauben, sich zu entwickeln, wurde die Simulation mit 30 Minuten Vorlaufzeit (um 08:40 UTC) gestartet.

Mit dem Modell PALM ist das Ziel eine gebäudeauflösende Simulation durchzuführen. Dies wird mit einer Auflösung von 2 m erreicht. Es wurden zwei Modellsetups verwendet:

- **wrf1km_to_palm2m**
PALM-Simulation mit drei ineinander geschachtelten Gebieten mit einer Auflösung von 50 m, 10 m und 2 m (Abbildung 8). Die 1 km und 10 min aufgelösten WRF-Daten (d02 aus 2.1.1) werden für den dynamischen Antrieb verwendet.
- **wrf100m_to_palm2m**
PALM-Simulation mit zwei ineinander geschachtelten Gebieten mit einer Auflösung von 10 m und 2 m (Abbildung 9). Die 100 m und 10 min aufgelösten WRF-Daten (d04 aus 2.1.2) werden für den dynamischen Antrieb verwendet.

¹⁹ <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac>

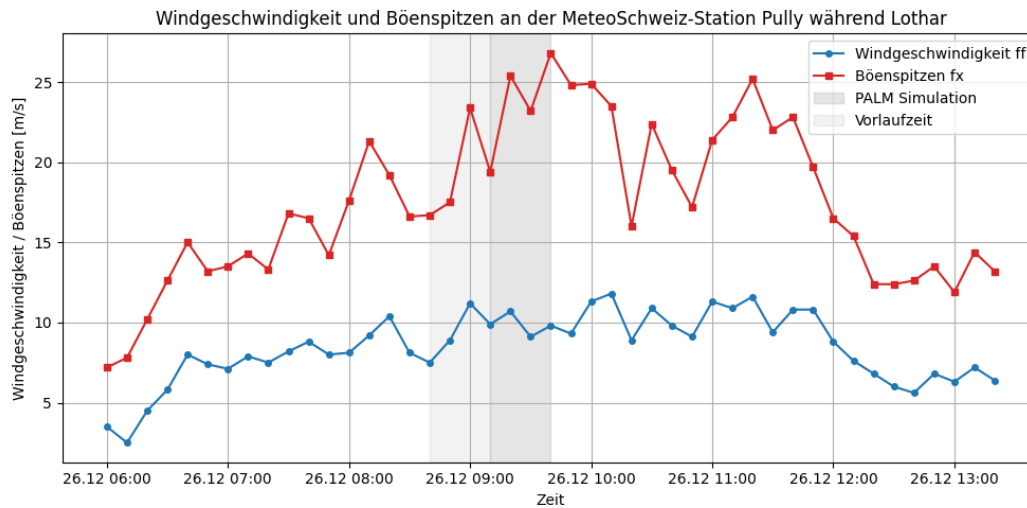


Abbildung 7: Windgeschwindigkeit und Böen gemessen an der SMN-Station Pully während Lothar. Der in PALM modellierte Zeitraum ist dunkelgrau hervorgehoben und die Vorlaufzeit hellgrau.

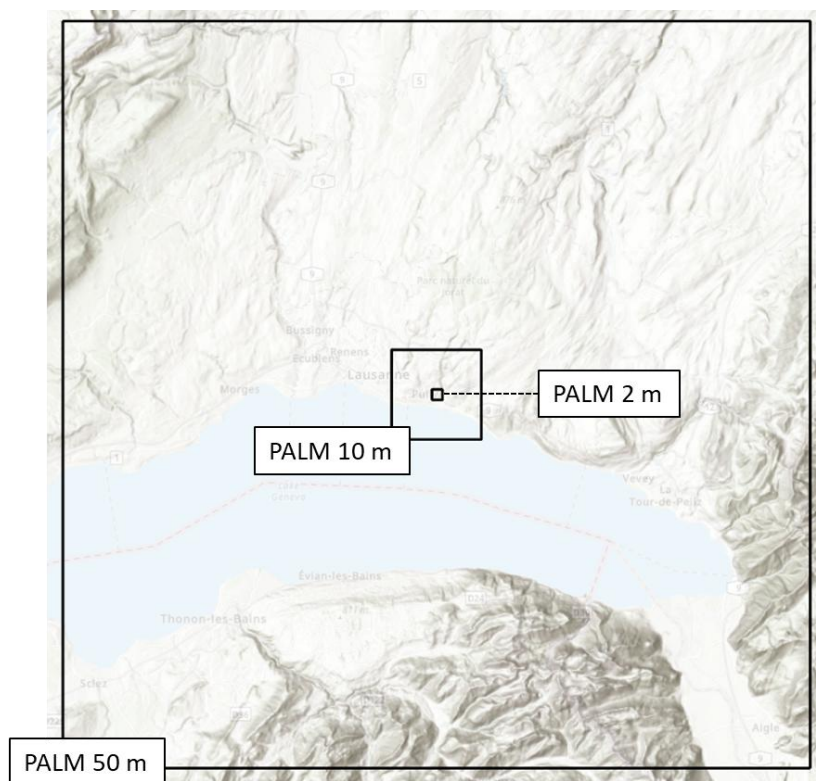


Abbildung 8: PALM Gebiete des Downscalings wrf1km_to_palm2m.

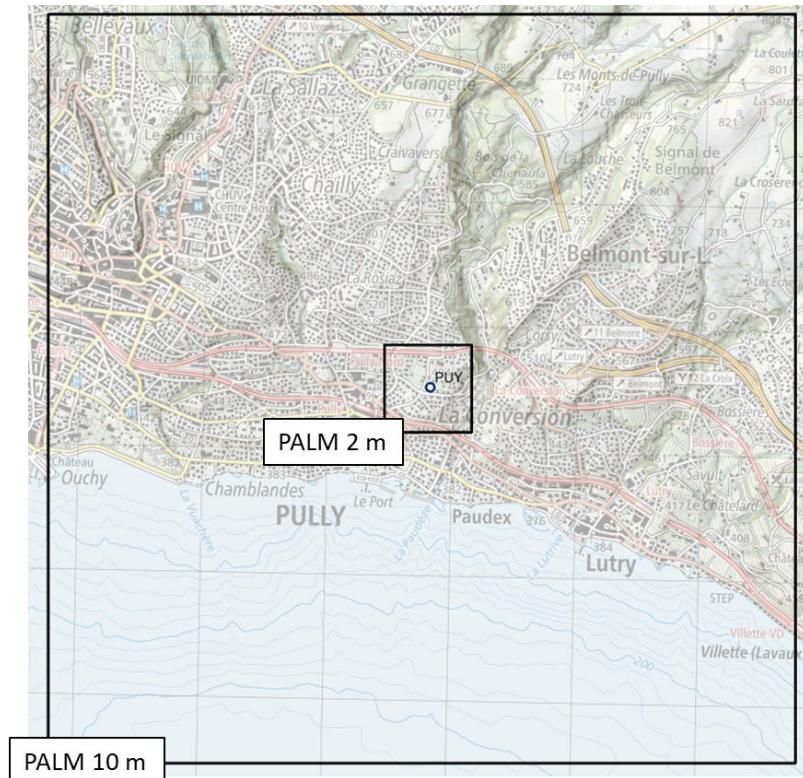


Abbildung 9: PALM Gebiete des Downscalings wrf100m_to_palm2m inklusive Standort der MeteoSchweiz Station Pully (PUY).

Die 10 m und 2 m Gebiete sind in beiden Modellsetups identisch. Der Mittelpunkt der drei Gebiete ist die SMN-Station in Pully (46.512283°N, 6.667517°E). Details zu den drei Gebieten sind in Tabelle 2 festgehalten.

Tabelle 2: Details zu den drei PALM Gebieten (50 m, 10 m, 2 m Auflösung).

Domain	PALM 50 m	PALM 10 m	PALM 2 m
Simulierter Zeitraum	26. Dezember 1999 09:10 bis 09:40 UTC		
Räumliche Auflösung (x,y,z)	50 m	10 m	2 m
Anzahl Zellen in x,y Richtung	999	599	349
Horizontale (x,y) Ausdehnung	49'950 m x 49'950 m	5'990 m x 5'999 m	698 m x 698 m
Anzahl Zellen in z Richtung	80	160	160
Vertikale (z) Ausdehnung	4'000 m	1'600 m	320 m

3.1.1 Statische Eingangsdaten

PALM benötigt für die Abbildung des Untersuchungsgebietes statische Eingangsdaten. Diese statischen Daten beschreiben die Oberfläche und deren Eigenschaften und sind im Rahmen des modellierten Ereignisses zeitlich konstant. Für PALM 50 m erstreckt sich das modellierte Gebiet bis über Frankreich, weshalb andere statische Inputdaten verwendet werden. Tabelle 3 beschreibt die verwendeten statischen Daten.

Tabelle 3: Beschrieb der in PALM verwendeten statischen Eingangsdaten.

Statische Inputdaten	Quelle PALM 50 m	Quelle PALM 10 m	Quelle PALM 2 m
Gebäudedaten	Copernicus	swissBUILDINGS3D	swissBUILDINGS3D
Geländemodell	swissALTI Regio	swissALTI3D	swissALTI3D
Vegetation (Wiese, Wald, Einzelbäume, Moore etc.)	Copernicus	swissTLM3D	swissTLM3D
Verkehr (Strassen / Bahn / versiegelte Flächen)	Copernicus	swissTLM3D	swissTLM3D
Wasserflächen	Copernicus	swissTLM3D	swissTLM3D

Von besonderem Interesse für die Sturmmodellierung sind die Gelände- und Gebäudedaten. Abbildung 10 zeigt die relative Geländehöhe der drei PALM-Gebiete sowie die Gebäudedaten des 2 m Gebietes.

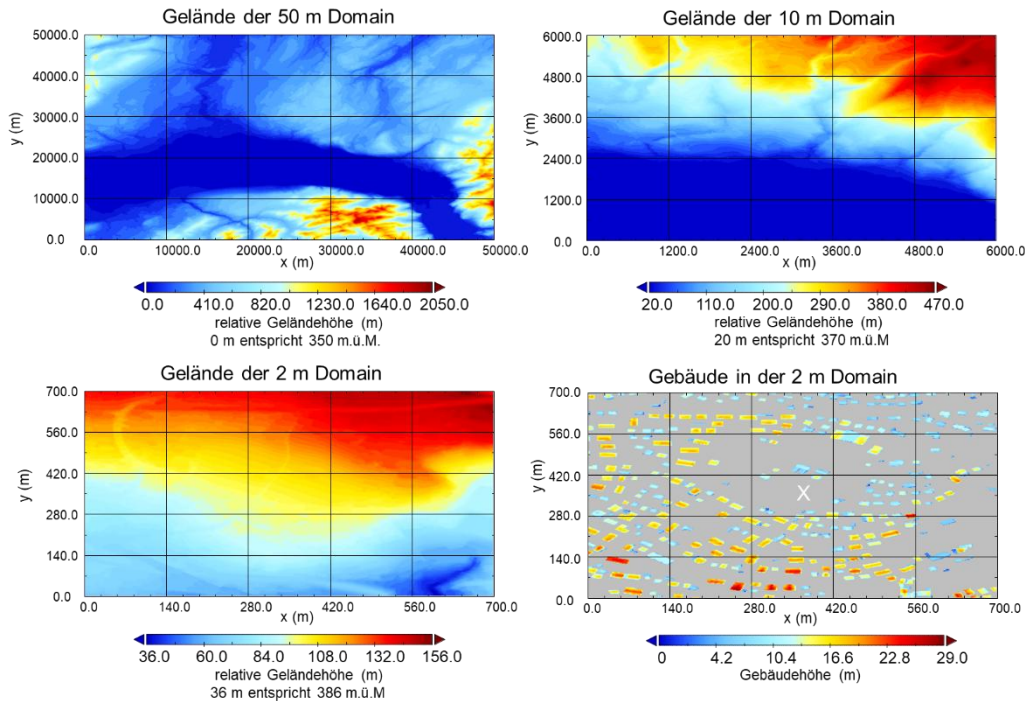


Abbildung 10: Die relative Geländehöhe der drei PALM Gebiete²⁰ sowie Gebäudehöhe in der 2 m Domain. Das weisse «X» in der Grafik unten rechts markiert den Standort der MeteSchweiz Station Pully.

3.2 Resultate

In diesem Abschnitt werden die Resultate der PALM-Simulationen präsentiert und mit den Messungen der MeteSchweiz Station in Pully verglichen. Dabei werden die PALM-Modellhöhen 9 m und 11 m betrachtet, um der Messhöhe an der MeteSchweiz Station in Pully (10 m) zu entsprechen.

Die PALM-Simulationen zeigen die Strömungsentwicklung beeinflusst durch das Gelände und die Gebäude (Abbildung 11). Die höchsten Windgeschwindigkeiten treten meist im offenen Gelände oder in engen Passagen zwischen Gebäuden auf. In der Strömung abgewandten Zonen hinter Gebäuden ist die Windgeschwindigkeit oft deutlich tiefer. Hier können auf kleinem Raum (kleiner 10 m) Unterschiede von 15 bis 20 m/s auftreten.

²⁰ Die Konvertierung der relativen Geländehöhen zur absoluten Höhe über Meer in Meter bezieht sich jeweils auf die Höhe über Meer der für PALM aufbereiteten Geländemodelle und nicht auf die tatsächliche Höhe. Darum ist in der 50 m Domain eine relative Höhe von 0 m mit einer Höhe von 350 m angegeben. Dies entspricht der tatsächlichen Höhe des Genfersees (372 m) auf den nächsten 50 m Schritt gerundet. Analog wird das Gelände der 10 m Domain auf 10 m gerundet, und somit ist der niedrigste Punkt auf 370 m. Dies entspricht der Höhe des Genfersees (372 m) auf 10 m gerundet.

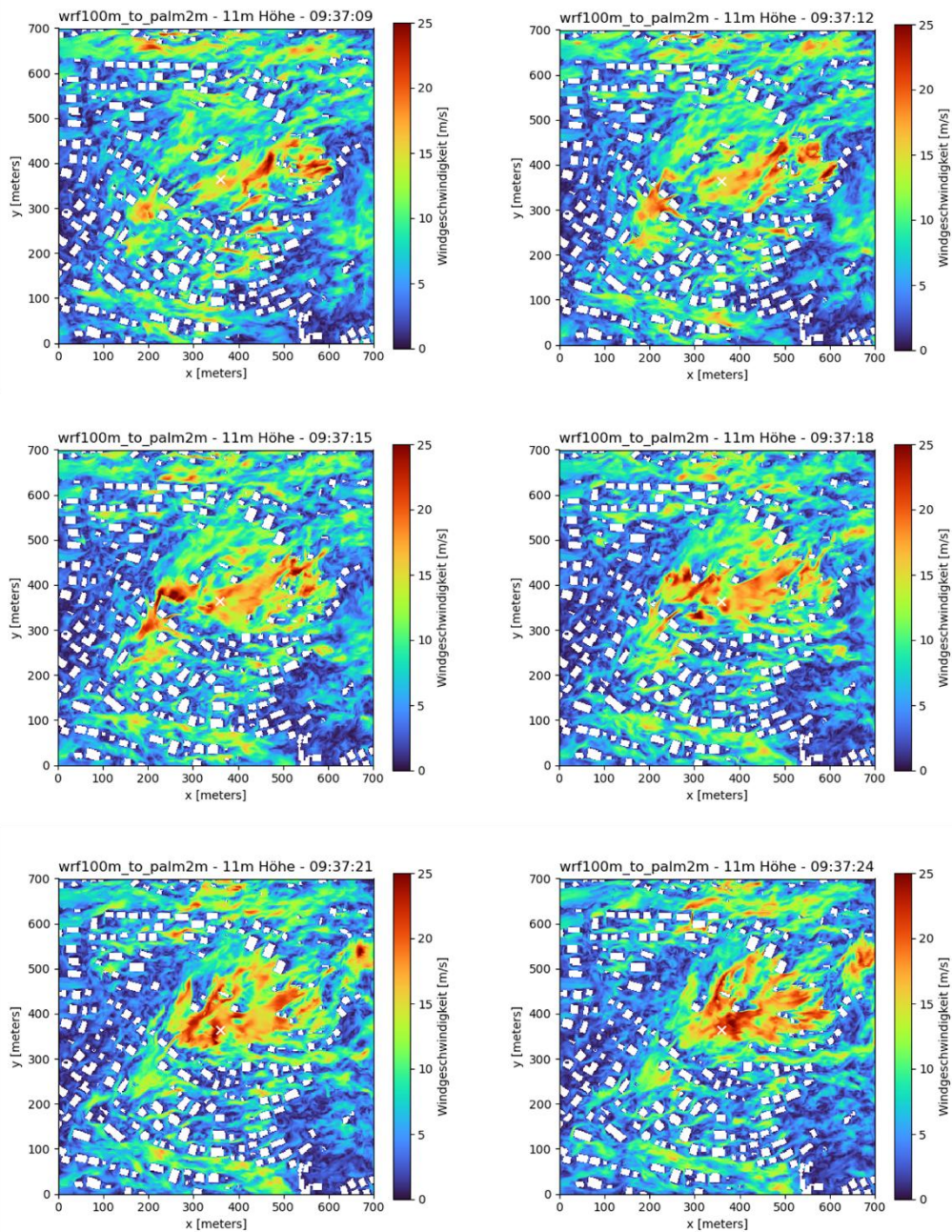


Abbildung 11: Beispiel für den zeitlichen Verlauf der Windgeschwindigkeit auf 11 m Höhe in der PALM-Simulation wrf100m_to_palm2m. Erstes Bild oben links ist um 09:37:09 UTC. Die folgenden Grafiken zeigen die zeitliche Entwicklung in 3 Sekunden-Schritten. Das weisse «X» in der Mitte markiert die MeteoSchweiz Station Pully.

Der Vergleich der maximalen Böen der PALM-Simulation und der an der MeteoSchweiz Station Pully gemessenen Werte zeigt, dass PALM diese gut wiedergibt. Jedoch gibt es Unterschiede der Resultate zwischen den beiden Antrieben WRF 1 km und WRF 100 m.

Die Simulation wrf1km_to_palm2 (Abbildung 12) überschätzt die Böen. Die maximale Böe über den gesamten Simulationszeitraum ist an der SMN Pully 26.81 m/s. PALM überschätzt diese Windgeschwindigkeit mit 28.51 m/s auf 9 m Höhe über Grund, respektive 28.50 m/s auf 11 m über Grund. Dies entspricht einem Unterschied von 1.70 m/s auf 9 m Höhe, respektive 1.69 m/s auf 11 m Höhe.

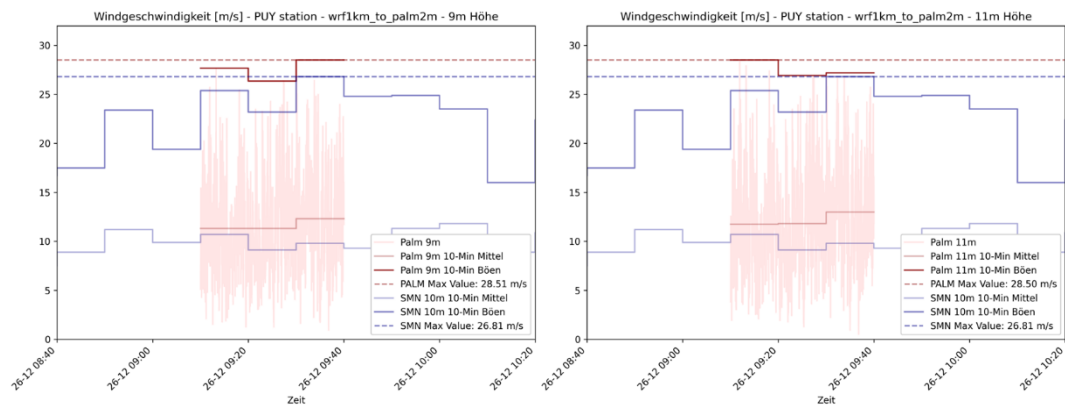


Abbildung 12: Vergleich der Windgeschwindigkeit und Böen zwischen PALM-Simulation wrf1km_to_palm2 und den 10-Minuten Messwerten an der MeteSchweiz Station Pully (SMN, blaue Linien). Links PALM auf 9 m Höhe. Rechts PALM auf 11 m Höhe. Die 1 Sekunden aufgelösten Werte aus PALM sind als hellrote Linie hinterlegt. Die daraus abgeleiteten 10-Minuten Mittelwerte und 1-Sekunden Böenmaxima pro 10-Minuten-Intervall sind als rote Linien dargestellt. Die maximalen Böen aus PALM und SMN, welche während den 30-Minuten der PALM-Simulation auftraten, sind mit gestrichelten Linien markiert.

Die Abweichungen zwischen der PALM-Simulation wrf100m_to_palm2 und SMN Pully sind kleiner (Abbildung 13). PALM unterschätzt die über den gesamten Simulationszeitraum gemessene maximale Windgeschwindigkeit von 26.81 m/s mit 25.89 m/s auf 9 m Höhe und 26.03 m/s auf 11 m Höhe. Dies entspricht einem Unterschied von -0.92 m/s auf 9 m Höhe, respektive -0.78 m/s auf 11 m Höhe.

