



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

MeteoSchweiz

Fachbericht MeteoSchweiz Nr.269

Westföhn am Vierwaldstättersee

Nicolai Krieger, Dr. Michael Armand Sprenger, Eugen Müller



ISSN: 2296-0058

Westföhn am Vierwaldstättersee

Nicolai Krieger, Dr. Michael Armand Sprenger, Eugen Müller

Empfohlene Zitierung:

Krieger N, Sprenger M, Müller E: 2018, Westföhn am Vierwaldstättersee. *Fachbericht MeteoSchweiz*, 269 71 pp.

Herausgeber:

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, © 2018

MeteoSchweiz

Operation Center 1
CH-8044 Zürich-Flughafen
T +41 58 460 99 99
www.meteoschweiz.ch

Abstract

In der Schweiz kennt man neben dem Nord- und Südföhn auch den Westföhn. Er tritt auf, wenn ein Westwind entlang des Voralpenreliefs strömt und in einigen Regionen föhnartig herabstürzt. Der Westföhn ist vor allem in der Region um Luzern bekannt. In dieser Bachelor-Arbeit werden in einem ersten Teil verschiedene Westföhn-Fälle anhand der synoptischen Lage eingeteilt. Im Hauptteil der Arbeit werden detaillierte Fallstudien zu drei verschiedenen Westföhn-Ereignissen durchgeführt. Dafür werden Messungen des SwissMetNet verwendet und mit Vorhersagedaten des COSMO-1 Modells die Euler'sche und Lagrange'sche Perspektive untersucht.

Bei starken Westföhn-Ereignissen zeigt sich der Westföhn im Gebiet zwischen Luzern und Cham, wobei die potentielle Temperatur von Luzern aus Richtung Norden um 1 - 2 °C abnimmt und die relative Feuchte um 5 - 10 % zunimmt. Im COSMO-1 Modell lassen sich für den Westföhn in Luzern zwei unterschiedliche Windrichtungen unterscheiden. Bei einer Strömung aus Südwesten kommt die Luft aus Höhen von 1500 - 2000 m. Für diese Anströmungs-Richtung lassen sich in der Region um Luzern drei verschiedene Strömungen ausmachen. Bei Westwinden kommt die Luft zwischen dem Napf und den Entlebucher Voralpen nach Luzern und steigt von Höhen von 1000 - 1300 m herab.

In der Region von Luzern lässt sich der Westföhn im COSMO-1 Modell durch eine Erwärmung und Abtrocknung in den untersten 500 - 1000 m der Atmosphäre erkennen. Auch in Höhen von 2000 - 3000 m über Meer kann im Modell ein Signal des Westföhns durch die Auslenkung von Isentropen beobachtet werden. Während die horizontale Ausdehnung des Westföhns vom COSMO-1 Modell gut wiedergegeben wird, werden während dem Westföhn die Temperatur 1 - 6 °C zu tief, die relative Feuchte etwa 20 % zu hoch und die Windgeschwindigkeiten 2 - 5 m s⁻¹ zu gering vorhergesagt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Föhncharakteristika und Föhntheorie	3
1.2	Föhn in der Schweiz	4
1.2.1	Südföhn	5
1.2.2	Nordföhn	6
1.2.3	Weitere Föhnarten	6
1.2.4	Westföhn	7
1.3	Ziele der Arbeit	9
2	Daten und Methoden	10
2.1	Messdaten	10
2.2	Operationelle Analysen des ECMWF	11
2.3	COSMO-1 und Trajektorien	11
3	Synoptische Einteilung von Westföhn-Fällen	14
3.1	Warmsektor-Typ	14
3.2	Rückseiten-Typ	17
4	Fallstudien	19
4.1	Fall 1: Westföhn während Sturmtief Burglind	19
4.1.1	Messungen	19
4.1.2	Synoptische Lage	22
4.1.3	Westföhn im COSMO-1 Modell	23
4.1.4	Horizontale Struktur	24
4.1.5	Vertikale Struktur	29
4.1.6	Zeitliche Entwicklung	32
4.1.7	Trajektorien	33
4.1.8	Vergleich Messungen und Modellvorhersage	36
4.2	Fall 2: Westföhn am 16.01.2018	37
4.2.1	Messungen	37
4.2.2	Synoptische Lage	39
4.2.3	Westföhn im COSMO-1 Modell	39
4.2.4	Horizontale Struktur	40
4.2.5	Vertikale Struktur	42
4.2.6	Zeitliche Entwicklung	44
4.2.7	Trajektorien	44
4.2.8	Vergleich Messungen und Modellvorhersage	45
4.3	Fall 3: Westföhn am 27.01.2014	47
4.3.1	Messungen	47
4.3.2	Synoptische Lage	47
4.3.3	Westföhn im COSMO-1 Modell	47
4.3.4	Horizontale Struktur	47
4.3.5	Vertikale Struktur	48
4.3.6	Zeitliche Entwicklung	51
4.3.7	Trajektorien	51
4.3.8	Vergleich Messungen und Modellvorhersage	52
5	Diskussion	53
5.1	Häufigkeit der Westföhn-Typen	53
5.2	Horizontale Ausdehnung	53
5.3	Windrichtung	54
5.4	Niederschlag bei Westföhn	55
6	Zusammenfassung	56

Danksagung	58
Literatur	59
Anhang A Westföhn am 03.01.2018	61
Anhang B Westföhn am 16.01.2018	67
Anhang C Westföhn am 27.01.2014	71
Anhang D Diskussion	73

1 Einleitung

Der Föhn ist ein spannendes, faszinierendes und sehr vielschichtiges meteorologisches Phänomen, das noch nicht vollständig verstanden ist (siehe auch Sprenger et al., 2016). Mit seinen starken, warmen und trockenen Winden hat der Föhn einen positiven und negativen Einfluss auf die Gesellschaft. Einerseits ermöglicht der Föhn durch die Erwärmung und somit Erhöhung der Mitteltemperatur den Anbau von wärmeliebenden Pflanzen bis in erhöhte Tallagen (Steinacker, 2006), andererseits kann ein Föhnsturm die Ausbreitung von Feuern unterstützen sowie Schäden und Unfälle verursachen (Richner & Hächler, 2013).

Eine klare und eindeutige Definition des Föhns zu geben ist schwierig. Nach der WMO (1992) ist der Föhn ein Wind, der durch den Abstieg erwärmt und abgetrocknet wurde, im Allgemeinen auf der Leeseite eines Bergs. Bei dieser Definition kommen jedoch zwei Fragen auf (Elvidge & Renfrew, 2016): Im Vergleich zu was ist der Föhn warm und trocken und wieso ist der Föhn warm und trocken? Nach Steinacker (2006) ist „[...] die Definition von Föhn als ‚warmer leeseitiger Wind‘ oder gar ‚warmer Fallwind‘ falsch oder zumindest irreführend.“ Beim Föhn handle es sich korrekterweise um eine absinkende Luftmasse, „[...] die eine vorher vorhandene, noch kältere Luft (Kaltluftsee) im Tal ersetzt [...]“ (Steinacker, 2006).

Der Begriff Föhn hat seinen Ursprung wahrscheinlich während der römischen Zeit und entstand aus dem Wort *favonius* (Brinkmann, 1971; Richner & Hächler, 2013). Im Laufe der Zeit entwickelte sich daraus der deutsche Name *Föhn* (Brinkmann, 1971; Richner & Hächler, 2013). In der Meteorologie wurde der allgemeine Begriff *Föhn* für den warmen und trockenen Wind verwendet, weil die Forschung dazu in den Alpen begann (Brinkmann, 1971; Richner & Hächler, 2013). Der lokale Name des Windes wurde also zum wissenschaftlichen Namen. Föhnartige Winde existieren aber nicht nur in den Alpen, sondern in allen Regionen, wo grosse Gebirgsketten liegen (Richner & Hächler, 2013). In den Rocky Mountains z.B. wird der Föhn *Chinook* (Brinkmann, 1971), in den Anden *Puelche* oder *Zonda* (Beusch et al., 2018) und in den Penninen in England *Helm wind* genannt (Richner & Hächler, 2013).

Im Folgenden werden zuerst die Föhncharakteristika vorgestellt und eine kurze Übersicht über die verschiedenen Föhntheorien gegeben. Danach werden die verschiedenen Föhntypen, die in den Schweizer Alpen auftreten können, vorgestellt.

1.1 Föhncharakteristika und Föhntheorie

Der Föhn zeigt sich in einem nicht zu breiten Tal durch das simultane Abtrocknen, Ansteigen der Temperatur und Einsetzen starker Winde mit konstanter Windrichtung (Gutermann, 1970; Dürr, 2008). Das Ende des Föhns erfolgt oft in mehreren Phasen und kann anschaulich als Kampf zwischen der Föhnluft und der sich nähernden Kaltfront verstanden werden (Richner & Hächler, 2013).

Das Phänomen des Föhns wurde in den Alpen seit Ende des 19. Jahrhundert untersucht (Sprenger et al., 2016). Zuerst stand die Frage im Zentrum, wie es zu der Erwärmung während des Föhns kommt (Steinacker, 2006). Während diese Frage schnell beantwortet war, wurde im Folgenden vor allem über die Rolle der feuchtadiabatischen Erwärmung auf der Luvseite des Gebirges diskutiert (Miltenberger et al., 2016; Würsch & Sprenger, 2015). Für mehrere Jahrzehnte war der Föhn das ausgezeichnete Beispiel um thermodynamische Prozesse in der Atmosphäre zu erklären (Steinacker, 2006).

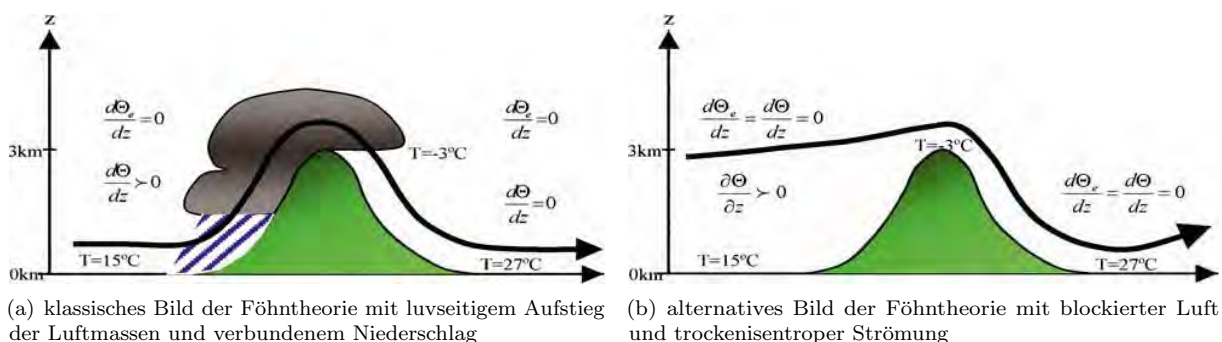


Abbildung 1: Föhntheorien nach Hann (1901). Quelle: Steinacker (2006)

Hann (1866) entwickelte als erster die klassische Föhntheorie, die auch in vielen Lehrbüchern zu finden ist (siehe Abbildung 1a): Feuchte Luft strömt, durch das synoptische Druckfeld bedingt, auf eine Bergkette zu. Sie wird angehoben und kühlt sich trockenadiabatisch ab, bis Sättigung erreicht ist. Anschließend wird die Luft weiter feuchtadiabatisch abgekühlt bis sie den Bergkamm erreicht hat. Es bilden sich Wolken und Niederschlag tritt auf. Auf der Leeseite des Berges lösen sich die Wolken auf, die Luft wird trockenadiabatisch aufgewärmt und trocknet ab. Weil die trockenadiabatische Erwärmung stärker ist als die feuchtadiabatische Abkühlung, hat das Luftpaket auf der selben Höhe wie der Ursprungshöhe eine höhere Temperatur. Über dem Bergkamm kann eine Föhnmauer beobachtet werden. Dieser Föhntyp wird auch als Schweizer Föhntypus oder Föhntyp I bezeichnet (Würsch & Sprenger, 2015).

Weil diese Föhntheorie nicht vollständig ist, entwickelte Hann (1901) in seinem Lehrbuch der Meteorologie eine alternative Föhntheorie. Diese besagt, dass die Luft, die auf der Leeseite des Berges in die Täler herabsteigt, aus höheren Schichten auf der Luvseite des Berges stammt (siehe Abbildung 1b). Weil die potentielle Temperatur immer mit der Höhe zunimmt, ist die Luft auf der Leeseite wärmer als die Luft auf der Luvseite auf der gleichen Höhe. Die Luft in den tieferen Schichten wird blockiert und kann nicht über die Bergkante gelangen. Der Föhn kann in einem solchen Fall also auch ohne das Vorhandensein von Niederschlag oder sogar Wolken auftreten. Dies ist der Österreicher Föhntypus oder Föhntyp II (Würsch & Sprenger, 2015).

In der Literatur findet man weitere Mechanismen, die zur Erwärmung und Abtrocknung der Luft auf der Leeseite des Gebirges führen können. Diese sind das turbulente, sensible Heizen und Abtrocknen durch mechanische Mischung sowie das radiative Heizen der unteren leeseitigen Schicht (Elvidge & Renfrew, 2016).

Der Schweizer und der Österreicher Föhntypus sollten als extreme Ereignisse angeschaut werden, weil sich viele Föhnereignisse gut aus einer Mischung der beiden Föhntypen erklären lassen (Richner & Hächler, 2013). Der grösste Teil der Erwärmung ist dabei dem Mechanismus des Österreicher Föhntypus zuzuschreiben, wobei bei Niederschlag auf der Luvseite auch die damit verbundene Erwärmung durch das Freisetzen latenter Wärme einen zusätzlichen Beitrag leisten kann (Steinacker, 2006; Miltenberger et al., 2016). Gemäss Elvidge & Renfrew (2016) können neben dem Föhntyp I und II auch die mechanische Mischung durch Turbulenz hauptsächlich für die Erwärmung verantwortlich sein. Die Bedeutung der einzelnen Mechanismen hängt von der Strömungsdynamik und den meteorologischen Bedingungen ab (Elvidge & Renfrew, 2016).

Bei Föhn ist die Luft sehr klar, was durch die trockenere und saubere Luft, die der Föhn nach unten bringt, erklärt wird (Richner & Hächler, 2013). Die Luft kann einerseits durch den Niederschlag auf der Luvseite ausgewaschen werden oder andererseits durch den Abstieg von reinerer Luft aus grösserer Höhe so sauber sein (Richner & Hächler, 2013). Zusätzlich führt das Absteigen der Luft zu erhöhter Ozonkonzentration in den Föhntälern (Richner & Hächler, 2013).

1.2 Föhn in der Schweiz

Durch die Ausrichtung der Alpenkette können im Alpenraum zwei hauptsächliche Föhnrichtungen unterschieden werden: Südföhn und Nordföhn (Cetti, 2015). Abbildung 2 gibt eine Übersicht über die Häufigkeit des Süd- und Nordföhns in den verschiedenen Alpentälern. Das Unterwallis, Oberwallis bei Visp (siehe auch Bouët, 1951), Haslital, Reusstal (siehe auch Gutermann et al., 2012), Glarnerland (siehe auch Streiff-Becker, 1930) und Rheintal (siehe auch Drobinski et al., 2007; Gutermann, 1970) sind die Hauptföhngebiete in der Schweiz (Gerstgrasser, 2017). Aus der Abbildung 2 ist zu erkennen, dass der Südföhn bei einem Föhnsturm am Vierwaldstättersee bis nach Luzern vordringen kann. Dabei kann der Südföhn in Luzern aus Süden oder aus Osten wehen.

Die Föhnhäufigkeit nimmt vom Alpenhauptkamm her zum Mittelland (Südföhn) und gegen Süden (Nordföhn) ab (Cetti, 2015; Gerstgrasser, 2017). Der Föhn tritt dabei am häufigsten in den von Norden nach Süden ausgerichteten Alpentälern auf (Cetti, 2015; Gerstgrasser, 2017). Eine geringe Höhe des Passübergangs nach Süden steigert weiter die Häufigkeit des Südföhns (Gerstgrasser, 2017). Die Föhnhäufigkeit hängt auch von der Stationshöhe ab: Im Allgemeinen nimmt die Föhnhäufigkeit mit der Stationshöhe zu (Cetti, 2015; Gerstgrasser, 2017).

Regional und saisonal hat die Föhnhäufigkeit eine grosse Variabilität (Gutermann, 1970; Gutermann et al., 2012; Richner & Hächler, 2013). Der Föhn tritt am häufigsten im Frühling mit einem Maximum im März (Nordföhn) bzw. April (Südföhn) auf (Gutermann et al., 2012; Cetti, 2015; Gerstgrasser, 2017). Ein

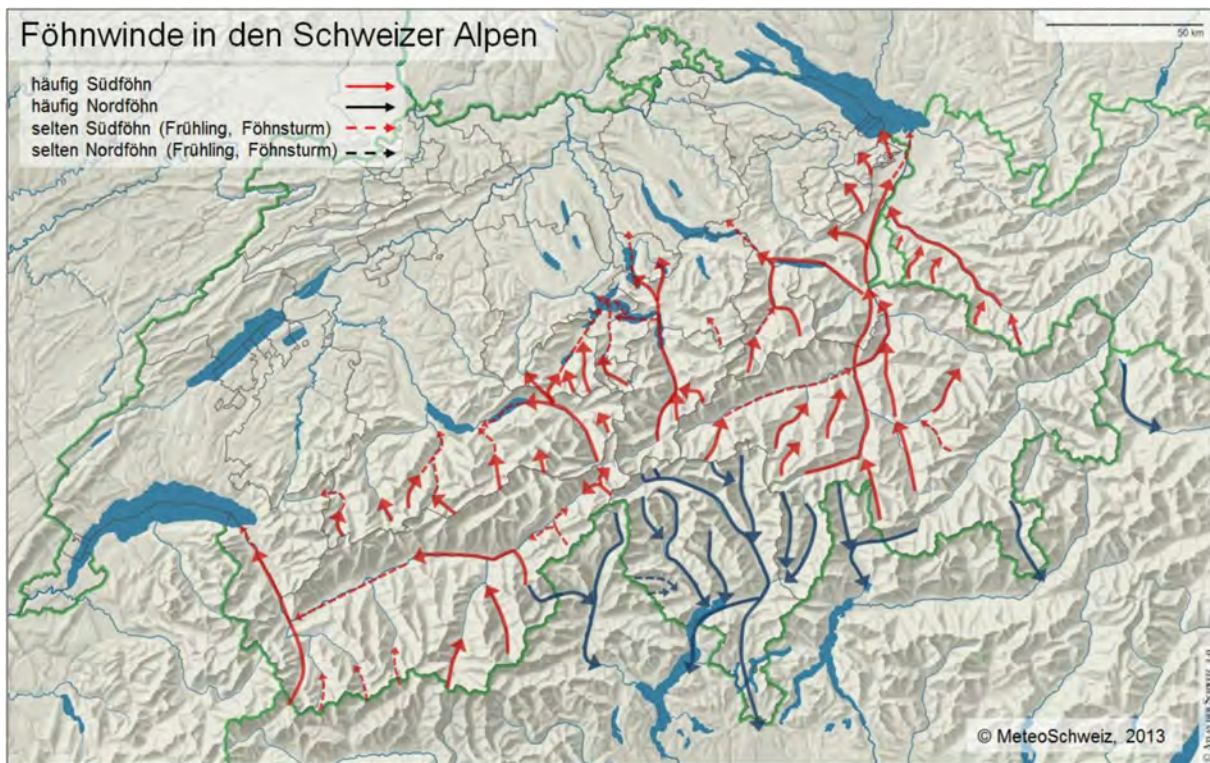


Abbildung 2: Typische Schweizer Föhntäler (rot: Südföhn, blau: Nordföhn). Quelle: Ludwig Z'graggen, MeteoSchweiz aus Gerstgrasser (2017)

sekundäres Maximum der Föhnhäufigkeit tritt für den Südföhn im Herbst in den Monaten Oktober und November auf (Gutermann et al., 2012; Gerstgrasser, 2017).

1.2.1 Südföhn

Gerstgrasser (2017) hat in seiner Dokumentation zum Südföhn das Wesentliche über den Südföhn zusammengefasst und die unterschiedlichen Formen des Südföhns vorgestellt. Das folgende Kapitel basiert daher stark auf Gerstgrasser (2017).

Der Südföhn überquert die Alpen von Süden her und führt im Norden zu einer Erwärmung und Abtrocknung. Auf der Südseite der Alpen herrscht normalerweise Stau und es kann zu starken Niederschlägen kommen.

Der **klassische, hochreichende Föhn** ist die typische Form des Südföhns und bringt oft ziemlich sonniges Wetter in den Föhntälern. Er tritt auf, wenn über der Biskaya oder über den Britischen Inseln ein Tief liegt. Durch das Tief kommt es auf der Alpennordseite zu Warmluftadvektion. Die Warmluft im Norden und kältere Luft in den unteren Luftschichten auf der Alpensüdseite führen zu einem hydrostatisch bedingten Druckgradient von Süden her über die Alpen. Dieser Druckgradient kann im Norden synoptisch durch den Druckabfall bei der Annäherung des Tiefs verstärkt werden. Der Alpenraum befindet sich während dem Föhn im Bereich von süd- bis südwestlichen Höhenwinden auf der Vorderseite eines Trops, wobei die Isohypsen im Fall des klassischen, hochreichenden Föhns nicht gekrümmt sind.

Der **antizyklonale Föhn** ist durch sehr trockene Luftmassen und praktisch wolkenlose Verhältnisse auf der Alpensüdseite charakterisiert. Es kommt zu keinem Niederschlag, was auf der Alpennordseite zu extrem tiefen Werten der relativen Feuchte führt. Der antizyklonale Föhn ist ein augenfälliges Beispiel für den Föhn Typ II bzw. Österreicher Föhn Typus. Der antizyklonale Föhn tritt auf, wenn die Isohypsen antizyklonal gekrümmt sind, sich der Trog also noch weiter westlich befindet. Im Vergleich zum klassischen Föhn ist die Höhenströmung schwächer.

Der **seichte Föhn** wird nicht oder nur unwesentlich durch die synoptische Lage unterstützt (für Erklärungen zur Strömungsdynamik siehe auch Sprenger & Schär, 2001). Er entsteht durch kältere

Luftmassen auf der Alpensüdseite, die mindestens bis zur Passhöhe hinauf reichen (siehe auch Mayr & Armì, 2008) und so hydrostatisch bedingt für einen Südüberdruck sorgen. Die Kaltluft strömt beim seichten Föhn wasserfallartig auf die Alpennordseite. Nördlich der Alpen findet man oft eine Hochdruckzelle, die sich nach Osten bewegt; auf der Alpensüdseite liegt eine geschlossene Wolkendecke. Oft tritt eine Phase seichten Föhns auf, bevor sich der klassische und hochreichende Föhn durchsetzen kann.

Ein spezieller Fall des seichten Föhns ist der **Güllerföhn** oder auch **Gegenstrom-Föhn** (für eine ausführliche Diskussion eines Güllerföhn-Ereignisses siehe auch Güller, 1977). Auch bei markanter Warmluftadvektion kann beim Güllerföhn Niederschlag fallen, wobei dieser durch die westlichen bis nordwestlichen Höhenwinde gebracht wird. Durch die Westwindlage und die Annäherung des Tiefs kommt es nördlich der Alpen zu einem starken Druckabfall. Es wird „[...] Luft aus den Alpentälern ‚abgesaugt‘ und es kann sich ein starke bis stürmische und eher kalte Föhnströmung entwickeln“ (Gerstgrasser, 2017). Das Phänomen des Güllerföhns tritt in den untersten 3000 m der Atmosphäre auf. Im Allgemeinen stösst der Güllerföhn weiter vor als der seichte Föhn.

Der **Dimmerföhn** oder auch **zyklonale Föhn** ist ein weiterer Föhntyp, der in den Alpen auftreten kann. Richner & Dürr (2015) definierten den Dimmerföhn als „a form of foehn in which humid air extends across the mountain ridge causing precipitation and poor visibility unusually far to the leeside.“ Also eine Form des Föhns, bei der sich feuchte Luft über die Bergkette erstreckt, was Niederschlag und schlechte Sicht ungewöhnlich weit auf der Leeseite verursacht. Der Dimmerföhn tritt auf, wenn die Strömung in erhöhten Lagen eine zyklonale Krümmung aufweist und das Geopotential im Vergleich zum Mittel tief ist (Gerstgrasser, 2017). Die Windgeschwindigkeiten und der Druckgradient sind beim Dimmerföhn sehr gross (Frey, 1953). Das föhnbedingte Absinken der Luft ist bei Dimmerföhn reduziert, weil bei den hohen Windgeschwindigkeiten die Absinkbewegung des Föhns nicht mehr ausreicht, um der Topografie zu folgen (Frey, 1953). „Der Dimmerföhn erreicht den Boden erst im unteren Teil der Täler und stürzt dann heftiger und weiter als gewöhnlich ins Mittelland hinein vor“ (Frey, 1953). Durch das reduzierte Absinken und den teilweise leichten Niederschlag liegt die relative Feuchte deutlich über 50 % und kann sogar 80 % oder mehr erreichen (Frey, 1953; Gerstgrasser, 2017). Dimmerföhn tritt sehr selten auf (Richner & Hächler, 2013), wobei die Häufigkeit aber sehr stark von der betrachteten Region abhängt (Gerstgrasser, 2017).

1.2.2 Nordföhn

Im Gegensatz zum Südföhn ist während dem Nordföhn die Temperaturzunahme nicht stark, weil die Luft aus dem kälteren Norden in den wärmeren Süden kommt (Billwiller, 1904). In extremen Fällen kann der Nordföhn sogar zu einer leichten Abkühlung führen (Cetti, 2015). Für den Nordföhn sind als Kriterien eine geringe relative Feuchte und starke Winde aus einer konstanten Windrichtung wichtiger. Nach Billwiller (1904) lassen sich zwei Typen des Nordföhns unterscheiden: einen Gradientenföhn, der durch einen Nord-Süd-Druckgradient im Alpenbereich entsteht sowie einen antizyklonalen Nordföhn, der sich bei Abwesenheit eines Druckgradienten ausbildet. Der Gradientenföhn kann durch eine Depression im Süden der Alpen oder durch die Annäherung einer Hochdruckzone an den Alpennordrand entstehen (Billwiller, 1904). Beim antizyklonalen Föhn tritt nach Billwiller (1904) „in den südlichen Alpentälern häufig ein föhnartiges Niedersinken warmer und trockener Luft auf aus dem zentralen Teil einer Anticyklone über dem Alpengebiete.“

1.2.3 Weitere Föhnarten

Der **Guggiföhn** tritt bei Eiger, Mönch und Jungfrau auf und ist ein lokaler Föhn (Gerstgrasser, 2017). Er tritt wegen der topografischen Verhältnisse bei Südost- oder Ostwinden auf (Gerstgrasser, 2017). Mit Böenspitzen von 150 bis 200 km h⁻¹ gehört der Guggiföhn zu den extremsten Wettererscheinungen im Alpenraum (Gerstgrasser, 2017). Im Gegensatz zum Südföhn wird er nicht „[...] durch den Stau am Alpenhauptkamm und Absinken nördlich davon verursacht, sondern durch sekundäre Stau- und Lee-Effekte am nördlichen Alpenkamm, wo die Berge im Vergleich zu den südöstlich vorgelagerten Gebieten deutlich höher sind“ (Gerstgrasser, 2017).

Der **Appenzellerföhn** ist ein regionaler Föhn in den Voralpen in der Region des Appenzell, St. Gallen und Bodensee (Richner & Hächler, 2013; Müller, 2017). Er steht nicht mit einer südlichen Windkomponenten auf dem Alpenhauptkamm in Verbindung, sondern tritt bei Westwinden und fallendem Druck auf der Alpennordseite auf (Richner & Hächler, 2013). Durch das Auftreten des Appenzellerföhns

bei Westwinden kann er auch als Westföhn bezeichnet werden.

Der **Pfänderwind**, **Bregenzer Fallwind**, **Falscher Föhn** oder auch **Ostföhn** tritt nicht in der Schweiz sondern Nahe der Schweizer Grenze in Bregenz am Bodensee auf. Man unterscheidet zwischen zwei Typen des Pfänderwinds (Gohm et al., 2015). Erstens dem klassischen Pfänderwind, der mit einer östlichen bis nordöstlichen grossskaligen Strömung verbunden ist, welche den Pfänder überquert und im Lee föhnartig herunterstürzt (Gohm et al., 2015). Dieser Typ führt zu mässigen bis starken Winden aber nur einer schwachen adiabatischen Erwärmung in Bregenz und der Umgebung (Gohm et al., 2015). Der zweite Typ bzw. südöstlicher Pfänderwind wird mit westlichen bis südwestlichen Strömungen am Alpenhauptkamm in Verbindung gebracht (Gohm et al., 2015). Das Rheintal ist bei diesem Typ mit Kaltluft gefüllt und ein ageostrophischer Wind am oberen Rand des Kaltluftsees wird durch den mesoskalige Druckgradienten begünstigt (Gohm et al., 2015). Diese Strömung überquert den Gebhardsberg und führt bei eher schwachen Winden zu einer starken Erwärmung an der Erdoberfläche (Gohm et al., 2015).

1.2.4 Westföhn

Müller (2017) hat in der Dokumentation zum Westföhn am Vierwaldstättersee das bekannte Wissen zum Westföhn zusammengetragen. Dieses Kapitel basiert daher auf Müller (2017).

Der Westföhn tritt auf, wenn der Westwind entlang der Alpen weht und entlang des Reliefs in einigen Regionen föhnartig herunterstürzt. In der Region um Luzern tritt der Westföhn am häufigsten und ausgeprägtesten auf. Föhnartige Effekte bei Westwind treten aber auch in Obwalden, bei Thun im Lee des Gantrisch, am oberen Zürichsee und am oberen Bodensee (Appenzellerföhn) auf. Mit dieser Arbeit soll der Westföhn in der Region um Luzern und am Vierwaldstättersee genauer untersucht werden.

Wie auch beim Nord- und Südföhn wird die Luft beim Abstieg trockenadiabatisch aufgewärmt und abgetrocknet. Die Abtrocknung und Erwärmung ist beim Westföhn aber weniger ausgeprägt als beim Südföhn. Abbildung 3 zeigt die Temperatur an verschiedenen Messstationen um den Vierwaldstättersee und das Gebiet des Westföhns bei einer typischen Westföhn-Situation. Die Erwärmung und Abtrocknung durch den Westföhn reicht von den Entlebucher Voralpen bis nach Luzern. Bis wie weit nach Norden der Westföhn wehen kann, ist noch nicht bekannt. Die höchste Temperatur findet man in Luzern, etwas weiter nördlich an der Station Emmen liegt die Temperatur schon deutlich weniger hoch.

Die Luft bei Luzern erreicht während dem Westföhn eine potentielle Temperatur, welche derjenigen des Naps entspricht, auch wenn die Strömung nicht vom Napf selber kommt. Abbildung 4 zeigt eine Zeitreihe der potentiellen Temperatur für ein Westföhn-Ereignis bei Luzern. Deutlich zu erkennen ist, wie die potentielle Temperatur auf das Niveau des Naps springt, aber nicht die gleich hohe potentielle Temperatur wie auf dem Pilatus erreicht. Die Luft kommt aus einer Höhe von rund 1500 m und somit aus deutlich geringerer Höhe als das Alpenkammniveau. Durch den – für einen Föhn eher geringen – Abstieg von 1000 m trocknet die Luft auf mindestens 60 %, in optimaleren Fällen auch auf 30 % - 40 % ab. Um den Westföhn von einem warmen Westwind oder Bergwind zu unterscheiden, hat Müller (2017) für die Messstation Luzern folgende Kriterien festgelegt:

- Windrichtung $240^\circ - 280^\circ$
- Mittelwind $\geq 3.6 \text{ m s}^{-1}$
- Temperatur mindestens 2°C höher als im Mittelland (Referenz-Station Zürich-Kloten)
- potentielle Temperatur: $\theta_{NAP} - \theta_{LUZ} \leq 0.5^\circ\text{C}$
- relative Feuchte $\leq 60\%$ (sekundär)

Wird die Voraussetzung eines Westwindes von 20 kn (Winterhalbjahr) bzw. 10 kn (Sommer) aus 250° in der freien Atmosphäre erfüllt, kann sich der Westföhn mit einer Strömung einstellen, die entlang der Voralpenkette strömt. Bevor die Luft bei Luzern herunterstürzt, strömt sie entlang der Nordflanken von Hohgant, Schratzenfluh, Schimbrig und Mittagbüpfli (siehe Abbildung 5).

Aus Erfahrung hat sich gezeigt, dass der Westföhn häufiger weht, wenn die Druckdifferenz (QFF) zwischen Bern und Luzern gross ist. Wenn die Druckdifferenz zwischen Bern und Luzern mindestens 1 hPa beträgt und die Differenz der potentiellen Temperatur zwischen dem Napf und Luzern negativ ist (oder nahe 0), tritt der Westföhn am häufigsten auf.

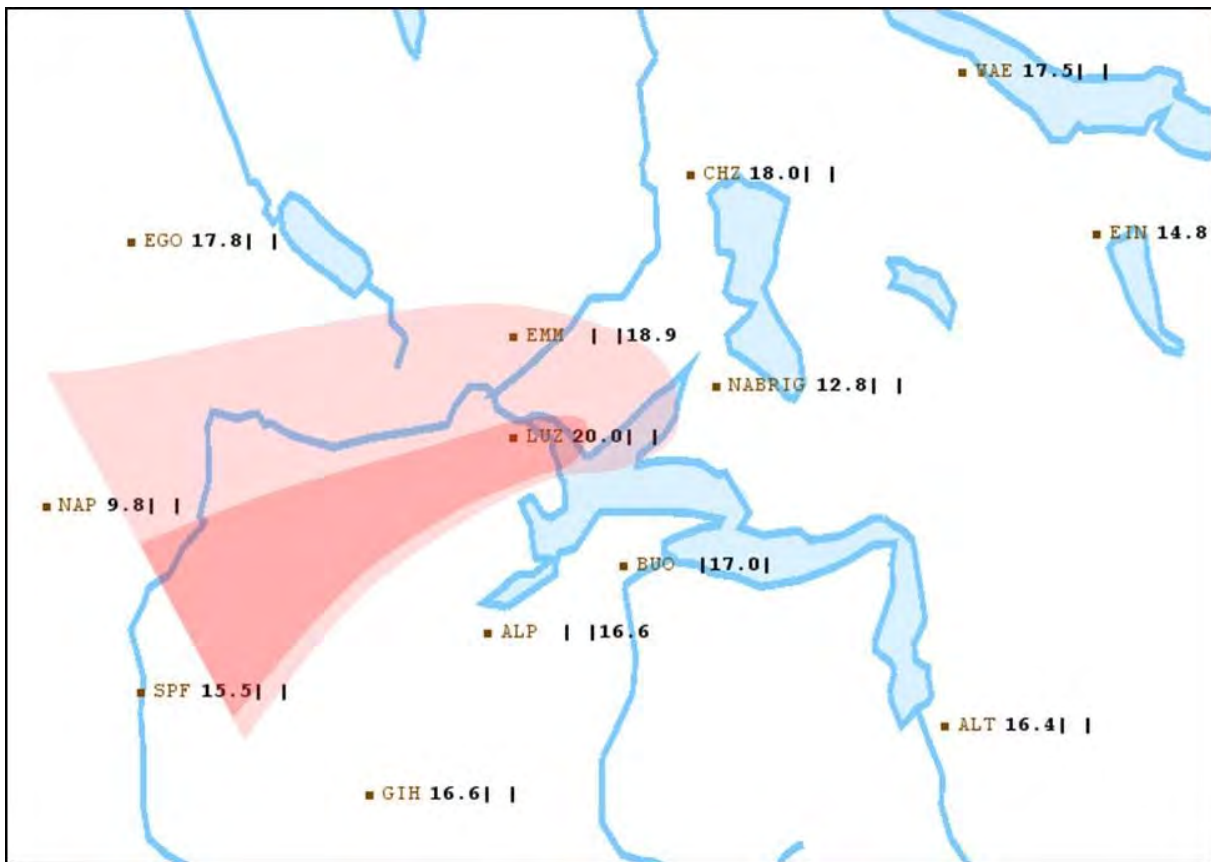


Abbildung 3: Temperaturen an den verschiedenen Messstationen um den Vierwaldstättersee am 04.10.2012 als typisches Beispiel für eine Westföhn-situation. Quelle: MeteoSchweiz aus Müller (2017)

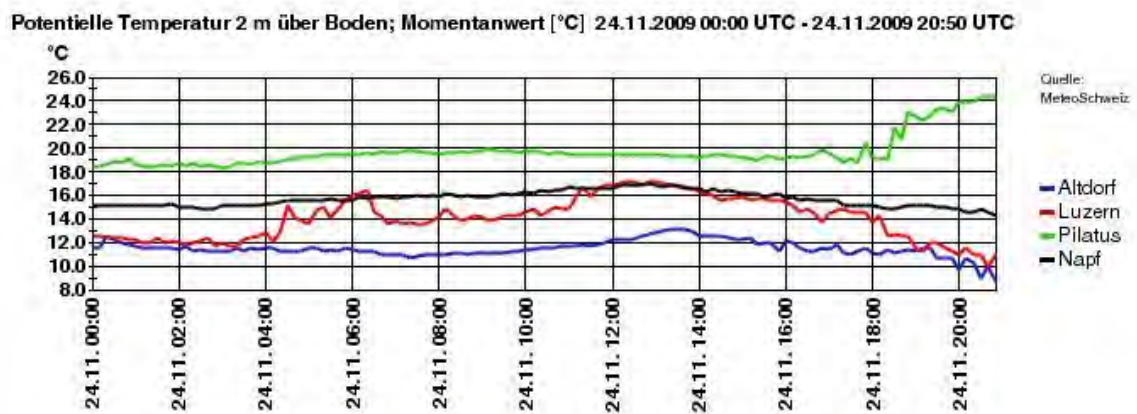


Abbildung 4: Beispiel des Verlaufs der potentiellen Temperatur an den Stationen Altdorf, Luzern, Pilatus und Napf bei einem Westföhn-Ereignis am 24.11.2009. Quelle: MeteoSchweiz aus Müller (2017)



Abbildung 5: Karte der Region um Luzern mit der eingezeichneten Westföhnströmung (roter Pfeil) als Beispiel für einen Westföhn aus Südwesten, der entlang der Voralpenkette südwestlich von Luzern strömt. Markiert ist der Ort der SwissMetNet Station Luzern. Quelle: Google Maps

1.3 Ziele der Arbeit

Müller (2017) hat in seiner Dokumentation das bekannte Wissen zum Westföhn zusammengetragen. Mit dieser Bachelor-Arbeit soll dieses Wissen erweitert und vertieft werden.

Einerseits soll eine Übersicht über verschiedene Westföhn-Typen gegeben und die Eigenschaften und Besonderheiten des Westföhns untersucht werden. Verschiedene Westföhn-Fälle sollen im Folgenden anhand der synoptischen Lage eingeteilt werden. In einem weiteren Teil der Arbeit geht es um die Analyse von drei Fallstudien. Dabei wird die Euler'sche und die Lagrange'sche Perspektive betrachtet. Zuerst wird untersucht, wie gut das COSMO-1 Modell den Westföhn vorhersagen kann. Zeigt sich eine gute Nachbildung des Westföhns im COSMO-1 Modell, wird die Physik des Westföhns genauer angeschaut. Das Ziel dabei wird sein, die folgende Fragen zu beantworten:

- Wie gross ist die horizontale Ausdehnung des Westföhns im COSMO-1 Modell und in der Realität?
- Wie sieht die horizontale und vertikale Struktur des Westföhns im COSMO-1 Modell aus?
- Woher und aus welcher Höhe kommt die Luft des Westföhns im COSMO-1 Modell?

2 Daten und Methoden

Für diese Bachelor-Arbeit wurden elf Termine mit mindestens einem Westföhn-Ereignis ausgewählt, die in der folgenden Liste zusammengetragen sind. Die detaillierten Fallstudien mit den COSMO-1 Modelldaten wurden für die drei ausgewählten Termine (fett) der Liste durchgeführt.

- 27.03.2009
- 24.11.2009
- 10.03.2011
- 27.08.2011
- 07.09.2011
- 21.01.2012
- 18.09.2013
- **27.01.2014**
- **03.01.2018**
- **16.01.2018**
- 18.01.2018

Die Topografie für das Darstellen der SwissMetNet-Messdaten in der Region des Vierwaldstättersees stammt vom Bundesamt für Landestopografie swisstopo (www.swisstopo.admin.ch). Die ursprüngliche Auflösung von 25m wurde auf ein Gitter von 30 m x 30 m interpoliert und geglättet.

2.1 Messdaten

Zu den elf Terminen standen Messdaten der SwissMetNet-Stationen Altdorf, Cham, Flühli LU, Gersau, Giswil, Luzern, Mosen, Napf, Pilatus, Sattel SZ, Schüpheim, Wädenswil und Zürich-Kloten, der Messstation Emmen der Luftwaffe der Schweizer Armee und der Messstation Rigi, Seebodenalp des Bundesamts für Umwelt zur Verfügung. Alle in dieser Arbeit verwendeten Messdaten stammen aus dem Datenportal der MeteoSchweiz, dem Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie. Die verschiedenen Stationen sind mit ihren Koordinaten und der Stationshöhe in Tabelle 1 zusammengetragen.

An den einzelnen Terminen lagen die Daten über eine Periode von jeweils 72 Stunden mit einer zeitlicher Auflösung von 10 Minuten vor. Für die verschiedenen Messstationen waren – falls gemessen – Werte der Temperatur und potentielle Temperatur, absolute und relative Feuchte, Niederschlag, Böenspitzen, Windstärke und Windrichtung vorhanden. Detailliertere Informationen zu den einzelnen SwissMetNet-Stationen sind auf der Webseite der MeteoSchweiz¹ zu finden. Eine Besonderheit der Messstation Luzern ist, dass die „Windmessung an exponierter Lage auf Gebäude in 41m Höhe über Boden“ (MeteoSchweiz¹) stattfindet.

Die Identifikation der Westföhn-Perioden an den verschiedenen Stationen basierte subjektiv auf der Betrachtung der Zeitreihe der potentiellen Temperatur, relativen Feuchte und des Windes (Böenspitzen,

¹Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz. Automatisches Messnetz. <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/mess-und-prognosesysteme/bodenstationen/automatisches-messnetz.html>

Tabelle 1: SwissMetNet-Stationen. Quelle: MeteoSchweiz

Name	Kürzel	Lon	Lat	Höhe (m)
Altdorf	ALT	8° 37' E	46° 53' N	438
Cham	CHZ	8° 28' E	47° 11' N	442
Emmen	EMM	8° 18' E	47° 05' N	426
Flühli, LU	FLU	8° 01' E	46° 53' N	939
Gersau	GES	8° 31' E	46° 60' N	521
Giswil	GIH	8° 11' E	46° 51' N	471
Luzern	LUZ	8° 18' E	47° 02' N	454
Mosen	MOA	8° 14' E	47° 15' N	453
Napf	NAP	7° 56' E	47° 00' N	1403
Pilatus	PIL	8° 15' E	46° 59' N	2106
Rigi-Seebodenalp	NABRIG	8° 28' E	47° 04' N	1031
Sattel, SZ	SAG	8° 38' E	47° 05' N	790
Schüpheim	SPF	8° 01' E	46° 57' N	742
Wädenswil	WAE	8° 41' E	47° 13' N	485
Zürich / Kloten	KLO	8° 32' E	47° 29' N	426

Windstärke und Windrichtung) unter Berücksichtigung der Grenzwerte, die Müller (2017) definiert hat (siehe Kapitel 1.2.4). Diese Grenzwerte wurden bei der Identifikation der Westföhnperioden mehr als Richtlinien denn als fixe Grenzen verstanden. Zeigten die Zeitreihen anhand eines Sprungs in mehreren Variablen ein deutliches Signal, wurden die Grenzwerte nach Müller (2017) aber nicht ganz erfüllt, so wurde diese Periode dennoch als Westföhn klassifiziert. Die Zeitreihe der potentielle Temperatur an den verschiedenen Messstationen wurde mit der potentiellen Temperatur am Napf verglichen. Für den Einsatz des Westföhns wurden insbesondere Sprünge in den verschiedenen Variablen gesucht.

