

Rosanna Egli
Rue de la Sarine 22
1700 Fribourg

Ozonmessungen in der UNESCO Biosphäre Entlebuch

Selbstständige Rechercharbeit für den BSc Geographie

Betreuer:

Christian Hauck – Professor Universität Fribourg

Co-Betreuer:

Mario Meier – Particle Vision GmbH

Abgabe der endgültigen Fassung:

Fribourg, der 17. April 2015

Entgegennehmendes Institut: Universität Fribourg

Abstract

Im touristischen Wandergebiet Sörenberg-Flühli, welches der UNESCO Biosphäre Entlebuch angehört, wurden im September 2014 Ozonmessungen durchgeführt, um die lokalen Mechanismen der Ozonproduktion und –verfrachtung zu untersuchen. Das Ziel war, Empfehlungen an Touristen herausgeben zu können, bezüglich wo man sich bei erhöhten Ozonkonzentrationen am besten aufhält. Es wurde ein mobiles Messgerät mit einem elektrochemischen Ozonsensor mehrmals auf einer Wanderung mitgeführt, um die lokale räumliche Ozonverteilung zu erfassen. Diese Methode der Datenerfassung für Ozon ist noch weitgehend unbekannt und soll anhand von dieser Studie getestet werden. Die erhobenen Daten konnten für die Analyse verwendet werden, allerdings nur zum relativen Vergleich innerhalb des Datensatzes. Die absoluten Werte wiesen eine zu hohe Unsicherheit auf, welche nicht weiter untersucht wurde. Es konnte eine erhöhte Ozonkonzentration in emissionsbelasteten Gebieten unter bestimmten meteorologischen Bedingungen nachgewiesen werden. Anhand der Ozon-Messdaten von Sörenberg-Flühli konnten zudem verschiedene Erkenntnisse aus bereits existierenden Studien betreffend dem Zusammenhang zwischen meteorologischen Parametern und der Ozonverteilung bestätigt werden. Es wurden die Faktoren Temperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und –richtung, sowie Gewitter und Niederschlag in der Analyse berücksichtigt.

Schlüsselwörter: Bodennahes Ozon, mobiler elektrochemischer Ozonsensor, Ozonbildung, Ozontransport, Wanderregion Sörenberg

Inhaltsverzeichnis

Abstract	3
1 Einleitung.....	7
1.1 Problemstellung	7
1.2 Ziele	9
1.3 Vorgehensweise	10
2 Theorieteil	11
2.1 Ozonbildung	11
2.2 Messverfahren für Ozon	13
3 Methoden.....	15
3.1 Die Routenwahl.....	15
3.2 Die Messgeräte.....	18
3.2.1 Stationäres Messgerät	18
3.2.2 Mobiles Messgerät.....	18
3.2.3 GPS	19
3.3 Meteorologische Daten.....	20
3.4 Die Messtage.....	21
4 Bearbeitung der gemessenen Daten.....	22
4.1 Offset des mobilen Messgeräts.....	22
4.2 Umrechnung von Koordinaten zu Distanz	28
4.3 Korrektur der Koordinaten vom Auto-GPS	31
4.4 Von WGS84 zu CH1903	33
5 Resultate	34

6 Interpretation und Diskussion.....	40
6.1 Messverfahren	40
6.2 Zeitliche Variabilität der Ozonkonzentration	44
6.3 Räumliche Variabilität der Ozonkonzentration.....	53
7 Konklusion	57
8 Danksagung	59
9 Literaturverzeichnis.....	60
10 Anhang	63
10.1 Offset des mobilen Messgeräts in Abhängigkeit von der Temperatur	63
10.2 Offset des mobilen Messgeräts in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit.....	64

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Ozon ist ein Gas in der Atmosphäre, das in den letzten Jahren oft in den Schlagzeilen in Zusammenhang mit den Themen Klimawandel, Ozonloch und der Verschlechterung der Luftqualität, sprich Sommersmog, für Aufregung gesorgt hat. Die Rolle, welche das Ozon für unsere Atmosphäre spielt, ist sehr komplex. Ozon kommt in verschiedenen Höhen der Atmosphäre in unterschiedlichen Konzentrationen vor und spielt bei vielen wichtigen chemischen und physikalischen Prozessen eine Rolle. Es ist ein reaktives Molekül und ein starkes Oxidationsmittel, welches eine wichtige Bedeutung für den Abbau von Luftschadstoffen in der Atmosphäre hat (Brönnimann, 2002). Gleichzeitig greift es aber in Bodennähe Oberflächen an, mit welchen es in Berührung kommt. Wenn Ozon in hohen Konzentrationen in der Luft vorhanden ist, hat dies negative Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen und Pflanzen. Es greift die menschlichen Atemwege an, kann Nase und Augen reizen, Asthmaanfalle auslösen und sogar krebsfördernd sein (Englert, 2000). Auch die Vegetation leidet unter der Ozonbelastung, da Ozon pflanzliche Zellstrukturen zerstört und die Photosynthese beeinträchtigt (Dierkesmann und Sandermann, 2000; Weigel und Bender, 2012).

In der Stratosphäre gibt es eine Schicht, welche erhöhte Ozonkonzentrationen aufweist. Hier wird ein Teil der, von der Sonne kommenden, UV-Strahlung von den Ozonmolekülen absorbiert und trifft somit nicht auf die Erdoberfläche. Da die UV-Strahlung für das Leben auf der Erdoberfläche schädlich ist, brauchen wir diese Ozonschicht in der Stratosphäre als natürlicher UV-Filter für das Sonnenlicht.

In der Troposphäre wirken die Ozonmoleküle als Treibhausgas. Sie absorbieren die langwellige Ausstrahlung der Erde, wodurch die Temperatur der Moleküle steigt und sie selber Wärmestrahlung emittieren. Der auf die Erde gerichtete Teil dieser Strahlung wird atmosphärische Gegenstrahlung genannt und trägt zu deren Erwärmung bei (Donald Ahrens, 2013). Laut Guicherit und Roemer (200) ist troposphärisches Ozon das drittwichtigste Treibhausgas.

Für die vorliegende Arbeit ist primär das Ozon in Bodennähe von Bedeutung. In Europa ist die bodennahe Ozonkonzentration in den 70er und 80er Jahren stark angestiegen (Oltmans et. al, 2006). Die Abbildung 1 zeigt deutlich eine Verbindung zwischen dem Ozontrend in Europa in den letzten 100 Jahren und demjenigen der Stickoxidemissionen (NO_x). NO_x ist ein wichtiger Vorläuferstoff beim Prozess der Ozonbildung (siehe Kapitel 2.1). Der Ozonanstieg gab Anlass zu

vielen Studien über verschiedene Aspekte des Luftschadstoffs Ozons (siehe Kapitel 2).

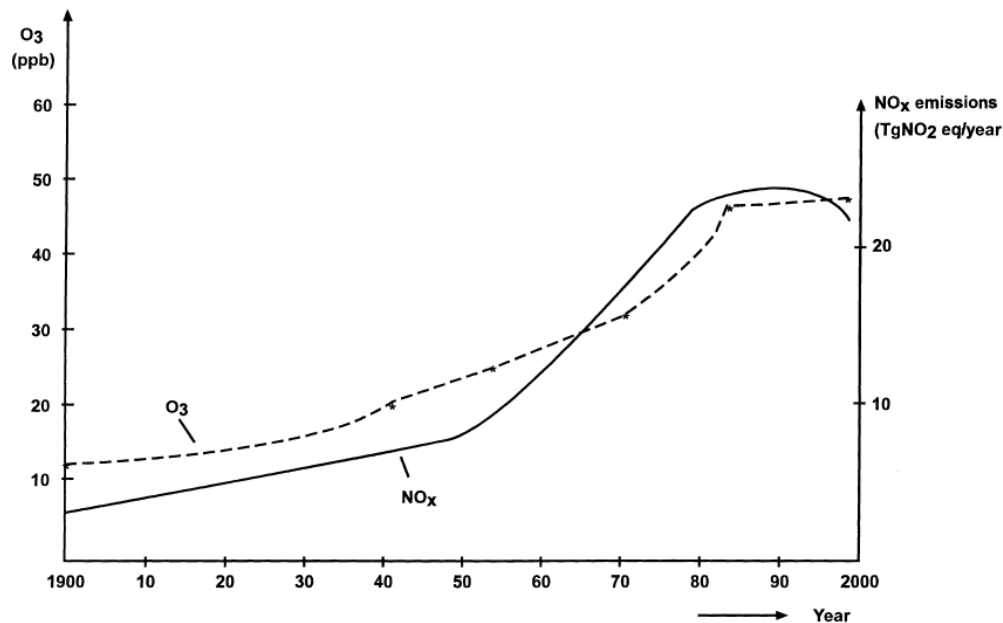


Abbildung 1: Konzentration von bodennahem Ozon und NO_x-Emissionen in Europa zwischen 1900 und 1995 (Quelle: Guicherit und Roemer, 2000)

Dieser Arbeit liegt das Interesse der UNESCO Biosphäre Entlebuch (UBE) an der Luftqualität im touristisch genutzten Wandergebiet Sörenberg-Flühli zu Grunde. Die UBE wird betrieben von einem Verband der Einwohnergemeinden Doppleschwand, Entlebuch, Escholzmatt-Marbach, Flühli, Hasle, Romoos und Schüpfheim. Der Verband übernimmt die Raumplanung der Region unter Berücksichtigung der "Kriterien für die Anerkennung und Überprüfung von Biosphärenreservaten der UNESCO in der Schweiz" (BUWAL, Stand 2002). Die UBE folgt den Prinzipien der nachhaltigen Entwicklung der Region, und der Erhaltung der Natur- und Kulturlandschaft, speziell der Moore und Karstgebiete.

Die UBE führt seit 2013 Projekte zur Ermittlung der Luftqualität durch, welche einen Bezug zum Moorschutz und zur touristischen Nutzung aufweisen. Im Sommer 2013 und im Jahr 2014 wurden verschiedene Luftschadstoffe, wie Feinstaub, NO₂, NH₃ und der Gesamtstickstoff gemessen (Meier, 2013). Ozon wurde dabei aber bisher nicht in Betracht gezogen. Daher entschloss sich die UBE, im Sommer 2014 eine Studie zur Ozonkonzentration in der touristisch genutzten Wanderzone Sörenberg-Flühli zu lancieren, welche im Rahmen einer Bachelorarbeit in Zusammenarbeit mit Particle Vision GmbH durchgeführt werden soll.

1.2 Ziele

Die Studie soll die Variabilität der Ozonwerte an heissen Sommertagen für verschiedene Zonen im Wandergebiet ermitteln, um Empfehlungen für Wandertouristen herausgeben zu können, bezüglich welche Orte an Ozon-belasteten Tagen eher zu bevorzugen, bzw. zu vermeiden sind. Es geht also darum, die lokalen Mechanismen der Ozonbildung und des Ozontransports zu untersuchen. Ozon ist ein intensiv erforschter Luftschadstoff und es existieren zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten zum Thema bodennahes Ozon. Nun sollen bereits gewonnene Erkenntnisse über das bodennahe Ozon in Hinblick auf die lokalen Bedingungen im Gebiet Sörenberg studiert werden. Die Schwerpunkte liegen dabei beim Zusammenhang zwischen anthropogenen Emissionen und Ozonbildung, dem Einfluss von meteorologischen Bedingungen auf die Ozonverteilung, sowie der Rolle von Topographie und Vegetation. Die räumlichen und zeitlichen Variationen der Ozonkonzentrationen sollen anhand dieser Faktoren analysiert werden. Daraus ergeben sich einige konkrete Fragestellungen und Hypothesen:

- Die Höhe der Ozonkonzentration in Bezug auf die meteorologischen Parameter Niederschlag, Wind, Temperatur und Strahlung beurteilt werden. Dabei werden Erkenntnisse aus bereits durchgeführten Studien auf die Forschungsregion angewandt, um zu sehen, ob diese anhand der erhobenen Daten vom Entlebuch bestätigt werden können.
- Es soll überprüft werden, ob im Studiengebiet ein Einfluss der Siedlung Sörenberg und der Verkehrsadern auf die Ozonkonzentration erkennbar ist. Dabei müssen regionale topographische Gegebenheiten und meteorologische Faktoren wie die Anströmung (Windgeschwindigkeit- und Richtung) miteinbezogen werden, welche die Verfrachtung des bodennahen Ozons beeinflussen. Die Hypothese lautet, dass das tagsüber im Dorf und an der Strasse produzierte Ozon durch den Wind hinauf in die Wanderregion transportiert wird, wo es nicht abgebaut werden kann, da das nötige NO fehlt. Das Ozon reichert sich also in den höheren, von der Zivilisation entfernten Lagen an. In Dorfnähe jedoch hat es weniger Ozon, da es nachts vor zu wieder abgebaut wird (siehe Kapitel 2.1).
- Unterschiede der Konzentration des bodennahen Ozons zwischen verschiedenen Vegetationsarten wie Hochmooren, Weideland und Waldland könnten in Verbindung mit den von den Pflanzen ausgeschiedenen biogenen Kohlenwasserstoffen sein, deren Abbauprodukte mit Stickstoffoxiden reagieren, was einen hemmenden Einfluss auf

den Ozonabbau hat (siehe Kapitel 2.1). Dadurch kann es auch in unbewohnten Gebieten zu hohen Ozonbelastungen kommen. Auch Methan, welches unter anderen aus Mooren stammt, kann die Entstehung von Ozon begünstigen (Rheinland Pfalz, 2006). Ein Ozon-verringender Faktor könnte die vermehrte Deposition des Ozons im Wald sein, aufgrund der grösseren vorhandenen Oberfläche im Vergleich zum offenen Feld (Leuenberger, 2007).

Ein zweiter wichtiger Aspekt der Arbeit ist das angewandte Messverfahren. Die Ozonmessungen wurden mit einem stationären und einem mobilen Messgerät gleichzeitig durchgeführt. Während das stationäre Messgerät die Hintergrundkonzentration mass, wurde das mobile Messgerät auf einer Wanderroute im Rucksack mitgeführt und ermittelte unterwegs in konstanten Zeitintervallen die Ozonkonzentration. Diese Methode mit einem mobilen elektrochemischen Ozonsensor, welcher im Rucksack mitgetragen wird, wurde bisher kaum genutzt. Es gibt noch keine wissenschaftliche Studie über die Durchführung einer direkt vergleichbaren Ozonmessung. Normalerweise werden nur stationäre Messgeräte verwendet, oder dann in Sonden eingebaute Sensoren, um die vertikale Ozonverteilung zu ermitteln. In dieser Arbeit ist ein Ziel herauszufinden, ob diese Art der Ozonmessung sinnvoll und aussagekräftig ist.

1.3 Vorgehensweise

Geplant waren ungefähr acht Messtage in den Monaten Juli und August, wenn die Sonneneinstrahlung am intensivsten ist, weil dann am meisten Ozon in Bodennähe entsteht (siehe Kapitel 2.1). Die Wetterlage im Sommer 2014 war jedoch dominiert von Regenfällen und relativ niedrigen Temperaturen (siehe Kapitel 3.4) und daher ungünstig, um Ozonmessungen durchzuführen. Es wurde schlussendlich nur an sechs Tagen in den Monaten September und Oktober Messungen entlang von zwei ausgewählten Wanderrouten durchgeführt. Anschliessend wurden die Variationen der gemessenen Ozonkonzentrationen qualitativ analysiert und zu erklären versucht.

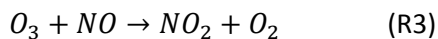
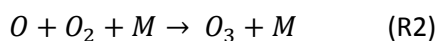
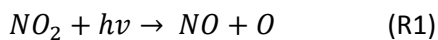
Die Arbeit beginnt mit einem Theorieteil, in dem die Grundlagen der Ozonbildung und des Ozontransportes in der Atmosphäre erläutert werden und ein Überblick über die bereits existierenden relevanten Studien geschaffen wird. Dann folgt ein Kapitel in dem das Verfahren der Datenerhebung detailliert erklärt wird. Das vierte Kapitel ist der Datenbearbeitung gewidmet, da verschiedene Korrekturen auf den Datensatz angewandt wurden. Schliesslich

folgt die Präsentation der Ergebnisse in Kapitel fünf und die Interpretation in Kapitel sechs. Die Interpretation ist in drei Kapitel unterteilt. Zuerst wird das Messverfahren diskutiert, danach die Unterschiede der Höhe der Ozonkonzentration zwischen den einzelnen Messtagen und zum Schluss die räumlichen Variationen entlang der Messrouten. Abschliessend werden in der Konklusion die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

2 Theorieteil

2.1 Ozonbildung

Ozon ist die dreiatomige Form von Sauerstoff (O_3). Es handelt sich bei Ozon um einen sekundären Luftschadstoff, welcher nicht direkt aus den Emissionen stammt, sondern durch weitere Reaktionen von Abgasen und anderen Luftbestandteilen unter bestimmten meteorologischen Bedingungen entsteht. Entstehung und Zerstörung von troposphärischem Ozon geschieht bei photochemischen Reaktionen von Sauerstoff und Stickstoffoxiden (Guicherit und Roemer, 2000):



Wenn nur die Reaktionen R1 bis R3 ablaufen, ergibt sich ein photostationäres Gleichgewicht zwischen O_3 und NO_x (NO , NO_2). Wenn allerdings Peroxyradikale wie HO_2 oder RO_2 (R: organischer Rest) vorhanden sind, dann ersetzen diese das Ozon in Gleichung R3 (Brönnimann und Neu 1996). Dadurch wird der Ozonabbau verringert. Die Peroxyradikale entstehen bei der Oxidation von CO und VOC (volatile organic compounds) durch Hydroxylradikale (OH) (Klemp et al., 2012).

Ozon hat in der Troposphäre eine Lebensdauer von einigen Tagen bis mehrere Wochen und ist daher nicht homogen durchmischt (Oltmans et al., 2006). Das Gas kann während dieser Zeit über weite Strecken in der Atmosphäre transportiert werden. Die Entwicklung der bodennahen Ozonkonzentration zu erklären oder vorherzusagen ist schwierig, da sie von vielen unterschiedlichen Faktoren abhängt. Sie ist das Resultat von Neubildung, Transport, chemischer Zerstörung und trockener Deposition auf Oberflächen.

Es gibt eine sogenannte Hintergrundkonzentration von Ozon, welches nicht lokalen anthropogenen Ursprungs ist. Dieses Ozon hat verschiedene Quellen, wie der Abwärtstransport von stratosphärischem Ozon, dem weiträumigen horizontalen Transport oder der in-situ Ozonbildung aus natürlichen entstandenen Vorläuferstoffen.

Hinzu kommt das Ozon, welches unter Einwirkung von Sonnenlicht bei der Reaktion (R1) mit NO aus anthropogenen Quellen entsteht. Die Entwicklung der Ozonkonzentrationen und deren Beziehung zu den Emissionen von Vorläuferstoffen ist Thema zahlreicher Studien. Eine Studie von Senger et al. (1999) ergab, dass Ozonwerte in der Nähe der Siedlungen und Verkehrsadern niedriger sind als in der freien Natur, da in den Regionen von Abgasemissionen das nötige NO vorhanden ist, welches zum Abbau von O₃ führt (R3). Es wurde festgestellt, dass die mittlere Ozonbelastung im Gebirge höher ist als im Flachland, und dass diese mit der Entfernung von Ballungsräumen zunimmt. Die städtischen Gebiete sind zwar die Hauptquelle der Ozonbildung, weil durch die Abgase NO₂ vorhanden ist (R1, R2). Das Ozon, welches jedoch aufs Land verfrachtet wird, bleibt lange bestehen, da dort kein NO für dessen Reduktion (R3) zur Verfügung steht. Zur dieser Schlussfolgerung kamen auch Richter et. al (1996) in ihrer Studie über die Ozontrends in Bayern. Brönnimann und Neu (1996) bestätigten einen Rückgang der Ozonkonzentration in Zusammenhang mit der Reduktion der Emissionen, der jedoch viel kleiner ist als derjenige der Emissionen. Dies erklären sie einerseits durch die verbleibende Ozonhintergrundkonzentration, welche bedeutend höher ist als die NO_x-Hintergrundkonzentration, andererseits durch die Nicht-Linearität der Ozonproduktion in Abhängigkeit der Vorläuferstoffe (National Research Council, 1991). Kuebler et al. (2001) hingegen konnten keinen eindeutigen Rückgang der Ozon-Jahresmittelwerte in Antwort auf den Emissionsrückgang nachweisen. Der Zusammenhang zwischen der Abgasproduktion und der Ozonbildung wird von Weiersmüller (2006) sogar wissenschaftlich angezweifelt, da laut ihm trotz der erheblichen Reduktion der Vorläuferstoffe aus Abgasen kein signifikanter Rückgang des Ozons bemerkbar ist. Er vermutet, dass das gesamte Ozon der bodennahen Luftschicht vom Gasaustausch mit höher gelegenen Luftschichten stammt.

Meteorologische Faktoren haben Auswirkungen auf die Ozonbildung, da sie die atmosphärische Zirkulation und die photochemischen Prozesse beeinflussen (Porter et al. 2001). Die Sonneneinstrahlung ist notwendig, um die photochemischen Reaktionen anzutreiben. Höhere Temperaturen beschleunigen die Reaktionsraten und fördern biogene Kohlenwasserstoff-Emissionen (Olszyna et al., 1997). Stabile Hochdruckwetterlagen im Sommer sind daher die ideale Voraussetzung für hohe photochemische Ozonproduktion in

Bodennähe. Der Effekt des Windes auf die Ozonkonzentration ist je nach allgemeiner Wetterlage unterschiedlich. Die Windgeschwindigkeit hat einen negativen Einfluss auf Ozon an Schönwettertagen und einen positiven Einfluss an Schlechtwettertagen (Brönniman et al., 2002). Das liegt daran, dass an Schönwettertagen das in-situ, photochemisch gebildete Ozon dominiert, welches durch den Wind verfrachtet wird. An Schlechtwettertagen ist die Hintergrundkonzentration von grösserer Bedeutung. Diese hängt unter anderem von der grossräumigen Advektion des Ozons ab, welcher durch Wind begünstigt wird. Auch der Niederschlag hat Auswirkungen auf den Transport des Ozons, da er eine vertikale Durchmischung der Luftschichten bewirkt (Ordóñez et al., 2005).

2.2 Messverfahren für Ozon

Das Ozon in der Atmosphäre kann in-situ oder durch Fernerkundung gemessen werden. Bei den in-situ-Messungen gelangt die Umgebungsluft direkt ins Gerät und wird dort auf den Ozongehalt analysiert. Bei der Fernerkundung kann anhand der durch Ozon verursachten Abschwächung oder der Veränderung elektromagnetischer Wellen der Ozongehalt der Luft festgestellt werden (Brönnimann, 2002).

Für die vorliegende Studie wurden in-situ Ozonmessungen durchgeführt. Es gibt unterschiedliche Methoden, wie der Ozongehalt in einem Messgerät bestimmt werden kann. Das erste bekannte Messverfahren war die Schönbein Methode, bei der ein mit Kaliumiodid getränkter Papierstreifen sich je nach Ozongehalt in der Luft unterschiedlich stark verfärbt. Da in Anwesenheit von Wasser eine chemische Reaktion zwischen Ozon und Kaliumiodid stattfindet, kann der Ozongehalt anhand der Anzahl entstandener Iodmoleküle, welche eine färbende Eigenschaft aufweisen, bestimmt werden. Im letzten Jahrhundert wurden viele Messungen mit diesem Verfahren durchgeführt (Anfossi et al., 1991; Sandroni et al., 1992; Marengo et al., 1994). Die Messwerte mussten aber oft im Nachhinein korrigiert werden, da sie durch Windgeschwindigkeit und Feuchtigkeit beeinflusst wurden (Guicherit und Roemer, 2000). Später wurden weitere Messgeräte entwickelt, die auf dem Prinzip der Kaliumiodidlösung basieren, aber weniger fehleranfällig sind. Dazu zählen zwei der meistverwendeten elektrochemischen Ozonsonden, die Brewer-Mast-Ozonsonde (Brewer and Milford, 1960) und die ECC-Sonde (=Electrochemical Concentration Cell) (Komhyr, 1969). In elektrochemischen Sensoren wird das freie Iodid (I_2) an der Elektrode durch Aufnahme von zwei Elektronen reduziert, wodurch ein elektrischer Strom entsteht. Anhand des Stromes kann

die Menge erzeugten Iodes und somit die Ozonkonzentration der Luft bestimmt werden (GAW, 2011).