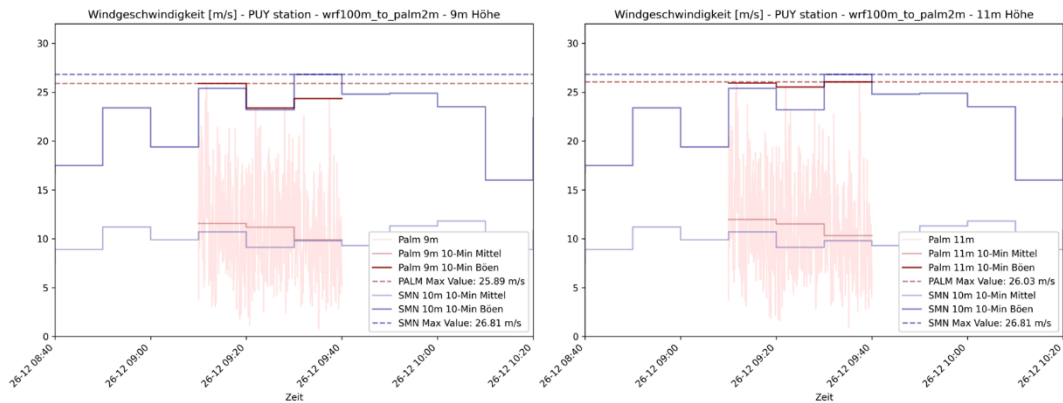


Abbildung 13: Vergleich der Windgeschwindigkeit und Böen zwischen PALM-Simulation wrf100m_to_palm2 und den 10-Minuten Messwerten an der MeteoSchweiz Station Pully (SMN, blaue Linien). Links PALM auf 9 m Höhe. Rechts PALM auf 11 m Höhe. Die 1 Sekunden aufgelösten Werte aus PALM sind als hellrote Linie hinterlegt. Die daraus abgeleiteten 10-Minuten Mittelwerte und 1-Sekunden Böenmaxima pro 10-Minuten-Intervall sind als rote Linien dargestellt. Die maximalen Böen aus PALM und SMN, welche während den 30-Minuten der PALM-Simulation auftraten, sind mit gestrichelten Linien markiert.

3.2.1 Windrichtung in PALM bei maximaler Windgeschwindigkeit

Die 2 m aufgelöste PALM-Simulation erlaubt es, die Windrichtung unter Einfluss des lokalen Geländes und der Gebäude zu untersuchen. In tieferen Auflösungen (100 m oder mehr) wird die Windgeschwindigkeit kaum vom lokalen Gelände beeinflusst und die Gebäude sind nicht berücksichtigt.

Ein Vergleich der Windrichtung zwischen der MeteoSchweiz Station Pully und den PALM-Modellierungen an der Gitterzelle der Station Pully (Abbildung 14) zeigt gute Übereinstimmung. Der 100 m WRF Antrieb hat eine leichte Drehung nach West zur Folge.

Die Windrichtung zum Zeitpunkt der maximalen Böen pro Gitterzelle ist in Abbildung 15 dargestellt. Die vorherrschende Windrichtung ist aus Sektoren Südsüdwest bis West. In der Simulation wrf100m_to_palm2m ist die Windrichtung eher West, in der Simulation wrf1km_to_palm2m eher Südwest. Jedoch treten auf kleinstem Raum manchmal grosse Unterschiede in der Windrichtung auf. Parallel zur Windrichtung und in der windabgewandten Seite von Gebäuden ist die Windrichtung bei maximaler Windgeschwindigkeit oft anders als die Hauptanströmungsrichtung. Dies hat mit Verwirbelungen durch den Einfluss des Gebäudes als Hindernis der Strömung zu tun.

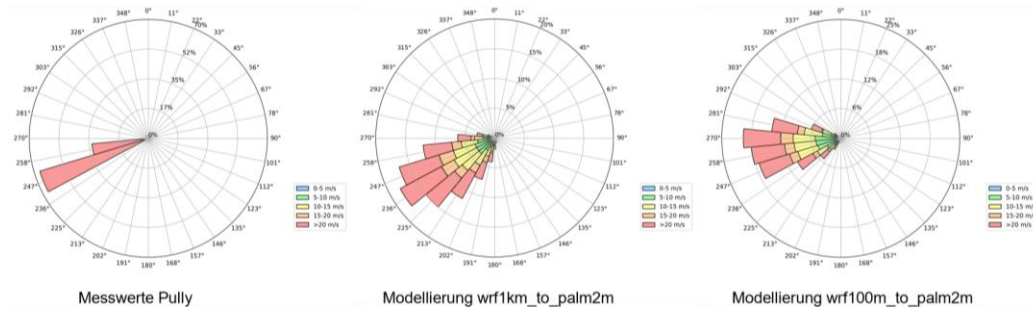


Abbildung 14: Windrose an der Station Pully für den Zeitraum der PALM-Modellierung. Links: Windrichtungen der drei Böenmaxima der 10-Minuten Intervalle der SMN-Daten. Mitte: 1800 1-Sekunden Zeitschritte der Modellierung wrf1km_to_palm2m. Rechts: 1800 1-Sekunden Zeitschritte der Modellierung wrf100m_to_palm2m. Die beiden Grafiken der PALM-Modellierungen beinhalten Windrichtung in 9 m und 11 m Höhe (diese unterscheiden sich kaum).

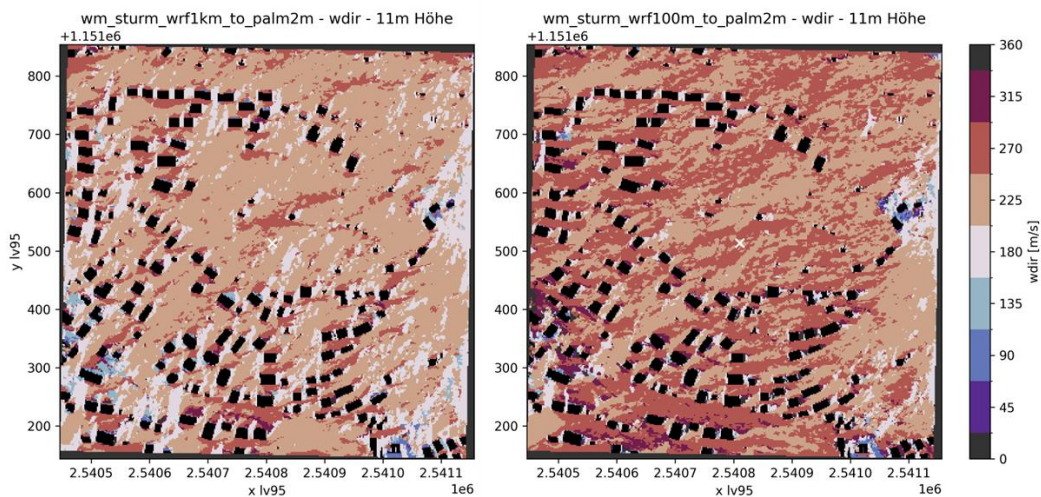


Abbildung 15: Windrichtung in PALM. Für jede Gitterzelle ist die Windrichtung zum Zeitpunkt der maximalen Böe dargestellt. Links die Simulation wrf1km_to_palm2m. Rechts die Simulation wrf100m_to_palm2m. Das weisse 'X' in der Mitte der Ausschnitte markiert die MeteoSchweiz Station Pully. Die Gebäude (schwarz) und die Ränder haben keine Werte.

3.3 Diskussion der Resultate und Effizienz der Modellierung

Der PALM-Modellsetup mit den 100 m aufgelösten WRF-Daten als dynamischer Antrieb (wrf100m_to_palm2m) erfasst die hochaufgelösten Strömungen genauer als der Modellsetup mit den 1 km aufgelösten WRF-Daten als dynamischer Antrieb. Vermutlich liegt dies an den hohen Windgeschwindigkeiten im WRF 1 km Modell als Ausgangslage. Der Auflösungsschritt von 1 km zu 50 m ist zu

gross um die grossräumigen Effekte korrekt auf die lokale Umgebung zu übersetzen.

Durch die hohe räumliche Auflösung von 2 m wird die Strömung im Gelände und insbesondere zwischen den Häusern wiedergegeben (Abbildung 11). Durch den bremsenden Effekt von Häusern und der Kanalisierung durch enge Passagen entstehen innerhalb kleiner Gebiete grosse Unterschiede in der Windgeschwindigkeit.

Die Modellierung wrf1km_to_palm2m ist relativ rechenaufwändig, weil drei ineinander verschachtelte Gebiete simuliert werden. Wir haben die Modellierungen mit Cloud-Computing auf einer Linux Umgebung (Ubuntu; 22.04 LTS) mit dem folgenden Setup durchgeführt:

Modellierung wrf1km_to_palm2m:

- 224 virtuelle CPUs (112 cores)
- 896 GB RAM

Modellierung wrf100m_to_palm2m:

- 128 virtuelle CPUs (64 cores)
- 512 GB RAM

Unter den für Meteotest zugänglichen Ressourcen entspricht dies einem optimierten Setup, das eine maximale Leistung zu vertretbaren Kosten bietet. Bezüglich Berechnungszeit gibt es Unterschiede zwischen den Modellsetups. Die Simulation wrf1km_to_palm2m benötigte rund 6.6 Tage Berechnungszeit. Die Simulation wrf100m_to_palm2m ist mit rund 2.8 Tagen deutlich schneller, weil der WRF-Input bereits 100 m aufgelöst ist und somit das grosse 50 m aufgelöste PALM-Gebiet nicht berechnet werden muss.

Die Berechnungszeit skaliert linear mit der Grösse des modellierten Gebiets. Falls der horizontale Ausschnitt vergrössert wird oder mehr Höhenstufen modelliert werden müssen (weil ein steiles Gebiet modelliert wird) muss mit entsprechend längeren Berechnungszeiten gerechnet werden. Das hier ausgewählte Modellgebiet (2 m Auflösung, $\sim 0.7 \text{ km}^2$ horizontal) in Pully ist bereits in relativ steilem Gelände und umfasst viele Höhenstufen (320 m oder 160 Zellen in der Vertikalen). Somit dürfte die hier angegebene Berechnungszeit repräsentativ sein für ähnlich grosse Modellgebiete in Orten mit ähnlich komplexer Topografie wie beispielsweise Bern oder Lausanne.

Aufgrund dieser Rechenzeiten eignet sich PALM nicht für die Erstellung einer grossflächigen (Kantons- oder Landesfläche) Sturmgefährdungskarte mit einer Auflösung von 2 m und unter Berücksichtigung mehrerer Stürme. PALM erlaubt hingegen hoch aufgelöste Analysen von spezifischen Wetterereignissen z.B. in 2 m Auflösung mit 1 Sekunden Intervallen und zeitlicher Abdeckung in der Grössenordnung einer Stunde in einem 1 km^2 grossen Gebiet.

4 Statistisches Downscaling mit dem Modell Wind-Topo

Dujardin und Lehning (2022)²¹ präsentieren mit Wind-Topo ein neuartiges statistisches Downscaling-Modell, das im Vergleich zum physikalischen Downscaling die rechnerisch effiziente Erstellung hochaufgelöster, grossräumiger Windkarten mit hoher Genauigkeit ermöglicht²².

Wind-Topo von Dujardin und Lehning (2022), ist ein Deep Learning basiertes Modell zur Berechnung räumlich hochaufgelöster bodennaher Windfelder in komplexem Gelände. Das Modell lernt aus Trainingsdaten von Wettervorhersagemodellen und Messstationen die feinskaligen Wechselwirkungen zwischen atmosphärischen Zuständen und hochaufgelösten topografischen Merkmalen. Wind-Topo ist ein Convolutional Neural Network, das als Eingabevariablen verschiedene Wettervorhersagemodell- und Geländeparameter nutzt und als Ausgabe die u- und v-Komponenten der Windvektoren berechnet. Dujardin und Lehning (2022) verwendeten für das Modelltraining Inputvariablen aus dem hochaufgelösten Wettermodell COSMO-1 und dem Geländemodell swissALTI3D, die auf eine Auflösung von 50 m resampled wurden, sowie die Outputvariablen u- und v-Windvektormessungen von SwissMetNet- und IMIS-Stationen. Dujardin und Lehning (2022) zeigten auf, dass mit Wind-Topo 50 m-Windkarten mit Windgeschwindigkeit/-richtungsgenauigkeiten²³ von Mean Bias Error (MBE)²⁴: -0.08 m/s und Mean Absolute Error (MAE): 1.22 m/s / 47.05° erstellt werden können.

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurde die praktische Anwendbarkeit von Wind-Topo evaluiert.

4.1 Evaluationssetup und dynamische Inputdaten

Zur Bewertung der praktischen Anwendbarkeit von Wind-Topo wurden die folgenden zwei Evaluationssetups verwendet.

²¹ Dujardin, J., & Lehning, M. (2022). Wind-Topo: Downscaling near-surface wind fields to high-resolution topography in highly complex terrain with deep learning. *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*, 148(746), 1-20.

²² Nach Dujardin und Lehning (2022) kann COSMO-1 für Schweizer Alpen innerhalb einer Stunde mit 2-GPUs auf 50 Meter herunterskaliert werden.

²³ Genauigkeiten entsprechend den Mittelwerten über alle Stationsarten "Exposed" bis "Alps" von Tabelle 2 in Dujardin und Lehning (2022).

²⁴ Siehe Anhang "Fehlermetriken" für Details zu Mean Bias Error (MBE) und Mean Absolute Error (MAE).

4.1.1 Evaluation von Wind-Topo mit 50 m Auflösung unter Verwendung von ICON-1 als Input

Der Quellcode von Wind-Topo sowie die Modellparameter, die durch ein Training mit stündlichen COSMO-1-, SwissMetNet- und IMIS-Stationsdaten im Zeitraum vom 1. Oktober 2015 bis 1. Oktober 2018 bestimmt wurden, sind öffentlich verfügbar²⁵. COSMO-1 war das operationelle hochauflösende Wetterprognosemodell der MeteoSchweiz, das 2024 durch das Modell ICON-1 abgelöst wurde. Der veröffentlichte Quellcode enthält jedoch nicht den Code zum Einlesen von Wettermodellldaten und zur Berechnung der daraus abgeleiteten Eingabedaten.

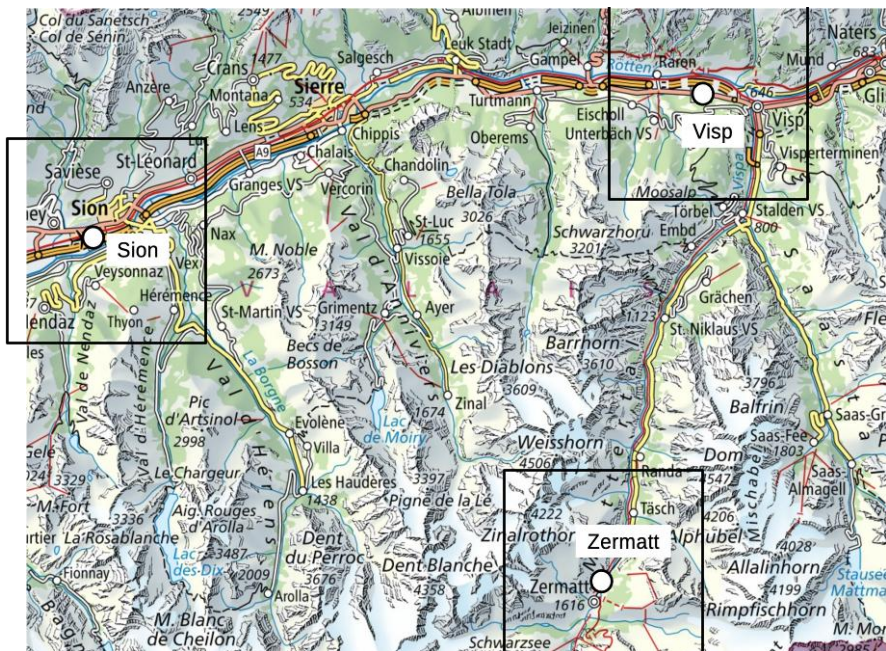


Abbildung 16: Statistische Downscaling-Gebiete von Wind-Topo unter Verwendung von ICON-1 als Input und Standorte der SwissMetNet Stationen Zermatt, Visp und Sion.

Der fehlende Code wurde in Rücksprache mit den Autoren nachimplementiert. Zur Validierung dieser Nachimplementierung, der Generalisierungsfähigkeit des Modells und der von Dujardin und Lehning (2022) präsentierten Genauigkeiten wurde Wind-Topo mit ICON-1-Daten für die Gebiete der SwissMetNet-Stationen Zermatt, Visp und Sion angewendet (Abbildung 16). Die Ergebnisse wurden anschliessend mit den stündlich gemessenen Windgeschwindigkeiten und -richtungen der SwissMetNet-Stationen verglichen. Details des Vergleichs können dem Kapitel 4.2.1 entnommen werden. Der Vergleich zeigt zusammenfassend, dass ähnliche Windgeschwindigkeitsergebnisse wie in Dujardin und Lehning (2022) erzielt werden. Zudem bestätigt er, dass das Modell mit einem

²⁵ <https://gitlabext.wsl.ch/dujardin/wind-topo>

vergleichbaren Wettervorhersagemodell als Input (ICON-1 anstelle von COSMO-1) generalisiert, sprich vermutlich nicht nachtrainiert werden muss.

4.1.2 Evaluation von Wind-Topo mit 100 m Auflösung unter Verwendung von WRF 1 km als Input während des Sturms Lothar

Basierend auf den 10 Minuten und 1 km aufgelösten WRF-Ergebnissen (Kapitel 2.1.1) wurden für das in Abbildung 17 dargestellte Gebiet im Zeitraum von 09:00 bis 15:00 UTC am 26.12.1999 alle 10 Minuten Windgeschwindigkeiten und -richtungen mit einer räumlichen Auflösung von 100 m in Wind-Topo berechnet. Die Ergebnisse wurden mit den Messungen der 25 SwissMetNet-Stationen im Testgebiet verglichen. Details des Vergleichs können Kapitel 4.1.2 entnommen werden.

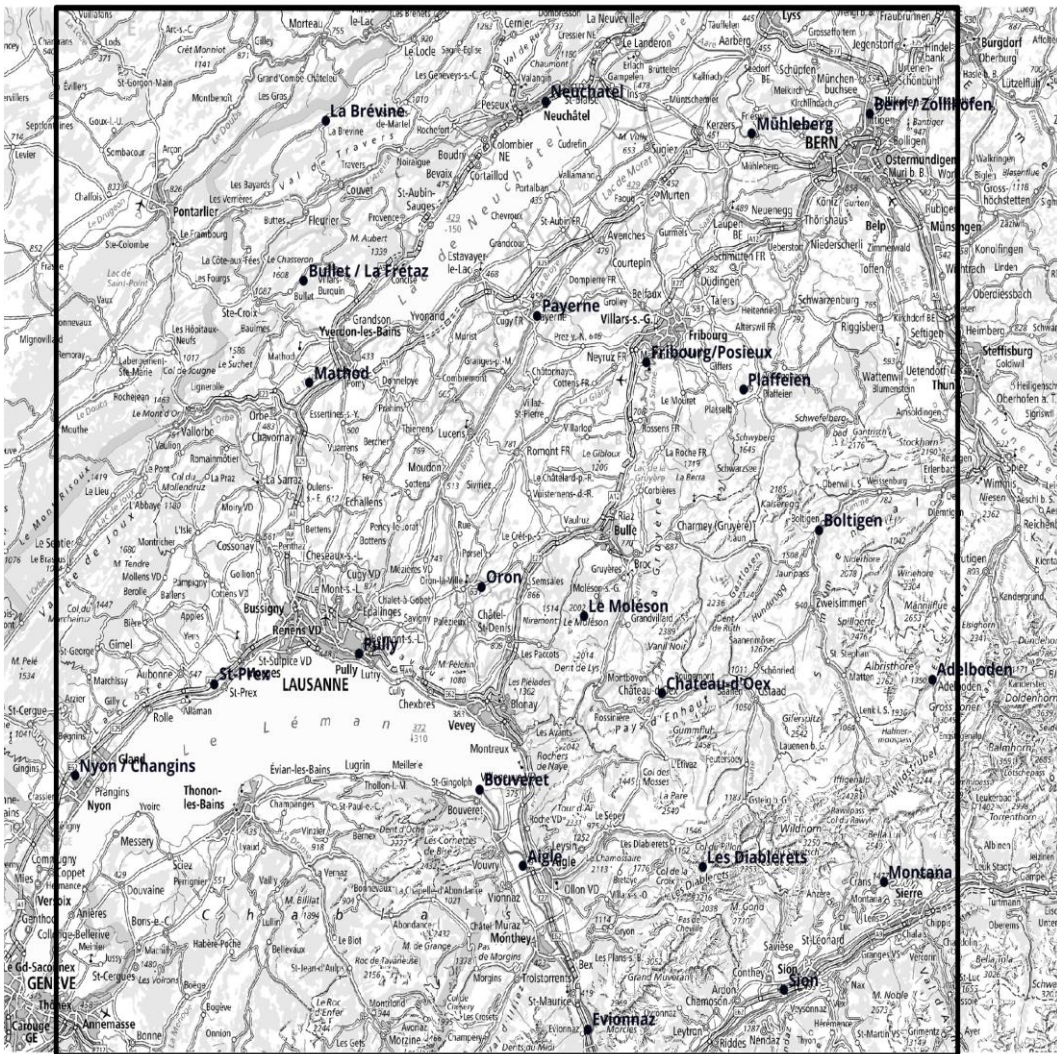


Abbildung 17: Testgebiet von Wind-Topo für statistisches Downscaling unter Verwendung von WRF 1 km als Input und Standorte der 25 SwissMetNet-Stationen.

Die Hauptziele dieser Evaluation waren, die Anwendbarkeit von Wind-Topo für grössere Berechnungsgebiete zu überprüfen. Zudem wurde untersucht, ob durch die Verwendung von WRF als Input anstelle von COSMO-1/ICON-1 ein Nachtraining von Wind-Topo erforderlich ist, um die validierten publizierten Genauigkeiten zu erreichen.

4.1.3 Statische Eingangsdaten

Wind-Topo benötigt verschiedene statische Eingangsdaten zur Topografie und deren Eigenschaften. Tabelle 4 beschreibt die verwendeten statischen Daten.

Tabelle 4: Beschrieb der von Wind-Topo verwendeten statischen Inputdaten.

Statische Eingangsdaten	Quelle
Geländemodell	swissALTI3D von 2 m auf 50 m umgerechnet mit SRTM 30 m für Grenzgebiet.
Geländeausrichtung	Basiert auf Geländemodell und wird intern von Wind-Topo berechnet.
Geländeneigung	Basiert auf Geländemodell und wird intern von Wind-Topo berechnet.