2.2 Operationelle Analysen des ECMWF

Für die Analyse der synoptischen Lage während den elf Westföhn-Fällen standen operationelle Analysen des *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF; www.ecmwf.int) zur Verfügung. Die operationellen Analysen waren jeweils über einen Zeitraum von 72 Stunden um 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC und 18 UTC vorhanden. Die Daten decken das Gebiet über dem Nordatlantik und Europa ab und wurden auf ein Gitter mit einer horizontale Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ interpoliert. Zu jedem Zeitpunkt waren 3D-Felder der Temperatur, des Druck, der absolute Feuchte und des Windes (alle drei Komponenten) vorhanden. Aus diesen primären Feldern wurden Felder der potentiellen Temperatur und äquivalent-potentiellen Temperatur (nach Bolton, 1980) sowie der relative Feuchte berechnet.

Die Felder der absoluten und äquivalent-potentiellen Temperatur, des Windes und der relativen Feuchte wurden von den 137 Modellschichten auf einige Standard-Druckflächen interpoliert. Anhand der interpolierten Felder und geopotentiellen Höhe auf 300 hPa, 500 hPa und 850 hPa wurde die synoptische Lage über Europa mit Trögen, Rücken und Tiefdrucksystemen mit ihren dazugehörigen Fronten charakterisiert. Die Identifikation und Lokalisierung der Fronten basierte auf dem Feld der äquivalent-potentiellen Temperatur auf 850 hPa. Dieses Feld wird auch in der operationellen Anwendung am Met Office und am Deutschen Wetterdienst zum Zeichnen der Bodenfronten verwendet (Schemm et al., 2018). Die äquivalent potentielle Temperatur eignet sich dafür besonders gut, weil sie bei reversiblen feuchtadiabatischen Prozessen erhalten ist und gut Luftmassen verschiedener Herkunft unterscheidet (Schemm et al., 2018). Eine weitere wichtige Eigenschaft ist, dass die äquivalent-potentielle Temperatur eine Front über den ganzen Tag identifizieren kann (Schemm et al., 2018).

2.3 COSMO-1 und Trajektorien

Das COSMO-Modell ist ein numerisches, nicht-hydrostatisches atmosphärisches Vorhersagemodell, das vom *Consortium for Small-Scale Modeling* (COSMO) entwickelt wurde (Schättler et al., 2008). Es wurde für die Anwendung auf der meso- β und meso- γ Skala entwickelt und kann effizient für Auflösungen zwischen 50 m und 50 km verwendet werden (Steppeler et al., 2003; Schättler et al., 2008). Die vertikale Koordinate des COSMO-Modells folgt der Topografie (Schär et al., 2002). Das COSMO-Modell basiert auf einfachen thermo- und hydrodynamischen Gleichungen, welche die kompressible Strömung in einer feuchten Atmosphäre beschreiben (Schättler et al., 2008). Detailliertere Informationen zum COSMO-Modell können in der Modellbeschreibung (Schättler et al., 2008) gefunden werden.

Für die Fallstudien waren Vorhersagedaten des sehr hoch aufgelösten COSMO-1 Modells vorhanden. Um eine zeitliche Auflösung von 10 Minuten zu erreichen, wurden von der MeteoSchweiz für diese Bachelor-Arbeit Reruns des Modells über einen Zeitraum von 30 Stunden jeweils ab 00 UTC durchgeführt.

Die COSMO-1 Vorhersagedaten beinhalten dreidimensionale Felder des Drucks, des Winds (alle drei Komponenten), der absoluten und potentiellen Temperatur und der absoluten und relativen Feuchte. Die horizontale Auflösung des Modells beträgt 1.1 km (0.01°)². Die Modelldaten bestehen aus 80 Modellschichten und 1158×774 (im Jahr 2018) bzw. 1062×774 (im Jahr 2014) horizontalen Gitterpunkten. Das Gebiet des COSMO-1 erstreckt sich über den gesamten Alpenbogen und hat die Schweiz im Zentrum. Abbildung 6 zeigt das Gebiet und die Topografie des COSMO-1 Modells. Neben dem Alpenbogen liegen auch das Zentralmassiv, der Jura, der Schwarzwald und der Ligurische Apenmin im Modellgebiet. Im Alpenraum sind die grossen Täler gut dargestellt und die Höhe des Gebirges ist mit Höhen von über 3000 m nahe an der Realität.

²Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. COSMO-1 – hochaufgelöste Vorhersagen für den Alpenraum. <http://www.meteoschweiz.admin.ch/home/mess-und-prognosesysteme/warn-und-prognosesysteme/cosmo-prognosesystem/cosmo-1-hochaufgeloeste-vorhersagen-fuer-den-alpenraum.html>

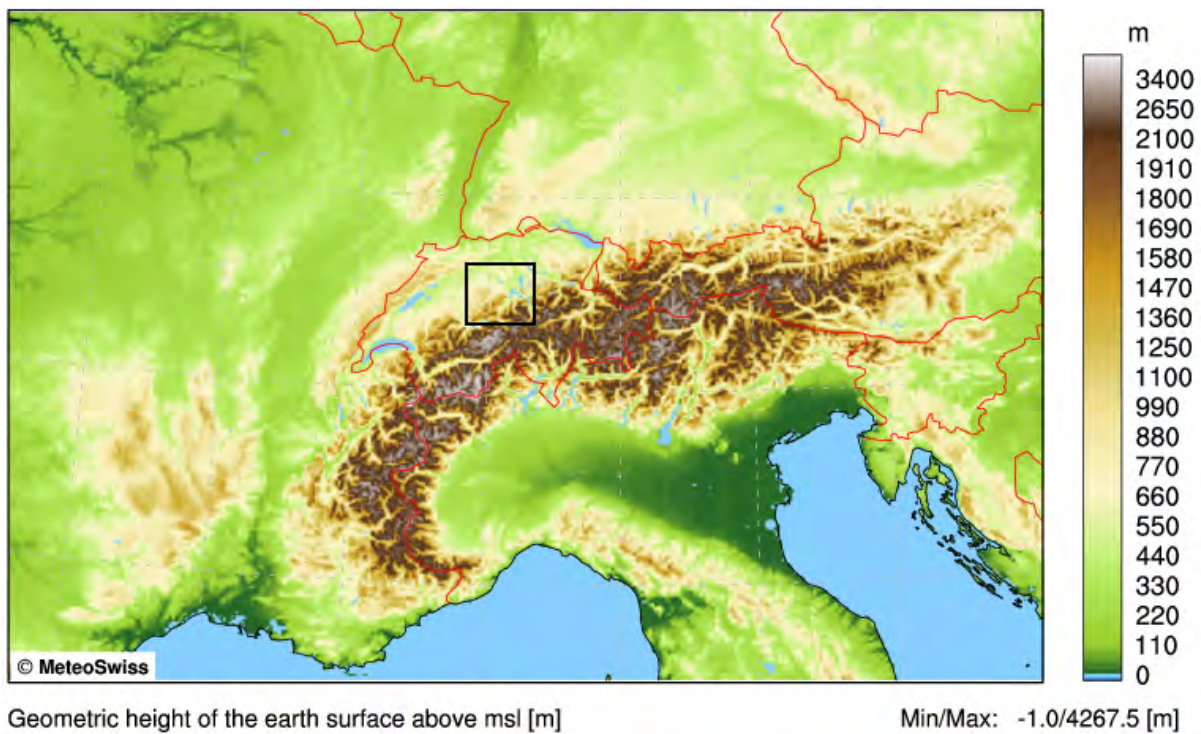


Abbildung 6: Höhe der Orografie des COSMO-1 Modellgebiets. Die schwarze Box gibt das Gebiet in Abbildung 7 an. Quelle: MeteoSchweiz

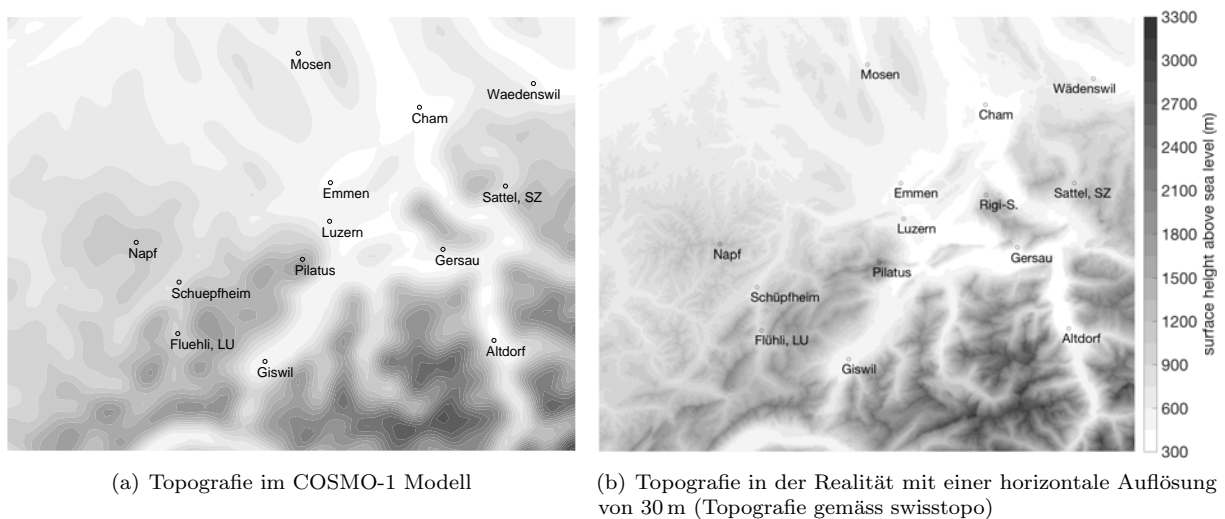


Abbildung 7: Topografie der Region um den Vierwaldstättersee mit der Lage der verschiedenen Messstationen

Abbildung 7 zeigt die Topografie im COSMO-1 Modell und in der Realität in der Region um Luzern mit der Lage, der für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Messstationen. Die Topografie des COSMO-1 Modell widerspiegelt auch kleinskalig gut die grösseren Täler, Berge und Hügel. Die sehr feinen Strukturen der Topografie (z.B. am Napf) können jedoch nicht durch das Modell dargestellt werden. Ausserdem werden durch das Modell die steilen und spitzen Berge und Hügel abgeflacht. So weist z.B. der Pilatus im Modell nur eine Höhe von gut 1650 m auf, in der Realität liegt der höchste Punkt des Pilatus aber auf 2128 m.

Für die Analyse der Strömung während eines Westföhn-Ereignisses wurden die Felder des COSMO-1 Modell von den 80 Modellschichten auf die Standard-Druckfläche von 850 hPa, aber auch auf eine konstante geometrische Höhe und konstante Höhe über der Topografie interpoliert. Für das Darstellen der vertikalen Querschnitte entlang einer Linie wurden die Modelldaten entlang dieser Linie interpoliert.

Die Vorwärts- und Rückwärts-Trajektorien für die Fallstudie wurden basierend auf den Modelldaten des COSMO-1 gerechnet. Die Berechnung wurde mit dem Tool LAGRANTO (The Lagrangian Analysis Tool) basierend auf Wernli & Davies (1997) und Sprenger & Wernli (2015) durchgeführt. Die absolute und potentielle Temperatur, der Wind (alle drei Windkomponenten) sowie die absolute und relative Feuchte wurden mit dem Tool LAGRANTO entlang der Trajektorien verfolgt.

3 Synoptische Einteilung von Westföhn-Fällen

In der Dokumentation zum Westföhn schlägt Müller (2017) drei verschiedene Typen des Westföhns vor, die durch unterschiedliche synoptische Lagen auftreten können. Er unterscheidet zwischen dem Warmsektor-Typ, der im Bereich des Warmsektors auftritt, dem Rückseiten-Typ, der auf der Rückseite einer abziehenden Kaltfront weht sowie dem Sommer-Typ, welcher bei genug grosser Labilität im Sommer auftreten kann (Müller, 2017). Unter den elf untersuchten Terminen, die im Rahmen dieser Arbeit ausgesucht wurden, befindet sich kein Sommer-Typ. Daher wird der Sommer-Typ in dieser Arbeit nicht diskutiert.

3.1 Warmsektor-Typ

Durch die extreme Vielfalt an unterschiedlichen Tiefdrucksystemen mit dazugehörigen Frontensystemen konnten unter den 11 untersuchten Westföhn-Ereignissen verschiedene Ausprägungen des Warmsektor-Typs identifiziert werden. Gewisse Westföhn-Ereignisse treten relativ rasch nach dem Durchzug der Warmfront auf. Andere Westföhn-Ereignisse setzen erst kurz vor dem Eintreffen der Kaltfront in der Region um den Vierwaldstättersee ein und enden mit dem Durchzug der Kaltfront. Zwischen diesen frühen und späten Westföhn-Ereignissen können einige weitere Ausprägungen auftreten.

Westföhn am 24.11.2009 Ein sehr anschauliches Beispiel für einen frühen Warmsektor-Westföhn trat am 24.11.2009 auf. Ein starkes Tief befand sich um 12 UTC mit seinem Zentrum nordwestlich von Grossbritannien (siehe Abbildung 8). Die Warmfront erstreckte sich von Schottland über die Nordsee und Deutschland bis nach Tschechien, die Kaltfront lag um 12 UTC noch über dem Atlantik. Die Höhenströmung über den Alpen ist durch einen Nordwestwind geprägt (siehe Abbildung 8a). Nördlich des Alpenbogens in der Region des Vierwaldstättersees weht auf 850 hPa ein Südwest bis Westwind (siehe Abbildung 8b). Der Westföhn setzte in Luzern um 11:40 UTC ein und wehte bis 18:10 UTC (siehe Abbildung 9). Die Messstation Cham zeigt nur eine schwache westföhnartige Strömung zwischen 13:50 UTC und 17:30 UTC. Der Einsatz des Westföhns erfolgte nach dem Durchzug der Warmfront und der Westföhn endete, bevor die Kaltfront in der Region um den Vierwaldstättersee eintraf.

Während dem Westföhn wehten an der Station Napf Winde mit etwa 10 m s^{-1} aus 220° bis 240° . Der Unterschied der potentiellen Temperatur zwischen den SwissMetNet-Stationen Luzern und Napf war vor dem Einsetzen des Westföhns mit 3°C relativ gering. Auffallend ist, wie in der Nacht und bis um 12 UTC am Napf, aber auch an den Stationen Luzern und Cham, durch die Warmfront leichter Niederschlag fiel. Mit dem Beginn des Westföhns hörte der Niederschlag auf. Zu Beginn wehte der Westföhn leicht aus Südwesten, drehte dann aber schnell auf Westen. Im weiteren Verlauf der Westföhn-Periode wehte der Wind an der Messstation Luzern weiter aus Westen mit einer leichten nördlichen Komponente. An der Messstation Cham kam der Wind deutlich stärker aus Südwesten. Im Vergleich zur Station Luzern lag die potentielle Temperatur an der Station Cham bis zu 1°C tiefer und die Luft trocknete nur auf knapp unter 70 % ab. Nach dem Ende des Westföhns nahm der Unterschied der potentiellen Temperatur zwischen den Stationen Luzern und Napf laufend zu und lag am 25.11.2009 00 UTC bei 6°C .

Westföhn am 07.09.2011 Ein Beispiel eines Westföhn-Ereignisses, bei dem der Westföhn erst im Vorfeld der sich annähernden Kaltfront einsetzte, trat am 07.09.2011 auf. Ein Höhentief lag über Island und ein Hoch befand sich über den Kanarischen Inseln (siehe Abbildung 10a). Über den Alpen kam die Strömung auf 300 hPa aus Westen bis Nordwesten. Durch ein Tief über Dänemark wehte der Wind auf 850 hPa nördlich der Alpen aus Westen bis Südwesten (siehe Abbildung 10b). Am 07.09.2011 um 12 UTC lag ein ausgedehntes Frontensystem von Skandinavien über Deutschland und Frankreich bis in die Biskaya. Die sehr langgezogene Kaltfront, die von Westen gegen den Alpenbogen zog, wurde von den Alpen abgebremst und aufgehalten. An der Station Luzern wehte der Westföhn ab 11:10 UTC und konnte sich bis um 01:20 UTC am 08.09.2011 halten (siehe Abbildung 11). Sobald sich die letzten Reste der warmen Luft verzogen hatten, hörte der Westföhn auf.

Speziell an diesem Westföhn-Ereignis ist, dass der Westföhn zuerst an der Station Emmen auftrat (ab 09:30 UTC) und erst knapp zwei Stunden später an der SwissMetNet Station Luzern durchdrückte (siehe Abbildung 11). An der Station Cham trat sogar ab 08:50 UTC ein relativ starker Wind aus Westen auf, der zu einer Abtrocknung und Erwärmung führte. Die potentielle Temperatur in Cham erreichte aber

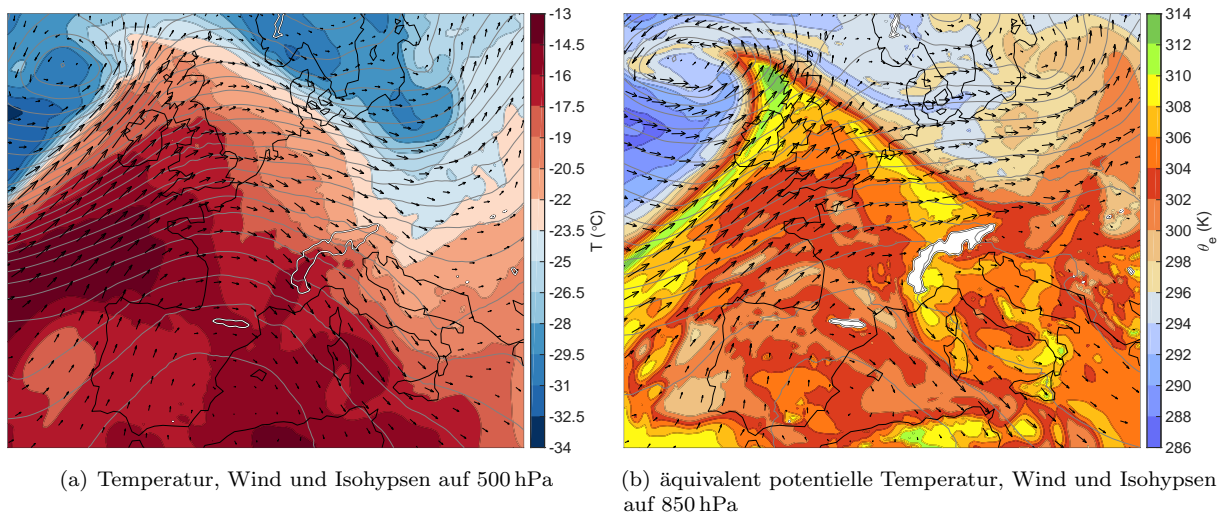


Abbildung 8: synoptische Lage über Europa am 24.11.2009 um 12 UTC

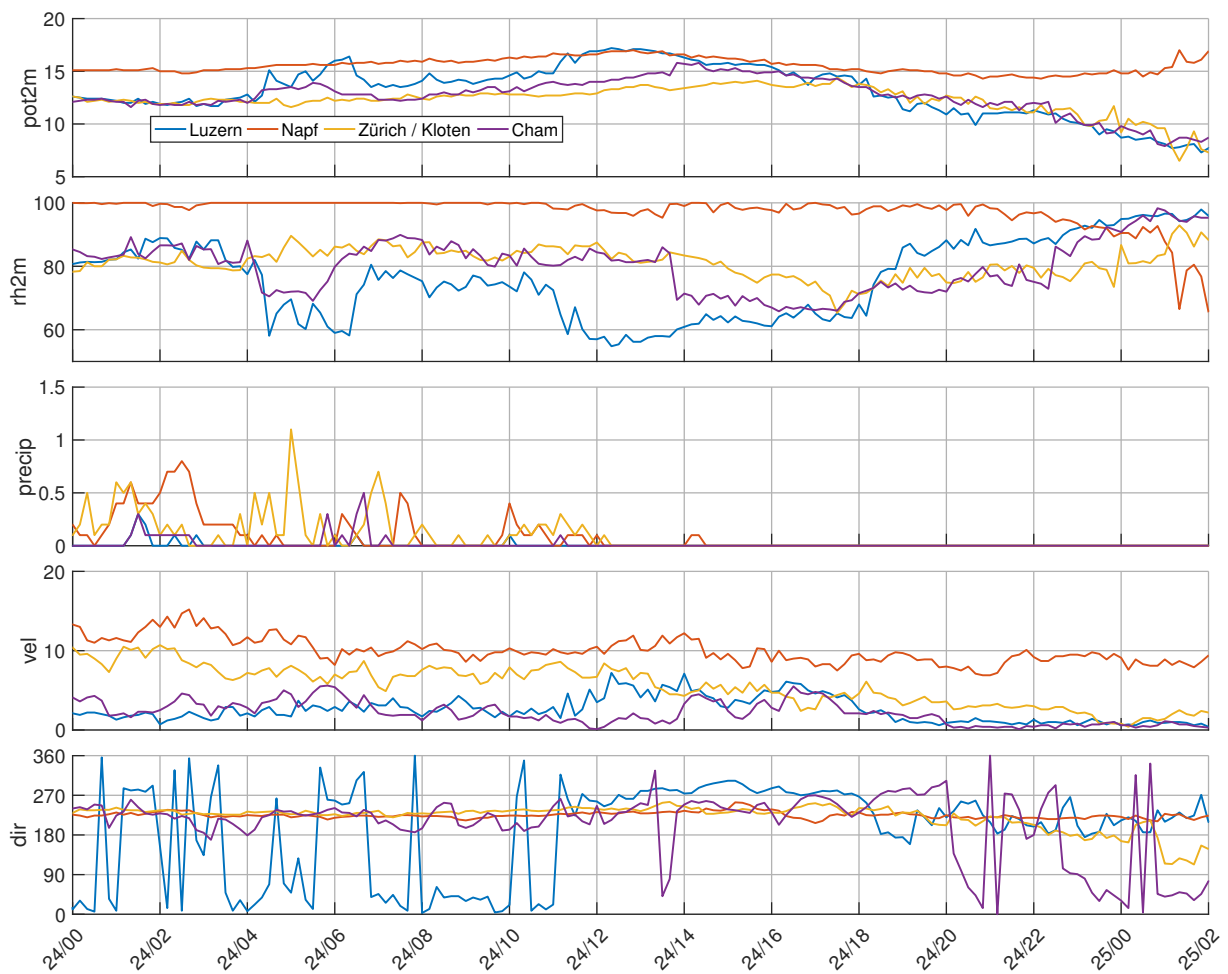


Abbildung 9: 10-Minuten Messwerte an den SwissMetNet-Stationen Luzern, Napf, Zürich-Kloten und Cham vom 24.11.2009 00 UTC bis 25.11.2009 02 UTC. pot2m: potentielle Temperatur 2 m über Boden ($^{\circ}\text{C}$); rh2m: relative Feuchte 2 m über Boden (%); precip: 10-Minuten Summe des Niederschlags (mm); vel: Skalar der Windgeschwindigkeit, 10-Minuten Mittel (m s^{-1}); dir: Windrichtung, 10-Minuten Mittel ($^{\circ}$).

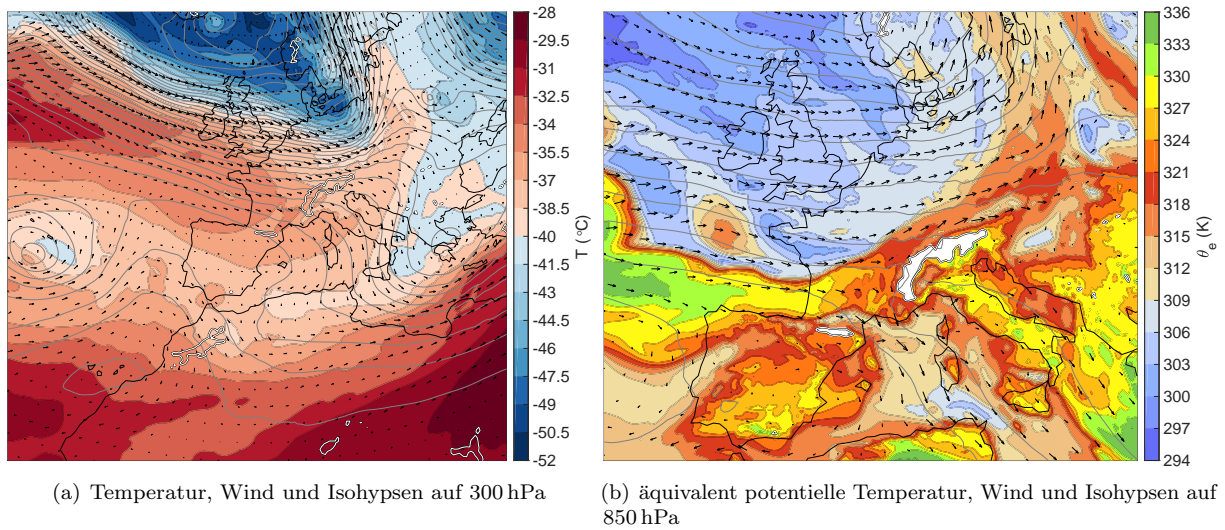


Abbildung 10: synoptische Lage über Europa am 07.09.2011 um 12 UTC

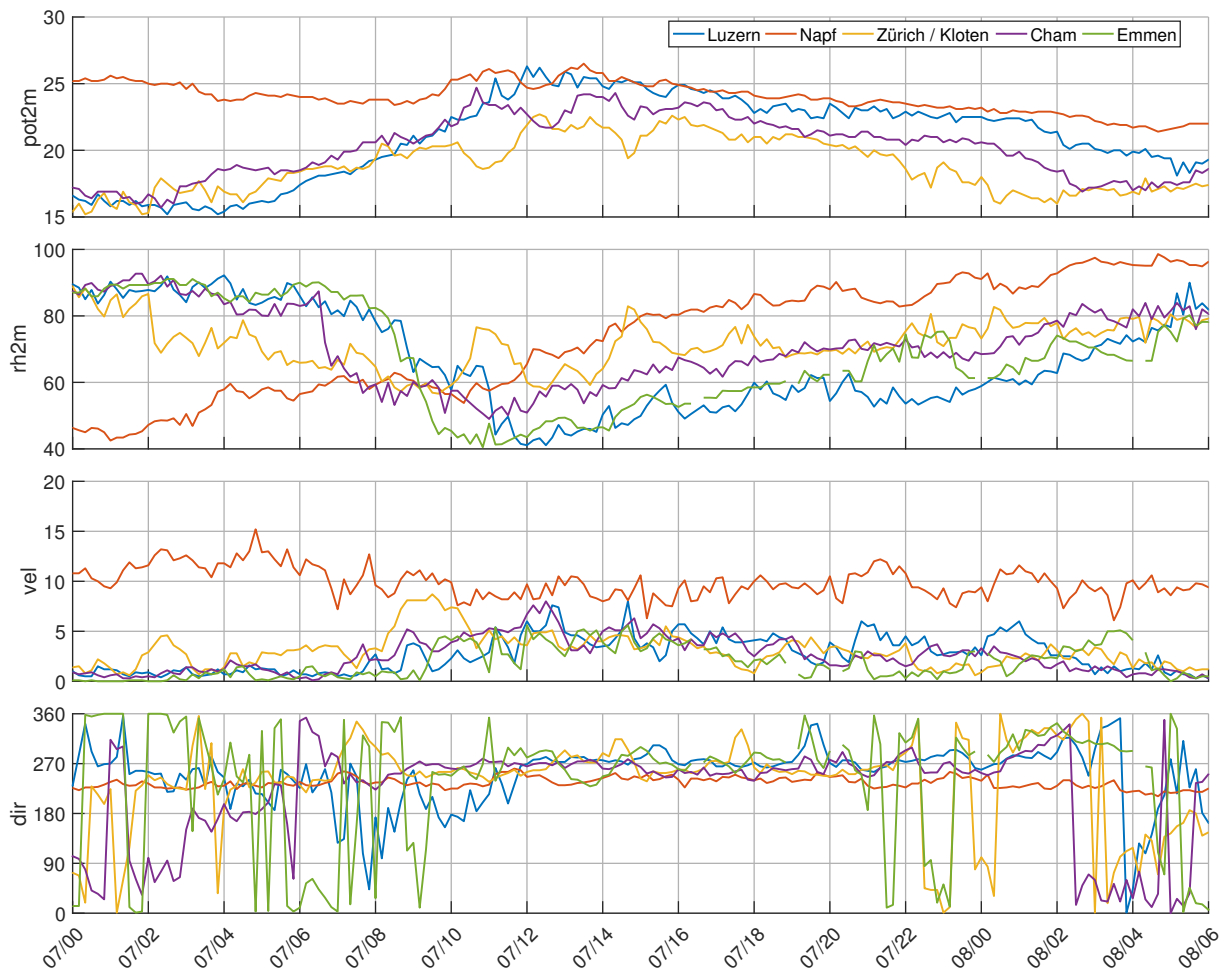


Abbildung 11: 10-Minuten Messwerte an den SwissMetNet-Stationen Luzern, Napf, Zürich-Kloten und Cham und der Messstation Emmen vom 07.09.2011 00 UTC bis 08.09.2011 06 UTC. pot2m: potentielle Temperatur 2 m über Boden (°C); rh2m: relative Feuchte 2 m über Boden (%); vel: Skalar der Windgeschwindigkeit, 10-Minuten Mittel (m s⁻¹); dir: Windrichtung, 10-Minuten Mittel (°).

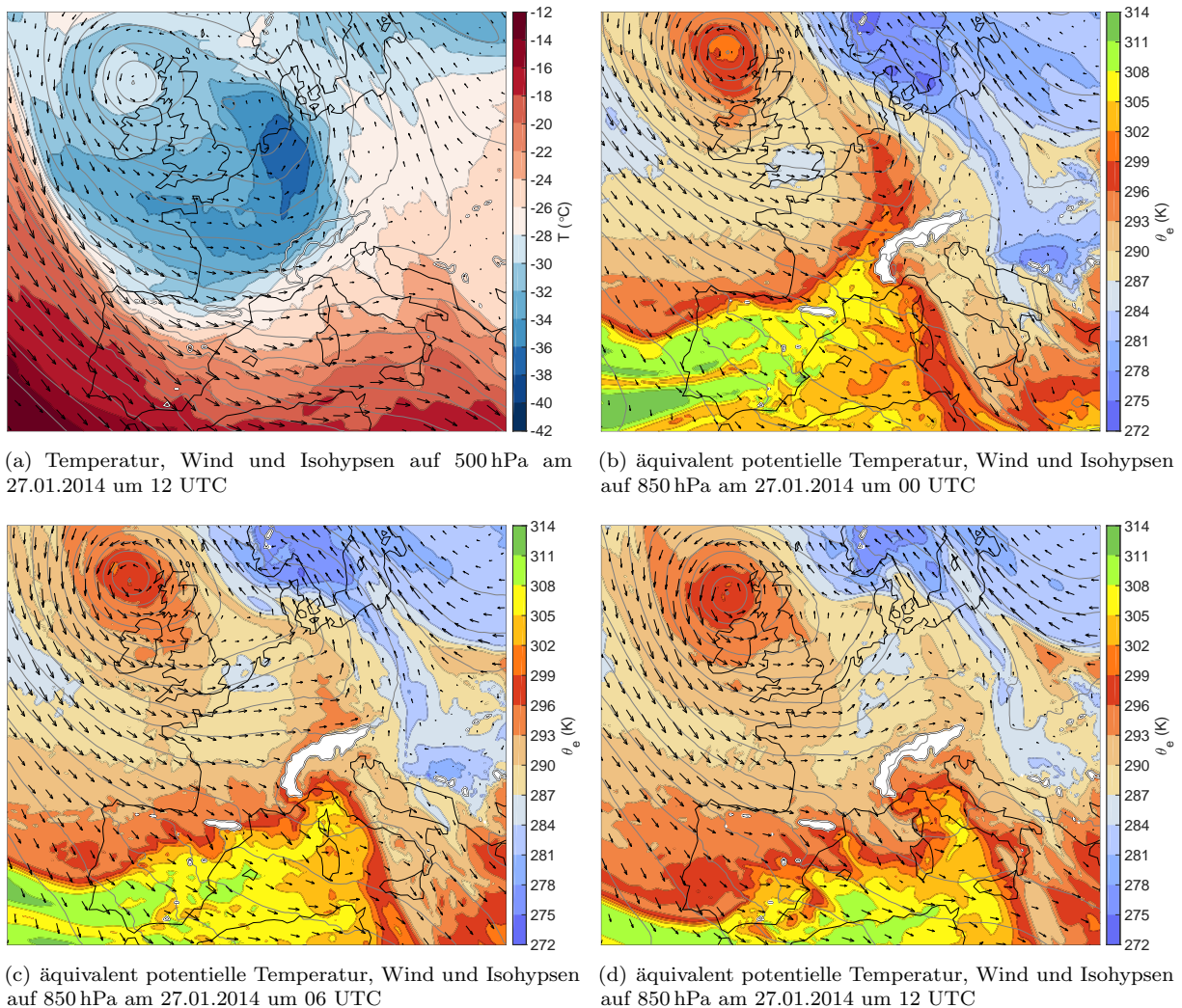


Abbildung 12: synoptische Lage über Europa am 27.01.2014 zwischen 00 UTC und 12 UTC

nie das Niveau der potentiellen Temperatur am Napf. Der Westföhn am 07.09.2011 endete knapp fünf Stunden früher in Emmen als in Luzern und eine Stunde früher in Cham als in Luzern. An der Station Napf wehten während dem Westföhn Winde mit 10 m s^{-1} aus $230^\circ - 260^\circ$. Der Wind wehte während dem Westföhn am 07.09.2011 an der Station Napf also weniger stark aus Süden als während dem Westföhn vom 24.11.2009.

3.2 Rückseiten-Typ

Ein schönes Beispiel für einen Rückseiten-Typ des Westföhns trat am 27.01.2014 auf. Um 12 UTC lag ein Trog über Westeuropa und ein Hoch über Ostrussland (siehe Abbildung 12a). Die Strömung auf 500 hPa über den Alpen kam aus Westen. Auf 850 hPa war die Strömung massgeblich durch das starke und bereits okkludierte Tief nordwestlich der Britischen Inseln beeinflusst und kam aus Westen bis Südwesten (siehe Abbildung 12b - d). Die einst zum Tief gehörenden Fronten lagen südlich der Alpen über Spanien (Kaltfront) und dem Mittelmeer (Warmfront). Am 27.01.2014 um 00 UTC lagen noch Teile der Warm- und Kaltfront des okkludierten Tiefs nördlich der Alpen (siehe Abbildung 12b). Um 06 UTC sind nur noch die Reste der beiden Fronten zu sehen, die sich in den folgenden 6 Stunden weiter auflösten (siehe Abbildung 12c und 12d).

An der Messstation Luzern wehte der Westföhn zwischen 10:40 UTC und 14:00 UTC (siehe Abbildung

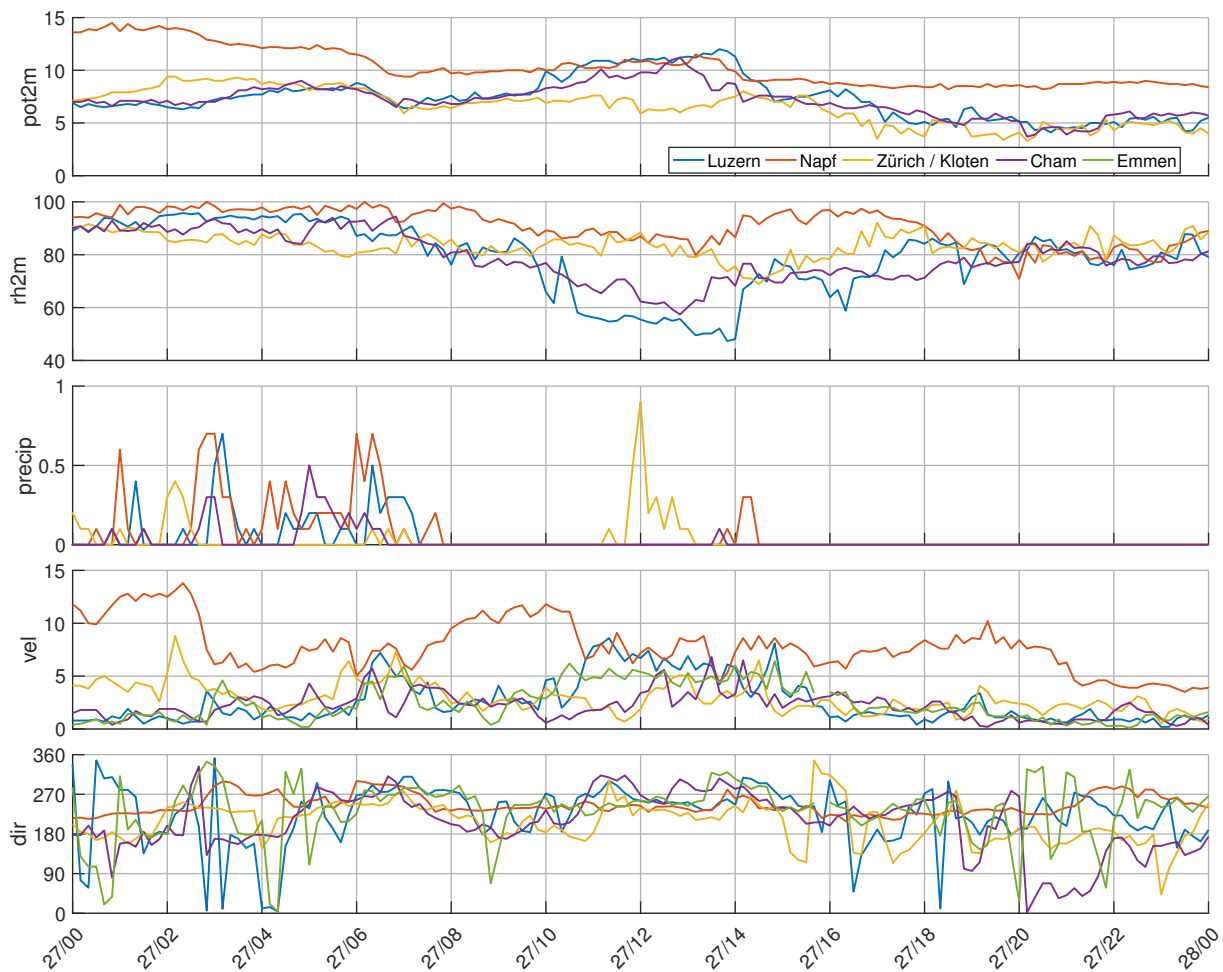


Abbildung 13: 10-Minuten Messwerte an den SwissMetNet-Stationen Luzern, Napf, Zürich-Kloten und Cham und der Messstation Emmen vom 27.01.2014 00 UTC bis 28.01.2014 00 UTC. pot2m: potentielle Temperatur 2 m über Boden ($^{\circ}\text{C}$); rh2m: relative Feuchte 2 m über Boden (%); precip: 10-Minuten Summe des Niederschlags (mm); vel: Skalar der Windgeschwindigkeit, 10-Minuten Mittel (m s^{-1}); dir: Windrichtung, 10-Minuten Mittel ($^{\circ}$).

13). Anhand der Messdaten an allen Stationen kann der Durchzug der Kaltfront zwischen 06 UTC und 07 UTC gelegt werden (Abkühlung und absolut gesehen weniger feuchte Luft, Nachlassen des Niederschlags). Der Rückgang der Temperatur war nicht so deutlich, da die Fronten auch nördlich des Alpenbogens bereits okkludierten. Das Einsetzen des Westföhns lag also bei diesem Fall deutlich auf der Rückseite der durchziehenden Kaltfront.

Während der Westföhn an der Station Luzern durch einen deutlichen Beginn und ein klares Ende charakterisiert war, griff der Westföhn nur für eine kurze Dauer in Cham durch. Die Windgeschwindigkeit und Windrichtung an der Messstation Emmen deutet darauf hin, dass der Westföhn in Emmen während einer ähnlichen Zeitperiode wehte wie an der Station Luzern. Wegen fehlenden Daten der relativen Feuchte und der Temperatur kann die Dauer des Westföhns an der Station Emmen nicht eindeutig bestimmt werden.

Dieses Westföhn-Ereignis vom 27.01.2014 war nicht durch eine sehr konstante Windrichtung geprägt. An der Messstation Luzern wehte der Wind zuerst aus Westen, drehte gegen Ende der Westföhn-Periode dann etwas stärker auf Südwesten. Der Wind wehte an der Station Emmen zwischen 09:20 UTC und 13:20 UTC aus Westsüdwest und zu Beginn somit stärker aus Süden als an der Station Luzern. An der Station Napf waren während des Westföhns die Winde mit $6 - 9 \text{ m s}^{-1}$ nicht stark und die Windgeschwindigkeit war am Napf nur wenig höher als an der Station Luzern. Während dem Westföhn war der Unterschied der potentiellen Temperatur von den Gebieten mit Westföhn zur Station Zürich-Kloten mit bis zu 5°C gross. Dies könnte unter anderem durch den Niederschlag in Zürich mit verursacht sein.

4 Fallstudien

Das folgende Kapitel zeigt eine detaillierte und ausführliche Fallstudie zum Westföhn während dem Sturmtief *Burglind* am 03.01.2018. Anhand von zwei weiteren Fallstudien zum Westföhn am 27.01.2014 und 16.01.2018 wird untersucht, wie repräsentativ die Fallstudie zum Westföhn während dem Sturmtief *Burglind* ist und ob in diesen beiden weiteren Fällen der Westföhn die gleichen Eigenschaften aufweist wie der Westföhn am 03.01.2018.

4.1 Fall 1: Westföhn während Sturmtief Burglind

4.1.1 Messungen

Der Westföhn-Fall vom 03.01.2018 trat während dem Sturmtief *Burglind* auf. Der Sturm *Burglind*, oder nach dem Met Office in Grossbritannien auch *Eleanor*, war der stärkste Wintersturm in der Schweiz seit *Lothar* 1999 (MeteoSchweiz, 2018). Im Flachland wurden verbreitet Windspitzen von 90 - 130 km h⁻¹ gemessen (MeteoSchweiz, 2018), wie auch an der Messstation Luzern. Dort wurde zwischen 06:40 UTC und 11:20 UTC ein starker Westföhn gemessen (siehe Abbildung 14). An der Station Emmen setzte der Westföhn um 07:50 UTC ein, in Cham erst um 08:30 UTC. Das Ende des Westföhns war an allen drei Stationen wegen dem Kaltfrontdurchgang zeitgleich um 11:20 UTC.