Im Montsouris Observatorium (Paris) wurden von 1976 bis 1911 Messungen durchgeführt, bei denen das Ozon in einer Arsenit-Ionen-Lösung absorbiert wird (Volz und Kley, 1988). Diese Methode wurde vom französischen Chemiker Albert-Levy entwickelt.

Ein anderes Verfahren bedient sich der Chemilumineszenz. Im Messgerät befindet sich ein organisches Gas, welches bei der Reaktion mit Ozon Licht aussendet. Die Ozonkonzentration wird durch die Intensität des ausgestrahlten Lichts bestimmt (Brönnimann, 2002).

Bei Bodenmessstationen werden heutzutage meist Geräte genutzt, die sich die Absorptionseigenschaften von Ozon zur die Bestimmung von dessen Konzentration zunutze machen. Die Luft wird mit UV-Licht bestrahlt. Die Abschwächung des Lichtstrahls wird gemessen, um damit die UV-Absorption zu bestimmen. Konkret wird abwechslungsweise Umgebungsluft und ozonfreie Luft durch eine Lampe mit bekanntem Spektrum bestrahlt. Das Gerät besteht aus zwei parallelen Kammern. In der einen Kammer wird die Umgebungsluft mit UV-Licht bestrahlt und es wird gemessen, wie viel der Strahlung absorbiert wird. Vor der zweiten Kammer wird das gesamte Ozon chemisch aus der Luft herausgefiltert und man erhält die sogenannte Nullluft. Diese wird dann ebenfalls mit dem UV-Licht bestrahlt. Aus der Differenz der UV-Absorption in den beiden Kammern kann der Ozongehalt der Umgebungsluft bestimmt werden (Brönnimann, 2002).

Wenn die zeitliche Auflösung nicht so wichtig ist, dafür die räumlichen Unterschiede von grosser Bedeutung sind, dann kann das Ozon mit einem Passiv-Sammler gemessen werden. Es handelt sich dabei um ein passives Messverfahren, bei dem ein beschichteter Filter der Umgebungsluft während mehreren Tagen ausgesetzt ist. Das Ozon reagiert mit der Beschichtung und im Labor kann im Nachhinein ermittelt werden, wie viel Ozon während der Zeit der Messung in der Luft war (Brönnimann, 2002).

3 Methoden

3.1 Die Routenwahl

Die Ozonkonzentration wurde an sechs Schönwetter-Nachmittagen entlang von zwei ausgesuchten Wanderrouten gemessen. Die beiden Routen sind in Abbildung 2 dargestellt.

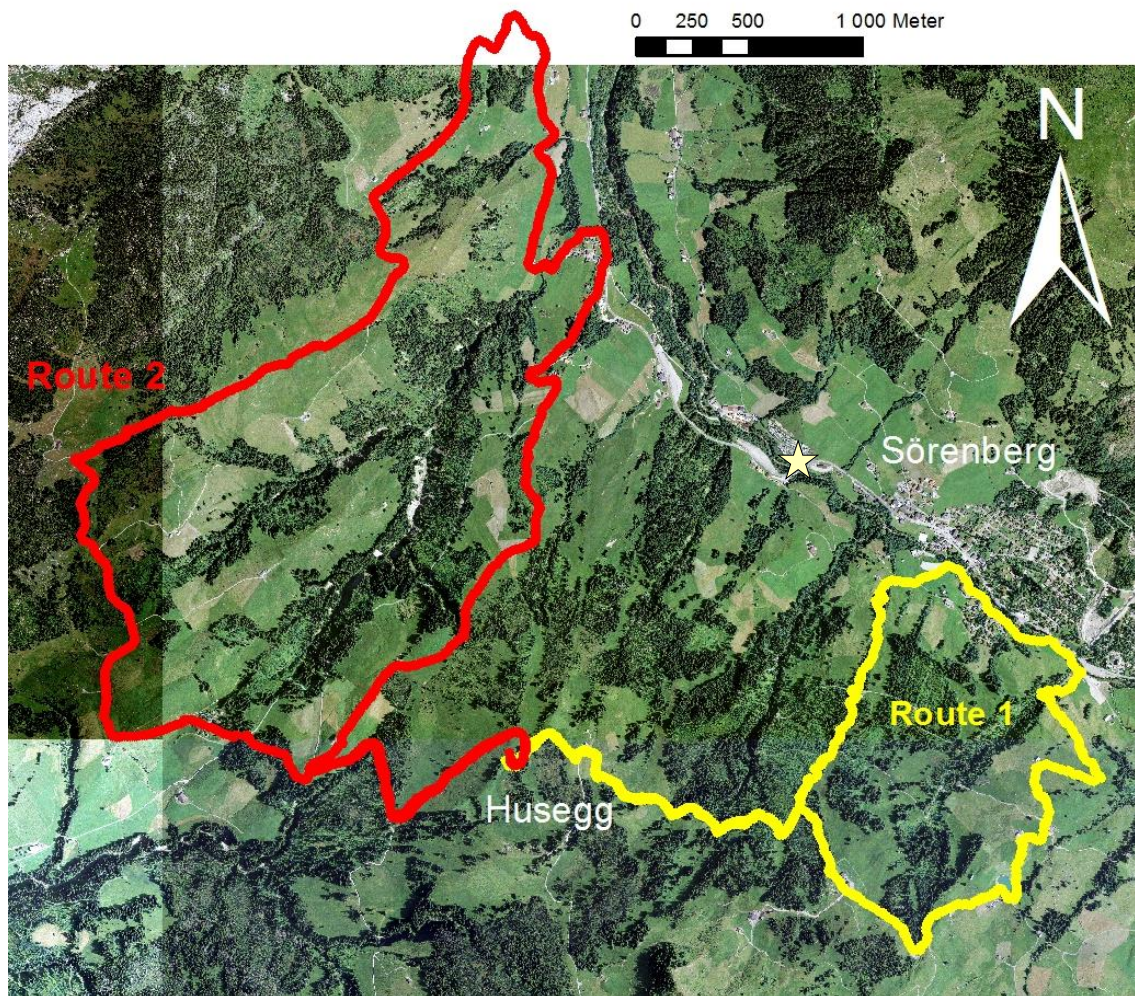


Abbildung 2: Die beiden Wanderrouten für die Ozonmessungen in der UNESCO Biosphäre Entlebuch, (Stern: Messstation wetterluzern)

Die Route 1 ist 9,7, die Route 2 ist 14 Kilometer lang. Um die Topographie des Gebietes zu zeigen, werden die Routen in Abbildung 3: Die erste Route, und Abbildung 4 aus einer seitlichen Perspektive betrachtet. So hat man eine Vorstellung vom Höhenprofil der Routen.



Abbildung 3: Die erste Route, aus westlicher Richtung betrachtet

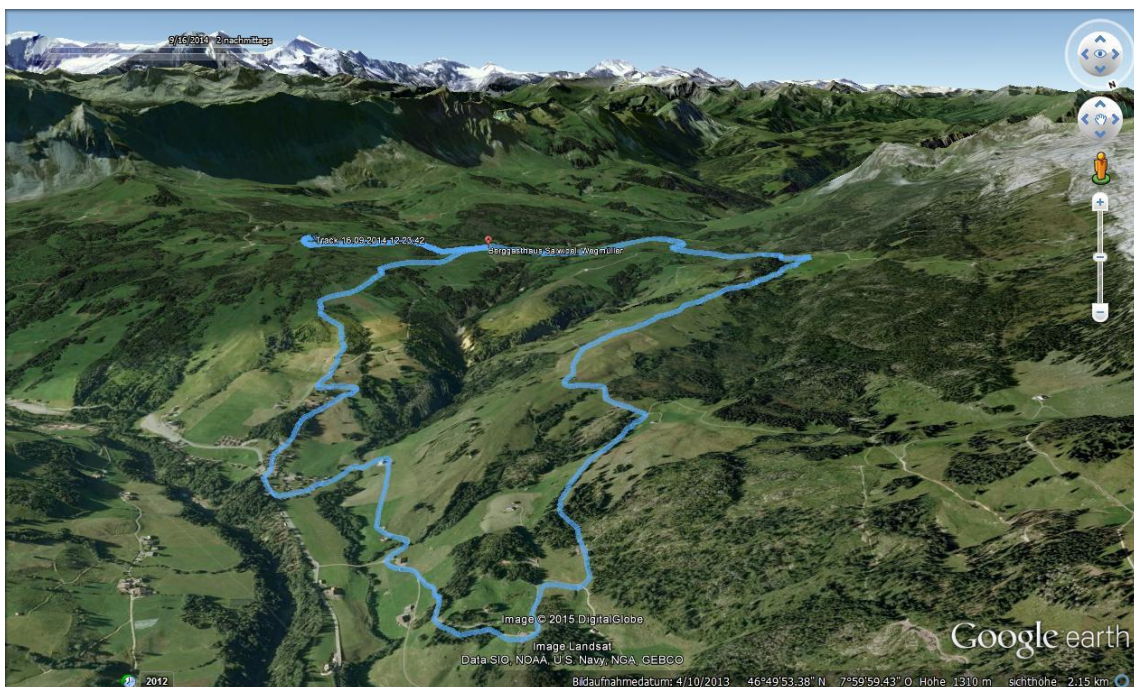


Abbildung 4: Die zweite Route, aus nördlicher Richtung betrachtet

Die Routen wurden so gewählt, dass möglichst viele verschiedene Vegetationstypen durchwandert werden, und dass sie Wegstücke in Siedlungsnähe sowie in kaum besiedelten Gebieten beinhalten. In der Abbildung 5 sind die verschiedenen Vegetationszonen entlang der Messrouten eingezeichnet. Dabei wird unterschieden zwischen Wald, Wiese und Moor. Zusätzlich sind Siedlungen, alleinstehende Häuser und Verkehrswege eingezeichnet.

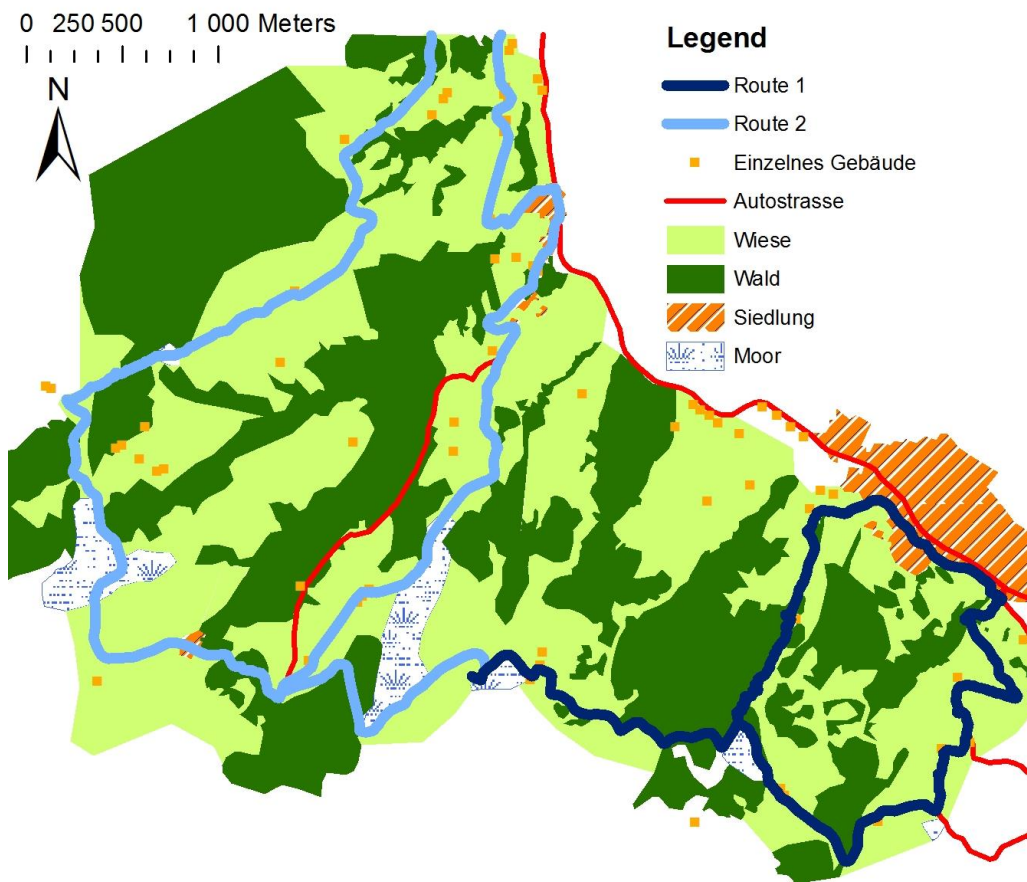


Abbildung 5: Vegetationszonen entlang der beiden Messrouten

Beide Routen starten von der Husegg aus, einer Hügelkuppe die südwestlich von Sörenberg gelegen ist. Sörenberg liegt im Mariental, das in Nordwest-Südost-Ausrichtung im Norden des Briener Rothorns liegt und von der Waldemme durchflossen wird. Auf der Husegg steht ein kleines Häuschen für den Skiliftbetrieb im Winter. Den Sommer über ist es ungenutzt und die Messgeräte konnten dort in der Zeit zwischen den Messtagen gelagert werden. Während der Wanderung konnte das stationäre Messgerät unter dem Vordach des Häuschens (Abbildung 6) installiert und am Strom angeschlossen werden.



Abbildung 6: Husegg, Skihäuschen mit stationärem Messgerät vor der Türe

3.2 Die Messgeräte

3.2.1 Stationäres Messgerät

Am Ausgangs- und Endpunkt der Wanderung wurde eine fest-installierte Messstation eingerichtet, welche als Referenz dient. Es wurde ein Ozonanalysator Modell 8810 verwendet, welcher leihweise aus dem Kanton Aargau beschafft werden konnte. Dieses Messgerät funktioniert nach dem Prinzip der UV-Absorption, wie im obigen Abschnitt beschrieben. Die Luft wird mit Licht der Wellenlänge 254 Nanometer bestrahlt und ein Photometer misst die absorbierte Lichtmenge. Ein Mikroprozessor ermittelt das Verhältnis von der restlichen Lichtintensität nach Bestrahlung von ozonhaltiger bzw. ozonfreier Luft und berechnet daraus die Ozonkonzentration. Diese Konzentration wird in ein elektrisches Signal umgewandelt und erscheint dann auf dem Display. Im Outputfile ist pro Minute ein Messwert eingetragen. Das Gerät wurde darauf eingestellt Ozonwerte zwischen 0 und 500 ppb zu messen. Die Ausgabewerte liegen im Bereich von 0 bis 10'000 Millivolt. Ein ppb entspricht somit 20 Millivolt, was bedeutet, dass der Output des Messgeräts durch 20 dividiert wird, um den Ozongehalt in ppb zu erhalten. Das Messgerät verfügt über eine automatische Temperatur- und Druckkompensation. Nach diesen beiden Korrekturen weisen die Ausgabewerte eine Genauigkeit von ± 2 ppb auf (Ozonanalysator 8810, Bedienungsanleitung). Die Messwerte schwanken nach dem Einschalten des Gerätes aufgrund der Eigenkalibration und stabilisieren sich dann nach einigen Minuten.

Der Ozonanalysator wurde im Labor des eidgenössischen Instituts für Meteorologie (METAS) kalibriert und für Messungen des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) im Kanton Aargau verwendet. Deswegen sind die Messungen dieses Gerätes verlässlich und es kann zur Überprüfung und Validierung der Messungen des mobilen Gerätes genutzt werden.

3.2.2 Mobiles Messgerät

Während den Wanderungen wurde ein mobiles Messgerät mitgetragen. Mit den Messungen dieses Gerätes sollten die räumlichen Unterschiede der Ozonkonzentration in den verschiedenen Abschnitten der Messrouten detektiert werden. Beim mobilen Messgerät handelt es sich um einen elektrochemischen Sensor, der an ein Transmitterboard angeschlossen und durch ein stabiles, gut belüftetes Metallgehäuse geschützt ist. Durch das Anschliessen der Batterie beginnt das Gerät mit den Messungen. Dieses mobile Messgerät wurde von der Gruppe um Professor Bernard Grobety des Departements für Geowissenschaften der Universität Fribourg gebaut und zur Verfügung gestellt.

Beim eingesetzten Sensor (Modell: O3 3E 1F) handelt es sich um einen amperometrischen Sensor mit drei Elektroden und einem organischen Elektrolyt. Der Messbereich liegt zwischen 0 und 1 ppm und die Auflösung liegt unter 0.03 ppm. Der Sensor kam in Kombination mit einem Transmitterbord (*Sensoric 4-20 mA Transmitter Board*) zum Einsatz, welches das Ausgangssignal in den Bereich 4-20 mA konvertiert. Sowohl der Sensor wie auch das Transmitterbord stammen von der Firma City Technology, welche diese Konfiguration vor der Auslieferung mit Hilfe eines Ozongenerators kalibriert hatte. Sollte sich allerdings die Sensitivität der Zelle durch äußere Einflüsse oder altersbedingt verändert haben, dann wird vom Gerät ein zu geringes Signal verzeichnet (mündliche Information von Dr. Christian Rustige, Bonn, 10.04.2015). Deshalb wird zusätzlich das stationäre Gerät als Referenz verwendet. Für den Sensor existieren verschiedene Querempfindlichkeiten, von denen für diese Arbeit allerdings nur diejenige zu Stickstoffdioxid (NO₂) von Bedeutung ist. Bei 20°C bewirken 10ppm NO₂ in der Luft, dass der Sensor eine um 6ppm höhere Ozonkonzentration misst.

3.2.3 GPS

Um die gemessenen Ozondaten der mobilen Messung interpretieren zu können, muss bekannt sein, wo sich das Gerät zur Zeit der Messung befunden hat. Um dies sicherzustellen, wurden die Wanderungen auf einem GPS-Gerät aufgezeichnet. Dies geschah bei vier der sechs Wanderungen mit Hilfe eines Smartphones und der Applikation ViewRanger. Die Genauigkeit dieses Messverfahrens ist abhängig vom verwendeten Smartphone sowie von der aktuellen Situation. Das GPS der verwendeten Natels (Sony Xperia Z3, iPhone 4S) kann die Position bis auf 10 Meter genau bestimmen, allerdings nur wenn genügend Satelliten am Himmel sichtbar sind und der Empfang nicht gestört ist. In einer ungünstigen Situation kann die Genauigkeit aber auch deutlich schlechter als 10 Meter sein. Die anderen beiden Tracks wurden mit dem Auto-GPS Nüvi 2545LM von Garmin aufgezeichnet. Die Garmin-Geräte messen laut Hersteller mit einer Genauigkeit von ungefähr 5 bis 10 Meter. Für die Koordinatenaufzeichnungen verwenden beide Geräte das Koordinatensystem WGS84.

3.3 Meteorologische Daten

Zur Beurteilung der meteorologischen Situation während des Sommers 2014 und speziell während der Messperiode wurden Daten von zwei verschiedenen Quellen bezogen. In erster Linie wurden Daten von Meteoschweiz verwendet, zusätzlich wurde an den Messtagen jeweils direkt die Daten von der Internetplattform *wetterluzern.ch* von der Station Sörenberg kopiert. Dort sind jeweils die Messwerte der vergangenen zwölf Stunden online zugänglich. Diese Wetterstation steht an der Kantonsstrasse, ist Eigentum des Kantons Luzern und wird für den Winterdienst, sprich für die Schneeräumung und Bekämpfung von Winterglätte benötigt. Auf Abbildung 2 ist die Lage der Messstation Sörenberg mit einem Stern markiert. Von Meteoschweiz wurden Daten der Stationen Flühli und Schüpheim verwendet. Die Positionen von allen drei Messstationen sind in Abbildung 7 eingezeichnet sind.

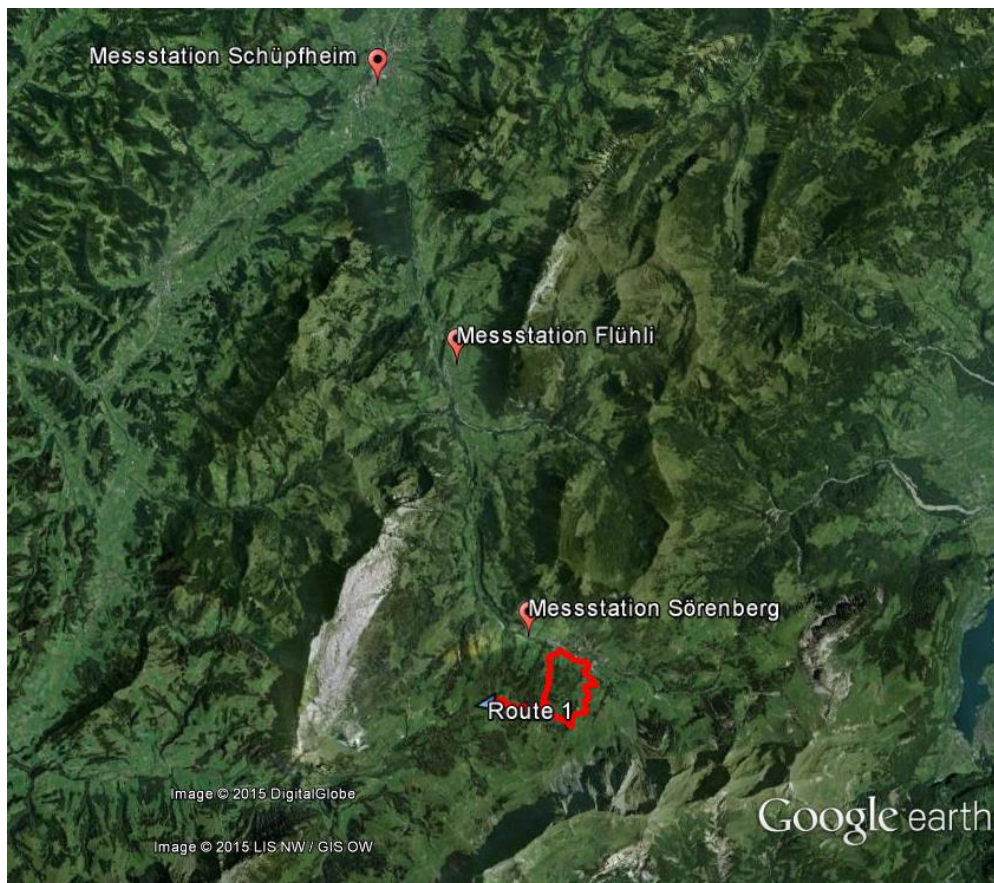


Abbildung 7: Lage der drei Wetterstationen, von denen Daten bezogen wurden. In Rot ist die erste Messroute eingezeichnet.

3.4 Die Messtage

Da der Jahresverlauf der Ozonkonzentration ein Sommermaximum für siedlungsnahе Gebiete aufweist (Brönnimann et al., 2000), war geplant, die Messungen in den Monaten Juli und August durchzuführen.