4.2 Resultate

4.2.1 Wind-Topo mit 50 m Auflösung unter Verwendung von ICON-1 als Input

In Tabelle 5 sind die Genauigkeiten von Wind-Topo, unter Verwendung von ICON-1 als Input, im Vergleich zu den Referenzmessungen (Stundenauflösung) von SwissMetNet aufgeführt. Dujardin und Lehning (2022) erzielen einen Mean Bias Error (MBE)²⁶ von -0.08 m/s und einen Mean Absolute Error (MAE) von 1.22 m/s für die Windgeschwindigkeit sowie einen Mean Absolute Error (MAE) von 47.05° für die Windrichtung. Für die drei Stationen werden ähnliche Werte für die Windgeschwindigkeit erzielt. Für Visp und Zermatt wird etwa der doppelte Mean Absolute Error (MAE) in der Windrichtung erreicht, während für Sion ein vergleichbarer Wert wie im Paper erzielt wird. Die Ursache für diesen Unterschied in den Windrichtungen bei Visp und Zermatt im Vergleich zum Paper ist nicht vollständig geklärt, jedoch hat ein Austausch dazu mit den Autoren stattgefunden.

²⁶ Siehe Anhang Fehlermetriken für Details zu Mean Bias Error (MBE) und Mean Absolute Error (MAE).

Tabelle 5: Genauigkeiten von Wind-Topo unter Verwendung von ICON-1 als Input zu SwissMetNet-Referenzmessungen (Stundenaufösung).

SMN-Station	Mean Bias Error (MBE) [m/s]	Mean Absolute Error (MAE) [m/s]	Mean Absolute Error (MAE) Richtung [°]
Sion	-0.71	1.14	56.03
Visp	0.28	1.01	78.78
Zermatt	-0.04	1.02	100.91

Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen den Verlauf der Windgeschwindigkeit und -richtung von Wind-Topo im Vergleich zu den SwissMetNet-Referenzmessungen. Die zeitliche Auflösung sind Stundenmittel. Wind-Topo hat im Trend den gleichen Verlauf wie SwissMetNet. Wind-Topo bildet jedoch die Windspitzen teilweise ungenau ab. Zudem weist die Windrichtung von Wind-Topo eine andere Varianz auf als diejenige der SwissMetNet-Messungen.

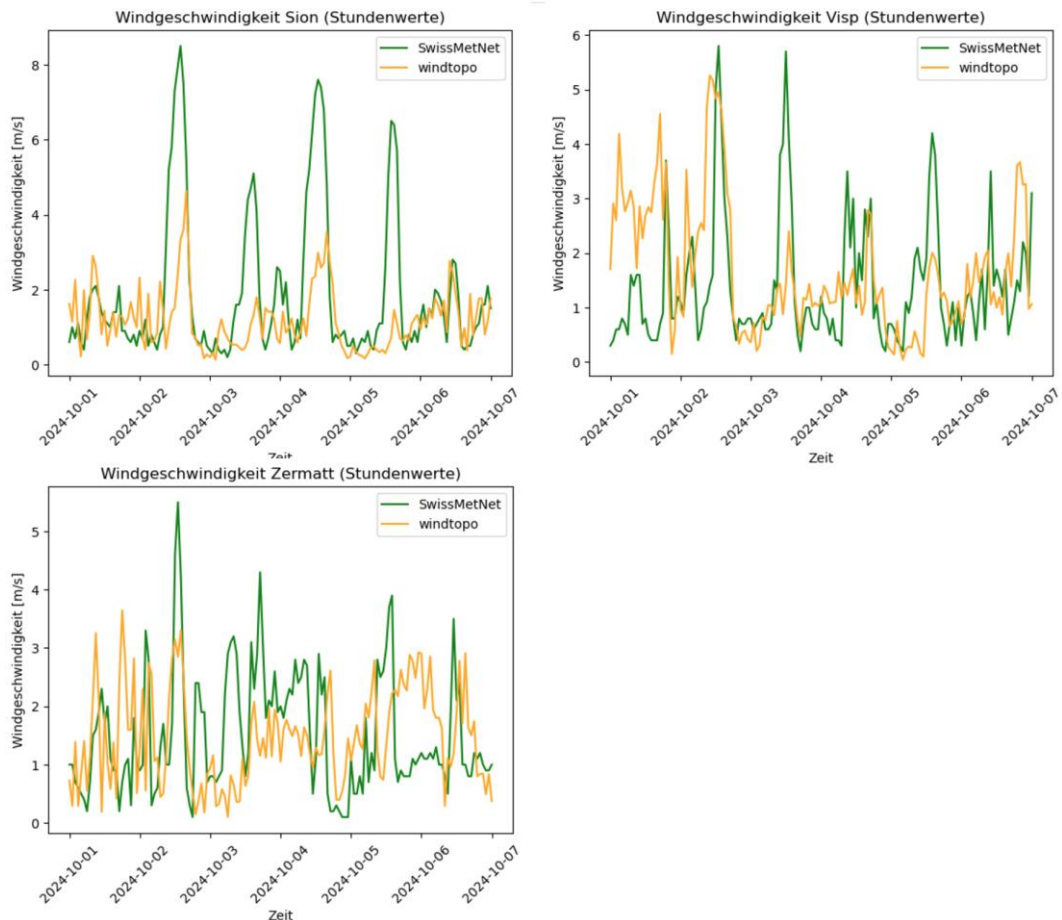


Abbildung 18: Vergleich der Windgeschwindigkeit von Wind-Topo mit ICON-1 als Input im Vergleich zu den SwissMetNet-Referenzmessungen. Es sind Stundenmittel abgebildet.

Der Vergleich zeigt zusammenfassend, dass ähnliche Windgeschwindigkeitsergebnisse wie in Dujardin und Lehning (2022) erzielt werden. Der Vergleich deutet darauf hin, dass das Modell mit einem ähnlichen Wettervorhersagemodell als Input (ICON-1 anstelle von COSMO-1) vermutlich generalisiert und daher nicht nachtrainiert werden muss.

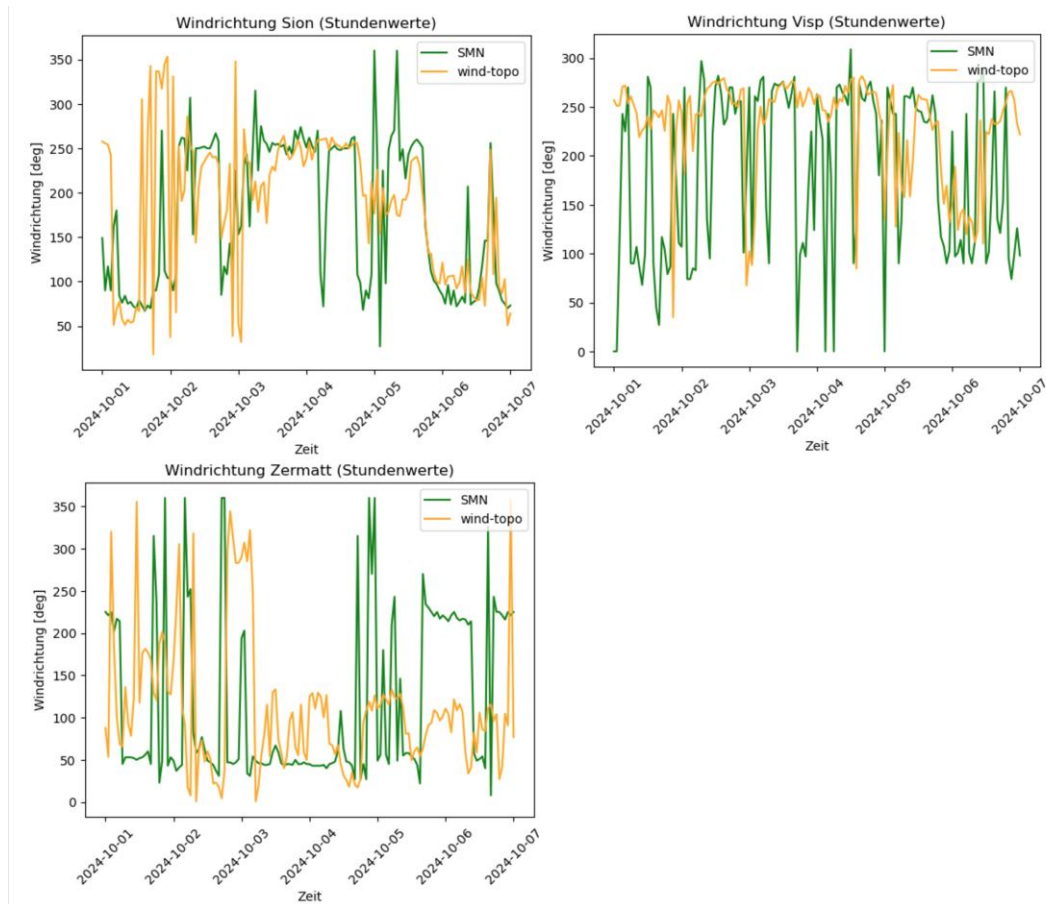


Abbildung 19: Vergleich der Windrichtung von Wind-Topo mit ICON-1 als Input im Vergleich zu den SwissMetNet-Referenzmessungen.

4.2.2 Wind-Topo mit 100 m Auflösung unter Verwendung von WRF 1 km als Input während des Sturms Lothar

In Tabelle 6 sind die Genauigkeiten von Wind-Topo, unter Verwendung von WRF 1 km (10-Minuten-Auflösung) als Input während des Sturms Lothar, im Vergleich zu den SwissMetNet-Referenzmessungen aufgeführt. Unter Berücksichtigung der 25 Stationen wird ein Mean Bias Error (MBE)²⁷ von 1.23 m/s und ein Mean Absolute Error (MAE) von 3.80 m/s für die Windgeschwindigkeit sowie ein Mean Absolute Error (MAE) von 54.82° für die Windrichtung erzielt.

²⁷ Siehe Anhang "Fehlermetriken" für Details zu Mean Bias Error (MBE) und Mean Absolute Error (MAE).

Tabelle 6: Genauigkeiten von Wind-Topo unter Verwendung von WRF 1 km (10-Minuten-Auflösung) im Vergleich zu den SwissMetNet-Referenzmessungen.

SMN-Station	Mean Bias Error (MBE) [m/s]	Mean Absolute Error (MAE) [m/s]	Mean Absolute Error (MAE) Richtung [deg]
Alle 25 Stationen	1.23	3.80	54.82
Oron	1.86	2.41	9.74
Pully	-2.63	2.87	20.74

Die Windgeschwindigkeitsgenauigkeiten in Tabelle 6 sind höher als die Werte in Tabelle 5 und Dujardin und Lehning (2022). Dies deutet darauf hin, dass Wind-Topo, welches mit COSMO-Daten trainiert wurde, nicht optimal mit WRF-Inputdaten funktioniert. Um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, sollte es mit WRF-Daten nachtrainiert werden.

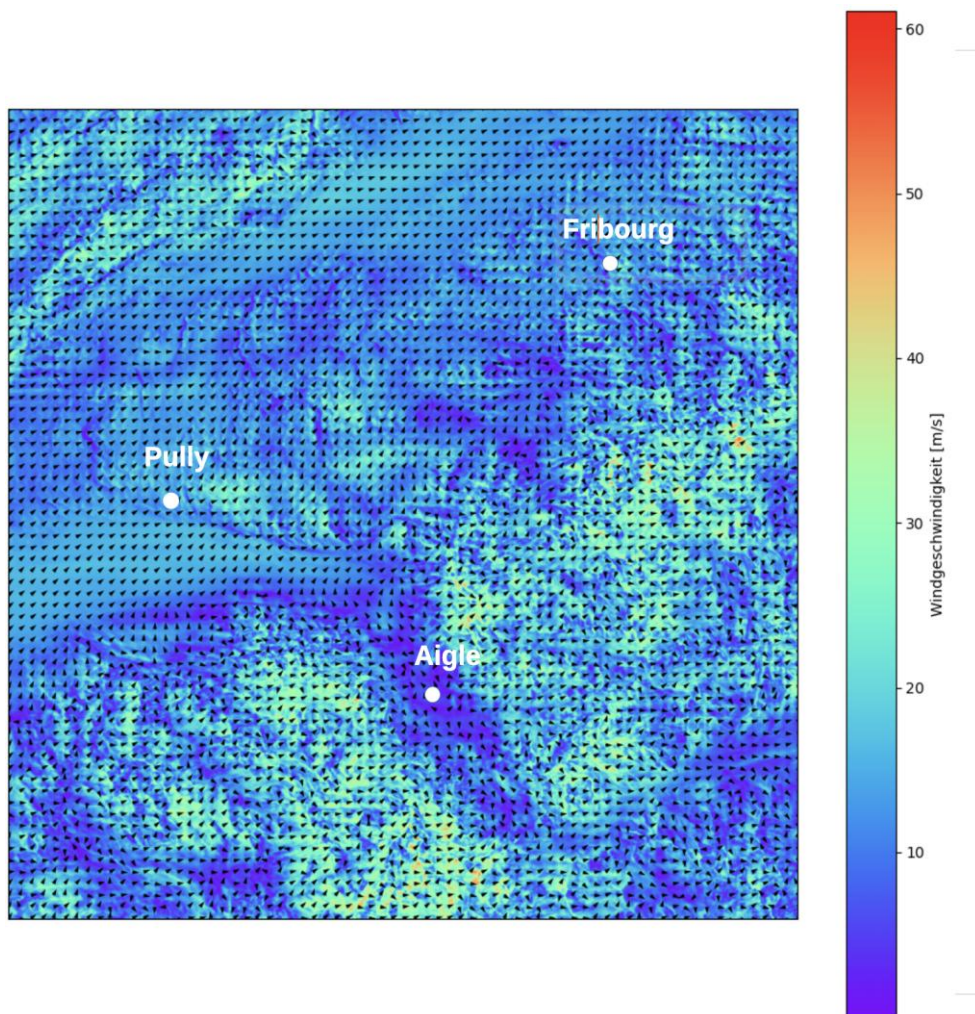


Abbildung 20: Windkarte mit 100 m Auflösung für das 10-Minuten-Mittel um 10 UTC am 26. Dezember 1999.

Die Abbildung 20 illustriert die Windkarte in 100 m Auflösung für das 10-Minuten-Mittel um 10 UTC am 26. Dezember 1999.

Die Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen den Verlauf der Windgeschwindigkeit und -richtung von Wind-Topo im Vergleich zu den SwissMetNet-Referenzmessungen. Die Wind-Topo Resultate folgen im Trend dem gleichen Verlauf wie SwissMetNet. Es gibt jedoch punktuelle Abweichungen von etwa 4 bis 6 m/s in der Windgeschwindigkeit. Für Pully beträgt die Windrichtung im Mittel etwa 250°, während sie bei SwissMetNet bei rund 270° liegt.

Die Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen für Pully und Oron auch den Verlauf der Windgeschwindigkeit und -richtung von Wind-Topo und WRF 100m. Exemplarisch enthalten die Abbildungen auch die Verläufe zweier weiterer Stationen aller 25 Stationen.

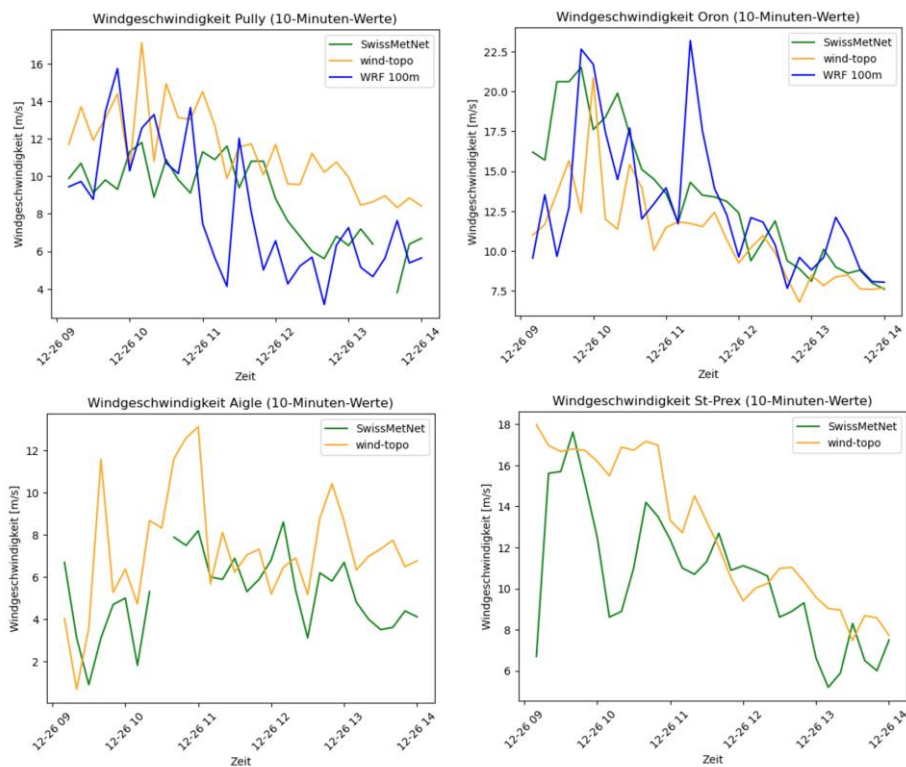


Abbildung 21: Vergleich der Windgeschwindigkeit von Wind-Topo mit WRF 1 km als Input im Vergleich zu den SwissMetNet-Referenzmessungen. Für Pully und Oron sind ebenfalls die WRF 100 m aufgelösten Instanzenwerte gezeigt.

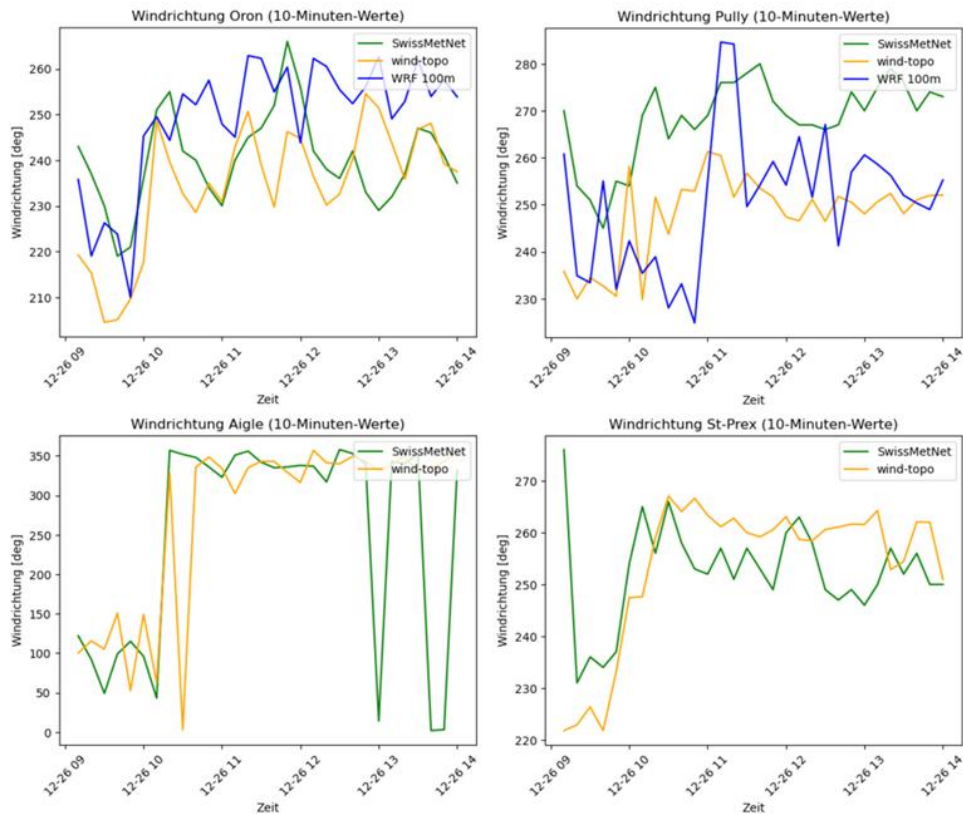


Abbildung 22: Vergleich der Windrichtung von Wind-Topo mit WRF 1 km als Input im Vergleich zu den SwissMetNet-Referenzmessungen. Für Pully und Oron sind ebenfalls die WRF 100 m aufgelösten Instantanwerte gezeigt.

4.2.3 Diskussion der Resultate und Effizienz des Modells

Wind-Topo erlaubt rechnerisch effizient grossräumige Windkarten mit guter Genauigkeit zu erstellen. Die Evaluationen haben jedoch gezeigt, dass die Maxima oft schlecht erfasst werden und die Windrichtung häufig eine andere Varianz als diejenige der Messungen von SwissMetNet aufweist.

Die bestehenden Modellparameter von Wind-Topo wurden unter Verwendung von COSMO-1 bestimmt. Die Evaluation unter Verwendung von WRF als Input hat gezeigt, dass aufgrund von Inputmodellunterschieden²⁸, höhere Mean Bias Errors (MBE) und Mean Absolute Errors (MAE) erreicht werden und somit Wind-Topo unter Verwendung von WRF nachtrainiert werden sollte, um bestmögliche Resultate zu erreichen.

²⁸ z.B. COSMO-1 verwendet SwissMetNet-Messungen zur Assimilation, um die Anfangsbedingungen durch Nudging oder andere Datenassimilationstechniken zu verbessern.

Wind-Topo kann zur Erstellung hochaufgelöster Windkarten mit einer Auflösung von 50 oder 100 m verwendet werden. Zur präzisen Abbildung von Windspitzen (Böen) sollte es jedoch weiter optimiert und nachtrainiert werden.

Bei Machine Learning Modellen fällt der substantielle Teil des Aufwands in der Trainingsphase an. Die eigentliche Modellierung benötigt nur schlanke Rechenressourcen und kann sehr kosteneffizient durchgeführt werden. Die Berechnung für das in Abbildung 20 dargestellte Gebiet dauerte pro Zeitschritt 15 Minuten auf Hardware mit der Spezifikation von:

- CPU: Apple M3 Max mit 16-CPU-Cores und 40-GPU-Cores
- Memory: 64 GB.