Der Beginn des Westföhns war an der SwissMetNet-Station Luzern mit einem Temperatursprung von gut 6 °C innerhalb von 10 Minuten bzw. 10 °C innerhalb einer Stunde sehr deutlich. Auch in der relativen Feuchte war der Beginn des Westföhns sehr deutlich zu erkennen. Die Luft trocknete innerhalb von 10 Minuten von 80 % auf gut 50 % ab. Während dem Westföhn trocknete die Luft in Luzern weiter ab und erreichte Werte von unter 40 %. Auch das Signal in der Windgeschwindigkeit zeigte ein deutliches Einsetzen des Westföhns. Vor dem Einsetzen des Westföhns wehte an der Station Luzern ein mittlerer Wind von etwa 1 m s⁻¹. Während des Westföhn-Ereignisses erreichte der mittlere Wind Werte von über 18 m s⁻¹ und Böenspitzen von bis zu 34 m s⁻¹ wurden gemessen.

An den Messstationen Emmen und Cham war das Einsetzen des Westföhns anhand des Signals der Windgeschwindigkeit noch deutlicher. Der mittlere Wind nahm an der Station Emmen innerhalb von 20 Minuten von 1.5 m s⁻¹ auf 11.3 m s⁻¹ und an der Station Cham innerhalb von 10 Minuten schlagartig von 4 m s⁻¹ auf 14 m s⁻¹ zu. Die potentielle Temperatur und relative Feuchte in Emmen und Cham zeigten den gleichen Verlauf wie an der Station Luzern. Die potentielle Temperatur stieg innerhalb von 10 Minuten um 7 °C (Emmen) bzw. 6 °C (Cham) und die relative Feuchte nahm gleichzeitig um 20 % an beiden Stationen ab.

Während der Westföhn-Periode lag die potentielle Temperatur in Luzern etwa 6 °C höher als an der Station Zürich-Kloten und über drei Stunden leicht höher als die potentielle Temperatur am Napf. Die potentiellen Temperaturen in Emmen und Cham lagen nach dem Einsetzen des Westföhns etwa 1 °C tiefer als an der Station Luzern (siehe auch Abbildung 15).

Zwischen 09:40 UTC und 10:20 UTC zeigten die Stationen Luzern, Emmen und Cham eine starke Zunahme der relativen und absoluten Feuchte. Diese Zunahme kann durch den Niederschlag zwischen 09:40 UTC und 10:10 UTC (Luzern) bzw. 10:30 UTC (Cham) erklärt werden und ging mit einem Temperatur-Rückgang von etwa 4 °C einher. Nach 10:20 UTC nahm die absolute Feuchte wieder deutlich ab. Diese, durch den Niederschlag bedingte, Zunahme der relativen Feuchte und Abkühlung war nicht das Ende des Westföhns, weil die Windgeschwindigkeit gleichzeitig nicht abnahm. Es könnte in diesem Fall von einem Dimmerwestföhn gesprochen werden, weil die Westföhnströmung Niederschlag brachte.

Die Strömung in erhöhten Lagen kam während der Westföhn-Periode aus Südwesten. Abbildung 15 zeigt die sehr starken mittleren Winde am Napf (07:20 UTC: 17.1 m s⁻¹ und 08 UTC: 19.8 m s⁻¹) und am Pilatus (07:20 UTC: 15.0 m s⁻¹, 08 UTC: 17.2 m s⁻¹, 08:40 UTC: 18.6 m s⁻¹ und 09:00 UTC: 23.4 m s⁻¹). Gut zu erkennen ist, wie der Westföhn zuerst in Luzern wehte und mit der Zeit ein immer grösseres Gebiet erfasste. Dabei nahm die potentielle Temperatur von Luzern aus Richtung Norden und Nordwesten leicht ab und die relative Feuchte zu. Die Zeitreihe der Messungen an weiteren Stationen um den Vierwaldstättersee wird in Abbildung A.1 gezeigt. Die Stationen Giswil und Wädenswil zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf wie die Stationen Luzern, Emmen und Cham. Der Durchbruch des Westföhns erfolgte an der Station Giswil aber bereits um 04:30 UTC und somit gut zwei Stunden früher als in Luzern. An der Station Wädenswil drückte der Westföhn um 08:50 UTC als letztes durch. Das Ende des

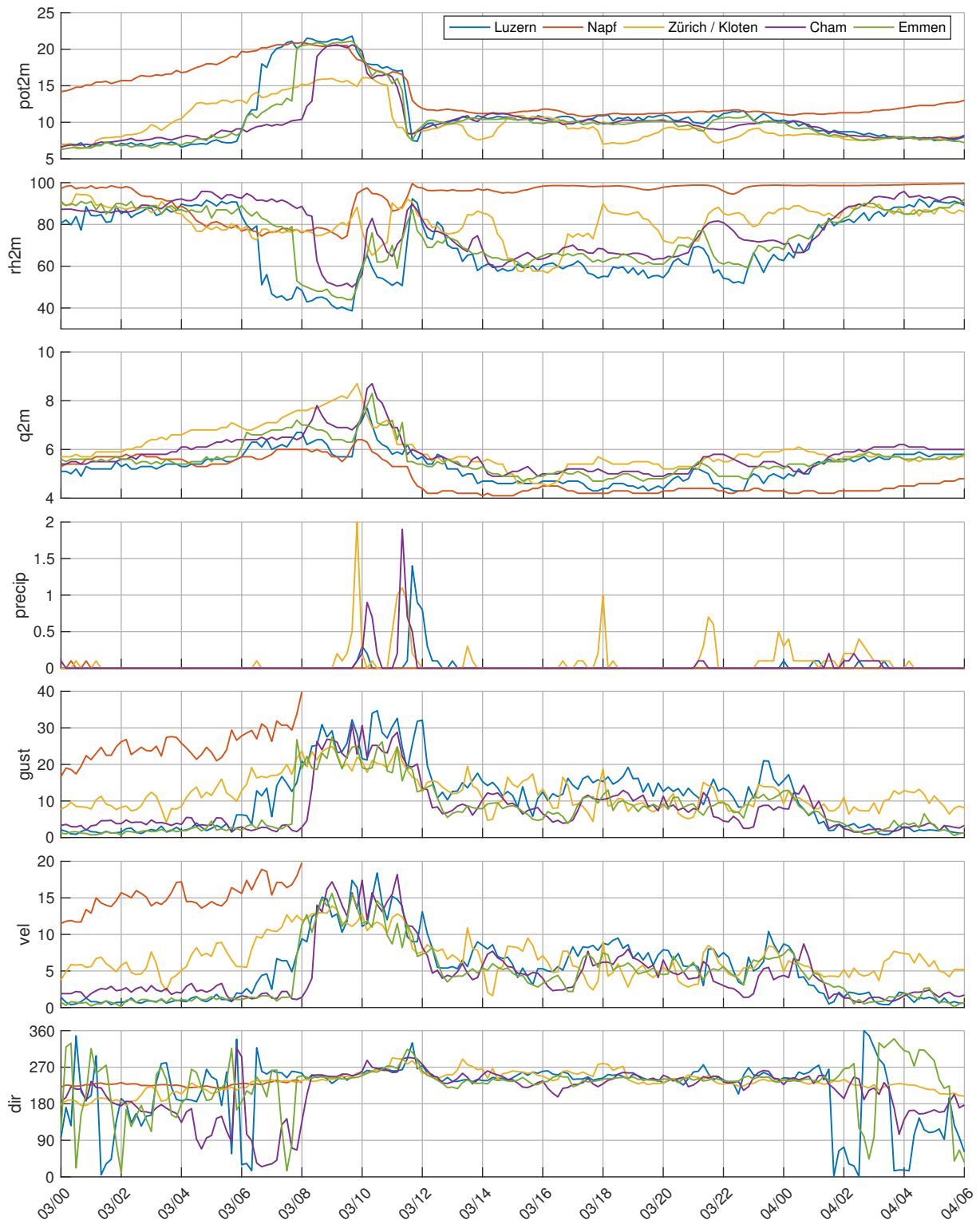


Abbildung 14: 10-Minuten Messwerte an den SwissMetNet-Stationen Luzern, Napf, Zürich-Kloten und Cham und der Messstation Emmen vom 03.01.2018 00 UTC bis 04.01.2018 06 UTC. pot2m: potentielle Temperatur 2 m über Boden ($^{\circ}\text{C}$); rh2m: relative Feuchte 2 m über Boden (%); q2m: absolute Luftfeuchte 2 m über Boden (g m^{-3}); precip: 10-Minuten Summe des Niederschlags (mm); gust: Maximum der Böenspitzen (1-Sekunden Messwerte) über 10 Minuten (m s^{-1}); vel: Skalar der Windgeschwindigkeit, 10-Minuten Mittel (m s^{-1}); dir: Windrichtung, 10-Minuten Mittel ($^{\circ}$).

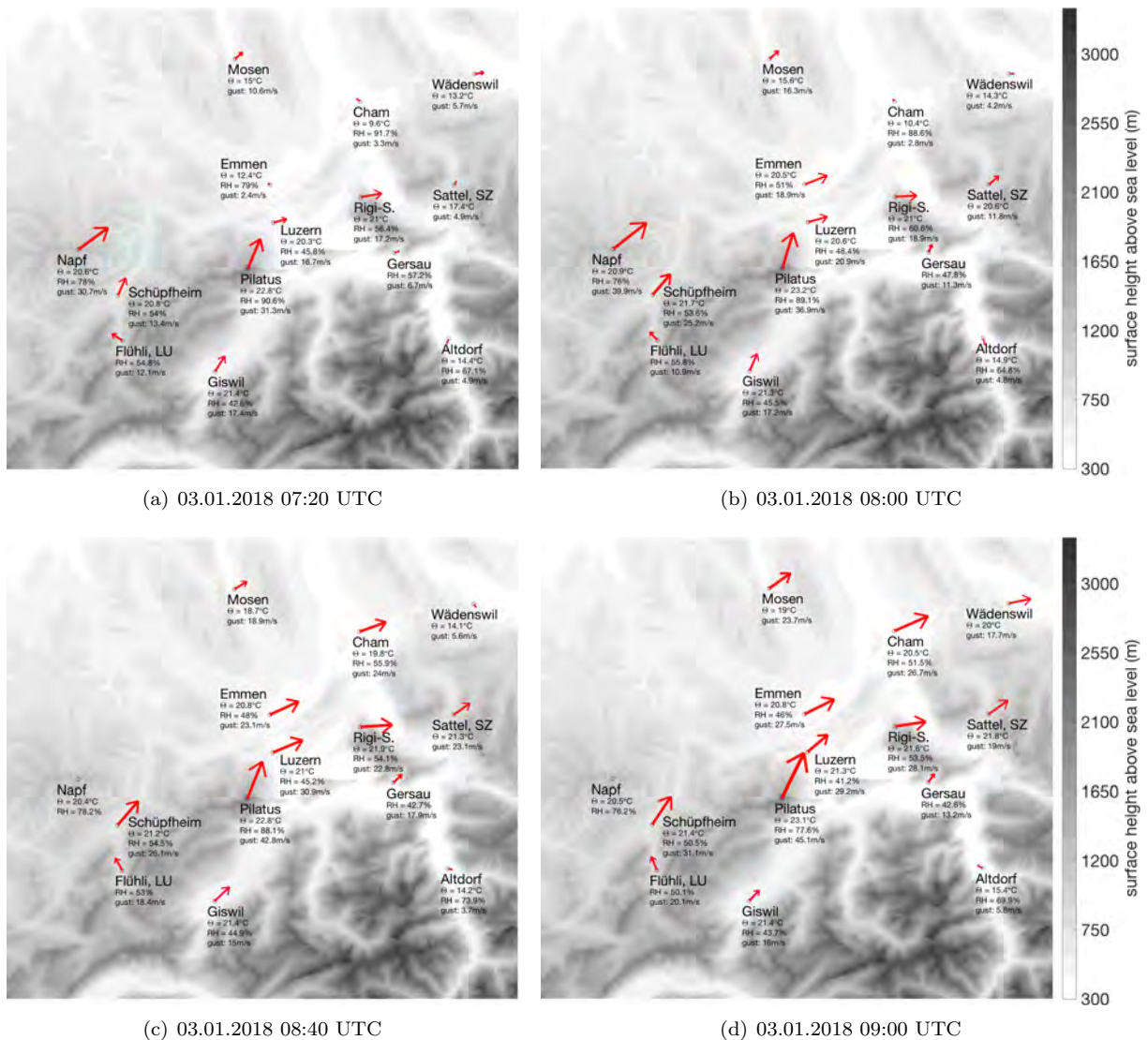


Abbildung 15: Messwerte der potentiellen Temperatur (θ), relativen Feuchte (RH) und Windböen (gust) sowie Wind (rote Pfeile) an den Messstationen um den Vierwaldstättersee am 03.01.2018. Die roten Pfeile sind nach der Windgeschwindigkeit skaliert und zeigen die Windrichtung an.

Westföhns war an diesen beiden Stationen ebenfalls verschoben. In Wädenswil traf die Kaltfront eine knappe Stunde früher ein als in Giswil.

Die Zeitreihe der verschiedenen Messgrößen an den Stationen Schüpheim und Rigi, Seebodenalp zeigten einen deutlich anderen Verlauf. Durch die erhöhte Lage der beiden Stationen (siehe auch Tabelle 1) entsprach der Verlauf der Messgrößen an diesen Stationen mehr derjenigen am Napf. Im Verlauf der Nacht und des Morgens des 03.01.2018 nahm die potentielle Temperatur kontinuierlich zu und die Luft trocknete langsam ab. Über dieselbe Zeitperiode nahm die Windgeschwindigkeit stark zu.

An der Station Gersau trocknete die Luft zwischen 04 UTC und 08 UTC um 50 % ab. Zwischen 04 UTC und 10 UTC nahm die Windgeschwindigkeit von 1.7 m s^{-1} auf 8.3 m s^{-1} zu. Die Windrichtung war in Gersau erst nach 07:50 UTC mehr oder weniger konstant, änderte aber auch danach noch deutlich stärker als an den anderen, durch den Westföhn beeinflussten, Stationen. Der Wind und die relative Feuchte deuten auf einen Westföhn zwischen 07:50 UTC und 11:40 UTC hin. Weil die Messung der Temperatur fehlte, kann keine abschliessende Aussage über den Westföhn an der Station Gersau gemacht werden.

Tabelle 2: Westföhnperioden während dem Sturmtief Burglind am 03.01.2018 an den verschiedenen Messstation um den Vierwaldstättersee. Der Rückseiten-Typ des Westföhns hielt sich an den meisten Stationen bis in die Nacht des 04.01.2018.

Messstation	Zeitperiode	
	Warmsektor-Typ	Rückseiten-Typ
Luzern	06:40 - 11:20	13:30 - 00:30
Emmen	07:50 - 11:20	13:30 - 00:20
Cham	08:30 - 11:10	14:10 - 00:40
Giswil	04:30 - 11:50	13:20 - 00:10
Wädenswil	08:50 - 11:10	13:40 - 01:20
Gersau	07:50 - 11:40	13:40 - 20:40

Rückseiten-Westföhn Im Laufe des Nachmittags drückte nochmals eine Strömung durch, die Eigenschaften des Westföhns aufwies. Die Strömung zeigte vergleichsweise nur ein schwaches Signal und war immer wieder durch Unterbrüche geprägt. Abhängig davon, wie die Grenzwerte für den Westföhn definiert werden, kann man den Westwind an der Station Luzern zwischen 13:30 UTC und 00:30 UTC am 04.01.2018 als Westföhn klassifizieren. Mit Windgeschwindigkeiten von 5 - 9 ms^{-1} , einer relativen Feuchte knapp unter 60% und der Windrichtung zwischen 240° und 260° wurden die Kriterien für den Westföhn an der Messstation Luzern gemäss Müller (2017) gut erfüllt. Die potentielle Temperatur von Luzern lag zeitweise aber mehr als 1°C unter derjenigen des Napfs. Auch lag die potentielle Temperatur an der Messstation Luzern nur zeitweise über dem Grenzwert von +2°C im Vergleich zur Station Zürich-Kloten. Die potentielle Temperatur erreichte also nach Müller (2017) nur kurzzeitig die Kriterien für den Westföhn. Zu beachten ist dabei aber auch, dass an der Station Zürich-Kloten zwischen 14:50 und 16:30 UTC eine leichte Erwärmung und Abtrocknung der Luft stattfand. Ausserhalb dieser Periode war der Unterschied der potentiellen Temperatur zwischen den Stationen Luzern und Zürich-Kloten deutlich zu erkennen und überstieg den Grenzwert von +2°C. Auch die Stationen Emmen und Cham zeigten ab 13:30 UTC erhöhte Windgeschwindigkeit bei ziemlich konstanter Windrichtung und eine leichte Erwärmung und Abtrocknung der Luft. Wie schon zwischen 09 UTC und 11 UTC waren die Signale an den Stationen Emmen und Cham aber nicht so deutlich wie an der SwissMetNet-Station Luzern.

Sieht man sich das Ende der Westwind-Periode zwischen 13:30 UTC und 00:30 UTC am 04.01.2018 an, ist ein deutlicher Rückgang in der Windgeschwindigkeit an den Stationen Luzern und Emmen am 04.01.2018 zwischen 00:20 UTC und 00:30 UTC und 20 Minuten später auch an der Station Cham zu erkennen. Dieser Rückgang fiel mit der Anfeuchtung der Luft, einem leichten Rückgang der potentiellen Temperatur im Vergleich zum Napf sowie der Änderung der Windrichtung zusammen. Zusammenfassend kann also an der Messstation Luzern von einem weniger ausgeprägten Westföhn-Ereignis zwischen 13:30 UTC am 03.01.2018 und 00:30 UTC am 04.01.2018 gesprochen werden. Die Westföhndauer an den verschiedenen Stationen in der Region des Vierwaldstättersees ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

4.1.2 Synoptische Lage

Am 03.01.2018 um 06 UTC lag ein Rücken über dem Atlantik, ein Trog über Osteuropa und ein starkes Höhentief über der Nordsee (siehe Abbildung 16a). Durch das Azorenhoch und die Lage des Tiefs kam die Höhenströmung über den Alpen aus Nordwesten. Der Jetstream lag am 03.01.2018 um 12 UTC aus westnordwestlicher Richtung genau über der Schweiz und hatte Zonen mit Windgeschwindigkeit von über 250 km h^{-1} (MeteoSchweiz, 2018).

Das Sturmtief Burglind lag am 03.01.2018 um 00 UTC mit seinem Zentrum über Grossbritannien, die Kaltfront befand sich entlang des Ärmelkanals bis weit hinaus über den Atlantik und die Warmfront erstreckte sich von den Niederlanden über Frankreich bis zum Mittelmeer (nicht gezeigt). Das Sturmtief bewegte sich mit der Zeit nach Osten und lag um 06 UTC mit der Warm- und Kaltfront über Westeuropa (siehe Abbildung 16b). Um 18 UTC erreichte das Sturmtief Dänemark.

Vor dem Alpenbogen auf 850 hPa wehte während der ganzen Sturmperiode ein sehr starker Südwest- bis Westwind. Mit dem Durchgang der Kaltfront kurz nach 11 UTC drehte der Wind und kam mehr aus Nordwesten. Diese Strömungsrichtung hielt aber nicht lange an und um 18 UTC wehte der Wind auf 850 hPa wieder aus Westen (nicht gezeigt).

Es fand ein deutlicher Unterbruch zwischen der Westföhn-Periode am Morgen und derjenigen am

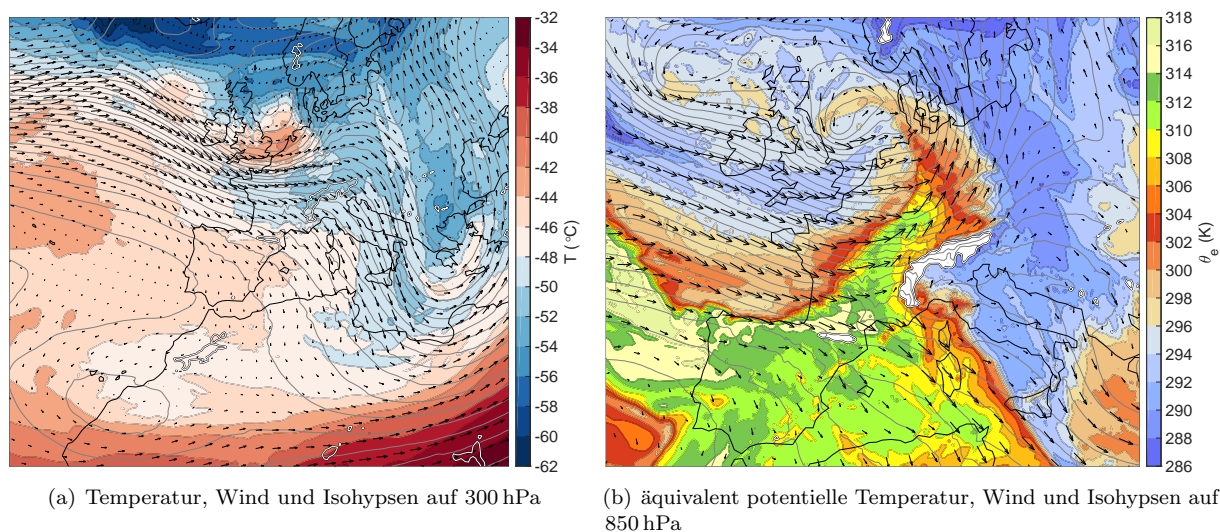


Abbildung 16: synoptische Lage über Europa am 03.01.2018 um 06 UTC

Nachmittag statt und die beiden Perioden wiesen unterschiedliche Eigenschaften auf. Daher macht es Sinn, von zwei verschiedenen Westföhn-Ereignissen zu sprechen und sie entsprechend zu klassifizieren. Der Westföhn zwischen 06:40 UTC und 11:20 UTC setzte deutlich nach dem Durchzug der Warmfront ein und endete mit dem Durchzug der Kaltfront. Die Region um Luzern befand sich während dem Westföhn also im Warmsektor des Sturmtiefs. Dieses Westföhn-Ereignis kann daher eindeutig als Warmsektor-Typ klassifiziert werden. Der weniger ausgeprägte Westföhn, der ab 13:30 UTC wehte, kann als Rückseiten-Typ eingeteilt werden.

4.1.3 Westföhn im COSMO-1 Modell

Die folgende Diskussion über den Westföhn während dem Sturmtief *Burglind* bezieht sich auf die 30h-Vorhersage durch das COSMO-1 Modell. Wird es in den folgenden Abschnitten nicht explizit angegeben, wird von den Modelldaten gesprochen.

Das COSMO-1 Modell simuliert einen sehr starken Westföhn am 03.01.2018. Wie in der Realität greift der Westföhn zuerst in Luzern, dann in Emmen und etwas später auch in Cham durch. Abbildung 17 zeigt, wie im Modell die Temperatur am Ort der SwissMetNet-Station Luzern zwischen 03:30 UTC und 03:50 UTC sprunghaft um mehr als 6°C zunimmt, während die relative Feuchte um etwa 20% zurückgeht. Der Beginn des Westföhns ist im Modell an den Stationen Emmen und Cham weniger markant als an der Station Luzern.

Die potentielle Temperatur am Ort der Messstation Luzern liegt ab 03:50 UTC über mehr als fünf Stunden mindestens auf dem Niveau der potentiellen Temperatur am Napf. Während der ganzen Westföhnperiode modelliert das COSMO-1 in Luzern Temperaturen, die rund 5°C höher liegen, als die Temperaturen am Ort der Station Zürich-Kloten. Interessant ist, wie das Modell zwischen 07:40 UTC und 07:50 UTC in Emmen und zwischen 08:10 UTC und 08:30 UTC in Cham erneut eine deutliche Erwärmung und Abtrocknung der Luft simuliert. Diese Effekte sind am Ort der Messstation Luzern nicht zu sehen.

Ein erster Unterbruch des Westföhns findet man im COSMO-1 Modell um 11 UTC. Zuerst nimmt in Cham die Temperatur ab und relative Feuchte zu, 20 Minuten bzw. 30 Minuten später dann auch am Ort der Stationen Emmen bzw. Luzern. Dies kann durch den Niederschlag an den Messstationen erklärt werden. Während des Unterbruchs des Westföhns kommt der Wind mehr aus Norden. Zwischen 12 UTC und 13:30 UTC vermag der Westföhn nochmals durchzudrücken, ist aber deutlich weniger stark als während der ersten Periode.

Ansätze des Rückseiten-Westföhns vom 03.01.2018 sind auch im COSMO-1 Modell zu erkennen. Dort weht am Nachmittag bis in die Nacht hinein ein sehr konstanter Wind aus Westen. Während dieser Zeitperiode ist die Windgeschwindigkeit am Ort der Messstation Luzern mit etwa 7 m s^{-1} immer noch hoch. In diesem Fall im COSMO-1 Modell von einem Westföhn zu sprechen wäre jedoch nicht korrekt,

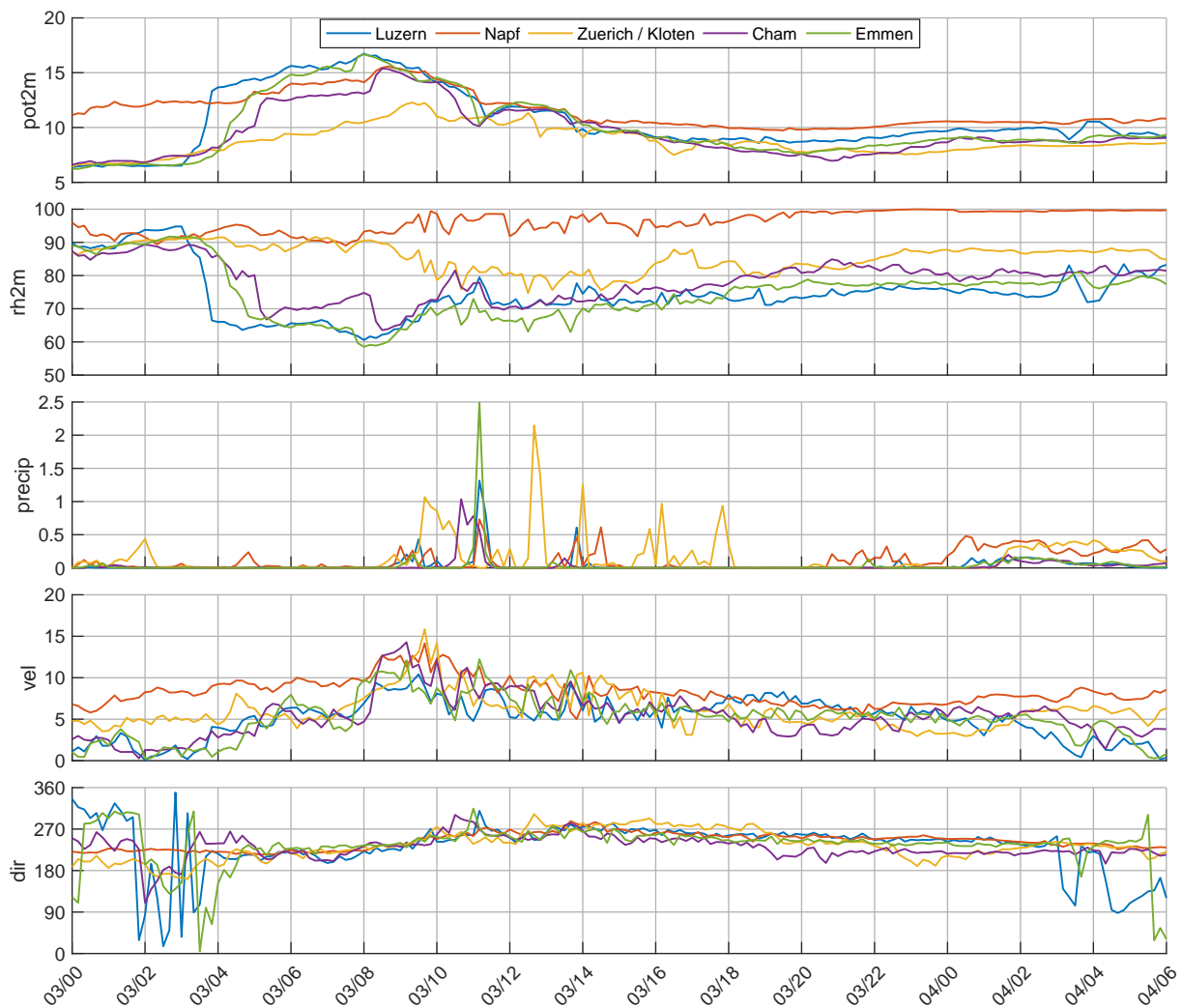


Abbildung 17: Durch das COSMO-1 Modell simulierte Werte am Ort der Messstationen Luzern, Napf, Zürich-Kloten, Cham und Emmen vom 03.01.2018 00 UTC bis 04.01.2018 06 UTC. pot2m: potentielle Temperatur 2 m über Boden ($^{\circ}\text{C}$); rh2m: relative Feuchte 2 m über Boden (%); precip: 10-Minuten Summe des Niederschlags (mm); vel: Skalar der Windgeschwindigkeit, 10-Minuten Mittel (m s^{-1}); dir: Windrichtung, 10-Minuten Mittel ($^{\circ}$)

weil die relative Feuchte mit 75 % sehr hoch ist. Auch die potentielle Temperatur an der Messstation Luzern wird 1 - 2 $^{\circ}\text{C}$ tiefer als am Napf und bis 19 UTC nicht höher als an der Station Zürich-Kloten simuliert. Am Ort der Stationen Emmen und Cham zeigt das Modell für die Zeitperiode nach 14 UTC am 03.01.2018 noch weniger die Eigenschaften eines Westföhns. Weil die Periode am Nachmittag zu wenig die Eigenschaften eines Westföhns zeigt, wird sich die Fallstudie im Folgenden hauptsächlich auf das vom COSMO-1 Modell simulierte Westföhn-Ereignis zwischen 03:50 UTC und 11 UTC beziehen.

4.1.4 Horizontale Struktur

Windfeld Abbildung 18 zeigt das Windfeld am 03.01.2018 um 08:10 UTC in der Region um den Vierwaldstättersee einerseits 100 Meter über der Topografie (Abbildung 18a) und andererseits 1000 Meter über Meer (Abbildung 18b). Mit Pfeilen ist die Lage der verschiedenen stärkeren Strömungen in der unteren Atmosphäre um Luzern eingezeichnet. Diese Strömungen treten über eine längere Zeitdauer während dem Westföhn auf. Im Folgenden werden die Strömung so genannt, wie sie in Abbildung 18 beschriftet sind. Die Strömung von der Südflanke des Pilatus nach Nordosten heisst Strömung A, diejenige stromaufwärts von Luzern aus zum Zugersee wird Strömung B genannt und eine parallele Strömung dazu

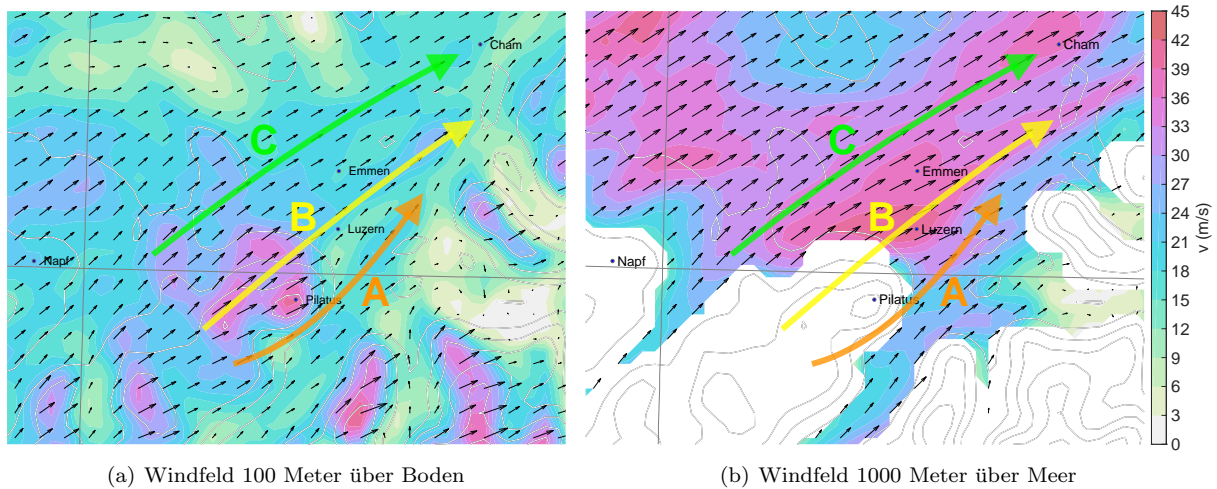


Abbildung 18: Skalar der Windgeschwindigkeit (Farbe), Windvektoren und Höhenlinien am 03.01.2018 um 08:10 UTC. Eingezeichnet ist die Lage der verschiedenen stärkeren Strömungen in der Region von Luzern.

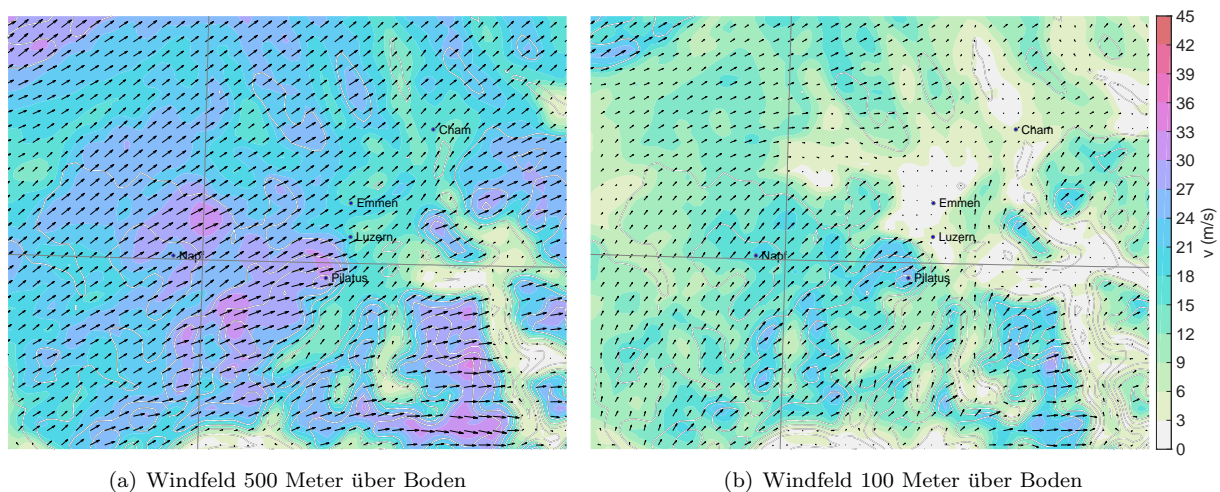


Abbildung 19: Skalar der Windgeschwindigkeit (Farbe), Windvektoren und Höhenlinien am 03.01.2018 um 03 UTC.

weiter im Norden wird Strömung C genannt.

Die Strömung A tritt vor allem in den bodennahen Schichten auf. Der Wind darüber kommt etwas stärker aus Westen und zeigt sich nicht als gebündelte Strömung. Die Strömung B hat eine Länge von 15 - 20 km und eine Breite von rund 2 km. Im Windfeld auf konstanter Höhe über der Topografie ist die Strömung B häufig die stärkste Strömung. Die Messstation Luzern liegt nicht im Zentrum der Strömung B sondern am südöstlichen Rand, die Station Emmen liegt nördlich der Strömung. Die Strömungen A und C haben eine ähnliche Ausdehnung wie die Strömung B.

Zu beachten ist, dass die Stärke und Eigenschaften dieser Strömungen auch durch die Darstellungsweise beeinflusst werden. Weil eine Hügelkette von Luzern zum Zugersee existiert (siehe auch Abbildung 7) und die Windfelder auf konstanter Höhe über Boden dargestellt sind, werden über der Hügelkette Winde in höheren Lagen der Atmosphäre gezeigt. Dadurch sind diese Winde auch stärker. Sowohl das Windfeld 100 Meter über Boden wie auch das Windfeld 1000 Meter über Meer zeigen ein Gebiet erhöhter Windgeschwindigkeit nördlich und nordwestlich von Luzern. Dieses Gebiet ist also nicht nur ein Artefakt der Darstellungsweise sondern existiert auch wirklich in dieser Form.

Das Windfeld 500 Meter über Boden zeigt schon um 03 UTC erhöhte Windgeschwindigkeiten an den Hängen stromaufwärts von Luzern (siehe Abbildung 19a). Diese Winde verlieren jedoch schnell an Stärke,

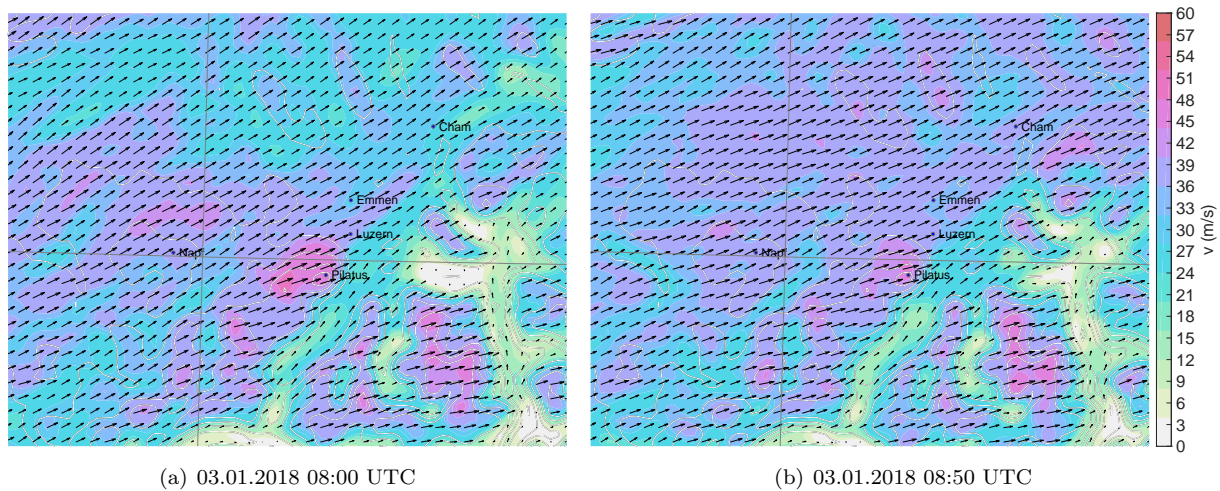


Abbildung 20: Skalar der Windgeschwindigkeit (Farbe) und Windvektoren 500 Meter über Boden sowie Höhenlinien in der Region um den Vierwaldstättersee am 03.01.2018 um 08:00 UTC und 08:50 UTC

währenddem sie nach Luzern vorstossen. Zu erkennen ist ein Ansatz der Strömung B als Zunge erhöhter Windgeschwindigkeit nördlich von Luzern aus Richtung Zugersee sowie die Strömung A. Diese Strukturen sind zu diesem Zeitpunkt nur auf 500 Meter über Boden zu erkennen. In tieferen Lagen wehen um 03 UTC nur sehr schwache Winde (siehe Abbildung 19b).

Strömung B nimmt auf 500 Meter über Boden im Laufe des Morgens an Stärke zu. Im Vergleich zur Strömung um 03 UTC verschiebt sie sich dann leicht nach Süden, so dass sie nördlich des Pilatus beginnt und über Luzern zum Zugersee reicht (siehe Abbildung 20a). Um 03 UTC herrschen in der Strömung B Windgeschwindigkeiten von 20 m s^{-1} , um 06 UTC Windgeschwindigkeiten von etwa 30 m s^{-1} und um 08 UTC erreicht der Wind Geschwindigkeiten von bis zu 40 m s^{-1} . Ab 08:50 UTC ist die Struktur der Strömung B 500 Meter über Boden nicht mehr so klar zu erkennen (siehe Abbildung 20b).

In den tieferen Lagen bildet sich erst im Laufe des Morgens die Strömung B aus. Während um 03 UTC in der Region von Luzern im Modell in Bodennähe noch praktisch Windstille herrscht, findet man an den Hängen stromaufwärts von Luzern schon hohe Windgeschwindigkeiten (siehe Abbildung 19b). Um 03:30 UTC ist der Beginn der Strömung A als kurze Zunge erhöhter Windgeschwindigkeit auf 10, 100 und 200 Meter über Boden südlich von Luzern zu erkennen (siehe Abbildung A.2). Zur selben Zeit sind die Windgeschwindigkeiten an den Hängen im Südwesten von Luzern hoch, die starken Winde reichen 100 und 200 Meter über Boden aber nur bis nach Luzern und verlieren dort schnell an Stärke. Das Windfeld 10 Meter über Boden zeigt um 03:30 UTC noch keinen Westföhn am Ort der Station Luzern.

Der Westföhn stösst zwischen 03:30 UTC und 05 UTC zuerst nach Luzern und danach weiter nach Nordosten vor. Um 04:50 UTC sind Ansätze der Strömungen B und C als Zungen erhöhter Windgeschwindigkeit nördlich von Luzern auch in den Windfeldern in den tieferen Lagen zu erkennen (nicht gezeigt). Ab 06 UTC ist die Strömung B von Luzern bis zum Zugersee deutlich zu erkennen (nicht gezeigt). In den tieferen Schichten herrschen über die gesamte Länge der Zunge die stärksten Winde um 08 UTC. Bis um 08:30 UTC bilden sich in den Windfeldern 10 m und 100 m über Boden zwei eingebettete Maxima aus (siehe Abbildung 21). Das erste Maximum der Windgeschwindigkeit liegt im Westen von Luzern und das zweite befindet sich kurz vor dem Zugersee. Die Windgeschwindigkeiten betragen an den Hängen stromaufwärts von Luzern 100 Meter über Boden über 30 m s^{-1} und bei Luzern um 20 m s^{-1} . Im Maximum der Windgeschwindigkeit vor dem Zugersee herrschen 100 Meter über Boden um 08:30 UTC Windgeschwindigkeiten von mehr als 30 m s^{-1} . Die Strömung B tritt also nicht während der gesamten Dauer des Westföhns bis in Bodennähe auf. In einer Höhe von 500 Metern tritt sie schon relativ früh auf. Erst im Laufe der Westföhn-Periode greift die Strömung B bis zum Boden durch.