Der Sommer 2014 war ein eher kalter und Niederschlagsreicher Sommer, nicht ideal um Ozonmessungen durchzuführen. Um die meteorologische Situation zu veranschaulichen, wurde die Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Messdaten von Meteoschweiz für die Messstation Schüpfheim (LU)

Monat (2014)	Hitzetag e	Sommertage	Sonnenreiche Tage	Sonnenarme Tage	Niederschlag (mm)	Temp. (°C)
April	0	0	9	12	107.0	8,6
Mai	0	1	5	14	168.1	10,7
Juni	1	7	11	3	91.6	15,8
Juli	0	4	6	13	334.1	16,1
Aug.	0	1	2	11	190.0	15,0
Sept.	0	0	6	7	76.6	13,6
Okt.	0	0	9	8	75.8	11,0

LEGENDE zur Tabelle:

Hitzetage: Maximum 30 Grad C oder höher; Monatssumme

Sommertage: Maximum 25 Grad C oder höher; Monatssumme

Sonnenreiche Tage: Tage des Monats mit relativer Sonnenscheindauer > 80%

Sonnenarme Tage: Tage des Monats mit relativer Sonnenscheindauer < 20%

Niederschlag: Monatssumme (mm)

Lufttemperatur: Lufttemperatur 2 m über Boden; Monatsmittel (°C)

Es fällt auf, dass es in Schüpfheim während dem ganzen Sommer nur einen einzigen Hitzetag und nur 13 Sommertage gab. Es ist aus der Tabelle ersichtlich, dass der August, als die Messgeräte einsatzbereit waren, ungünstige Wetterbedingungen für die Messungen des Ozons herrschten. Es gab nur einen Tag, an dem die Temperatur die 25°C-Grenze überstieg. Des Weiteren sind auch die Zahlen zu der relativen Sonnenscheindauer signifikant. Im August gab es zwei Tage, an denen die Sonne mehr als 80% der möglichen Dauer schien. Dafür gab es elf Tagen, an denen sie weniger als 20% der möglichen Zeit schien. Der Gesamtniederschlag sowie die Temperatur zeigen, dass es ein eher kühler und nasser Sommer war, und dass der Juni im Mittel der trockenste Monat des Sommers war. Da die Messgeräte aber erst Mitte Juli einsatzbereit waren, konnte in dieser Zeit noch nicht mit der Feldarbeit begonnen werden. Der Juli hingegen war sehr niederschlagsreich, wodurch die Luft von Schadstoffen gesäubert

wurde. Es ist anzumerken, dass diese Werte von Schüpfheim stammen, also nicht direkt vom Messgebiet. Schüpfheim liegt ungefähr 10 Kilometer Luftlinie nördlich von Sörenberg. Sörenberg liegt zudem gut 200 Meter höher als Schüpfheim.

Im August waren die Wetterbedingungen tatsächlich so unvorteilhaft, dass der erste Messtag erst im September durchgeführt wurde. Die sechs Wanderungen erfolgten an den folgenden Tagen: 3. und 4. September, 7. und 8. September, 16. September, 9. Oktober. Die vier ersten Tage wurde entlang der Route 1 gemessen, die letzten beiden Tage entlang der Route 2 (siehe Abbildung 3).

Die Messwanderung wurde jeweils in den frühen Nachmittagsstunden durchgeführt, da nach dem nächtlichen Rückgang der Ozonkonzentrationen am Vormittag die Neubildung dominiert und bis zu frühen Nachmittag das Maximum erreicht ist (Englert, 2000).

4 Bearbeitung der gemessenen Daten

4.1 Offset des mobilen Messgeräts

Die Abbildung 8 zeigt die unkorrigierten Messergebnisse der beiden Messgeräte für die sechs Messtage, nachdem die Ausgabewerte der Geräte in die Einheit ppb (parts per billion) umgewandelt wurden. Um die Ozonkonzentration anzugeben, gibt es zwei gebräuchliche Einheiten. Mit ppb wird ein Mischungsverhältnis, also die Anzahl Ozonmoleküle in einer Milliarde Luftteilchen ausgedrückt. Mit Mikrogramm pro Kubikmeter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) wird die Masse der Ozonmoleküle pro Luftvolumen angegeben, wobei diese Angabe vom Luftdruck und somit von der Höhe über Meer abhängig ist. Je tiefer der Luftdruck, desto weniger Luftteilchen befinden sich im gleichbleibenden Volumen. In dieser Arbeit werden die Ozonkonzentrationen in ppb angegeben, da diese Einheit vom Luftdruck unabhängig ist.

An den verschiedenen Messtagen in Abbildung 8 sieht man, dass die Werte des stationären Messgerätes relativ konstant bleiben, während die Werte des mobilen Geräts deutliche Variationen aufweisen. Des Weiteren ist ein bedeutender Offset des mobilen Gerätes im Vergleich zum stationären Gerät zu erkennen. Zu Beginn und am Schluss der Wanderung befanden sich die beiden Geräte jeweils am selben Ort und sollten daher dieselbe Ozonkonzentration in ppb messen. Die Werte vom mobilen Messgerät sind jedoch immer bedeutend niedriger. Die Ozonkonzentrationswerte des mobilen Messgeräts liegen nach deren

Umrechnung in ppb oft im negativen Bereich, was in der Realität nicht möglich ist. Der 16. September ist der einzige Tag, an dem nur positive Werte gemessen wurden. Wenn man allerdings den Offset korrigiert, dann kommen auch die restlichen Werte des mobilen Messgerätes in den positiven Bereich zu liegen.

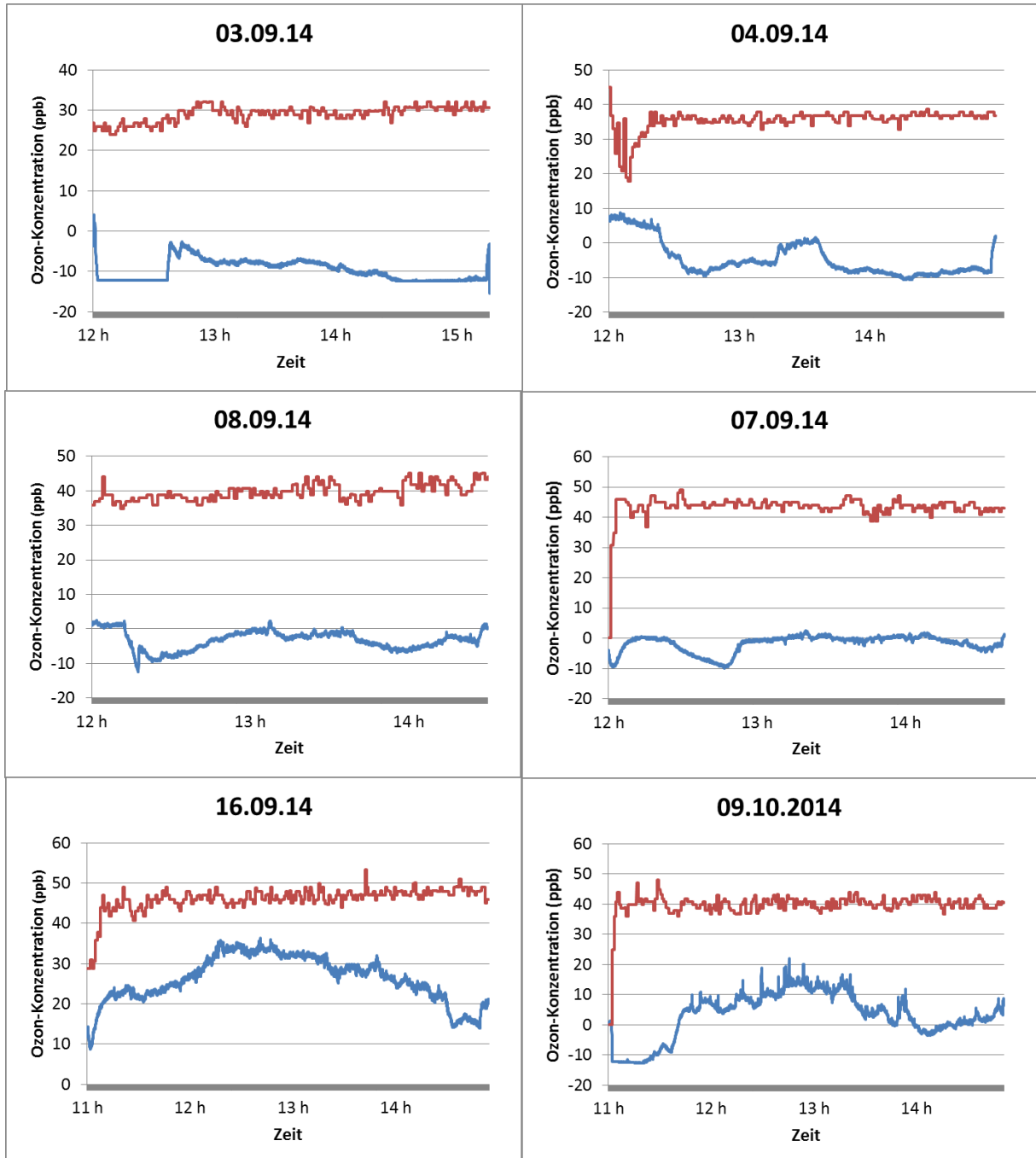


Abbildung 8: In ppb umgewandelte Werte der Ozonkonzentration im Wandergebiet Sörenberg, stationäres Messgerät (rote Linie), mobiles Messgerät (blaue Linie)

Vor der Wanderung liefen die beiden Geräte jeweils zehn bis zwanzig Minuten lang gleichzeitig vor der Hütte auf der Husegg. Die Differenz der mittleren, dort gemessenen Ozonkonzentration von den beiden Geräten entspricht dem mittleren Offset des mobilen Gerätes während dieser Zeitdauer, unter der Annahme, dass die vom stationären Gerät gemessenen Werte korrekt sind.

	3.9.2014	4.9.2014	7.9.2014	8.9.2014	16.9.2014	9.10.2014
Mittel mobiles Gerät vor der Wanderung	-9.8474	2.7242	-1.2143	-1.3990	22.2665	-10.9249
Mittel Stationäres Gerät vor der Wanderung	26.6933	33.5604	43.9394	37.4413	44.3651	40.6552
Gemittelter Offset vor der Wanderung	36.5407	30.8362	45.1537	38.8403	22.0986	51.5801
Offset der letzten Messung	33.8606	34.8310	41.8511	43.7270	25.3118	33.4089
Abweichung der letzten Messung vom gemittelten Offset vor der Wanderung	-7.3 %	+13%	-7.3%	+12.6%	+14.5%	-35.2%
Mittelwert Offset vor und nach der Wanderung	35.2	32.8	43.5	41.3	23.7	42.5

Tabelle 2: Ozonkonzentration auf der Husegg, beide Messgeräte am selben Ort (Alle Angaben in ppb, ausser zweitletzte Zeile)

Zur Berechnung der Werte in Tabelle 2 wurden nicht alle Messungen direkt nach dem Einschalten der Geräte verwendet, sondern erst ab dem Zeitpunkt, als sich die Messwerte der Geräte stabilisiert hatten. Die vierte Zeile zeigt zusätzlich die Differenz der Messwerte vom mobilen und vom stationären Messgerät bei der letzten Messung, bevor die Geräte ausgeschaltet wurden. Die Werte des mittleren Offsets zu Beginn der Messungen variieren an den unterschiedlichen Tagen bis zu 29 ppb. Der Mittelwert liegt bei 37.5ppb und die Tageswerte weichen maximal um 41% von diesem ab. Ohne den Messwert vom 9. Oktober liegt die maximale Abweichung vom Mittelwert bei 36%. Wird diese Berechnung für den Mittelwert des Offsets vor und nach der Wanderung durchgeführt (Tabelle 2, letzte Zeile), dann weichen die einzelnen Tage bis zu 35% vom Mittelwert ab. Wenn dabei der 16. September wegen seinen auffällig tiefen Werten weggelassen wird, dann sinkt die Abweichung der verbleibenden fünf Tage von deren Mittelwert bis auf 16% ab. Beim Vergleich der Werte

zu Beginn und zum Schluss desselben Messtages liegen die Abweichungen immer unter 15%, mit Ausnahme des letzten Messtages.

Die Abbildung 9 zeigt den Offset jeder einzelnen Messung, welche zur Bestimmung des Mittelwertes vor der Wanderung benutzt wurden. Die Nummern der Messungen sind chronologisch geordnet. Die Messung eins ist die erste Messung am 3. September und die Messung 4712 die letzte Messung vom 9. Oktober. Die Werte sind nicht komplett willkürlich verteilt. Es gibt Abschnitte auf denen der Offset konstant bleibt. An gewissen Stellen steigt er jedoch an oder sinkt ab.

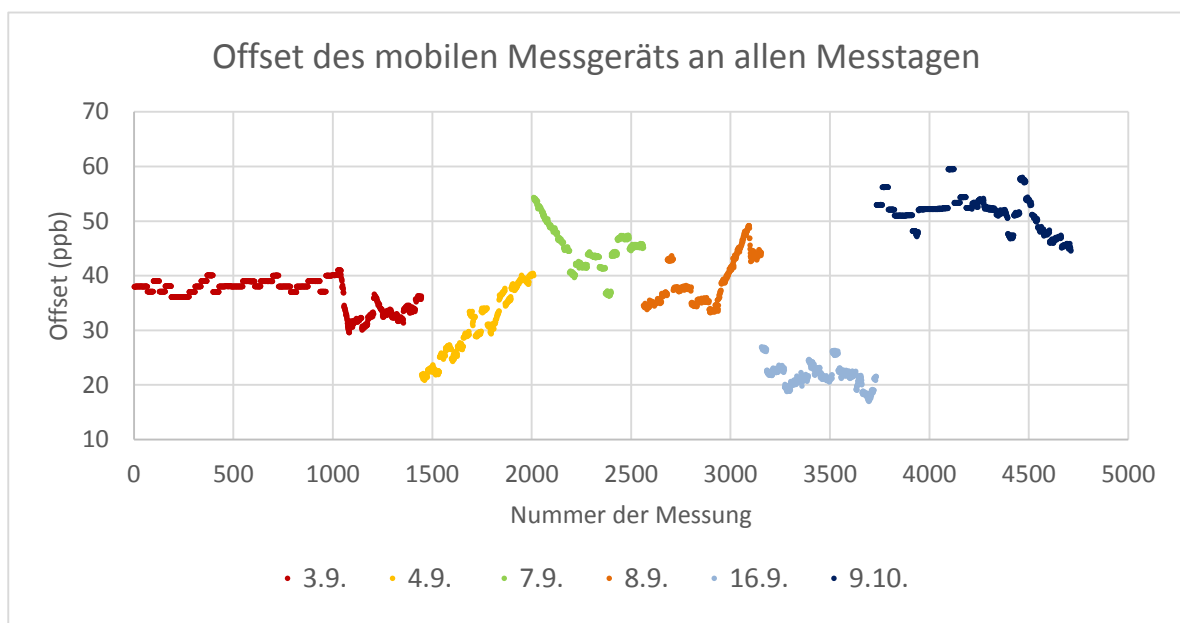


Abbildung 9: Differenz der gemessenen Ozonkonzentration vom mobilen und dem stationären Messgerät vor der Wanderung. Messung Nummer 1 ist die erste Messung am 3. September und Messung Nummer 4712 ist die letzte am 9. Oktober.

Um diese zeitliche Veränderung des Offsets besser zu visualisieren, wurden die Tage in Abbildung 10 einzeln dargestellt. Der Offset ist hauptsächlich konstant, ausser an den Stellen, welche mit roten Kreisen markiert sind. Der 16. September und der 8. Oktober ist der Offset stabil. Am 3. September ist er zuerst stabil und fällt gegen Ende der Wanderung abrupt ab. Der Offset am 4. September folgt einer konstante Steigung. Am 7. September fällt der Offset anfangs stetig ab und stabilisiert sich dann. Am 8. September steigt er gegen Ende der Messperiode an, fällt dann aber ganz am Schluss wieder ab.

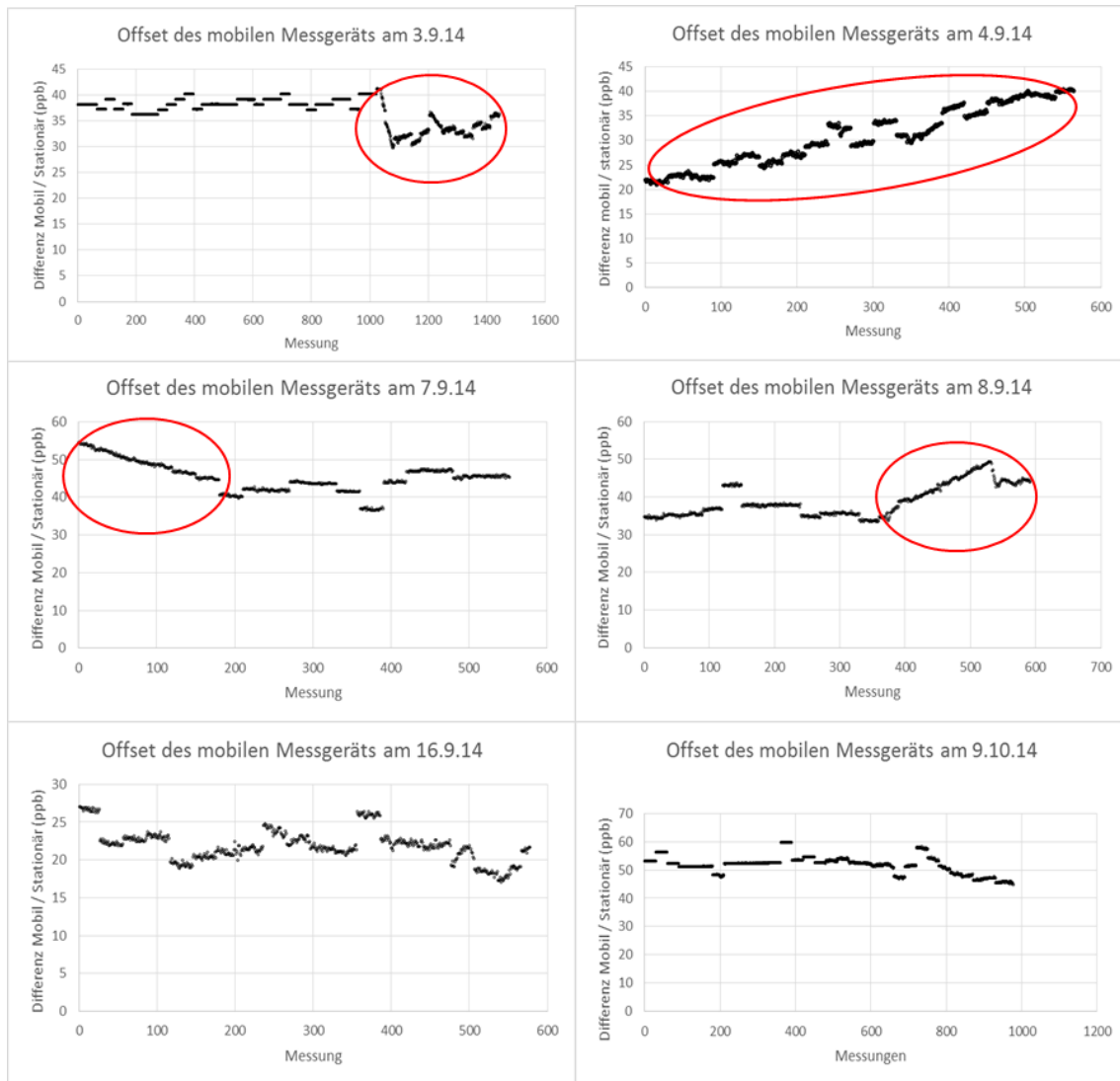


Abbildung 10: Offset des mobilen Messgerätes an allen Messtagen, Rot eingekreist sind Unregelmässigkeiten

Abbildung 11 und Abbildung 12 wurde der Offset des mobilen Gerätes gegen die Temperatur und gegen die Feuchtigkeit, welche ebenfalls von diesem Gerät alle zwei Sekunden gemessen wurden, geplottet.

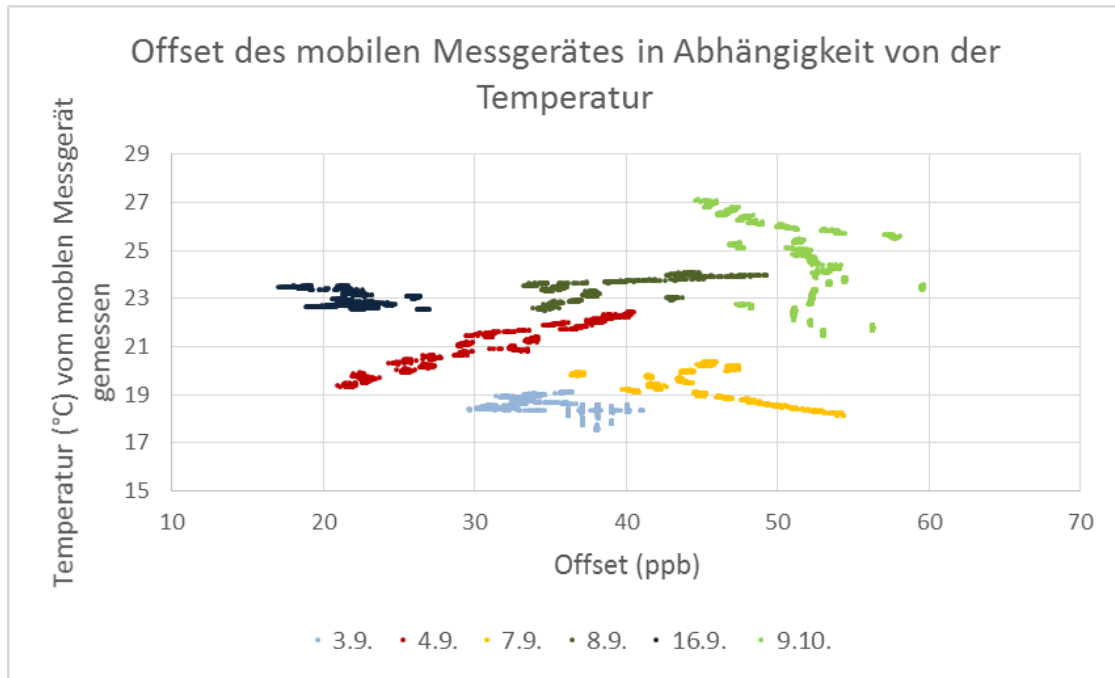


Abbildung 11: Offset und Temperatur an allen Messtagen vor Beginn der Wanderung

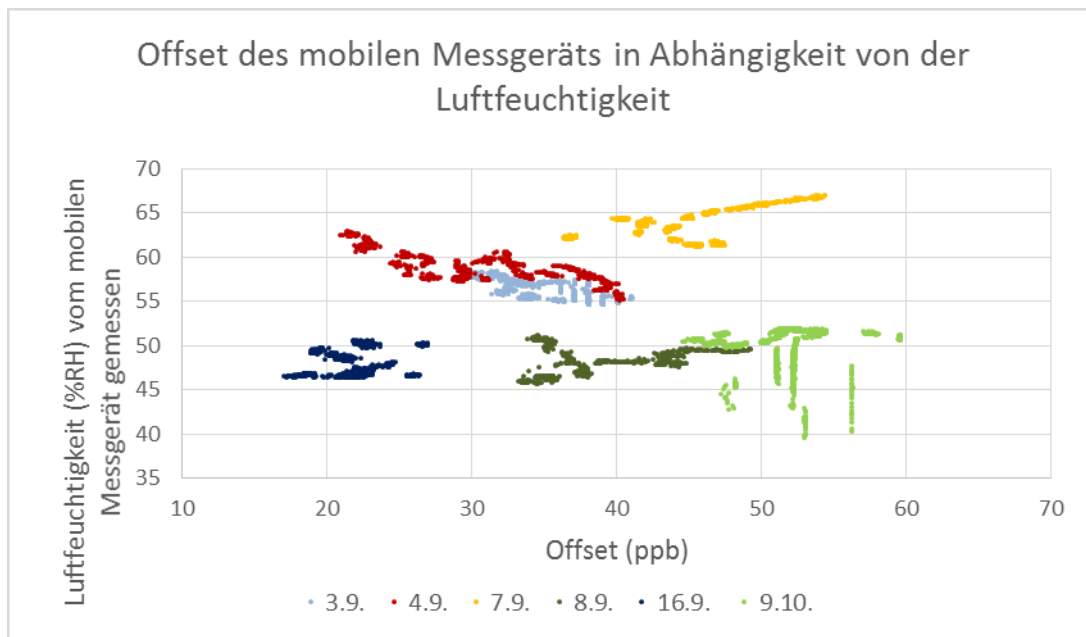


Abbildung 12: Offset und Luftfeuchtigkeit an allen Tagen vor Beginn der Wanderung

Bei Betrachtung der beiden obigen Abbildungen fällt auf, dass die Tage mit höheren Temperaturen (3., 8. und 16. September) eine niedrigere Luftfeuchtigkeit aufweisen. Eine Korrelation zwischen den Parametern Temperatur und Feuchtigkeit mit dem Offset ist nicht zu

erkennen. Bloss am 4. September steigt der Offset mit steigender Temperatur und fallender Luftfeuchtigkeit an. Die andern Tage bestätigen diesen Trend jedoch nicht.