5 Statistisches Downscaling mit Windrefine

Windrefine ist ein Machine-Learning basiertes Modell zur Berechnung von räumlich hochaufgelösten bodennahen Windfeldern in komplexem Gelände, das sich bei Meteotest in Entwicklung befindet. Das Modell verwendet als Eingabevariablen verschiedene Wettervorhersagemodell- und Geländeparameter und berechnet als Ausgabe die u- und v-Komponenten der Windvektoren.

Für das Modelltraining werden die Eingangsdaten von ICON-1 und swissALTI3D, welche auf eine Auflösung von 100 m resampled werden, sowie die Outputvariablen u- und v-Windvektormessungen von SwissMetNet verwendet. Das Modelltraining ist auf andere Inputdatensätze und Windoutputvariablen (z.B. Windböen) einfach anpassbar. Der Grundansatz der laufenden Entwicklungen basiert auf der Arbeit von Dujardin und Lehning (2022), während die Weiterentwicklungsziele unter anderem die verbesserte Bestimmung von Windspitzen²⁹, optimierte Topografie-Berücksichtigung³⁰, Verbesserungsuntersuchungen betreffend Generalisierung³¹ und Performanceoptimierungen beinhaltet.

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurde die praktische Anwendbarkeit von Windrefine evaluiert.

5.1 Evaluationssetup und dynamische Eingangsdaten

Die laufenden Entwicklungen von Windrefine verwenden für das Training und für die Validierung ICON-1, swissALTI3D und die Messungen von 167 SwissMetNet-Stationen für das Gebiet der Schweiz (Abbildung 23). Zurzeit werden dazu stündliche Daten von 01.07.2024 bis 29.12.2024 verwendet. Für ein räumlich und zeitlich möglichst generalisierbares Modell ist vorgesehen, Daten über einen deutlich längeren Zeitraum und unter Einbezug weiterer Stationen zu verwenden.

²⁹ Optimierte Bestimmung von Windspitzen durch Methoden wie die Focal-Loss-Funktion, Oversampling hoher Windspitzen und die Synthetic Minority Over-Sampling Technique for Regression with Gaussian Noise (SMOGR).

³⁰ Optimierte Topografieüberücksichtigung durch spezialisierte ConvNet-Architekturen, gezieltes Feature Engineering oder Vision Transformers (ViTs).

³¹ Durch Verwendung von mehr Trainingsdaten und optimierte Trainingsmethodik.

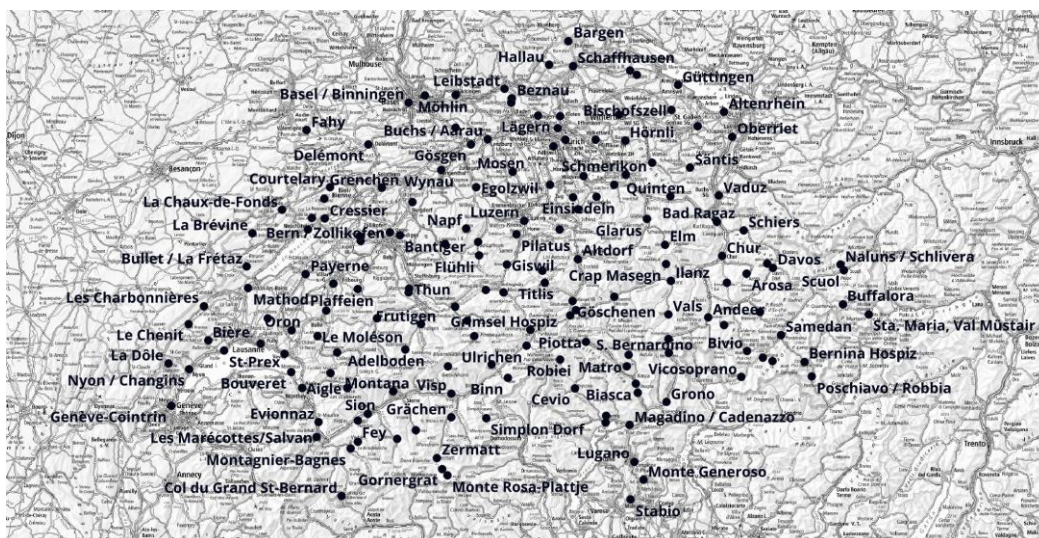


Abbildung 23: Statistisches Downscaling-Gebiet mit Windrefine unter Verwendung von ICON1 als Input und Standorte von 167 SwissMetNet-Stationen.

5.1.1 Statische Eingangsdaten

Windrefine benötigt verschiedene statische Eingangsdaten, welche die Topografie und deren Eigenschaften beschreiben (Tabelle 7).

Tabelle 7: Beschrieb der von Windrefine verwendeten statischen Inputdaten.

Statische Eingangsdaten	Quelle
Geländemodell	swissALTI3D von 2m auf 100m umgerechnet mit SRTM 30m für Grenzgebiet.
Geländeausrichtung	Basiert auf Geländemodell und wird statisch vorgerechnet.
Geländeneigung	Basiert auf Geländemodell und wird statisch vorgerechnet.

5.2 Resultate

In Tabelle 8 sind die Genauigkeiten von Windrefine unter Verwendung von ICON-1 als Input im Vergleich zu den SwissMetNet-Referenzmessungen aufgeführt. Bei einer 10-fachen Kreuzvalidierung über die Stationen ergibt sich für den gesamten Zeitraum ein Mean Bias Error (MBE)³² von -0.1 m/s und ein Mean Absolute Error (MAE) von 1.0 m/s für die Windgeschwindigkeit (Stundenauflösung).

³² Siehe Anhang "Fehlermetriken" für Details zu Mean Bias Error (MBE) und Mean Absolute Error (MAE).

Tabelle 8: Genauigkeiten von Windrefine unter Verwendung von ICON-1 im Vergleich zu den SwissMetNet-Referenzmessungen (Stundenwerte).

	Mean Bias Error (MBE) [m/s]	Mean Absolute Error (MAE) [m/s]
10-fache Kreuzvalidierung	-0.1	1.0

In Tabelle 9 sind die Genauigkeiten von Windrefine im Vergleich zu Messungen der Stationen des Interkantonalen Mess- und Informationssystem (IMIS) aufgeführt. Für den gesamten Zeitraum wird ein Mean Bias Error von 0.2 m/s und ein Mean Absolute Error (MAE) von 1.34 m/s für die Windgeschwindigkeit (Stundenwerte) erreicht.

Tabelle 9: Genauigkeiten von Windrefine unter Verwendung von ICON-1 im Vergleich zu den IMIS-Referenzmessungen (Stundenwerte).

IMIS-Station	Mean Bias Error (MBE) [m/s]	Mean Absolute Error (MAE) [m/s]
129 Stationen	0.2	1.34

Die Abbildung 24 zeigt den Verlauf der Windgeschwindigkeit (Stundenmittel) von Windrefine im Vergleich zu den SwissMetNet-Referenzmessungen für eine Auswahl von Validierungsstationen. Die Übereinstimmung mit SwissMetNet ist gut.

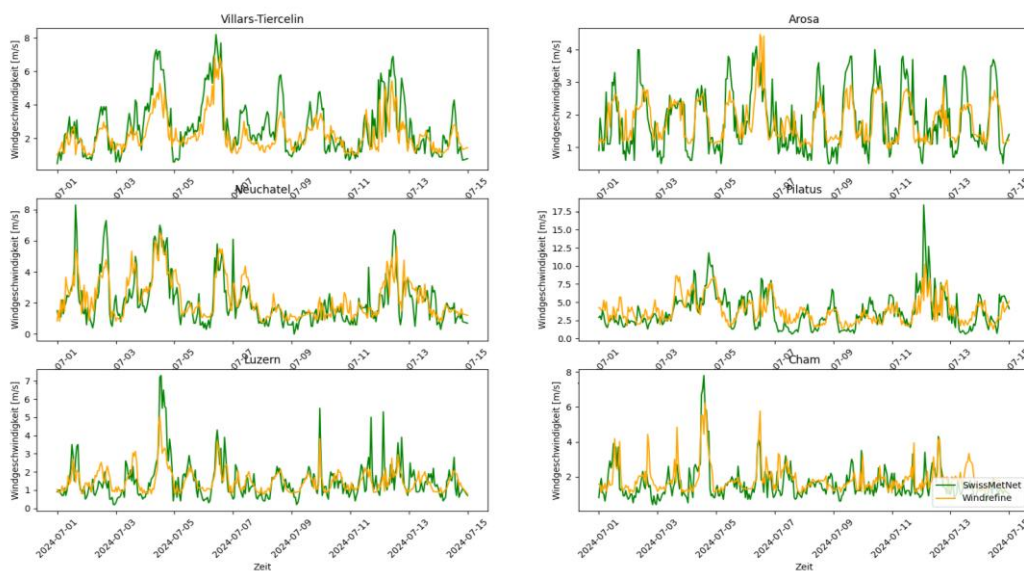


Abbildung 24: Verlauf der Windgeschwindigkeit (Stundenmittel) von Windrefine (gelb) im Vergleich zu den SwissMetNet-Referenzmessungen (grün) für eine Auswahl von Validierungsstationen.

Schliesslich ist in der Abbildung 25 die Windkarte mit 100 m Auflösung für 16:00 UTC am 09.10.2024 (Sturmtief Gerda / Kirk) zu sehen.

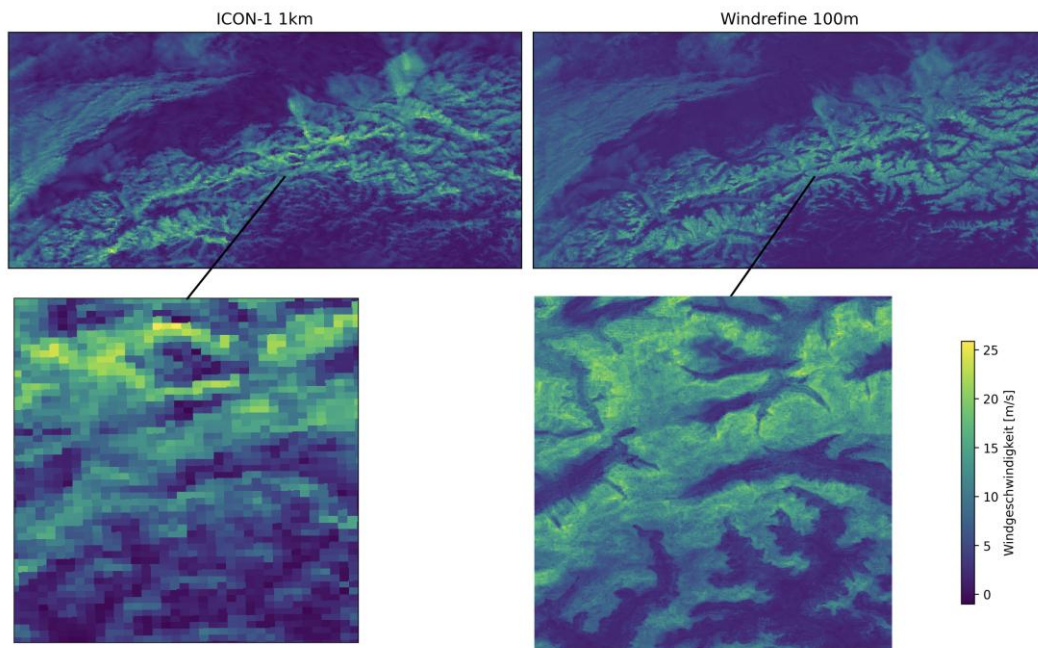


Abbildung 25: Windkarte mit 100 m Auflösung für 16 UTC (Stundenmittel) am 9. Oktober 2024 (Sturmtief Gerda / Kirk).

5.2.1 Diskussion der Resultate und Effizienz des Modells

Windrefine erlaubt es rechnerisch effizient grossräumige Windkarten mit guter Genauigkeit zu erstellen und ist darum für die Erstellung hochauflöster (100 m) Sturmgefährdungskarten geeignet.

Das Modell befindet sich in Entwicklung und hat den Fokus auf der präzisen Bestimmung von Böen, einer optimierten Topografie-Berücksichtigung, Untersuchungen zur Verbesserung der Generalisierung und Performanceoptimierungen.

Bei Machine Learning Modellen fällt der substantielle Teil des Aufwands in der Trainingsphase an. Die eigentliche Modellierung benötigt nur schlanke Rechenressourcen und kann sehr kosteneffizient durchgeführt werden. Die Berechnung für das in Abbildung 25 dargestellte Gebiet dauerte pro Zeitschritt 2 Minuten auf Hardware mit der Spezifikation von:

- CPU: Apple M3 Max mit 16-CPU-Cores und 40-GPU-Cores
- Memory: 64 GB

6 Zusammenfassender Vergleich der Modelle WRF, PALM, Wind-Topo und Windrefine

In der Tabelle 10 und Abbildung 26 sind die Resultate der 100 m aufgelösten WRF-Simulation und der beiden PALM-Simulationen dargestellt und mit den gemessenen Böenspitzen an der SMN Station Pully verglichen. Die beste Übereinstimmung liefert die PALM-Simulation mit dem 100 m Antrieb des WRF.

Tabelle 10: Vergleich der maximal auftretenden Böen aus PALM und WRF mit der MeteoSchweiz Station in Pully (SMN) im Zeitraum 08:40:01 bis 10:20:00 UTC. Es wird der jeweils höchste PALM-Wert aus den Höhen 9 m und 11 m verwendet.

Methode	Gemessen (SMN Pully) [m/s]	Modelliert [m/s]	Unterschied Modell – SMN [m/s]
PALM 2 m (wrf1km_to_palm2m)	26.81	28.50	1.69
PALM 2 m (wrf100m_to_palm2m)	26.81	26.03	-0.78
WRF 100 m	26.81	30.48	3.67

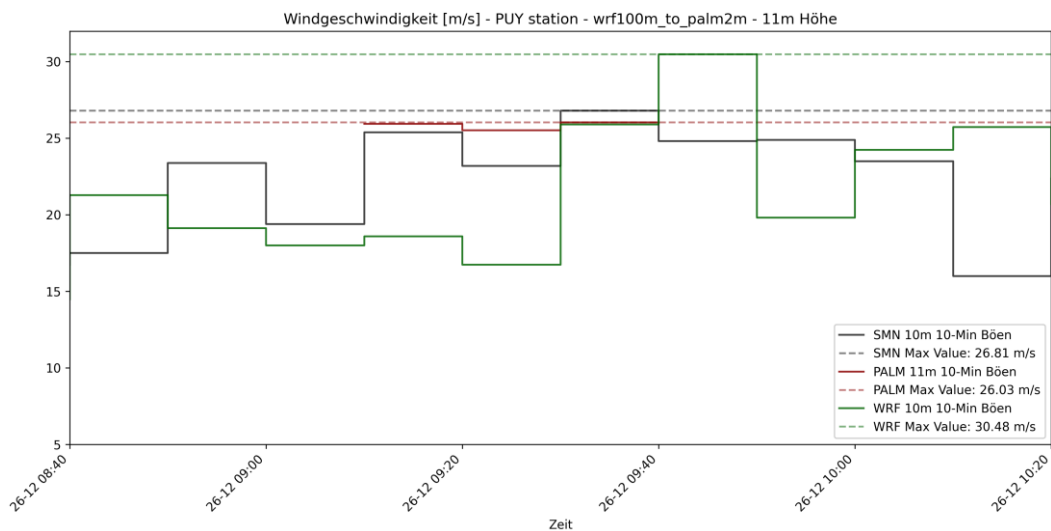


Abbildung 26: Böen an SMN-Station Pully (schwarz) und modelliert mit WRF 100 m (grün) und PALM 2 m (rot; die Kurve zeigt die Werte für die PALM Modellierung wrf100m_to_palm2m auf 11 m Höhe)

Im Folgenden wird ein visueller Vergleich der maximalen Böen basierend auf den PALM-Modellierungen mit einer horizontalen Auflösung von 2 m und dem WRF mit einer Auflösung von 100 m präsentiert. Um die Unterschiede der Resultate aufgrund der Auflösung zu verdeutlichen, wird nur der Ausschnitt des mit PALM modellierten Gebietes gezeigt.

Abbildung 27 zeigt die maximale Böe pro Gitterzelle in 10 m Höhe über Grund für das WRF-Modell mit einer horizontalen Auflösung von 100 m. Abbildung 28 zeigt die maximale Böe pro Gitterzelle des PALM 2 m-Modells in 9 m und 11 m Höhe (100 m WRF Antrieb).

Beim Vergleich von Abbildung 27 mit Abbildung 28 wird der starke Unterschied des Detaillierungsgrades der Informationen aufgrund der unterschiedlichen Auflösung deutlich.

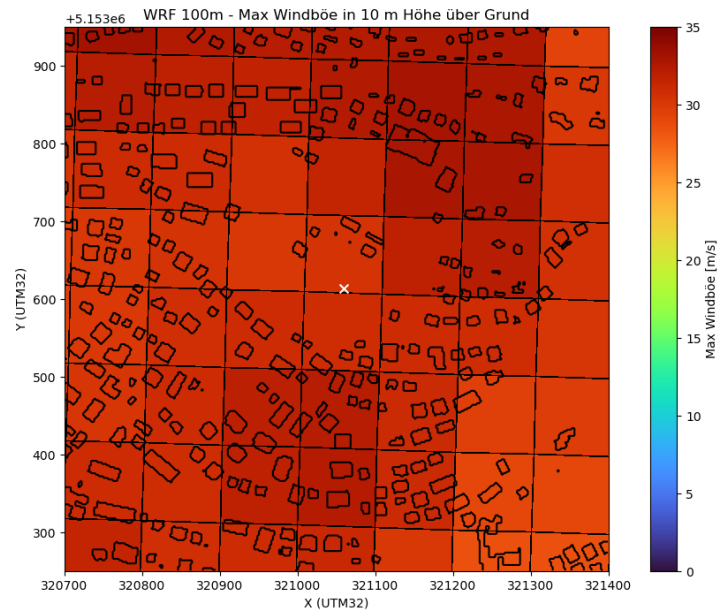


Abbildung 27: Maximale Böe pro Gitterzelle in 10 m Höhe über Grund zwischen 7 UTC und 14 UTC für das WRF-Modell mit einer horizontalen Auflösung von 100 m. Der Standort der SMN-Station in der Mitte des Kartenausschnitts ist mit einem weissen Kreuz markiert.

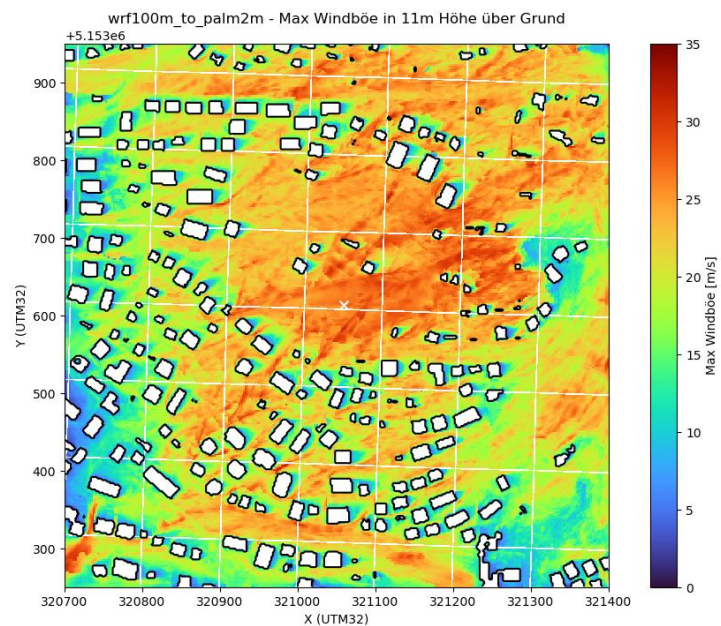
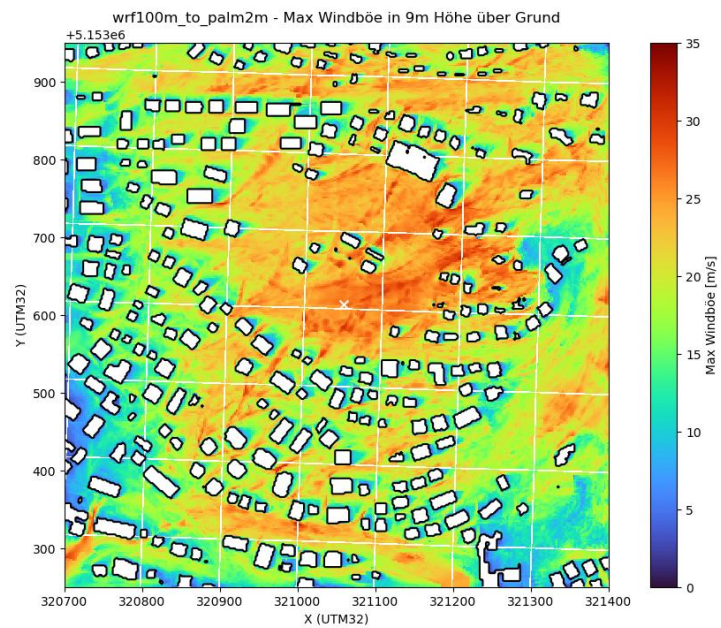


Abbildung 28: Maximale Böe pro Gitterzelle in 9 m (oben) und 11 m (unten) Höhe über Grund zwischen 09:10 bis 09:40 UTC für das PALM-Modell mit einer horizontalen Auflösung von 2 m. Das WRF-Modellgitter (100 m Auflösung) ist in Weiss dargestellt. Der Standort der SMN-Station in der Mitte des Kartenausschnitts ist mit einem weissen Kreuz markiert.