Während das Gebiet von Luzern bis zum Zugersee bis um 08:30 UTC immer stärkere Winde erfährt, erreicht die Strömung A die maximale Stärke früher. Das Gebiet wird im Laufe des Morgens grösser und ist im Windfeld 10 Meter über Boden um 07:10 UTC besonders ausgeprägt (siehe Abbildung A.3a). Um 07:40 UTC schliesst sich die Strömung A weiter stromabwärts mit der Strömung B zusammen (siehe

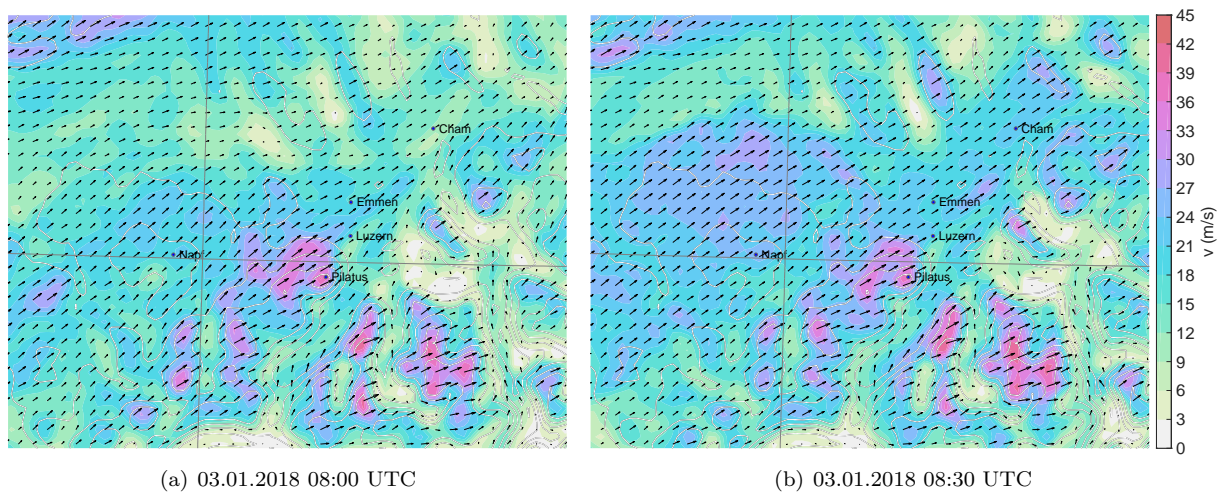


Abbildung 21: Skalar der Windgeschwindigkeit (Farbe) und Windvektoren 100 Meter über Boden sowie Höhenlinien in der Region um den Vierwaldstättersee am 03.01.2018 um 08 UTC und 08:30 UTC

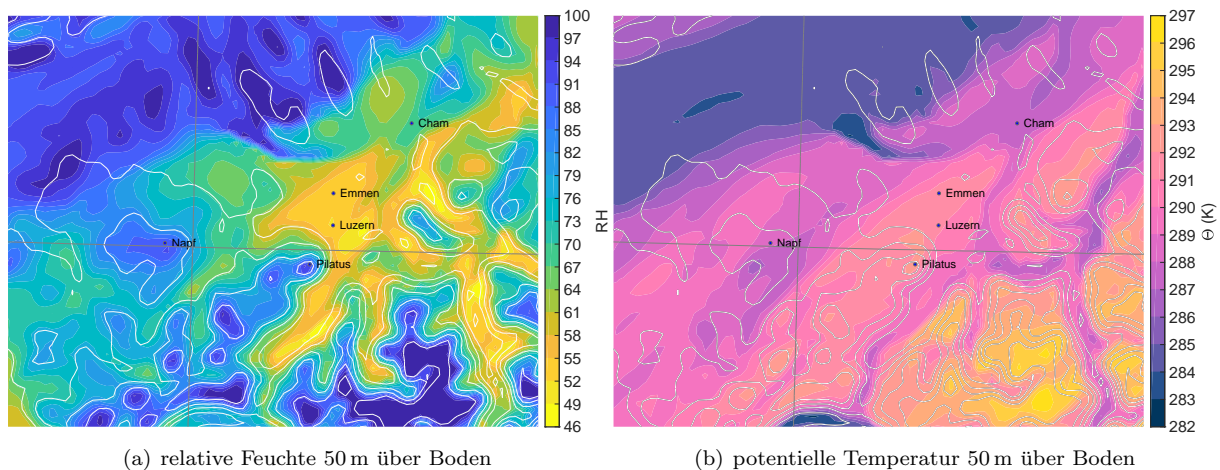


Abbildung 22: relative Feuchte und potentielle Temperatur 50 m über Boden in der Region um den Vierwaldstättersee am 03.01.2018 um 08 UTC.

Abbildung A.3b).

Während der ganzen Westföhn-Periode weht der Wind bei Luzern und in der Strömung B konstant aus Südwesten. Der Wind kommt im Modell am Ort der Messstation Luzern in Bodennähe mit einer Windrichtung von $210^\circ - 250^\circ$ sehr stark aus Süden. Dieser Wert liegt ausserhalb der Grenzwerte, die Müller (2017) definiert hat. Mit zunehmender Höhe dreht der Wind etwas nach Westen und liegt ab einer Höhe von 400 Metern im Bereich von $240^\circ - 270^\circ$ (siehe auch Abbildung A.6).

Temperatur- und Feuchtefeld Wie schon in der aus dem COSMO-1 Modell extrahierten Zeitreihe (Abbildung 17) am Ort der Messstation Luzern zu sehen war, führte der Westföhn innert kurzer Zeit zu einer starken Erwärmung. Dies ist auch in der horizontalen Verteilung der Temperatur zu sehen (siehe Abbildung 23). Die Winde an den Hängen stromaufwärts von Luzern führen einerseits durch die adiabatische Erwärmung beim Abstieg und andererseits durch die nachfolgende Warmluftadvektion Richtung Luzern zur starken Erwärmung. Zwischen 03:10 und 04:00 UTC wird eine immer grössere Region um Luzern erwärmt. Die Erwärmung beträgt innerhalb dieser Periode am Ort der Messstation Luzern gut 6°C . Das Gebiet der Erwärmung und Abtrocknung beschränkt sich um 04 UTC noch auf einen Bereich von einigen Kilometern um die Messstation Luzern. Die warme Luft breitet sich im Laufe des Morgens

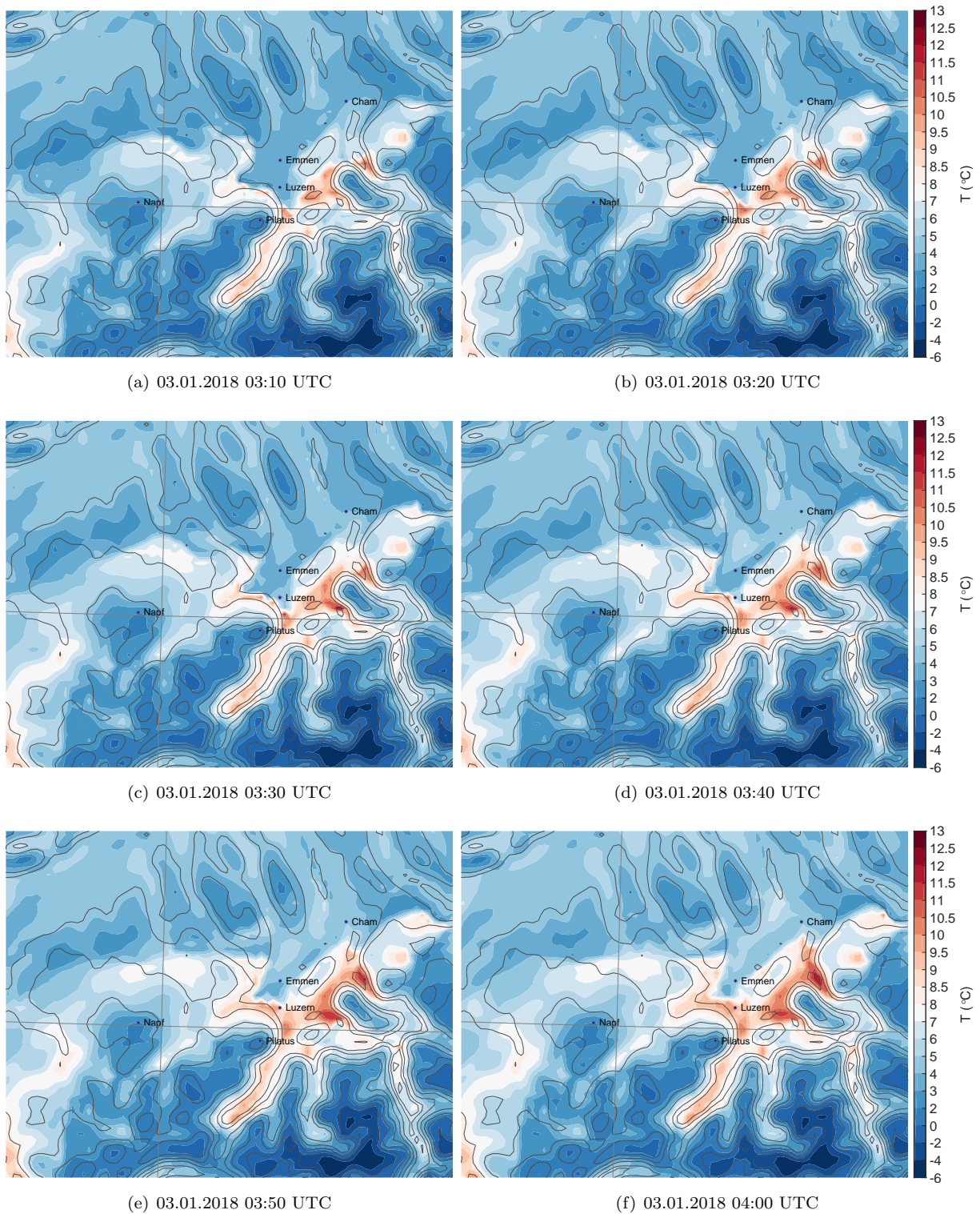
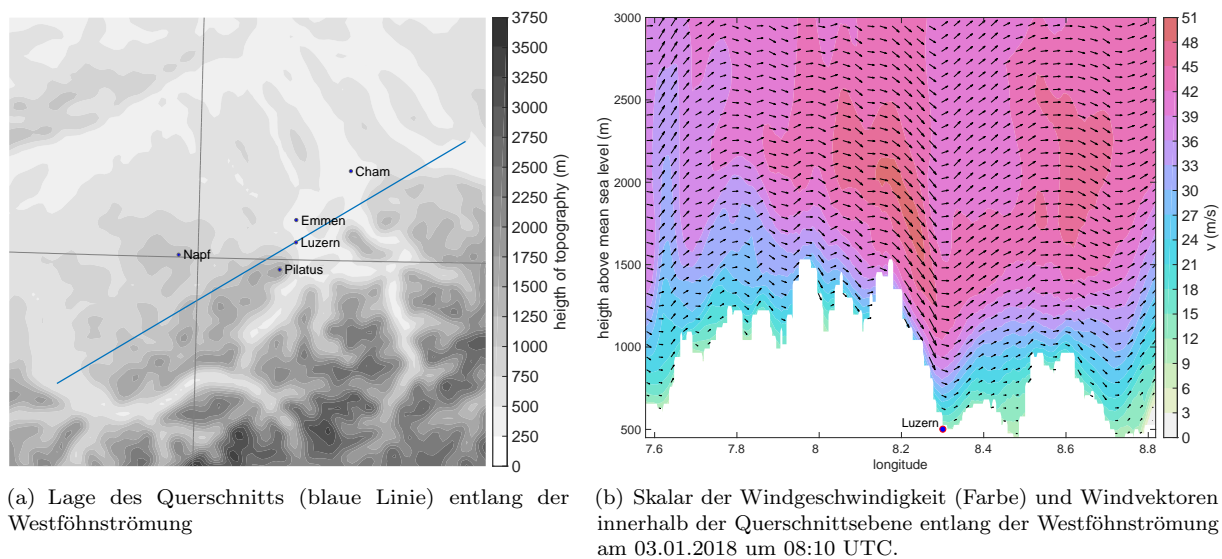


Abbildung 23: Temperatur 2 Meter über Boden am 03.01.2018 zwischen 03:10 UTC und 04:00 UTC in der Region um den Vierwaldstättersee. Ab 03:50 UTC weht der Westföhn am Ort der Messstation Luzern.



(a) Lage des Querschnitts (blaue Linie) entlang der Westföhnströmung

(b) Skalar der Windgeschwindigkeit (Farbe) und Windvektoren innerhalb der Querschnittsebene entlang der Westföhnströmung am 03.01.2018 um 08:10 UTC.

Abbildung 24: Lage des vertikalen Querschnitts und Wind im vertikalen Querschnitt entlang der Westföhnströmung am 03.01.2018 um 08:10 UTC

weiter aus und erreicht um 08 UTC die maximale Ausdehnung (nicht gezeigt). Der Westföhn zeigt sich im Gebiet zwischen Luzern und Risch-Rotkreuz (siehe auch Abbildung 5) mit Temperaturen von 10 - 13 °C. Dieses Gebiet zeigt sich nicht nur in der Temperatur sondern hat sich bereits im Windfeld (siehe z.B. Abbildung 21) gezeigt.

Das Signal des Westföhns zeigt sich auch konsistent in der relativen Feuchte und der potentiellen Temperatur (siehe Abbildung 22). Im Laufe des Morgens trocknet die Luft in einem immer grösseren Gebiet ab. Um 08 UTC zeigt die relative Feuchte 50 Meter über Boden ein relativ breites Band trockenerer Luft von Luzern aus Richtung Cham (siehe Abbildung 22a). Dieses Band trockenerer Luft hat Werte der relativen Feuchte zwischen 50 % und 60 %. Östlich von Luzern trocknet die Luft sogar noch stärker ab und erreicht eine relative Feuchte von 46 % bis 52 %. Die Station Cham liegt ausserhalb des Endes des Gebiets, die Messstation Emmen im nördlichen Teil des Gebiets. Dieses Gebiet trockenerer Luft stimmt relativ gut mit dem Gebiet erhöhter Windgeschwindigkeit auf konstanter Höhe über Meer überein (siehe Abbildung 18b).

Das Feld der potentielle Temperatur 50 m über Boden (Abbildung 22b) zeigt, wie die Luft über Luzern die gleiche potentielle Temperatur hat wie die Luft entlang der Voralpenkette von Hohgant, Schratzenfluh, Schimbrig bis Mittagjüpfli (siehe auch Abbildung 5). Deutlich zu erkennen ist auch der Gradient in der potentiellen Temperatur vom Mittelland und Jurasüdfuss aus nach Luzern. Die Differenz der potentiellen Temperatur von Luzern zum Jurasüdfuss beträgt bis zu 7 °C. Das Gebiet erhöhter potentieller Temperatur reicht bis zum Zugersee aber nicht ganz bis zur Messstation Cham. Am Ende des Gebiets nimmt die potentielle Temperatur über rund 6 km um 4 °C ab. Deutlich erkennbar ist auch, wie in die Region des Westföhns höhere potentielle Temperaturen vorherrschen, als die potentielle Temperatur am Napf.

4.1.5 Vertikale Struktur

Für das Sturmtief *Burglind* sagt das COSMO-1 Modell sehr hohe Windgeschwindigkeiten in der freien Atmosphäre von über 40 m s^{-1} vorher. Der Einfluss der Topografie durch die Abschwächung des Windes ist im Allgemeinen bis auf eine Höhe von 1000 m zu erkennen. Abbildung 24b zeigt, wie die starken Winde stromaufwärts von Luzern bis in Bodennähe durchgreifen und die Hänge herabstürzen. Dort erreichen die Windgeschwindigkeiten ihr erstes Maximum bereits etwa 500 m über der Topografie. Die sehr starken Fallwinde gelangen nicht ganz bis nach Luzern herunter, sondern werden vor Luzern deutlich abgeschwächt. Der Wind folgt stromaufwärts von Luzern der Topografie, stromabwärts steigt die Luft wieder an. Zu einigen Zeitpunkten sind die Windgeschwindigkeiten 500 m über den Hängen stromaufwärts von Luzern nochmals höher als sonst in der freien Atmosphäre entlang des Querschnitts (siehe Abbildung 24b).

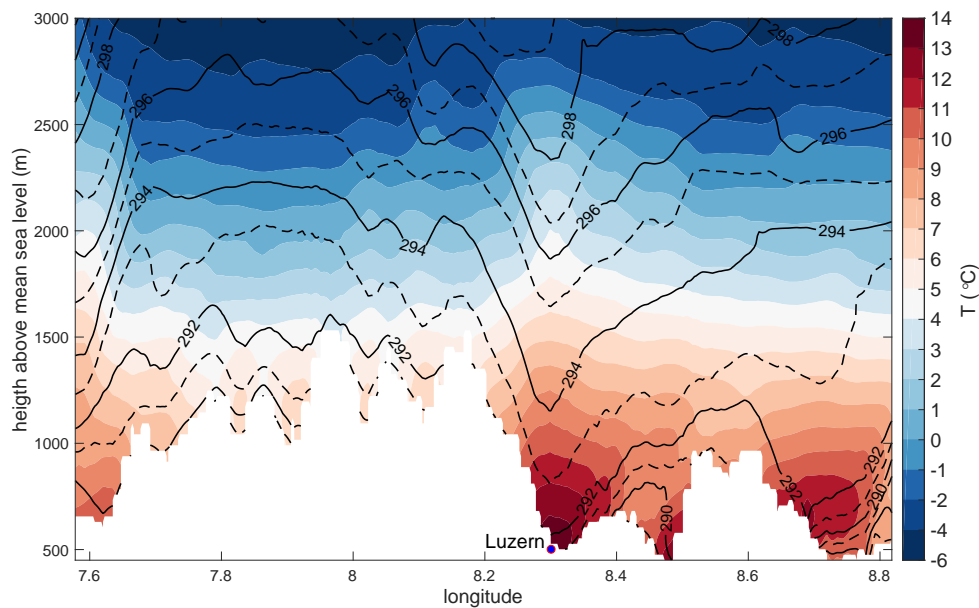


Abbildung 25: Temperatur (Farbe) und Isentropen (K) im Querschnitt entlang der Westföhnströmung am 03.01.2018 um 08 UTC. Die Lage des Querschnitts ist in Abbildung 24a gezeigt.

Abbildung 25 zeigt, wie die Temperaturen um Luzern viel höher liegen als in den weiteren Gebieten auf gleicher Höhe entlang des Querschnitts. Nicht nur in Bodennähe sondern auch in grösserer Höhe wird die Luft über Luzern durch den Westföhn stark erwärmt und ist um 2 - 3 °C höher als einige Kilometer stromaufwärts und -abwärts. Im Feld der potentiellen Temperatur ist der Einfluss des Westföhns noch deutlicher zu sehen. Abbildung 25 zeigt, wie die Isentropen stromaufwärts von Luzern sehr stark abfallen und einige Kilometer stromabwärts von Luzern wieder steil ansteigen. Auch die Isentropen in 2500 m Höhe zeigen eine starke Auslenkung. In den tieferen Schichten über Luzern fallen die Isentropen um 1000 m ab.

Besonders interessant ist die Verteilung der Feuchte entlang des vertikalen Querschnitts. Abbildung 26 zeigt, wie der Westföhn im COSMO-1 Modell um 06 UTC absolut gesehen feuchtere Luft nach Luzern bringt. Durch den Abstieg und die starke Erwärmung trocknet die Luft dennoch auf 60 % ab. Im Verlaufe des Morgens nimmt der Unterschied der absoluten Feuchte von den bodennahen Schichten zu den sehr feuchten Schichten in 1500 m bis 2000 m Höhe ab. Ab 09:30 UTC findet man absolut gesehen die feuchtesten Schichten in Bodennähe. Nach 09:30 UTC bringt der nur noch schwach wehende Westföhn nicht mehr feuchtere Luft nach unten, sondern auch absolut gesehen trockenere Luft (nicht gezeigt).

Abbildung 26 zeigt auch, wie der Westföhn auch die Luft in Höhen von 1500 m bis 3000 m abtrocknet und so die sehr feuchte Schicht (Wolkenschicht) zwischen 1500 m und 2500 m aufreisst. Man kann von einem Föhnfenster sprechen. Ab 06:30 UTC lösen sich die Wolkenschichten auf und das durch den Westföhn aufgerissene Föhnfenster ist nicht mehr so deutlich erkennbar. Ab 08:40 UTC kommt wieder sehr feuchte Luft in die Region um Luzern und die Untergrenze der Wolken sinken ab. Während dieser Periode wird die Luft in Luzern durch den Westföhn nur noch auf etwa 70 % abgetrocknet (nicht gezeigt).

Der Querschnitt senkrecht zur Westföhnströmung in Abbildung A.4 zeigt anhand der relativen Feuchte, wie der Westföhn von Süden her nach Luzern kommt. Die trockene Luft breitet sich im Verlauf des Morgens von Luzern weiter Richtung Norden aus. Um 08 UTC erkennt man die stärkste Abtrocknung etwas nördlich von und bei Luzern. Dieses Gebiet stimmt gut mit der Strömung B aus Abbildung 18 überein. Die Strömung A südlich von Luzern wird durch diesen Querschnitt ebenfalls geschnitten. Sie ist zu gewissen Zeitpunkten als Minimum der relativen Feuchte südlich von Luzern zu erkennen (siehe Abbildung A.4). Das Föhnfenster über Luzern ist im Querschnitt senkrecht zur Strömung sehr gut zu erkennen. Auf einer Höhe von 2500 m trocknet die Luft von 100 % auf bis zu 50 % ab.

Im Querschnitt senkrecht zur Strömung zeigt sich der Westföhn durch das Abfallen der Isentropen über eine Distanz von 5 - 10 km (siehe Abbildung 27a). Das stärkste Abfallen der Isentropen findet man während dem Westföhn-Ereignis oft etwas nördlich von Luzern. Im Vergleich zum Mittelland und dem Jurasüdfuss fallen die Isentropen bei Luzern um knapp 1000 m ab. Das Windfeld im Querschnitt senkrecht

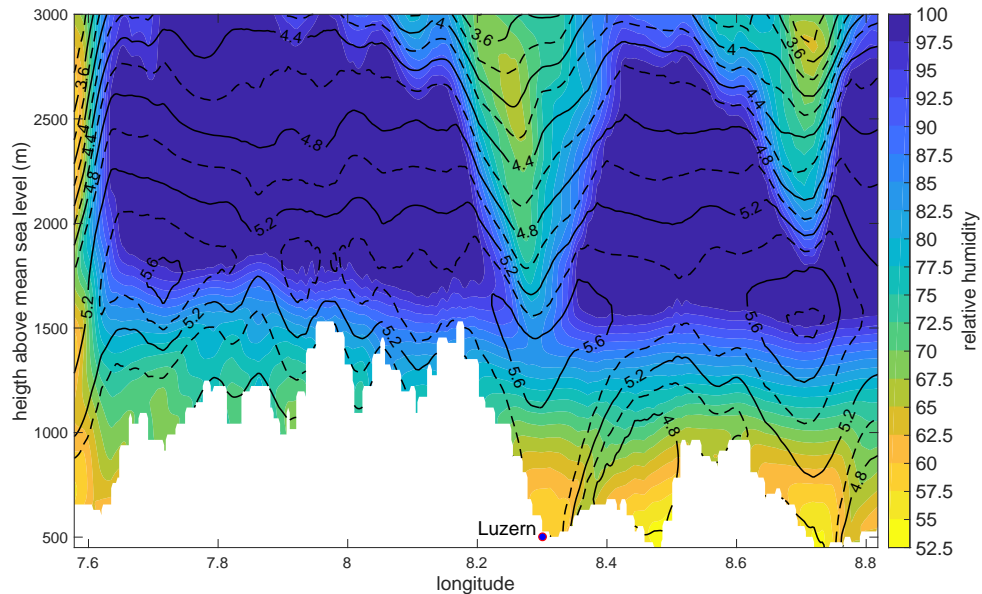
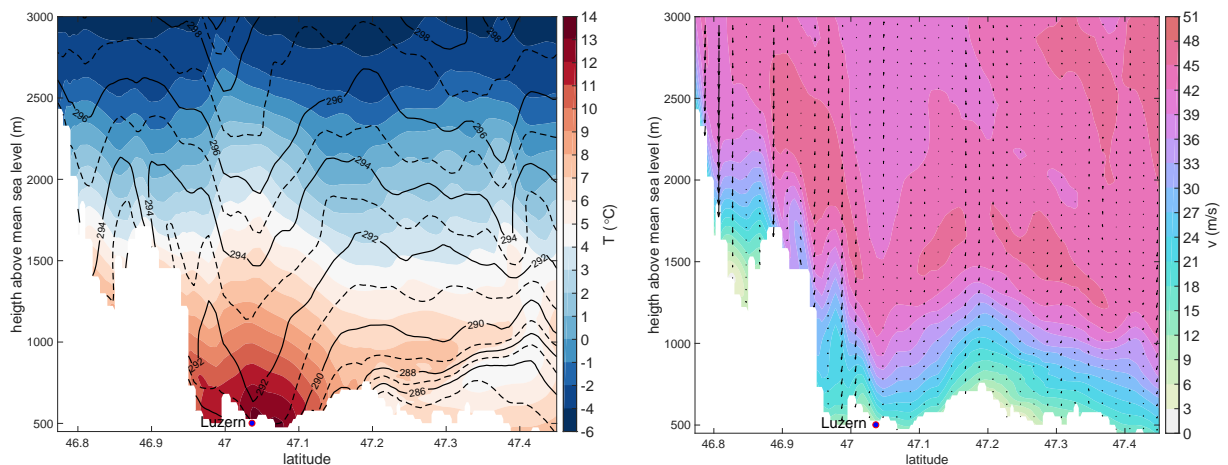


Abbildung 26: Absolute und relative Feuchte (Isolinien, g kg^{-1} bzw. Farbe) im Querschnitt entlang der Westföhnströmung am 03.01.2018 um 06 UTC. Die Lage des Querschnitts ist in Abbildung 24a gezeigt.



(a) Temperatur (Farbe) und Isentropen (K) im Querschnitt senkrecht zur Westföhnströmung am 03.01.2018 um 08:10 UTC

(b) Skalar der Windgeschwindigkeit (Farbe) und Windvektoren innerhalb der Querschnittsebene senkrecht zur Westföhnströmung am 03.01.2018 um 8:10 UTC

Abbildung 27: absolute und potentielle Temperatur sowie Wind im Querschnitt senkrecht zur Westföhnströmung am 03.01.2018 um 8:10 UTC. Die Lage des Querschnitts ist in Abbildung A.4a.

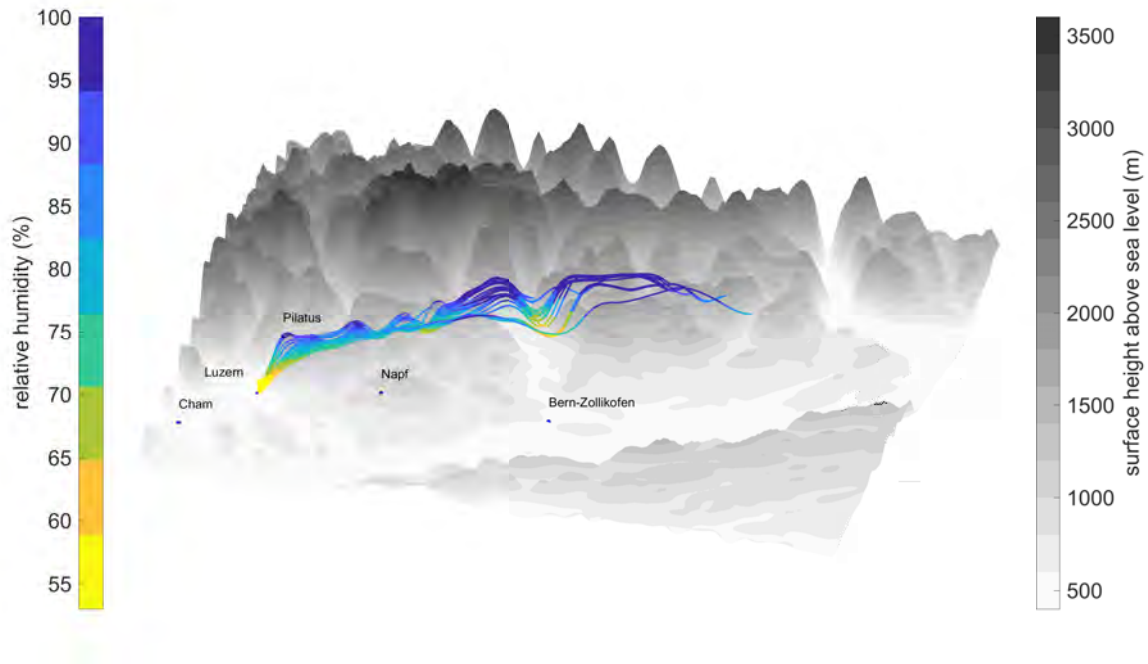


Abbildung 29: Relative Feuchte der Rückwärts-Trajektorien am 03.01.2018 um 07 UTC. Die 28 Trajektorien wurden in Luzern um 07 UTC zwischen 10 und 310 m über Boden mit einem vertikalen Abstand von 50 m und an vier Punkten mit einem horizontalen Abstand von 400 m gestartet und reichen eine Stunde in die Vergangenheit. Blick aus Nordosten auf die Innerschweizer und Berner Voralpen und Alpen.

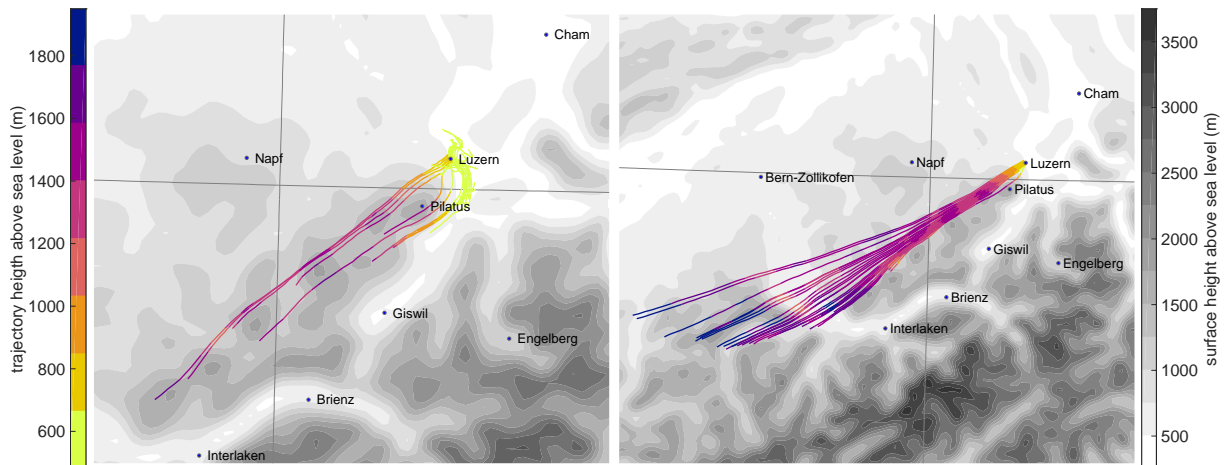
zeigt auch, wie in der Nacht in Höhen von 1000 - 1500 m über Luzern eine sehr feuchte Schicht vorherrscht. Diese wird ab 03:50 UTC durch den Westföhn deutlich abgetrocknet. Die Abtrocknung ist in diese Höhe viel weniger konstant und bis auf die kurze Periode zwischen 08 UTC und 09 UTC nicht so deutlich wie in Bodennähe. In Höhen ab 800 m über Boden ist die Abnahme der relativen Feuchte auf die Abnahme der absoluten Feuchte zurückzuführen.

Auch im zeitlichen Verlauf des Windes über der Messstation Luzern (siehe Abbildung A.6) ist zu sehen, wie schon vor dem Beginn des Westföhns starke Winde über Luzern wehen. Zuerst greifen die starken Winde zwischen 01:20 UTC und 03:50 UTC in immer tieferen Lagen durch. Zwischen 07:30 UTC und 08:10 UTC nehmen die Winde in Bodennähe nochmals deutlich an Stärke zu und erreichen dann in der untersten Modellschicht Geschwindigkeiten von 10 m s^{-1} . Nach 10 UTC lassen die Winde in Bodennähe und in der freien Atmosphäre etwas nach, sind aber auf 10 m über Boden mit $4 - 8 \text{ m s}^{-1}$ immer noch stark.

4.1.7 Trajektorien

Rückwärts-Trajektorien, die am 03.01.2018 um 07 UTC ab dem Ort der Messstation Luzern gestartet wurden, sind in Abbildung 29 gezeigt. Die Trajektorien folgen wellenförmig der Topografie entlang der Voralpen und stürzen an der Nordflanke des Pilatus nach Luzern herunter. Bevor die Luft entlang der Nordflanken von Hohgant, Schratzenfluh, Schimbrig und Mittagsgüpfli (siehe auch Abbildung 5) strömt, fließt sie über den Thunersee. Gut zu erkennen ist auch, wie die Luft aus deutlich grösserer Höhe kommt als die Station Luzern und beim Abstieg abgetrocknet wird.

Bereits um 03 UTC können aus dem COSMO-Modell Trajektorien gerechnet werden, die bei Luzern föhnartig herabstürzen (siehe Abbildung 30a). Dabei zeigen aber nur diejenigen Trajektorien eine Westföhnströmung an, welche auf einer Höhe von 260 und 310 m über Boden gestartet wurden. Die Luft in Bodennähe kommt zu diesem Zeitpunkt nicht die Hänge südwestlich von Luzern herab, sondern bewegt sich nur wenig in der Region um Luzern. Während also in Bodennähe erst sehr schwache Winde wehen, weht der Westföhn ab einer Höhe von 250 m über Boden. Zu diesem Zeitpunkt sind in den Trajektorien



(a) Höhe der Rückwärts-Trajektorien gestartet um 03 UTC (b) Höhe der Rückwärts-Trajektorien gestartet um 04 UTC

Abbildung 30: Rückwärts-Trajektorien am 03.01.2018 um 03 UTC und 04 UTC. Die 28 Trajektorien wurden in Luzern zwischen 10 und 310 m über Boden mit einem vertikalen Abstand von 50 m und an vier Punkten mit einem horizontalen Abstand von 400 m gestartet und reichen eine Stunde in die Vergangenheit.

bereits zwei Strömungen zu erkennen, die im Abschnitt 4.1.4 vorgestellt wurden. Einige Trajektorien kommen entlang der Gipfel der Voralpenkette nach Luzern und bewegen sich entlang der Strömung B (siehe auch Abbildung 18). Vereinzelt Trajektorien strömen südlich der Voralpenkette entlang und bewegen sich wie die Strömung A entlang der Süd- und Ostflanke des Pilatus nach Luzern. Um 04 UTC kommen alle Trajektorien aus Südwesten und der Westföhn hat sich deutlich in Luzern durchgesetzt (siehe Abbildung 30b). Die Luft kommt zu diesem Zeitpunkt aus Höhen von 1500 - 2000 m über Meer. Im Vergleich zu den Rückwärts-Trajektorien, die ab dem Ort der Messstation Luzern gestartet wurden, kommen die Rückwärts-Trajektorien ab Cham aus geringerer Höhe. Abbildung 32b zeigt, wie die Luft über den Napf strömt und hinter dem Napf absinkt. Die Luft in Cham kommt aus einer Höhe von 800 - 1300 m.

Abbildung 31 zeigt, wie die Luft aus der Region des Thunersees nach Nordosten strömt und zwischen dem Napf und Luzern die Hänge der Voralpen herunterstürzt. Einzelne Trajektorien, die um 05 UTC gestartet wurden, erreichen in der Region von Emmen die bodennahen Schichten, viele der Trajektorien bleiben einige hundert Meter über der Topografie (Abbildung 31a). Fast alle Trajektorien folgen zu diesem Zeitpunkt bis nach Emmen der Topografie und steigen etwas vor Cham wieder deutlich an. Die Strömung B ist besonders stark vertreten unter diesen Trajektorien. Es gibt aber auch Trajektorien, welche der Strömung A oder C folgen. Die Trajektorien, welche um 06 UTC gestartet wurden (Abbildung 31b), zeigen noch deutlicher eine kohärente Strömung (Strömung C), die entlang der Voralpen der Topografie folgt und bis nach Cham in Bodennähe bleibt. Dort steigen die Trajektorien wieder deutlich an und erreichen anschliessend Höhen um 1000 m über Boden. Auffallend ist bei den Trajektorien in Abbildung 31b, wie einzelne Trajektorien an der Süd- und Ostflanke des Pilatus entlang strömen und dann relativ stark nach Norden drehen und unter einigen anderen Trajektorien durchfliessen. Diese Trajektorien sind bei Luzern sehr nahe am Boden und steigen im Folgenden kaum an.

Abbildung A.7 zeigt drei ausgewählte Rückwärts-Trajektorien, die am 03.01.2018 um 07 UTC ab dem Ort der Messstation Luzern auf Höhen von 50, 100 und 250 m gestartet wurden. An der Nordflanke des Pilatus stürzen alle drei Trajektorien um etwa 1000 m ab. Davor bewegen sie sich wellenförmig entlang der Topografie und bewegen sich in Höhen von 1300 - 2300 m. Tabelle 4 zeigt verschiedene meteorologische Grössen entlang der Trajektorie, die auf einer Höhe von 100 m über Luzern gestartet wurde. Die Luft wird auf ihrem Weg vom Mittagsgüpfli hinab nach Luzern adiabatisch um etwa 9°C erwärmt (siehe auch Abbildung A.8a). Dabei wird die Luft aber absolut gesehen leicht angefeuchtet und die potentielle Temperatur nimmt leicht ab (siehe Abbildung A.8b). Nach Luzern herab nimmt die Windgeschwindigkeit deutlich ab, der Wind ist mit knapp 10 m s^{-1} auf 100 m über Boden aber noch stark.

Der Verlauf der Trajektorien in Abbildung 31 zeigt, dass bis um 09 UTC hauptsächlich eine Umströmung

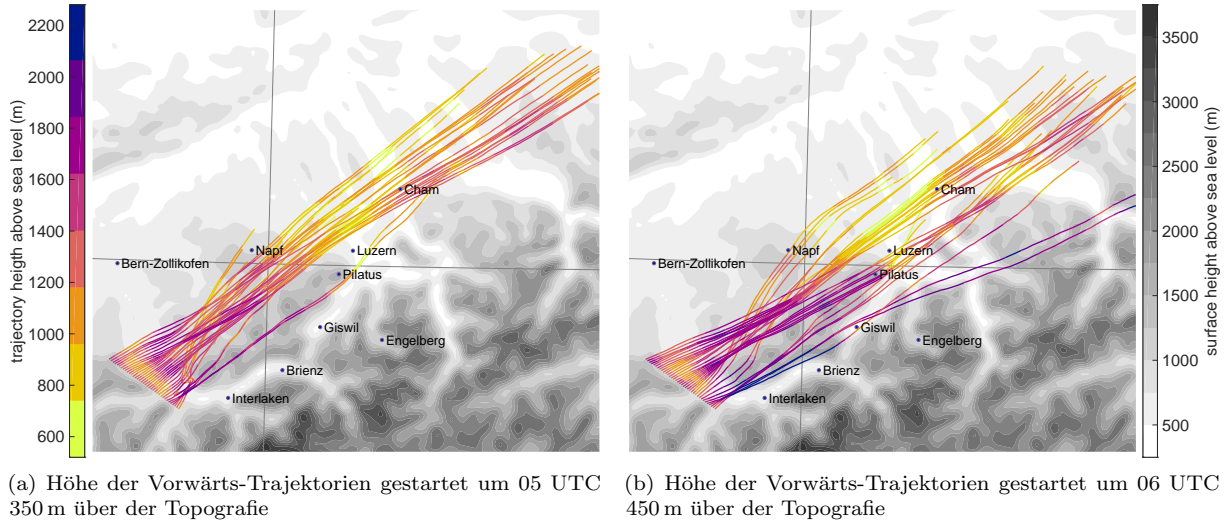


Abbildung 31: Vorwärts-Trajektorien gestartet am 03.01.2018 um 05 UTC und 06 UTC. Die 36 Trajektorien wurden in der Region des Thunersees mit einem horizontalen Abstand von 1200 m gestartet und reichen eine Stunde in die Zukunft.

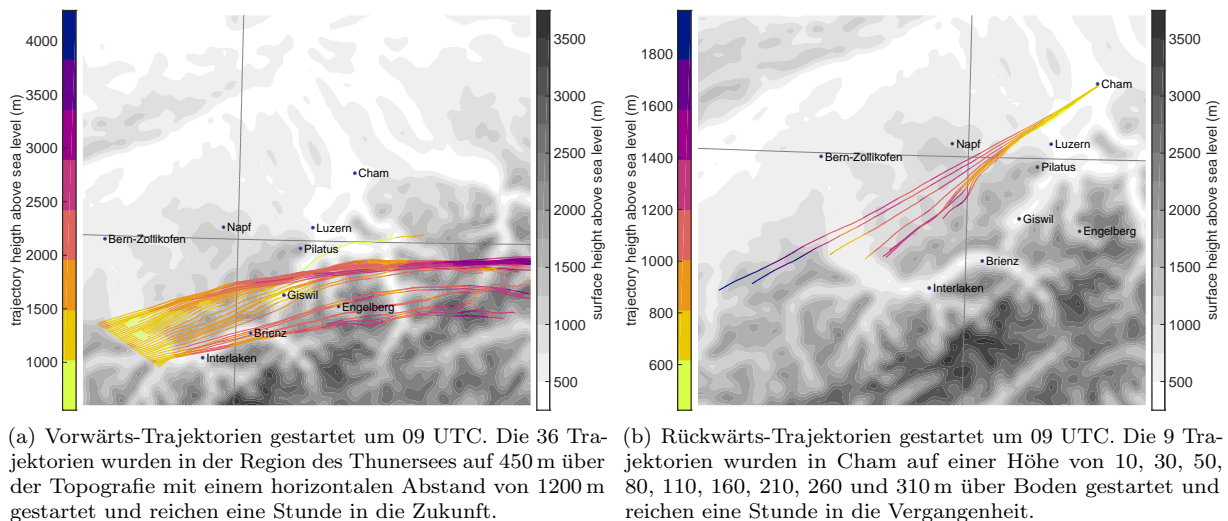


Abbildung 32: Höhe der Trajektorien am 03.01.2018

der Alpen vorherrscht. Ab 09 UTC gibt es dann auch viele Trajektorien, die über die Berge strömen und weiter in die Alpen hinein vorstossen (siehe Abbildung 32a). Im Vergleich zu den Stunden davor kommt die Luft weniger stark aus Süden. Ab 09 UTC strömt die Luft zwischen dem Napf und den Entlebucher Voralpen nach Luzern. Dadurch ist der Abstieg der Luft deutlich reduziert und die Erwärmung und Abtrocknung der Luft ist entsprechend geringer.

Der Westwind, der im COSMO-1 Modell am Nachmittag des 03.01.2018 in der Region von Luzern weht, kommt deutlich stärker aus Westen als der Westföhn am Morgen des 03.01.2018. Dies wurde primär durch die Drehung des Windes mit dem Durchgang der Kaltfront verursacht. Die Rückwärts-Trajektorien, welche um 13 UTC und 19 UTC ab der Station Luzern gestartet wurden, zeigen, wie die Luft über den Napf strömt und von dort nach Luzern herunter kommt (siehe Abbildung A.9). Die Luft kommt nur noch aus einer Höhe von 1200 - 1500 m. Weil die Luft in den untersten Metern der Atmosphäre nicht direkt vom Napf kommt, sondern die Täler des Entlebuches herunter strömt, liegt die potentielle Temperatur in Luzern tiefer als diejenige auf dem Napf.