Schlussendlich wird für diese Arbeit keine Korrektur des Offsets vorgenommen, da dieser Unregelmässigkeiten aufweist, deren Ursache nicht bekannt ist. Deshalb wird die Analyse der Ozonkonzentration im restlichen Verlauf dieser Arbeit auf den nicht-korrigierten Werten des mobilen Messgeräts basieren. Da die Analyse auf dem Vergleich zwischen den sechs Messtagen und zwischen den verschiedenen Positionen an einem einzelnen Messtag basiert, kann dies trotzdem zu gültigen Schlussfolgerungen führen. Es werden keine Aussagen über den tatsächlichen absoluten Ozongehalt in der Luft gemacht.

4.2 Umrechnung von Koordinaten zu Distanz

Die Ausgabetabelle der Messgeräte gibt in einer Kolonne den Zeitpunkt der Messung und in einer Kolonne den Parameter von dem die Ozonkonzentration abgeleitet werden kann. Es ist naheliegend, die Ozonkonzentration an den verschiedenen Tagen über einer Zeitachse zu plotten. Dies wurde in Abbildung 13 für das mobile Messgerät gemacht. Für die Beantwortung der Forschungsfragen ist es jedoch relevant, an welcher Position die Ozonkonzentration gemessen wurde und nicht zu welcher Uhrzeit.

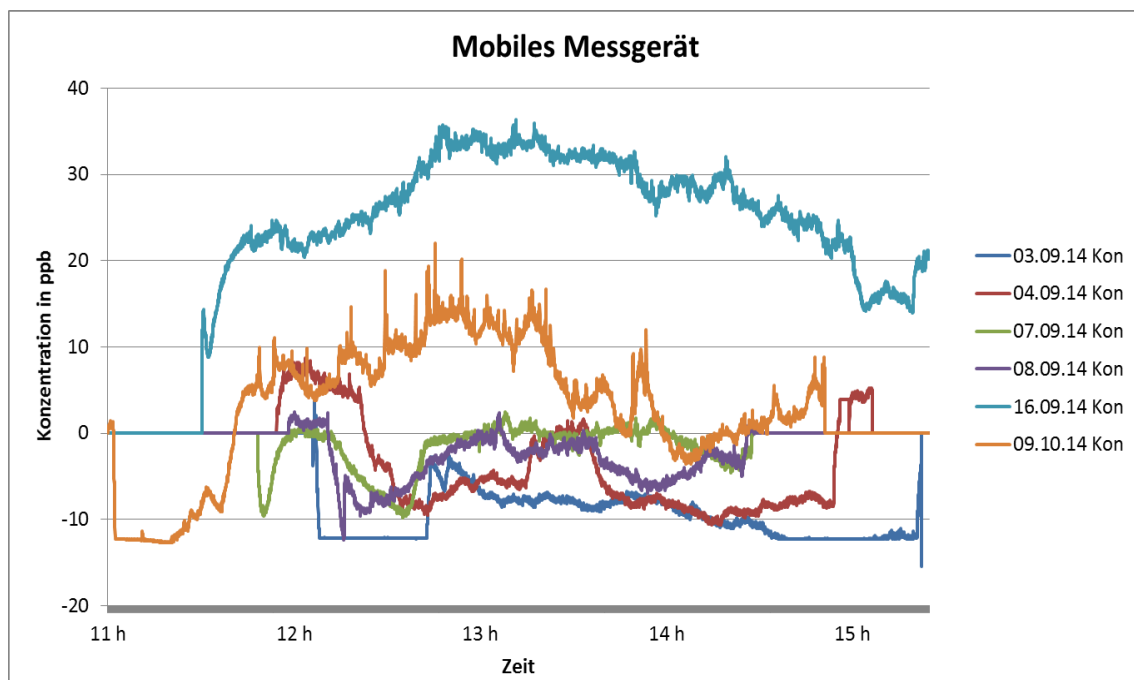


Abbildung 13: Ozonkonzentration während Wanderungen im Gebiet Flühli-Sörenberg, beim 16.09.14 und 09.10.14 handelt es sich um die zweite, längere Route.

Aus diesem Grund wurde der Verlauf der Wanderung mit einem GPS-Gerät aufgezeichnet. Zu jedem Messwert existieren ein Längen- und ein Breitengrad. Um die Position der Messung in einer einzigen Variablen auszudrücken, wird die „zurückgelegte Distanz“ vom Start der Wanderung bis zum Messpunkt berechnet. Die Distanz zwischen zwei benachbarten Messpunkten ist ein Vektor im Koordinatensystem WGS84 und seine Länge kann mithilfe der Längen- (X) und Breitengraden (Y) der beiden Messpunkte wie folgt berechnet werden:

$$Distanz = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (G1)$$

Zuerst müssen aber der Breiten- und der Längengrad in Kilometer umgewandelt werden. Ein Breitengrad entspricht überall auf der Welt einer Länge von 111,32 km. Beim Längengrad hängt die Länge eines Grades davon ab, wie weit südlich oder nördlich man sich auf der Erdkugel befindet. Die Wanderung aus dieser Forschungsarbeit befindet sich am nächsten bei 47° nördlicher Breite. Der Umfang eines Breitenkreises wird berechnet mit Hilfe der Formel:

$$U = 2 * 6731km (= Erdradius) * \pi * \cos(Breitengrad) \quad (G2)$$

Der 47. Breitenkreis hat laut Gleichung (G2) einen Umfang von gerundeten 27'300 Kilometern. Der Umfang entspricht 360 Grad, also misst ein Grad 76 Kilometern, wenn auf ganze Kilometer gerundet wird.

Auf den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 14, Abbildung 15) wurde nun also die vom mobilen Gerät gemessene Ozonkonzentration gegen die zurückgelegte Distanz geplottet. Somit kann direkt aus der Grafik abgelesen werden, ob die Ozonkonzentration immer auf denselben Abschnitten der Wanderung zu- beziehungsweise abnimmt.

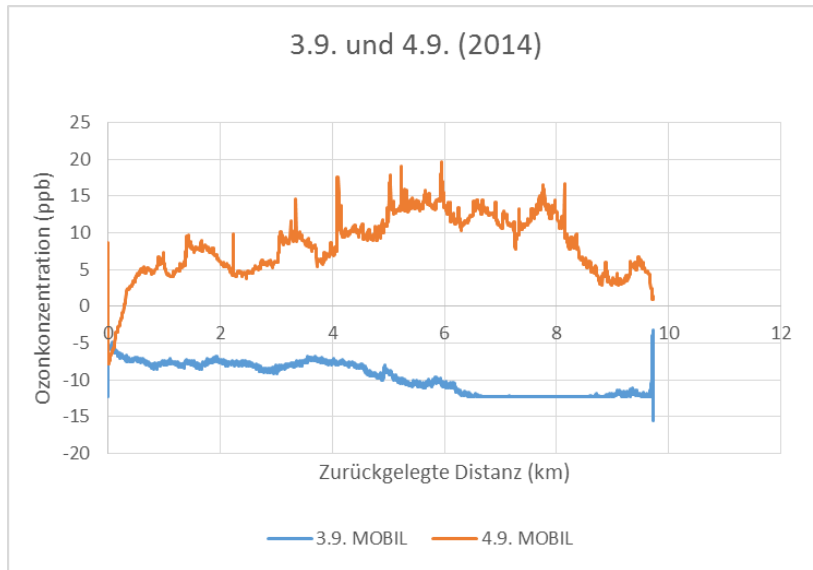


Abbildung 14: Ozonkonzentration am ersten und zweiten Messtag, Route eins

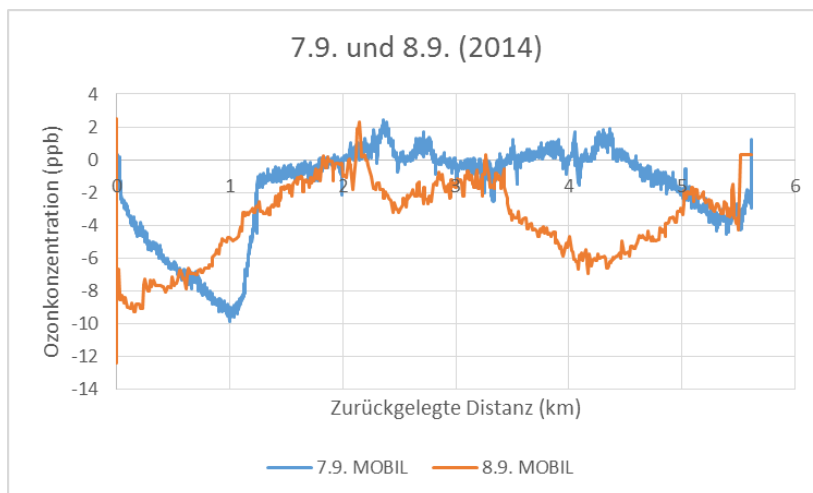


Abbildung 15: Ozonkonzentration am dritten und vierten Messtag, Route eins

Nach der oben beschriebenen Berechnungen beträgt die Gesamtlänge der Wanderung am 3. und 4. September fast 10 Kilometer, am 7. und 8. September jedoch nur 5.5 Kilometer. Dies, obwohl es sich um dieselbe zurückgelegte Wegstrecke handelt. Da diese Strecke etwas weniger als 10 Kilometern entspricht, muss am 7. und 8. September ein Fehler unterlaufen sein. An diesen beiden Tagen wurde der Track mit dem Auto-GPS aufgezeichnet. Entweder war an diesem Gerät etwas falsch eingestellt, oder es hat anstelle des WGS84 ein anderes Koordinatensystem verwendet. Die Korrektur dieser Unstimmigkeit wird im folgenden Kapitel beschrieben.

4.3 Korrektur der Koordinaten vom Auto-GPS

Die Koordinaten des Auto-GPS stimmen in zweierlei Hinsicht nicht mit denen von ViewRanger überein. In Abbildung 16 ist erkennbar, dass sich die beiden Trackaufzeichnungen sowohl in der Position wie auch in der Grösse unterscheiden. Die Form ist jedoch deckungsgleich.

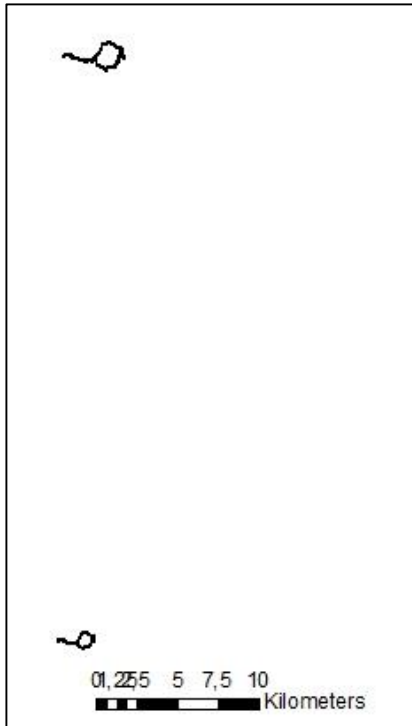


Abbildung 16: Track vom 3.9.2014 mit ViewRanger aufgezeichnet (oben) und Track vom 8.9.2014 mit Garmin-GPS aufgezeichnet (unten), WGS84 Koordinaten

Dass die von Viewranger aufgezeichneten Daten dem WGS84 entsprechen und korrekt sind, lässt sich anhand von Google Earth überprüfen. Beim Import der Trackaufzeichnung in Google Earth erscheinen die Wanderungen an der korrekten Position in der dreidimensionalen Karte.

Da nicht herausgefunden werden konnten, warum die Trackaufzeichnung vom Garmin-GPS nicht derjenigen von ViewRanger entspricht, wird eine Korrektur angewendet, um die Koordinaten von Garmin denjenigen von Viewranger anzugleichen.

Dazu werden zuerst die Koordinaten des Ausgangs- und Endpunktes von allen vier mit ViewRanger aufgezeichneten Tracks gemittelt. Die Husegg befindet sich laut diesem Mittelwert bei 46,813869 Grad nördlicher Breite und 8,007463 Grad östlicher Länge. Die Differenz dieses als richtig erachteten Anfangspunktes und dem Anfangspunkt der Messung des Garmin-AutoGPS wird ermittelt, um danach jeden Messpunkt des AutoGPS um diese Differenz zu korrigieren.

Um die Ausdehnung der Tracks anzupassen wird zuerst die gesamte Länge der Wanderung für den Track von ViewRanger sowie für den von Garmin ausgerechnet (siehe Kapitel 4.2). Die „richtige“ Länge der Route 1 beträgt 9,73 Kilometer, die zu korrigierende nur 5,61 Kilometer. Dies entspricht einem Verhältnis von ungefähr 1,734. Diese gesamte Länge des Tracks wurde gefunden, indem alle Abstände zwischen zwei benachbarten Messpunkten aufsummiert wurden. Jeder der Abstände zwischen zwei Messpunkten muss mit dem Faktor 1,734 multipliziert werden. Das gelingt, indem man jeweils die erste Koordinate beibehält. Dann multipliziert man die Breiten- sowie die Längendifferenz zwischen den beiden ehemaligen Messpunkten mit dem Faktor 1,734. Nun addiert man die so erhaltenen neuen Längen- und Breitendifferenzen zu den Koordinaten des ersten Messpunktes. Somit erhält man den korrigierten zweiten Messpunkt. Man nimmt nun den zweiten, korrigierten Messpunkt und korrigiert gleich wie zuvor auch den dritten Messpunkt usw. Die somit erhaltene Annäherung der GPS-Koordinaten an die ViewRanger-Koordinaten stimmt bis auf circa 100 Meter genau überein, wie auf Abbildung 17 zu sehen ist.

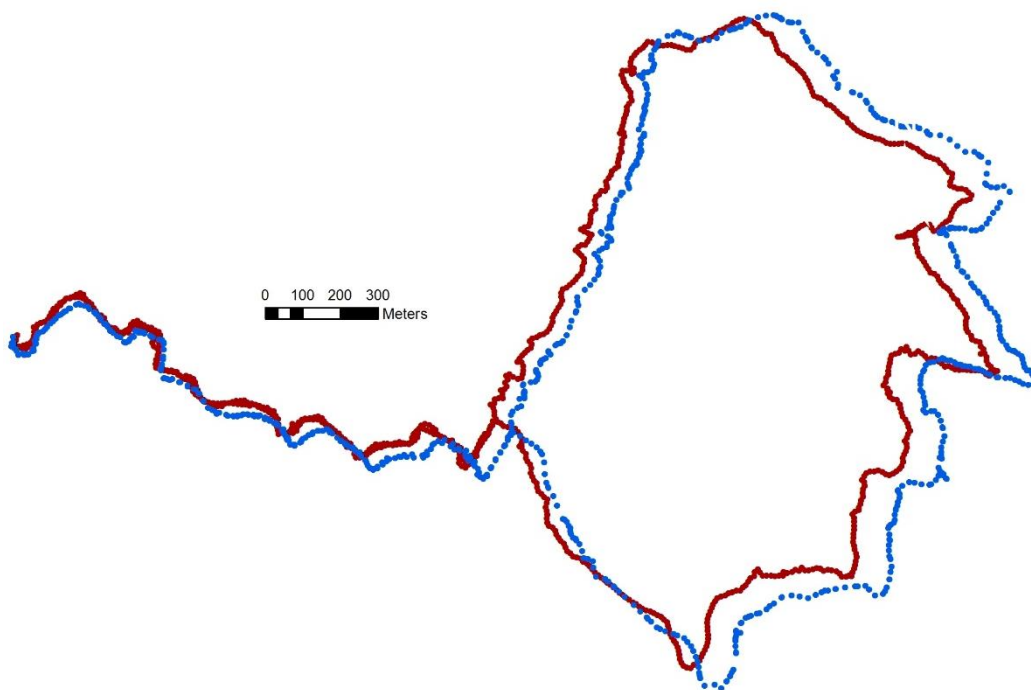


Abbildung 17: Mit ViewRanger aufgezeichneter Track in dunkelrot und korrigierte Garmin-GPS Track in blau

4.4 Von WGS84 zu CH1903

Um die Ozondaten im Programm ArcGis zu analysieren, braucht es einen Kartenhintergrund von der Forschungsregion in hoher Auflösung, um die Vegetationszonen zu erkennen. Es wurden Orthophotos von swisstopo bezogen. Diese Karten sind automatisch georeferenziert wenn sie in ArcGis eingefügt werden, doch sie sind im Koordinatengitter der Schweiz (CH1903) codiert. Da die GPS-Daten der Messungen im Weltkoordinatensystem (WGS84) abgespeichert sind, muss eine Umwandlung gemacht werden. Diese Umrechnung wurde nach der folgenden Formel gemacht (Dupraz, 1992):

„ Näherungsformeln für die direkte Umrechnung von: ellipsoidischen WGS84-Koordinaten (ϕ, λ, h) \Rightarrow Schweizer Projektionskoordinaten (y, x, h')

(Genauigkeit im 1-Meter-Bereich)

nach: [H. Dupraz, Transformation approchée de coordonnées WGS84 en coordonnées nationales suisses, IGEO-TOPO, EPFL, 1992]

Die Parameter wurden von U. Marti (Mai 1999) neu berechnet. Zudem wurden die Einheiten so angepasst, dass sie mit den Formeln aus [Bolliger 1967] vergleichbar werden.

1. Breite ϕ und Länge λ sind in Sexagesimalsekunden ["] umzuwandeln
2. Hilfsgrößen (Breiten- und Längendifferenz gegenüber Bern in der Einheit [10000"]) berechnen:

$$\phi' = (\phi - 169028.66 \text{ "})/10000$$

$$\lambda' = (\lambda - 26782.5 \text{ "})/10000$$
3. y [m] = $600072.37 + 211455.93 * \lambda' - 10938.51 * \lambda' * \phi' - 0.36 * \lambda' * \phi'^2 - 44.54 * \lambda'^3$
 x [m] = $200147.07 + 308807.95 * \phi' + 3745.25 * \lambda'^2 + 76.63 * \phi'^2 - 194.56 * \lambda'^2 * \phi'$
 $+ 119.79 * \phi'^3$

“(Bundesamt für Landestopographie swisstopo, 2005, S.1)

Die gesamten Koordinaten von den sechs Messtagen wurden so transformiert und konnten danach in ArcGis auf die Orthophotos projiziert werden.

5 Resultate

Die Abbildung 18 zeigt die vom stationären Messgerät gemessenen Ozonkonzentrationen an den Messtagen. So kann man die Menge des Ozons in der Luft für die verschiedenen Tage direkt vergleichen. Es ist aber interessant zu sehen, ob es eine zeitliche Tendenz gibt. Die Messungen liegen alle im zeitlichen Bereich zwischen 11 Uhr und 16 Uhr. Tatsächlich scheint es an einigen Tagen einen leichten Anstieg während des Verlaufs des Nachmittags zu geben.

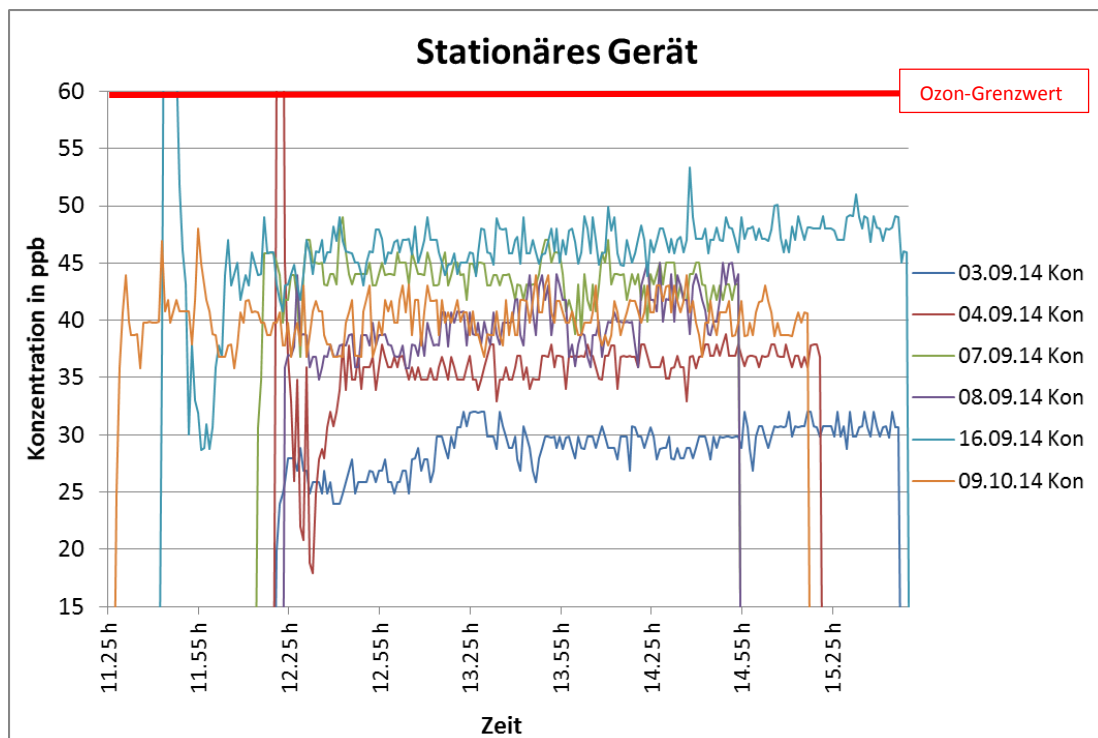


Abbildung 18: Ozonkonzentration auf der Husegg, der Grenzwert für Ozon in der Schweiz ist mit der roten Linie gekentzeichnet

Die Ozonwerte des stationären Geräts bleiben für alle sechs Tage bis auf kleine Schwankungen konstant während der Zeit der Messwanderung. Die täglichen Schwankungen sind in der Grössenordnung von 10ppb. Zu Beginn der Messungen schlägt die Konzentration am 4. und am 16. September stark nach oben, dann nach unten aus. Dies ist die Periode in der sich das Gerät kalibriert. Danach bleibt es stabil. Bei den anderen Tagen ist die anfängliche Selbstkalibration nicht so deutlich zu erkennen.

Die gemessenen Ozonkonzentrationen liegen im Bereich zwischen 20 und 50 ppb. Dies ist relativ wenig. Der in der Schweiz gesetzlich festgelegte Grenzwert für Ozon beträgt $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ab dann wird das Ozon gesundheitsschädlich für die Menschen. Der Umrechnungsfaktor von ppb in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ beträgt ca. 2.00 für Standorte unter 1500 Meter über Meer, bei einem Druck von 1013.25 hPa und der Temperatur von 20°C (BUWAL, 2004). Die Husegg ist der höchste Punkt

der Messwanderungen und liegt auf 1469 Meter über Meer. Demzufolge entspricht auf der Messwanderung $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Ozon ungefähr 60 ppb. Der Grenzwert wurde also an den sechs Messtagen nie überschritten (siehe Abbildung 18).

Am wenigsten Ozon wurde am ersten Messtag (3. September) gemessen, danach folgt der 4. September. Die höchsten Werte stammen vom 16. September. Am 7. September wurde mehr Ozon gemessen als am folgenden Tag, dem 8. September.

Die Abbildung 13 zeigt dieselbe Grafik für die Messwerte des mobilen Geräts. Die Ozonkonzentration variieren zeitlich stark. Trotzdem gibt es Parallelen zu den Messwerten des stationären Gerätes (Abbildung 18). Der Tag mit der höchsten Ozonkonzentration ist der 16. September, der Tag mit dem wenigsten Ozon der 3. September. Beim mobilen Gerät ist der 16. September mit Abstand der ozonreichste und der 3. September nur knapp der ozonärmste Tag. Das stationäre Gerät hingegen zeigt für den 16. September knapp am meisten und für den 3. September deutlich am wenigsten Ozon an. Diese Abweichungen können daher stammen, dass der Offset des mobilen Messgerätes nicht korrigiert wurde. Die Tatsache, dass die Messungen des mobilen Gerätes stark variieren, während diejenigen des Stationären Gerätes konstant bleiben, deutet aber dennoch darauf hin, dass entlang der Messwanderung lokal bedingte Unterschiede in der Ozonkonzentrationen vorhanden sind. Um zu sehen, ob immer an denselben Stellen auf der Wanderung höhere bzw. niedrigere Werte gemessen wurden, wurde die Ozonkonzentration gegen die zurückgelegte Distanz geplottet (Abbildung 19, Abbildung 20).