Der Vergleich mit den gemessenen Böenspitzen zeigt, dass mithilfe der Modellkette WRF 100 m – PALM 2 m die tatsächlich auftretenden Böenspitzen

gut erfasst werden (Tabelle 10 und Abbildung 26). Ausserdem wird aus dem Vergleich der Karten der maximalen Windgeschwindigkeiten aus WRF 100 m und PALM 2 m ersichtlich, wie mit PALM die grosse räumliche Variabilität der Böen gebäudeauflösend wiedergegeben werden kann (Abbildung 28). Somit ist der grosse Vorteil dieser physikalischen Modelle, dass sie die Strömung physikalisch konsistent erfassen.

Hingegen ist es aufgrund der grossen Anforderungen an die Rechenleistung kaum möglich, mit dieser Modellkette und Auflösungen schweizweit eine Vielzahl von Sturmereignissen zu modellieren. Hier bietet sich ein Machine Learning basiertes statistisches Downscaling an, welches mit geringer Rechenzeit eine gute Genauigkeit liefert.

Das auf COSMO-1 Daten vortrainierte Modell Wind-Topo erstellt mit geringem Rechenaufwand grossräumige Windkarten mit guter Genauigkeit (Abbildung 20). Jedoch zeigt die Evaluation mit Messdaten, dass die Maxima teilweise schlecht erfasst werden (Abbildung 18). Wind-Topo ist nicht darauf ausgelegt, Böen zu erfassen. Das bei Meteotest in Entwicklung befindliche Machine-Learning basierte Modell Windrefine generalisiert den Ansatz von Wind-Topo und ist darauf ausgerichtet Böenspitzen zu berechnen. Windrefine kann mit geringem Rechenaufwand und mit optimierter Topografie-Berücksichtigung grossräumige Windkarten berechnen (Abbildung 25) und zeigt im Vergleich mit Messdaten eine gute Genauigkeit (Abbildung 24).

7 Schlussfolgerung und Empfehlung für die Sturmmodellierungen

Zur Erstellung von hoch (100 m und 2 m) aufgelösten Sturmgefährdungskarten wurden verschiedene Modelle und Modellketten geprüft. Es wurde sowohl die Qualität der Modellresultate, als auch die Machbarkeit (Rechenzeit, benötigte Rechenleistung) untersucht.

Wir konnten zeigen, dass die Böenspitzen eines Sturmereignisses hochaufgelöst (100 bis 2 m) in guter Genauigkeit modelliert werden können. Allerdings sind die dazu nötigen Verfahren mit physikalischen Modellen bezüglich Ressourcenaufwand und Rechenzeit sehr anforderungsreich. Dies macht sie ungeeignet zur Erstellung einer kantonalen oder schweizweiten Sturmgefährdungskarte in 100 m Auflösung oder mehr. Hier kommt die Effizienz von Machine Learning Methoden ins Spiel. Aufgrund von Trainingsdatensätzen "lernt" das Modell, wie Ausgangsdaten mit einer Auflösung von 1 km auf 100 m herunterskaliert werden. Dieser Ansatz ist in der Umsetzung für einen Kanton oder die ganze Schweiz hinsichtlich Rechenressourcen hocheffizient.

Damit haben sich zwei Anwendungsgebiete herauskristallisiert: Einerseits die Erstellung einer flächendeckenden Sturmgefährdungskarte für die ganze Schweiz, andererseits die Möglichkeit für einzelne Gebäudegruppen hochauflösende Sturmmodellierungen durchzuführen. Für beide Anwendungsgebiete konnten wir ein Verfahren bzw. eine Modellkette herleiten, das repräsentative Resultate mit überzeugender Genauigkeit verspricht. Diese werden in Tabelle 11 aufgelistet und in den folgenden Abschnitten detaillierter erklärt.

Tabelle 11: Beschreibung der zwei vorgeschlagenen Modellketten.

Anwendungszweck	Sturmgefährdungskarte 100 m (ganze Schweiz)	Gebäudeauflösende Sturmmodellierung 2 m
Zeitliche Abdeckung	Sturmereignisse seit 2016	Einzelne ausgewählte Sturmereignisse seit 1940 Rund 60 Minuten in 1 Sekunden Auflösung
Räumliche Abdeckung	Schweizweite Abdeckung	Lokal; rund 1 km ²
Resultat	Flächendeckende Karte mit Böen mit 50 jährlicher Wiederkehrperiode	Zeitreihe der Böen pro Sturmereignis und Gitterzelle
Eignung	Generelle örtliche Einstufung des Sturmrisikos für den Gebäudepark	Hochdetaillierte Berechnung der Sturmspitzen an einzelnen Gebäuden für spezifische Fragestellungen
Modellierung	Statistisches Downscaling	Physikalische Modellierung mit PALM
Modellkette	COSMO/ICON - Windrefine	COSMO/ICON – WRF – PALM (für Stürme nach 2008 ³³) ERA5 – WRF – PALM (für Stürme vor 2008)

7.1 Hochdetaillierte Sturmberechnungen

Die Stärke der physikalischen Modelle WRF und PALM liegt in der physikalisch konsistenten Wiedergabe von einzelnen Ereignissen. Ausgewählte Sturmereignisse in sensiblen Gebieten (Grössenordnung 1 km²) können mit PALM in 2 m Auflösung simuliert werden. Dies kann auf vergangene Stürme angewandt werden wie auch nach Bedarf kurz nach Eintreten eines neuen Ereignisses. Um die Bearbeitungszeit kurz zu halten, können die statischen Daten für die Schweiz bereits im Vorfeld aufbereitet werden, so dass im Ereignisfall lediglich die Simulationszeit berücksichtigt werden muss.

Das Anwendungsgebiet liegt einerseits in der Planungsphase. Insbesondere Gebäuden mit speziellen Konstruktionen oder potenziell windanfälligen Komponenten kann mit einer vorgängigen Modellierung die Planung und Umsetzung auf die kleinskalig zu erwartenden Windbelastungen ausgerichtet werden. Andererseits können Sturmereignisse nachmodelliert werden, um einen Schadenfall eingehend zu untersuchen, mit dem Ziel präventive Massnahmen für die Zukunft ableiten zu können.

³³ COSMO-2 mit eine 2.2km Auflösung ist seit 2008 operationell.

7.2 Grossflächige Sturmgefährdungskarten

Für das Erstellen einer grossflächigen (Kantone bis gesamte Schweiz) 100 m aufgelösten Sturmgefährdungskarte bietet sich ein statistisches Downscaling aus existierenden 1 km aufgelösten COSMO/ICON-Daten an. Die Rechenzeiten von physikalischen Modellen wie WRF sind für solche grossen Gebiete, Auflösungen und nötige Anzahl Sturmereignisse zu gross. Statistisches Downscaling bietet den Vorteil von sehr geringer Rechenzeit bei guter Genauigkeit.

Dabei kann an die bestehenden Arbeiten von Wind-Topo angeknüpft werden, das auf die Modellierung mittlerer Windgeschwindigkeiten ausgerichtet ist. Mit der Weiterentwicklung WindRefine konnten wir zeigen, dass sich der Ansatz auch auf die Modellierung von Böenspitzen erweitern lässt.

Somit empfehlen wir, für eine 100 m aufgelöste Sturmgefährdungskarte mit 50-jährlicher Wiederkehrperiode die stärksten 15 Stürme, basierend auf 1 km COSMO/ICON-Daten mit Windrefine statistisch auf 100 m Auflösung herunterzuskalieren. Anschliessend werden mit einer Extremwertanalyse gemäss Kapitel 13.2 die 50-jährliche Extremstürme berechnet.

Die so produzierten Karten eignen sich für eine zuverlässige örtliche Einstufung des Sturmrisikos und können bei der Beurteilung des Schadenpotenzials oder bereits zur Risikominderung in Planung und Bau hochwertige Grundlegendaten beisteuern.

8 Méthodologie pour une carte de danger et analyse de risque

Afin d'évaluer la possibilité de mettre en place une carte des dangers à haute résolution spatiale liée au vent en Suisse, il est nécessaire de pouvoir déterminer des intensités liées aux vitesses de vent mesurées ou modélisées. Deux échelles d'analyse distincte sont étudiées, une première analyse est située dans la zone test de Pully où Meteotest a effectué une modélisation des vitesses de vent pour la tempête Lothar du 26 décembre 1999, une seconde analyse couvre tout le canton de Vaud se basant sur les vitesses mesurées par les stations automatiques de mesure au sol du réseau SwissMetNet de MétéoSuisse.

Afin de déterminer la vulnérabilité, plusieurs caractéristiques des bâtiments ont été considérées, des caractéristiques physiques (hauteur, présence d'avant-toit, présence de toit-plat, nombre et orientation des façades, surface des façades) et d'autres caractéristiques (année de construction, valeur assurée). La répartition de ces éléments et de la sinistralité des bâtiments est étudiée afin d'établir des possibles corrélations entre eux, ainsi que de déterminer si des facteurs influencent la vulnérabilité des bâtiments. Ces caractéristiques sont complétées par les données des sinistres fournies par l'ECA Vaud. Une première série de sinistres comprend les sinistres ayant eu lieu entre 2010 et 2024 sur tout le territoire du canton, ces sinistres sont ceux utilisés pour l'analyse à l'échelle cantonale. Une seconde série de sinistres contenant les sinistres de la tempête Lothar ont par la suite été rendus disponibles. Cette seconde série permet d'évaluer la pertinence des intensités déterminées pour la zone test de Pully.

9 Données disponibles

9.1 Données des bâtiments

Les données publiques suivantes, disponibles à l'échelle nationale ont été utilisées comme base de calcul pour décrire les bâtiments.

Tableau 1. Source des données utilisées afin de décrire les bâtiments.

Source de données	Description générale des données	Informations disponibles
Energie solaire : Aptitude des toitures ³⁴	<ul style="list-style-type: none">• Toitures découpées à partir des données de swissBUILDINGS 3D 2.0. Tous les éléments de toitures sont reliés à partir d'un numéro unique à un bâtiment de SwissBuildings 2.0.• Géométrie : Polygone	<ul style="list-style-type: none">• Orientation de chaque élément• Pente de chaque élément• Surface de chaque élément (surface utile)
Energie solaire : Potentiel des façades ³⁵	<ul style="list-style-type: none">• Idem que toitures• Géométrie : Ligne	<ul style="list-style-type: none">• Orientation des façades• Surface des façades

Ces deux jeux de données ont été modélisés à partir des données du modèle du territoire swissBUILDINGS 3D 2.0, ainsi ces données sont disponibles pour toute la Suisse.

Aux données nationales disponibles, s'ajoutent pour la commune de Pully qui comprend la zone test pour la modélisation des rafales à l'échelle du bâtiment, des données fournies par l'ECA-VD. A partir de ces données, les éléments suivants ont pu être déterminés, respectivement extraits par SIG :

³⁴ <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/numerisation-et-geoinformation/geoinformation/geodonnees/solaire/energie-solaire-aptitude-des-toitures.html>

³⁵ <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/numerisation-et-geoinformation/geoinformation/geodonnees/solaire/energie-solaire-potentiel-des-facades.html>

Tableau 2. Description des données utilisées pour définir les bâtiments.

Données	Description	Unité	Echelle	Sources
Présence d'avant-toit – Façade	Différence entre empreinte du bâtiment au sol (façade) et empreinte de la surface du toit	Présence / Absence	Canton	<ul style="list-style-type: none"> Energie solaire : Aptitude des toitures Energie solaire : Potentiel des façades
Présence d'avant-toit – Bâtiment	Bâtiment considéré avec avant-toit si une façade possède un avant-toit	Présence / Absence	Canton	<ul style="list-style-type: none"> Energie solaire : Aptitude des toitures Energie solaire : Potentiel des façades
Nombre d'éléments de toiture	Nombre d'éléments de toiture par bâtiment	-	Canton	<ul style="list-style-type: none"> Energie solaire : Aptitude des toitures
Nombre d'éléments de toiture par orientation	Nombre d'orientations différentes parmi les éléments de toiture d'un bâtiment	-	Canton	<ul style="list-style-type: none"> Energie solaire : Aptitude des toitures
Présence absence d'un élément de toit plat sur un bâtiment	Bâtiment considéré avec toit plat si une partie du toit possède une pente < 9°	Présence / Absence	Canton	<ul style="list-style-type: none"> Energie solaire : Aptitude des toitures
Nombre de façades	Nombre de façades par bâtiment	-	Canton	<ul style="list-style-type: none"> Energie solaire : Potentiel des façades
Nombre d'orientation des façades	Nombre d'orientations différentes des façades par bâtiment	-	Canton	<ul style="list-style-type: none"> Energie solaire : Potentiel des façades

Surface totale des façades par bâtiments	Somme de la surface de toutes les façades par bâtiment	m ²	Canton	<ul style="list-style-type: none"> Energie solaire : Potentiel des façades
Valeur assurée	Valeur assurée pour chaque bâtiment	CHF	Pully	<ul style="list-style-type: none"> ECA VD
Année de construction	Année de construction du bâtiment. (Données incomplètes)	Année	Pully	<ul style="list-style-type: none"> ECA VD
Hauteur du bâtiment	Différence entre altitude supérieure du toit et point le plus bas du bâtiment	m	Pully	<ul style="list-style-type: none"> ECA VD

Les données pour les deux échelles d'analyses se répartissent ainsi :

Tableau 3. Nombre de bâtiments et de façades concernées pour les deux échelles d'analyse.

	Zone test de Pully	Canton de Vaud
Nombre de bâtiments	339	169'093
Nombre de façades	2'367	1'449'105

9.2 Données de vent

Pour la zone test de Pully les données du vent utilisées sont celles de la modélisation WRF 100m to PALM 2m (chap. 3) en particulier les valeurs des vecteurs horizontaux de la vitesse (\vec{u} ; \vec{v}) fournis par la modélisation. La résolution des cellules du raster est de 2 m. Les données des modélisations à 5, 7, 9 et 11 mètres ont été utilisées pour l'analyse. La modélisation est effectuée pour la tempête Lothar du 26 décembre 1999.

A l'échelle cantonale, les données de vent sont issues des valeurs aux stations de mesures du réseau SwissMetNet de MétéoSuisse. Pour le canton de Vaud il y a actuellement 18 stations sur l'ensemble du territoire. Les données ne sont cependant pas disponibles depuis 2010 pour toutes les stations. Le tableau 4 donne un aperçu de la disponibilité des données pour les stations du canton. Les données disponibles sont pour chaque heure : la vitesse moyenne du vent [m/s], la vitesse de la rafale de 3 secondes la plus élevée [m/s], la direction moyenne du vent [°].

Tableau 4. Disponibilité des mesures de vent pour les stations du réseau de mesures SwissMetNet. Les stations mises en évidence sont celles pour lesquelles les données sont disponibles pour la totalité de la période.

Stations	Données disponibles depuis
Aigle	01.01.2010
Bière	01.01.2010
Bouveret	01.01.2010
Bullet / La Frétaz	01.01.2010
Château-d'Oex	08.02.2012
Col des Mosses	20.09.2015
Evionnaz	01.01.2010
La Dôle	01.01.2010
Les Charbonnières	23.09.2014
Les Diablerets	01.01.2010
Method	01.01.2010
Nyon / Changins	01.01.2010
Oron	01.01.2010
Payerne	01.01.2010
Pully	01.01.2010
St-Prex	01.01.2010
Vevey / Corseaux	20.09.2015
Villars-Tiercelin	13.03.2014

9.3 Données des sinistres

Les données des sinistres ont été fournies par l'ECA VD. Les données contiennent pour chaque sinistre les données suivantes : Date du sinistre, Code AEAI, Description du sinistre, Cause ECA (Ouragan, Grêle), Valeur assurée [CHF], Dégâts [CHF]. Pour des raisons de qualité des données, dans un premier temps, uniquement les données des sinistres de 2010 à 2024 ont été fournies. Pour ce projet uniquement les événements classifiés comme ouragan ont été considérés. Dans un second temps des données concernant les événements plus anciens (1994-2009) ont également été fournies par l'ECA VD. Les données fournies pour cette étude préliminaire, sont rattachés à un bâtiment mais sans précision autre que la description du sinistre pour évaluer la zone précise où les dégâts ont eu lieu. De plus, les sinistres contiennent également les dommages aux alentours des bâtiments et non uniquement les dégâts directs aux bâtiments.

10 Détermination des intensités

10.1 Zone test de Pully

Pour la zone test de Pully la modélisation permet d'obtenir des vecteurs de vitesse et de direction pour des cellules de 2 m. Pour calculer des intensités la vitesse et la direction de l'impact sur les façades ont été déterminées à partir des deux vecteurs horizontaux issus de la modélisation (\vec{u} ; \vec{v}). Ainsi pour chaque cellule de 2 m sur 2 m de la zone de test de Pully, l'intensité du vent sur des axes ouest-est (\vec{u}) et sud-nord (\vec{v}) est disponible.

Afin de déterminer la pression du vent sur chaque façade de la zone, une zone tampon de 1 m du côté extérieur de chaque façade est créée. La moyenne pondérée par surface de recouvrement pour les deux axes est calculée sur ce tampon. La combinaison des deux vecteurs permet d'obtenir la vitesse moyenne (v_m [m/s]) et la direction moyenne (α [°]) sur chaque façade de la zone. Cette moyenne est établie pour les 4 hauteurs de modélisation des rafales, de la tempête Lothar (fig. 1).

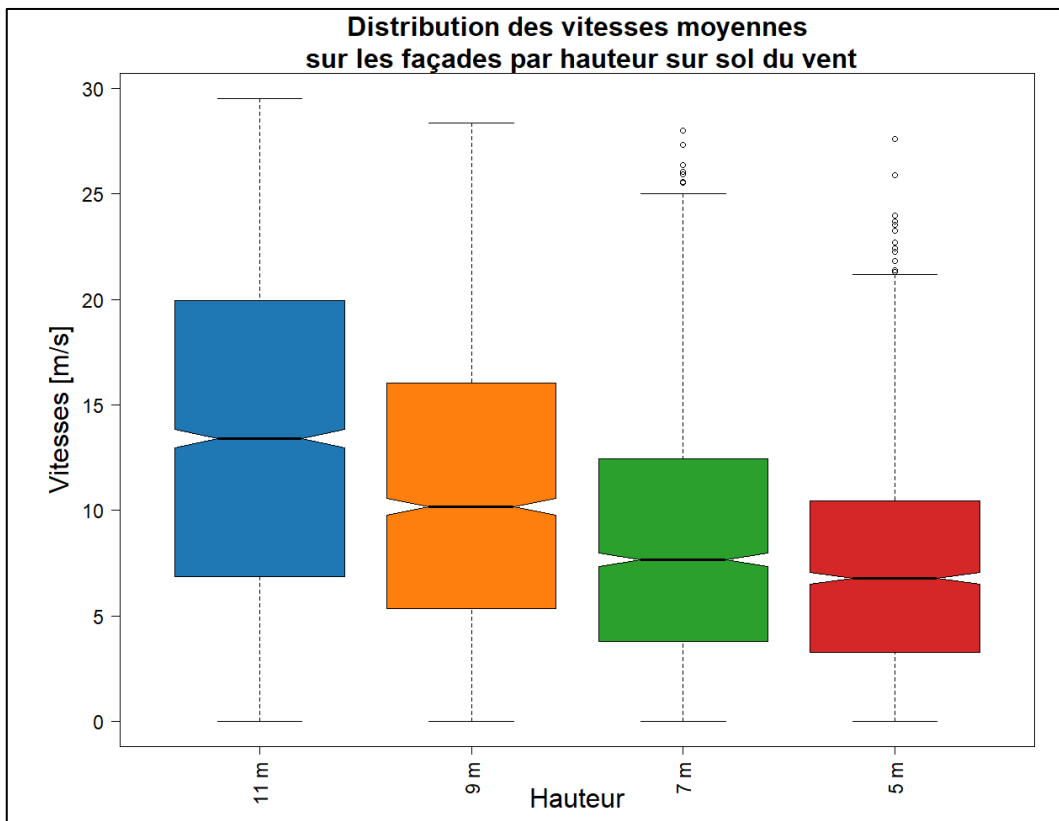


Figure 1. *Boxplots* des vitesses moyennes de l'impact sur les façades du vent pour chaque hauteur de la modélisation du vent.