4.1.8 Vergleich Messungen und Modellvorhersage

Die vom Modell vorhergesagte Zeitperiode des Westföhns stimmt nur einigermaßen mit der Wirklichkeit überein. Der Westföhn setzt im Modell 3 Stunden und 10 Minuten zu früh ein. Während in der Realität am Napf zwischen 09:30 UTC und 09:50 UTC und zwischen 11:20 und 11:50 UTC eine deutliche Abkühlung beobachtet werden konnte, zeigt das Modell zwischen 11:00 UTC und 11:10 UTC sowie zwischen 13:30 UTC und 14:00 UTC eine Abkühlung. Die erste Abkühlung kann durch den fallenden Niederschlag erklärt werden, die zweite zeigt den Durchgang der Kaltfront. Leichter Niederschlag fällt im COSMO-1 Modell bereits ab 09 UTC, der Westföhn weht während dieser Zeit aber noch weiter. Der stärkere Niederschlag um 11 UTC fällt eine gute Stunde später als in der Realität und führt zum Unterbruch des Westföhns. In der Realität konnte sich der Westföhn auch während dem Niederschlag halten. Nach dem Unterbruch des Westföhns weht zwischen 12 UTC und 14 UTC im COSMO-1 Modell nochmals ein relativ starker Westföhn. Das Ende des Westföhns durch den Durchgang der Kaltfront in Luzern ist im Modell nicht so markant, wie es in der Wirklichkeit war. Der Zeitpunkt des Kaltfrontdurchgangs wird vom COSMO-1 Modell etwa zwei Stunden zu spät vorhergesagt.

Die potentielle Temperatur am Napf wird für den 03.01.2018 durch das COSMO-1 Modell um 3 - 6 °C zu tief simuliert. Entsprechend sind auch die potentiellen Temperaturen in Luzern (5 - 6 °C), Emmen (4 - 6 °C) und Cham (5 - 6 °C) deutlich zu tief, weil die Luft an diesen Stationen aus der Höhe des Napfs kommt. Ein weiterer möglicher Grund für die zu tiefen potentiellen Temperaturen im COSMO-1 Modell können Diffusionsprozesse und zu starke Austauschprozesse mit der Erdoberfläche sein (Hächler et al., 2011). Nach dem Durchzug der Kaltfront stimmen die vorhergesagten Temperaturen gut mit der Wirklichkeit überein. Die relative Feuchte wird durch das COSMO-1 Modell während dem Westföhn etwa um 20 % zu hoch simuliert. Weil im COSMO-1 Modell kein Niederschlag fällt, kann die zu hohe relative Feuchte durch die zu tiefe Ausgangstemperatur in erhöhten Lagen erklärt werden. Ein weiterer möglicher Grund ist, dass die Luft beim Abstieg in die tiefen Lagen durch die im COSMO-1 Modell zu starken Austauschprozesse mit der Erdoberfläche angefeuchtet wird.

Die Windgeschwindigkeit wird durch das COSMO-1 Modell relativ gut vorhergesagt. In der Nacht sagt das COSMO-1 Modell korrekt tiefe Windgeschwindigkeiten in den flachen Lagen voraus. Durch den zu frühen Einsatz des Westföhns sind zwischen 04 UTC und 08 UTC die Windgeschwindigkeiten entsprechend zu hoch. Während dem starken Westföhn am Vormittag zwischen 08 UTC und 11 UTC sind die Windgeschwindigkeiten im Modell 2 - 5 m s⁻¹ zu gering. Am Nachmittag stimmt die Windgeschwindigkeit im Modell sehr gut mit der Wirklichkeit überein. Bei der Windrichtung weist das Modell dagegen einen Fehler von etwa 20° auf. Am Vormittag kommt der Wind zu stark aus Süden. Nach dem Kaltfrontdurchgang dagegen weht der Wind im Modell zu stark aus Westen. Das COSMO-1 Modell überschätzt also die Drehung des Windes mit dem Durchgang der Kaltfront.

Die horizontale Ausdehnung des Westföhns in der Realität ist schwer abzuschätzen, da die räumliche Abdeckung durch Messstationen eher gering ist. Das COSMO-1 Modell scheint aber gut das Gebiet des Westföhns zu simulieren. Beim Westföhn während dem Sturmtief *Burglind* kommt der Westföhn knapp bis nach Cham, was gut mit den Messungen übereinstimmt. Die Stärke des Westföhns lässt aber von Luzern nach Cham etwas nach. Dies kann sowohl in den Messwerten als auch in den Modelldaten beobachtet werden.

4.2 Fall 2: Westföhn am 16.01.2018

4.2.1 Messungen

Der Westföhn-Fall vom 16.01.2018 trat in Verbindung mit dem Sturmtief *Evi* auf und war durch einige Unterbrüche geprägt. Der Einsatz des Westföhns erfolgte um 06 UTC zeitlich leicht versetzt zuerst in Emmen, 20 Minuten später dann in Luzern und nochmals 10 Minuten später in Cham (siehe Abbildung 34). Der Westföhn setzte also im Vergleich zum Westföhn während *Burglind* viel schneller hintereinander an den Stationen Luzern, Emmen und Cham ein. Das Ende des Westföhns erfolgte am 17.01.2018 um 03:30 UTC mit dem Durchgang der Kaltfront.

Dieses Westföhn-Ereignis war durch einen markanten Beginn und ein markantes Ende gekennzeichnet. Dazwischen traten immer wieder deutliche Unterbrüche des Westföhns auf. Diese fielen mit dem, im Laufe des Tags immer wieder auftretenden, Niederschlag zusammen. Im Gegensatz zum Westföhn während *Burglind* führte der Niederschlag am 16.01.2018 zum Unterbruch des Westföhns. Durch den gelegentlich auftretenden Niederschlag fiel in Luzern und Emmen die relative Feuchte nur selten unter 50%. In Cham war die Abtrocknung weniger stark und die relative Feuchte erreichte minimale Werte von 55%. Die potentielle Temperatur an der Station Luzern lag zu Beginn der Westföhn-Periode noch auf dem Niveau des Napfs. Im Verlauf des Tages kühlte es in Luzern durch den Niederschlag immer wieder ab und die Temperaturen stiegen nicht mehr auf das Niveau der potentiellen Temperatur am Napf. Weil in Cham häufig Niederschlag fiel, vermochte der Westföhn nach 16 UTC bis in die Nacht hinein mit einer Ausnahme zwischen 02 UTC und 03 UTC nicht mehr bis nach Cham vorzustoßen.

Der Westföhn vom 16.01.2018 begrenzte sich nicht nur auf das Gebiet zwischen Luzern und Cham. An der Station Giswil wehte der Westföhn bereits am 15.01.2018 ab 23:00 UTC (siehe Abbildung B.1). Vor dem Durchbruch des Westföhns bei Luzern und Emmen setzte er sich um 01:30 UTC in Schüpfheim durch. Für einzelne kurze Zeitperioden wehte der Westföhn auch in Gersau.

Abbildung 33 zeigt Messwerte zu Beginn der Westföhnperiode an den Wetterstationen um den Vierwaldstättersee. In erhöhten Lagen kam der Wind stark aus Süden (auf dem Pilatus aus 200°, am Napf aus 235°), während am Boden und in den tiefen Lagen der Wind mit 230° - 260° deutlich mehr aus Westen kam. Diese Windrichtungen stimmten sehr gut mit den Windrichtungen beim Westföhn während *Burglind* überein. Der Westföhn erreichte an der Station Luzern Windgeschwindigkeiten von bis zu 14 m s^{-1} und Böenspitzen von bis zu 27 m s^{-1} . Auch an den Stationen Emmen und Cham war es mit einem mittleren Wind von 10 m s^{-1} und Böenspitzen von 20 m s^{-1} sehr windig.

Nach dem Durchzug der Kaltfront wehte ein föhnartiger Westwind (föhnartige Erwärmung und

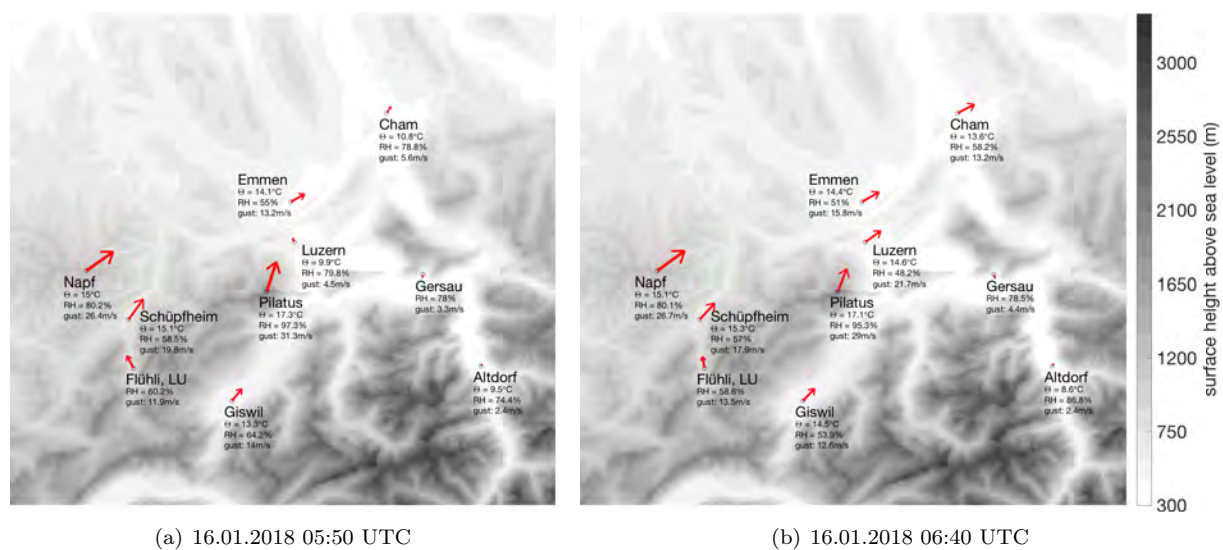


Abbildung 33: Messwerte der potentiellen Temperatur (θ), relativen Feuchte (RH) und Windböen (gust) sowie Wind (rote Pfeile) an den Messstationen um den Vierwaldstättersee am 16.01.2018. Die roten Pfeile sind nach der Windgeschwindigkeit skaliert und zeigen die Windrichtung an.

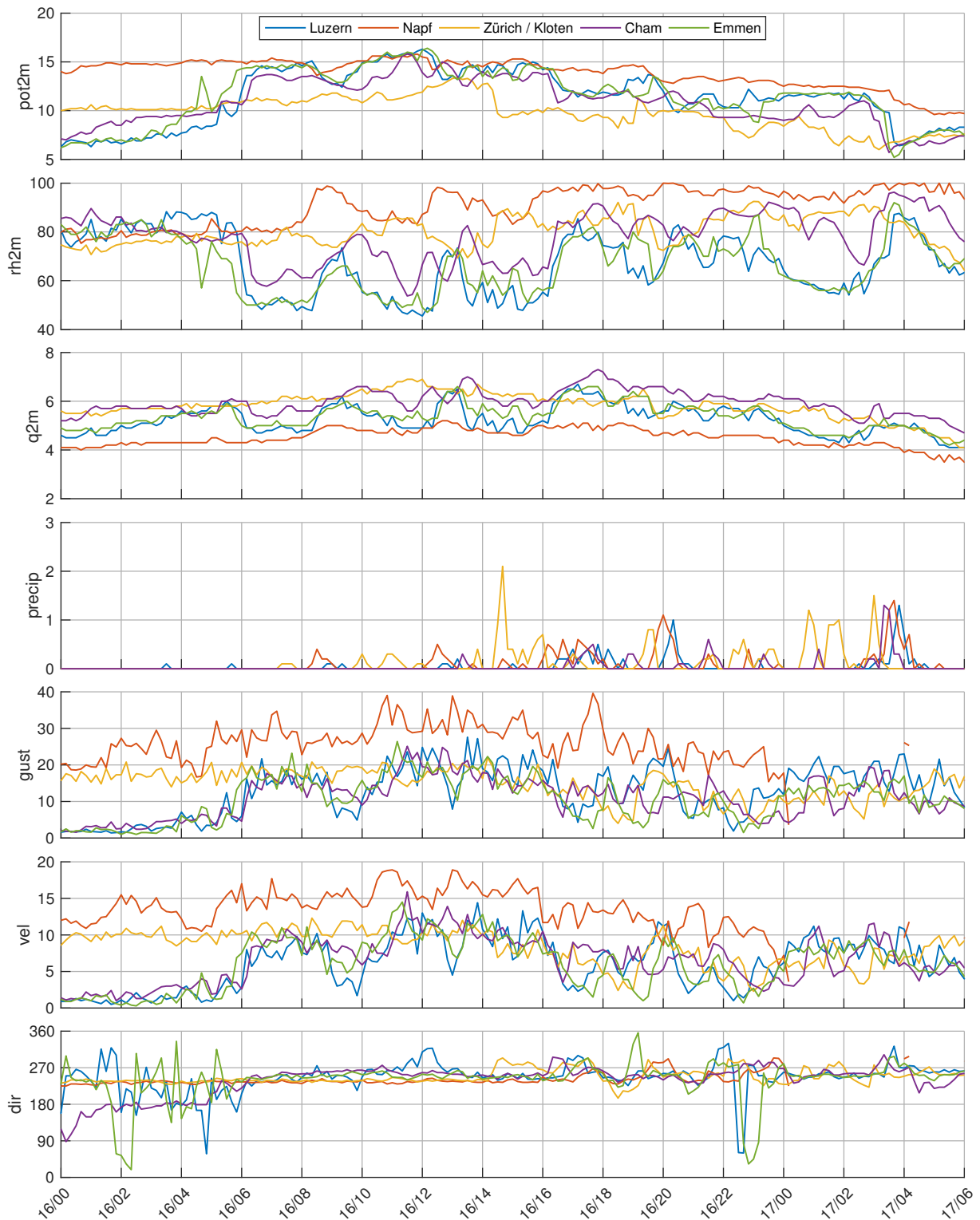


Abbildung 34: 10-Minuten Messwerte an den SwissMetNet-Stationen Luzern, Napf, Zürich-Kloten und Cham und der Messstation Emmen vom 16.01.18 00 UTC bis 17.01.18 06 UTC. pot2m: potentielle Temperatur 2 m über Boden ($^{\circ}\text{C}$); rh2m: relative Feuchte 2 m über Boden (%); q2m: absolute Luftfeuchte 2 m über Boden (g m^{-3}); precip: 10-Minuten Summe des Niederschlags (mm); gust: Maximum der Böenspitzen (1-Sekunden Messwerte) über 10 Minuten (m s^{-1}); vel: Skalar der Windgeschwindigkeit, 10-Minuten Mittel (m s^{-1}); dir: Windrichtung, 10-Minuten Mittel ($^{\circ}$).

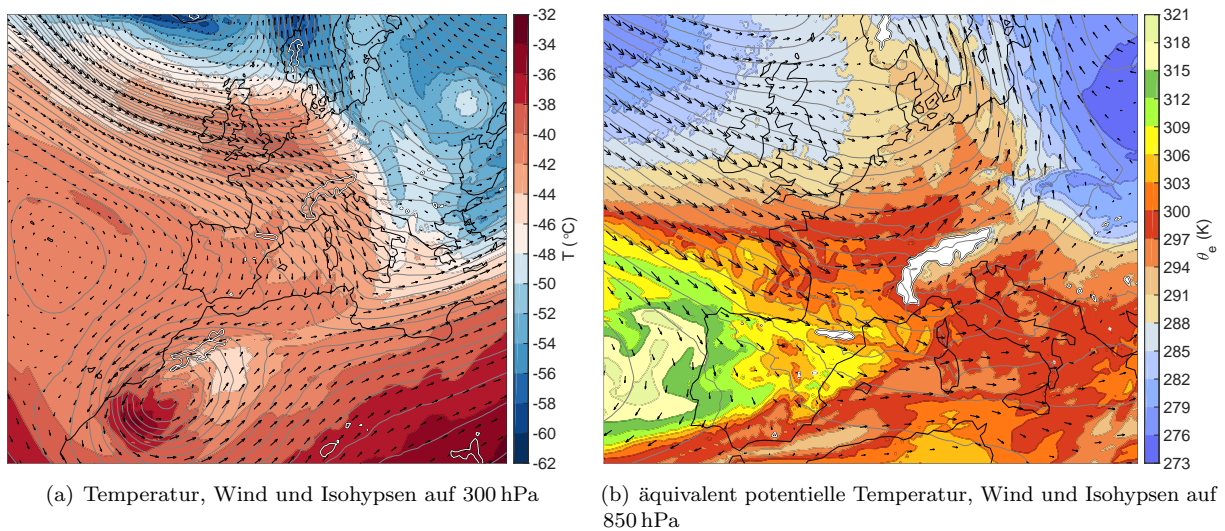


Abbildung 35: synoptische Lage über Europa am 16.01.2018 um 06 UTC

Abtrocknung, potentielle Temperatur in Luzern war aber 1 - 2 °C tiefer als am Napf), der immer wieder einzelne Unterbrüche aufwies. Die Erwärmung und Abtrocknung war an der Station Luzern relativ gering, vor allem war kein Unterschied in der potentiellen Temperatur zur Station Zürich-Kloten auszumachen. Diese Phase mit dem ständigen Wechsel der Luftmassen hielt bis am 19.01.2018 und dem Durchgang der Kaltfront des darauffolgenden Sturmtiefs *Friederike* an.

4.2.2 Synoptische Lage

Am 16.01.2018 lag ein Höhentief über Island und eines über Marokko sowie ein Hoch über den Azoren und eines über Lettland (siehe Abbildung 35a). Die Strömung über den Alpen kam auf 300 hPa aus Nordwesten. Vom Atlantik über Grossbritannien bis zu den Alpen wehte ein starker Jetstream.

Um 06 UTC befand sich ein sekundäres Tief über Dänemark, dessen okkludierte Front über Norddeutschland lag und gegen die Alpen noch als Warm- und Kaltfront erkennbar war (siehe Abbildung 35b). Die Warmfront lag über Osteuropa und die Kaltfront erstreckte sich von Deutschland aus zonal nach Westen. Vor den Alpen wehte auf 850 hPa ein Südwestwind. Während dem Westföhn lag Luzern im Warmsektor des Tiefs. Daher wurde der Westföhn vom 16.01.2018 als Warmsektor-Typ klassifiziert.

4.2.3 Westföhn im COSMO-1 Modell

Wie aus der Zeitreihe in Abbildung 36 zu erkennen ist, sagt das COSMO-1 Modell für den 16.01.2018 an der Station Luzern einen Westföhn ab 02:00 UTC vorher. Trotz des leichten Niederschlags, der ab 04 UTC fällt, weht der Westföhn relativ stark. Zu Beginn der Westföhnperiode weht der Westföhn mit etwa 5 m s^{-1} aus Südwesten. Zwischen 07 UTC und 09 UTC nimmt die Windgeschwindigkeit nacheinander an den Stationen Luzern, Emmen und Cham sprunghaft auf 7 - 9 m s^{-1} zu. Gleichzeitig dreht der Wind auf Westsüdwest.

Während dem Westföhn wird die potentielle Temperatur an der Station Luzern so hoch wie am Napf vorhergesagt und die relative Feuchte liegt zwischen 60 % und 70 %. Auch am Ort der Stationen Emmen und Cham zeigt das Modell ab 03 UTC eine föhnartige Erwärmung und Abtrocknung. Die potentielle Temperatur liegt jedoch 1 - 2 °C tiefer als an den Stationen Luzern und Napf. Erst nach 08:20 UTC liegt die potentielle Temperatur an der Station Emmen auf dem Niveau der potentiellen Temperatur am Napf. Es kann von einem schwachen Westföhn ab 02:40 UTC (Cham) bzw. 02:50 UTC (Emmen) gesprochen werden. Mit einer deutlichen Temperaturabnahme zwischen 12:40 UTC und 13:20 UTC und dem anschliessend relativ starken Niederschlag endet der Westföhn.

Nach 14 UTC weht an den Stationen Luzern, Emmen und Cham immer noch ein starker Westwind, der eine leichte Erwärmung und Abtrocknung bringt. Die potentielle Temperatur erreicht aber nicht

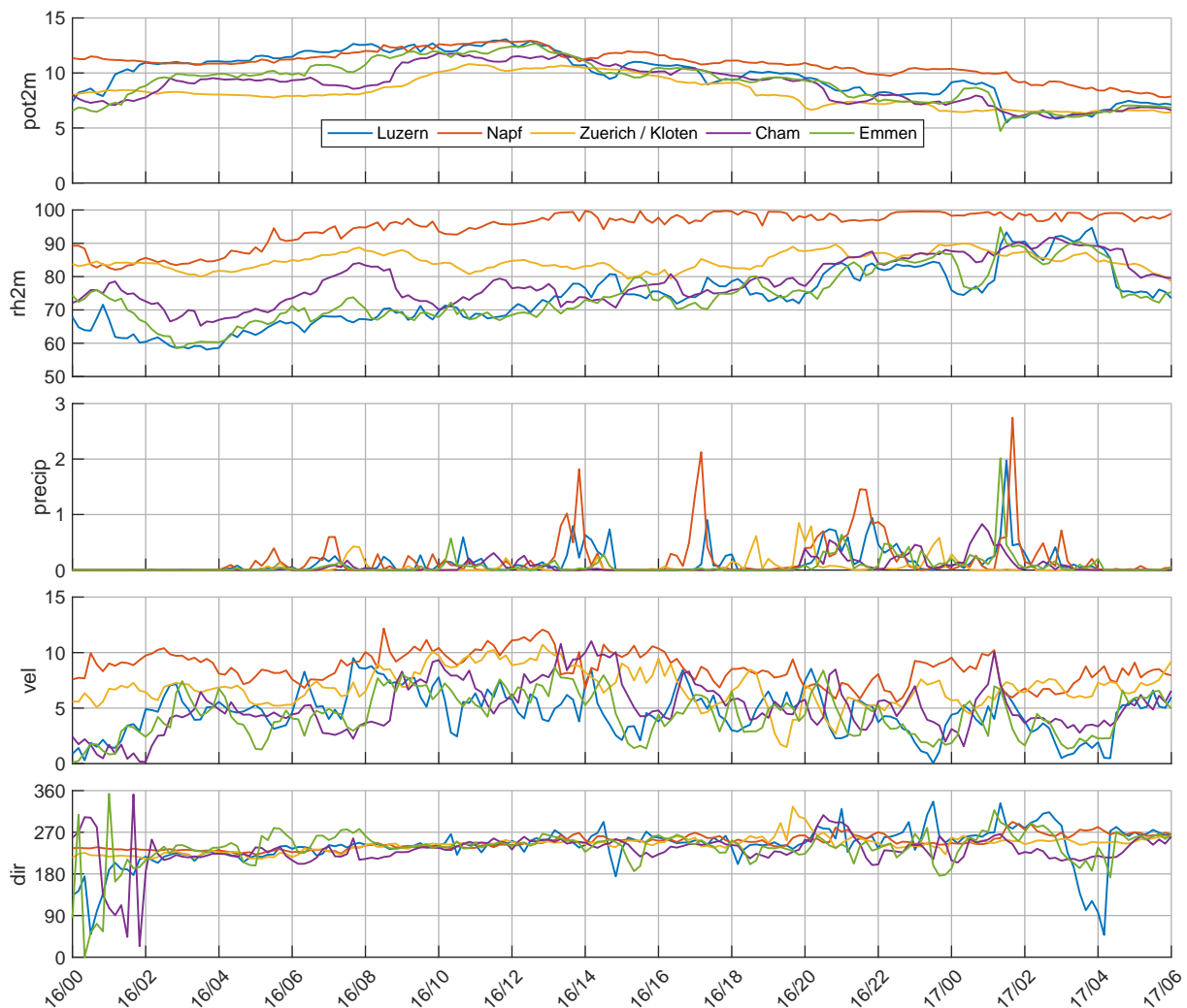


Abbildung 36: Durch das COSMO-1 Modell simulierte Werte am Ort der Messstationen Luzern, Napf, Zürich-Kloten, Cham und Emmen vom 16.01.2018 00 UTC bis 17.01.2018 06 UTC. pot2m: potentielle Temperatur 2 m über Boden ($^{\circ}\text{C}$); rh2m: relative Feuchte 2 m über Boden (%); precip: 10-Minuten Summe des Niederschlags (mm); vel: Skalar der Windgeschwindigkeit, 10-Minuten Mittel (m s^{-1}); dir: Windrichtung, 10-Minuten Mittel ($^{\circ}$)

mehr das Niveau der potentiellen Temperatur am Napf. Ausserdem trocknet die Luft nur noch auf eine relative Feuchte von 70 % ab. Wegen des immer wieder drehenden Windes und der zu geringen potentiellen Temperatur kann nicht mehr von einem Westföhn gesprochen werden.

4.2.4 Horizontale Struktur

Windfeld Nördlich der Alpen auf 850 hPa treten im COSMO-1 Modell durch den durchziehenden Sturm zwischen 03 UTC und 06 UTC Windgeschwindigkeiten von über 30 m s^{-1} auf. Im Gegensatz zum Windfeld während *Burglind* gibt es über dem Vierwaldstättersee einige Gebiete, in denen nur sehr schwache Winde wehen oder Windstille herrscht (siehe Abbildung 37). Während längeren Perioden ist der Westföhn nur knapp bis Luzern zu sehen und schwächt sich dort über eine kurze Distanz stark ab.

In der Region von Luzern sind im COSMO-1 Modell um 03 UTC 100 m über Boden die gleichen drei Strömungen zu finden, die auch während dem Sturmtief *Burglind* auftreten (siehe Abbildung 37a). Die Strömungen sind aber vergleichsweise schwächer ausgeprägt. Um 03:30 UTC sind im Windfeld 10 m über Boden die Anfänge der Strömungen A und B zu erkennen (siehe Abbildung 37b). Der Anfang der Strömung A ist als deutliches Maximum der Windgeschwindigkeit im Südosten von Luzern vorzufinden. Knapp bis nach Luzern gelangt die Strömung B und verliert dort schnell an Stärke. Die Strömung C

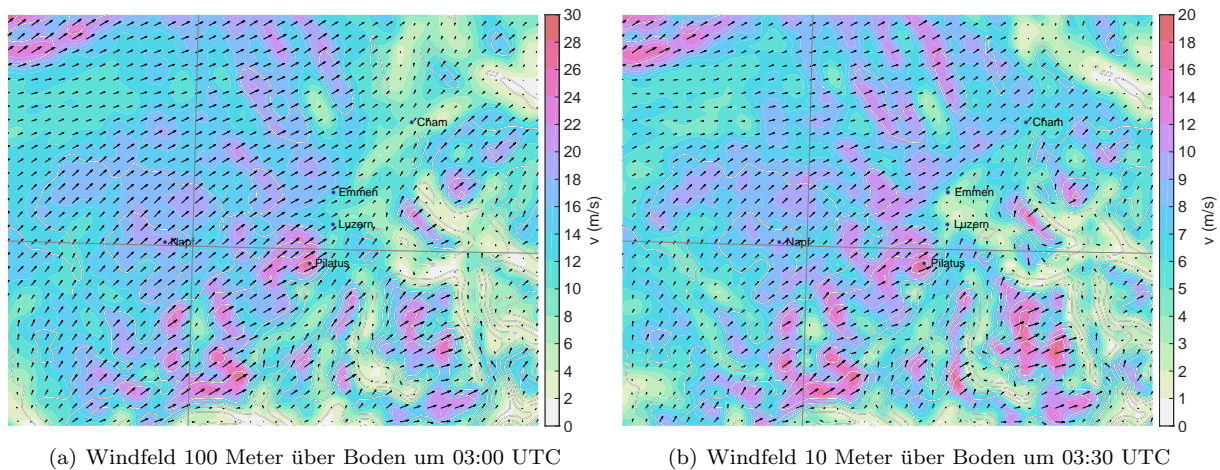


Abbildung 37: Skalar der Windgeschwindigkeit (Farbe), Windvektoren und Höhenlinien in der Region um den Vierwaldstättersee am 16.01.2018 um 03 UTC und 03:30 UTC.

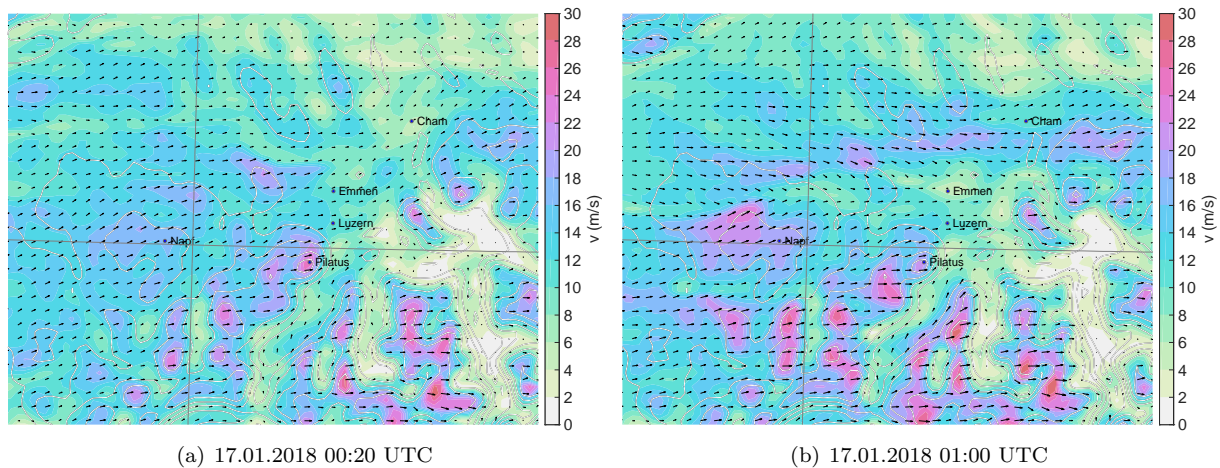


Abbildung 38: Skalar der Windgeschwindigkeit (Farbe) und Windvektoren 100 Meter über Boden sowie Höhenlinien in der Region um den Vierwaldstättersee am 17.01.2018 um 00:20 UTC und 01:00 UTC

dagegen ist besonders deutlich zu erkennen und reicht mit Geschwindigkeiten von $8 - 10 \text{ m s}^{-1}$ fast bis nach Cham. 200 m über Boden ist die Strömung B schon um 02:00 UTC mit einem sekundären Maximum der Windgeschwindigkeit vor dem Zugersee zu erkennen (nicht gezeigt). Erst um 03 UTC ist die gesamte Strömung als Zunge erhöhter Windgeschwindigkeit vorhanden (nicht gezeigt).

Weil vor dem Durchgang der Kaltfront am 17.01.2018 um 01:30 UTC der Westföhn stärker aus Westen weht als am Morgen des 16.01.2018, sind die für den Fall *Burglind* definierten Strömungen nicht vorhanden. Das Windfeld 100 m über Boden zeigt eine Zunge erhöhter Windgeschwindigkeit von den Hängen im Westen von Luzern auf den Vierwaldstättersee hinaus (siehe Abbildung 38). Um 00:20 UTC zeigt sich eine weitere Zunge erhöhter Windgeschwindigkeit weiter im Norden. Die Gebiete erhöhter Windgeschwindigkeit in den tieferen Lagen sind in der Nacht des 17.01.2018 kleiner und zeigen geringere Windgeschwindigkeiten als am Morgen des 16.01.2018. In Cham und am Zugersee sind die Windgeschwindigkeiten gering.

Temperatur- und Feuchtfeld Das Feld der relativen Feuchte um 03:20 UTC in Abbildung 39a zeigt die Abtrocknung in der Region um Luzern. Das Gebiet zwischen Malters, Luzern, Horw und Risch-Rotkreuz (siehe auch Abbildung 5) zeigt 50 m über Boden eine Abtrocknung auf eine relative Feuchte von etwa 50%. Während die relative Feuchte Richtung Nordosten nur langsam zunimmt, zeigt das Feld der absoluten Temperatur 2 m über Boden um 05:20 UTC eine deutlichere Abnahme von Luzern aus

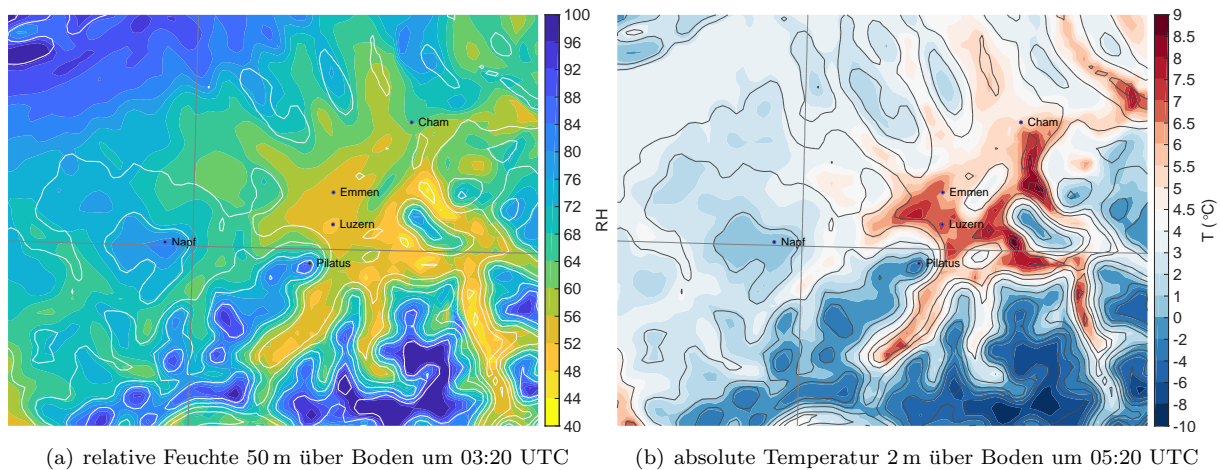


Abbildung 39: relative Feuchte und absolute Temperatur am 16.01.2018 in der Region um den Vierwaldstättersee

Richtung Nordosten (siehe Abbildung 39b). Eine Erwärmung findet nur zwischen Malters, Rothenburg und Luzern statt (siehe auch 5). Über dem Vierwaldstättersee und Zugersee können nochmals höhere Temperaturen beobachtet werden als in den durch den Westföhn beeinflussten Gebieten. Diese hohen Temperaturen kommen wahrscheinlich durch die stehende Luft über dem warmen Gewässer zustande. Auch über dem Zürichsee, Sarnersee und Thunersee findet man erhöhte Temperaturen. Die potentielle Temperatur liegt 50 m über Boden in Luzern 1 - 1.5 °C höher als am Napf (siehe Abbildung B.2a). Das Gebiet der erhöhten potentiellen Temperatur reicht aber nur leicht über Luzern hinaus und die Luft kühlt Richtung Zugersee schnell ab. Der Unterschied der Temperatur von den Gebieten mit Westföhn zum Mittelland und Jurasüdfuss beträgt etwa 3 °C.

Der schwächere Westföhn aus Westen, der vor dem Durchzug der Kaltfront weht, bringt nur eine Erwärmung von etwa 1 °C (nicht gezeigt). Die potentielle Temperatur am Ort der Messstation Luzern erreicht nicht das Niveau der potentiellen Temperatur am Napf. Das Gebiet erhöhter potentieller Temperaturen liegt zu diesem Zeitpunkt südlich von Luzern und ist als Zunge erhöhter potentieller Temperatur über dem Vierwaldstättersee zu erkennen (siehe Abbildung B.2b).

4.2.5 Vertikale Struktur

Abbildung 40 zeigt die Temperatur im Querschnitt entlang der Westföhnströmung. Gut zu erkennen ist die Erwärmung in der Region von Luzern und das starke Abfallen der Isentropen. Die Isentropen stürzen kurz vor Luzern um 1000 m herab und steigen kurz nach Luzern wieder steil an. Die Auslenkung der Isentropen ist auch noch auf 3000 m über Meer zu sehen, wobei die Auslenkung der Isentropen auf dieser Höhe mit 500 m geringer ist als in den bodennahen Schichten (Auslenkung um etwa 1000 m). Auf 2500 m über Meer ist die Auslenkung der Isentropen geringer als beim Fall *Burglind*. Am 17.01.2018 um 01 UTC zeigt sich der Westföhn hauptsächlich in der Auslenkung der untersten und bodennahen Isentropen. Die Isentropen in grösserer Höhe werden kaum ausgelenkt.

Auch im Feld der absoluten Feuchte ist ein Einfluss des Westföhns in grösserer Höhe zu sehen (siehe Abbildung 41a). In 2500 m Höhe führt der Westföhn über Luzern zu einer Reduktion der absoluten Feuchte von 0.4 g kg^{-1} . Diese Reduktion der absoluten Feuchte führt dazu, dass die Wolkenschicht auf 1500 - 2000 m aufgelöst wird. Wie auch beim Westföhn während *Burglind* ist im Feld der relativen Feuchte in Abbildung 41b ein Föhnfenster zu erkennen. Um 03:50 UTC wird in Luzern die Luft auf eine relative Feuchte von etwa 50 % abgetrocknet. Später am Morgen ist die Abtrocknung geringer, weil die Wolkenschicht absinkt und so feuchtere Luft abgetrocknet werden muss.

Das Windfeld im Querschnitt entlang der Westföhnströmung zeigt eine sehr ähnliche Struktur wie beim Westföhn während *Burglind* (siehe Abbildung B.3). Das Windfeld zeigt eine deutliche Absinkbewegung stromaufwärts von Luzern. Bis in Höhen von 500 m über der Topografie nimmt die Windgeschwindigkeit schnell zu. Darüber herrschen eher konstante Windgeschwindigkeiten. An den Hängen stromaufwärts von

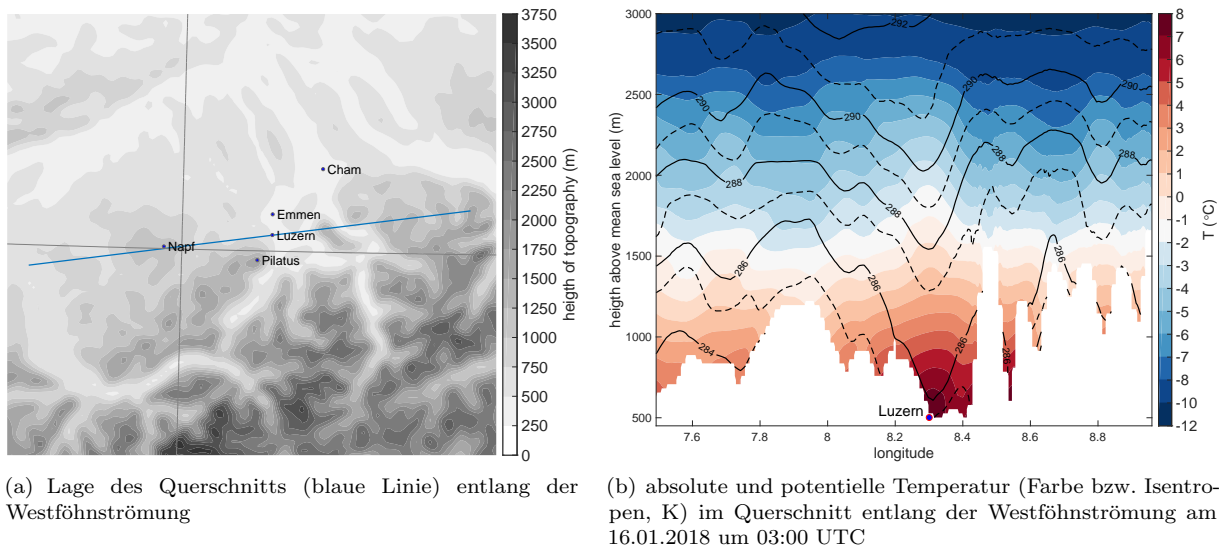


Abbildung 40: Lage des Querschnitts und Temperatur im Querschnitt entlang der Westföhnströmung am 16.01.2018 um 03:00 UTC.

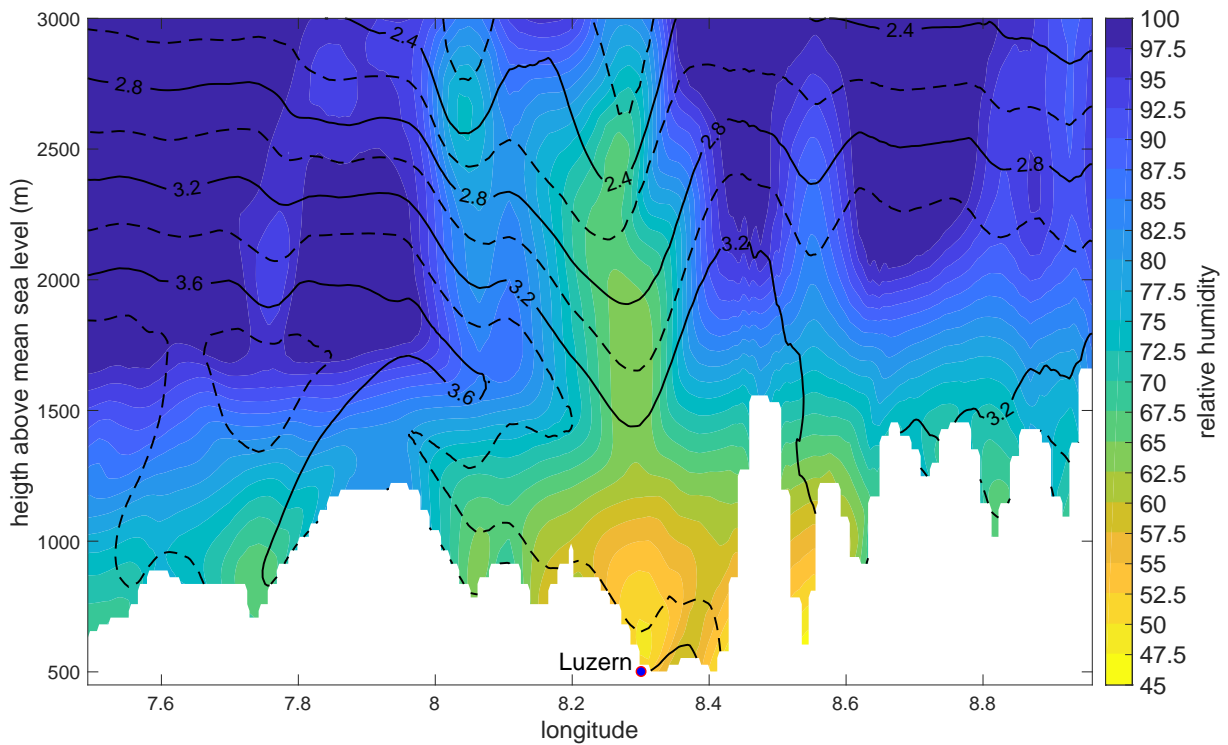
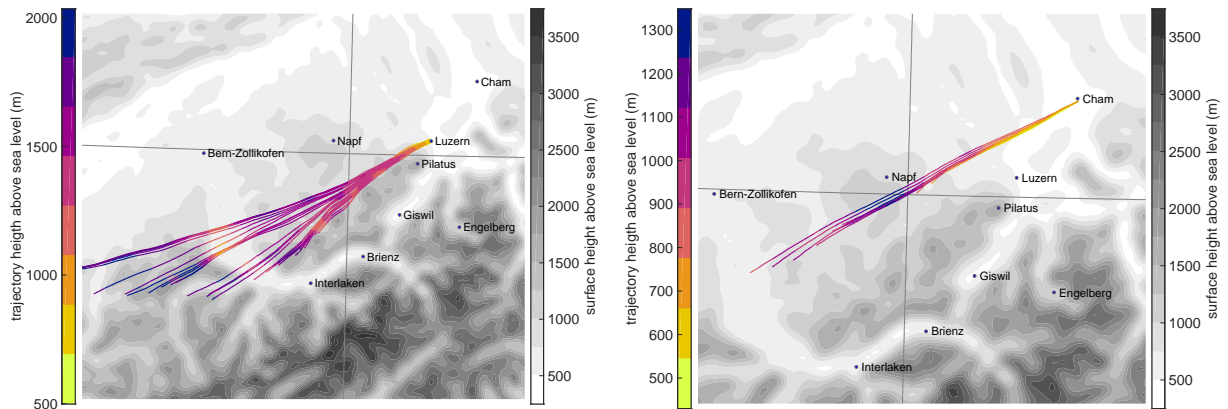


Abbildung 41: Absolute und relative Feuchte (Isolinien, g kg^{-1} bzw. Farbe) im Querschnitt entlang der Westföhnströmung am 16.01.2018 um 03:50 UTC. Die Lage des Querschnitts ist in Abbildung 40 gezeigt.