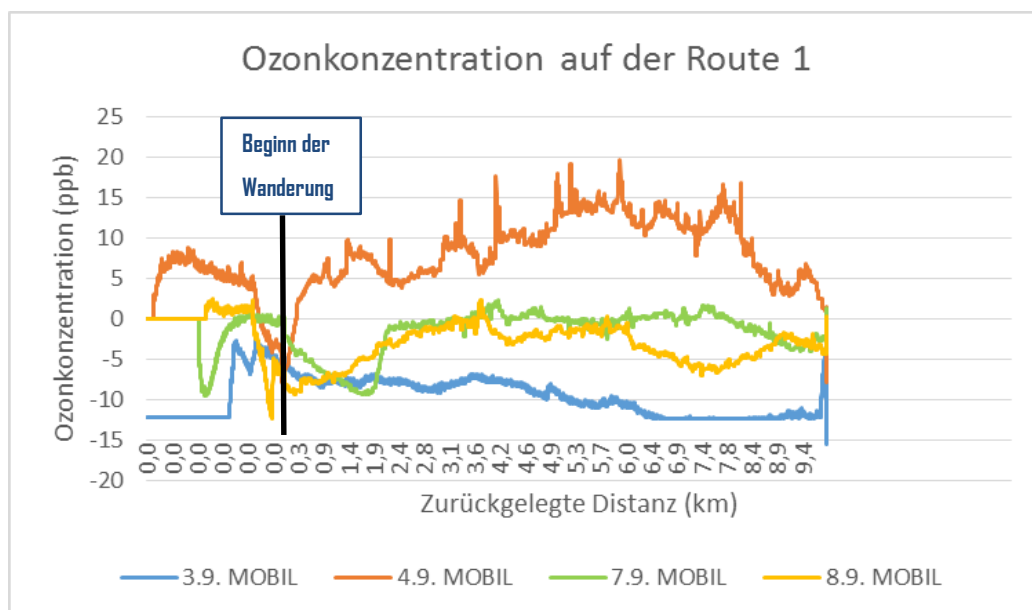


Abbildung 19: Ozonkonzentration entlang der Route 1, unkorrigierte Messwerte

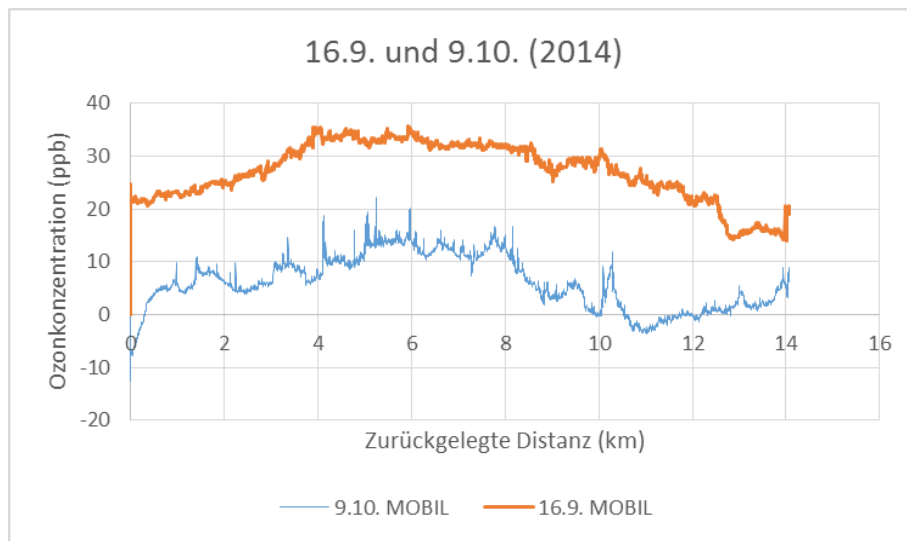


Abbildung 20: Die Ozonmessungen der zweiten Route, unkorrigierte Messwerte

In Abbildung 19 ist keine eindeutige Übereinstimmung des Verlaufs der vier Kurven zu erkennen. Das Ozon war am 3. September extrem niedrig und nahm während der Wanderung weiter ab. Die Kurve hat mit den anderen drei Tagen keine Übereinstimmung. Bei den restlichen drei Tagen kann man erkennen, dass die Ozonkonzentration zu Beginn und zum Schluss der Wanderung eher geringer und im mittleren Teil tendenziell höher ist. Interessant ist, dass in drei Fällen vor der Wanderung auf der Husegg etwas höhere Werte gemessen wurden und die Werte dann zu Beginn der Wanderung plötzlich stark abfallen, danach wieder ansteigen. Dies fällt zeitlich mit dem Verstauen des mobilen Messgeräts im Rucksack zusammen. Dabei wird Gerät von einer waagrechten in eine senkrechte Position gebracht und durch den Rucksack verändert sich die Luftzufuhr, obwohl darauf geachtet wurde, dass die Lüftungsöffnung des Gerätes frei liegt. Trotzdem könnten diese Veränderungen das Gerät in den Messungen kurzfristig beeinträchtigt haben. Danach steigt die Konzentration an allen Tagen wieder bis auf das anfängliche Niveau und sogar noch höher. Ausnahme ist der 3. September, an dem die Ozonkonzentration von Beginn an immer weiter abnimmt. Während den letzten drei Kilometern bleiben die Werte aussergewöhnlich konstant, bei ungefähr – 12 ppb, was höchst wahrscheinlich die Messlimite des Gerätes aufzeigt. Die beschriebenen Variationen der gemessenen Ozonkonzentration können allerdings auch vom Offset des mobilen Messgerätes beeinflusst sein, da es sich bei den Messwerten in Abbildung 19 und Abbildung 20 um die unkorrigierten Werte handelt.

Offensichtlicher ist ein Muster in der Abbildung 20. Der Verlauf der beiden Konzentrationskurven ist sehr ähnlich an den beiden Tagen. Die Ozonkonzentration steigt zuerst während vier bis fünf Kilometer an, dann beginnt sie wieder zu sinken. Auf den letzten Kilometern steigt die Konzentration dann nochmals an, am 9. Oktober früher als am 16. September. Am 16. September war allgemein die Ozonmenge in der Luft höher. Am 9. Oktober waren die kleinräumigen Schwankungen grösser, die Messwerte sind weniger „stabil“. Ein ähnliches Verhalten zeigen die Messungen vom 4. September (vgl. Abbildung 19). Dies sind gleichzeitig die beiden Tage, an denen das stationäre Messgerät bei der Kalibration starke Schwankungen aufgewiesen hat.

Um zu sehen, an welchen Stellen auf der Wanderung genau diese Variationen liegen, wurde die Route im Koordinatensystem aufgezeichnet und einzelnen Messpunkte je nach Höhe der Ozonkonzentration eingefärbt (Abbildung 21). Die Farbskala ist nicht identisch für die beiden Routen, da auf der zweiten Route am 16. September die mit Abstand höchsten Werte und auf Route eins, vor allem am 3. September, viel tiefere Werte gemessen wurden. Wenn man eine einheitliche Skala für alle Messtage verwendet, dann erscheinen die vier Tracks von Route 1 fast komplett grün, und derjenige des 16. September rot. Das macht es schwierig, die räumliche Variation zu analysieren.

Am 3. September wurde vom mobilen Messgerät am wenigsten Ozon gemessen, am 7. September am meisten (Abbildung 21). Es besteht eine Tendenz, dass unten im Tal, in der Siedlung mehr Ozon gemessen wurde, als in höheren Lagen, in Wald und Wiese. Am deutlichsten ist dies am 4. September zu erkennen, aber auch der 8. September folgt diesem Muster.

Am 3. September war die Konzentration zu Beginn der Wanderung am grössten und nahm dann im Verlaufe der Wanderung immer mehr ab (vgl. Abbildung 14). Eine auf die Siedlung zurückzuführende Veränderung der Konzentration ist nicht erkennbar. Auch am 7. September zeigte sich in Dorfnähe keine Erhöhung der gemessenen Ozonkonzentrationen. Sie sind in der Höhe auf dem südlichsten Wegabschnitt ebenso hoch wie im Tal.

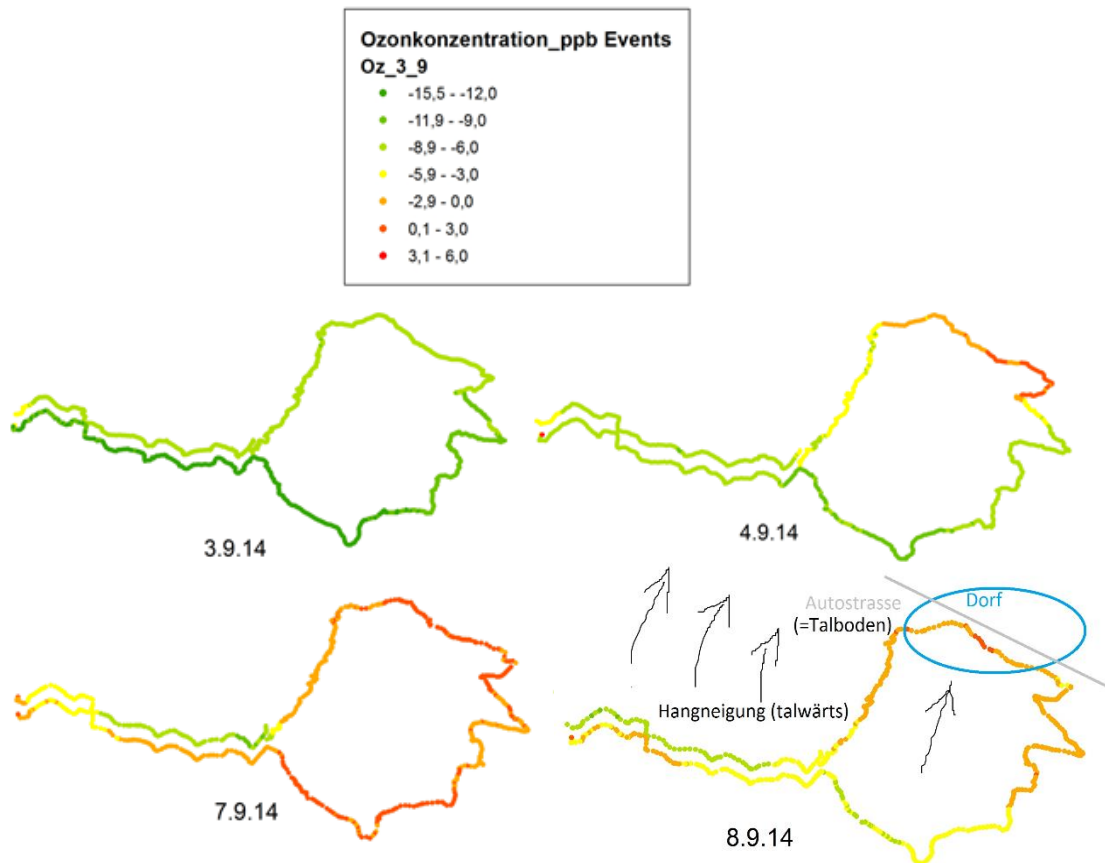


Abbildung 21: Ozonkonzentration auf der Route 1. Die Anfangsstrecke ist leicht versetzt aufgezeichnet, damit die Konzentration vom Hin- (oben) und Rückweg (unten) unterschieden werden können.

Für die zweite Route ist es unvorteilhaft, dieselbe Skala für beide Tage zu nehmen (Abbildung 22), da der 16. September auch dann noch beinahe durchgehend rot erscheint. Daher wurden hier nochmals die Skalen auf die beiden Tage individuell zwischen dem Minimum und dem Maximum der pro Tag gemessenen Ozonkonzentration angepasst (Abbildung 23).

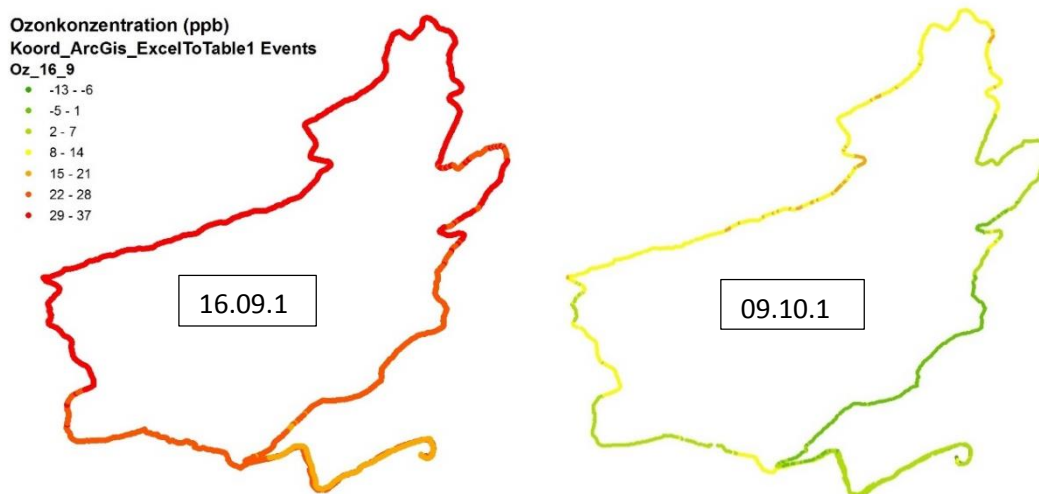


Abbildung 22: Ozonkonzentration entlang der Route 2, gleiche Farbskala für beide Messtage

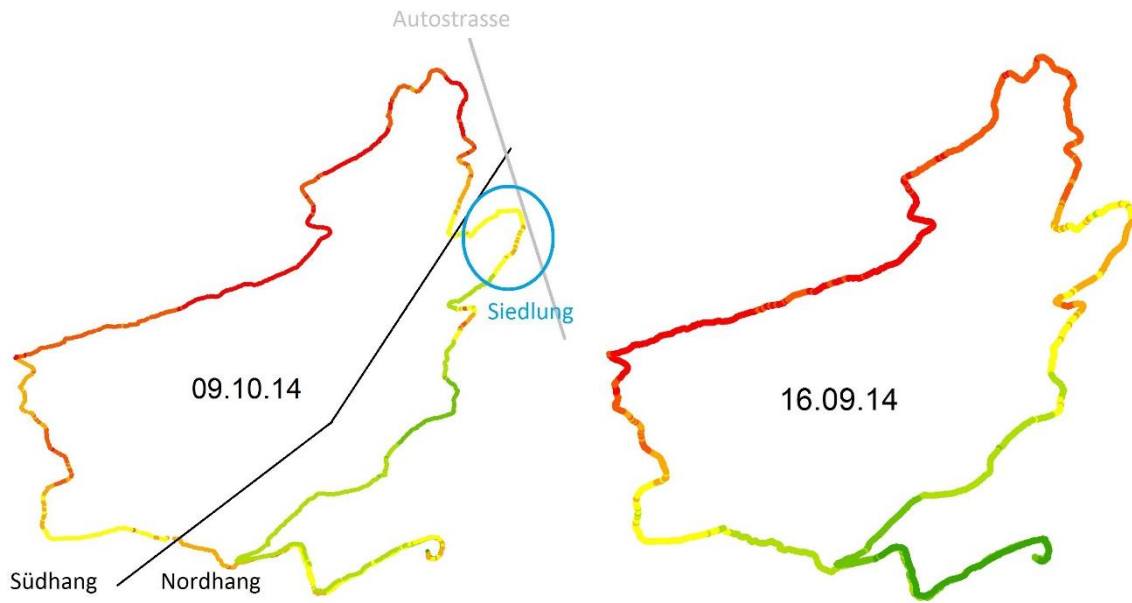


Abbildung 23: Ozonkonzentration Route 2; unterschiedliche Farbskalen, angepasst an die Werte des jeweiligen Tages

Die Abbildung 23 zeigt, dass die räumliche Verteilung der Ozonkonzentration an den beiden Tagen beinahe identisch ist. Das Ozon kommt auf dem nördlichen Abschnitt der Wanderung in bedeutend höheren Konzentration vor, als im südlichen Teil.

6 Interpretation und Diskussion

6.1 Messverfahren

Wie erwartet existiert ein Offset der Messungen mit dem mobilen Messgerät gegenüber den Referenzmessungen mit dem stationären Gerät. Der Gesamtmittelwert der Messabweichung an den sechs Messtagen, wenn sich die beiden Messgeräte am selben Ort befinden, liegt bei 36,5ppb. Dies ist angesichts der laut Hersteller maximalen Auflösung von <30ppb des Sensors kein schlechtes Resultat. Es handelt sich bei der Messabweichung allerdings nicht um einen systematischer Fehler, da er nicht für alle Messungen identisch ist. Es scheint sich trotzdem nicht um eine völlig zufällige Messabweichung zu handeln. Der Offset hat immer das gleiche Vorzeichen, die Messwerte des mobilen Geräts liegen ohne Ausnahmen tiefer als die Referenzwerte. Wenn Extremwerte des Offsets herausgefiltert werden, dann ist dieser bis auf $\pm 16\%$ Abweichung vom Mittelwert konstant. Diese Messabweichung liegt somit beinahe in einem akzeptablen Bereich. Die grosse Schwierigkeit liegt in den niedrigen Konzentrationen, welche gemessen wurde. Durch die tiefen Messwerte vergrössert sich das Signal/Rauschverhältnis. Je höher die gemessenen Ozonkonzentrationen, desto kleiner wird die Messabweichung im Verhältnis zu den Messwerten. Ausserdem wurde nur an sechs Tagen gemessen. Es benötigt mehr Daten um eine aussagekräftige statistische Analyse bezüglich des Offsets durchzuführen.

Bei Betrachtung der einzelnen Fehlerwerte zeigt sich, dass der Offset an den einzelnen Tagen bis auf gewisse Unregelmässigkeiten stabil bleibt (Abbildung 10), dass er aber von Tag zu Tag stark variiert (Abbildung 9). In dieser Arbeit konnte nicht ermittelt werden, wovon der Offset abhängt. Laut dem Hersteller tendiert das Basissignal der meisten Sensoren dazu, mit steigender Temperatur anzusteigen, genauer genommen verdoppelt sich das Signal bei einem Temperaturanstieg von ungefähr 10°C. Dies ist normalerweise nicht problematisch, ausser wenn sehr niedrige Gaskonzentrationen gemessen werden. Das war in dieser Forschungsarbeit der Fall, da in Folge der suboptimalen Wetterbedingungen sehr wenig Ozon in Bodennähe vorhanden war. In diesem Fall kann eine Veränderung der Grundlinie des Signals grosse Auswirkungen auf die Messresultate haben. Bei den vorliegenden Messresultaten konnte jedoch nur am 4. September ein Anstieg des Offsets mit steigender Temperatur nachgewiesen werden. An den anderen Tagen war keine Korrelation nachweisbar, weder mit der Temperatur noch mit der Luftfeuchtigkeit. Die Variationen des Offsets müssen also mit anderen Faktoren zusammenhängen. Diese konnten jedoch im Umfang dieser Studie nicht erforscht werden.

Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor sind die Querempfindlichkeiten des Sensors gegenüber Stickstoffdioxid (NO_2). Bei höherer NO_2 Konzentration nimmt die vom Gerät gemessene Ozonkonzentration auch zu (siehe Kapitel 3.2.2). Streng genommen müsste also gleichzeitig auch der NO_2 Gehalt der Luft gemessen werden.

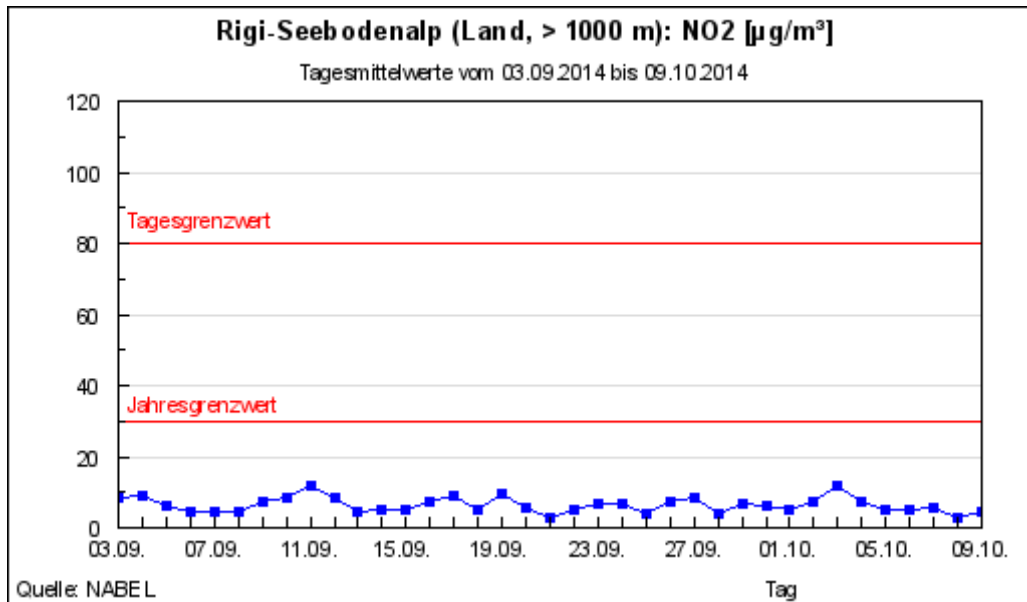


Abbildung 24: NO_2 -Tagesmittelwerte der Messstation Rigi-Seebodenalp, in der Zeit der Ozonmessungen

Die Abbildung 24 zeigt die NO_2 Konzentration, welche von der NABEL-Messstation Rigi-Seebodenalp während der Messperiode aufgezeichnet wurde. Diese Messstation ist in Bezug auf Höhe und Landschaft am besten mit dem Messgebiet vergleichbar. Die NO_2 Konzentration ist in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ angegeben. Ein ppb NO_2 entsprechen ungefähr $1,91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (BUWAL, 2004). Damit die Ozonkonzentration um ein ppb verfälscht wird, braucht es $1,67 \text{ ppb } \text{NO}_2$ in der Luft (Kapitel 3.2.2), was gerundeten $3,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entspricht. An den Messtagen lagen die NO_2 -Werte auf der Rigi zwischen $4,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (7. September) und $8,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (4. September). Dies bedeutet eine Erhöhung der gemessenen Ozonwerte von maximal 3 ppb. Unter der Annahme, dass die NO_2 -Konzentrationen in Sörenberg ähnlich waren wie auf der Rigi, kann diese Messverfälschung vernachlässigt werden. Es ist aber dennoch wichtig, sich bewusst zu sein, dass bezüglich der Hypothese vom Zusammenhang der Abgase und der Ozonbildung, die Verfälschung durch das NO_2 die Interpretation beeinflusst. Wenn davon ausgegangen wird, dass in Siedlungsnähe weniger Ozon vorhanden ist, da die Abgase den Ozonabbau fördern (siehe Kapitel 2), dann könnte dies aus den Daten nicht ersichtlich sein, weil das Gerät bei abgasreicher Luft (u. a. NO_2) höhere Ozonkonzentrationen angibt, als in Realität wirklich vorliegen. Die

Querempfindlichkeit würde diesem Trend, falls es ihn tatsächlich gibt, entgegenwirken und ihn vielleicht so kompensieren, dass er nicht mehr erkannt wird.

Eine mögliche Problematik liegt im Transport des mobilen Messgeräts während der Wanderung. Es ist nicht optimal, das Gerät in einem Rucksack mitzutragen, wie es für die vorliegende Forschungsarbeit gemacht wurde. Das Messgerät ist nicht gekühlt und bloss durch eine kleine Öffnung belüftet. Diese Art es zu transportieren stellt eine potentielle Fehlerquelle für die Temperatur- und Luftfeuchtmessungen. Auch die Ozonmessung kann unter Umständen verfälscht werden, weil die Luftzufuhr aus der Umgebung beschränkt ist. Dies ist jedoch sehr unwahrscheinlich. Es wurde darauf geachtet, dass die Löcher, durch welche die Luft eingesogen und wieder ausgestossen wird, oben durch den geöffneten Rucksack an der frischen Luft sind. Aber das Gerät oder der Rucksack können leicht verrutschen während dem marschieren.