Afin de transcrire ces vitesses de vent en intensité, la prise en compte de l'angle d'impact (φ [°]) sur les façades est également importante. Cet angle d'impact

correspond à la différence entre la direction moyenne (α) du vecteur impactant la façade et l'orientation de la façade. En incluant cet angle il est ainsi possible de calculer la pression dynamique du vent (q_p) qu'elle représente sur chaque façade de la zone (fig. 2 et 3) selon la formule^{36 37}:

$$q_p = \frac{\rho_l}{2} \cdot v_w^2 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

avec $\rho_l = 0.00125 \left[\frac{\text{t}}{\text{m}^3} \right]$: Densité de l'air

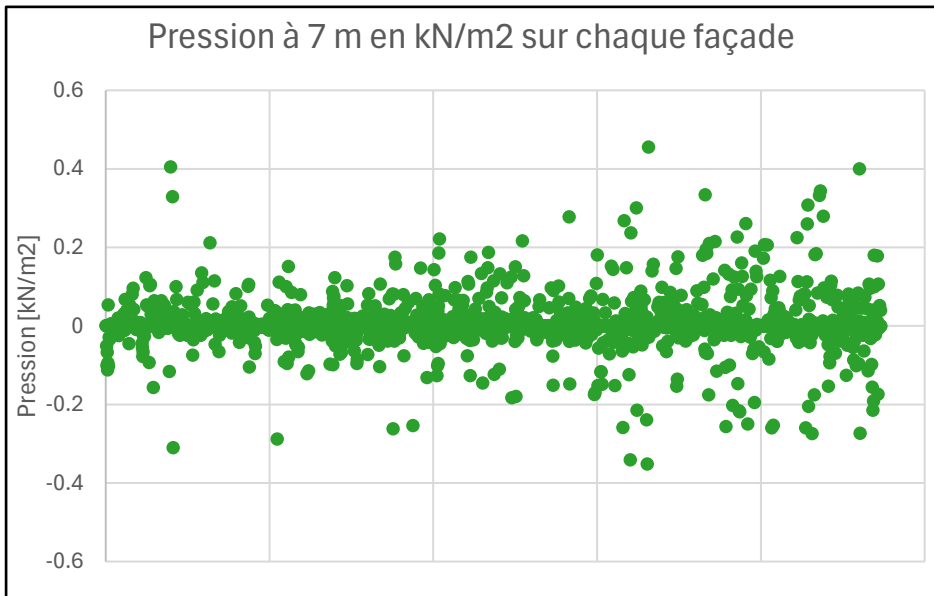
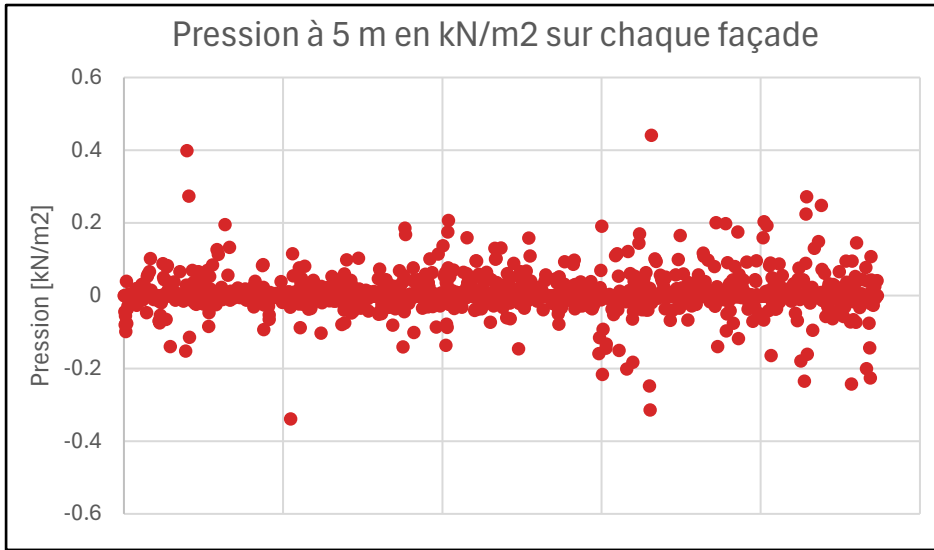
$$\text{et } v_w = v_m \cdot \cos(\varphi)$$

Contrairement au calcul de la pression dans la norme SIA 261 les valeurs de vitesse et de direction issues de la modélisation permettent de directement calculer la pression exercée sur chaque façade la zone. En effet, le calcul des forces dans la norme s'effectuant sur la base de la valeur de référence de la pression dynamique³⁸, la hauteur sur sol ainsi qu'un coefficient de rugosité. Ces éléments sont pris en compte dans la modélisation, ainsi les données obtenues permettent un calcul direct de la pression dynamique moyenne sur chaque façade. Les résultats obtenus pour chaque hauteur de vent sur sol sont représentés dans les figures 2 et 3. Les valeurs positives représentent une pression ($\varphi < 90^\circ$ ou $\varphi > 270^\circ$) sur les façades, les valeurs négatives la présence d'un phénomène de succion ($90^\circ < \varphi < 270^\circ$).

³⁶ SIA 261 (2020). Actions sur les structures porteuses

³⁷ <https://www.protection-dangers-naturels.ch/specialiste/dangers-naturels/tempetes.html>

³⁸ SIA 261 (2020). Actions sur les structures porteuses. Annexe E Valeur de référence de la pression dynamique.



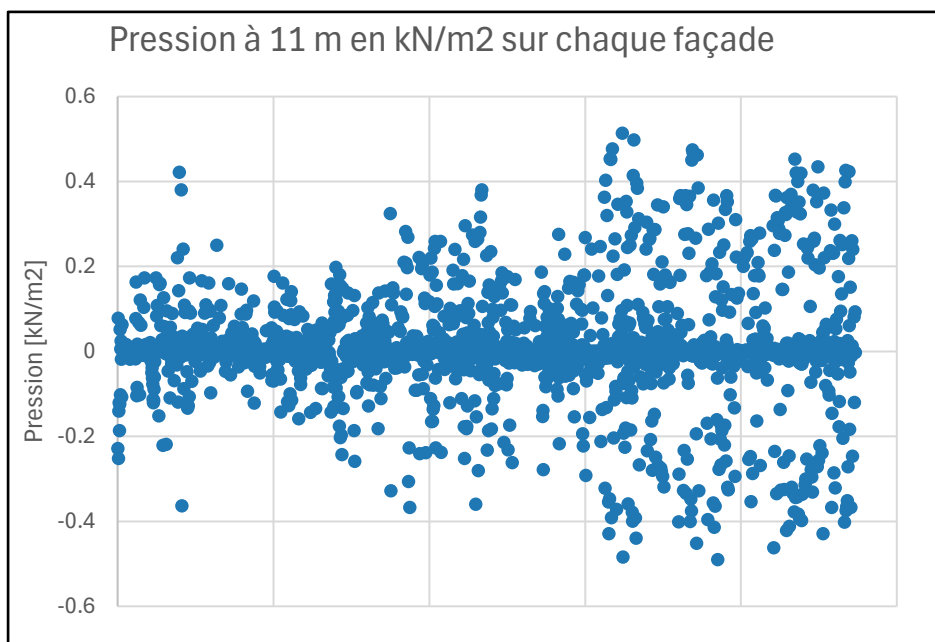
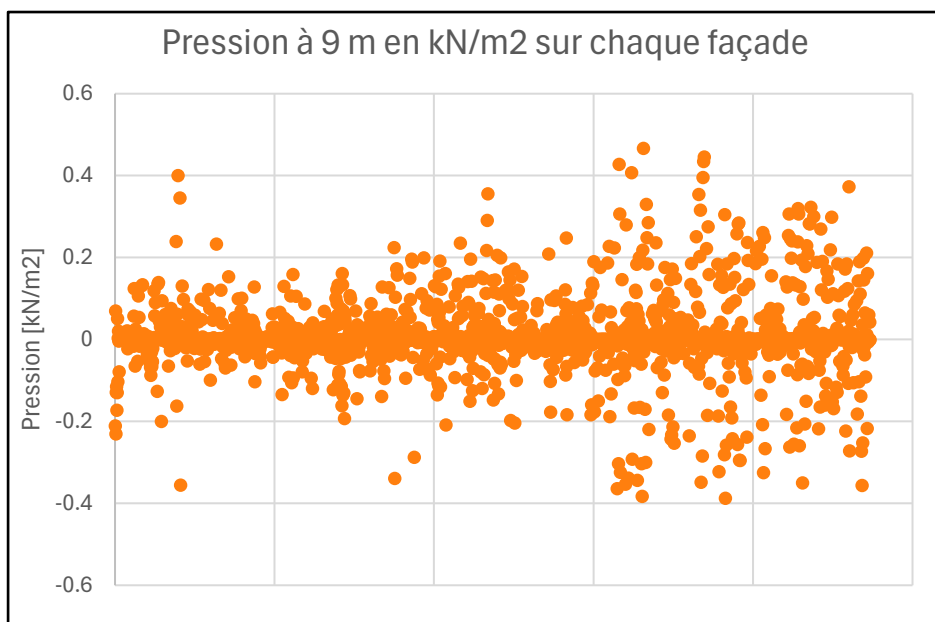


Figure 2. Pression sur chaque façade de la zone de test de Pully pour les vitesse et direction de vent issues la modélisation. Chaque point représente une façade.

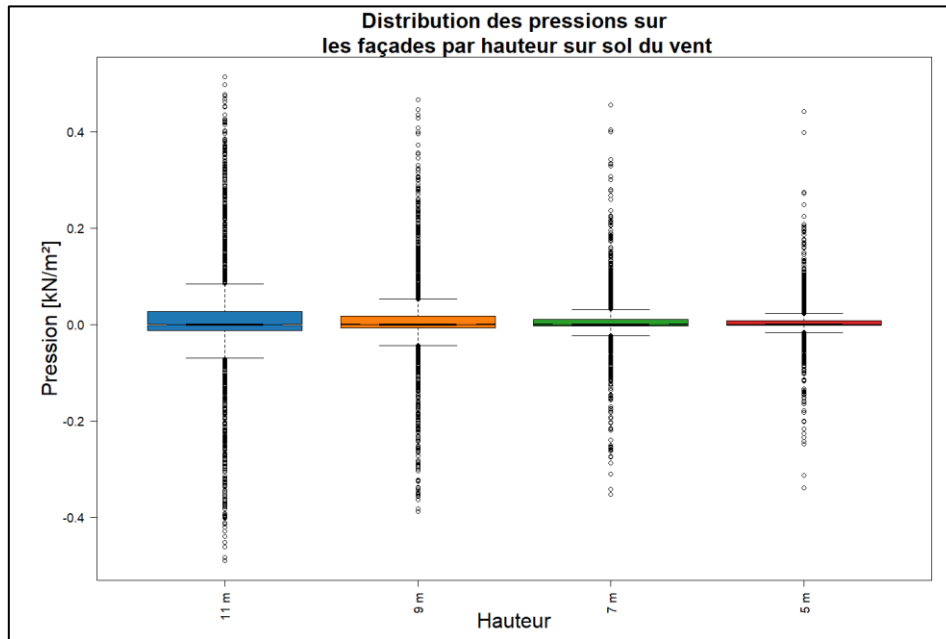


Figure 3. Boxplot de la distribution des valeurs de pressions sur les façades

Comme pour les vitesses de vent (fig.1) les valeurs absolues de pression (fig.2 et 3) ou de succion augmentent avec la hauteur sur sol de la modélisation. Les valeurs maximales, ou minimales en cas de succion, augmentent légèrement, alors que la fréquence des valeurs supérieures à 0,4 kN/m² est nettement plus importante pour la hauteur sur sol de 11 m³⁹. Pour toutes les hauteurs sur sol modélisées la majorité des valeurs de pression se situe à des valeurs absolues très faible. En effet la figure 3 montre une distribution très concentrée autour de la valeur zéro.

³⁹ Il s'agit dans le modèle CLIMADA développé par l'ETHZ du seuil où les dégâts commencent à apparaître sur les bâtiments. Néanmoins l'analyse a montré ici que des dommages sont déjà présents à des vitesses moindres. https://climada-python.readthedocs.io/en/stable/tutorial/climada_entity_ImpactFuncSet.html

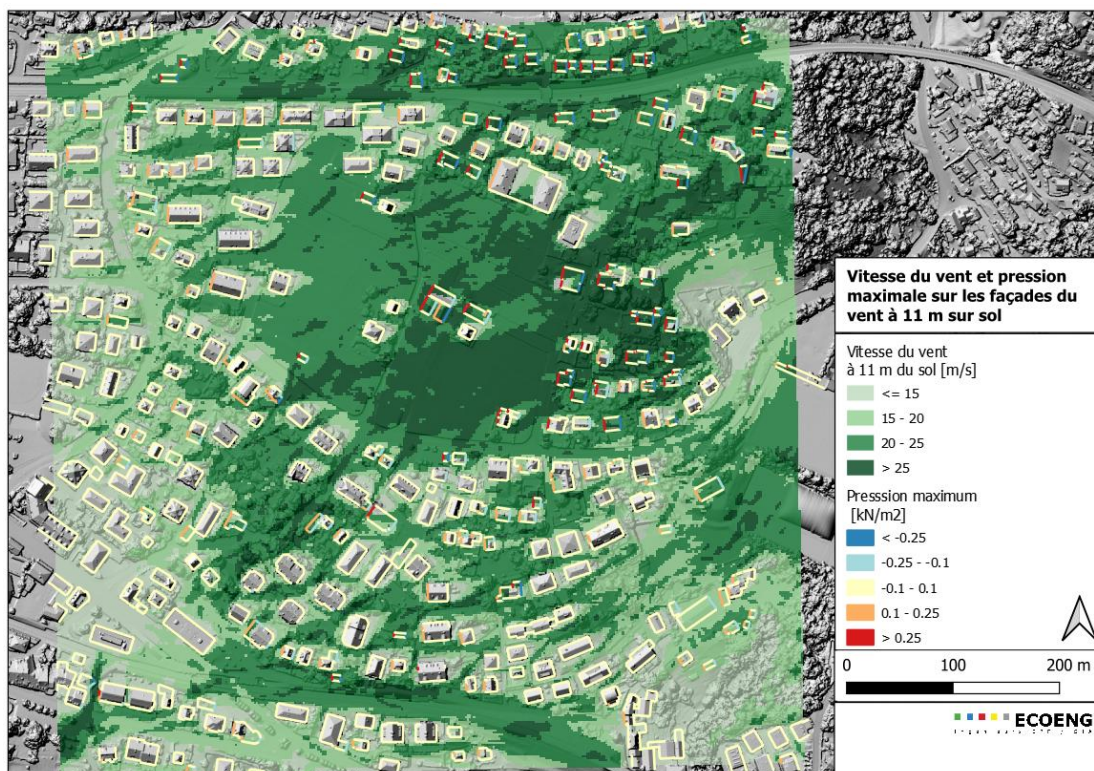


Figure 4. Vitesse du vent et pression maximale sur les façades du vent à 11m sur sol

10.2 Canton de Vaud

Pour effectuer une analyse de risque au niveau cantonal des sinistres, il est nécessaire de définir une vulnérabilité en liant chaque sinistre analysé à une donnée de vent afin de pouvoir lier chaque sinistre à une intensité. Une première analyse a été effectuée en sélectionnant uniquement les événements d'une certaine importance. La sélection de ces événements est réalisée sur la base de la somme de la valeur des dédommagements regroupés par date de sinistre. Pour tous les événements sélectionnés, chaque sinistre est relié à la vitesse maximale de rafale relevée le jour du sinistre, de la station de mesure la plus proche. La station la plus proche est désignée comme la station avec la plus courte distance linéaire avec le lieu du sinistre, les potentielles caractéristiques topographiques (altitude, exposition, ...) n'ont ainsi pas été prise en compte. La direction du vent est aussi relevée, un calcul de la pression dynamique n'est cependant pas effectué. La direction disponible correspondant à la direction moyenne du vent durant l'heure pendant laquelle la rafale a eu lieu, cette donnée n'est pas réellement pertinente pour évaluer l'impact sur les façades. Comme le démontre bien la modélisation pour la zone test de Pully, les vitesses mesurées à une station ne correspondent pas non plus directement à la vitesse d'impact sur les façades en raison de la dynamique du vent dans le milieu construit.

11 Analyse de risque

11.1 Zone test de Pully

Pour la zone test de Pully, la méthodologie appliquée pour le calcul de la pression dynamique sur chaque façade est testée au moyen des données de sinistres disponibles pour la tempête Lothar du 26 décembre 1999. Pour ce faire les sinistres concernant des bâtiments de la zone, datés entre le 25 et le 27 décembre ont été sélectionnés. Pour chaque bâtiment sinistrés deux indicateurs ont été calculé pour qualifier les dommages : la valeur du dédommagement en rapport avec la surface de la façade du bâtiment [CHF/m²] et le rapport entre la valeur du dédommagement et la valeur assurée du bâtiment [%]. Ces deux indicateurs ont été testés pour une corrélation avec la valeur maximale de pression subie par une façade d'un bâtiment (fig. 5). Dans les deux cas, la régression linéaire n'a démontré aucune corrélation entre les deux variables.

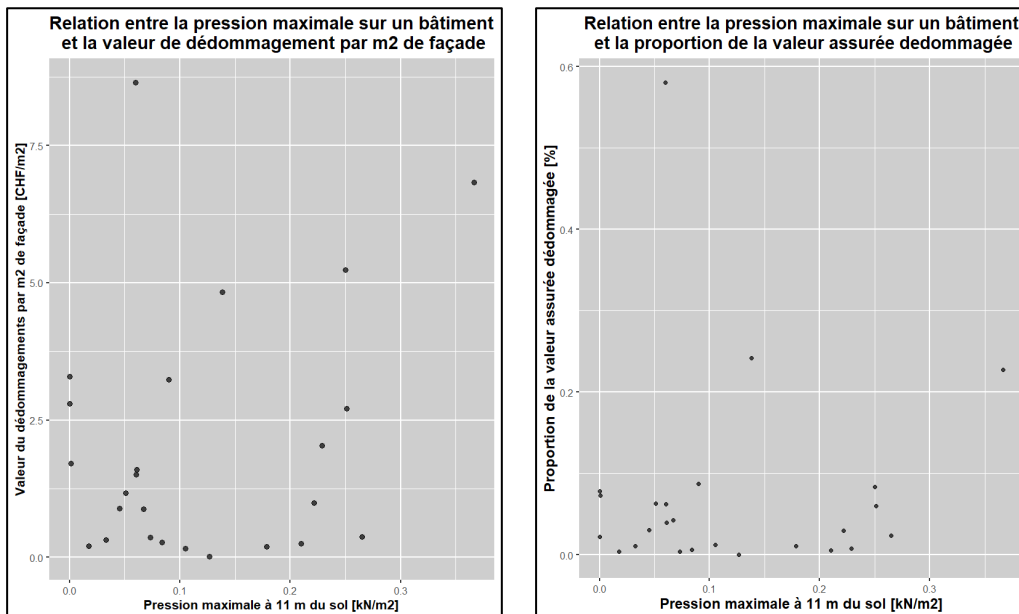


Figure 5. Nuage de points de la relation en la pression maximale à 11 m du sol soutenue par une façade d'un bâtiment sinistré et la valeur du dédommagement. A droite par rapport au m² de façade, à gauche par rapport à la valeur assurée du bâtiment.

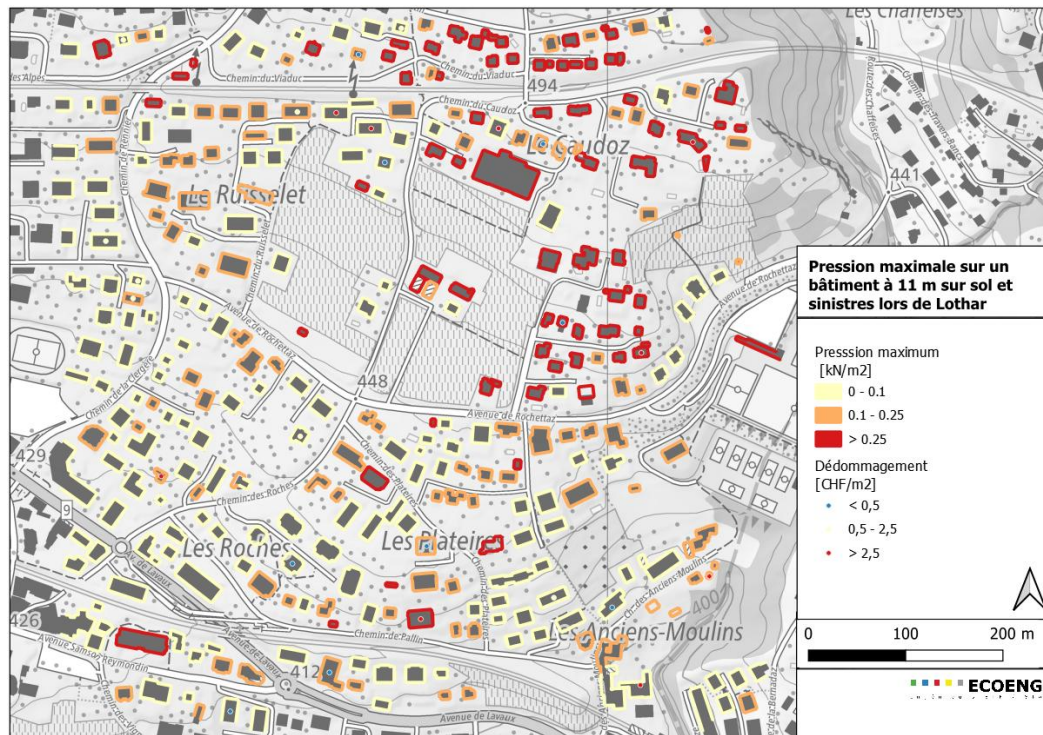


Figure 6. Représentation de la pression maximale par bâtiment et de la valeur des dédommagements par surface de façade.

La non-corrélation entre les variables ne permet pas de valider définitivement la méthodologie pour estimer le risque. En effet, définir des intensités est quasiment impossible dans notre cas. Le faible nombre de données pour la zone, uniquement 26 sinistres⁴⁰, la fiabilité de celles-ci pas totalement assurée, notamment leur géoréférencement. Le patrimoine bâti de la zone a probablement été modifié entre la tempête Lothar de 1999 et les données des bâtiments utilisées pour la modélisation du vent et des calculs de pression. Les calculs de pression ne sont ainsi pas forcément entièrement représentatifs des conditions d'occurrence des sinistres. De manière générale il est de toute manière impossible de définir des intensités avec la modélisation d'un unique événement, la répétition de l'analyse est nécessaire afin de pouvoir en déduire des tendances.

11.2 Canton de Vaud

A l'échelle cantonale, des variables descriptives des sinistres sont représenté afin de dégager des tendances dans la distribution des sinistres. Différentes caractéristiques des bâtiments ont ensuite été testées pour déterminer leur influence sur la survenue de sinistres.

⁴⁰ Une valeur très extrême pas prise en compte dans l'analyse.

En premier lieu, une représentation de la proportion de la valeur du dédommagement en fonction de la valeur assurée (fig. 7) pour la totalité des sinistres de la période (2010-2024) couverte par les données reçues est effectuée.