(a) Höhe der Rückwärts-Trajektorien am 16.01.2018 um 06 UTC. Die 28 Trajektorien wurden in Luzern zwischen 10 und 310 m über Boden mit einem vertikalen Abstand von 50 m und an vier Punkten mit einem horizontalen Abstand von 400 m gestartet und reichen eine Stunde in die Vergangenheit.

(b) Höhe der Rückwärts-Trajektorien am 16.01.2018 um 10 UTC. Die 9 Trajektorien wurden in Cham auf einer Höhe von 10, 30, 50, 80, 110, 160, 210, 260 und 310 m über Boden gestartet und reichen eine Stunde in die Vergangenheit.

Abbildung 43: Höhe der Rückwärts-Trajektorien am 16.01.2018

Gegen das Ende des Westföhns am 17.01.2018 um 01 UTC kommt die Luft zwischen den Entlebucher Voralpen und dem Napf nach Luzern herunter (siehe Abbildung 44). Das Höhenprofil drei ausgewählter Rückwärts-Trajektorien, die am 17.01.2018 um 01 UTC über Luzern gestartet wurden, ist in Abbildung B.5 gezeigt. Die Luft kommt aus einer Höhe von 1000 - 1300 m über Meer und folgt der Topografie. Die Erwärmung und Abtrocknung sind mit 4°C bzw. 20% gering (siehe Tabelle 5). Die Windgeschwindigkeit nimmt beim Abstieg nach Luzern nur wenig ab und bleibt über 10 m s^{-1} . Die potentielle Temperatur nimmt vor Luzern leicht ab, was wiederum durch die Diffusionsprozesse und die zu starken Austauschprozesse mit der Erdoberfläche im Modell erklärt werden können (Hächler et al., 2011).

Trajektorien, die in der Region von Thun gestartet wurden, zeigen, dass in der Nacht und am Morgen des 16.01.2018 eine Umströmung der Alpen stattfindet (siehe Abbildung 45a). Dagegen strömt die Luft in der Nacht des 17.01.2018 nicht entlang der Voralpen, sondern über die Voralpen und fließt tiefer in die Alpen hinein (siehe Abbildung 45b). Zu diesem Zeitpunkt findet also eher eine Überströmung als eine Umströmung der Alpen statt.

4.2.8 Vergleich Messungen und Modellvorhersage

An der Station Luzern setzt der Westföhn im Modell um 02:00 UTC und somit 4 Stunden früher als in der Realität ein. Auch an den Stationen Emmen und Cham setzt der Westföhn im COSMO-1 Modell zu früh ein. Das Ende des Westföhn wird durch das Modell etwa 2 Stunden zu früh vorhergesagt. Dies ist aber vor allem auf den falsch vorhergesagten Zeitpunkt des Kaltfrontdurchgangs zurückzuführen. Die deutlichen Wechsel der Westföhnströmung mit den Niederschlagsereignissen werden durch das Modell nicht so klar vorhergesagt, wie sie in der Realität auftraten.

Wie schon während dem Westföhn am 03.01.2018 wird die potentielle Temperatur am Napf zu gering modelliert. Sie liegt im Modell $2 - 4^{\circ}\text{C}$ zu tief. Entsprechend werden auch die potentiellen Temperaturen an den Stationen Luzern ($2 - 4^{\circ}\text{C}$), Emmen ($3 - 4^{\circ}\text{C}$) und Cham ($1 - 4^{\circ}\text{C}$) zu niedrig vorhergesagt. Auch die Windgeschwindigkeit ist an den Stationen Luzern, Emmen und Cham mit $5 - 9\text{ m s}^{-1}$ geringer als in der Realität ($8 - 12\text{ m s}^{-1}$). Die Messungen zeigen mit einer relativen Feuchte von bis zu 50% eine stärkere Abtrocknung als im Modell mit relativen Feuchten zwischen 60% und 70%. Am Morgen weht der Wind im COSMO-1 Modell leicht zu stark aus Süden. Zwischen 12 UTC und 22 UTC stimmt die Windrichtung im Modell gut mit den Messungen überein.

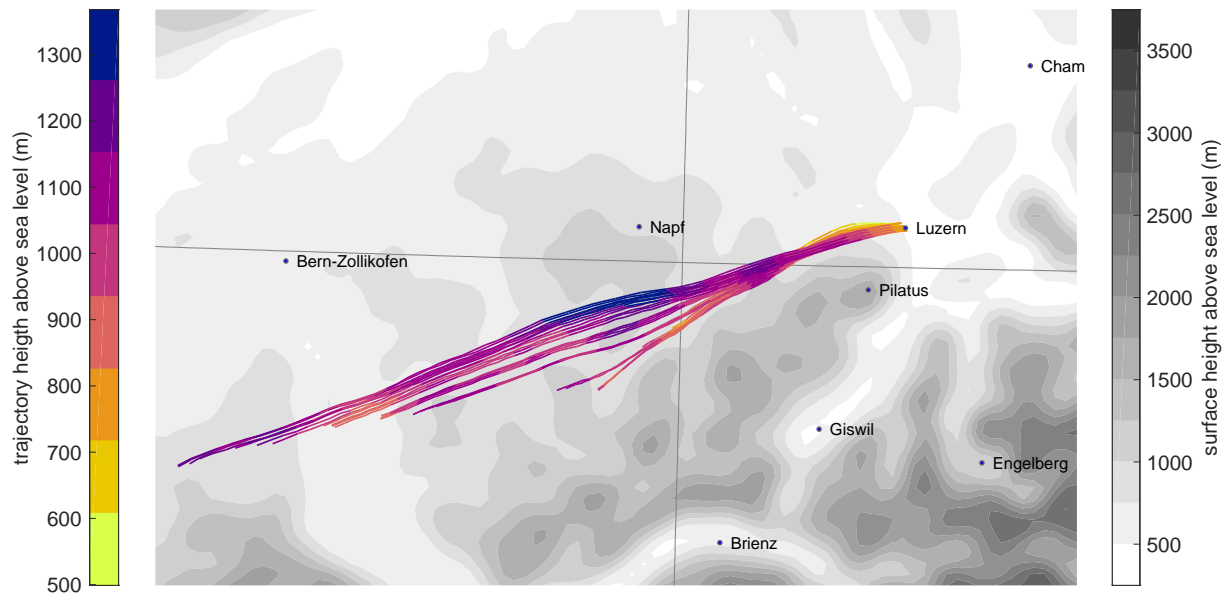


Abbildung 44: Höhe der Rückwärts-Trajektorien am 17.01.2018. Die 28 Trajektorien wurden um 01 UTC in Luzern zwischen 10 und 310 m über Boden mit einem vertikalen Abstand von 50 m und an vier Punkten mit einem horizontalen Abstand von 400 m gestartet und reichen eine Stunde in die Vergangenheit.

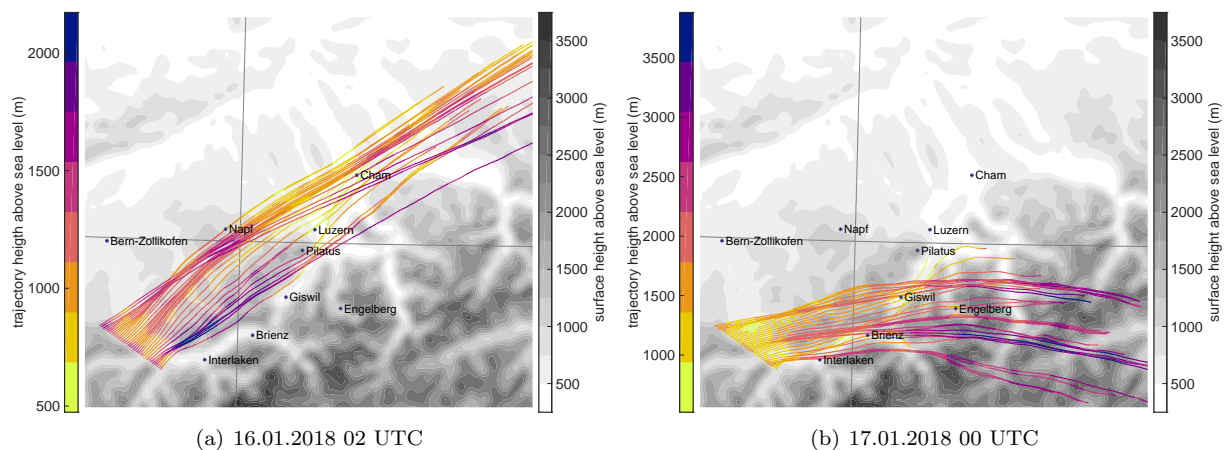


Abbildung 45: Höhe der Vorwärts-Trajektorien am 16.01.2018 um 02 UTC und 17.01.2018 um 00 UTC. Die 36 Trajektorien wurden in der Region des Thunersees auf 350 m über der Topografie mit einem horizontalen Abstand von 1200 m gestartet und reichen eine Stunde in die Zukunft.

4.3 Fall 3: Westföhn am 27.01.2014

4.3.1 Messungen

Dieses Westföhn-Ereignis trat am 27.01.2014 in Zusammenhang mit dem Orkantief *Lilli* auf. Der Westföhn setzte an der Station Luzern um 10:40 UTC und somit rund 3 Stunden nach dem Durchgang der Kaltfront ein (siehe Abbildung 13 in Abschnitt 3.2). Der Westföhn wehte etwa bis 14:00 UTC, bevor nochmals etwas kältere Luftmassen am Napf dazu führten, dass der Westföhn nachliess.

Der föhnartige Westwind führte auch an der Station Cham zu einer leichten Erwärmung und einem Abtrocknen der Luft. Es war jedoch dort weder ein klarer Beginn noch ein markantes Ende des Westföhns zu erkennen. Weil zu keinem Zeitpunkt gleichzeitig in der Messung der Temperatur, der Feuchte und des Windes (Geschwindigkeit und Richtung) die Kriterien für den Westföhn erfüllt wurden, kann man nicht von einem Westföhn in Cham sprechen. Ob an der Station Emmen Westföhn herrschte, kann nicht beantwortet werden, da die Messungen der relativen Feuchte und der Temperatur fehlen. Eine relativ konstante Windrichtung und mittlere Winde von rund 5 m s^{-1} zwischen 09:20 UTC und 13:20 UTC lassen einen Westföhn an der Station Emmen vermuten. An der Station Giswil wehte am 27.01.2014 kein Westföhn. Zwischen 09 UTC und 14 UTC zeigte die Station Schüpheim eine leichte Abtrocknung auf eine relative Feuchte von 70% (siehe Abbildung C.1). Die potentielle Temperatur in Schüpheim erreichte erst gegen 14 UTC das Niveau der potentiellen Temperatur am Napf. Mit Windgeschwindigkeiten von etwa 5 m s^{-1} aus Südwesten kann von einem schwachen Westföhn-Ereignis in Schüpheim gesprochen werden.

Die potentielle Temperatur in Luzern lag während diesem Westföhn-Ereignis mindestens auf dem Niveau des Napf, gegen Ende sogar etwas darüber. Auch die Abtrocknung war mit relativen Feuchten bis unter 50% deutlich. Im Vergleich zu den beiden anderen Fallstudien sind die Windgeschwindigkeiten an der Station Luzern mit $5 - 8 \text{ m s}^{-1}$ geringer.

4.3.2 Synoptische Lage

Die synoptische Lage in Europa für den 27.01.2014 wurde bereits im Abschnitt 3.2 vorgestellt und ist in der Abbildung 12 gezeigt. Um 12 UTC kurz nach dem Einsetzen des Westföhns befinden sich nordöstlich der Alpen die Reste der Warm- und Kaltfront eines starken Tiefs über dem Nordosten von Grossbritannien. Die Strömung in der Region um den Vierwaldstättersee ist durch das Tief im Nordosten der Britischen Inseln geprägt und kommt auf 850 hPa aus Westen bis Südwesten. Auf 500 hPa weht der Wind aus Westen. Dieses Westföhn-Ereignis vom 27.01.2014 wurde als Rückseiten-Typ klassifiziert.

4.3.3 Westföhn im COSMO-1 Modell

Das COSMO-1 Modell sagt einen kurz andauernden Westföhn in der Region um Luzern vorher (siehe Abbildung 46). An der Station Luzern weht im COSMO-1 Modell der Westföhn zwischen 11:40 UTC und 13:20 UTC, an der Station Emmen bereits ab 11:00 UTC und bis 13:00 UTC. Am Ort der Station Cham zeigt sich der Westföhn zwischen 12:20 UTC und 13:30 UTC. Mit einer relativen Feuchte von knapp unter 70% war die Abtrocknung im COSMO-1 Modell eher gering. Mit Windgeschwindigkeiten um 3 m s^{-1} modelliert das COSMO-1 nur einen schwachen Westföhn. Die potentielle Temperatur steigt dabei aber trotzdem auf das Niveau der potentiellen Temperatur am Napf. Der Anstieg der potentiellen Temperatur ist in diesem Fall eher kontinuierlich über eine Dauer von knapp zwei Stunden zwischen 10 UTC und 12 UTC. An den Stationen Luzern und Emmen kommt der Wind im Modell während dem Westföhn aus $260^\circ - 270^\circ$ und somit weniger aus Süden als während dem Westföhn der anderen beiden Fallstudien.

4.3.4 Horizontale Struktur

Vor Beginn und am Anfang des Westföhns herrscht über dem Vierwaldstättersee noch Windstille. Auch während der gesamten Westföhn-Periode wehen über dem Vierwaldstättersee nur sehr schwache Winde aus Südosten. Die Winde des Westföhns südwestlich von Luzern reichen bis knapp nach Luzern und verlieren dort auf kurzer Distanz an Stärke. Der Wind kommt am 27.01.2014 stärker aus Westen als es beim Westföhn während *Burglind* der Fall war. Um 12:10 UTC ist eine Zunge erhöhter Windgeschwindigkeit nördlich von Luzern Richtung Zugersee zu erkennen (siehe Abbildungen 47). Diese Zunge zeigt in eine etwas andere Richtung als die vorgestellten Strömungen während dem Westföhn in Zusammenhang mit dem Sturmtief *Burglind* und entspricht mehr der Strömung des Westföhns in der Nacht des 17.01.2018

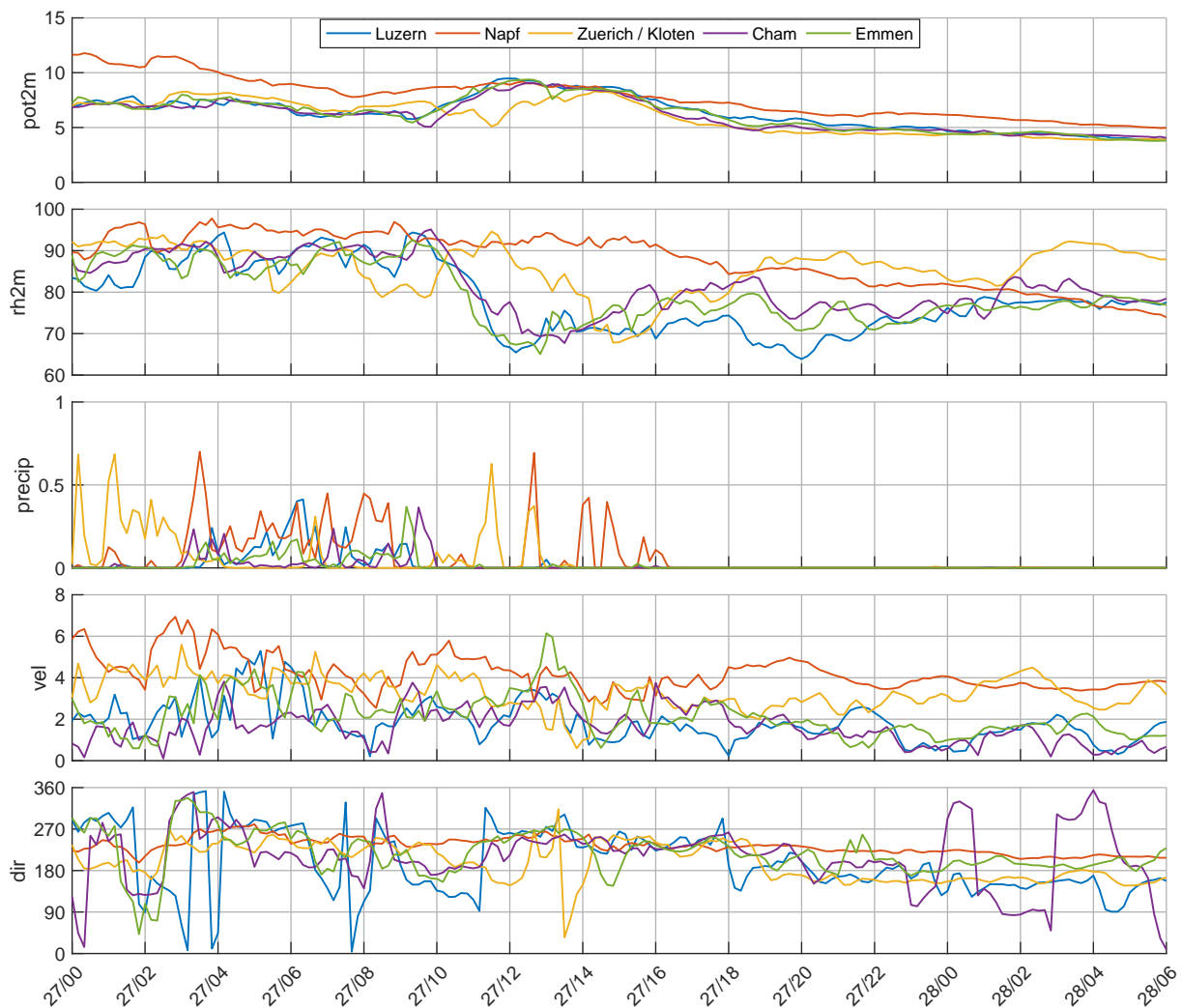


Abbildung 46: Durch das COSMO-1 Modell simulierte Werte am Ort der Messstationen Luzern, Napf, Zürich-Kloten, Cham und Emmen vom 27.01.2014 00 UTC bis 28.01.2014 06 UTC. pot2m: potentielle Temperatur 2 m über Boden ($^{\circ}\text{C}$); rh2m: relative Feuchte 2 m über Boden (%); precip: 10-Minuten Summe des Niederschlags (mm); vel: Skalar der Windgeschwindigkeit, 10-Minuten Mittel (m s^{-1}); dir: Windrichtung, 10-Minuten Mittel ($^{\circ}$)

(siehe auch Abbildung 38). Diese Zunge erhöhter Windgeschwindigkeit bildet sich zwischen 11:40 UTC und 12:10 UTC aus und hat Windgeschwindigkeiten von $6 - 7 \text{ m s}^{-1}$. Weiter nördlich zeigt sich nochmals eine Strömung, die bis nach Cham reicht. Im Süden und Osten des Pilatus ist nicht wie in den anderen Fällen eine Strömung zu erkennen sondern es herrscht praktisch Windstille.

Die Erwärmung durch den Westföhn zeigt sich nur schwach im Gebiet zwischen Luzern und Cham (siehe Abbildung 48a). Die Temperaturen liegen in diesem Gebiet knapp 1°C höher als im Mittelland und Jurasüdfuss. Der Westföhn sorgt um 11:40 UTC auf 50 m über Boden für eine konstante potentielle Temperatur vom Napf über Luzern bis fast nach Cham (siehe Abbildung 48b). Die Luft 50 m über Boden wird durch den Westföhn im Gebiet zwischen Luzern und dem Zugersee nur auf eine relative Feuchte von 60% abgetrocknet (nicht gezeigt).

4.3.5 Vertikale Struktur

Wie bereits in den beiden bisherigen Fallstudien zu sehen war, zeigt auch das Windfeld im Querschnitt entlang der Westföhnströmung am 27.01.2014 die gleichen Eigenschaften: (1) erhöhte Windgeschwindigkeiten an den Hängen stromaufwärts von Luzern, (2) Absinken stromaufwärts von Luzern und anschliessend ein Ansteigen der Luft und (3) Abschwächung der bodennahen Winde, bevor sie Luzern erreichen (siehe

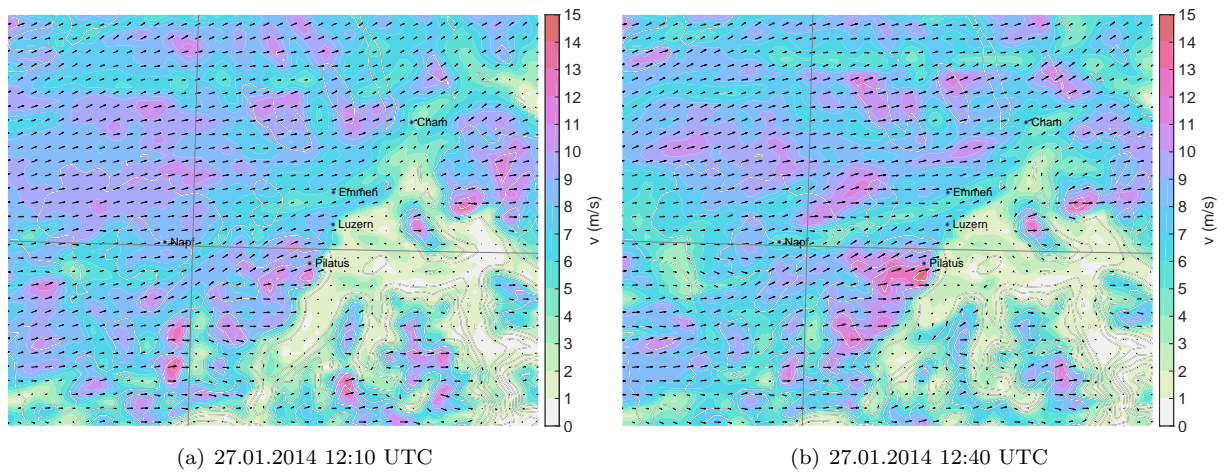


Abbildung 47: Skalar der Windgeschwindigkeit (Farbe) und Windvektoren 100 Meter über Boden sowie Höhenlinien in der Region um den Vierwaldstättersee am 27.01.2014 um 12:10 UTC und 12:40 UTC

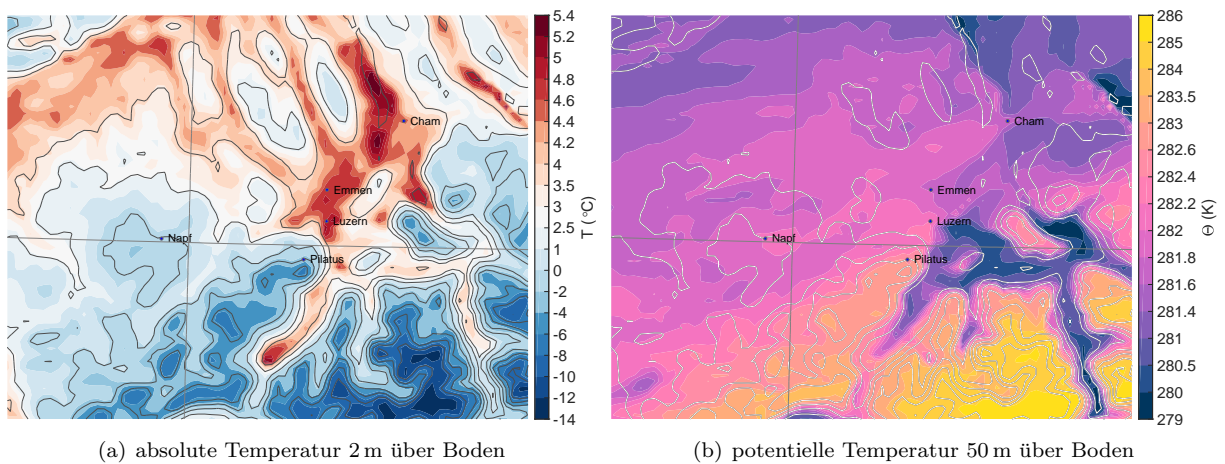
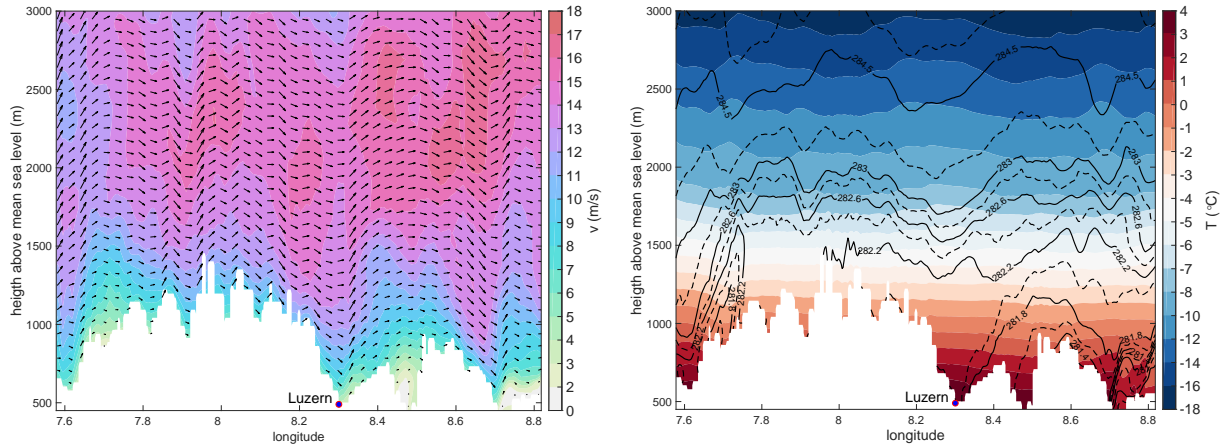
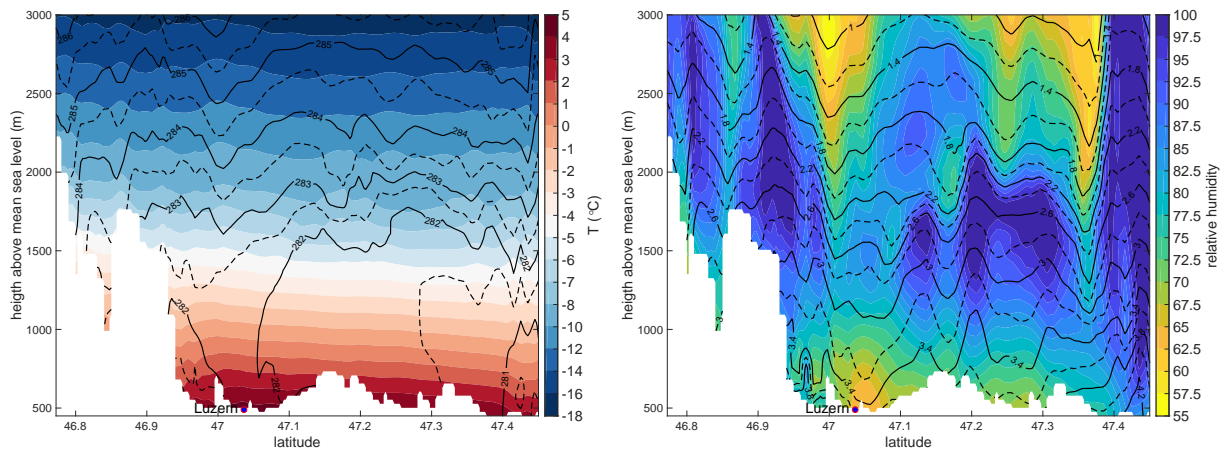


Abbildung 48: Temperaturfelder 2 m und 50 m über Boden in der Region um den Vierwaldstättersee am 27.01.2014 um 11:40 UTC



(a) Skalar der Windgeschwindigkeit (Farbe) und Windvektoren innerhalb der Querschnittsebene entlang der Westföhnströmung am 27.01.2014 um 12:10 UTC (b) Temperatur (Farbe) und Isentropen (K) im Querschnitt entlang der Westföhnströmung am 27.01.2014 um 11:40 UTC

Abbildung 49: absolute und potentielle Temperatur sowie Wind im Querschnitt entlang der Westföhnströmung am 27.01.2014 um 11:40 UTC und 12:10 UTC. Die Lage des Querschnitts ist in Abbildung 24a gezeigt.



(a) Temperatur (Farbe) und Isentropen (K) (b) absolute und relative Feuchte (Isolinien, $g\ kg^{-1}$ bzw. Farbe)

Abbildung 50: Temperatur und Feuchte im Querschnitt senkrecht zur Westföhnströmung am 27.01.2014 um 11:50 UTC. Die Lage des Querschnitts ist in Abbildung 24a gezeigt.

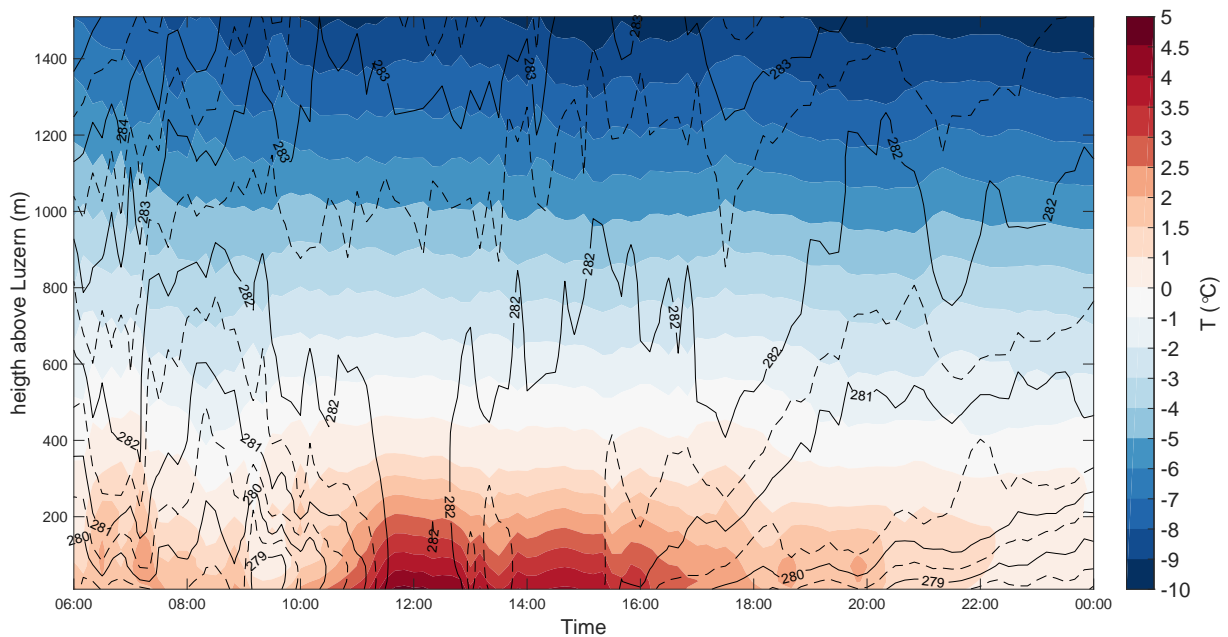


Abbildung 51: Durch das COSMO-1 Modell simulierte Zeitreihe der Temperatur (Farbe) und potentiellen Temperatur (Isolinien, K) über der Messstation Luzern vom 27.01.2014 06 UTC bis 28.01.2014 00 UTC. Diese Abbildung entspricht einem Lidar, der die modellierte Temperatur über Luzern im Laufe der Zeit angibt.

Abbildung 49). Im Gegensatz zu den vorherigen Fallstudien führt der Westföhn am 27.01.2014 aber hauptsächlich zu einer Auslenkung der Isentropen bis in eine Höhe von 1500 m. Darüber ist nur eine leichte Wellenbewegung der Isentropen zu erkennen. In den untersten 800 m der Atmosphäre führt der Westföhn über Luzern praktisch zu einer konstanten potentiellen Temperatur.

Die absolute und potentielle Temperatur im Querschnitt senkrecht zur Strömung in Abbildung 50a zeigt, wie der Einfluss des Westföhns hauptsächlich in den untersten 1000 m der Atmosphäre zu erkennen ist. In den Schichten darüber zeigt sich nur eine schwache Auslenkung der Isentropen. Das Feld der relativen Feuchte in Abbildung 50b zeigt, wie über den Voralpen und über dem Mittelland tiefe feuchte Schichten vorherrschen. Über Luzern ist die Luft etwas trockener und man kann von einem Föhnfenster sprechen. Die tiefen feuchten Schichten sorgen dafür, dass die Luft nur auf eine relative Feuchte von etwa 60% abtrocknet.

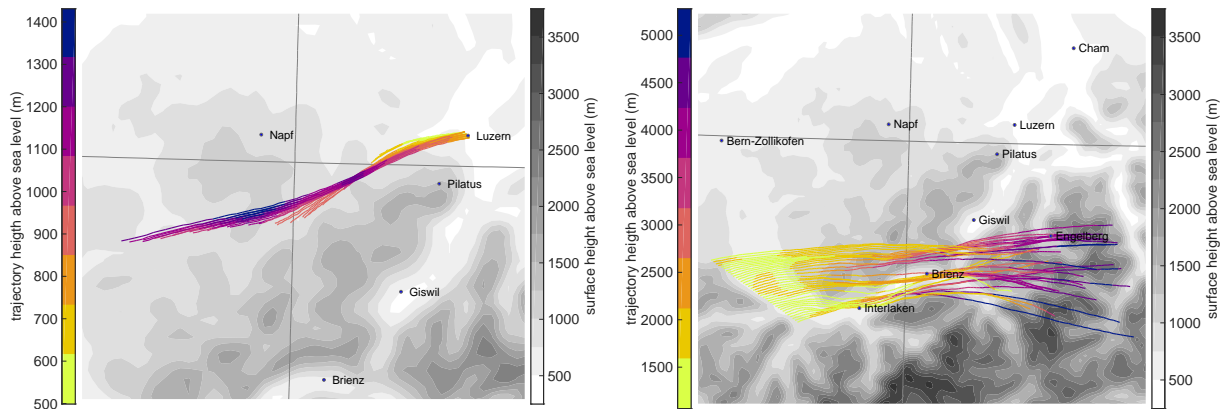
4.3.6 Zeitliche Entwicklung

Die Zeitreihe der absoluten und potentiellen Temperatur über der Station Luzern in Abbildung 51 zeigt, wie durch den Westföhn hauptsächlich die Atmosphäre in den untersten knapp 1000 m beeinflusst wird. Eindrücklich ist die konstante potentielle Temperatur über eine Höhe von 900 m zwischen 11:40 UTC und 12:40 UTC. In einer Höhe von mehr als 1000 m über Boden verändert sich die Temperatur nicht im Verlauf des Tages.

Zwischen 09 UTC und 11 UTC weht in Luzern in der bodennahen Schicht noch ein schwacher Wind aus Südosten (siehe Abbildung C.2). Ab einer Höhe von 200 m nimmt der Wind an Stärke zu, dreht abrupt und kommt aus Westen. Zwischen 11 UTC und 12 UTC dreht dann auch der Wind in Bodennähe auf Westen und die Windgeschwindigkeiten nehmen von 2 m s^{-1} auf knapp 5 m s^{-1} zu.

4.3.7 Trajektorien

Im Gegensatz zu den Trajektorien während des Westföhns am 03.01.2018 und 16.01.2018 kommen die Rückwärts-Trajektorien am 27.01.2014 deutlich weniger entlang der Voralpenkette sondern strömen zwischen den Voralpen und dem Napf nach Luzern herunter (siehe Abbildung 52a). Um 12 UTC kommt die Luft in Luzern in Bodennähe nur aus einer Höhe von etwa 1000 m. Wie die Vorwärts-Trajektorien in Abbildung 52b zeigen, ist die Strömung bei den Alpen eher eine Überströmung als eine Umströmung. Der



(a) Rückwärts-Trajektorien am 27.01.2014 um 12 UTC. Die 28 Trajektorien wurden in Luzern um 12 UTC zwischen 10 und 310 m über Boden mit einem vertikalen Abstand von 50 m und an vier Punkten mit einem horizontalen Abstand von 400 m gestartet und reichen eine Stunde in die Vergangenheit.

(b) Vorwärts-Trajektorien am 27.01.2014 um 11 UTC. Die 36 Trajektorien wurden in der Region des Thunersees auf einer Höhe von 350 m über der Topografie mit einem horizontalen Abstand von 1200 m gestartet und reichen eine Stunde in die Zukunft.

Abbildung 52: Höhe der Trajektorien am 27.01.2014

gleiche Verlauf der Trajektorien konnte auch beim Westföhn am 17.01.2018 (Abschnitt 4.2.7) beobachtet werden.

4.3.8 Vergleich Messungen und Modellvorhersage

In der Realität war der Westföhn durch einen klaren Beginn und ein klares Ende charakterisiert. Dies ist im COSMO-1 Modell nicht der Fall, wo der Westföhn eher schleichend einsetzt. Die Zeitperiode, in welcher der Westföhn im Modell weht, stimmt gut mit der Realität überein. Der Westföhn setzt im Modell in Luzern eine Stunde zu spät ein und hört 40 Minuten zu früh auf. Der Westföhn wehte in der Realität deutlich länger als er durch das COSMO-1 Modell vorhergesagt wurde.

Die Windgeschwindigkeiten während dem Westföhn sind im Modell mit etwa 3 m s^{-1} im Vergleich zu den Messungen mit $6 - 8 \text{ m s}^{-1}$ zu gering. Die relative Feuchte wird im Modell etwa 20% zu hoch vorhergesagt. Wie bereits in den ersten beiden Fallstudien wird auch hier die potentielle Temperatur am Napf ($1 - 2^\circ\text{C}$) und entsprechend die potentielle Temperatur in Luzern ($1 - 3^\circ\text{C}$) und Cham (bis zu 2°C) zu tief vorhergesagt. Die Windrichtung stimmt in diesem Fall gut überein, wird aber tendenziell zu fest aus Süden modelliert.

Während das COSMO-1 Modell für die Station Cham die potentielle Temperatur über zwei Stunden auf dem Niveau der potentiellen Temperatur am Napf simuliert, war in der Realität die potentielle Temperatur nur über 40 Minuten auf dem Niveau des Napfs. Die Ausdehnung des Westföhns am 27.01.2014 wird durch das COSMO-1 Modell also etwas überschätzt.

5 Diskussion

5.1 Häufigkeit der Westföhn-Typen

Im Kapitel 3 wurden die verschiedenen Westföhn-Typen vorgestellt. Neben den drei Fallstudien wurde auch der Westföhn an den weiteren Terminen synoptisch nach dem Warmsektor oder Rückseiten-Typ eingeteilt. Von den insgesamt elf untersuchten Fällen wurden neun Westföhn-Ereignisse als Warmsektor-Typ klassifiziert (siehe Tabelle 3). Drei der Westföhn-Ereignisse können als Rückseiten-Typ klassifiziert werden. Der Westföhn vom 03.01.2018 während dem Sturmtief *Burglind* wurde dabei als Warmsektor-Typ und nach einem kurzen Unterbruch und dem Durchzug der Kaltfront auch als Rückseiten-Typ eingeordnet. Unter diesen betrachteten Westföhn-Terminen trat der Warmsektor-Typ am häufigsten auf. Diese Häufung der Warmsektor-Typen widerspricht der in der Dokumentation von Müller (2017) gemachten Aussage, dass der Rückseiten-Typ häufiger auftritt als der Warmsektor-Typ. Ob die untersuchten Fälle für die Klimatologie repräsentativ sind, ist nicht sicher. Daher kann hier nicht abschliessend beantwortet werden, ob der Warmsektor- oder Rückseiten-Typ häufiger auftritt.

Die einzelnen Westföhn-Fälle treten manchmal nicht als isolierte Phasen auf, sondern es gibt neben dem Hauptereignis weitere Perioden, bei denen ein Westföhn herrscht. Diese Nebentermine zeichnen sich oft durch (1) einen schwachen Westföhn, (2) einen Westföhn, der sich nur über eine sehr kurze Zeitspanne vermag durchzusetzen oder (3) einen Wechsel zwischen Niederschlag und Westföhnströmung aus. Ein sehr anschauliches Beispiel dafür ist die Zeitperiode zwischen dem 16.01.2018 und 19.01.2018 (siehe auch Abbildung D.1). Wie bereits in der Fallstudie diskutiert, zeigte sich der Westföhn am 16.01.2018 mit einigen Unterbrüchen. Am 17.01.2018 wehte dann ein föhnartiger Westwind, der eine leichte Erwärmung und Abtrocknung brachte. Erst wieder am 18.01.2018 ab 12:10 UTC zeigte sich ein starker Westföhn in Luzern.

Diese Perioden, welche über bestimmte Zeitspannen einen Westföhn zeigen oder bei denen der Westwind föhnartige Signale zeigt, können gut durch die länger anhaltenden Westwinde in Europa erklärt werden. Anscheinend werden dabei die Bedingungen für den Westföhn immer wieder und für unterschiedlich lange Sequenzen erreicht und der Westföhn kann sich durchsetzen.

5.2 Horizontale Ausdehnung

Müller (2017) hat in der Dokumentation zum Westföhn das föhnartig erwärmte Gebiet von den Entlebucher Voralpen bis nach Luzern begrenzt (siehe auch Abbildung 3). Wie weit der Westföhn nach Norden vorstossen kann, war nicht bekannt (Müller, 2017). Tabelle 3 zeigt die Westföhndauer an den Stationen Luzern, Emmen und Cham. Für die Station Cham wurden die, durch Müller (2017) für die Station Luzern

Tabelle 3: Westföhnperioden an den verschiedenen Messstation. Niederschlag: vor (v, innerhalb von 6 h), während (w), bei Unterbruch (U) und nach (n, innerhalb von 6 h) dem Westföhn. Hellgraue Werte zeigen Termine an, wo die potentielle Temperatur nicht gemessen wurde und der Beginn und das Ende des Westföhn entsprechend unsicher ist. Das Fragezeichen zeigt fehlende Messdaten für diesen Termin an.