Um zu überprüfen ob die Referenzmessungen vom stationären Messgerät tatsächlich verlässlich sind, werden die Werte mit offiziellen Messungen des NABEL Messnetzes verglichen. Es werden erneut die Werte der Messstation Rigi-Seebodenalp verwendet. In Abbildung 25 sind die Messungen der NABEL-Station an den sechs Messtagen aufgezeichnet. Für den direkten Vergleich folgen in Abbildung 26 die Messungen des stationären Messgeräts auf der Husegg.

Die Konzentrationen lagen an beiden Messstationen im Bereich zwischen 25 und 50 ppb, ausser dem 7. und 8. September, als auf der Rigi Werte bis zu 60 ppb gemessen wurden. Am 4., 7., 8. Und 16. September steigen die Werte auf der Rigi zwischen 12 und 15 Uhr deutlich an, während sie auf der Husegg konstant bleiben oder nur ganz minim zunehmen. Dieser Unterschied ist womöglich auf lokale topographische und meteorologische Faktoren zurückzuführen. Generell lässt sich sagen, dass die Werte des stationären Gerätes mit denen von der NABEL-Station kompatibel sind.

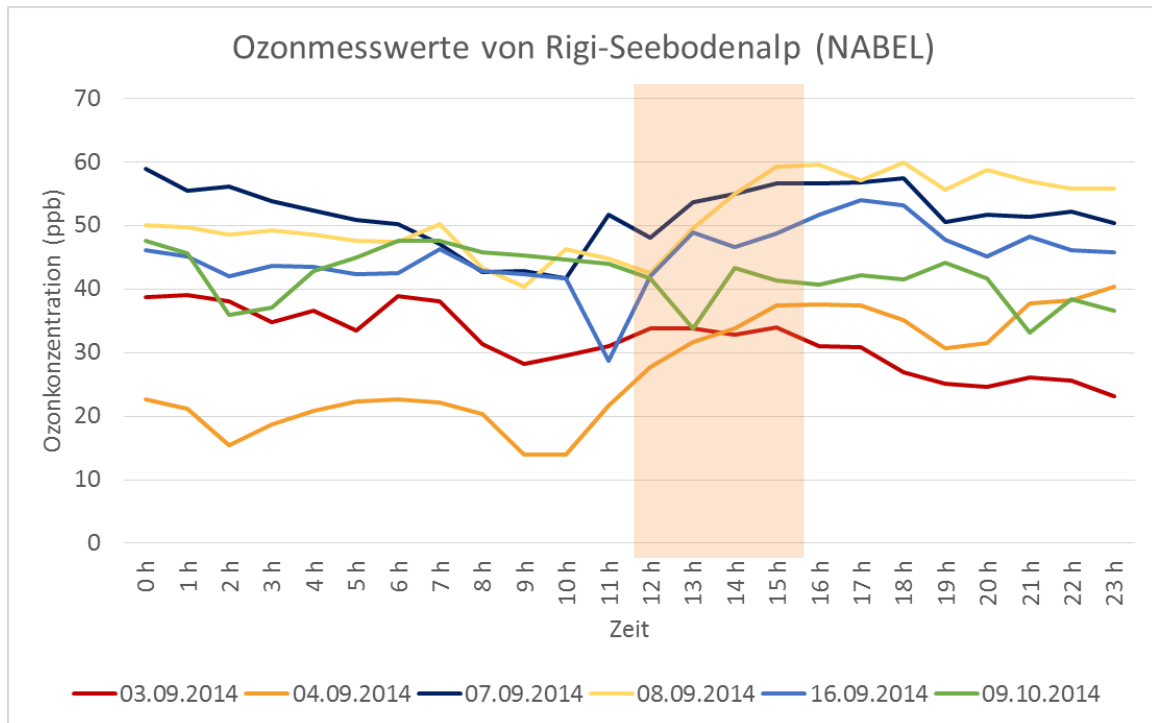


Abbildung 25: Offizielle Ozon-Messwerte der NABEL-Messstation Rigi-Seebodenalp an den Messtagen. Hellrot gezeichnet ist die Zeitperiode der Messungen auf der Husegg mit dem stationären Messgerät.

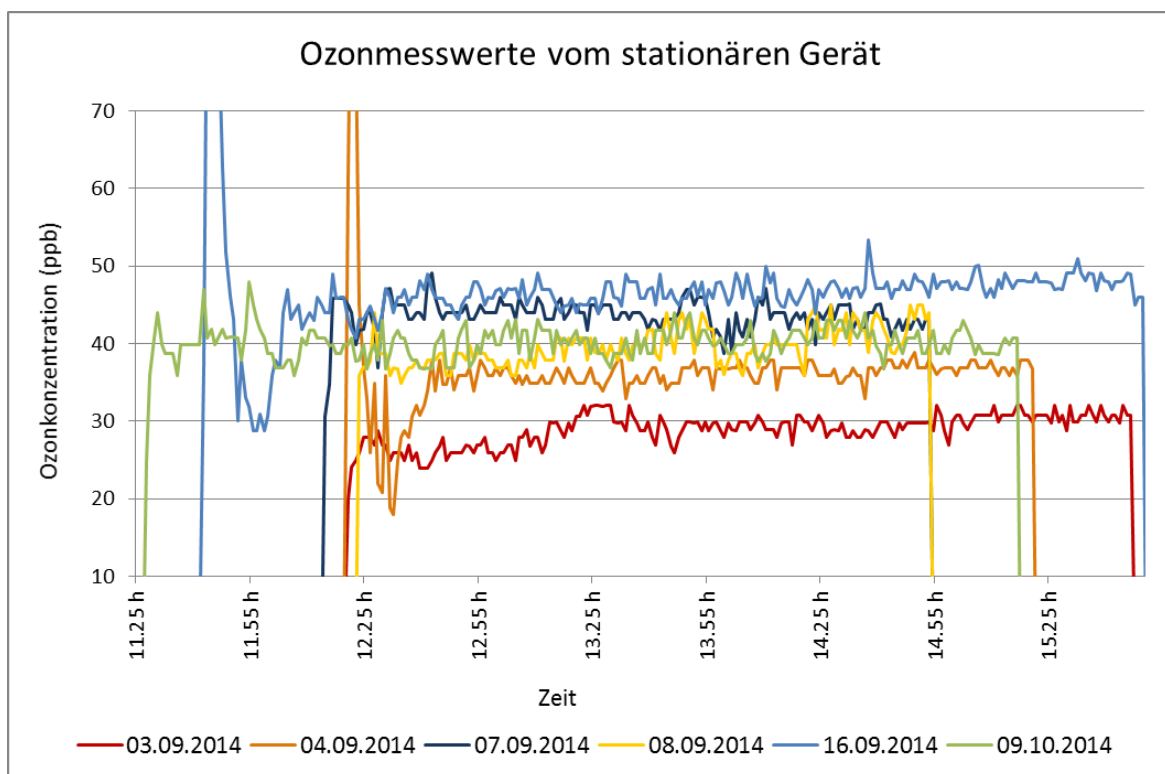


Abbildung 26: Ozonmesswerte vom stationären Messgerät an allen Messtagen auf der Husegg

6.2 Zeitliche Variabilität der Ozonkonzentration

Wie die Abbildung 18 zeigt, war nicht an allen Tagen gleich viel Ozon in der Luft. Dies wird in Tabelle 3 nochmals verdeutlicht, indem der Tagesmittelwert bestimmt wurde. Sie sind aufsteigend geordnet, angefangen bei der tiefsten Konzentration von links.

Datum	3. Sept	4. Sept	8. Sept	9. Okt	7. Sept	16. Sept
Ozon (ppb)	29,7	36,1	39,6	40,2	43,8	45,9

Tabelle 3: Mittelwert der vom stationären Messgerät auf der Husegg gemessenen Ozonkonzentration

Pochanart et al. (2001) schätzten in ihrer Studie die durchschnittliche jährliche Hintergrundozonkonzentration in Arosa auf 35 ppb. Dieser Wert ist nicht direkt auf die Region Sörenberg im Herbst 2014 übertragbar. Trotzdem muss man sich bewusst sein, dass die Hintergrundkonzentration einen wesentlichen Anteil der gemessenen Ozonkonzentrationen ausmacht. Trotzdem wird davon ausgegangen, dass an den Messtagen die photochemische Ozonproduktion in Bodennähe hinzukommt, da es sich um warme und sonnige Tage handelte.

Um zu erklären, warum es an gewissen Tagen mehr und an anderen weniger Ozon gab, wird die Wettersituation miteinbezogen. Ordóñez et al. (2005) haben sich mit dem Einfluss der meteorologischen Bedingungen auf die täglichen Ozonmaxima befasst. Dabei war die Nachmittagstemperatur der Parameter mit der stärksten positive Korrelation zur Ozonkonzentration. Die zweitwichtigste Variable war die Globalstrahlung, welche als Antrieb für photochemische Reaktionen ebenfalls die Ozonbildung begünstigt.

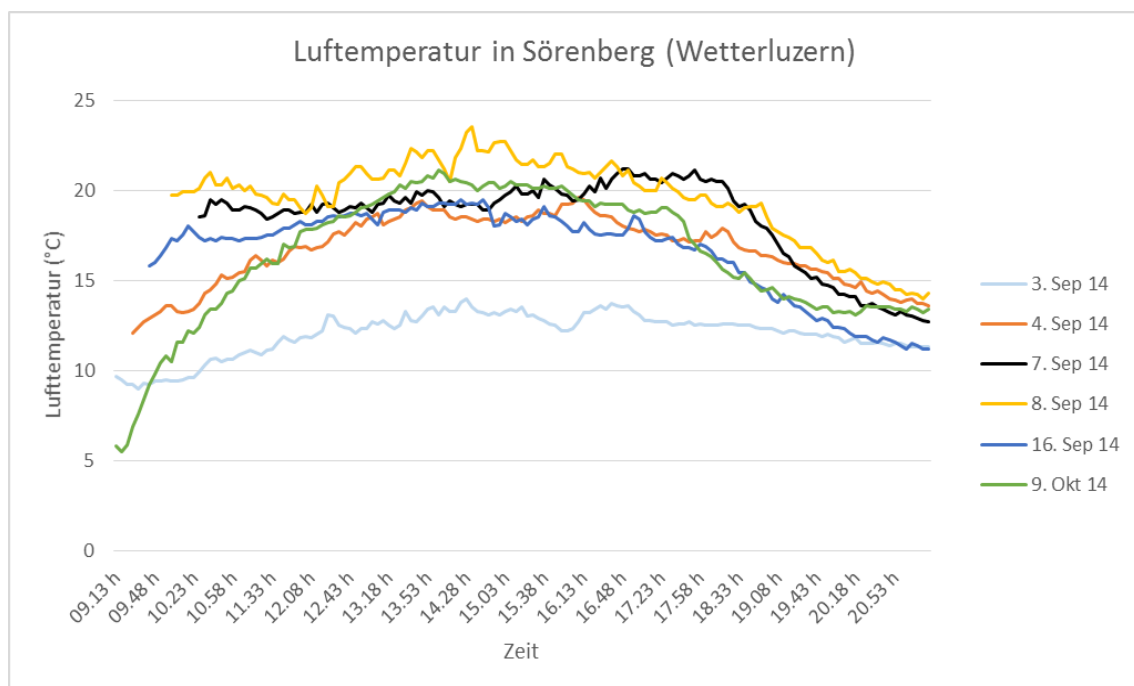


Abbildung 27: Die Lufttemperatur von der Station Sörenberg von wetterluzern

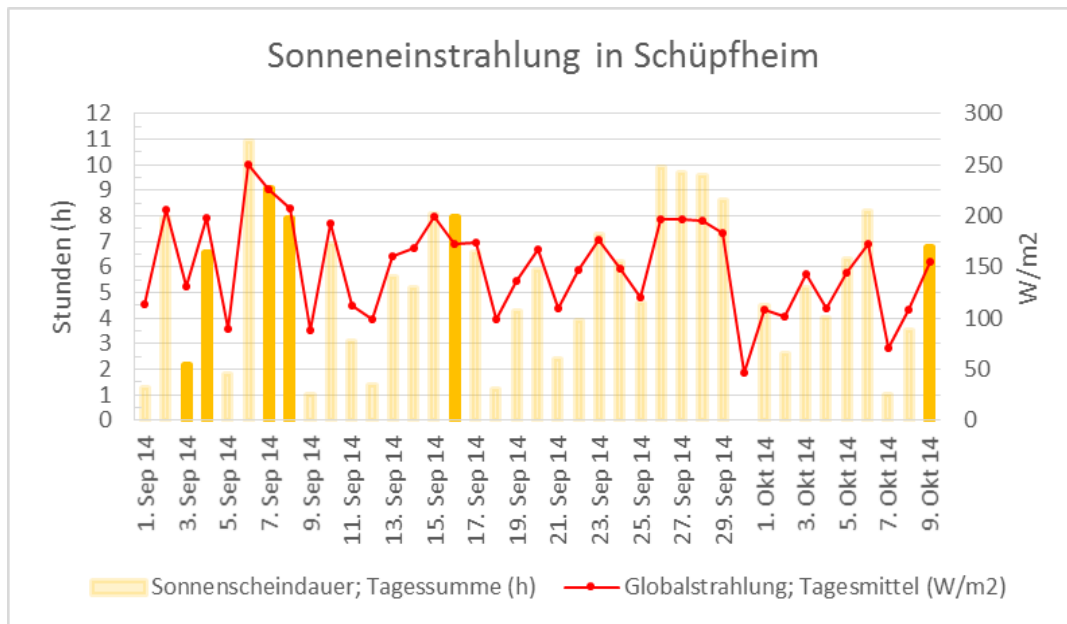


Abbildung 28: Sonnenscheindauer und Globalstrahlung für die Messstation Schüpflheim von Meteoschweiz

Die Abbildung 27 zeigt die Lufttemperatur welche in Sörenberg an den Messtagen aufgezeichnet wurde und auf Abbildung 28 sind Sonnenscheindauer und Globalstrahlung für Schüpflheim aufgezeichnet.

Die tiefen Ozonkonzentrationen vom 3. September lassen sich durch die geringe Sonneneinstrahlung und die damit verbundene tiefe Temperatur erklären. Es war den ganzen Tag bewölkt und die Sonne schien bloss zwei Stunden. An den anderen Tagen war es klar und die Sonne schien zwischen sechs und neun Stunden, was die höheren Temperaturen im Vergleich zum 3. September erklärt. Der 4. September war der Tag mit den zweitniedrigsten Ozonwerten und auch mit der zweitkürzesten Sonnenscheindauer. Allerdings war die Globalstrahlung höher als am 16. September und am 9. Oktober, was daran liegen könnte, dass der Einfallswinkel der Sonne im September mit jedem Tag flacher und die Intensität somit schwächer wird. Dass die Ozonkonzentration nicht nur von diesen Faktoren abhängen kann, zeigt sich am besten am Beispiel vom ozonreichsten Tag, dem 16. September, an dem weder die höchste Temperatur, noch die längste Sonnenscheindauer, oder die grösste Globalstrahlung von den sechs Tagen gemessen wurde.

Ordóñez et al. (2005) folgern aus ihren Analysen, dass der Herbst grössere Variationen in Bezug auf die meteorologischen Bedingungen aufweisen als der Sommer und dass daher mehr Parameter einbezogen werden müssen, um die Ozonkonzentrationen zu erklären. Es wurden auch Faktoren miteinbezogen, welche die Stabilität der Atmosphäre aufzeigen, wie

Niederschlag und Gewitter. Das Model von Ordóñez et al. (2005) besagt, dass im Herbst und Winter die Ozonkonzentrationen höher liegen in Situationen mit grösserer vertikaler Durchmischung, sprich bei hoher Nachmittagstemperatur und Niederschlägen. Das liegt daran, dass dann der Ozoneintrag von höheren Schichten bedeutend ist. In manchen anderen Studien über den Einfluss der meteorologischen Parameter auf die Ozonbildung (Brönnmann et al., 2002; Thompson et al., 2001) wurde der Faktor Niederschlag jedoch ganz ausser Acht gelassen.

In Abbildung 29 sind die Gewitterbeobachtungen von Flühli aufgeführt.

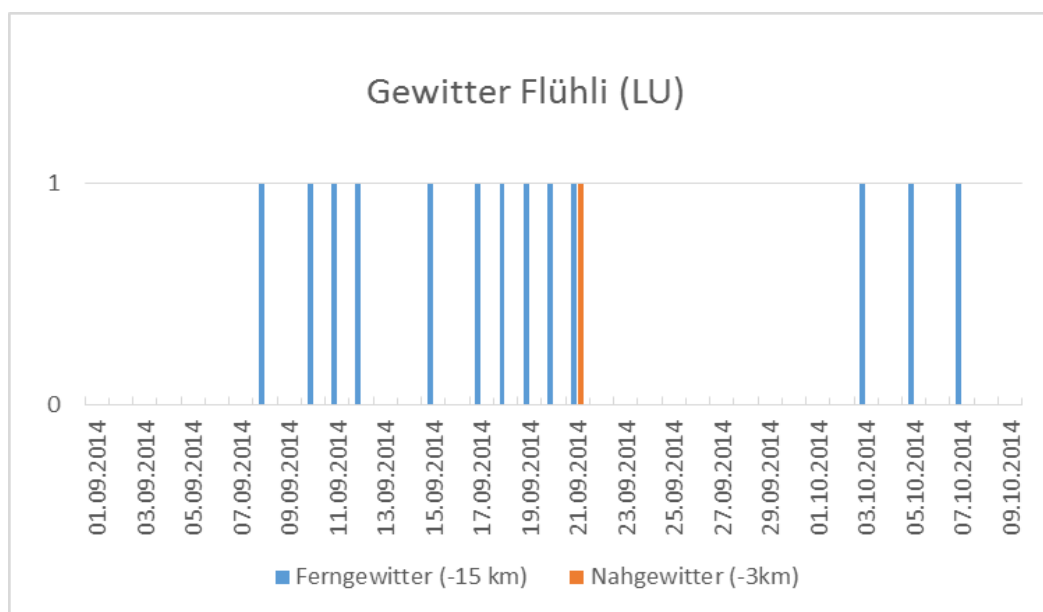


Abbildung 29: Gewitter in der Umgebung von Flühli, Daten von Meteoschweiz

Es wurde während der ganzen Messperiode nur ein einziges Nahgewitter verzeichnet, am 21. September. Dieses hatte keinen Einfluss auf die Messdaten, da erst 18 Tage später wieder gemessen wurde. Ob die Fergewitter wirklich einen Einfluss auf die gemessene Ozonkonzentration haben, ist nicht erwiesen. Die Annahme von Ordóñez et al. (2005) wird dadurch bestätigt, dass die niedrigsten Ozonwerte am 3. und 4. September in einer gewitterfreien Woche gemessen wurden. Es gab also keine grossräumige Umwälzung der Luftschichten und gleichzeitig waren die Temperaturen vor allem am 3. September eher tief (Abbildung 27), was für niedrige photochemische Ozonproduktion in Bodennähe spricht. Dadurch gewinnt der Ozoneintrag aus höheren Schichten an Bedeutung.

Andererseits könnte das Fergewitter, welche am 8. September in Flühli registriert wurde, eine Erklärung sein, warum am Vortag (7. September) höhere Ozonwerte gemessen wurden. Bei gleichbleibenden, guten Wetterverhältnissen müsste es am Folgetag wegen Akkumulation

mit dem Ozon vom Vortag höhere Konzentrationen haben. Falls es sich bei dem Ferngewitter um ein sehr heftiges Gewitter handelte, dann ist es vorstellbar, dass die Durchmischung der Luftschichten grossräumig war (>15km) und somit auch die Region Sörenberg betraf.

Sörenberg befindet sich 8 Kilometer talaufwärts (südlich) von Flühli. Bei Betrachtung der Wetterkarte vom 8. September am Mittag (Abbildung 30) zeigt sich eine Kaltfront, welche sich der Schweiz von Norden her nähert.

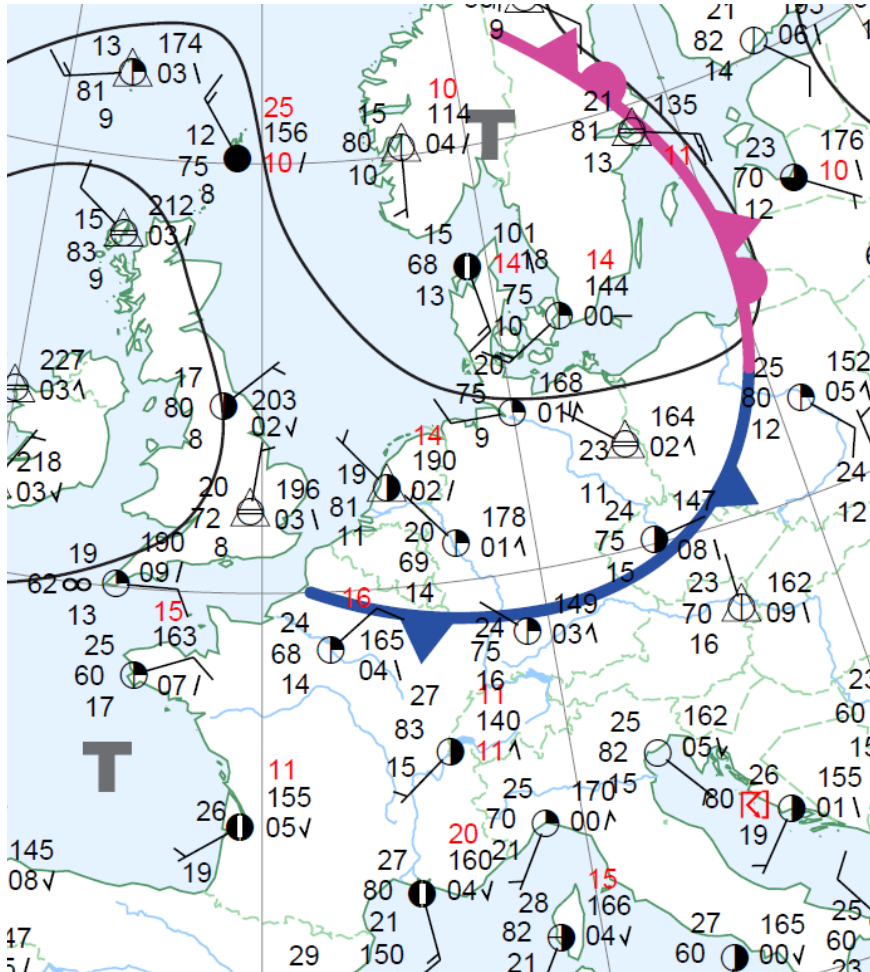


Abbildung 30: Wetterkarte vom 8.9.15 12 UTC (Quelle: Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz)

Diese Kaltfront könnte den Alpenkamm am Abend oder in der Nacht erreicht und dort zu Gewittern geführt haben. Nach dem Gewitter in Flühli zog die Störung vermutlich weiter Tal einwärts, wodurch auch die Luftmassen im Mariental durchmischt wurden. Am 7. und 8. September wurde an der Messstation Flühli kein Niederschlag aufgezeichnet (Abbildung 31). Am 9. September war die Tagessumme 12,4 mm, bei einer Messperiode von 5.40 Uhr bis 5.40 Uhr am Folgetag. Das ist eine weitere Bestätigung der Vermutung, dass die Kaltfront das Messgebiet nachts erreicht hat, da beim Durchzug einer Kaltfront oftmals zuerst Gewitter

auftreten, gefolgt von ausgiebigen Regengüssen (Donald Ahrens, 2013).