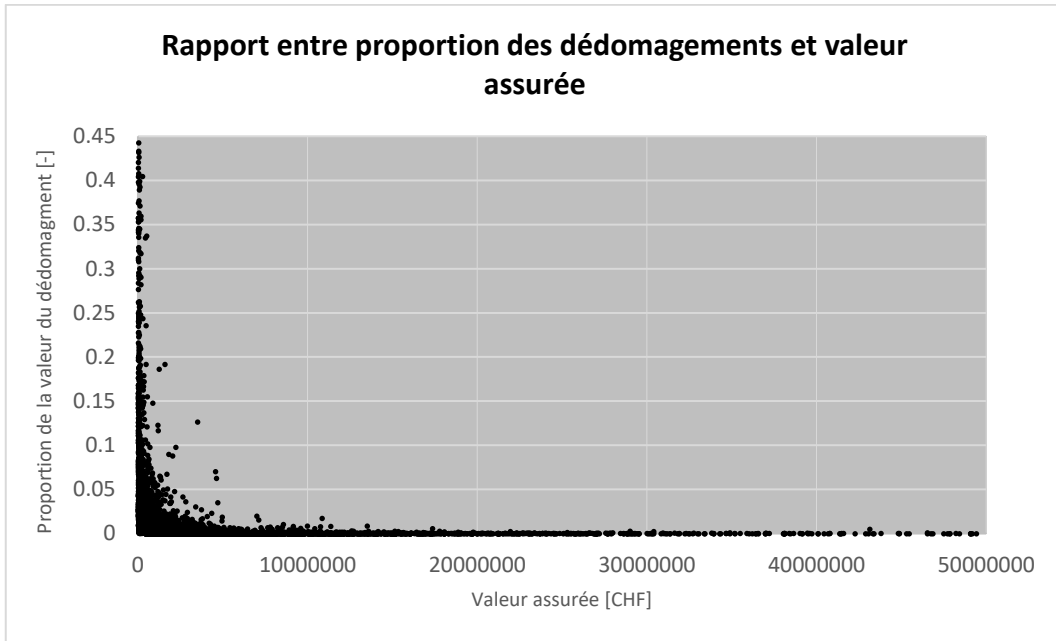


Figure 7. Rapport entre la valeur proportionnelle des dédommagements et la valeur assurée des bâtiments sinistrés. Représentation uniquement pour les bâtiments jusqu'à 50'000'000, mais la tendance est similaire pour les bâtiments avec une valeur supérieure.

Une forte diminution de la proportion de dommage par rapport à la valeur du bâtiment est observée. Ainsi les dégâts proportionnellement importants interviennent principalement sur les bâtiments ayant une valeur moindre.

Une sélection des événements est effectuée pour limiter l'analyse aux événements les plus importants en termes de valeurs de dédommagements. Un seuil de 1'000'000 CHF permet de limiter l'analyse sur 14 événements (fig. 8). Ces 14 événements représentent près de la moitié des dédommagements sur la période considérée.

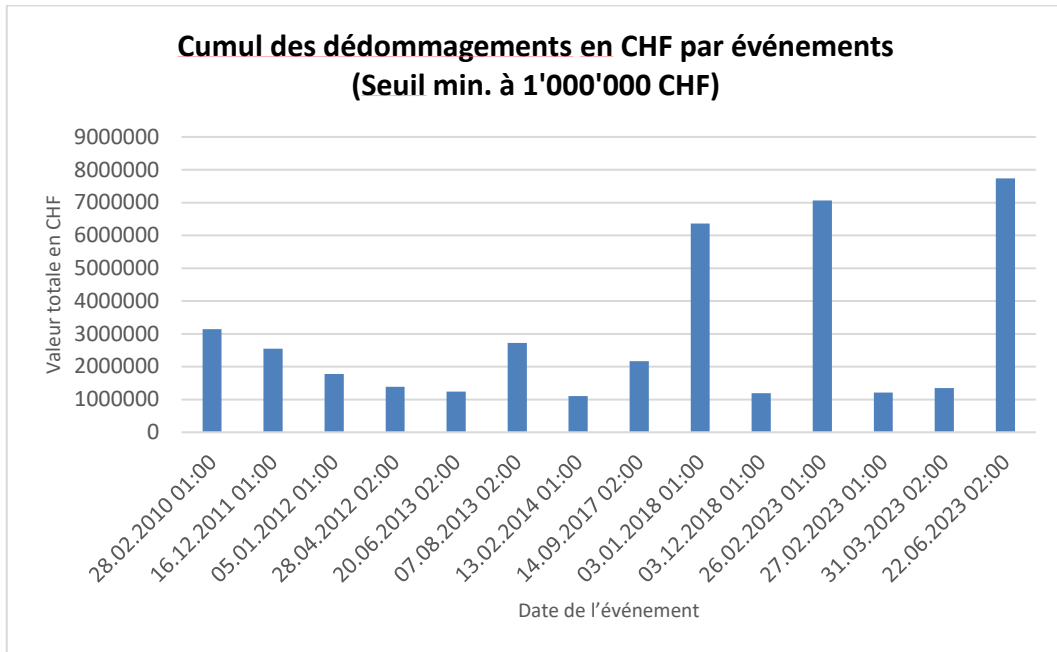


Figure 8. Événements avec un cumul de dédommagement supérieur à 1'000'000 CHF

11.2.1 Valeurs des dédommagements

La distribution du nombre de sinistre par classe de valeurs de dédommagements (tab. 5., fig. 9) montre que la majorité des dédommagements se trouve dans la classe de valeurs entre 1000 et 5000 CHF. Le pic du cumul de la valeur de dédommagements se situe également dans cette classe à plus de 20'000'000 de CHF au total. Les classes de dédommagements plus élevée représente tout de même une part importante au niveau du cumul de la valeur des dédommagements. Par contre, les dédommagements de moins de 1000 CHF, un tiers des sinistres, ne représente qu'un peu plus de 5 % en valeur cumulée.

En effectuant l'analyse séparément pour chaque événement sélectionné, l'on obtient une distribution des valeurs relativement similaire (fig. 10)

Tableau 5. Nombre de sinistres et cumul des dédommagements par classes de valeurs de dédommagement.

Valeurs du dédommagement [CHF]	Nombre de sinistres (% du total)	Cumul des dédommagements [CHF] (% du total)
0-1000	3'640 (33 %)	2'141'788 (5.2 %)
1001-5000	5'639 (51.1 %)	13'213'111 (32.2 %)
5001-10'000	1'047 (9.5 %)	7'198'270 (17.6 %)
10'001-20'000	430 (3.9 %)	5'967'818 (14.6 %)
20'001-50'000	195 (1.8 %)	5'761'722 (14.1 %)
50'001-100'000	55 (0.5 %)	3'485'318 (8.5 %)
>100'000	19 (0.2 %)	3'236'415 (7.9 %)
TOTAL	11'025	41'004'442

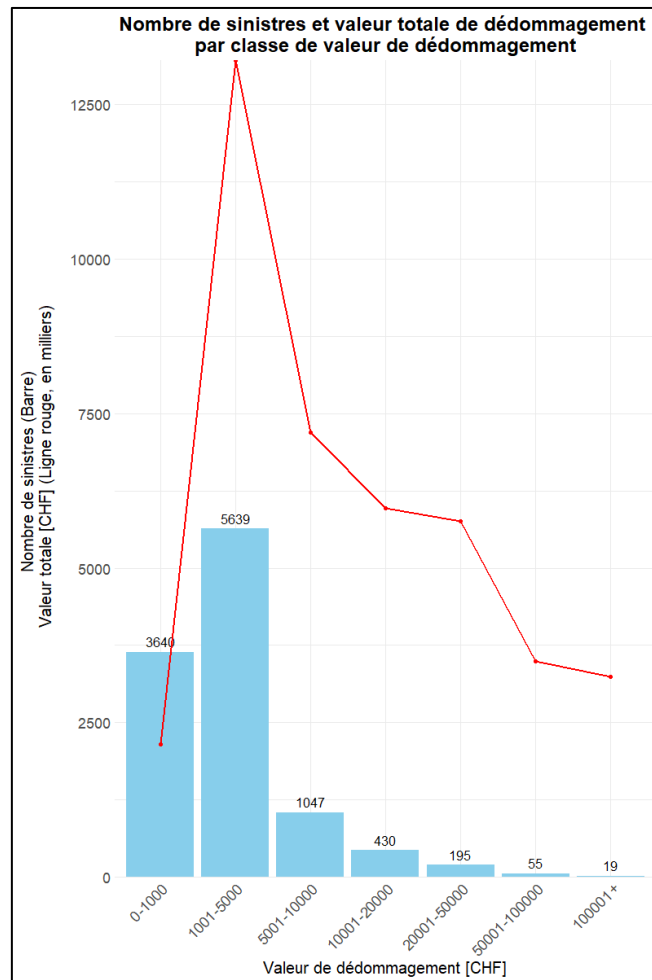


Figure 9. Nombre de sinistres et cumul des dédommagements par classes de valeurs de dédommagement.

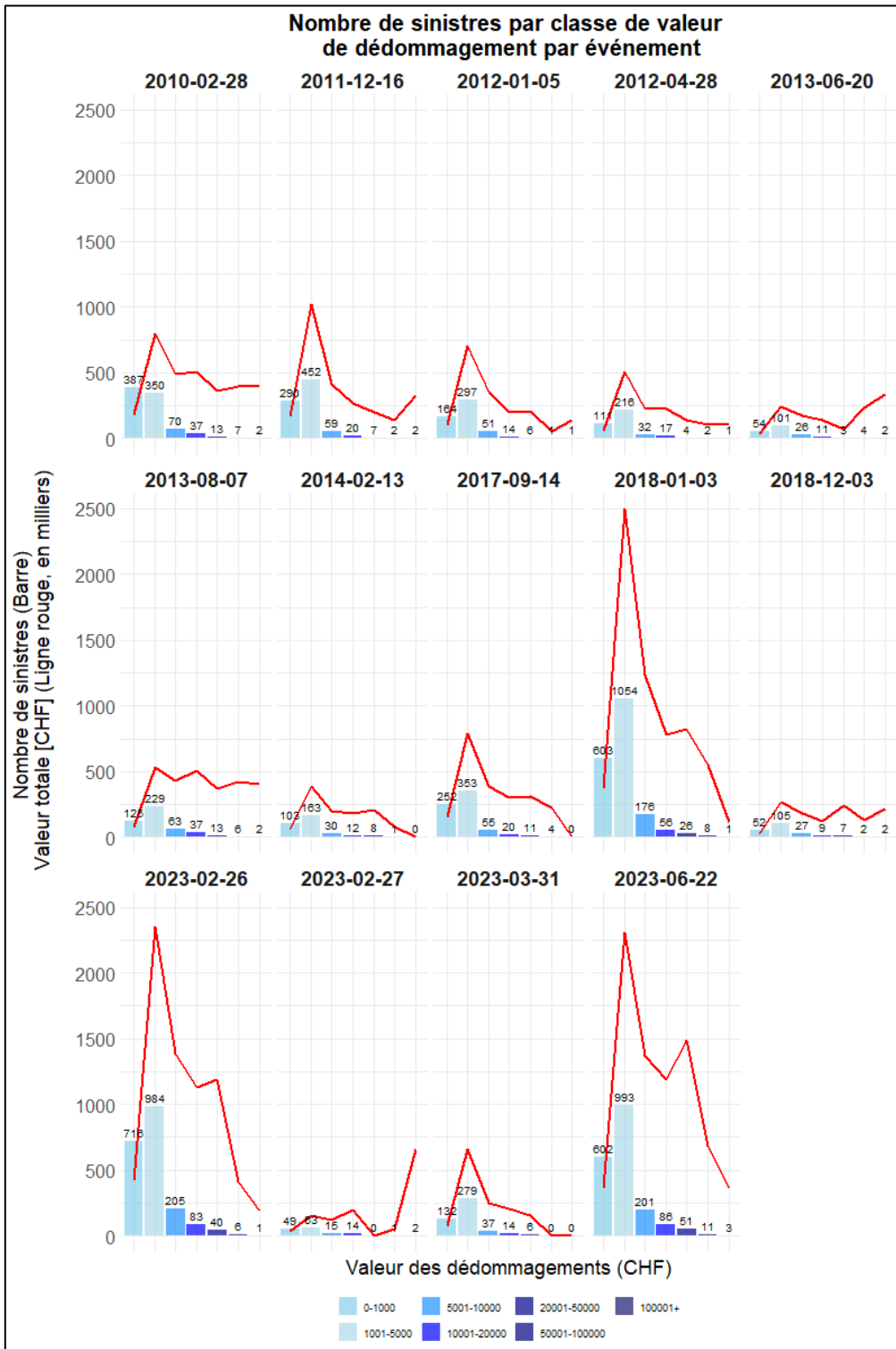


Figure 10. Nombre de sinistres et cumul des dédommagements par classes de valeurs de dédommagement par événements.

11.2.2 Valeurs des bâtiments sinistrés

Une représentation par classe de la répartition des dédommagements par classe de valeurs des bâtiments touchés est également effectuée. Pour une meilleure représentation, ces valeurs devraient être normalisé à partir des données de la valeur assurée de tous les bâtiments, cette donnée n'est malheureusement pas disponible pour cette étude. La répartition, en particulier la valeur moyenne des dédommagements, semble indiquer des possibles dégâts importants pour les petites classes de valeurs (valeur assurée < 500'000 CHF). Ceci peut être considérée comme un facteur de risque pour les bâtiments, néanmoins la majorité des sinistres et des coûts se situe dans la classe des bâtiments entre 1'000'000 et 5'000'000 CHF. Cette classe représente probablement la classe de valeur la plus fréquente dans le portefeuille cantonal. Les bâtiments ayant une plus grande valeur, semblent moins sensibles au risque, ils sont probablement pour la plupart mieux aptes à résister aux forts vents, la valeur moyenne des dégâts augmente lorsqu'ils interviennent, mais le cumul de leur valeur reste relativement faible.

Tableau 6. Nombre de sinistres, cumul et valeur moyenne des dédommagements par classes de valeur assurée des bâtiments.

Valeur assurée du bâtiment sinistré [CHF]	Nombre de sinistres (% du total)	Cumul des dédommagements [CHF] (% du total)	Valeur moyenne du dédommagement [CHF]
< 100'000	410 (3.7 %)	1'823'529 (4.5 %)	4448
100'001-500'000	1324 (12 %)	5'451'732 (13.3 %)	4118
500'001-1'000'000	3760 (34.1 %)	10'174'851 (24.8 %)	2706
1'000'001-5'000'000	4687 (42.5 %)	18'180'248 (44.3 %)	3879
5'000'001-10'000'000	485 (4.4 %)	2'620'022 (6.4 %)	5402
>10'000'000	359 (3.3 %)	2'754'060 (6.7 %)	7671
TOTAL	11025	41'004'442	3719

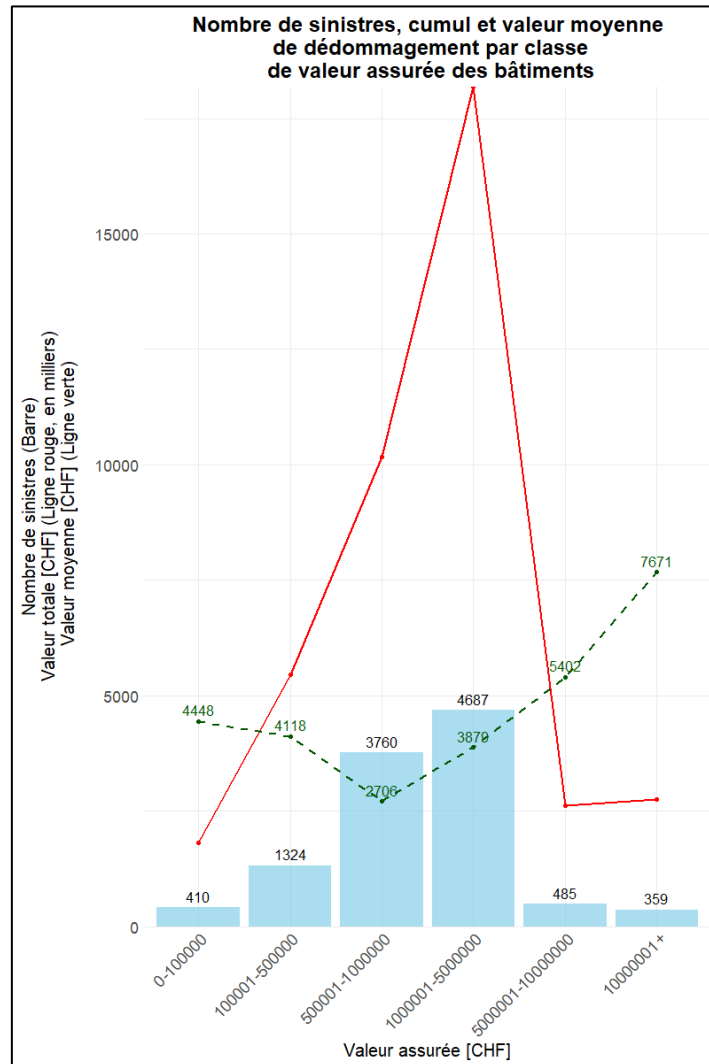


Figure 11. Nombre de sinistres, cumul et valeur moyenne des dédommagements par classes de valeur assurée des bâtiments.

11.2.3 Vitesse des rafales

La relation entre la vitesse de la rafale la plus élevée mesurée à la station la plus proche et le nombre et la valeur des sinistres est également représentée (tab. 7, fig. 12). Le nombre un peu moins important de données pour cette variable est due à l'absence de la donnée pour certaines stations (tab. 4). Très peu de dommages interviennent pour des vitesses mesurées en-dessous de 15 m/s. Il n'y a pas réellement d'augmentation de la valeur moyenne des dommages pour les trois classes de vitesses supérieures, par contre il y a une forte augmentation du nombre de sinistres entre les différentes classes. Ainsi l'augmentation de la vitesse du vent augmente en premier lieu la probabilité d'occurrence des dégâts, par forcément leur importance. L'analyse par événement (fig. 13) montre pour la majorité des événements une tendance identique. Cette analyse par événements doit être nuancé, car certains événements sont très régionalisés et reposent sur les données de peu de stations (fig. 14). Une classification plus détaillée des

vitesse au-dessus de 30 m/s n'est pas effectuée car le nombre de données n'est plus suffisant pour faire une classification pertinente. En effet, peu de vitesses de rafale au-dessus de 30 m/s ont été mesurées par les stations du canton.

Tableau 7. Nombre de sinistres, cumul et valeur moyenne des dédommagements par classes de vitesse de la rafale.

Vitesse de la rafale [m/s]	Nombre de sinistres (% du total)	Cumul des dédommagements [CHF] (% du total)	Valeur moyenne du dédommagement [CHF]
< 15	164 (1.6 %)	466'340 (1.2 %)	2'844
16-20	929 (9.1 %)	3'517'843 (9.1 %)	3'787
21-25	2'732 (26.7 %)	10'410'941 (26.8 %)	3'811
>26	6'394 (62.6 %)	24'500'939 (63 %)	3'832
TOTAL	10'219	38'896'063	3'806

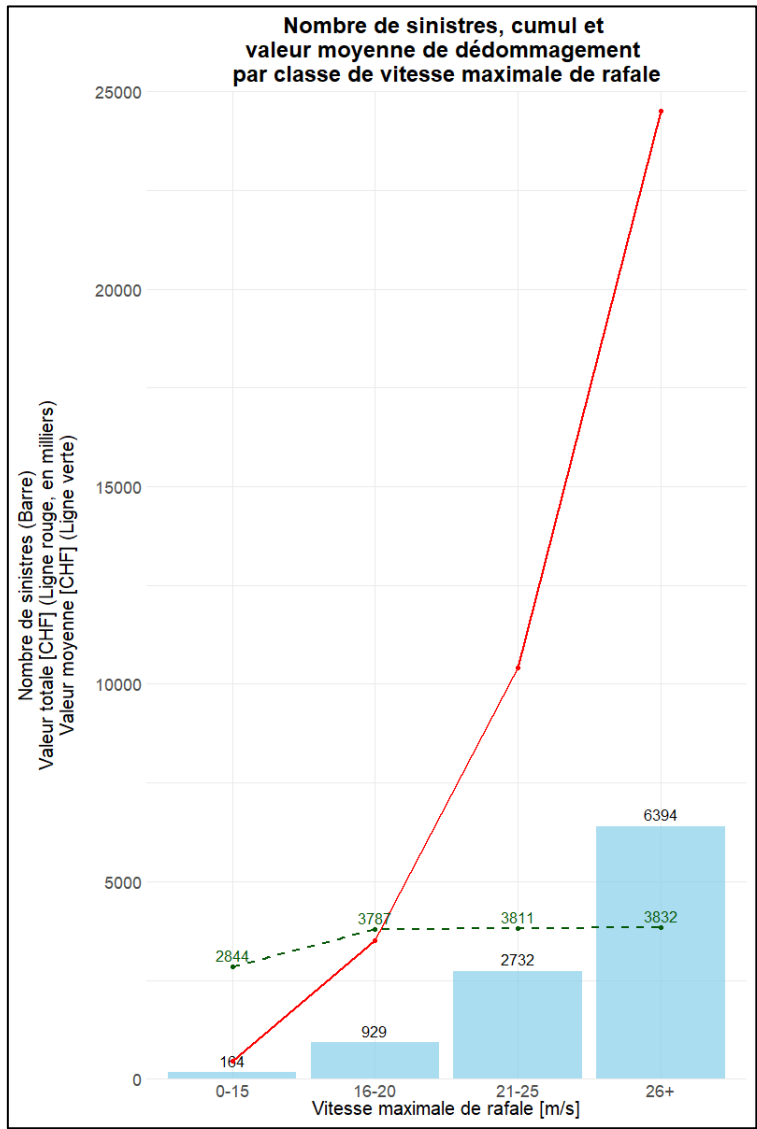


Figure 12. Nombre de sinistres, cumul et valeur moyenne des dédommagements par classes de vitesse de la rafale.

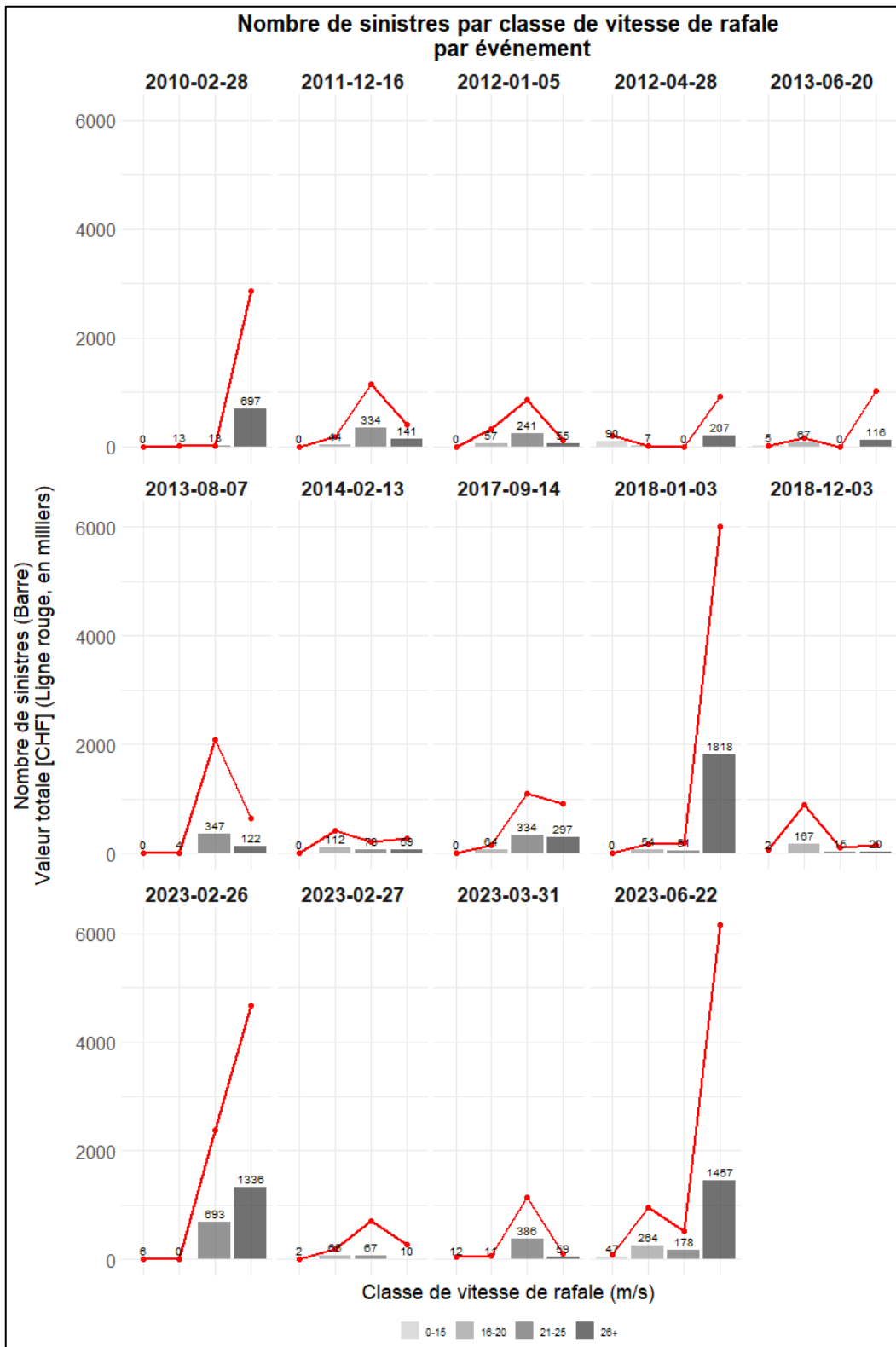


Figure 13. Nombre de sinistres et cumul de la valeur des dédommagements par classes de vitesse de la rafale, pour chaque événement sélectionné.

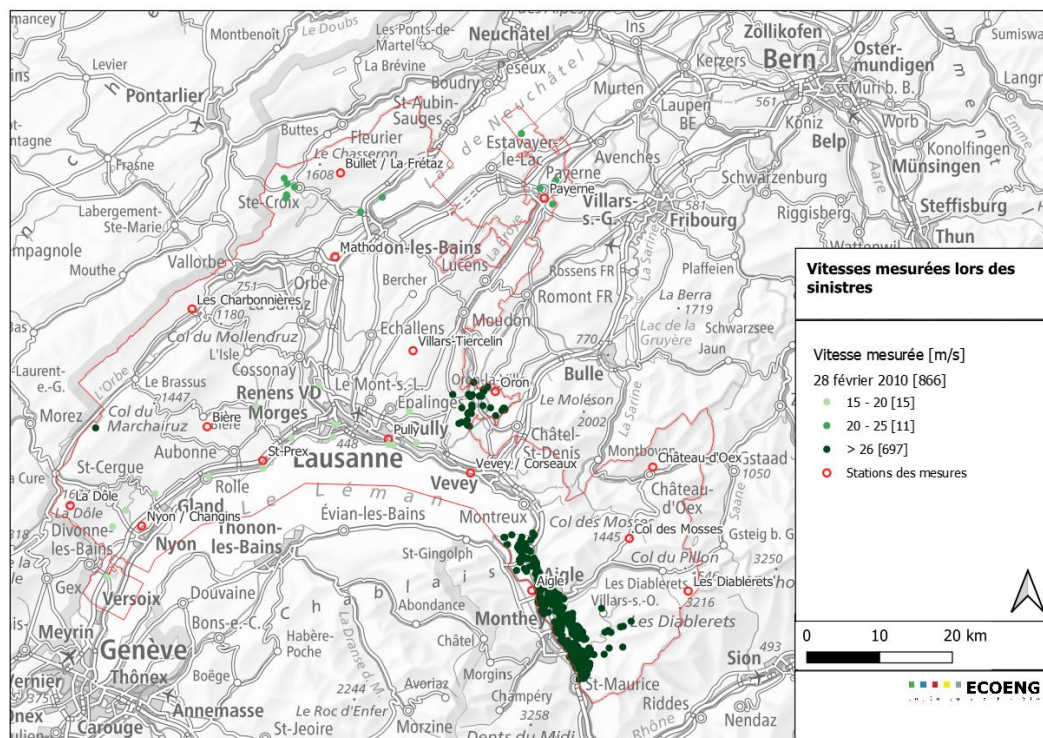


Figure 14. Tempête de foehn du 28 février 2010 la très grande majorité des vitesses mesurées proviennent de la station d'Aigle.

Un facteur de correction serait nécessaire pour ces données de vitesses, en effet la position de la station elle-même peut fortement influencer la valeur mesurée. Ainsi certaines stations présentent quasi systématiquement des valeurs faibles (tab. 8). Par exemple en vert dans le tableau la station de Pully a une valeur au-dessous de 20 m/s par seconde, la station étant en partie abritée du vent⁴¹. Cette station étant située proche de grandes agglomérations de nombreux sinistres lui sont rattachés. Ainsi de nombreux sinistres, ont une valeur de vitesse sous-estimée. L'inverse se produit pour les stations situées en altitude, mais le nombre de sinistres liés aux valeurs de ces stations est moins important et influence plus faiblement la répartition des données.

⁴¹ <https://www.meteosuisse.admin.ch/services-et-publications/applications/valeurs-mesurees-et-reseaux-de-mesure.html#param=messnetz-automatisch&table=false&station=PUY>

Tableau 8. Nombre de sinistres et valeur moyenne de la rafale la plus forte pour chaque station du canton de Vaud.

Station de mesure	Nombre de sinistres	Valeur moyenne de la plus forte rafale [m/s]
Aigle	1846	25.2
Bière	924	27.1
Bullet / La Frétaz	921	24.1
Château-d'Oex	261	27.1
Col des Mosses	161	26.3
La Dôle	106	36.0
Les Charbonnières	580	23.8
Les Diablerets	142	42.2
Method	2'061	27.1
Nyon / Changins	1'674	24.4
Oron	282	27.5
Payerne	1'749	23.1
Pully	1'914	18.4
St-Prex	1'874	30.5
Vevey / Corseaux	870	21.8
Villars-Tiercelin	1'744	23.6

11.2.4 Direction moyenne du vent

L'analyse en fonction de la direction moyenne du vent pour les différents événements ne permet pas de classification quant à la sensibilité aux dommages des bâtiments (fig. 15). Néanmoins cette analyse permet de déterminer par événement une direction majoritaire et peut permettre une classification des événements par direction. Cette classification peut permettre avec plus de données de comparer des événements similaires en termes de direction mais avec de vitesses différentes, ou inversement des événements avec des vitesses similaires mais des directions différentes. On peut également observer pour le canton de Vaud au moins trois types d'événements distincts en termes de direction principale : foehn (direction sud-est), bise (direction nord-est) et une tendance d'ouest pour des tempêtes hivernales ou situations orageuses (à différencier en fonction de la saison).

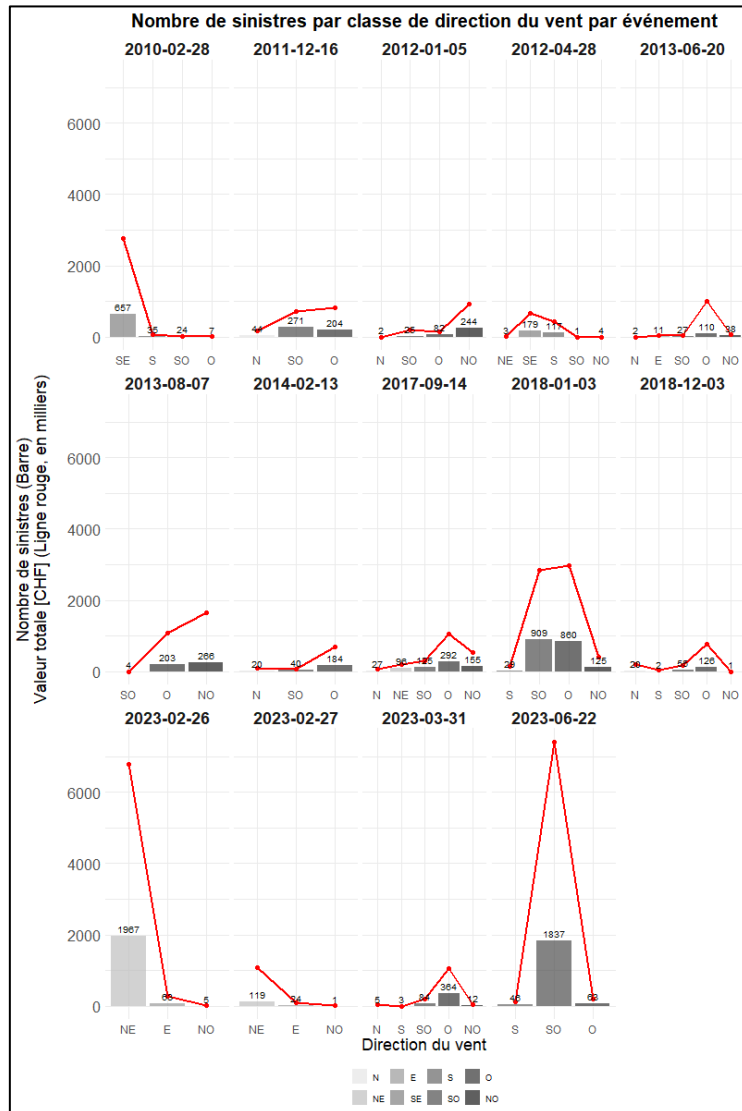


Figure 15. Nombre de sinistres et cumul de la valeur des dédommagements par direction moyenne du vent, pour chaque événement sélectionné.

11.2.5 Sensibilité en fonction des caractéristiques des bâtiments

Les caractéristiques des bâtiments tels que la présence d'avant-toit, la présence de toit plat ainsi que le nombre d'orientation des façades sont testés afin de déterminer leur influence sur la survenue de sinistre ou non sur les bâtiments.

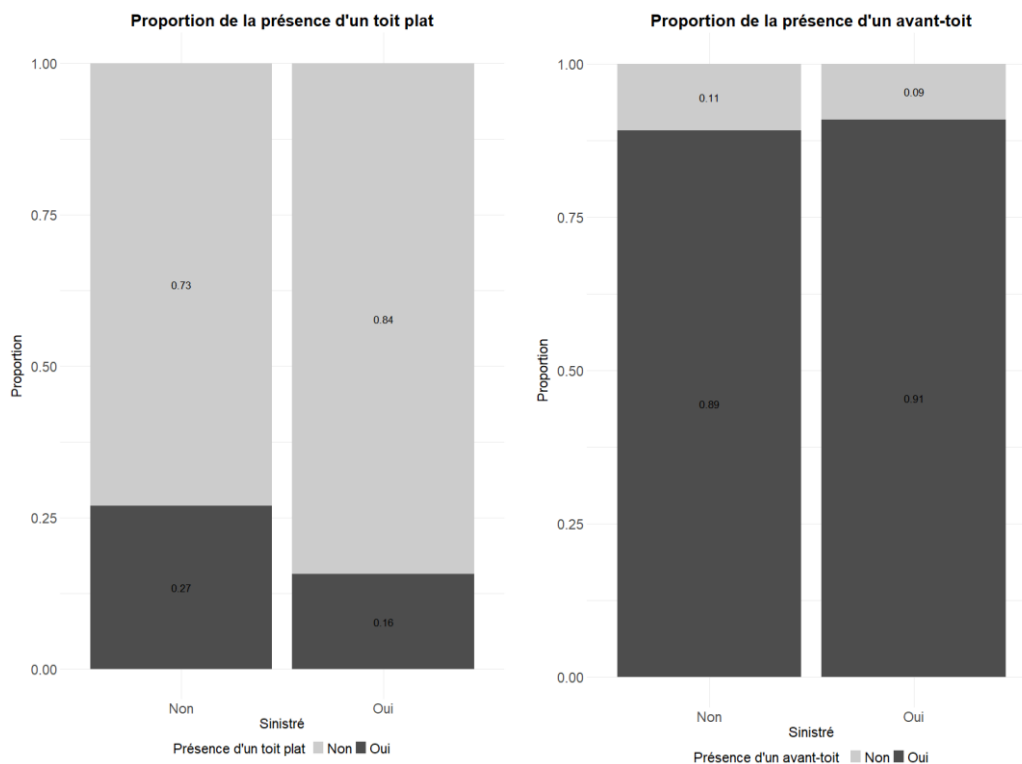


Figure 16. Proportion des bâtiments sinistrés ou non ayant un toit plat ou un avant-toit.

Les proportions de bâtiments sinistrés ou non possédant un avant-toit ou une partie de toit-plat sont comparées. Pour les deux caractéristiques, le résultat du test est significatif. Pour la présence d'un toit plat, les proportions sont de 27 % pour les bâtiments non sinistrés et de 16 % pour les bâtiments sinistrés, un test d'égalité des proportions a été effectué (fonction *prop.test()* sur R) avec une *p-value* < 0.05. Concernant la présence d'un avant-toit, les proportions sont de 89 % pour les bâtiments non sinistrés et de 90 % pour les bâtiments sinistrés, un test d'égalité des proportions a été effectué (fonction *prop.test()* sur R) avec une *p-value* < 0.05. Cependant pour cette caractéristique, bien que le résultat du test soit significatif, il n'est pas vraiment utilisable tel quel dans la pratique. La différence entre les deux proportions étant minime. Pour la présence d'une partie de toit plat, la différence entre les deux proportions est plus marquée, ce facteur pourrait ainsi être intégré dans une analyse multifactorielle de sensibilité aux dégâts.

12 Conclusion pour l'analyse des dangers et des risques

Aucune corrélation entre les dédommagements et les pressions exercées sur les façades n'a malheureusement été trouvée. Le choix de la tempête modélisée ainsi que la taille restreinte de la zone autour de la station de Pully (700 m x 700 m) limitent et biaisent en partie les analyses effectuées. En effet, le choix de la tempête Lothar implique des données de sinistres moins précises disponibles auprès de l'ECA. Une comparaison avec le portefeuille immobilier actuel nécessiterait une correction des valeurs assurées et des valeurs des dédommagements. De plus, le patrimoine bâti à également évolué dans la zone entre 1999 et l'année de la modélisation des bâtiments utilisée. La taille de la zone est également un facteur limitant, pour la tempête Lothar, uniquement 26 sinistres ont été recensés dans le secteur.

L'utilisation des données de modélisation a néanmoins permis de calculer des pressions précises exercées sur les façades et peut être utile lors d'une étude locale de risque. Enfin ce type de modélisation peut permettre d'établir un lien entre des vitesses mesurées aux stations de mesure au sol et les pressions exercées sur les bâtiments. Ainsi avec soit la modélisation de plusieurs évènements dans la même zone, soit la modélisation d'un évènement dans plusieurs zones, soit une modélisation comprenant une plus grande zone, les valeurs obtenues pourraient permettre d'augmenter les données permettant de déterminer des seuils d'intensité basés sur les preuves pour les vitesses de vent. Le choix de la ou des zones à modéliser doit également se faire en prenant en compte la disponibilité et la qualité des données de sinistres auprès des assurances cantonales. Ceci peut permettre dans un second temps

A l'échelle cantonale la définition de facteur de correction pour les vitesses mesurées aux stations automatiques est nécessaire pour définir des intensités liées aux sinistres. La modélisation d'une carte de l'aléa de vent avec une résolution de 100 m, en plus d'une analyse plus ciblée sur certains évènements pourrait permettre de définir des cartes d'intensité au niveau local ou régional.

13 Anhang

13.1 Fehlermetriken

Mean Bias Error (MBE)

Der Mean Bias Error (MBE) ist ein Mass für die durchschnittliche systematische Abweichung zwischen vorhergesagten (\hat{y}_i) und tatsächlichen (y_i) Werten. Er wird berechnet als:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)$$

Interpretation:

- $MBE > 0 \rightarrow$ Modell überschätzt systematisch die tatsächlichen Werte.
- $MBE < 0 \rightarrow$ Modell unterschätzt systematisch die tatsächlichen Werte.
- $MBE \approx 0 \rightarrow$ Keine systematische Verzerrung, aber Fehler könnten sich gegenseitig aufheben.

Der Mean Bias Error ist nützlich zur Identifikation von systematischen Fehlern, aber weniger zur Gesamtbewertung der Vorhersagegüte geeignet, da positive und negative Fehler sich ausgleichen können.

Mean Absolute Error (MAE)

Der Mean Absolute Error (MAE) ist ein Mass für die durchschnittliche absolute Abweichung zwischen vorhergesagten (\hat{y}_i) und tatsächlichen (y_i) Werten. Er wird berechnet als:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|$$

Interpretation:

- Der MAE gibt an, wie gross die Fehler im Durchschnitt sind, unabhängig von ihrer Richtung.
- $MAE = 0 \rightarrow$ Perfekte Vorhersage.
- Je grösser der MAE, desto schlechter die Vorhersagegüte

Im Gegensatz zum Mean Bias Error (MBE) werden hier nur die Beträge der Fehler betrachtet, sodass sich positive und negative Abweichungen nicht gegenseitig aufheben.

13.2 Extremwertanalyse

Zur Schätzung extremer Windwerte mit 50-jährlichem Auftreten benötigt man im Allgemeinen Daten von 10 bis 15 Stürmen. Durch Anwendung der Peaks-Over-Threshold (POT)-Methode werden die historischen Stürme ausgewählt, die einen bestimmten Schwellenwert überschreiten. Dadurch werden die Berechnungen, die erforderlich sind, um bestehende Wettermodelle auf die gewünschte räumliche Auflösung herunterzurechnen, erheblich reduziert. Die relevanten historischen Stürme können durch eine Analyse der Zeitreihen an den SMN-Stationen bestimmt werden. Dabei wird analysiert, ob ein Sturm nur lokal hohe Böen verzeichnete oder regional oder sogar schweizweit. Somit können Referenzstürme für die Anwendung der POT-Methode ausgewählt werden.

Es wird eine von Larsén et al. 2018 und Holmes et al. 2000 definierte Methode angewandt, die es ermöglicht, aus einer Reihe historischer Stürme die maximale Windgeschwindigkeit zu schätzen, die in derselben Region innerhalb eines x-Jahreszeitraums beobachtet werden kann.

$$V_N = u_0 + \frac{\sigma}{k} - \frac{\sigma}{k} (\lambda N)^{-k}$$

Dabei ist $u_0 \left[\frac{m}{s} \right]$ die Schwellenwindgeschwindigkeit, $\sigma \left[\frac{m}{s} \right]$ und k sind die Anpassungsparameter, die durch historische Stürme bestimmt werden, $\lambda \left[\frac{\text{stürme}}{\text{jahr}} \right]$ ist die Häufigkeit der beobachteten Stürme und $N [\text{jahr}]$ die x-jährliche Wiederkehrperiode des Windgeschwindigkeitsmaximums $V_N \left[\frac{m}{s} \right]$.

Da sowohl die historisch modellierten Windgeschwindigkeiten, die zur Bestimmung der Anpassungsparameter verwendet werden, als auch der Schwellenwert für die Windgeschwindigkeit und der Koeffizient für die Stürme pro Jahr geschätzt werden, müssen ihre jeweiligen Fehler auf die maximale Windgeschwindigkeit bei x-jährlicher Wiederkehr übertragen, indem die folgende Gleichung angewandt wird:

$$\Delta V_N = \sqrt{\left(\frac{\partial u_0}{\partial V_n} \Delta u_0 \right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial V_n} \Delta \sigma \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial V_n} \Delta u_k \right)^2 + \left(\frac{\partial \lambda}{\partial V_n} \Delta \lambda \right)^2}$$

Schliesslich kann die x-jährlich wiederkehrende maximale Windgeschwindigkeit zur Bestimmung des maximalen Staudrucks $q [Pa]$ verwendet werden. Der relative Fehler (prozentualer Fehler) verdoppelt sich von der Windgeschwindigkeit zum Staudruck aufgrund der quadratischen Beziehung. Es ist daher sehr wichtig, dass der Fehler der modellierten Windgeschwindigkeiten möglichst klein ist.

$$q = \frac{1}{2} \rho v^2, \frac{\Delta q}{q} = \frac{2 \Delta v}{v}$$