Termin	Typ	Richtung	Niederschlag	Zeitperiode		
				Luzern	Emmen	Cham
27.03.2009	Warmsektor	West	v	11:00 - 17:10	?	10:10 - 17:00
24.11.2009	Warmsektor	West	v	11:40 - 18:10	?	13:50 - 17:30
10.03.2011	Warmsektor	West	-	10:20 - 17:20	?	11:00 - 17:20
27.08.2011	Rückseite	West	v (Cham)	12:30 - 17:40	?	12:30 - 16:10
07.09.2011	Warmsektor	West	-	11:50 - 01:20	09:30 - 20:50	08:50 - 00:20
21.01.2012	Warmsektor	Südwest	v, n	13:50 - 06:10	18:10 - 03:10	19:40 - 04:50
18.09.2013	Warmsektor	Südwest	v, n	03:50 - 15:40	04:10 - 15:00	09:00 - 14:30
27.01.2014	Rückseite	Südwest	v	10:00 - 14:00	09:20 - 13:20	-
03.01.2018	Warmsektor	Südwest	w, n	06:40 - 11:20	07:50 - 11:20	08:30 - 11:10
03.01.2018	Rückseite	Südwest	n	13:20 - 00:20	13:40 - 00:20	14:10 - 00:40
16.01.2018	Warmsektor	Südwest	U, n	06:10 - 03:30	05:50 - 03:20	06:20 - 02:50
18.01.2018	Warmsektor	Südwest	v, n	12:10 - 03:30	10:10 - 01:30	21:50 - 01:10

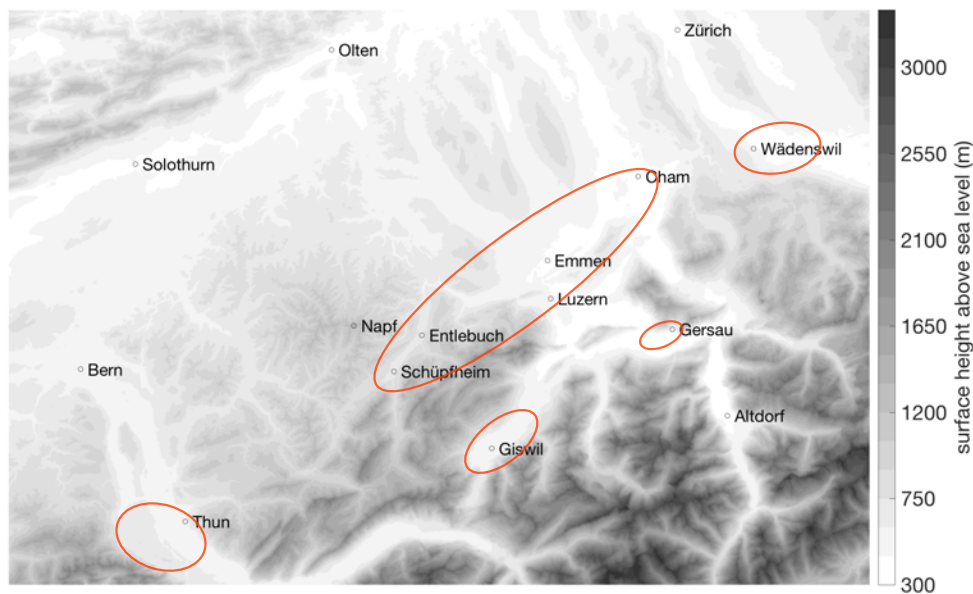


Abbildung 53: Karte der Westföhngebiete um den Vierwaldstättersee und in den weiteren Regionen in den Voralpen. Topografie gemäss swisstopo

definierten, Grenzwerte leicht angepasst. Auch eine potentielle Temperatur 1 - 2 °C tiefer als am Napf wurde bei einem Temperatursprung zu Beginn des Westföhns akzeptiert. Aus der Tabelle 3 ist erkennbar, dass der Westföhn – oder zumindest ein föhnartiger Westwind – auch sehr häufig an der Station Cham weht. Weil die potentielle Temperatur von Luzern aus Richtung Norden und Nordosten abnimmt und die relative Feuchte zunimmt, ist es schwierig, den Westföhn in Cham von anderen Westwinden zu unterscheiden. Dabei kommt erschwerend dazu, dass der Westföhn (im Vergleich zum Südföhn) meistens nur eine geringe Erwärmung und Abtrocknung bringt. In starken Fällen mit entsprechend deutlicher Erwärmung und Abtrocknung kann also gut von einem Westföhn an der Station Cham gesprochen werden.

Der Westföhn setzt meistens zuerst in Luzern ein, bevor er auch in Emmen und zuletzt in Cham durchgreift. Es gibt aber auch Fälle, wo der Westföhn zuerst in Emmen (16.01.2018) oder sogar als erstes in Cham (07.09.2011 und 27.03.2009) einsetzt. Setzt der Westföhn zuerst in Luzern ein, ist es von Fall zu Fall sehr unterschiedlich, wie lange er hat, um sich bis nach Emmen und Cham auszubreiten. Der Westföhn kann sich häufig in Luzern am längsten halten. Wird der Westföhn durch den Durchzug einer Kaltfront beendet, ist das Ende an den Stationen Luzern, Emmen und Cham mehr oder weniger zeitgleich und hängt vom Zeitpunkt des Eintreffens der Kaltfront an den verschiedenen Stationen ab.

Wie Müller (2017) bereits erkannte, weht der Westföhn nicht erst ab Luzern, sondern ist bereits in den Entlebucher Voralpen zu beobachten. Gut zu erkennen ist dies an den Messwerten der Station Schüpfheim. Wenn sich der Westföhn in den tiefen Lagen um Luzern durchsetzen kann, so weht er häufig auch in Schüpfheim.

Neben den Gebieten zwischen den Entlebucher Voralpen, Luzern und Cham kann sich der Westföhn auch in Gersau, am Thunersee, in Obwalden bei Giswil oder am Zürichsee in Wädenswil durchsetzen (siehe Abbildung 53). In Gersau setzt sich der Westföhn nur in starken Fällen durch und ist dort eher über kurze Phasen zu erkennen (siehe Abbildung B.1). Ob sich der Westföhn an der Station Giswil in Obwalden durchsetzt ist von Fall zu Fall verschieden. In den drei Fallstudien zeigt sich im COSMO-1 Modell der Westföhn jeweils auch am Thunersee. Wie häufig und wie stark der Westföhn dort weht, wurde nicht untersucht.

5.3 Windrichtung

Die Messungen während verschiedenen Westföhn-Ereignissen wie auch die Modelldaten der drei Fallstudien haben gezeigt, dass der Westföhn aus zwei leicht unterschiedlichen Richtungen auftreten kann. Einerseits kann der Wind an der SwissMetNet Station Luzern aus 260° - 270° und andererseits mit 240° - 250° stärker

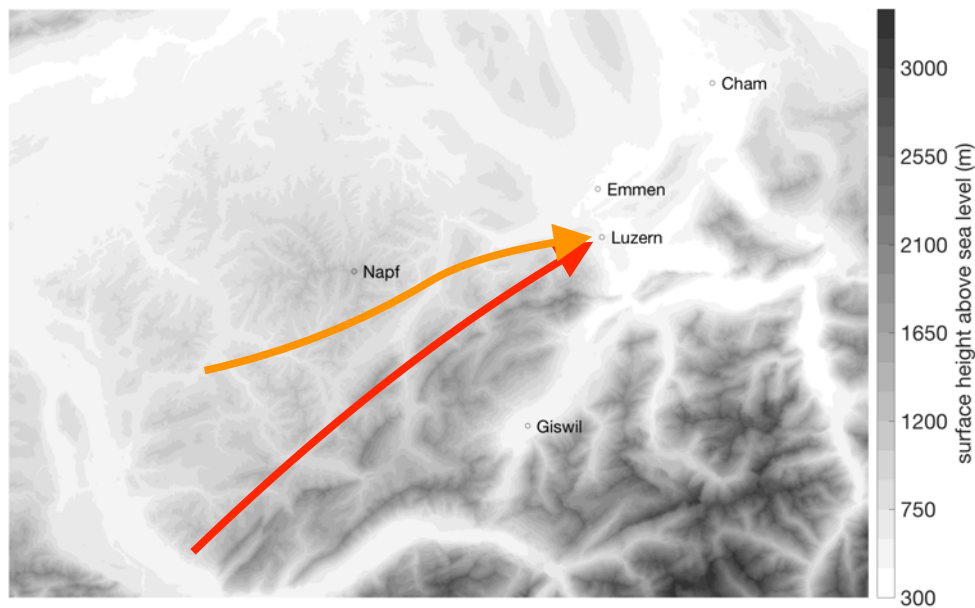


Abbildung 54: Karte der Westföhnströmungen nach Luzern aus $260^\circ - 270^\circ$ (orange) und aus $240^\circ - 250^\circ$ (rot). Topografie gemäss swisstopo

aus Südwesten wehen (siehe Abbildung 54). Im COSMO-1 Modell kommt die Luft beim Westföhn aus $260^\circ - 270^\circ$ zwischen der Voralpenkette und dem Napf nach Luzern herunter und kommt aus einer Höhe von 1000 - 1300 m. Beim Westföhn aus Südwesten strömt die Luft entlang der Nordflanken der Voralpenkette von Hohgant, Schratzenfluh, Schimbrig und Mittagjüpfli und kommt im COSMO-1 Modell aus einer Höhe von 1500 - 2500 m über Meer. Während im COSMO-1 Modell beim Westföhn aus Westen die Luft in Luzern nur knapp das Niveau der potentiellen Temperatur am Napf erreicht und wenig abgetrocknet wird, ist die Abtrocknung und Erwärmung beim Westföhn aus Südwesten durch den grösseren Abstieg stärker.

In der Realität lassen sich zwar die zwei verschiedenen Windrichtungen unterscheiden, für die elf untersuchten Fälle konnten aber keine Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede in den weiteren Eigenschaften des Westföhns abhängig von der Windrichtung ausgemacht werden. So ist der Westföhn aus Südwesten nicht mit einer stärkeren Erwärmung und Abtrocknung verbunden.

5.4 Niederschlag bei Westföhn

Westwindlagen sind oft mit durchziehenden Störungen verbunden, welche Niederschlag in der Schweiz bringen. Weil der Westföhn nur in den unteren Schicht der Atmosphäre wirkt und die Luftmassen nur von Höhen aus 1000 - 2500 m stammen, können die Westwinde Bewölkung und Niederschlag bringen. Tritt Niederschlag während einem Westföhn auf, führt dies zu einer Abkühlung und Anfeuchten der Luft, das Signal des Westföhns ist entsprechend weniger deutlich und nur noch in der Windrichtung und -geschwindigkeit zu erkennen. Im Fall vom Westföhn am 03.01.2018 während dem Sturmtief *Burglind* wehte der Föhn weiter und es kam nur zu einer starken Anfeuchtung und Abkühlung. In diesem Fall kann von einem Dimmerwestföhn gesprochen werden. Der Westföhn vom 16.01.2018 dagegen konnte sich nicht während dem Niederschlag halten und es fanden immer wieder Unterbrüche des Westföhns statt. In den meisten Fällen fällt jedoch nur vor Beginn des Westföhns oder nach dem Ende des Westföhns durch die durchziehende Warm- oder Kaltfront Niederschlag. Wie aus der Tabelle 3 zu sehen ist, konnte an vier Terminen vor dem Westföhn Niederschlag beobachtet werden, an sechs Terminen fiel nach dem Westföhn Niederschlag. Nur an zwei Terminen fiel auch deutlich vor und nach dem Westföhn kein Niederschlag.

6 Zusammenfassung

In dieser Bachelor-Arbeit wurden 11 Westföhn-Perioden, basierend auf Messungen an verschiedenen Stationen um den Vierwaldstättersee, identifiziert. Anhand von operationellen Analysen des ECMWF wurden die verschiedenen Westföhn-Fälle nach der synoptischen Lage eingeteilt. Im Hauptteil der Arbeit wurden drei detaillierte Fallstudien mit der Euler'schen und Lagrang'schen Perspektive zu Westföhn-Ereignissen am 27.01.2014, 03.01.2018 und 16.01.2018 durchgeführt. Dafür wurden 30 h-Vorhersagen des COSMO-1 Modells mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten verwendet.

Der Westföhn kann sich unter ganz verschiedenen Ausprägungen zeigen. Interessant dabei ist, dass häufig vor, während oder nach dem Westföhn Niederschlag fällt. In bestimmten Fällen kann der Niederschlag zu einem Unterbruch des Westföhns führen. In seltenen, starken Fällen kann eine Dimmerwestföhn auftreten, bei dem während dem Westföhn Niederschlag fällt. Trotz des Niederschlags wehen die starken Winde weiter und es findet nur noch eine geringe Abtrocknung auf eine relative Feuchte von etwa 70 % statt. In den meisten Fällen fällt Niederschlag wegen der durchziehenden Warm- oder Kaltfront vor oder nach einem Westföhn-Ereignis.

Das COSMO-1 Modell zeigt Aspekte des Phänomens des Westföhns in der Region von Luzern. Während dem Sturmtief *Burglind* vom 03.01.2018 sagt das COSMO-1 Modell einen starken Westföhn vorher. Auch in den beiden anderen Fallstudien vom 27.01.2014 und 16.01.2018 zeigt das Modell einen Westföhn, das Signal ist aber weniger deutlich ausgeprägt. In den drei untersuchten Fallstudien setzt der Westföhn im COSMO-1 Modell im Vergleich zur Realität zwei mal deutlich zu früh (3 h und 4 h) und ein mal verspätet (40 min) ein. Die Beobachtung, dass das COSMO-Modell den Föhnneinsatz tendenziell zu früh modelliert, hat bereits Wilhelm (2012) zum Nord- und Südföhn im COSMO-2 Modell gemacht. Dabei hat es jedoch eine sehr grosse Bandbreite des Fehlers für das Einsetzen des Föhns zwischen unterschiedlichen Föhnfällen gegeben (Wilhelm, 2012).

Während des Westföhns sagt das COSMO-1 Modell für die Stationen Luzern, Emmen und Cham zu geringe Temperaturen ($\Delta\theta = 1 - 6^\circ\text{C}$), eine zu hohe relative Feuchte ($\Delta\text{RH} \approx 20\%$) und zu niedrige Windgeschwindigkeiten ($\Delta v = 2 - 5 \text{ m s}^{-1}$) vorher. Die zu geringe Erwärmung und Abtrocknung können durch die tiefere Topografie und entsprechend geringeren Abstieg der Luftmassen beim Westföhn erklärt werden. Ein weiterer Grund können die Diffusionsprozesse und die zu starken Austauschprozesse mit der Erdoberfläche im COSMO-1 Modell sein (Hächler et al., 2011). Die horizontale Ausdehnung des Westföhns im COSMO-1 Modell scheint gut mit derjenigen in der Realität übereinzustimmen.

Im Folgenden werden die in der Einleitung gestellten Fragen aufgegriffen und beantwortet:

- Wie gross ist die horizontale Ausdehnung des Westföhns im COSMO-1 Modell und in der Realität?

Der Westföhn zeigt sich nicht nur in Luzern sondern auch fast immer in Emmen. Die Modell-Vorhersagen des COSMO-1 zeigen, dass die horizontale Ausdehnung des Westföhn in allen drei Fallstudien von Luzern bis wenige Kilometer im Nordosten von Emmen reicht. In starken Fällen kann der Westföhn auch bis nach Cham und zum Zugersee vorstossen. Die durch den Westföhn bedingte Erwärmung und Abtrocknung ist von der Station Luzern aus gegen Norden immer geringer. Beim Westföhn nimmt die potentielle Temperatur von Luzern aus Richtung Norden um 1 - 2 °C ab und die relative Feuchte um 5 - 10 % zu. Der Westföhn kann sich auch am Thunersee, in Obwalden, in Gersau, in Wädenswil am Zürichsee und als Appenzellerföhn am oberen Bodensee zeigen.

- Wie sieht die horizontale Struktur des Westföhns im COSMO-1 Modell aus?

Abhängig von der Windrichtung lassen sich in der Region von Luzern im Windfeld unterschiedliche Strömungen identifizieren. Bei Südwestwinden zeigen sich zu bestimmten Zeitpunkten drei verschiedene Strömungen. Die erste Strömung liegt an der Süd- und Ostflanke des Pilatus und zieht weiter nach Norden bis Nordosten. Die anderen beiden Strömungen liegen nördlich des Pilatus und verlaufen von Südwesten nach Nordosten. Nur die zweite Strömung an der Nordflanke des Pilatus verläuft durch Luzern. Bei Westwinden können zwei schwächere Strömungen ausgemacht werden, die nördlich von Luzern liegen und stärker in Ost-West-Richtung verlaufen.

- Wie sieht die vertikale Struktur des Westföhns im COSMO-1 Modell aus?

Die vertikale Struktur des Westföhns im COSMO-1 Modell lässt erkennen, dass sich der Westföhn hauptsächlich in den untersten Schichten der Atmosphäre zeigt. Eine leichte wellenförmige Auslenkung

der Isentropen und der Isolinien der absoluten Feuchte waren auch in Höhen von 2000 - 3000 m noch zu sehen. Eine deutliche Erwärmung und Abtrocknung der Luft konnte in zwei Fällen nur in den untersten 1000 m der Atmosphäre beobachtet werden. An den Hängen stromaufwärts von Luzern zeigen sich durch den Westföhn die höchsten Windgeschwindigkeiten 500 - 700 m über der Topografie. Im Modell findet in Luzern die stärkste Erwärmung und Abtrocknung auf 50 - 200 m über Boden statt.

- Woher und aus welcher Höhe kommt die Luft des Westföhns im COSMO-1 Modell?

Im COSMO-1 Modell lassen sich beim Westföhn zwei unterschiedliche Strömungsrichtungen unterscheiden. Die erste Strömung kommt aus Südwesten und strömt entlang der Nordflanken von Hohgant, Schratzenfluh, Schimbrig und Mittagjüpfli nach Luzern. Die Luft kommt während dem Westföhn aus Südwesten aus einer Höhe von 1500 - 2500 m über Meer. Eine zweite Strömung kommt stärker aus Westen und fließt zwischen dem Napf und den Voralpen nach Luzern. Bei diesem Westföhn aus Westen kommt die Luft aus Höhen von 1000 - 1300 m.

Eine Frage ist mehrfach während dieser Arbeit aufgekommen: Unter welchen Bedingungen kann der Westföhn auftreten? In diesem Zusammenhang stellt sich dann auch die Frage, was die Mechanismen des Westföhns sind. In zukünftigen Studien könnte untersucht werden, was die Bedingungen für den Westföhn sind und ob der Westföhn durch Schwerewellen entsteht.

Weil sich der Westföhn nicht nur in Luzern zeigt, sondern auch in weiteren Regionen entlang der Voralpen und Alpen weht, könnten Fallstudien und Untersuchungen zum Westföhn in diesen Regionen durchgeführt werden. Ausserdem wäre es interessant zu untersuchen, in welchen Regionen und unter welchen Bedingungen es in der Schweiz bei starken Westwinden zu föhnartigen Fallwinden kommen kann.

Um mehr über den Westföhn herauszufinden, wäre es hilfreich eine automatisierte Föhnklassifikation für den Westföhn einzuführen, wie sie schon für den Südföhn besteht (siehe auch Dürr, 2008). Mit einer solchen automatisierten und objektiven Föhnklassifizierung könnte eine gute Klimatologie des Westföhns erstellt und Daten über den Westföhn über einen längeren Zeitraum gesammelt werden.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich zuerst bei André Walser von der Modellierungsgruppe der MeteoSchweiz bedanken. Er hat einzig für diese Bachelor-Arbeit Reruns der 30h-Vorhersage gerechnet und diese mit einer höheren zeitlichen Auflösung von 10 Minuten bereitgestellt.

Ein grosses Dankeschön geht auch an meine beiden Betreuer Michael Sprenger und Eugen Müller. Michael Sprenger hat mich in technischen Belangen unterstützt und hatte immer ein offenes Ohr für meine Fragen. Ausserdem hat er mich durch Hinweise und Korrekturen zu differenzierterem Schreiben angeregt. Eugen Müller möchte ich für die Expertise im Zusammenhang mit dem Westföhn und die kritischen aber konstruktiven Fragen und Rückmeldungen während dem Erstellen dieser Arbeit danken. Das Schreiben der Arbeit und die Diskussionen über den Westföhn während den Treffen haben mir viel Freude bereitet und einen Einblick in das wissenschaftliche Arbeiten ermöglicht.

Abschliessend danke ich meinen Eltern, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und meiner Familie, dass sie stets Zeit fand, Teile der Arbeit gegenzulesen.

Literatur

- Beusch, L., Raveh-Rubin, S., Sprenger, M., & Papritz, L. (2018). Dynamics of a Puelche foehn event in the Andes. *Meteorologische Zeitschrift*, 27(1), 67–80.
- Billwiller, R. (1904). *Der Bergeller Nordföhn*. Druck von Zürcher & Furrer. 55 pp.
- Bolton, D. (1980). The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, 108(7), 1046–1053.
- Bouët, M. (1951). Le foehn en valais. *Bulletin de la Murithienne*, 68, 54–74.
- Brinkmann, W. A. R. (1971). What is a foehn? *Weather*, 26(6), 230–240.
- Cetti, C. (2015). Climatology of Alpine north foehn. Master's thesis, ETH Zürich. 76 pp.
- Drobinski, P., Steinacker, R., Richner, H., Baumann-Stanzer, K., Beffrey, G., Benech, B., Berger, H., Chimani, B., Dabas, A., Dorninger, M., et al. (2007). Föhn in the Rhine Valley during MAP: A review of its multiscale dynamics in complex valley geometry. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133(625), 897–916.
- Dürr, B. (2008). *Automatisiertes Verfahren zur Bestimmung von Foehn in Alpentaälern*. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz. 13 pp.
- Elvidge, A. D. & Renfrew, I. A. (2016). The causes of foehn warming in the lee of mountains. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(3), 455–466.
- Frey, K. (1953). Die Entwicklung des Süd- und des Nordföhns. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie A*, 5(4), 432–477.
- Gerstgrasser, D. (2017). Dokumentation Südföhn. Dokumentation, MeteoSchweiz. 59 pp.
- Gohm, A., Siller, M., & Bär, J. (2015). Nature and climatology of Pfänderwind. *Meteorologische Zeitschrift*, 24, 243–259.
- Güller, A. (1977). *Der aussergewöhnliche Föhnsturm vom 13. Februar 1976 in der Ostschweiz*. Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, No. 69. Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt. 16 pp.
- Gutermann, T. (1970). *Vergleichende Untersuchungen zur Föhnhäufigkeit im Rheintal zwischen Chur und Bodensee*. City-Druck AG. 68 pp.
- Gutermann, T., Dürr, B., Richner, H., & Bader, S. (2012). *Föhnklimatologie Altdorf: die lange Reihe (1864-2008) und ihre Weiterführung, Vergleich mit anderen Stationen*. Fachbericht MeteoSchweiz, 241. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz. 53 pp.
- Hächler, P., Burri, K., Dürr, B., Gutermann, T., Neururer, A., Richner, H., & Werner, R. (2011). Der Föhnfall vom 8. Dezember 2006 – eine Fallstudie. *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz*, 234. 56 pp.
- Hann, J. (1866). Zur Frage über den Ursprung des Föhns. *Zeit. Osterreich Ges. Met*, 1, 257–263.
- Hann, J. (1901). *Lehrbuch der Meteorologie von Julius Hann*. Chr. Herm. Tauchnitz. 329–338.
- Mayr, G. J. & Armi, L. (2008). Föhn as a response to changing upstream and downstream air masses. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 134(635), 1357–1369.
- MeteoSchweiz (2018). *Der Wintersturm Burglind/Eleanor in der Schweiz*. Fachbericht MeteoSchweiz, 268. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz. 35 pp.
- Miltenberger, A. K., Reynolds, S., & Sprenger, M. (2016). Revisiting the latent heating contribution to foehn warming: Lagrangian analysis of two foehn events over the swiss alps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(698), 2194–2204.

- Müller, E. (2017). Westföhn am Vierwaldstättersee. Dokumentation, MeteoSchweiz. 12 pp.
- Richner, H. & Dürr, B. (2015). Facts and fallacies related to dimmerfoehn. Technical report, ETH Zürich. 4 pp.
- Richner, H. & Hächler, P. (2013). Understanding and forecasting Alpine foehn. In *Mountain Weather Research and Forecasting* (pp. 219–260). Springer.
- Schär, C., Leuenberger, D., Fuhrer, O., Lüthi, D., & Girard, C. (2002). A new terrain-following vertical coordinate formulation for atmospheric prediction models. *Monthly Weather Review*, 130(10), 2459–2480.
- Schättler, U., Doms, G., & Schraff, C. (2008). A description of the nonhydrostatic regional COSMO-model part VII: users guide. Technical report, Deutscher Wetterdienst. 175 pp.
- Schemm, S., Sprenger, M., & Wernli, H. (2018). When during their life cycle are extratropical cyclones attended by fronts? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(1), 149–165.
- Sprenger, M., Dürr, B., & Richner, H. (2016). Foehn studies in Switzerland. In *From weather observations to atmospheric and climate sciences in Switzerland: Celebrating 100 years of the Swiss Society for Meteorology: A book of the Swiss Society for Meteorology*. chapter 11, (pp. 215–247). vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich.
- Sprenger, M. & Schär, C. (2001). Rotational aspects of stratified gap flows and shallow föhn. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 127(571), 161–187.
- Sprenger, M. & Wernli, H. (2015). The lagranto lagrangian analysis tool - version 2.0. *Geoscientific Model Development*, 8(8), 2569–2586.
- Steinacker, R. (2006). Alpiner Föhn – eine neue Strophe zu einem alten Lied. *Promet*, 32(1/2), 3–10.
- Stappeler, J., Doms, G., Schättler, U., Bitzer, H., Gassmann, A., Damrath, U., & Gregoric, G. (2003). Meso-gamma scale forecasts using the nonhydrostatic model Im. *Meteorology and atmospheric Physics*, 82(1-4), 75–96.
- Streiff-Becker, R. (1930). *Altes und Neues über den Glarner-Föhn*. Glarus: Naturforschende Gesellschaft des Kantons Glarus. 51 pp.
- Wernli, H. & Davies, H. C. (1997). A lagrangian-based analysis of extratropical cyclones. I: The method and some applications. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123(538), 467–489.
- Wilhelm, M. (2012). COSMO-2 Model Performance in Forecasting Foehn: A Systematic Process-oriented Verification. Master's thesis, ETH Zürich. 55 pp.
- WMO (1992). *International meteorological vocabulary = Vocabulaire météorologique internationale = Meždunarodni meteorološki slovar = Vocabulario meteorológico internacional* (Second ed. ed.), volume no. 182, Ed. 2 of WMO/OMM/BMO. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization.
- Würsch, M. & Sprenger, M. (2015). Swiss and austrian foehn revisited: A lagrangian-based analysis. *Meteorologische Zeitschrift*, 24(3), 225–242.

Anhang A Westföhn am 03.01.2018

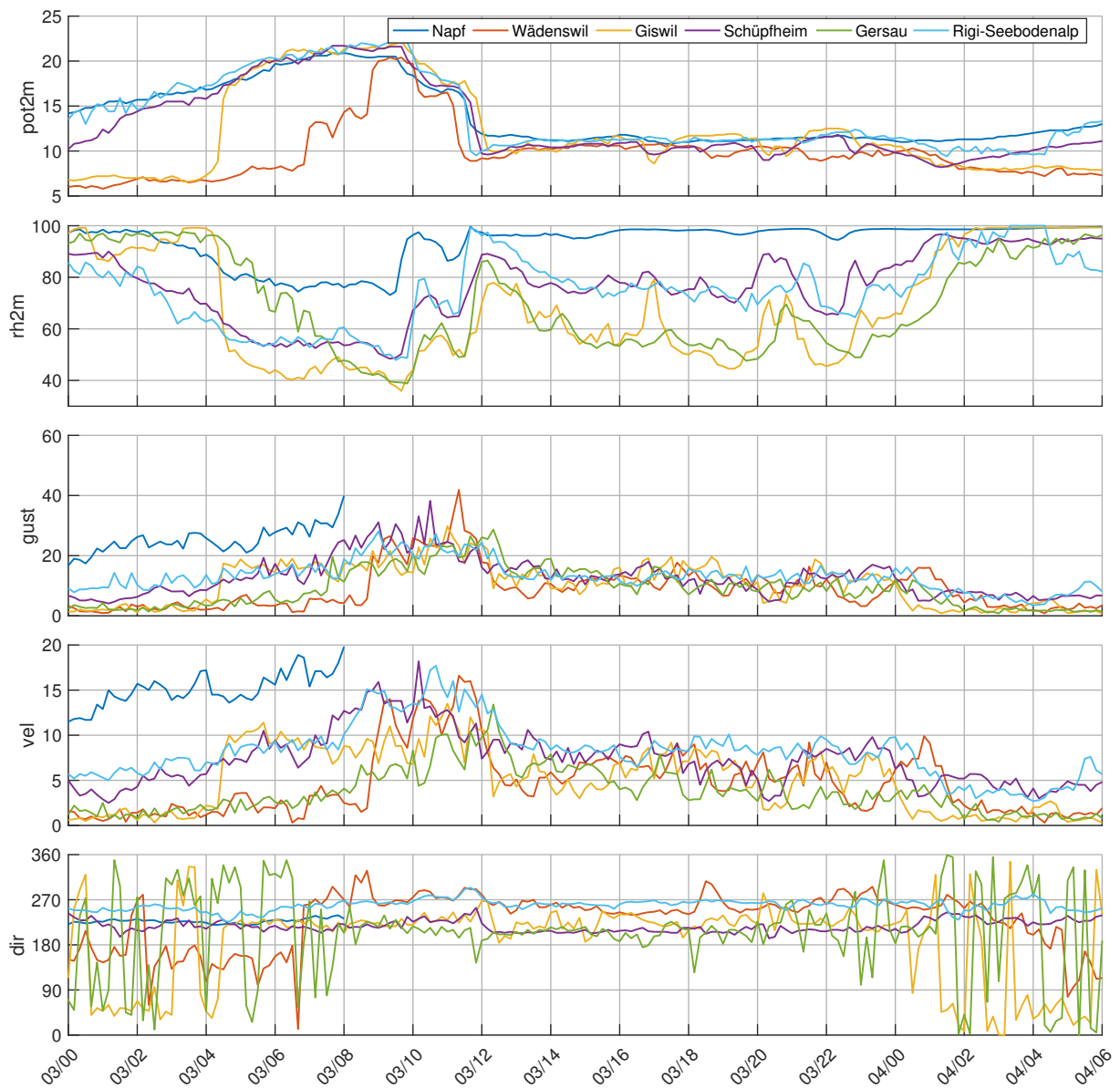


Abbildung A.1: 10-Minuten Messwerte an den SwissMetNet-Stationen Napf, Wädenswil, Giswil, Schüpheim und Gersau und der Messstation Rigi, Seebodenalp vom 03.01.2018 00 UTC bis 04.01.2018 06 UTC. pot2m: potentielle Temperatur 2 m über Boden ($^{\circ}\text{C}$); rh2m: relative Feuchte 2 m über Boden (%); gust: Maximum der Böenspitzen (1-Sekunden Messwerte) über 10 Minuten (m s^{-1}); vel: Skalar der Windgeschwindigkeit, 10-Minuten Mittel (m s^{-1}); dir: Windrichtung, 10-Minuten Mittel ($^{\circ}$).

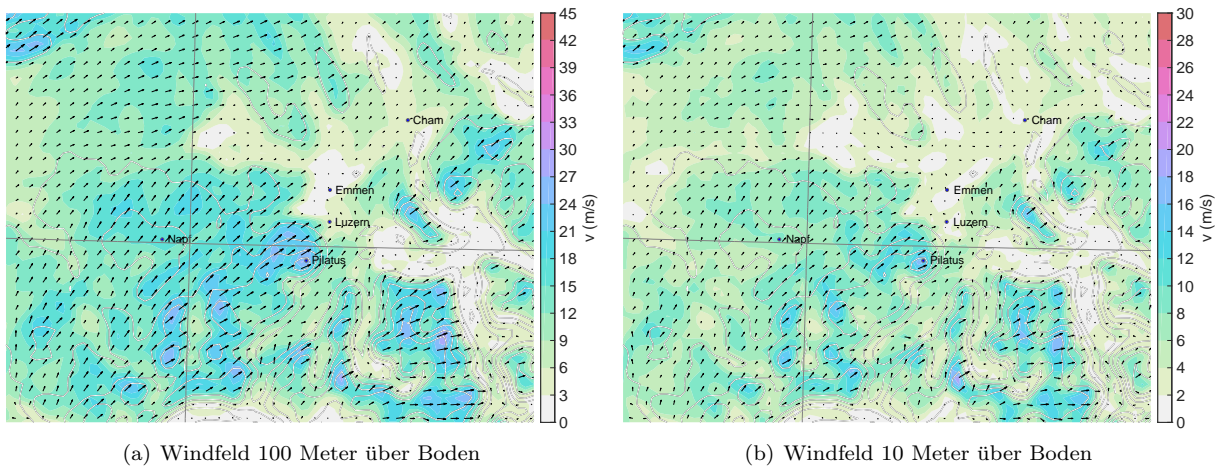


Abbildung A.2: Skalar der Windgeschwindigkeit (Farbe), Windvektoren und Höhenlinien am 03.01.2018 um 03:30 UTC

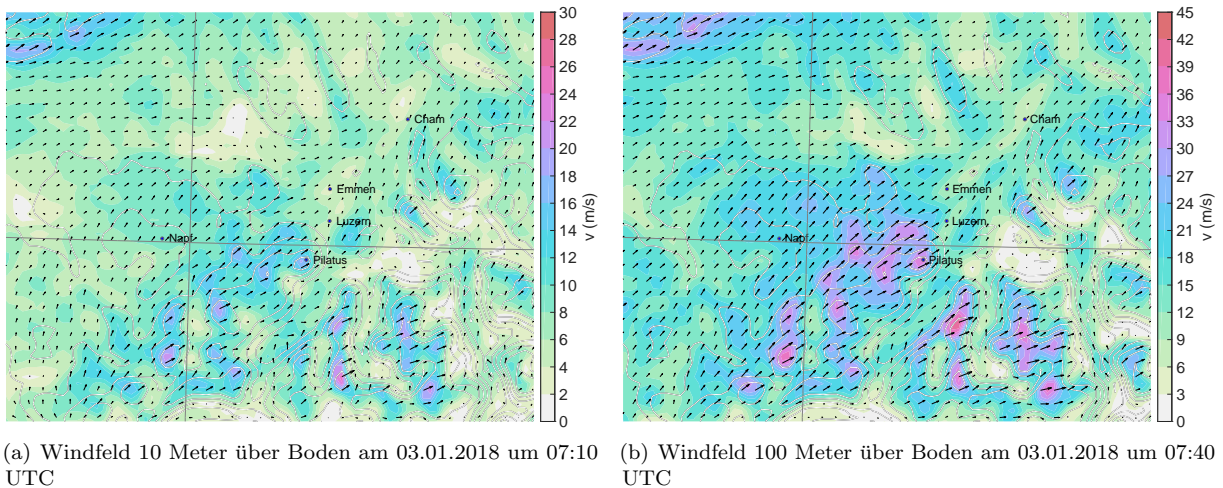
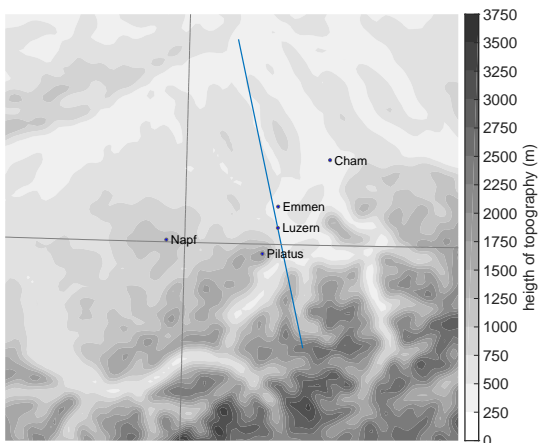


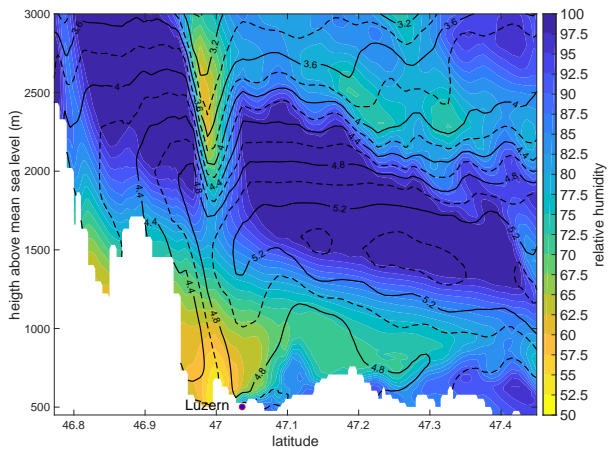
Abbildung A.3: Skalar der Windgeschwindigkeit (Farbe), Windvektoren und Höhenlinien am 03.01.2018 um 07:10 UTC und 07:40 UTC.

Tabelle 4: Koordinaten, Höhe, Skalar der Windgeschwindigkeit, absolute und potentielle Temperatur sowie relative und absolute Feuchte entlang einer Rückwärts-Trajektorie. Die Trajektorie wurde am 03.01.2018 um 07 UTC 100 m über der Messstation Luzern gestartet und reicht eine Stunde in die Vergangenheit.

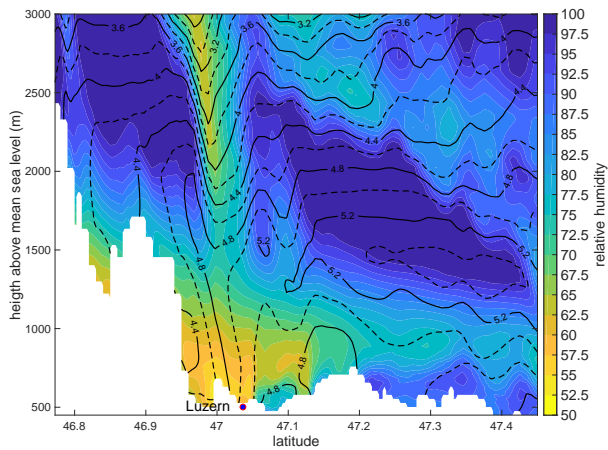
Uhrzeit (UTC)	lon (°)	lat (°)	Höhe (m)	v (ms^{-1})	T ($^{\circ}\text{C}$)	θ ($^{\circ}\text{C}$)	RH (%)	q (g m^{-3})
06:00	7.59	46.67	1957	25.1	1.2	19.7	97	5.0
06:05	7.68	46.70	1811	26.5	2.5	19.7	90	5.1
06:10	7.77	46.73	2238	23.5	-1.1	20.2	100	4.6
06:15	7.84	46.77	1785	21.9	2.5	19.4	89	5.0
06:20	7.91	46.81	1263	22.0	7.7	19.5	67	5.1
06:25	7.97	46.85	1644	21.0	3.3	19.0	87	5.1
06:30	8.02	46.88	1334	16.5	6.4	18.9	73	5.1
06:35	8.08	46.91	1702	21.1	2.4	18.7	91	5.0
06:40	8.14	46.95	1453	19.9	4.6	18.4	82	5.1
06:45	8.20	46.97	1544	13.9	3.7	18.5	87	5.2
06:50	8.24	47.00	1236	17.9	6.4	18.3	76	5.3
06:55	8.28	47.02	774	10.1	11.0	18.4	60	5.4
07:00	8.30	47.04	591	9.8	12.7	18.2	55	5.4



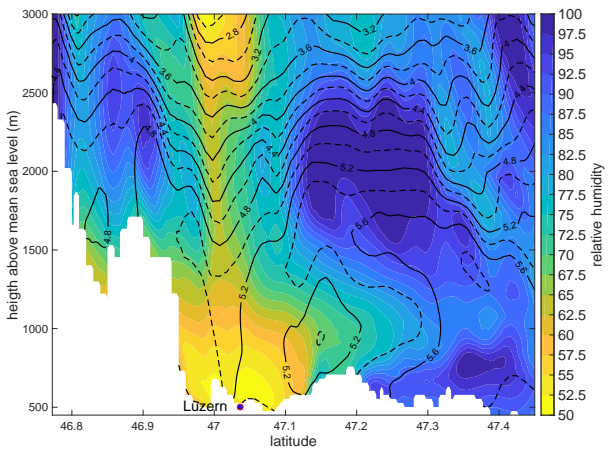
(a) Lage des Querschnitts (blaue Linie) senkrecht zur Westföhnströmung



(b) 03.01.2018 03:30 UTC



(c) 03.01.2018 04:00 UTC



(d) 03.01.2018 07:50 UTC

Abbildung A.4: Lage des Querschnitts und absolute und relative Feuchte (Isolinien, g kg^{-1} bzw. Farbe) im Querschnitt senkrecht zur Westföhnströmung am 03.01.2018 um 03:30 UTC, 04:00 UTC und 07:50 UTC

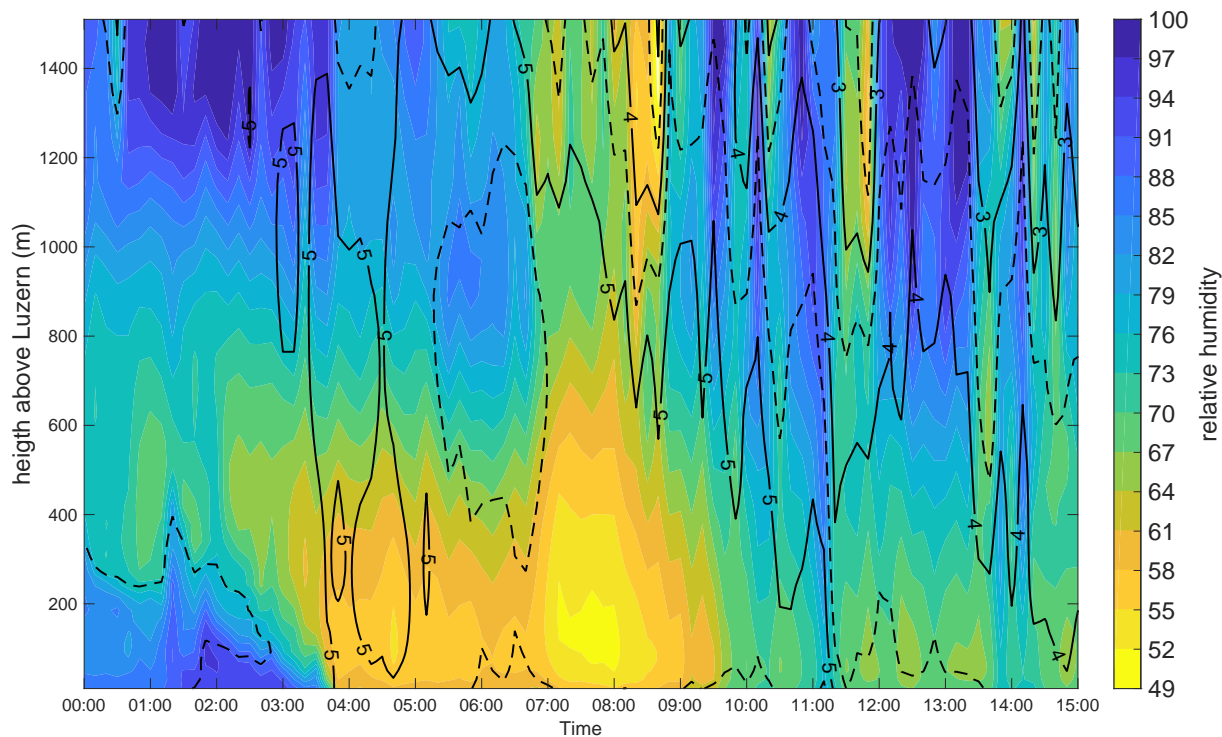


Abbildung A.5: Durch das COSMO-1 Modell simulierte Zeitreihe der absoluten und relativen Feuchte (Isolinien, g kg^{-1} bzw. Farbe) über der Messtation Luzern am 03.01.2018 von 00 UTC bis 15 UTC. Diese Abbildung entspricht einem Lidar, der die modellierte Feuchte über Luzern im Laufe der Zeit angibt.

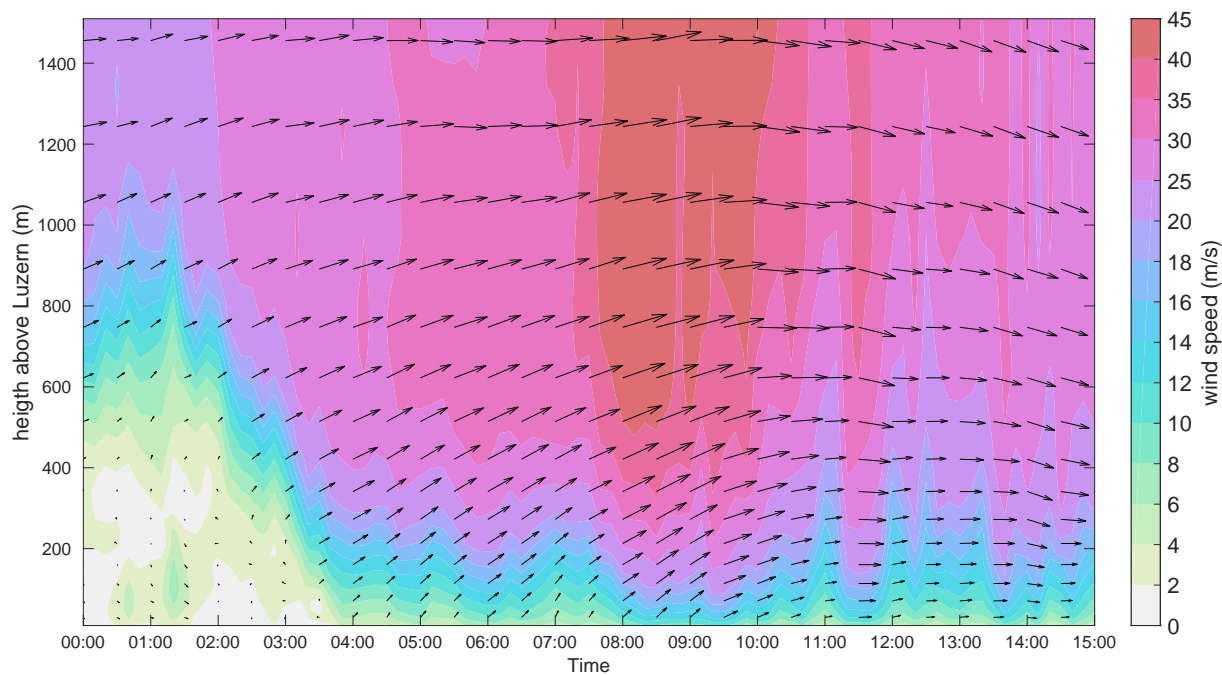


Abbildung A.6: Durch das COSMO-1 Modell simulierte Zeitreihe des Skalars der Windgeschwindigkeit (Farbe) und der horizontalen Windvektoren über der Messtation Luzern am 03.01.2018 von 00 UTC bis 15 UTC. Diese Abbildung entspricht einem Lidar, der das modellierte Windfeld über Luzern im Laufe der Zeit angibt.

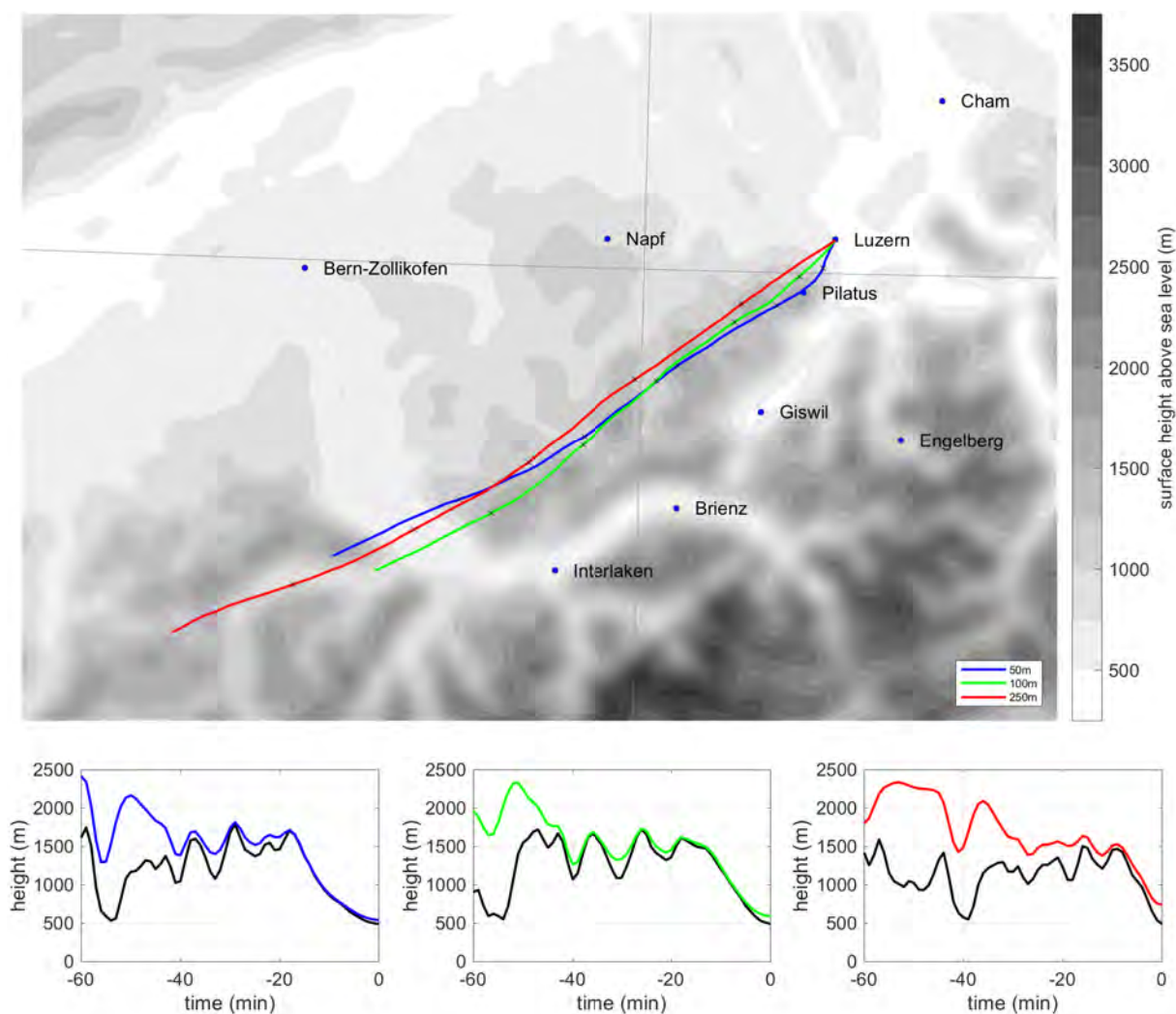
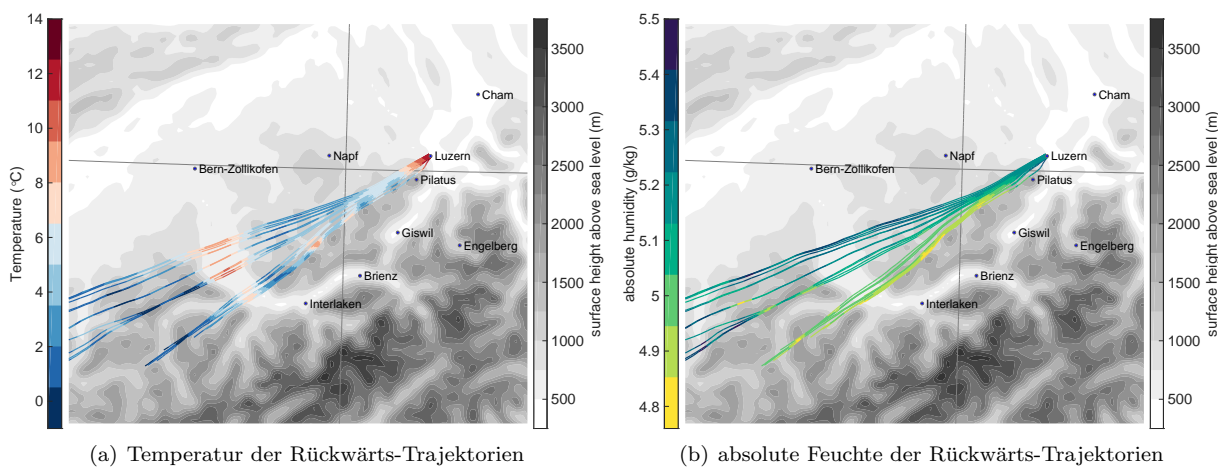


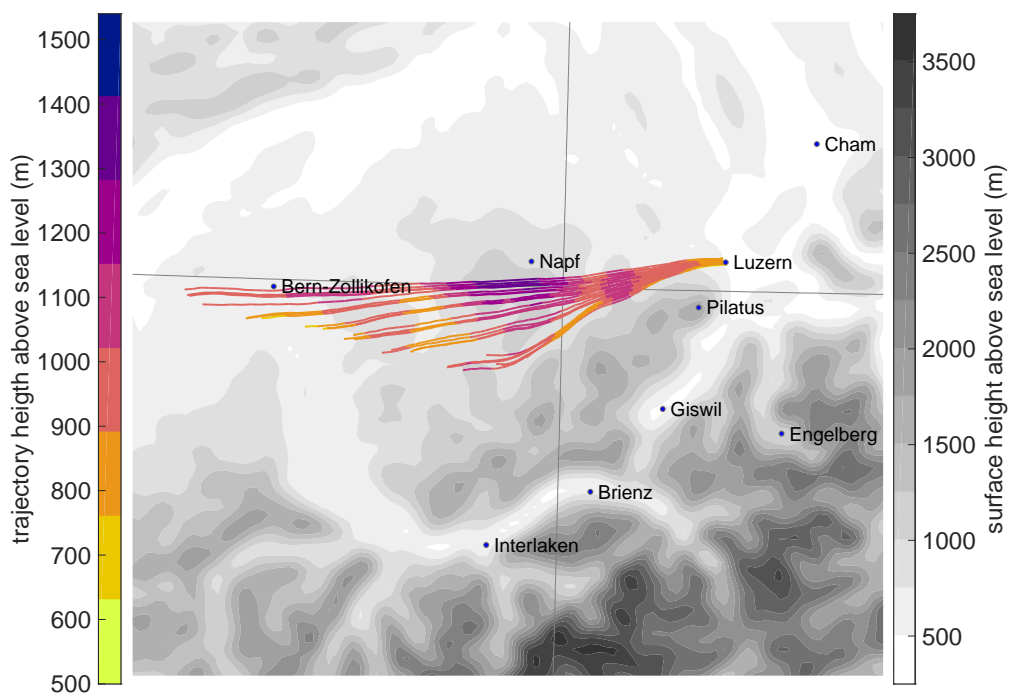
Abbildung A.7: Höhe der Rückwärts-Trajektorien am 03.01.2018. Die Trajektorien wurden um 07 UTC auf 50 (blau), 100 (grün) und 250 m (rot) über der Messstation Luzern gestartet und reichen eine Stunde in die Vergangenheit. Die kleinen Grafiken zeigen die Höhe der Trajektorien und der Topografie unterhalb der Trajektorien in Abhängigkeit der Zeit.



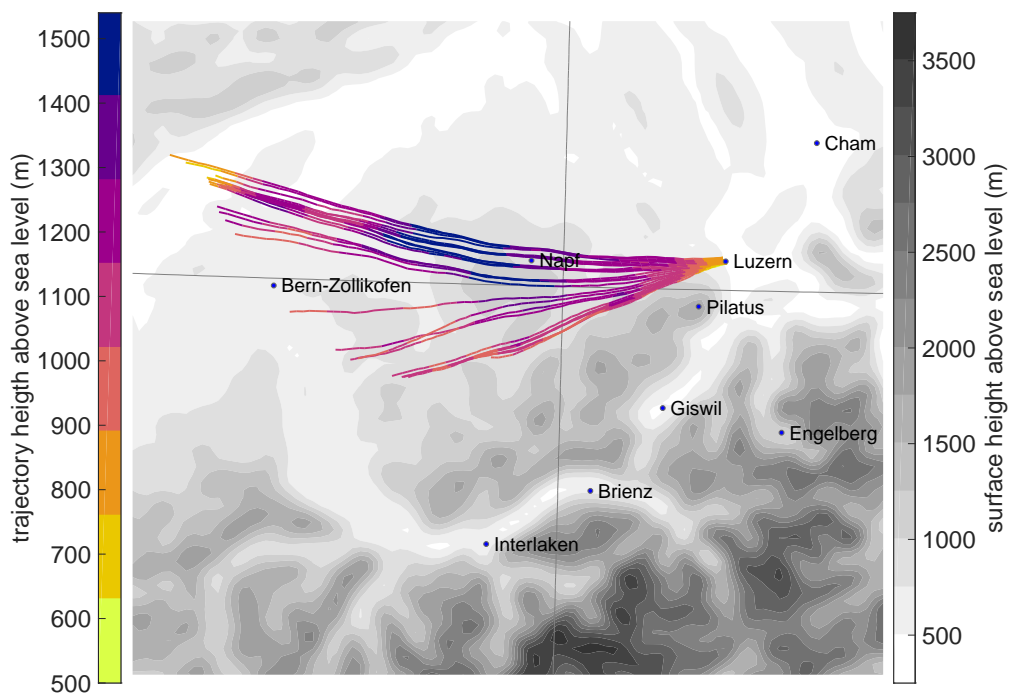
(a) Temperatur der Rückwärts-Trajektorien

(b) absolute Feuchte der Rückwärts-Trajektorien

Abbildung A.8: Rückwärts-Trajektorien am 03.01.2018. Die 28 Trajektorien wurden in Luzern um 08 UTC zwischen 10 und 310 m über Boden mit einem vertikalen Abstand von 50 m und an vier Punkten mit einem horizontalen Abstand von 400 m gestartet und reichen eine Stunde in die Vergangenheit.



(a) Höhe der Rückwärts-Trajektorien gestartet um 13 UTC



(b) Höhe der Rückwärts-Trajektorien gestartet um 19 UTC

Abbildung A.9: Höhe der Rückwärts-Trajektorien am 03.01.2018. Die 28 Trajektorien wurden in Luzern zwischen 10 und 310 m über Boden mit einem vertikalen Abstand von 50 m und an vier Punkten mit einem horizontalen Abstand von 400 m gestartet und reichen eine Stunde in die Vergangenheit.

Anhang B Westföhn am 16.01.2018

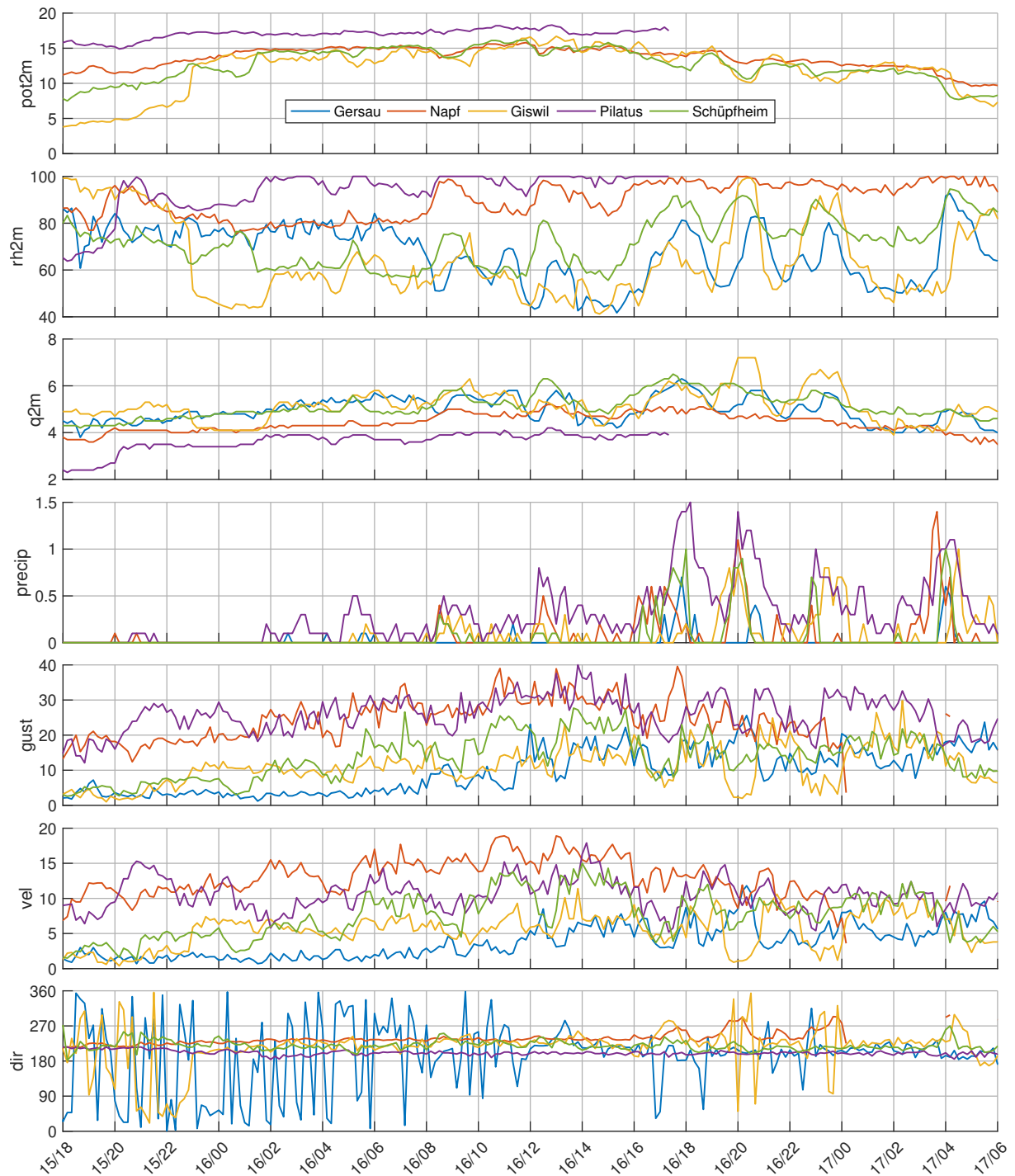
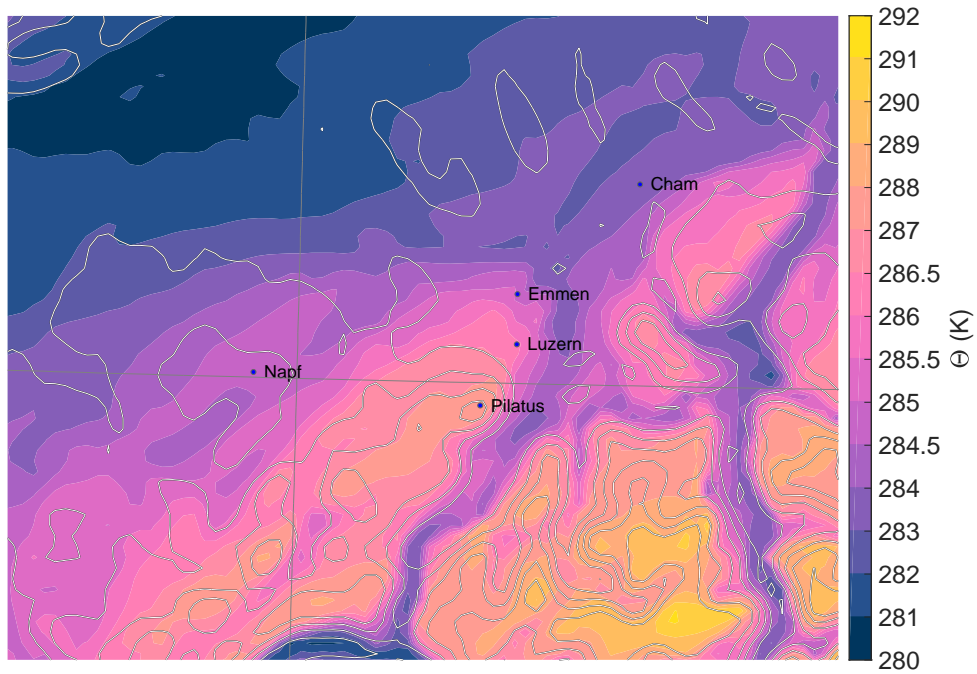
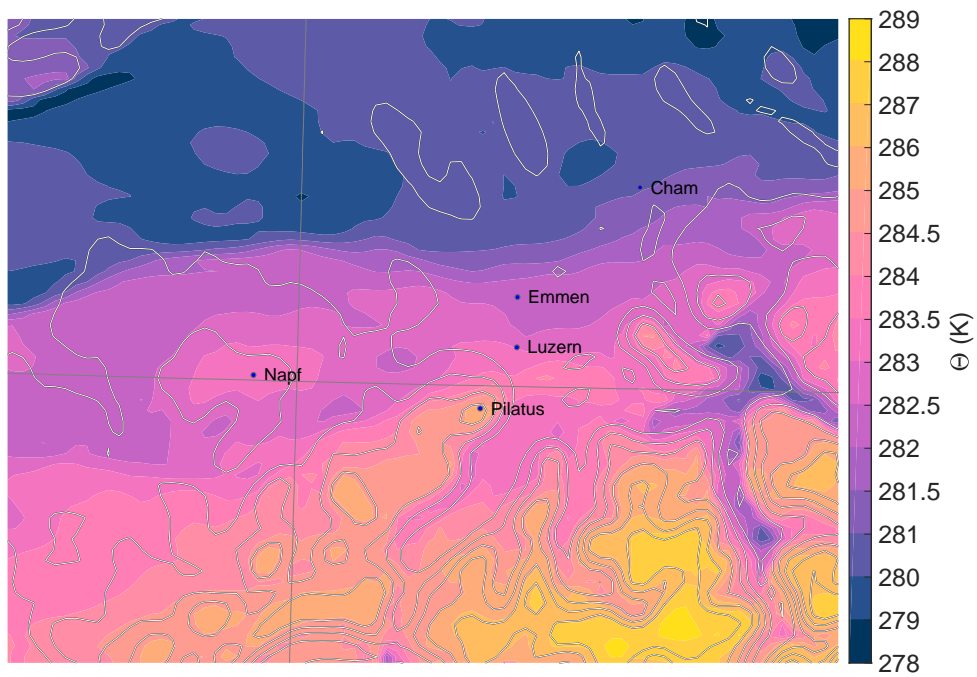


Abbildung B.1: 10-Minuten Messwerte an den SwissMetNet-Stationen Gersau, Napf, Giswil, Pilatus und Schüpfheim vom 15.01.18 18 UTC bis 17.01.18 06 UTC. pot2m: potentielle Temperatur 2 m über Boden ($^{\circ}\text{C}$); rh2m: relative Feuchte 2 m über Boden (%); q2m: absolute Luftfeuchte 2 m über Boden (g m^{-3}); precip: 10-Minuten Summe des Niederschlags (mm); gust: Maximum der Böenspitzen (1-Sekunden Messwerte) über 10 Minuten (m s^{-1}); vel: Skalar der Windgeschwindigkeit, 10-Minuten Mittel (m s^{-1}); dir: Windrichtung, 10-Minuten Mittel ($^{\circ}$).



(a) 16.01.2018 05:20 UTC



(b) 17.01.2018 00:50 UTC

Abbildung B.2: potentielle Temperatur 50 m über Boden am 16.01.2018 und 17.01.2018 in der Region um den Vierwaldstättersee

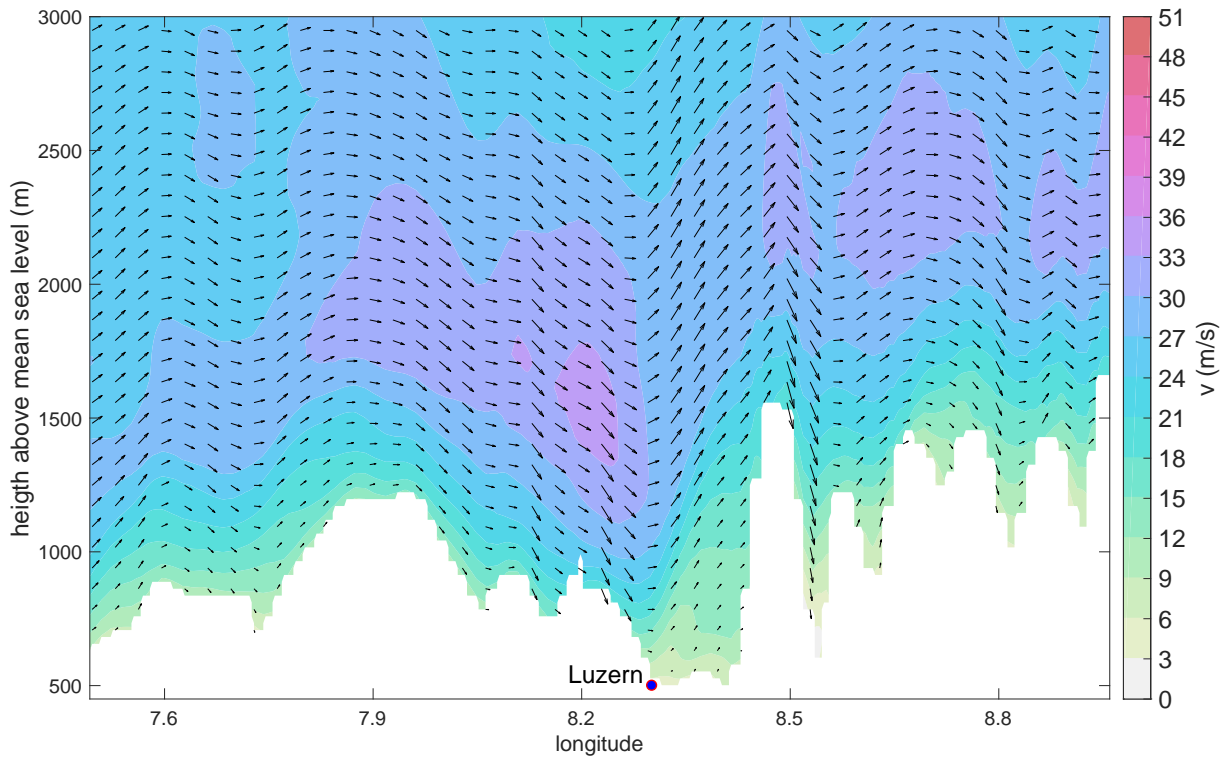


Abbildung B.3: Skalar der Windgeschwindigkeit (Farbe) und Windvektoren innerhalb der Querschnittsebene entlang der Westföhnströmung am 16.01.2018 um 03:20 UTC. Die Lage des Querschnitts ist in Abbildung 40a gezeigt.

Tabelle 5: Koordinaten, Höhe, Skalar der Windgeschwindigkeit, absolute und potentielle Temperatur sowie relative und absolute Feuchte entlang einer Rückwärts-Trajektorie. Die Trajektorie wurde am 17.01.2018 um 01 UTC 100 m über der Messstation Luzern gestartet und reicht eine Stunde in die Vergangenheit.

Uhrzeit (UTC)	lon (°)	lat (°)	Höhe (m)	v (ms^{-1})	T (°C)	θ (°C)	RH (%)	q (g m^{-3})
00:00	7.68	46.86	1144	16.9	0.2	11.0	86	3.8
00:05	7.74	46.88	1079	15.3	0.7	10.9	84	3.8
00:10	7.80	46.89	992	14.8	1.6	10.9	79	3.8
00:15	7.85	46.91	1033	14.4	1.0	10.7	84	3.9
00:20	7.91	46.92	1100	14.4	0.2	10.6	88	3.9
00:25	7.96	46.93	1016	14.5	1.0	10.6	84	3.9
00:30	8.01	46.95	923	14.8	1.6	10.2	83	4.0
00:35	8.06	46.97	928	14.2	1.4	10.2	84	4.0
00:40	8.11	46.99	1097	13.7	-0.3	10.2	94	4.0
00:45	8.16	47.01	895	13.4	1.6	10.0	84	4.0
00:50	8.21	47.02	905	14.6	1.2	9.8	88	4.1
00:55	8.26	47.03	723	12.2	3.0	9.7	79	4.0
01:00	8.30	47.04	591	11.3	4.1	9.6	75	4.1

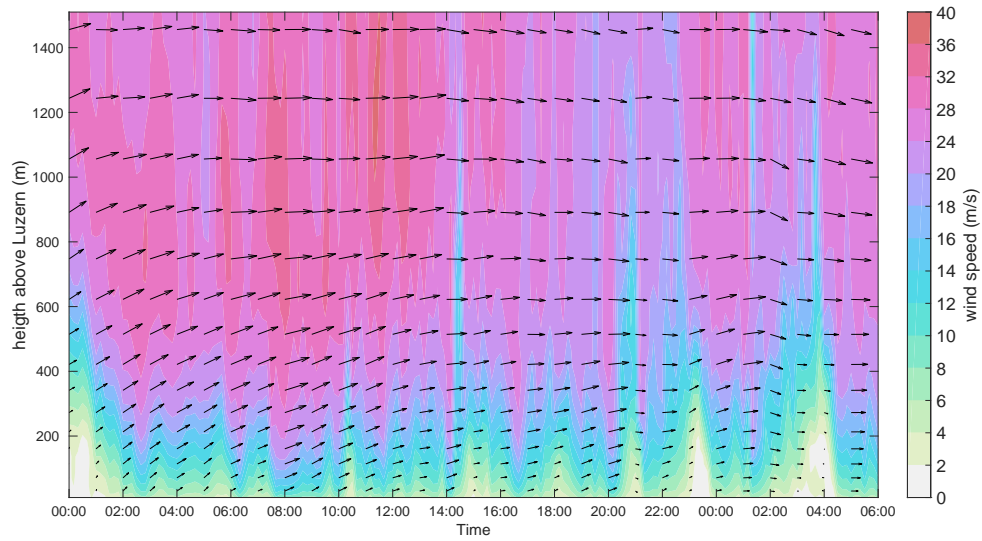


Abbildung B.4: Durch das COSMO-1 Modell simulierte Zeitreihe des Skalars der Windgeschwindigkeit (Farbe) und der horizontalen Windvektoren über der Messtation Luzern vom 16.01.2018 00 UTC bis 17.01.2018 06 UTC. Diese Abbildung entspricht einem Lidar, der das modellierte Windfeld über Luzern im Laufe der Zeit angibt.

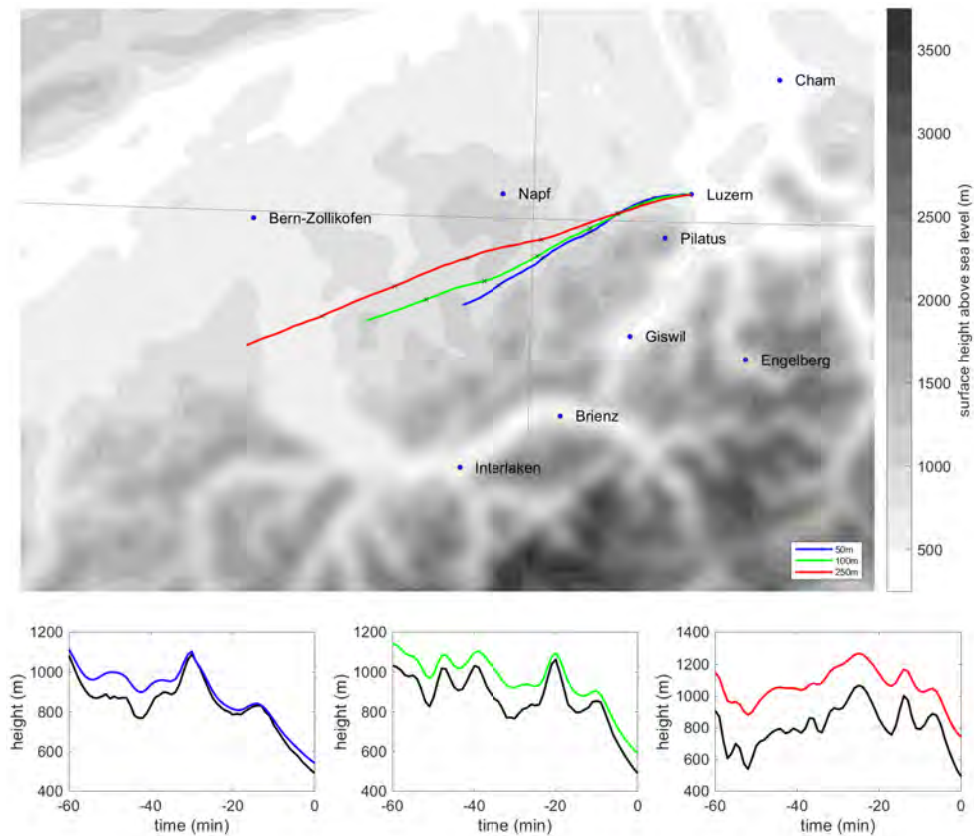


Abbildung B.5: Höhe der Rückwärts-Trajektorien am 17.01.2018. Die Trajektorien wurden um 07 UTC auf 50 (blau), 100 (grün) und 250 m (rot) über der Messtation Luzern gestartet und reichen eine Stunde in die Vergangenheit. Die kleinen Grafiken zeigen die Höhe der Trajektorien und der Topografie unterhalb der Trajektorien in Abhängigkeit der Zeit.

Anhang C Westföhn am 27.01.2014



Abbildung C.1: 10-Minuten Messwerte an den SwissMetNet-Stationen Pilatus, Napf, Giswil und Schüpfheim vom 27.01.2018 00 UTC bis 28.01.2018 06 UTC. pot2m: potentielle Temperatur 2 m über Boden ($^{\circ}\text{C}$); rh2m: relative Feuchte 2 m über Boden (%); q2m: absolute Luftfeuchte 2 m über Boden (g m^{-3}); precip: 10-Minuten Summe des Niederschlags (mm); gust: Maximum der Böenspitzen (1-Sekunden Messwerte) über 10 Minuten (m s^{-1}); vel: Skalar der Windgeschwindigkeit, 10-Minuten Mittel (m s^{-1}); dir: Windrichtung, 10-Minuten Mittel ($^{\circ}$).

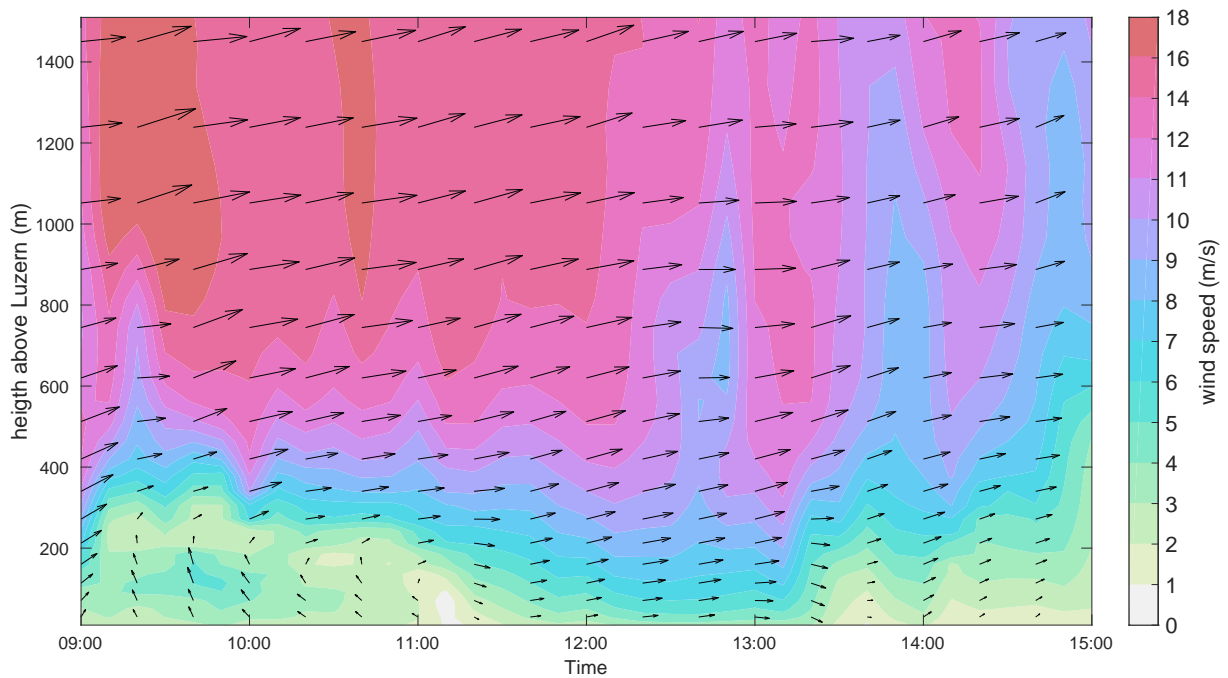


Abbildung C.2: Durch das COSMO-1 Modell simulierte Zeitreihe des Skalars der Windgeschwindigkeit (Farbe) und der horizontalen Windvektoren über der Messtation Luzern am 27.01.2014 von 09 UTC bis 15 UTC. Diese Abbildung entspricht einem Lidar, der das modellierte Windfeld über Luzern im Laufe der Zeit angibt.

Anhang D Diskussion

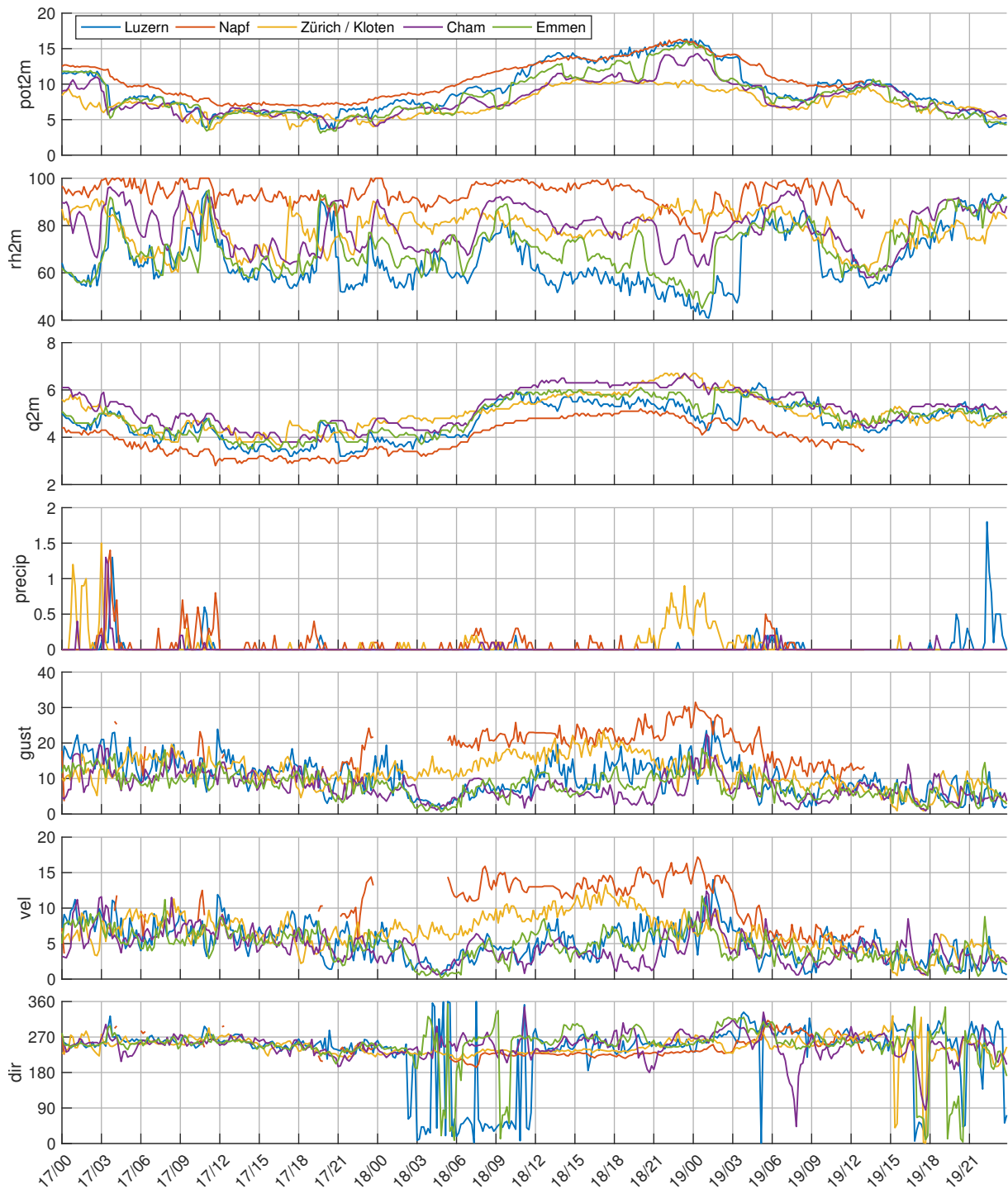


Abbildung D.1: 10-Minuten Messwerte an den SwissMetNet-Stationen Luzern, Napf, Zürich-Kloten, Cham und der Messtation Emmen vom 17.01.2018 00 UTC bis 19.01.2018 23:50 UTC. pot2m: potentielle Temperatur 2 m über Boden ($^{\circ}\text{C}$); rh2m: relative Feuchte 2 m über Boden (%); q2m: absolute Luftfeuchte 2 m über Boden (g m^{-3}); precip: 10-Minuten Summe des Niederschlags (mm); gust: Maximum der Böenspitzen (1-Sekunden Messwerte) über 10 Minuten (m s^{-1}); vel: Skalar der Windgeschwindigkeit, 10-Minuten Mittel (m s^{-1}); dir: Windrichtung, 10-Minuten Mittel ($^{\circ}$).

MeteoSchweiz
Operation Center 1
CH-8044 Zürich-Flughafen
T +41 58 460 99 99
www.meteoschweiz.ch

MeteoSvizzera
Via ai Monti 146
CH-6605 Locarno Monti
T +41 58 460 97 77
www.meteosvizzera.ch

MétéoSuisse
7bis, av. de la Paix
CH-1211 Genève 2
T +41 58 460 98 88
www.meteosuisse.ch

MétéoSuisse
Chemin de l'Aérogologie
CH-1530 Payerne
T +41 58 460 94 44
www.meteosuisse.ch