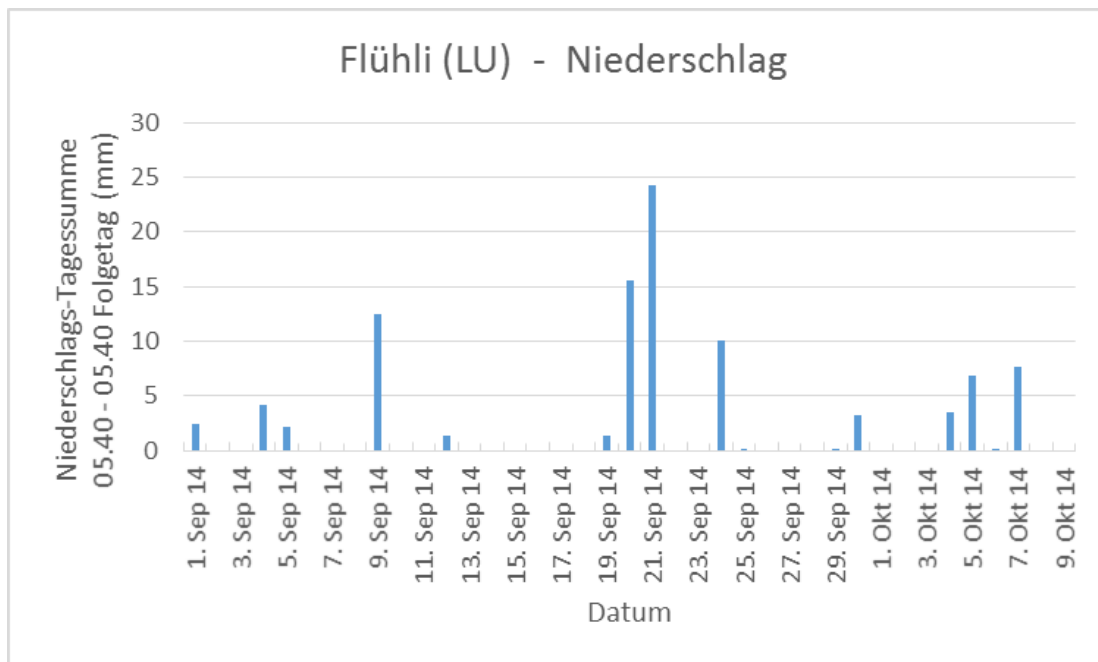


Abbildung 31: täglicher Niederschlag in der Station Flühli von Meteoschweiz

Dies würde Ordóñez et al.'s (2005) Annahme widersprechen. Allerdings fanden die Messungen Anfangs Herbst statt und der 6. bis 8. September waren ausgesprochen sonnig und warme Tage (Abbildung 28). Sie könnten dadurch in die Kategorie Sommertage fallen, für welche laut Ordóñez et al (2005) eine Stagnation der Luftmassen vorteilhaft ist. Dies gilt auch für die Situation am 16. September. Es hatte in Flühli während drei Tagen nicht geregnet hat, vier Tage zuvor gab es ganz wenig Niederschlag und vorher nochmal zwei niederschlagsfreie Tage. Das Ozon konnte sich also über diese Tage ansammeln. Das am 16. September gemessene Ozon hat sich nicht alles an diesem Tag gebildet. An allen anderen Messtagen gab es nur einen bis zwei trockene Tage im Voraus.

Aus diesen Beobachtungen wird geschlossen, dass die Parameter Niederschlag und Gewitter für Erklärung der Ozonkonzentration für die sechs Messtage im Entlebuch von Bedeutung sind. Die atmosphärische Durchmischung kann jedoch je nach Situation positive oder negative Auswirkungen auf das Ozon in Bodennähe haben.

Ein weiterer wichtiger Faktor bezüglich der Ozonverteilung ist der Wind. Da es sich bei den sechs Messtagen eher um Schönwettertage handelte, hat der Wind laut Brönnimann et al. (2002) einen negativen Einfluss auf die Ozonkonzentration. Dies liegt daran, dass sich an Schönwettertagen mit hoher Globalstrahlung und hohen Temperaturen Ozon in Bodennähe

neu bildet, dann aber vom Wind verfrachtet wird.

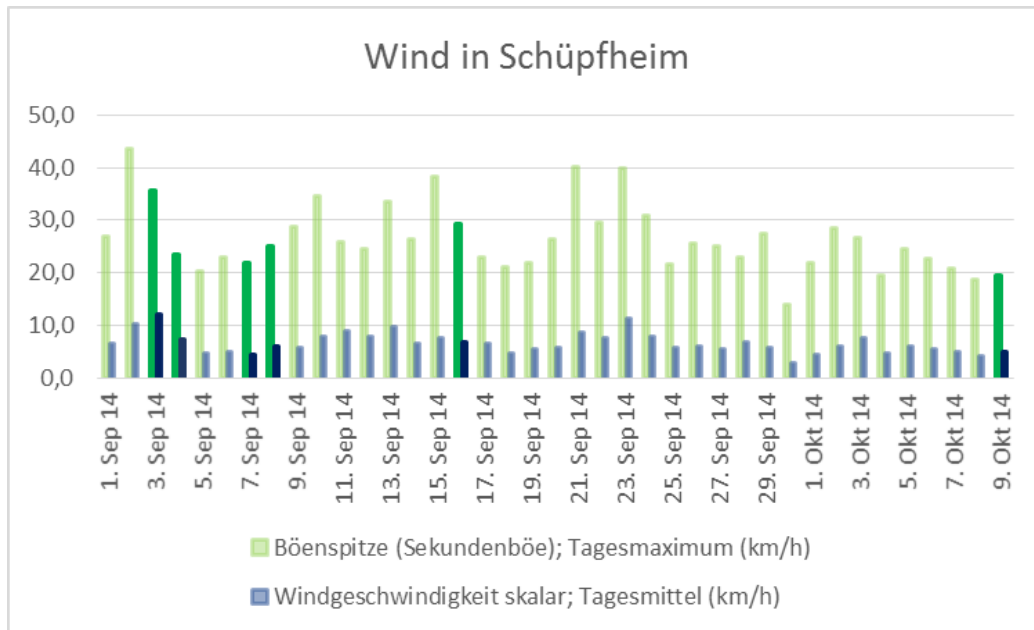


Abbildung 32: Windgeschwindigkeit in Schüpffheim, Daten von Meteoschweiz; die sechs Messstage wurden mit dunkelgrüner, bzw. dunkelblauer Farbe hervorgehoben

Die Abbildung 32 zeigt das Tagesmittel und das Tagesmaximum der Windgeschwindigkeit in Schüpffheim. Diese Angaben sind mit Vorsicht zu behandeln. Es gibt lokale Winde, die sich sehr kleinräumig entwickeln. Die Werte für Schüpffheim gelten nicht automatisch auch für Sörenberg, vor allem da sich Sörenberg in einem Tal befindet. Das Berg-Tal-Wind-System, welches speziell und sehr lokal ist, wird im nächsten Paragraph näher beschrieben. Die Abbildung 32 zeigt, dass am 3. September in Schüpffheim ein sehr windreicher Tag war. Es ist der Tag des Monats mit dem höchsten Windgeschwindigkeitsmittel und auch die maximale Böenspitze war mit 35 km/h verhältnismässig hoch. Das bestätigt die Aussage von Brönnimann et al. (2002), da der 3. September gleichzeitig der Tag mit der niedrigsten Ozonkonzentration ist. Es bleibt zu beachten, dass es sich bei den Werten in Abbildung 32 um Mittelwerte handelt. Ein Tag, an dem es nachts heftig gestürmt hat, aber tagsüber windstill war, kann denselben Mittelwert haben wie ein Tag, an dem es konstant leicht gewindet hat. Es sind keine zeitlich hochaufgelöste Winddaten vorhanden.

Deswegen werden in Abbildung 33 die Daten von wetterluzern zu der Windgeschwindigkeit an dreien der Messtage gezeigt. In dieser Grafik ist der 3. September nun nicht mehr deutlich der windigste Tag. Der 9. Oktober ist laut Abbildung 32 der Messtag mit dem kleinsten Tagesmittel der Windgeschwindigkeit. Die Messwerte von Sörenberg (Abbildung 33) allerdings zeigen nicht grundsätzlich tiefere Windgeschwindigkeiten für den 9. Oktober, aber die grössten Schwankungen. Es herrschte also ein unbeständiger Wind. Diese Angaben mit den Ozonkonzentrationen an den jeweiligen Tagen in Verbindung zu bringen, ist nicht offensichtlich. Es scheint keinen direkten Zusammenhang zu geben.

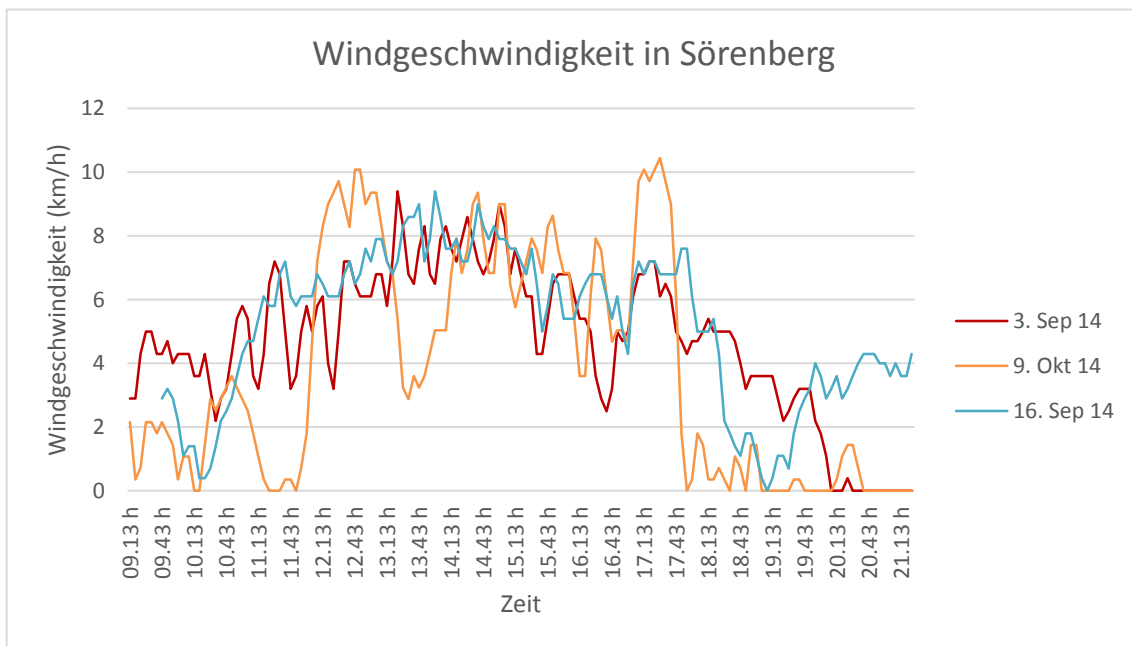


Abbildung 33: Windgeschwindigkeit der Station Sörenberg von wetterluzern

Auffällig ist, dass der Wind an allen Tagen zwischen 10 und 13 Uhr zunimmt und dann zwischen 17 und 20 Uhr wieder abschwächt. Dies deutet darauf hin, dass es sich um einen lokales System handelt, bei welchen im Tagesverlauf Winde generiert werden. In diesem Beispiel handelt es sich um einen Talwind, welcher am Morgen einsetzt, wenn die Luft sich auf den bereits sonnenbeschienenen Berggipfeln und Flanken erwärmt und aufsteigt. Die kalte Luft wird aus dem Tal angesogen um den entstandenen Druckunterschied auszugleichen. Dieser Wind lässt gegen Abend wieder nach, denn nach Sonnenuntergang kühlt sich die Luft in der Höhe schnell ab und beginnt zu sinken. Der Wind frischt dann in der Nacht erneut auf, diesmal in die entgegengesetzte Richtung, weil die kalten Luftmassen von den Höhen hinunter ins Tal wehen (Donald Ahrens, 2013).

Abgesehen vom Wetter gibt es noch weitere beeinflussende Faktoren für die Höhe der Ozonkonzentration. Damit Ozon überhaupt entstehen kann, müssen die Vorläuferstoffe in der Luft vorhanden sein, welche unter anderem von den Abgasemissionen stammen (vgl. Kapitel 2). Brönnimann und Neu (1997) haben den Einfluss des Wochentages auf das bodennahe Ozon untersucht und nachgewiesen, dass die Ozonkonzentrationen an Wochenenden niedriger sind. Dies begründen sie mit dem fehlenden Berufsverkehr und somit weniger Vorläufersubstanzen in der Luft. Der wöchentliche Ozonzyklus lässt sich durch die photochemische Produktion, die Destruktion durch NO und die Akkumulation begründen. Für Schönwetter-Bedingungen und verkehrsreiche Gebiete bedeutet dies einen Anstieg des Ozons von Montag bis Freitag und einen Rückgang von Freitag bis Montag, mit dem Tiefpunkt am Montag (Brönnimann und Neu, 1997). Die Wochentage der sechs Messtage waren wie folgt:

3. - 4. September: Mittwoch, Donnerstag

7. - 8. September: Sonntag, Montag

16. September: Dienstag

9. Oktober: Donnerstag

Der einzige Tag an einem Wochenende war also der 7. September und dies ist der Tag mit der zweithöchsten Ozonkonzentration. Die Messwanderung dieser Arbeit liegt in einem ländlichen, nicht sehr verkehrsbelasteten Gebiet. Man sollte in Betracht ziehen, dass Sörenberg angesichts der Einwohnerzahl ein kleiner (ca. 800 Einwohner), aber dafür touristischer Ort ist, der von sehr vielen Wochenendausflüglern besucht wird. Daher ist anzunehmen, dass der Verkehr am Wochenende höher ist, als unter der Woche. Hinzu kommt, dass einige Ausflugsziele in der Nähe der Messroute mit dem Auto erreichbar sind. In Abbildung 34 sind die Bergrestaurants mit Sternen (v. li. Salwideli, Rossweid, Schwand) und die Zufahrtsstrassen rot eingezeichnet.

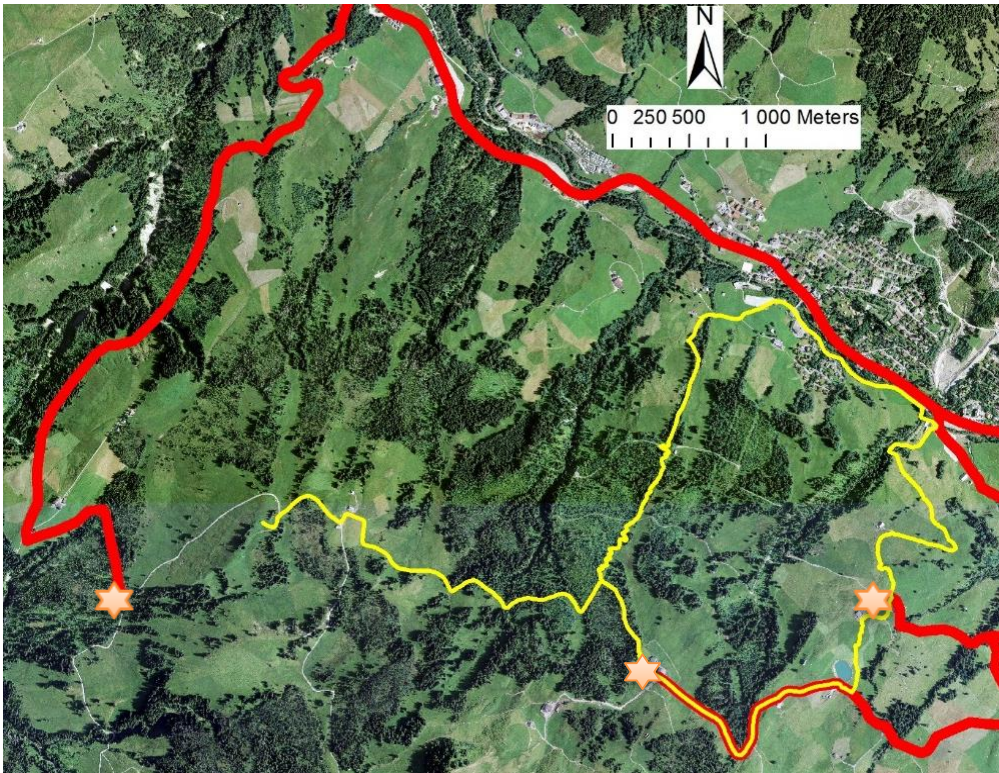


Abbildung 34: Route 1, In Rot sind befahrbare Strassen eingezeichnet, Bergrestaurants mit orangen Sternen

Diese Strassen sind an Schönwetter-Wochenenden mehr befahren als unter der Woche. Somit können die Messresultate die Annahme bestätigen, dass erhöhte Abgasemissionen die Ozonbildung begünstigen. Dies ist zudem eine weitere mögliche Erklärung für die höheren Konzentrationen vom 7. im Vergleich zum 8. September. Aufgrund der vielen vorhandenen Stickoxiden von den Autos der Sonntagsausflügler konnte sich am Sonntag viel Ozon bilden, welches dann aber in der Nacht auf Montag, als keine Sonnenstrahlung mehr vorhanden war, mithilfe des NO wieder abgebaut wurde. Montags waren dann nicht mehr so viele Stickoxide vorhanden und es konnte weniger Ozon gebildet werden, als am Vortag. Die Ozonkonzentration der restlichen vier Tage zeigen allerdings keinen direkten Zusammenhang mit dem Wochentag.

6.3 Räumliche Variabilität der Ozonkonzentration

Um die räumliche Ozonverteilung zu analysieren, spielt die mikroklimatische Situation eine Rolle. Dabei werden Faktoren wie die Hangneigung, Beschattung und Vegetation betrachtet.

An den beiden Messtagen auf der Route zwei wurde eine beinahe identische relative Ozonverteilung beobachtet (Abbildung 23). Die beiden Messungen liegen 23 Tage auseinander und es ist höchst unwahrscheinlich, dass es sich um einen Zufall handelt. Die Abbildung 35 zeigt nochmals die Werte vom 16. September. Die Erklärung für die höheren Ozonwerte im nördlichen Teil der Wanderung liegt bei Betrachtung des Höhenprofils (Abbildung 4) auf der Hand. Es handelt sich um einen Südhang und beim südlich gelegenen Teil der Wanderung um einen Nordhang. Da der Südhang eine grössere Sonneneinstrahlung aufweist, wird die Ozonbildung dadurch begünstigt. Der Nordhang dagegen liegt oft im Schatten, wodurch es dort kühler und feuchter bleibt.



Abbildung 35: Rot = hohe Ozonkonzentration, grün = niedrige Ozonkonzentration, hellblau gezeichnet ist eine Stelle mit erhöhter Ozonkonzentration

Ein Detail bei den Messwerten der zweiten Route ist die hohe Ozonkonzentration die in der Kurve gemessen wurde, welche in Abbildung 35 hellblau gekennzeichnet ist. Auch am 9. Oktober wurden genau an dieser Stelle leicht höhere Werte gemessen (vgl. Abbildung 23). Zur Zeit der Messungen befand sich an diesem Ort eine Baustelle, es wurden in der Kurve gleich mehrere Häuser errichtet. Beide Male, als die Stelle auf der nachmittäglichen Messwanderung passiert wurde, waren grosse Maschinen und Lastwagen im Einsatz. Hier könnten die Abgase als Vorläuferstoffe für die höhere Ozonproduktion verantwortlich sein.

Für die erste Messroute ist die Interpretation schwieriger, da an den vier Messtagen kein eindeutiges Verteilungsmuster vorliegt. Der 3. September sollte nicht für die Analyse genutzt werden, da die Ozonkonzentration sehr tief war. Die Konzentration nahm auf der Wanderung stetig ab und erreichte gegen Schluss das Detektionslimit (vgl. Abbildung 14). Die Ozonverteilung am 4. September ist jedoch sehr interessant (vgl. Abbildung 21), da genau auf dem Abschnitt unten im Tal, wo die Wanderung durch das Dorf Sörenberg führt, höhere Werte gemessen wurden, als auf dem Rest der Route. Auch am 8. September ist diese Tendenz sichtbar, wenn auch viel weniger ausgeprägt. Die Werte des 7. September stimmen aber nicht in das Schema, da auch auf dem Abschnitt zwischen Schwand und Rossweid gleich hohe Konzentrationen gemessen wurden, wie auch unten im Dorf (vgl. Abbildung 21). Dies kann am Sonntagsverkehr zu diesen beiden Restaurants liegen, was am Schluss des Kapitels 6.1 ausführlich beschrieben ist. Diese Trends widersprechen der anfänglichen Hypothese, laut dieser die Ozonkonzentrationen an der Quelle der Stickoxid-Emissionen niedriger sind als in emissionsfernen ländlichen Gebieten. Die Erkenntnisse von Senger und Werner (1999) über die Ozonverteilung in ländlichen und städtischen Regionen konnten bei dieser Forschungsarbeit nicht bestätigt werden. Zur Relativierung muss gesagt werden, dass die Messungen im Wandergebiet Sörenberg auf kleinem Raum stattfanden (grösste Luftlinien-Distanz ca. 5 km) und dass es sich beim Dorf Sörenberg nicht um eine Grossstadt mit hoher Verkehrsbelastung handelt. Die Ausgangslage war nicht dieselbe für die beiden Studien. Zusätzlich wurden die Messungen in den Nachmittagsstunden durchgeführt. Laut Senger und Werner (1990) nähern sich die Ozonwerte der Stadt denen des Landes am Nachmittag an. In der Nacht jedoch fallen die Werte in der Stadt stark ab, während die Werte auf dem Land nur schwach absinken. Ausserdem braucht es eine Verfrachtung des Ozons von emissionsnahen zu emissionsfernen Gebieten, damit der Trend der höheren Ozonkonzentrationen in ruralen Gebieten zu Stande kommt.

In der Hypothese war daher zusätzlich die Annahme, dass der lokale Wind das in Siedlungsnähe gebildete Ozon hangaufwärts verfrachten würde. Die Windstärke wurde bereits diskutiert (Abbildung 33). Der 3. und der 4. September sind von der Windstärke her ähnlich, am 7. ist diese etwas schwächer und am 8. September dann nochmals schwächer. Wichtig ist nun die Windrichtung, welche in Abbildung 36 gezeigt wird. Die Angaben zum 9. Oktober fehlen. Die tagsüber vorherrschenden Winde kommen aus Westen (270°) mit einem Richtungswechsel in den Abendstunden, hin zu Südost (ca. 130 Grad). Diese Angaben bestätigen eindeutig, dass in Sörenberg ein Berg- Talwindssystem vorherrscht (siehe Kapitel 6.1).

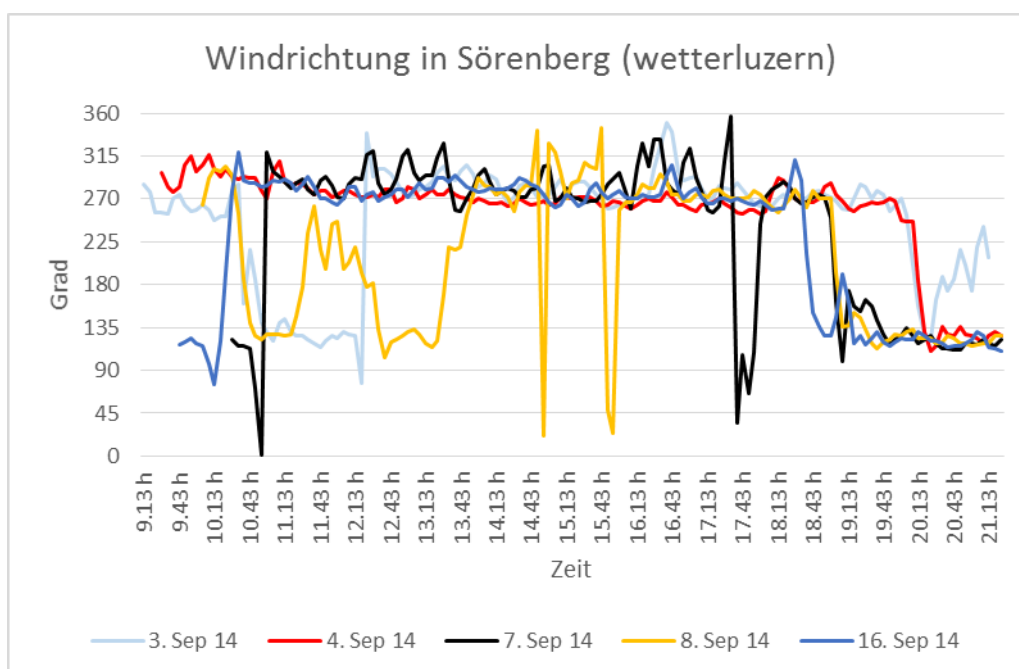


Abbildung 36: Windrichtung an den Messtagen in Sörenberg

Der Wind aus Westen kommt vom Tal her, das heisst ursprünglich von Norden, wurde aber durch die Biegung des Tales umgelenkt. Der Bergwind kommt von Südosten her nach Sörenberg. Diese Windrichtungen wurden zur Verdeutlichung in Abbildung 37 auf der Karte eingezeichnet.

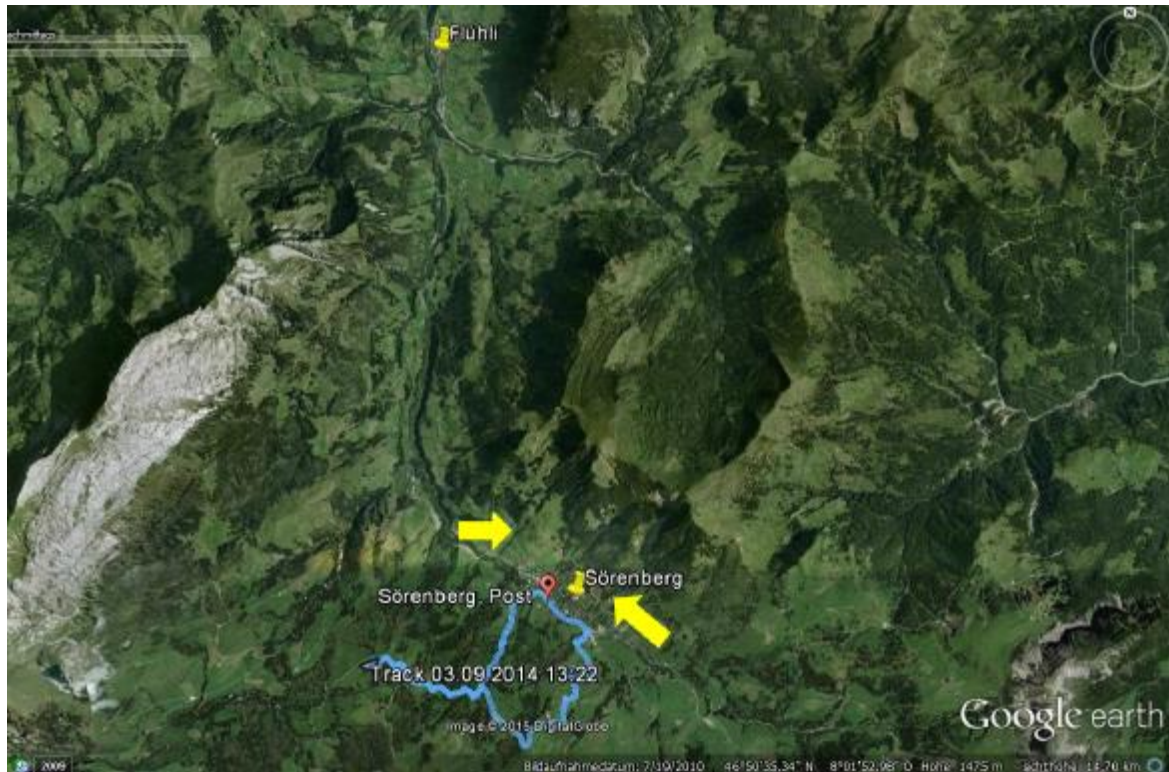


Abbildung 37: vorherrschende Windrichtungen in Sörenberg

In der Grafik der Windrichtungen (Abbildung 36) sieht man, dass am 4. September ein absolut konstanter Wind aus Westen herrschte, was bedeutet, dass das Ozon, falls es unten im Dorf an den Hauptverkehrsadern gebildet wurde, auch dort bleibt, respektive nach Süd-Osten talaufwärts transportiert wird. Am 8. September wehte der Wind anfangs der Wanderung aus Osten und drehte während der Wanderung zweimal abrupt nach Norden (oder sogar NNE). Diese Windrichtungen bewirkt, dass das Ozon den südlichen Hang des Marientals hinauf transportiert würde, genau in das Gebiet der Messwanderung. Somit liesse sich erklären, warum am 8. September die hohen Werte nicht nur ganz unten im Tal zu finden sind (Abbildung 21), sondern auch ein Stück weit den Hang hinauf. Es scheint also tatsächlich einen Zusammenhang zwischen den Verkehrsemissionen und der Ozonbildung zu geben, allerdings genau umgekehrt als angenommen, war durch die Windrichtung erklärt werden kann. Diese bewirkt (ausser ansatzweise am 8. September) nicht, dass das in Siedlungsnähe gebildete Ozon in das Wandergebiet transportiert wird.

Die Ozonverteilung entlang der Messrouten anhand der Vegetationszonen (Abbildung 5) zu analysieren, ist unter den gegebenen Voraussetzungen nicht möglich. Die gemessenen Konzentrationen sind zu schwach und es wurden zu wenige Messungen durchgeführt, um eine aussagekräftige Interpretation zu machen. Um aus den vorliegenden Ergebnissen auf

Wanderempfehlungen für Touristen zu schliessen ist heikel, da diese zu wenig gut fundiert sind. Ausserdem lag die Ozonkonzentration an den Messtagen tiefer als der Grenzwert, bei dem die gesundheitsschädliche Wirkung des Ozons bedeutend wird. Es müssten also weitere Messungen im Hochsommer durchgeführt werden, um die gefundenen Trends zu bestätigen und weitere Erkenntnisse zu finden. Anhand der im September und Oktober gesammelten Daten von den sechs Messtagen kann aber gesagt werden, dass schattige Nordhänge tendenziell zu bevorzugen und sonnige Südhänge zu vermeiden sind. Dorf- und Verkehrsnähe scheinen ebenfalls ungünstig zu sein.

7 Konklusion

Die gewählte Methode mit dem mobilen elektrochemischen Ozonsensor und dem stationären Referenz-Messgerät hat nicht in allen Hinsichten überzeugt. Dies liegt zu einem grossen Teil an den ungünstigen meteorologischen Bedingungen unter denen die Ozonmessungen durchgeführt wurden. Im Verhältnis zu den sehr niedrigen gemessenen Ozonkonzentrationen war der Offset des mobilen Gerätes von grosser Bedeutung. Um bei diesen geringen Ozonwerten verlässliche Messungen durchführen zu können, müsste das Gerät zuerst präzise kalibriert werden. Da der für die sechs Messtage dieser Forschungsarbeit ermittelte Offset nicht konstant ist, konnte die Kalibration mithilfe des stationären Messgerätes nicht durchgeführt werden. Die Ermittlung der Ursache des Offsets und die Korrektur der Messwerte könnte Bestand einer weiteren Studie über diese Art Messverfahren sein. Für diese Arbeit wurden die Daten vom mobilen Messgerät trotz der fehlenden Korrektur genutzt, da sich die Hypothesen und Fragestellungen durch die relativen Unterschiede der gemessenen Ozonkonzentrationen beantworten lassen. Die absoluten Werte wurden dabei nicht in die Analyse einbezogen.

Bei der Analyse der zeitlichen Variationen des Ozongehaltes an den verschiedenen Messtagen konnte bestätigt werden, dass die meteorologischen Parameter Temperatur und Globalstrahlung positiv auf die Produktion von bodennahen Ozons wirken. Zusätzlich haben sich die Faktoren Gewitter und Niederschlag als wichtige Parameter erwiesen. Die Erkenntnisse der Studie von Ordóñez et al. (2005) bezüglich der vertikalen Durchmischung der Atmosphäre und deren unterschiedlichen Wirkung auf den Ozongehalt bei verschiedenen Wetterlagen konnten ebenfalls bestätigt werden. Die Rolle des Windes auf die Ozonproduktion und -verfrachtung konnte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Dass in Sörenberg ein ausgeprägtes Berg-Talwind-System vorherrscht war aus den Winddaten deutlich erkennbar. Dieses scheint jedoch keinen signifikanten Ozontransport zu verursachen.

Des Weiteren konnte ein Zusammenhang zwischen Abgasemissionen und Ozonbildung für das lokale Wandergebiet Sörenberg nachgewiesen werden. Allerdings widerspricht dieser der Hypothese, dass ländliche Regionen stärker ozonbelastet sind, als städtische. Es wurden höhere Ozonkonzentrationen in Siedlungsnähe gemessen. Zusätzlich war ansatzweise erkennbar, dass der Wochenend-Verkehr einen positiven Einfluss auf die Ozonbildung hat. Die Schlussfolgerung ist also, dass im Messgebiet unter den meteorologischen Bedingungen, welche zur Zeit der Messungen herrschten, die Ozonkonzentration nahe der Emissionsquellen höher ist und dass das Ozon nicht in das Wandergebiet südwestlich von Sörenberg verfrachtet wird.

Bei der Analyse der räumlichen Variabilität entlang der zweiten Messroute wurde ein starker Einfluss der Hangexposition auf die Ozonkonzentration verzeichnet. Der strahlungsexponierte Südhang wies an beiden Tagen erheblich höhere Konzentrationen vor. Dies ist eine Bestätigung der allgemein bekannten Tatsache, dass Strahlung ein wichtiger Faktor für die Ozonproduktion ist, da sie die photochemische Aufspaltung von NO_2 antreibt.

8 Danksagung

Diese Forschungsarbeit wurde von der UBE initiiert und finanziell unterstützt, der daher besonderer Dank gilt. Auch meinem Betreuer Professor Christian Hauck danke ich, für die Zwischenkorrektur und die Beantwortung meiner Fragen. Des Weiteren möchte ich mich bei Mario Meier bedanken, der mich vor allem während den Feldmessungen, aber auch bei der Datenauswertung unterstützt und beraten hat. Für die Bereitstellung des mobilen Ozonmessgerätes bedanke ich mich bei Departement Geowissenschaften der Uni Fribourg. Der Dank für das stationäre Messgerät geht an Markus Schenk, vom Amt für Umwelt im Kanton Aargau.

9 Literaturverzeichnis

- Anfossi, D., Sandroni, S., Viarengo, S. (1991): Tropospheric ozone in the nineteenth century: the Moncalieri series. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Jg. 96, Volume D9, S. 17349-17352.
- Brewer, A. W., Milford, J. R. (1960): The oxford-kew ozone sonde. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. *Mathematical and Physical Sciences*, Jg. 256, Volume 1287, S. 470-495.
- Brönnimann, S. (2002): Ozon in der Atmosphäre. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt.
- Brönnimann, S., Buchmann, B., Wanner, H. (2002): Trends in near-surface ozone concentrations in Switzerland: the 1990s. *Atmospheric Environment*, Volume 36, S. 2841–2852.
- Brönnimann, S., Neu, U. (1997): Weekend-weekday differences of near-surface ozone concentrations in Switzerland for different meteorological conditions. *Atmospheric Environment*, Volume 31, S. 1127–1135.
- Brönnimann, S., Schuepbach, E., Zanis, P., Buchmann, B., Wanner, H. (2000): A climatology of regional background ozone at different elevations in Switzerland (1992–1998). *Atmospheric Environment*, Volume 34, S. 5191-5198.
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo (2005): Näherungslösungen für die direkte Transformation CH1903 ↔ WGS84. Eidgenössisches Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (2004): Vollzug Umwelt – EMPFEHLUNGEN - Immissionsmessung von Luftfremdstoffen – Messempfehlungen. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern, 1. Januar 2004.
- Dierkesmann, R., Sandermann, H. (2000): Wirkung von Ozon auf Menschen und Pflanzen. *Meteorologische Fortbildung*, 26. Jg., Volume 3/4, S. 151-161.
- Donald Ahrens, C. (2013): *Meteorology Today – An introduction to weather, climate and the environment*. Canada: Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Dupraz, H. (1992) : Transformation approchée de coordonnées WGS84 en coordonnées nationales suisses, IGEO-TOPO, EPFL.
- Englert, N. (2000): Ozon als Luftschadstoff. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz*, Volume 43, S. 487-493.

- GAW Report No. 201 (2001): Quality Assurance and Quality Control for Ozonesonde Measurements in GAW. Chair Publications Board. Genf, September 2011.
- Guicherit, R., Roemer, M. (2000): Tropospheric ozone trends. *Chemosphere - Global Change Science*, Volume 2, S. 167-183.
- Klemp, D., Mihelčić, D., Mittermaier, B. (2012): Messung und Bewertung von Verkehrsemissionen. Forschungszentrum Jülich
- Komhyr, W.D. (1969): Electrochemical concentration cells for gas analysis. *Ann. Geophys.*, Volume 25, S. 203-210.
- Kuebler, J., van den Bergh, H., Russell, A. G. (2001): Long-term trends of primary and secondary pollutant concentrations in Switzerland and their response to emission controls and economic changes. *Atmospheric Environment*, Volume 35, S. 1351-1363.
- Künzle, T., Neu, U. (1994): Experimentelle Studien zur räumlichen Struktur und Dynamik des Sommersmogs über dem Schweizer Mittelland. *Geographica Bernensia*, Band G17.
- Leuenberger, M., (2007): Ozon im Wald – Schutzwirkung bei hoher Ozonbelastung?. Praktikumsbericht OSTLUFT.
- Marenco, A., Gouget, H., Nédélec, P., Karcher, F. (1994): Evidence of a long-term increase in tropospheric ozone from Pic du Midi data series: Consequences: Positive radiative forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Jg. 99, Volume D8, S. 16617-16632.
- Meier, M., Zünd, T. (2013): Pilotprojekt: Synergistische Nutzung von Luftqualitätsmessungen für Naturschutz und Tourismus in der UNESCO Biosphäre Entlebuch (UBE); interner Projektbericht.
- Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten, Mainz, Rheinland Pfalz. Bearbeitung: Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, Mainz. Vorlage: Björn Schließmann, Bischofsheim (2. Auflage, 2006): Ozon in der Troposphäre. <http://www.luft-rlp.de/ozon/troposphaere/index.php> [aufgerufen am 11.08.2014]
- National Research Council (1991): Rethinking the Ozon Problem in Urban and Regional Air Pollution, Washington, District of Columbia.
- Olszyna, K. J., Luria, M., Meagher, J.F. (1997) : The correlation of temperature and rural ozon levels in southwestern USA. *Atmospheric Environment*, Jg. 31, Volume 18, S. 3011-3022.

- Oltmans, S. J. et al. (2006): Long-term changes in tropospheric ozone. *Atmospheric Environment*, Jg. 40, Volume 17, S. 3156-3173.
- Ordóñez, C., Mathis, H., Furger, M., Henne, S., Hüglin, C., Staehelin, J., Prévôt, A. S. H. (2005): Changes of daily surface ozone maxima in Switzerland in all seasons from 1992 to 2002 and discussion of summer 2003. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Volume 5, S. 1187–1203.
- Pochanart, P., Akimoto, H., Maksyutov, S., Staehlin, J. (2001): Surface ozone at the Swiss Alpine site Arosa: the hemispheric background and the influence of large-scale anthropogenic emissions. *Atmospheric Environment*, Volume 35, S. 5553 – 5566.
- Porter, P. S., Rao, S. T., Zurbenko, I. G., Dunker, A. M., Wolff, G. T. (2001): Ozone air quality over North America: a critical review of trend detection techniques and assessments. *Journal of the Air and Waste Management Association*, Volume 51, S. 283 – 306.
- Richter, K., Ruckdeschel, W. (1996): Bodennahes Ozon: Trends in Bayern. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, Volume 8, S. 65-72.
- Sandroni, S., Anfossi, D., Viarengo, S. (1992): Surface ozone levels at the end of the nineteenth century in South America. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Jg. 97, Volume D2, S. 2535-2539.
- Senger, S. U., Werner, Dietrich J. G. (1999): Verteilung und Abnahme von bodennahem Ozon in städtischen und ländlichen Regionen. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, Volume 11, S. 253-259.
- Thompson, M. L., Reynolds, J., Cox, L. H., Guttorp, P., Sampson, P.D. (2001): A review of statistical methods for the meteorological adjustment of tropospheric ozone. *Atmospheric Environment*, Volume 35, S. 617-630.
- Volz, A., Kley, D. (1988): Evaluation of the Montsouris series of ozone measurements made in the nineteenth century. *Nature publishing group*, Nature 332, S. 240 – 242.
- Weiersmüller, R. (2006): Bodennahes Ozon – wie die Fakten einer umstrittenen Theorie angepaßt wurden. *Fusion*, Volume 2/2006.
- Weigel, H.-J., Bender, J. (2012): Bodennahes Ozon – ein Problem für Kulturpflanzen und Ernährungssicherheit? *Gesunde Pflanzen*, Volume 64, S. 79 – 87.

10 Anhang

10.1 Offset des mobilen Messgeräts in Abhängigkeit von der Temperatur

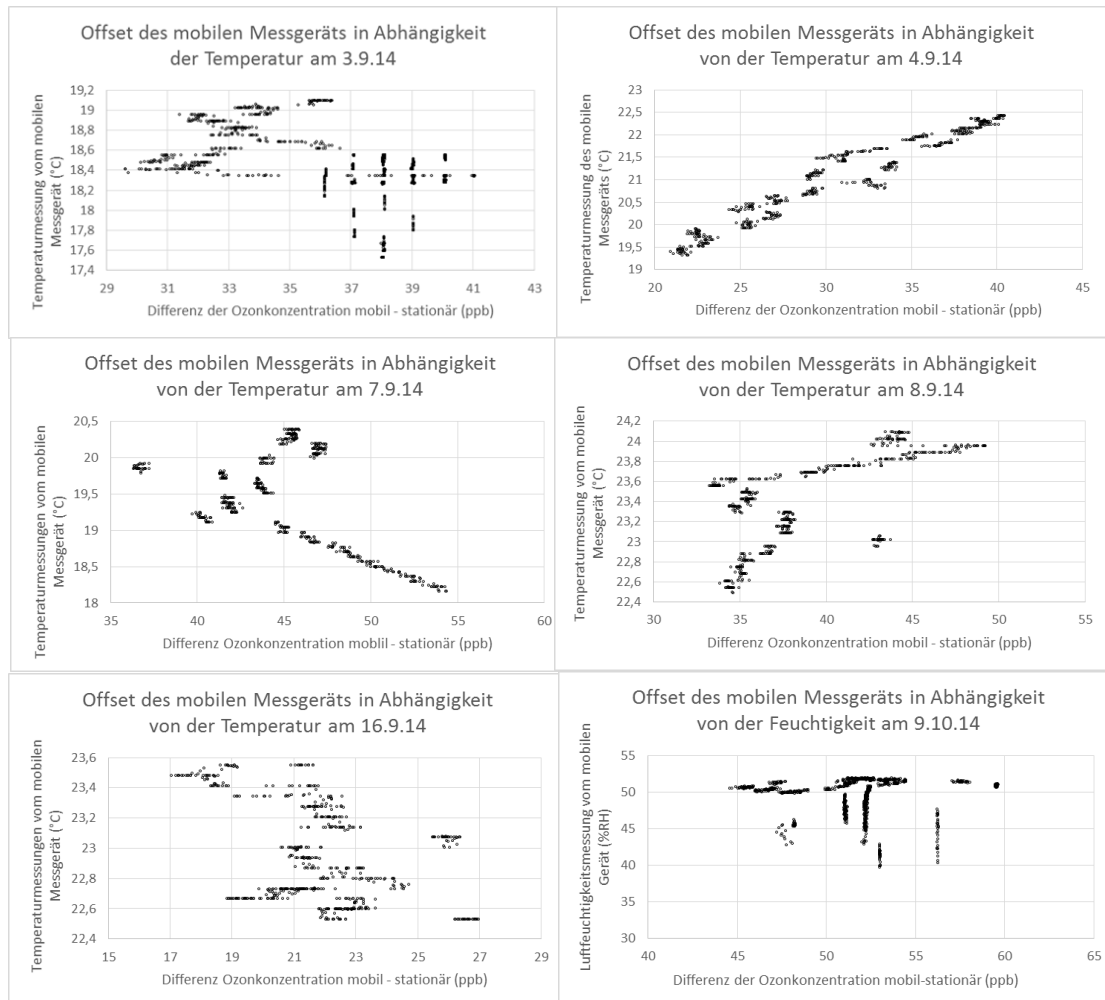


Abbildung 38: Differenz des stationären und des mobilen Messgerätes vor der Wanderung in Abhängigkeit von der Temperatur

10.2 Offset des mobilen Messgeräts in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit

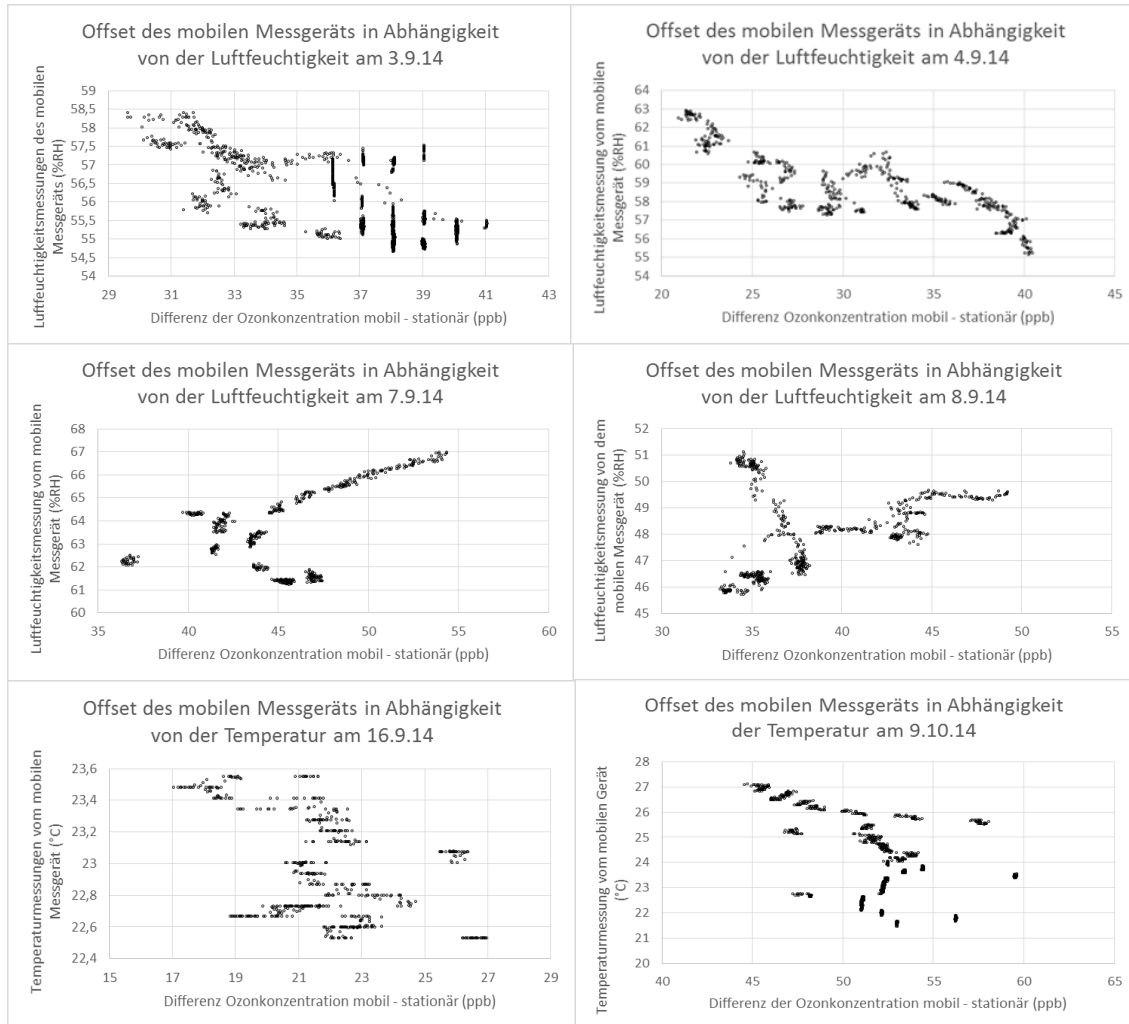


Abbildung 39: Differenz des stationären und des mobilen Messgerätes vor der Wanderung in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit